

한국교량및구조공학회  
2021년도 기술컨퍼런스

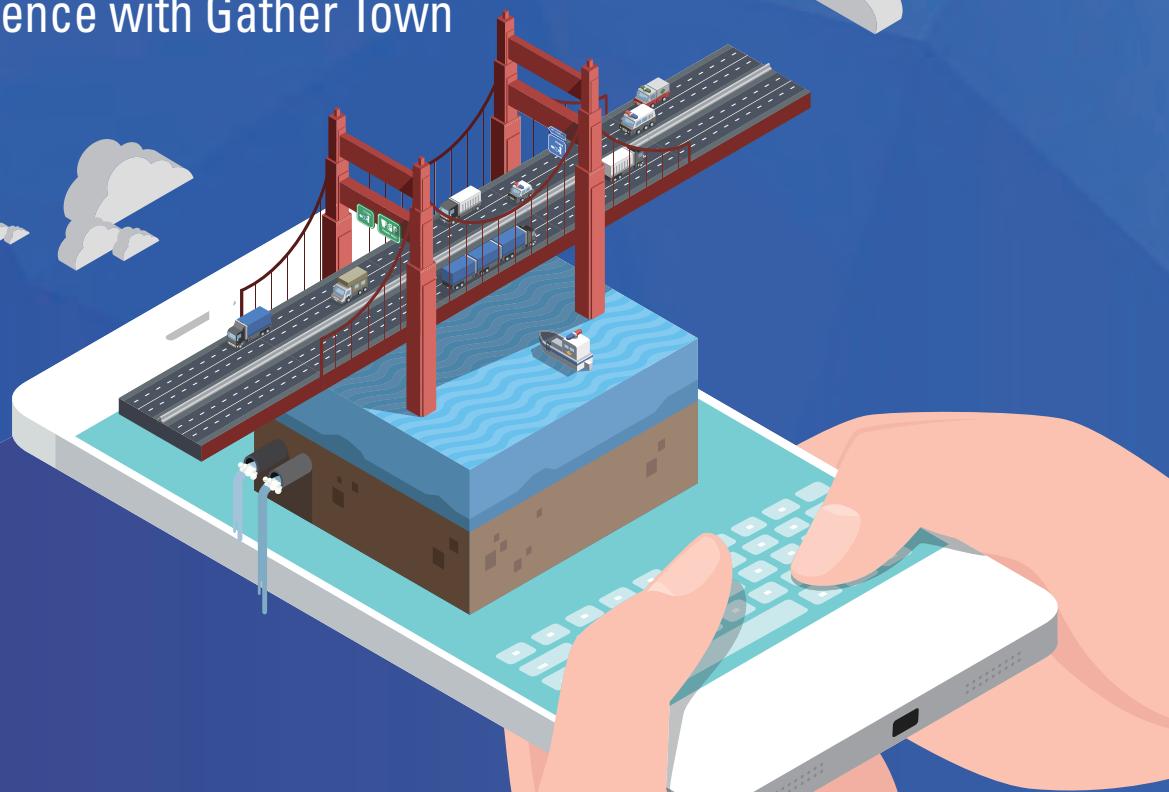
# 인프라의 디지털 트윈 기술 : 설계·시공·유지관리

Digital Twin Technology in Infrastructure :  
Design · Construction · Maintenance

2021. 11. 26. (금)

09:00 ~ 16:50

Digital Conference with Gather Town



**KIBSE**

사단법인 한국교량및구조공학회  
Korean Institute of Bridge and Structural Engineers

서울시설공단



서울대학교  
건설환경융합연구소

한국교량및구조공학회  
2021년도 기술컨퍼런스

# 인프라의 디지털 트윈 기술 : 설계·시공·유지관리

Digital Twin Technology in Infrastructure :  
Design · Construction · Maintenance

2021. 11. 26. (금)

09:00 ~ 16:50

Digital Conference with Gather Town

**KIBSE**

상단  
법인 한국교량및구조공학회  
Korean Institute of Bridge and Structural Engineers

서울시설공단

서울대학교  
건설환경종합연구소



# — 프로그램

|             |   |   |   |
|-------------|---|---|---|
| 08:40-09:10 | 입장  |   |   |
| 09:10-09:30 | 개회식<br>개회사<br>경과 보고 및 행사 진행 소개  | 사회: 박원석   학술위원장<br>서석구   한국교량및구조공학회장<br>임윤묵   조직위원장   |   |
| 09:30-11:20 | Keynote Session<br><br>한국형전투기 KF-21 개발을 위한 디지털 엔지니어링<br>Digital Engineering for Korean Fighter KF-21 Development<br>조선산업에서 보는 대형 구조물의 디지털 전환 기술들<br>Some Digitalization Technologies for Large Structures<br>Learned from Shipbuilding Industries<br>교량의 생애주기 관리를 위한 디지털 트윈 모델 개발<br>Development of Digital Twin Models for Life-Cycle<br>Management of Bridges | 좌장: 임윤묵   조직위원장<br>김지홍<br>한국항공우주산업(주) 상무<br>신종계<br>서울대학교 명예교수<br>한국조선해양 기술자문<br>심창수<br>중앙대학교 교수 |   |
| 11:20-12:00 | 도로인프라 얼라이언스 출범<br><br>• 축사<br>성희제   서울시의회 도시안전건설위원장<br>박영수   국토안전관리원 원장<br>최해천   서울대학교 부총장<br><br>• 노후 인프라 대응을 위해 힘을 합쳐야<br>조성일   서울시설공단 이사장  | 포스터 세션 I<br>- 장소 : Poster Session Room  |   |
| 12:00-13:00 | 중식  |   |   |
| 13:00-14:30 | Parallel Session<br><br>기술 세션 I<br>- 주제 : 철도 인프라의 유지관리 기술<br>- 좌장 : 윤형철   충북대학교<br>- 장소 : Keynote Hall  | 특별 세션<br>- 주제 : 도로인프라 관리 오픈 스퀘어<br>- 좌장 : 차범진   서울시설공단<br>- 장소 : Seminar Room 1                 | 영 엔지니어 세션 I<br>(논문 및 발표 : 영어)<br>- 좌장 : 박연철   한남대학교<br>- 장소 : Seminar Room 2  |
| 14:30-15:00 | 휴식  | 포스터 세션 II<br>- 장소 : Poster Session Room   |   |
| 15:00-16:30 | Parallel Session<br><br>기술 세션 II<br>- 주제 : 디지털 기반 인프라 건설 및 운영<br>- 좌장 : 조수진   서울시립대학교<br>- 장소 : Keynote Hall  | 기술 세션 III<br>- 주제 : 횡단 형식의 다변화와 교량 미래기술<br>- 좌장 : 김호경   서울대학교<br>- 장소 : Seminar Room 1          | 영 엔지니어 세션 II<br>(논문 및 발표 : 영어)<br>- 좌장 : 채운병   서울대학교<br>- 장소 : Seminar Room 2 |
| 16:30-16:50 | 시상 및 폐회<br>KIBSE 우수구조물상   | 시상: 서석구   한국교량및구조공학회장, 사회: 박원석   학술위원장<br>KIBSE 학회상   | 우수논문상<br>영 엔지니어<br>최우수 논문상  |

# — 목차

## Keynote Session

|     |   |    |
|-----|---|----|
| KS1 | 한국형전투기 KF-21 개발을 위한 디지털 엔지니어링<br>김지홍   한국항공우주산업(주) 상무         | 02 |
| KS2 | 조선산업에서 보는 대형 구조물의 디지털 전환 기술들<br>신종계   서울대학교 명예교수, 한국조선해양 기술자문 | 04 |
| KS3 | 교량의 생애주기 관리를 위한 디지털 트윈 모델 개발<br>심창수   중앙대학교 교수                | 06 |
| KS4 | 노후 인프라 대응을 위해 힘을 합쳐야<br>조성일   서울시설공단 이사장                      | 08 |

## 기술 세션

|    |   |    |
|----|---|----|
| 01 | 이동 차량을 고려한 단순지지 교량의 동적상호작용 분석<br>김은주   한양대학교                | 11 |
| 02 | 딥러닝 기반 철도교량 3D 점군데이터의 객체 분류 및 분할 연구<br>박정준   한국철도기술연구원      | 13 |
| 03 | 철도 콘크리트 인프라 자가진단 시스템 개발<br>이승정   인천대학교                      | 15 |
| 04 | 동특성 식별 프로그램을 활용한 부유식 교량의 응답 진폭 연산자 분석에 관한 연구<br>장민우   명지대학교 | 17 |
| 05 | 센서퓨전을 이용한 고속철도 교량의 공진현상 평가 연구<br>정승후   한국철도기술연구원            | 19 |
| 06 | 계측기반 시공 시뮬레이션을 이용한 프리팹 교량 시공지원<br>심성한   성균관대학교              | 21 |
| 07 | 3차원 데이터 기반 프리팹 교량 구조물 품질관리 공법 개발<br>이순환   브리콘(주)            | 23 |
| 08 | 건설메타버스의 설계엔지니어<br>정태원   한맥기술(주)                             | 25 |

# — 목차

|    |   |    |
|----|---|----|
| 09 | 반지도학습 딥러닝 모델을 이용한 신호기반 이상상태 모니터링<br>김병현   서울시립대학교 | 27 |
| 10 | FBG 센서를 활용한 교량 성능 평가<br>조근희   한국건설기술연구원           | 29 |
| 11 | 5K Bridge 기술 로드맵<br>김호경   서울대학교                   | 31 |
| 12 | 5km급 초장대교량에 대한 시설계<br>김창수   DM엔지니어링               | 33 |
| 13 | 주경간장 2km 철도도로병용교컨셉설계<br>김홍식   평화엔지니어링             | 35 |
| 14 | SFT 기술의 최근연구동향 및 전망 분석<br>김기영   한국과학기술원           | 37 |
| 15 | 케이블교량 화재리스크 평가 절차 및 적용 예<br>손윤기   (주)엔비코컨설팅       | 39 |
| 16 | 국내 최장 해상 보행현수교의 설계 및 시공<br>구기정   (주)케이블브릿지        | 41 |
| 17 | 도로인프라 관리 오픈스퀘어 추진을 통한 노후 인프라 대응<br>박병호   서울시설공단   | 43 |

## Young Engineer's Session

|      |  |    |
|------|--|----|
| YES1 | Development of Sag-based Cable Tension Estimation Method<br>조현철   한국수자원공사  | 46 |
| YES2 | Stochastic dynamic analysis of multi-span bridge under track irregularity and spatially varying ground motions<br>MA CHUNYAN   한양대학교 | 48 |
| YES3 | Planning and Construction of Pedestrian Suspension Bridge<br>안정균   (주)케이블브릿지   | 50 |
| YES4 | Prediction of Maximum Deflection of RC Beam under the Low-Velocity Impact Loading<br>안혁준   서울대학교                                     | 52 |

# — 목차

|       |  |    |
|-------|--|----|
| YES5  | Experimental study of fatigue performance of reinforced concrete beam<br>안준용   서울대학교   | 54 |
| YES6  | The analysis of service life in RC girder by deterministic and probabilistic analysis method<br>considering cold joint and loading conditions<br>윤용식   한남대학교 | 56 |
| YES7  | Long-Term Damping Characteristics of a Cable-Supported Bridge<br>황도연   서울대학교   | 58 |
| YES8  | Millimeter-wave Radar and Accelerometer Based Structural Displacement Estimation<br>Zhanxiong Ma   한국과학기술원   | 60 |
| YES9  | Safety Evaluation of Buried Pipelines under Strike-Slip Fault caused by Earthquake<br>최양록   고려대학교  | 62 |
| YES10 | Mechanical Behavior of PVA-ECC with CNTs<br>이동민   경북대학교  | 64 |

## 포스터 세션

|      |  |    |
|------|--|----|
| PS01 | 국내 엔지니어링의 해외 케이블교량 진출 방안<br>김홍식   평화엔지니어링        | 67 |
| PS02 | 해상 강박스 거더교의 계획 및 시공<br>안용수   (주)효명이씨에스           | 69 |
| PS03 | 구조용 유리바닥재의 실용성<br>김남희   서울대학교                    | 71 |
| PS04 | 장대교량의 에너지 자립을 위한 교량상 소형풍력발전단지 설계<br>최도현   서울대학교  | 73 |
| PS05 | 웨브가 바닥판에 부분매립된 플레이트거더의 실대형 성능시험<br>이지운   POSCO   | 75 |
| PS06 | 준능동 제어가 적용된 지진격리건물에 대한 실시간하이브리드실험<br>채윤병   서울대학교 | 77 |

# — 목차

|      |  |     |
|------|--|-----|
| PS07 | 부식 결함이 존재하는 관의 길이 방향 부식 간격에 따른 파열 압력 차이 분석에 관한 연구<br>남영준   연세대학교                   | 79  |
| PS08 | 교량 내진보강 강재 전단키의 밤침 콘크리트 손상 사례 연구<br>강상규   한국도로공사                                   | 81  |
| PS09 | 철근콘크리트 보의 휨 파괴 실험 시 음향방출 신호 분석<br>박승민   목포대학교                                      | 83  |
| PS10 | 소형 풍동을 활용한 산악 계곡 지형의 풍환경 특성 변화 분석<br>정우진   서울대학교                                   | 85  |
| PS11 | PSC 교량 공동조사를 위한 덱트깊이별 Impact-Echo 분석 연구<br>이성호   서울과학기술대학교                         | 87  |
| PS12 | 풍하중을 받는 구조물의 가속도와 하중 데이터를 이용한 비선형 감쇠력 추정 인공신경망개발–작은<br>감쇠력 추정을 중심으로<br>전재환   서울대학교 | 89  |
| PS13 | 케이블의 계측 데이터 기반 확률론적 거동 예측<br>김민선   울산과학기술원   | 91  |
| PS14 | 신뢰성–여용성 해석을 통한 서해대교의 유조차 화재 리스크 평가<br>임성현   서울대학교                                  | 93  |
| PS15 | 균열 효과를 고려한 Bouc-Wen 모델 기반 이력 거동 모델링 프레임워크<br>오세빈   서울대학교                           | 95  |
| PS16 | 강체 스프링 네트워크를 활용한 텍스타일 보강 콘크리트 재료의 직접인장 거동 모델링<br>박지운   연세대학교                       | 97  |
| PS17 | 교량상 특정 변단면의 영향을 받는 차량풍하중 평가<br>전형윤   서울대학교   | 99  |
| PS18 | 현수교의 차량 화재 리스크 분석<br>손윤기   (주)엔비코컨설팅   | 101 |
| PS19 | 차량화재에 대한 현수교의 방화벽 시스템 제안<br>최근기   단국대학교  | 103 |
| PS20 | 사장교의 차량 화재 리스크 분석<br>김창수   DM엔지니어링   | 105 |
| PS21 | 신뢰도기반 코드 캘리브레이션을 통한 교량 평가 활하중계수 분석<br>김경현   가천대학교                                  | 107 |

# — 목차

|      |   |     |
|------|---|-----|
| PS22 | 연속 경간을 갖는 콘크리트 사장교의 온도에 따른 장기거동 평가<br>서정욱   한국도로공사        | 108 |
| PS23 | 정적 풍하중 증가에 따른 장경간 보행 현수교의 비선형 거동 평가<br>김정곤   서울대학교        | 110 |
| PS24 | 공용 중 강교량의 현장계측 정보 및 교통통계 자료를 활용한 피로 신뢰도 평가<br>이상현   서울대학교 | 112 |

# Keynote Session

---

# 한국형 전투기 KF-21 개발을 위한 디지털 엔지니어링

## Digital Engineering for Korean Fighter KF-21 Development

김지홍\* · 주영신\*\*

Kim, Ji Hong · Joo, Young Shin

한국 공군의 장기운용 전투기(F-4, F-5) 대체전력으로 개발 중인 KF-21은 4.5세대 전투기로, 체계개발 기간만 10.5년이 소요되는 대형 국책 개발사업이다. 본 논문에서는 국내외의 다양한 협력사가 참여하는 국제공동개발 사업인 KF-21에 적용된 Digital Engineering 기술들을 항공제조업의 특성을 바탕으로 사례 중심으로 소개하고자 한다.

---

**핵심용어** : PLM, DMU, MBD, FDMU, TLM, Dashboard, DMS

### 1. 서론

한국형 전투기 체계개발 사업은 공군의 장기 운용 전투기 F-4, F-5를 대체할 4.5 세대 KF-21을 개발하는 사업으로, 10.5년의 개발 기간에 주계약업체의 개발인력 1,500여명을 비롯한 정부 기관, 해외기술지원업체, 550여개의 LRU를 공급하는 국내/외 협력업체와 다수의 대학교/연구소가 참여하는 대형 국책사업이다. KF-21은 12,000여개의 개발 요구도에 따라 13,800 종의 도면과 13,000 종의 기술문서로 설계되어, 250,000 개의 하드웨어 부품과 백만 Line 이상의 내장 소프트웨어로 작동하는 매우 복잡한 시스템이다.

이렇게 복잡한 전투기 개발 사업에서 일정, 비용, 성능 목표를 달성하기 위해서는 이전 사업을 통해 고도로 축적된 기술과 인프라를 기반으로 사업 전기간 일관되고 연속성을 가지며 개발 단계별 특징에 맞는 개발 솔루션과 환경 구축이 필수적이다. KF-21은 디지털 엔지니어링 기술을 기반으로 2016년 개발착수 이후 기본설계, 상세설계, 시제작을 완수하고 현재 지상시험이 순조롭게 진행되고 있으며 다음 단계인 비행시험(TLM, Test Lifecycle Management), 양산 및 운영, 성능개량을 위한 시스템 실행 구축 또한 계획대로 진행중이다.

### 2. KF-21 Digital Engineering 환경

전투기 개발과정도 일반 제품 개발 프로세스와 유사하게 개발요구도 정의부터, 기본설계, 상세설계, 시제작, 시험평가를 거쳐 개발을 완료하고 양산 및 운영단계로 진행되는 시스템 엔지니어링 절차를 따른다. 10년 이상의 장기간 개발 동안 기술진보를 고려한 개발 일관성을 유지하기 위해서는 사업 전순기의 제품 개발 프로세스를 관리할 PLM(Product Life Cycle Management) 솔루션 선정 및 구축이 중요하며, KF-21은 솔루션간 비교 검토를 통해 다쏘시스템의 3DEXperience 플랫폼을 선정하였으며, 개발 단계별 필요한 디지털 솔루션과 개발 환경 구축 로드맵에 따라 단계별 시스템 실행 구축 프로젝트를 통해 시스템 및 개발 데이터의 연속성과 확장성을 유지하고 있다.

요구도 관리 부분에서는 TRM (Traceable Requirement Management)를 이용해 사용자의 요구사항을 개발 단계별로 체계요구도, 기능 기준(Functional Baseline), 할당 기준(Allocated Baseline), 초기 제품 기준(Initial Product Baseline)으로 식별하였고, 이후의 설계, 해석, 제작 및 요구도 검증까지 연결(Connected)되고 추적관리가 가능하게 12,000개의 하위 요구도로 구성된 Database를 구축하였다.

설계 솔루션으로는 3DEXperience 플랫폼에 내장된 CATIA V6를 기반으로 1,500 명 이상의 설계자가 동일한 협업환경에서 설정된 설계 기준에 따라 3차원 모델 및 도면(MBD)을 생성하여 D-BOM을 만들고, 플랫폼 내의 PLM 환경의 E-BOM과 자동 연계 기능을 가지게 구성하였으며, D-BOM과 E-BOM으로부터 M-BOM을

---

\* , \*\* 한국항공우주산업(주) ([kimjh@koreaaero.com](mailto:kimjh@koreaaero.com), [ys.joo@koreaaero.com](mailto:ys.joo@koreaaero.com))

생성하기 위한 환경(MFG Item)을 자동으로 구성(DM:Digital Manufacturing)할 수 있게 하였다.

3차원 CAD 데이터를 DMU(Digital Mock Up)로 구현하여 설계 적절성을 직관적으로 검토(VR 환경 연동)하고 도면 배포시 실시간 간접검증 도구로 활용하여 도면 품질을 향상시켰으며 경량화된 DMU로 고장탐구, 전자교류 생성, 각종 기술문서 생성과 기술 협의에 비설계자도 쉽게 활용할 수 있게 하였다.

KF-21은 방산사업 최초로 전체도면을 3D도면(MBD :Model Based Definition)을 적용하였다. 3D 형상에 직접 3D Annotation(치수, Text, GD&T 등)을 기입한 MBD로 추가 2D 도면 작성 및 독해시간을 절감하고 도면 작성 오류를 최소화해 3D 기반 공정할당 및 조립성 사전 검증 등 생산성을 증대시킬 수 있었다.

간접, 조립성 등을 검토하는 형상 기반의 DMU 활용을 넘어, 각 부품의 기능(Function)까지 고려하여 제품의 성능을 미리 파악/검증하기 위한 모델 기반의 F-DMU 개념을 제품 개발에 적용하였다. 이를 위해 각각의 부품이 가지고 있는 기능을 모사하고, 다양한 분야(기구, 전기, 추진, ECS 등) 모델들을 유기적으로 연결하여 시험 평가 등에 활용할 계획이며, 향후 Digital Twin으로 발전될 수 있게 진행중이다.

Single DB 환경하의 각종 개발 데이터는 Portal, Dashboard와 연결되어 개발 일정, 도면 배포 현황 및 각종 개발 지표들을 모든 개발자들과 실시간으로 공유하고 의사 결정에 효과적으로 활용하고 있으며, 후속의 시상 시험, 비행시험용 Dashboard를 확대 구현중이다.

개발 플랫폼 내의 각종 기술 자료뿐만 아니라 국내외 협력업체를 포함한 KF-21 사업의 모든 기술 문서와 자료들은 통합 기술자료 관리시스템(K-DMS)에 연계되어 관리되며, 체계적인 생성, 등록, 배포 및 신속한 조회가 가능하다.



그림 1 KF-21 디지털 엔지니어링 적용 사례

### 3. 결론

KF-21은 과거의 항공기 개발사업과 달리 디지털 엔지니어링이 본격적으로 적용된 최초의 개발 사업으로 현재까지 개발 성공에 기여하고 있다. 해외 방산 사업 및 전 산업군의 Digital Transformation 추세를 고려할 때, KF-21의 디지털 엔지니어링 환경은 지속적인 혁신을 통해 체계개발 성공과 경쟁력 향상에 기여 할 예정이다.

### 참고문헌

- 한국방위산업학회 방위산업 디지털 혁신 세미나, 이일우, “한국형 전투기의 성공적인 개발을 위한 KAI의 디지털혁신 전략,” 2021.5.21

# 조선산업에서 보는 대형구조물의 디지털 전환 기술들

## Some Digitalization Technologies for Large Structures Learned from Shipbuilding Industries

신종계\*

Shin, Jong Gye

조선산업의 제품인 선박과 해양플랜트는 그 설계, 생산, 운영 과정에서 토목이나 건축 구조물과 유사성을 갖추고 있어, 오랫동안 학문적, 기술적 교류가 이어져 왔다. 조선산업은 탄소중립에 기반한 친환경 기술 개발과 디지털 변환으로의 노력이 진행중인데. 본 발표에서는 우리나라 조선산업에서의 디지털변환 사례를 조망하고, 이를 통해 다른 대형구조물과의 유사성, 차별성을 이해하고자 한다. 디지털 변환은 PLM(Product Lifecycle Management), 빅데이터와 인공지능, 디지털 트윈, 시뮬레이션 등을 포함한다.

**핵심용어** : 대형구조물 디지털변환 기술, 빅데이터, 시뮬레이션, 디지털 트윈

### 1. 서론

우리 나라 조선산업에서 일어나는 디지털 변환 기술을 살펴보고, 다른 대형 구조물에 적용성을 비교하고 사례로 삼고자 한다.

### 2. 조선, 토목, 건축 기술의 유사성

제품의 설계는 항상 다른 일품설계이며, 사용되는 엔지니어링 기술은 공통적인 분야와 특수분야로 구성된다. 선박이나 해양플랜트, 토목,, 건축 구조물은 옥외 장소에서 조립공정을 거쳐서 대형 구조물을 만드는 것이고 차이점은 조선해양 제품은 만든 후에 사용하는 곳으로 바다를 통해 이동을 하는 공정이 추가된다.

### 3. 조선산업의 디지털변환 기술 사례들

디지털 변환은 PLM(Product Lifecycle Management), 빅데이터와 인공지능, 디지털 트윈, 시뮬레이션 등을 포함한다. 조선산업에서 진행하고 있는 자율운항 선박, 스마트 조선소 등에 관한 사례를 소개한다.

### 4. 결론

조선산업의 디지털 변환은 생존을 위한 방향이다. 치열한 세계 조선 경쟁에서 우위를 유지하기 위해서 디지털 변환은 핵심 요소이다. 대형구조물의 설계, 생산에도 유사한 기술이 필요할 것이다.

### 감사의 글

토목, 건축과 유사한 조선해양산업의 기술 발전에 늘 관심을 가져주시고 본 학회에 초청하여 주신 학회장님과 성균관대학교 이광명 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

\* 서울대 조선해양공학과 명예교수, 한국조선해양 기술자문, 공학박사 (E-mail:jgshin@snu.ac.kr) – 발표자

### 참고문헌

1. 김정호, 2013, 건설의 길을 묻다, 보문당 (신종계, 죄길선, 미래에 대한 확신이 한국 조선산업을 키웠다").
2. Yong Suk Suh, Jong Gye Shin, Jong Hun Woo, 2020, Toward Smart Shipbuilding in Korea, Marine Technology, Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp30~35

# 교량의 생애주기 관리를 위한 디지털 트윈 모델 개발

## Development of Digital Twin Models for Life-Cycle Management of Bridges

심창수\*

Shim, Chang Su

건설산업에서 BIM이 새로운 의사소통과 협업의 수단이 되고 있는데 결정된 내용을 전달하는 정적인 역할에 머물고 있다. 시설물은 설계에서의 가정값에서 가상으로 완성되고 실제 시공을 하면서 많은 변수들의 영향으로 변화한다. 준공 이후의 공용 단계에서 노후화나 보수 보강의 과정에 따라 달라진다. 이러한 동적인 변화를 표현하고 센싱과 해석 모델 연동을 통해 진화하는 디지털트윈 모델의 현황과 사례를 소개하고자 한다.

**핵심용어 :** BIM, 디지털트윈모델, 센싱, 해석 연동

### 1. 서론

디지털 트윈 모델(DTM)은 제품의 개발단계부터 실제 제품의 성능을 모사할 수 있는 해석 모델과 데이터로부터 출발한다. 제조업에서 이러한 개발단계에서 축적된 기술을 유지관리시장으로 확대 적용하기 위해서 필수적인 센싱체계를 내재화하고 이를 네트워크로 수집하여 성능 데이터를 축적하고 지속성있는 사업 모델을 구축하기 위해 활발하게 개발되고 있다. 공용 단계가 가지는 다양성을 바탕으로 제품의 성능을 높이고 생애주기 차원의 비용절감이 가능한 설계 개선이 가능해지는 장점을 가지게 된다. 건설산업에서는 이상적으로는 설계자가 시공과정에서의 오류를 보고 보완을 하고 유지관리 단계에서 발생하는 문제로부터 다시 교훈을 얻어 설계를 개선하는 정보의 흐름이 논의되고 있다. BIM은 이러한 건설산업 디지털전환의 중요한 매개체 역할을 수행하고 있다. 그러나, 여전히 분절화된 실무관행과 계약절차, 지적재산권에 대한 장벽으로 정보순환은 이루어지지 못하고 각 단계에서의 제한적 효율성만을 추구할 수 밖에 없는 상황이다. 디지털 트윈모델로 진화하기 위해서는 데이터에 기반한 정보 정의가 우선적으로 이루어져야 한다. 이 논문에서는 도입 초기 단계에 있는 디지털 트윈 모델 개발의 사례를 살펴보고 향후 방향성을 제시하였다.

### 2. 건설산업 디지털 트윈모델 현황

데이터 기반의 엔지니어링을 Level-3 BIM으로 기술수준을 정의하고 있는데 디지털 모델을 생성하고 사업기간동안의 변화를 실시간으로 반영하기 위한 연구들이 수행되었다(Dang 2020; Shim and Roh 2021). 스마트건설기술개발사업에서는 프리팹 구조의 개발단계에서부터 성능이력과 거동 모사를 위한 디지털 모델이 데이터 모델과 함께 개발되고 있다. 구조물이 핵심거동을 생애주기동안 관리하고 그 데이터를 기반으로 생애주기 비용이나 장수명화가 가능한 설계 개선을 할 수 있는 정보 파이프라인을 수립하는 방안으로 제시되었다. 영국에서 모델 기반의 준공성과품이 시도된 사례가 있다(Gaunt 2017). 이러한 신규 교량에 대한 디지털트윈 모델은 형상과 속성, 거동의 변화를 즉시 반영할 수 있는 모델 정의가 매우 중요하다.

기존 시설물에 대한 디지털트윈모델은 정확한 정보가 부재한 경우에는 스캐닝을 통한 역설계를 시도하는 실사모델(reality model), 구조물이 거동이력을 축적하고 활용하기 위한 교량유지관리시스템에서의 디지털 모델(심창수 등 2018; Shim et al. 2017, 2019)에 대한 개념과 시범 적용 사례가 제시되었다. 데이터 분석이 가능한 수준의 디지털화가 않으면 디지털트윈모델의 개발이 가지는 효용성이 매우 떨어지게 된다. 불확실성을 반영하기 위해서는 전체 시설물이 데이터화되고 서로 연결되어 상호 데이터의 수집, 분석, 활용이 이루어져야 한다.

실질적인 디지털트윈모델이 개발되고 건설산업의 디지털전환을 가속화시키는 방법론이 되기 위해서는 건설 산업이 축적한 경험지식을 디지털모델로 표현하는 데이터 정의에 대한 합의가 이루어져야 한다. 다양한 변수들로 인해 일률적인 제품화된 시설물이 되지 못하기 때문에 데이터의 가치가 더욱 중요하다. 유사한 시설물

\* 정회원 · 중앙대학교 사회기반시스템공학부 교수, 공학박사 (E-mail:csshim@cau.ac.kr) - 발표자

들을 대표하는 디지털트윈모델이 제시되면 센싱과 연동되는 해석모델, 성능이력에 대한 데이터를 통해서 진화할 수 있다. 그림 1에 제시한 바와 같이 선형에 따라 위치하는 시설물들은 환경, 하중, 지반, 재료 등의 영향으로 다른 거동을 나타낼 수 있고 이를 디지털화된 형태로 상시적으로 데이터를 축적하고 DTM을 업데이트하는 체계가 필요하다. 축적된 경험지식의 통합을 통해 이러한 디지털트윈모델 개발이 가능하다.

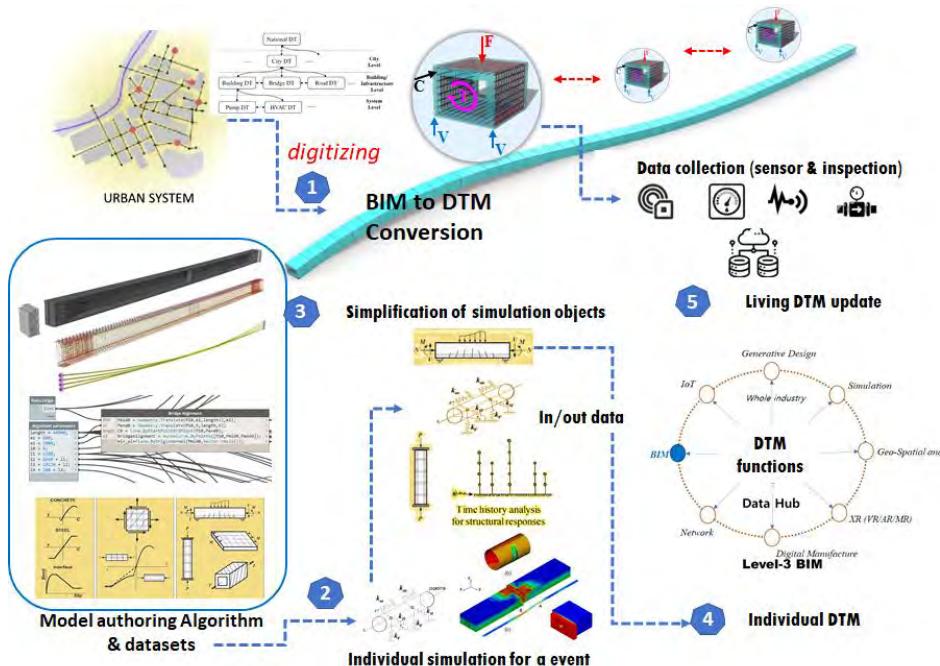


그림 1. BIM과 디지털트윈모델의 연계방안

#### 4. 결론

건설산업의 각 분야별로 축적해온 지식을 디지털화하는 기술이 디지털트윈모델이고 이러한 모델 개발과 활용을 위한 국가적인 노력이 필요하다. 디지털인프라를 통해 건설산업의 디지털전환의 이루어질 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 스마트건설기술개발사업의 연구비지원(21SMIP-A158708-02)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 심창수, 전치호, 강휘랑, 당고손, 소칸야 (2018). 교량의 장기성능 예측을 위한 디지털트윈 모델 정의, 한국 BIM학회 논문집, 8(4): 13-22.
- Son, N.S., Rho, G.T., Shim, C.S.(2020), A master digital model for suspension bridges, Applied Sciences, 7666.
- Gaunt, M. (2017), BIM model-based design delivery. Proceedings of the institution of civil engineers, Smart infrastructure and construction. 170: 50-58.
- Shim, C.S., Kang, H.R., Dang, N.S. and Lee, D.K.(2017), Development of BIM-based bridge maintenance system for cable-stayed bridges. Smart Structures and Systems. 20(6): 697-708.
- Shim, C.S., Dang, N.S., Lon, S. and Jeon, C.H.(2019), Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model. Structure and Infrastructure Engineering. 15(10): 1319-1332.
- Shim, C.S. and Roh G.T. (2021). Data-Driven Modeling Algorithms for Cable-Stayed Bridges Considering Mechanical Behavior. Appl. Sci. 11, 2266.

# 노후 인프라 대응을 위해 힘을 합쳐야

We need to work together to respond to aging infrastructure

조성일\*

Jo, Sung il

국내외적으로 인프라 노후화 문제는 사회적으로 이슈가 되고 있으며, 국민의 안전과 국가 재정에 큰 부담을 안겨주고 있다. 이에 대응하고자 국내 ‘기반시설관리기본법’ 등 관련 정책이 수립되고 있는 시점에서 일본의 산학관민 총력적 대응 플랫폼인 ‘인프라 메인테넌스 국민회의(Japanese Congress for Infrastructure Management, 이하 국민회의)’를 주목할 만하다. 국내 노후 인프라 대응을 위해 기술·데이터·지혜의 국가적 역량을 한곳으로 모을 수 있도록 공공·대학·민간·연구·학회 등 다양한 기관이 힘을 합쳐야 할 때이다.

**핵심용어** : 노후 인프라, 공동대응, 기술개발, 산학관민, 플랫폼, 오픈스퀘어

## 1. 서론 (노후 인프라 대응을 위한 골든 타임)

미국, 유럽, 일본 등 인프라가 앞서 건설되었던 많은 국가에서 인프라 노후화는 사회적으로 큰 이슈가 되고 있다. 노후된 인프라는 시민의 안전에 위협이 될 뿐만 아니라, 그것을 보수하고 지속 가능하게 하는데 막대한 국가 재정이 소요되어 미래의 부담요인으로 작용한다. 노후 인프라 위기를 극복하기 위해서는 지금이 국가적으로 중요한 시기임에 분명하다.

## 2. 국내외 인프라 노후화

미국은 1930년대 집중 성장 이후 1980~90년대 이후 대형 붕괴사고가 발생하는 등 사회적으로 인프라 노후화 문제로 많은 어려움을 겪었으며, 최근에도 마이애미 콘도 붕괴, 루즈벨트 교량 균열 발생 등 인프라 노후화 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 노후 인프라 문제 해결을 위해 재정 부담이 커지고 있는 상황에서 최근 바이든 대통령은 인프라 개선을 위해 ‘더 나은 재건(Build Back Better)’이라는 슬로건으로 1천 400조원의 인프라 관련 예산을 편성하는 등 인프라 투자 재원 마련을 위한 중세를 추진하려는 움직임이다.

일본은 1950~60년대 고도 성장기를 거치면서 많은 인프라가 건설되었고 2000년대부터 인프라 노후화 문제가 대두되었다. 특히 2012년 12월 발생한 일본 사사고(簾子) 터널 친정붕락 사고는 9명의 사망자를 내며 사회적으로 큰 충격을 주었다. 이 사고로 일본의 인프라 노후화 문제에 대한 인식이 높아지면서 본격적인 대책을 마련하는 계기가 되었다.



그림 1. 마이애미 콘도 붕괴 (미국)



그림 2. 루즈벨트 교량 균열 (미국)

국내의 경우 1970년 경제개발을 통해 급격한 성장을 이루었으며 이 과정에서 많은 인프라가 건설되었다. 최

\* 서울시설공단 이사장, 공학박사 (E-mail : josungil58@sisul.or.kr) - 발표자

근 국내에서도 도로함몰, 열수송관 파열, 교량의 중대한 결함 발견 등 인프라 노후화로 인한 문제가 곳곳에서 발생하고 있는 상황이다. ‘지속가능한 기반시설 관리 기본법’을 시행(2020년 1월)하고 기반시설관리 기본계획(2020년 5월)을 수립하는 등 정부도 인프라 노후화에 대응하고자 관련 정책을 수립하고 있으며, 사회적으로도 노후 인프라 문제에 대해 관심이 높아지고 있다.

### 3. 일본의 노후 인프라 대응 시사점

국내 노후 인프라 대응과 관련하여 우리보다 약 20년 먼저 고도 경제성장기를 거치면서 인프라를 대대적으로 확충한 일본의 사례를 살펴보는 것도 의미가 있을 것이다. 일본은 사사고(筏子) 터널 친정봉락 사고 이후 국토교통성에 사회자본 노후화 대책회의를 신설하여 2년 뒤인 2014년, 국내의 기반시설관리기본계획에 해당하는 인프라 장수명화기본계획 및 행동계획 등 관련 정책을 수립·발표하였다. 이에 따라 모든 기반시설을 5년에 1회, ‘근접육안점검’을 통해 점검하도록 규정하고 2014년부터 모든 시설물을 조사하고 있다.

노후 인프라의 실태 파악이 정책 시행에 있어 우선 이겠지만, 일본의 경우 ‘인프라메인테넌스 국민회의’(Japanese Congress for Infrastructure Management, 이하 국민회의)가 눈에 띈다. 2016년 11월 설립된 ‘국민회의’는 사회 인프라가 국민의 삶에 중요한 것임을 인식시키고, 노후 인프라를 효율적·효과적으로 관리하기 위해 산학관민의 기술과 지혜를 총동원하기 위한 플랫폼 구축을 목표로 하고 있다.

‘공공 기술니즈를 공개하여 혁신기술을 발굴·지원’, ‘기술 기업 간 협력 촉진’, ‘지방자치 단체 기술지원’, ‘인프라 관리 중요성 사회 홍보’를 주요 추진 업무로 하고 있으며, 유지관리 산업을 육성하여 해외로 시장을 확장하려는 계획도 갖고 있다.

기업, 연구기관, 공공, 시민단체 등의 자발적인 참여로 회원을 구성하고 있는데, 설립 당시 개인 회원 포함 199개 단체였던 회원 수가 현재 2,440개 단체(기업 892, 개인 265, 단체 162, 공공 1,121)로 빠르게 늘고 있다. 공공·대학·민간·연구·학회 등 산학관민의 모든 주체의 기술과 지혜를 총동원하여 인프라 유지관리 기술을 개발하고 미래 먹거리를 창출함으로써 노후 인프라의 위기를 기회로 바꾸려는 일본의 의지를 볼 수 있는 대목이다.

### 4. 결론 (노후 인프라 대응을 위해 힘을 합쳐야)

국내에서도 노후 인프라 유지관리를 위해 로봇·드론·인공지능(AI)·이미지프로세싱 및 자산관리 등 관련 기술 개발을 비롯하여 정책적 논의가 활발히 진행되고 있지만, 산발적으로 진행되고 있는 게 아쉽다. 인프라 관리와 관련 산학관민이 갖고 있는 지식과 시행착오, 극복사례 등 소중한 경험의 공개되지 않고 서로 공유되지 못하여 비슷한 실패가 반복되고 있음을 안타깝게 생각한다. 이번 기회에 우리도 기술·데이터·지혜의 국가적 역량을 한 곳으로 모을 수 있는 플랫폼을 구축할 것을 제언한다.

공공·대학·민간·연구·학회 등 산학관민 모든 주체가 함께 힘을 합쳐 인프라 관리를 위한 혁신기술을 개발하고, 관련 정책이 현장 끝선의 현실을 반영할 수 있도록 선순환 구조를 정립하며, 사회가 인프라 노후화 문제에 지속적으로 관심을 갖도록 함께 노력해야 할 때이다.

### 감사의 글

‘도로인프라 관리 오픈 스퀘어’에 함께 참여해 주신 한국도로공사 김진숙 사장님, 국토안전관리원 박영수 원장님을 비롯한 ‘도로인프라 얼라이언스’ 모든 기관 임직원 여러분과 본 사업을 기획·추진하고 있는 서울시설공단 임직원 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

# 기술 세션

---

# 이동 차량을 고려한 단순지지 교량의 동적상호작용 분석

## Time varying frequency analysis considering vehicle-bridge interaction dynamics

이재훈\* · 이영재\*\* · 김은주\*\*\*

Lee, Jaehun · Lee, Young Jae · Kim, Robin Eunju

이동차량(열차)-교량의 상호작용 해석은 이동하중에 따른 교량의 진동특성 및 동적 충격계수의 증가, 교량의 사용성 및 열차의 주행 안정성 등을 파악하기 위하여 많은 연구가 수행된 바 있다. 일반적으로 열차-교량 상호작용 해석은 각각 시스템의 고유치 해석을 통하여 교량의 진동특성과 교량의 동적거동특성을 예측하여 공진주파수 영역에서의 상호작용 해석이 어렵다. 본 연구에서는 교량과 차량을 각각 2자유도를 갖는 시스템을 형성하여 수치해석적으로 상호작용으로 인한 고유값 변화를 수치해석적으로 분석하였다.

**핵심용어** : 이동차량, 동적상호작용, 고유값해석, 단순지지 교량

### 1. 서론

이동차량을 활용한 교량동특성 거동 분석은 차량의 질량 및 진동을 무시하지 않는 경우 교량과 차량의 동적 상호작용을 반영해야 한다 (Kim et al., 2016). 교량-차량 상호작용시스템은 시간가변적이기 때문에 고유진동수 또한 시간가변적이며 비선형적 특성을 보여 정확한 예측이 어려우며 대부분의 연구에서는 실험적으로 규명한다.. Yang et al (2013)은 교량과 차량을 각각 단자유도를 갖는 시스템으로 구성하여 교량과 차량에 대한 고유값(eigenvalue)에 대해 수학적 정해를 유도하였다. 이론해를 기반으로 다양한 차량변수(질량 및 교량-차량 고유진동수비)에 대해 상관관계를 도식화하여 나타내었다. 하지만, 실제 교량에 적용하기 위해서는 교량 및 차량의 고차모드에 대한 상관관계 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 교량과 차량이 각각 2자유도를 갖는, 총 4자유도의 시스템으로 형성하여 수치해석적으로 시간가변적인 교량 및 차량의 고유값 상관관계를 분석하였다.

### 2. 동적상호작용 운동방정식

본 연구에서 사용된 교량-차량 상호작용모델은 Fig.1과 같다. 교량의 길이는  $L$ 이며 전체 길이에 대해 동일한 단면상수를 갖는 Euler-Bernoulli 단순지지보로 모델링하였다. 특히 교량의 표면은 매끄러운 것으로 가정하여 가상일의 원리를 활용한 assumed modes method 모델을 개발하였다. 차량은 1/4차량이며 상질량( $m_s$ )과 하질량( $m_u$ ) 사이에 서스펜션( $k_s$ ,  $c_s$ )으로 연결하여 모델링 하였다. 차량의  $x = Vt$ 에 위치하였을 때 교량의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} M_B & 0 & 0 \\ 0 & m_u & 0 \\ 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_B \\ \ddot{u}_u \\ \ddot{u}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & -c_t N(Vt) & 0 \\ -c_t N(Vt) & c_t + c_s & -c_s \\ 0 & -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_B \\ \dot{u}_u \\ \dot{u}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} - k_t N(Vt) & 0 & 0 \\ K_{21} & k_t + k_s & -k_s \\ 0 & -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_B \\ u_u \\ u_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -m_u g \\ -m_s g \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 3. 수치예제 및 결과

\* 비회원 · 한양대학교 건설및환경공학과 학사과정 (E-mail:jhunlee1089@gmail.com)

\*\* 비회원 · 한양대학 건설및환경공학과 석사과정 (E-mail:yjlee8836@naver.com)

\*\*\* 비회원 · 한양대학교 건설및환경공학과 조교수, 공학박사 (E-mail:robinekim@hanyang.ac.kr) - 발표자

표1에 나타난 차량과 교량에 대해 해석을 진행하였으며 교량 2차와 차량 1차모드가 상호작용하여 변화하는 고유값의 추이를 각각 그림 1과 그림2에 나타냈다. 중앙경간에서 FAR 값이 1.5이상으로 높은 값을 보이는 것을 알 수 있으며 이러한 현상은 교량의 2차모드와 상호작용이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 차량과 교량의 모드 교차가 발생 할 때 상호작용하는 교량의 모드 차수에 따라 FAR 변화 추이가 다름을 알 수 있다.

표 1. 상호작용 시스템 물성치

|         | Property                 | Value                                | Property                      | Value                  |
|---------|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Vehicle | Sprung Mass ( $m_s$ )    | 1-70 kg                              | Suspension stiffness( $k_s$ ) | $5 \times 10^6$        |
|         | Unsprung Mass ( $m_u$ )  | 3 kg                                 | Suspension damping( $c_s$ )   | 700                    |
|         | Tire stiffness ( $k_t$ ) | $5-10 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> | Tire damping ( $c_t$ )        | 700                    |
| Bridge  | Vehicle Speed            | 5 m/s                                |                               |                        |
|         | Length ( $L$ )           | 3 m                                  | Density ( $\rho$ )            | 2400 kg/m <sup>3</sup> |
|         | Elastic Modulus ( $E$ )  | 100 GPa                              | Damping factor( $\zeta$ )     | 2%                     |
|         | Width ( $b$ )            | 65 cm                                | Height ( $h$ )                | 2 cm                   |

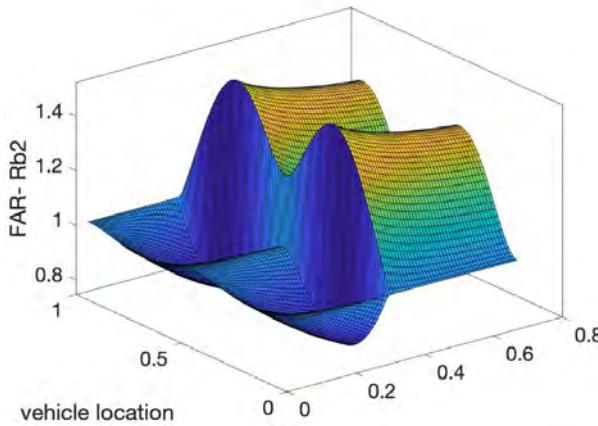


그림 1. 교량 2차모드 고유값

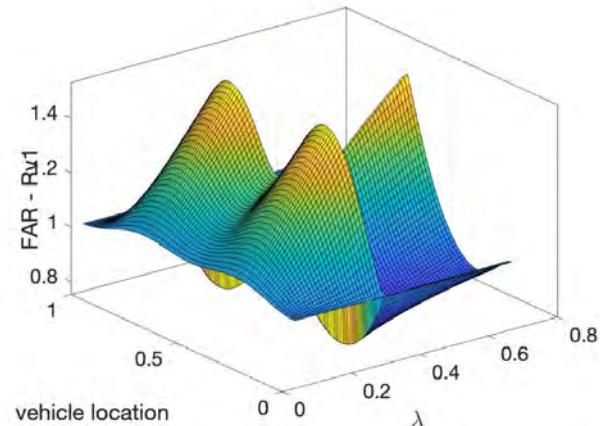


그림 2. 차량 1차모드 고유값

#### 4. 결론

본 연구에서는 교량과 차량의 고차모드가 상호작용하였을 때 차량 및 교량에서 변화하는 고유값을 분석하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 국토교통촉진연구사업 (No. 21CTAP-C164093-01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Kim, R. E., Moreu, F., & Spencer Jr, B. F. (2016). Hybrid model for railroad bridge dynamics. Journal of Structural Engineering, 142(10), 04016066.
- Yang, Y. B., Cheng, M. C., & Chang, K. C. (2013). Frequency variation in vehicle - bridge interaction systems. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 13(02), 1350019.

# 딥러닝 기반 철도교량 3D 점군데이터의 객체 분류 및 분할 연구

## A Study on Classification and Segmentation of 3D Point Cloud Data for Railroad Bridge using Deep Learning

박정준\* · 유영무\*\* · 김병규\*\*\*

Park, Jeongjun · Ryu, Young-Moo · Kim, Byung-Kyu

문재인 정부는 SOC 디지털화의 핵심 기술로 디지털 트윈을 중점 과제로 선정하였으며, 향후 SOC 유지관리는 디지털 트윈 체계기반으로 이루어질 것으로 예상된다. 신규구조물에 대해서는 프로젝트 수행 시 디지털 트윈 구축이 가능하나, 기 건설된 구조물에 대해서는 별도의 유지관리용 3D 모델링 과정이 필요하다. 본 논문에서는 기 건설된 철도교량의 디지털 트윈 구축에 있어 딥러닝 기술 적용에 대한 연구를 수행하였다. 철도 교량의 3D 점군데이터를 학습 DB로 구축하여, 객체 분류 및 분할에 딥러닝을 활용하여 자동화하는 연구를 수행하였다. 딥러닝을 활용한 다양한 철도교량 형식의 객체 분류는 매우 정확한 결과를 보여주었으며, 좀 더 복잡한 해석인 객체 분할에 있어서도 상당히 정확한 결과를 도출하였다. 향후 본 기술은 기 건설된 다양한 철도 교량 및 터널 등 철도시설물의 3D 모델 구축에 활용이 가능할 것으로 예상된다.

---

**핵심용어 :** 딥러닝, 객체 분할, 3D 점군데이터, 철도교량, Scan to BIM

### 1. 서론

문재인 정부의 한국판 뉴딜 종합계획 중 디지털 뉴딜에 SOC 디지털화가 포함되어 있으며, SOC 디지털화의 핵심 기술로 디지털 트윈이 중점 과제로 선정되었다. 디지털 트윈 기반의 유지관리 체계에서는 가장 환경에 현실 구조물과 동일한 3D 형상 데이터가 구축되고 디지털 정보가 결합되어 체계적인 정보의 관리 및 다양한 의사결정이 가능하다. 디지털 트윈의 구축에 있어 새롭게 발주되는 사업에서는 유지관리용 BIM 모델 구축을 포함하여 프로젝트가 진행될 수 있으나, 기 건설된 구조물의 경우는 별도의 3D 모델링 작업이 필요하다. 이미 건설된 구조물의 경우 정확한 도면이 있을 경우 3D 모델 구축이 용이하나, 건설 시기가 오래된 구조물의 경우 도면이 분실되거나, 개·보수 및 노후화로 인해 도면과 일치하지 않는 경우가 많다. 이 경우 정확한 형상의 계측을 통해 유지관리용 3D 모델을 구축해야 한다. 현재 정확한 3D 모델 구축방법에는 Lidar를 통해 구조물의 형상에 대한 3D 점군데이터를 취득하고 이를 인력에 의한 수작업을 통한 방법이 있으나, 이는 상당한 시간과 노력이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 인력에 의한 모델링 작업을 자동화하기 위한 연구의 첫 단계로, 딥러닝을 활용하여 철도교량의 3D 점군데이터의 객체 분류 및 분할에 대한 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 PointNet(Qi et al, 2017, Lee et al, 2021)을 딥러닝 알고리즘으로 활용하였다.

### 2. 철도교량 3D 점군데이터의 객체 분류 연구(object classification)

철도교량의 3D 점군데이터를 인식에 대한 학습 DB를 구축하기 위해서 철도교량의 8가지 교량 상부 형식 및 교각 9가지 형식에 대한 3D 모델링을 각각 1,140개, 1,284개 구축하였다. 구축한 3D 모델의 표면에서 포인트를 추출하는 별도의 알고리즘을 통해 3D 점군데이터 학습 DB를 구축하였다. 이렇게 생성한 총 17가지 카테고리 3D 점군데이터는 ModelNet40 데이터에 추가하여 딥러닝을 통한 객체 분류를 수행하였다. 표 1과 같이 교량 상부(girder)의 평균 분류 정확도는 100%였으며, 교각(pier)의 평균 분류 정확도는 90%로 도출되었다. 교각의 경우 같은 T형 교각이라 하더라도 기둥의 모양이 원형·타원인지에 따라서 별도의 카테고리로 생성하

---

\* 정회원 · 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사 (jjpark@krri.re.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사 (E-mail:ymryu@krri.re.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사 (E-mail:bkkim86@krri.re.kr)

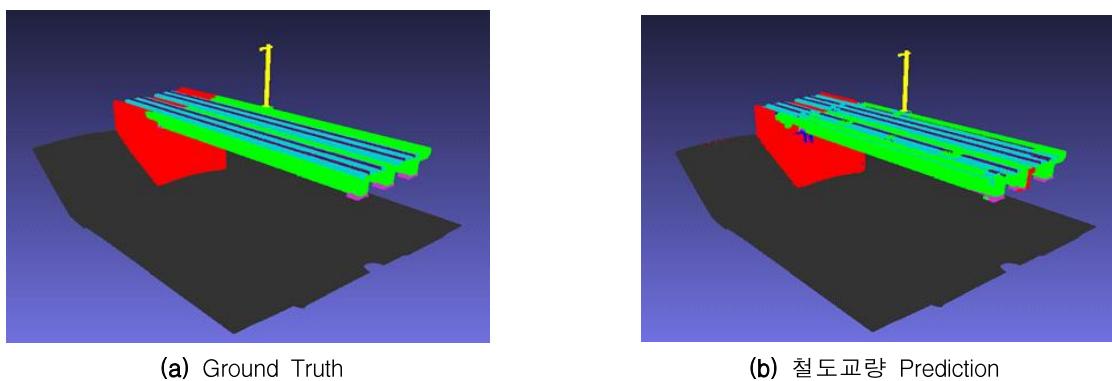
였는데, 이 경우에는 위낙 둘의 차이가 적어서 정확도가 낮아진 것으로 판단된다.

**표 1. 객체 분류 결과(object classification)**

| category     | cup | desk  | mean girder | lamp | person | mean pier | plant | stairs | table |
|--------------|-----|-------|-------------|------|--------|-----------|-------|--------|-------|
| accuracy [%] | 0.7 | 0.791 | 1           | 0.85 | 0.55   | 0.90      | 0.67  | 0.6    | 0.77  |

### 3. 철도교량 3D 점군데이터의 객체 분할 연구(semantic segmentation)

철도교량의 객체 분할 딥러닝 학습 DB 구축을 위해서 실제 교량과 유사한 형태로 모델링을 수행하였다. 대상 교량 형식은 PSC Beam으로 하였으며, 8개의 카테고리(교량상부, 교각, 교대, 전신주, 교량받침, 레일, 침목, 지형)로 세분화하여 모델링을 수행하였다. 3D 점군데이터 추출을 위해서는 Meshlab 프로그램을 사용하였으며, 점들을 추출하는 방법으로 Poisson-disk sampling(Robert, 1986) 방식을 사용하였다. 테스트 결과는 평균 95.7%의 정확도 및 71.7%의 MIoU 값을 보여주었다.



**그림 1. 철도교량 객체 분할 결과**

### 4. 결론

본 연구에서는 철도 교량의 3D 점군데이터를 딥러닝 학습을 통해 분류 및 분할하는 연구를 수행하였으며, 두 경우에서 모두 평균 95%이상이 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 3D 점군데이터를 인력에 의해 모델링하는 과정 중 딥러닝 기술을 활용하여 객체 분할 자동화가 가능한 것을 확인하였으며, 향후 관련 기술의 추가적인 연구를 통해 자동화된 3D 모델링까지 확장하는 연구를 수행할 예정이다.

### 참고문헌

- Lee, J.S., Park, J., and Ryu, Y.-M. (2021), “Semantic segmentation of bridge components based on hierarchical point cloud model”, Automation in Construction, Vol. 130, 103847.
- Qi, C.R., Su, H., Mo, K., and Guibas, L.J. (2017), “PointNet, Deep learning on point sets from 3D classification and segmentation”, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 77–85.
- Robert, L. (1986), “Stochastic sampling in computer graphics”, ACM Transaction on Graphics, Vol. 5, No. 1, pp.51–72.
- Z. Wu, S. Song, A. Khosla, F. Yu, L. Zhang, X. Tang, and J. Xiao. 3d shapenets: A deep representation for volumetric shapes. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 1912 - 1920, 2015.

# 철도 콘크리트 인프라 자가진단 시스템 개발

## Development of self-sensing system for railway concrete infrastructures

이승정\* · 유일환\*\* · 안다훈\*\*\*

Lee, Seung-Jung, You, Ilhwan · Ahn, Dahoorn

본 논문에서는 철도 콘크리트 인프라의 자가진단을 위한 시스템을 개발하였다. 다중벽탄소나노튜브 (Multi-walled carbon nanotubes; MWCNTs)와 같은 전도성 나노소재를 시멘트에 혼입하여 압전저항성능을 가지고도록 하고, 이를 통해 외부 하중이나 변형이 가해질 경우 구조물의 저항이 변하게 하여 자가진단할 수 있는 시스템을 제작하였다. 추가로 탈부착이 가능한 무선 송수신 모듈을 제작하여 자가진단이 무선으로 가능하도록 하였다. 개발된 시스템은 반복압축하중 하에서 유선 시스템과 비교하였으며 실제 철도환경에서 성능시험도 수행하였다.

**핵심용어** : 철도 콘크리트 인프라, 자가진단, 무선센싱, 시멘트복합체, 다중벽탄소나노튜브

### 1. 서론

노후화된 철도 인프라가 지속적으로 증가함에 따라 인프라의 건전성을 효율적으로 평가하기 위한 상태/안전 진단 및 관리 기술의 수요가 급격히 증가하는 추세에 있다[1]. 특히 철도 침목과 도상은 승차감 및 안전성에 큰 영향을 줄 수 있는 중요한 구조재료임에도 불구하고 유지관리 시스템이나 진단 장비가 부족한 상태이며, 대부분 인력에 의한 직접 진단에 의존하고 있다. 하지만 구조물의 거동을 측정하는 대부분의 센서들은 금속으로 이루어져 있어 콘크리트로 만들어진 구조물과 상이한 재료특성으로 인하여 거동의 호환성에 문제가 자주 발생하고 있다. 따라서 전기가 흐를 수 있는 전도성 충전제를 시멘트에 혼입하여 자가진단이 가능하도록 구성한 자가진단 콘크리트(self-sensing concrete)가 개발 및 연구되고 있다[2, 3]. 본 논문에서는 철도환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 무선전송 자가진단을 위한 센싱 시스템을 개발하고자 하였다.

### 2. 무선전송 자가진단 콘크리트 시스템

자가진단 콘크리트 개발에서 가장 중요한 점은 전기 저항을 낮춰서 응력과 변형률의 변화, 손상발생과 같은 환경 변화에 민감하도록 만드는 것이다. 따라서 일반적으로 전기가 잘 흐르지 못한다고 알려진 시멘트 재료 외에 추가로 혼입하는 충전제의 전기전도도가 매우 중요하다. 현재까지 연구된 다양한 혼입 충전제 중에서 센서로서의 성능이 가장 좋다고 알려진 나노 충전제는 다중벽 탄소나노튜브(MWCNTs)이다.

본 연구에서는 섬유 형태의 충전제인 MWCNTs의 경우, 직경이 약 15nm로 매우 고운 입자를 가진 재료이기 때문에, van der Waals 힘에 의해 응집하는 성질을 가지고 있다. 따라서 적절하게 분산되지 못한 충전제는 재료의 응집과 더불어 시멘트기반 센서 내에서 결함을 유발하여 강도 저하의 원인이 될 수도 있으며, 연속성의 부재로 인해 전기전도성에 악영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 MWCNTs를 분산시키기 위해 소니케이터 (QSONICA, Q500)를 사용하였다. 추가로 보통포틀랜드 시멘트에 실리카포트를 혼입하여 분산 효과를 증진시키고자 하였다. 충전제의 종류, 혼입량에 따른 영향을 줄이기 위해, 여러 연구들을 통해 센싱 성능이 가장 우수하다고 알려진 부피비 1.0%의 MWCNTs를 본 연구에서도 사용하였다. 실리카포트는 시멘트 중량의 30%가 대체되었고, 물/바인더 비율은 0.35이다.

무선전송 시스템은 자가진단 콘크리트 모듈측에서 센싱 신호를 생성하고 송신하는 송신기, 데이터를 저장하

\* 비회원 · 인천대학교 도시환경공학부 건설환경공학전공 조교수, 공학박사 (E-mail: seungjung@inu.ac.kr) – 발표자

\*\* 비회원 · 고려대학교 미래건설환경융합연구소 연구교수, 공학박사 (E-mail: ih-you@korea.ac.kr)

\*\*\* 비회원 · 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 조교수, 공학박사 (E-mail: dhahn@seoultech.ac.kr)

는 PC 측에서 센싱 신호를 수신하는 수신기로 구성하였다. 자가진단 콘크리트 모듈에 외부에서 하중이 인가될 때 저항 변화가 발생하며, 본 연구에서는 5~500 Ω의 측정범위를 목표로 무선전송 시스템을 구성하였다.

### 3. 성능검증

무선전송 시스템과 연결된 자가진단 콘크리트의 자가진단 반복성 검증을 위해, 반복압축시험을 수행하였으며 이를 유선전송 시스템을 이용하였을 때와 비교하였다. 그림 1과 같이 개발된 무선 전송 시스템을 활용하여 데이터를 취득한 경우의 게이지 팩터(GF)와 그 거동이 유선 전송 시스템을 활용한 시험 결과와 매우 유사하였으며, 따라서 개발된 무선 전송 시스템이 유선 전송 시스템과 유사한 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

데이터 손실률이 5%이하인 거리를 신뢰도가 보장되는 전송거리로 정의하고, 개활지, 철도역사, 철도궤도 환경에서 무선전송거리를 측정한 결과는 그림 2와 같다. 신호강도 높을수록 전송거리가 높으며, 개활지가 가장 높은 전송거리를 보이고 철도 선로상에서 가장 낮은 전송거리를 보이지만, 14 dBm의 신호 강도에서 최대 100m 이상의 전송거리를 확보할 수 있으므로 철도 환경에서 신호 중계기 설치 시 200 m 이상의 간격으로 설치하여도 안정적으로 센싱 신호를 전송할 수 있음을 알 수 있다.

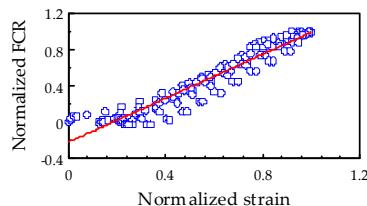


그림 1. normalized FCR vs. normalized 변형률 비교  
(무선(左), 유선환경(右))

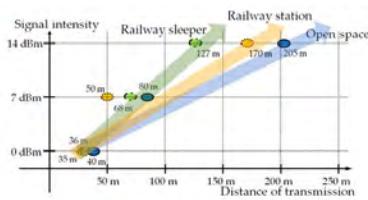
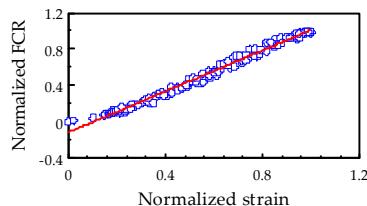


그림 2. 송신신호강도에 따른 전송거리 시험 결과

### 4. 결론

본 논문에서는 철도 환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 자가진단을 위한 시스템을 개발하였다. 콘크리트 구조물 거동의 정확한 모니터링을 위해 사용되는 자가진단 콘크리트 모듈에 직접 텔루착이 가능한 무선 송신모듈과, 센싱 데이터를 무선으로 수신하여 저장하는 무선 수신 모듈의 설계, 제작 및 성능 평가를 수행하였다.

### 감사의 글

이 성과는 2019년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1C1C1008190)

### 참고문헌

- Lee S-J, Moon DY, Ahn CH, Lee JW, Zi G. (2018) A precast slab track partially reinforced with GFRP rebars. *Computers and Concrete*, 21(3): 239–248.
- Han BG, Ding S, Yu X. (2015) Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement*, 59: 110–128.
- Lee S-J, You I, Zi G, Yoo DY. (2017) Experimental investigation of the piezoresistive properties of cement composites with hybrid carbon fibers and nanotubes. *Sensors*, 17(11): 2516.

# 동특성 식별 프로그램을 활용한 부유식 교량의 응답 진폭 연산자 분석에 관한 연구

## A Study on Response Amplitude Operator Analysis of Floating Bridge Using Modal Parameter Identification Toolsuite

장민우\*

Chang, Minwoo

부유식 교량의 거동은 파도, 조류, 통과하는 차량 등에 하중에 의해 영향을 받는다. 다양한 하중을 고려한 동적 평가를 수행하고, 이를 바탕으로 주행하는 열차에 미치는 영향을 분석하는 연구를 수행하였다. 단위 길이의 부유식 교량과 계류 장치의 축소 모형을 제작하고, 수조 실험을 통해 파도의 주파수 특성에 따른 응답을 계측하였다. 모드 식별을 통해 응답 진폭 연산자를 추출하고, 유한요소 모델과의 비교 검증을 통해 수조 실험의 유효성을 검증하였으며, 그 결과를 부유식 교량의 동특성 평가에 활용하였다.

---

**핵심용어 :** 부유식 교량, 동특성 해석, 응답 진폭 연산자, 수조 실험

### 1. 서론

최근 공간의 제약을 극복하고, 자원의 원활한 이동을 위해서 다양한 방식의 철도 교량이 제시되고 있다. 이를 반영하여, 섬이 많은 국내 지형을 효율적으로 이용하기 위해 부유식 교량을 철도교로 활용하는 방안이 제시된 바 있다[1]. 철도 교량의 경우 차량의 원활한 운행을 위해서 안전성을 평가하는 것이 필수적이다[2]. 그러나 부유식 교량은 파고의 특성, 조수간만의 차, 통과하는 차량 등 다양한 하중에 의해 거동이 영향을 받게 되어 실험을 통해 안전성을 검증하는 것이 필요하다. 파고의 특성이 거동에 지배적인 영향을 미치기 때문에, 이를 반영하여 주행 안전성 시험을 수조 모델과 진동대를 이용한 가진 시험으로 나누어 수행하는 연구가 이루어진 바 있다[3].

이 연구에서는 시스템 식별 기법에 기반한 수조 실험 결과를 보완하는 방안에 대해 제시하고자 한다. 수조 실험의 목적은 입력 조파에 따른 부유체의 무차원 전달 함수인 응답 진폭 연산자(Response Amplitude Operator, RAO)를 측정하는 것이다. 많은 연구를 통해 부유체의 다양한 유형의 계류 시스템에 대해 RAO 분석이 사용되었고, 유한요소 모델과의 비교를 통해 여러 조합의 입력에 대한 응답이 검증된 바 있다[4]. 진동대 실험을 위한 가진 입력 조건은 RAO의 선형 조합을 통해 산정할 수 있기 때문에, 면밀한 분석이 필요하다. 이 연구에서는 응답 모드 식별 프로그램을 사용한 RAO 분석과 수치해석 모델을 조합하여 연속적인 분포를 가지는 RAO 모델 생성을 위한 연구를 수행하였다.

### 2. 수조 시험 축소 모형 및 시스템 식별

수조 실험은 1/30의 비율로 축소된 부유식 교량 1m를 대상으로 수행하였다(그림 1). 4개의 계류 장치가 스프링에 연결되어 탄성 범위 내에서 부유체를 고정하였으며, 무게추를 밸러스트로 활용하여 무게중심과 경심의 길이차를 실제 모델과 동일하게 맞추었다. 계류 장치의 말단에는 로드셀을 장착하여 부유체가 탄성 거동 유무를 평가하도록 조치하였으며, 부유체는 강체 거동을 간주하여, 상부 중심에서의 응답(sway, heave, roll)을 영상 장비를 통해 계측하였다. 주파수 대역별로 10개의 조파에 해당하는 부유체의 응답을 계측하고, 각각의 모션에 대해 출력 기반 시스템 식별을 통해 RAO 분석을 수행하였다(그림 2). 유한요소 모델을 통한 결과와 비교하여, RAO 분석 결과의 유사성을 확인하였고, 이를 통해 수조 실험의 정확성을 입증하였다(그림 3).

---

\* 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 조교수, 공학박사 (cmw321@mju.ac.kr) - 발표자

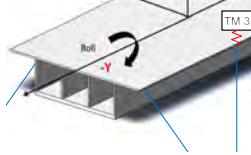


그림 1. 수조시험 축소모형 모델

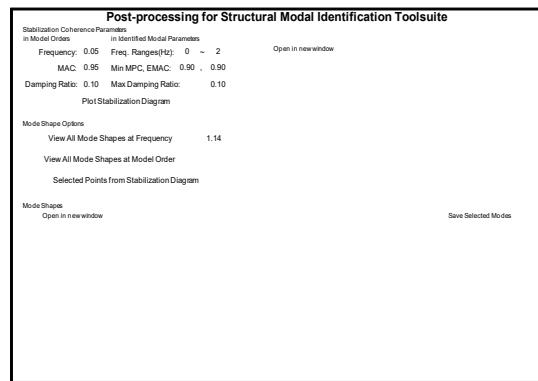


그림 2. 시스템 식별을 통한 RAO 분석 예

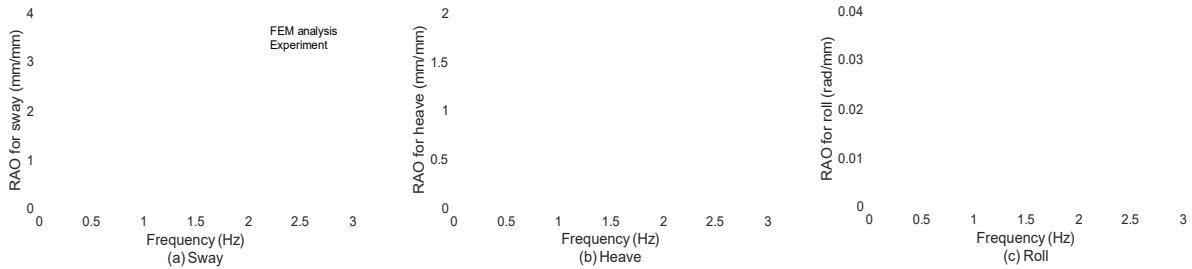


그림 3. 시스템 식별과 유한요소를 활용한 모션(sway, heave, roll)에 따른 RAO 결과 비교

### 3. 결론

시스템 식별 프로그램을 활용하여, 부유체의 세 가지 주요 운동(sway, heave, roll)을 분석하였다. 사용한 모든 출력 기반 식별 프로그램에 대하여 모드 형상을 추적하고, 유한요소 모델과의 비교를 통해 각 모션의 주파수 대역별 무차원 계수인 RAO를 분석하는데 활용되었다. 이러한 분석 결과를 토대로 주행 안전성 평가를 효율적으로 수행할 수 있는 근거를 제시하였다.

### 감사의 글

이 연구는 교육부의 학술연구지원사업의 연구비 지원()에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- 서승일, 장민우, 문형석, & 김선천. 2017, 동요하는 궤도를 주행하는 열차의 탈선 시험에 관한 연구, 한국 방재학회 논문집, 17(6), 29-35.
- UIC Code 518, 2009, *Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour-safety-track fatigue-running behaviour*, 4th ed. International Union Railways, Paris, France, 32-50.
- Chang, M., Seo, S. I., & Mun, H. S. 2020, *Running safety and behavior tests for a scaled-down railway vehicle crossing a floating bridge*, KSCE Journal of Civil Engineering, 24(6), 1750-1762.
- Harnois, V., Weller, S. D., Johanning, L., Thies, P. R., Le Boulluec, M., Le Roux, D., Soulé, V. & Ohana, J. 2015, *Numerical model validation for mooring systems: Method and application for wave energy converters*, Renewable Energy, 75, 869-887.

# 센서 퓨전을 이용한 고속철도 교량의 공진현상 평가 연구

Resonance assessment of high-speed railway bridge using multi-sensor fusion

정승호\* · 김현민\*\* · 김성일\*\*\* · 이경찬\*\*\*\* · 이준화\*\*\*\*\*

Jeong, Seunghoo · Kim, Hyunmin · Kim, Sung Il · Lee, Kyoung Chan · Lee, Junhwa

고속철도 교량은 차량의 축간 간격으로 인해 일정한 주기로 가진된다. 만약 차량의 가진주기가 교량의 고유주기와 가까워지면 교량에서 공진현상이 발생한다. 고속철도 교량은 공진이 발생하지 않도록 설계되나 실제 호남고속선 내 특정교량에서 공진현상이 다수 관찰된 바 있다. 교량의 공진수준을 평가하는 연구들이 있었으나 실제 현장에서 계측을 통해 평가하는 연구는 부족하다. 이에 본 연구는 공진현상을 정량적으로 평가할 수 있는 공진지수를 제안하고 이를 실제 교량에 적용하여 공진의 수준을 평가하는 것을 목표로 하고 있다.

**핵심용어** : 공진, 고속철도 교량, 센서퓨전, 차량-교량 상호작용

## 1. 서론

교량 내 공진현상은 고속철도 차량이 교량을 통과할 때 발생하는 가진주파수가 교량의 고유진동수와 가까울 때 발생한다고 알려져 있다. 교량에서 지속적으로 공진현상이 관찰된다면, 구조물 자체의 사용성 및 안전성과 더불어 고속철도 차량의 승차감에 악영향을 미치게 되며 공진이 심할 경우 열차 탈선사고 또한 발생할 가능성이 있다. 실제 호남고속철도 내 교량에서 공진현상이 관찰된 바 있어, 교량과 차량 사이의 상호작용을 고려한 교량의 공진수준을 평가하기 위한 연구가 필요하다.

## 2. 선행연구 분석

과거 선행연구들은 교량에서 공진이 발생하는 경우를 크게 2가지로 제시하고 있다[1-3]. 첫 번째는 고속철도 차량의 축 간 간격으로 인해 발생하는 특정 가진주파수가 교량의 고유진동수와 가까워지는 경우이며, 두 번째는 차량이 교량을 통과하는 시간이 교량 자체의 고유주기와 가까워지는 경우이다. 첫 번째 경우는 차량의 축간 간격과 교량의 고유진동수를 바탕으로 공진을 일으키는 임계속도를 계산하며, 두 번째 경우는 교량의 길이와 고유진동수를 바탕으로 임계속도를 계산한다. 두 번째 경우에서 계산되는 임계속도는 일반적으로 차량의 운영 최고속도보다 매우 크기 때문에, 공진을 이야기할 때 첫 번째 경우를 주로 고려하게 된다. 하지만 두 방법 모두 차량과 교량사이의 상호작용으로 발생하는 이동질량 효과는 고려하지 않은 채 이동하중만 가지고 공진이 발생하는 임계속도를 제시하고 있어 실제 교량에 적용하기에 어려움이 있다[4]. 차량의 이동질량을 고려할 경우, 교량-차량 시스템의 공진발생 주파수는 시간에 따라 변하며[1], 현장에서 이를 계측하기 위해서는 많은 어려움이 존재한다.

## 3. 연구목표 및 결론

본 연구는 교량과 차량의 상호작용을 고려하여 교량의 공진수준을 정량적으로 평가할 수 있는 새로운 공진지수를 제안하고자 한다. 제안하는 공진지수는 교량-차량 시스템의 공진발생 주파수 정보 없이, 차량 통과 시 교량에서 얻은 동적변위의 차량 가진시점 대비 시간상 위상 변화를 이용하여 공진의 수준을 평가할 수

\* 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원, 공학박사 (E-mail: shjeong@krri.re.kr) – 발표자

\*\* 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원, 공학석사 (E-mail: hmkim@krri.re.kr)

\*\*\* 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원, 공학박사 (E-mail: sikim@krri.re.kr)

\*\*\*\* 배재대학교 드론·철도·건설시스템공학과 조교수, 공학박사 (E-mail: kcleee@pcu.ac.kr)

\*\*\*\*\* 울산과학기술원 도시환경공학부 박사후연구원, 공학박사 (E-mail: junhwa@unist.ac.kr)

있도록 개발되었다. 공진현상이 발생하는 호남고속선 내 PSC 박스거더교를 대상(그림 1)으로 수치해석모델을 구축하였고 제안한 방법을 검증하였다(그림 2). 또한 대상교량에 가속도계와 변형률계를 설치하고(그림 3) 장기간 모니터링을 수행하였으며, 가속도와 변형률응답을 바탕으로 센서퓨전을 통해 열차 통과 시 교량의 동적변위를 계측하였다. 제안하는 공진지수를 계측된 응답에 적용하여 다양한 차량 속도에 따른 차량-교량 상호작용을 고려한 교량의 공진수준을 성공적으로 평가하였다.



그림 1. 호남고속선 내 PSC 박스거더교

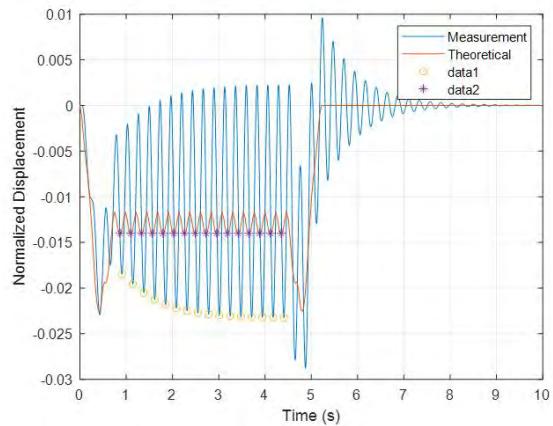


그림 2. 290KPH 통과시 교량응답의 위상변화 결과



그림 3. 대상교량 박스거더 내부 센서 설치

### 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2021R1F1A1054787)과 한국철도기술연구원의 지원(PK2103B1)을 받아 수행된 연구임

### 참고문헌

1. Mao, L. and Y. Lu (2013), Critical speed and resonance criteria of railway bridge response to moving trains. *Journal of Bridge Engineering*, 18(2): p. 131–141.
2. Xia, H., N. Zhang, and W. Guo (2006), Analysis of resonance mechanism and conditions of train - bridge system. *Journal of Sound and Vibration*, 297(3–5): p. 810–822.
3. Lu, Y., L. Mao, and P. Woodward (2012), Frequency characteristics of railway bridge response to moving trains with consideration of train mass. *Engineering Structures*, 42: p. 9–22.
4. Frýba, L (2001), A rough assessment of railway bridges for high speed trains. *Engineering Structures*, 23(5): p. 548–556.

# 계측기반 시공 시뮬레이션을 이용한 프리팹 교량 시공지원

## Data-driven Assembly Simulation for Prefabricated Construction

이준화\* · 심성한\*\*

Lee, Junhwa · Sim, Sung-Han

부재의 공장생산과 조립시공을 특징으로 하는 프리팹 교량 시공은 현장타설 최소화로 인한 공기단축과 품질 향상의 특징이 있어 미래의 건설시장에서 비중이 커질 것으로 기대되고 있다. 그러나 공장생산된 부재의 조립 시 시공오차의 누적으로 인해 품질이 저하될 수 있으며 이는 공용 중 교량의 안전성과 직결되는 중요한 문제이다. 그러나 협행 프리팹 시공에서는 이러한 조립오차를 효과적으로 제어하고 최소화하기 위한 방법론의 개발과 적용이 충분히 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 교량의 설계정보, 프리팹 부재 및 as-built 구조의 형상 및 위치 정보를 바탕으로 조립 시공을 시뮬레이션하여 조립 시 시공오차를 효과적으로 제어하기 위한 방법론을 제시한다.

**핵심용어** : 프리팹 시공, 시공 시뮬레이션, 디지털 모델, 계측 데이터

### 1. 서론

프리팹 시공은 기존의 현장타설 중심의 건설을 벗어나 주요 부재를 공장에서 생산하여 조립하여 구조물을 건설하는 건설 프로세스를 뜻한다. 프리팹 시공에서는 콘크리트의 현장타설 과정을 거치지 않으므로, 공기단축의 효과가 크며, 각 부재를 공장에서 생산하므로 높은 품질의 부재를 생산하여 공급할 수 있다는 장점이 크다. 우리나라의 경우 교량 노후화가 급속하게 일어나고 있으므로 향후 교량 교체공사에 대한 수요가 높을 것으로 예상되고, 특히 도심지 교량의 경우 교체공사 시 공기가 짧은 프리팹 시공이 큰 비중을 차지할 수 있을 것으로 생각된다.

프리팹 시공은 부재를 접합하여 하나의 구조로 일체화하므로 오차를 최소화하여 시공을 정확히 하는 것이 중요하다. 현재 교량 프리팹 시공에 많이 사용되는 부재는 거더와 바닥판이며, 이 경우 거더의 상부에 부착된 스터드 볼트와 바닥판의 전단포켓의 위치가 일치해야 조립이 가능하다. 그러나 실제 시공에서는 거더 및 스터드 볼트의 위치가 설계와 상당한 차이를 가질 수 있으며, 이는 다수의 바닥판 조립 시 오차누적으로 인해 조립이 실패할 가능성을 내포하고 있다. 조립 실패의 경우, 재시공 등의 조치를 취할 수 있으나 공기단축이라는 프리팹 시공의 가장 큰 장점을 살리지 못하게 된다.

본 연구에서는 교량의 설계정보, 프리팹 부재와 as-built 구조의 형상 및 위치 정보를 바탕으로 전체 조립 공정을 시뮬레이션하여 프리팹 시공을 지원하는 기술을 개발한다. 조립 시공성을 판단하기 위해 프리팹 부재 및 as-built 구조의 형상 및 위치 정보를 바탕으로 조립 시뮬레이션을 수행하고, 국 부재의 최적 조립위치 계산 및 문제 발생 위치를 추정한다. 개발된 방법론은 수치해석을 통해 검증하였다.

### 2. 형상 및 위치 정보 기반 조립 시공성 판단

계측된 형상정보를 바탕으로 바다판의 최적 조립위치 및 시공성 판단을 위한 알고리즘은 아래 최적화 문제를 통해 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{x,y,\theta} f(S_{design}(i), T(S_{prefab}(i), x, y, \theta)) \\ & s.t. \begin{cases} f(B(i), T(S_{prefab}(i), x, y, \theta)) = 0 \\ f(S_{prefab}(i-1), T(S_{prefab}(i), x, y, \theta)) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

\* UNIST 도시환경공학과, 박사후연구원, 공학박사 (E-mail: junhwa@unist.ac.kr)

\*\* 성균관대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail: ssim@skku.edu) - 발표자

단,  $f(A, B)$ 는 형상  $A$ ,  $B$  교집합의 넓이,  $S_{design}(i)$ 는  $i$ 번째 바닥판의 설계형상,  $S_{prefab}(i)$ 는 설치하려는  $i$ 번째 바닥판의 계측형상,  $S_{prefab}(i-1)$ 는 기 설치된  $i-1$ 번째 바닥판의 위치정보,  $B(i)$ 는 스터드 볼트의 위치정보,  $T(A, x, y, \theta)$ 는 형상  $A$ 의 위치를  $(x, y)$ 만큼 평행이동,  $\theta$ 만큼 회전이동 시킨 형상이다. 식 (1)에 의해서  $i$ 번째 바닥판의 최적 설치위치 정보인  $(x, y, \theta)_{optimal}$ 가 결정되며, 이는 현재 설치하려는 바닥판이 거더 위의 스터드 볼트 및 직전에 설치된 바닥판이 충돌되지 않는 조건 하에서 설계값과 가장 가까운 위치를 나타낸다.

개발된 조립시공성 사전 판단 소프트웨어를 검증하기 위한 수치 모의실험을 수행하였다. 사용한 교량모델은 Figure 6과 같이 길이 50m, 폭 10m이며, 2m 간격의 총 4개 거더로 이루어져 있다. 바닥판에는 가로 0.4m 세로 0.1m 크기의 전단포켓 16개가 배치되어 있고, 각 전단포켓에는 4개의 스터드 볼트가 접합되도록 설계되었다. 이렇게 구성된 수치모델은 설계형상으로 가정하고, 계측값을 모사하기 위해 스터드 볼트의 위치, 바닥판 조립 위치, 바닥판 조립 위치에 대한 오차 및 바닥판의 제작오차를 고려하였다. 스터드 볼트의 위치는 드론을 통해 계측된 것으로 가정하고, 설계 상의 위치에 난수발생으로 만든 오차(오차 수준:  $3\sigma = \pm 5\text{mm}$ )를 더하여 계측위치를 설정하였다. 거더의 조립 위치는 거더 평행방향의 오차(오차 수준:  $3\sigma = \pm 20\text{mm}$ )와 지면의 수직 방향에 대한 회전오차(오차 수준:  $3\sigma = \pm 1^\circ$ )를 고려하였다. 바닥판 조립위치는 바닥판 면의 수평방향의 오차(오차 수준:  $3\sigma = \pm 20\text{mm}$ )와 수직방향의 회전오차(오차 수준:  $3\sigma = \pm 1^\circ$ )를 반영하였고, 바닥판 조립오차는 바닥판 및 전단포켓 크기에 대한 오차(오차 수준:  $3\sigma = \pm 5\text{mm}$ )를 고려하였다.

이와같이 정의한 수치모델을 통해 조립 시뮬레이션을 수행하여 각 바닥판에 대한 최적의 조립위치를 계산하였다. 최적의 조립위치는 Figure 7과 같이 이전 조립된 바닥판과 새로 조립되는 바닥판 간의 좌측/우측 모서리 사이의 거리로 표현된다. 설계에서 고려한 바닥판 간의 거리 0.02m를 중심으로 결정되는 것을 볼 수 있다. 본 수치해석에 고려한 오차 수준에서는 조립실패로 예측되는 경우가 발생하지 않았으며, 모든 바닥판에 대해 최적 위치가 성공적으로 산정되었다.

26

24

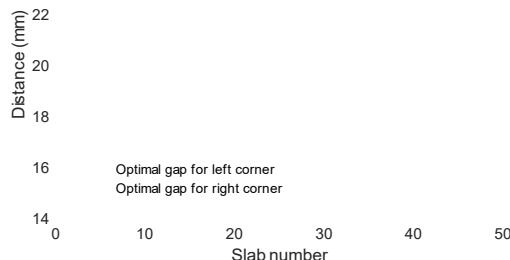


그림 1. 수치해석을 통해 계산된 최적 조립위치

#### 4. 결론

형상정보를 바탕으로 각 부재의 최적 조립위치를 산정하였으며 부재의 조립가능 여부는 해의 존재여부를 통해 판단할 수 있다. 이러한 시공 이전의 조립 시뮬레이션을 결과를 바탕으로 실제 시공 현장에서 프리팹 바닥판을 조립하여야하는 위치를 알 수 있으며, 시공 이전에 조립의 가능성은 사전에 판단할 수 있으므로 조립 실패의 위험성을 최소화할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(스마트 건설기술 개발사업 : 과제번호 21SMIP-A156887-02)

# 3차원 데이터 기반 프리팹 교량 구조물 품질관리 기술

## 3D data-based prefab bridge structure quality control technology

이순환\* · 김재규\*\*

Lee, Soonl Hwan · Kim, Jae Kyu

프리팹 교량 구조물의 정밀한 품질관리와 데이터 호환을 위하여 스캐닝의 Point Cloud 기반 3차원 품질데이터 계측과 데이터 처리 기술 연구

**핵심용어 :** 프리팹, 3D 스캐닝, 품질관리

### 1. 서론

도로 구조물의 프리팹화 트랜드에 따라 품질관리 절차와 기술의 진보가 필요하다. 공장 제작하는 프리팹의 특성에 맞도록 3차원 구조물의 형상을 계측하고 시각화하여 정밀하고 직관적 품질관리가 가능해야 한다. 3차원 스캐닝 기술을 이용하는 품질관리 기술을 개발하고 있다.

### 2. 프리팹 구조물 스키마 정의와 형상 스캐닝

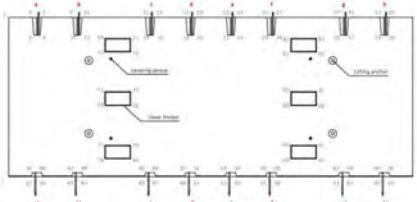


그림 1. 바닥판 형상 정의 스키마

| 번호 | 설명        | 단위             | 설명                     | 단위 |
|----|-----------|----------------|------------------------|----|
| 1  | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 2  | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 3  | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 4  | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 5  | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 6  | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 7  | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 8  | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 9  | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 10 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 11 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 12 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 13 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 14 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 15 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 16 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 17 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 18 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 19 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 20 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 21 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 22 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 23 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 24 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 25 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 26 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 27 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 28 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |
| 29 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 높은 향440mm | m  |
| 30 | 바닥판 유휴면면적 | m <sup>2</sup> | 기둥(화분대석) 높이는 낮은 향440mm | m  |

그림 2. 형상 데이터 정의

계측 속도와 데이터량을 최소로 하기 위해 프리팹 구조물의 형상을 결정하는 스키마를 정의한다.

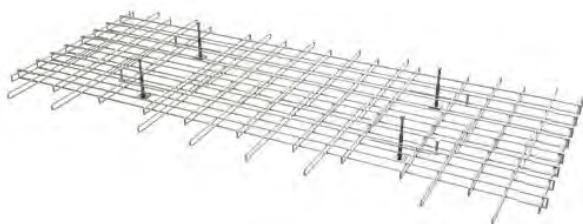


그림 3. 프리팹 바닥판 3차원 배근 설계



그림 4. 바닥판 구조 3차원 설계

3차원 설계모델을 구성하여 배근 간섭과 완성한 제품의 품질을 판단한다. 설계모델과 계측모델을 이용하여 프리팹 조립 사전 시뮬레이션을 진행할 수 있다.

\* (주)브리콘 대표이사, 공학박사 (E-mail:soonhwanlee@ebricon.com) - 발표자

\*\* (주)브리콘 주임연구원, 공학석사 (E-mail:soonhwanlee@ebricon.com)

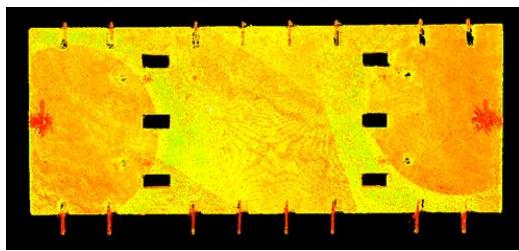


그림 5. 3차원 스캐닝 Point Cloud

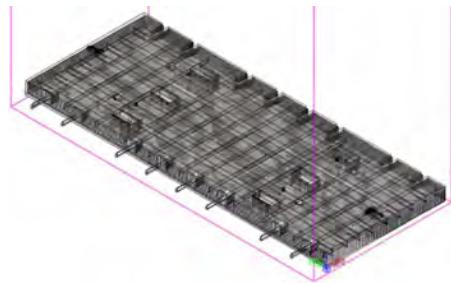


그림 6. 설계모델과 계측모델 정합

#### 4. 결론

3차원 스캐닝 데이터의 취득 속도와 데이터 후처리 시간을 단축하고 설계모델과 계측모델을 정합하여 정밀한 품질관리 정보를 디지털화하여 시공자 관리자 발주자 등 공사 관계자들이 데이터를 공유하고 품질관리 업무에 도움이 되는 절차를 수립하였다.

#### 감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 "스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호 21SMIP-A158708-02)"의 지원으로 수행되었습니다.

# 건설 메타버스 구현을 위한 핵심기술과 건설엔지니어

## Core technologies and the Preparation of Engineers for Building the Metaverse in the Construction industry

정태원\*

Chung, Taewon

인프라시설 건설산업에서 산업효율을 높이고, 공사기간을 단축하고, 안전하고 고품질의 건설을 수행하기 위한 스마트건설기술 개발분야에 많은 주목과 관심이 더해지고 있다. 전통의 건설산업의 발전방향을 제시하려는 노력은 디지털트윈의 개념을 도입하였고, 나아가 메타버스를 통한 혁신을 도모하고 있는 실정이다. 본고에서는 ICT기술의 융복합을 통한 건설산업의 혁신방향에 부응하려는 건설업계와 건설엔지니어가 해야할 노력과 가져야 할 관점에 대해 제안하고자 한다.

**핵심용어** : 인프라시설, 스마트건설, 메타버스, 디지털트윈, 융복합기술

### 1. 서론

인프라시설 건설산업의 발전을 위해 국토교통부에서 2018년 “건설산업 혁신방안”을 시작으로 “스마트 건설기술 로드맵” 등을 발표하고 본격적인 변화가 시작되었다. 2020년에는 국가연구개발사업으로 “도로실증을 통한 스마트건설기술개발사업”을 착수하며 본격적인 혁신의 방향을 제시하였다.[1][2] 인프라 건설사업의 핵심주체인 발주자들이 선도적으로 “BIM 기반의 설계, 공사, 유지관리”에 대해 활발한 논의를 이끌어내고, 자체적인 판단에 따라 설계발주단계에서 스마트기술 적용을 명문화함으로써 건설산업계에 기술발전에 대한 노력을 강하게 요구하고 있는 실정이다. 현재 진행되는 연구개발에서도 건설산업의 디지털전환이 이루어질 것을 전제로 디지털트윈 구현을 가시적인 목표로 설정하고 있다.

2020년 이후 발생한 팬데믹 상황이 지속되면서 온라인과 비대면에 따른 요구가 점차 증가하고, AI와 XR에 대한 관심이 증가하며, ICT기업을 중심으로 폭발적으로 메타버스에 대한 논의가 활발해졌다. 건설산업도 비대면 상황을 극복하기 위한 노력으로 메타버스 개념을 도입하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 전통 건설산업은 ICT기술산업과의 융복합기술 개발에 쉽게 적응하지 못하고 있는 실정이며, 건설기술인들은 이러한 상황에 혼란을 느끼고 있어서, 건설 메타버스를 중심으로 건설산업의 미래를 전망해보고자 한다.

### 2. 건설 메타버스와 디지털트윈

전통 건설산업을 아주 인색하게 말하자면 “디지털 파일을 사용하는 아날로그산업”이라고 할 수 있다. 현재 건설현장에서 각 건설단계별, 참여주체들이 생산, 유통하는 정보는 디지털 파일로 만들어져서, 아날로그 형태인 종이문서 또는 PDF형태의 파일로 전달하는 것이 일반적이다. 현재의 업무 처리방법이 그렇기도 하지만, 건설 관련 법, 제도에 따라서 실제 현장에서 아날로그 형태로 수행되고 있는 것이 현실이다. 건설산업의 디지털화는 건설과정의 정보를 디지털 정보로 전 주기에 연계되어 처리할 수 있어야 한다. 여기에 각종 ICT기술을 도입하여 획기적으로 바꿀 수 있는 방법을 찾는 것이 “건설산업의 디지털전환”이라 할 수 있다. 디지털 전환은 여러 단계의 과정을 건설기술 중심으로 단순화하고, 최적의 효율을 발휘할 수 있도록 디지털에 기반한 업무 수행방법으로 바꾸는 것이다.



그림 1. 건설산업의 디지털전환 및 XR전환

\* 정회원 · 한맥기술 기술개발센터 센터장 (E-mail:ctw@hanmaceng.co.kr) - 발표자

디지털전환된 건설산업은 건설관련 정보들을 3차원 가상공간에서 시설물 모델에 기반하여 실제와 같은 환경으로 모델링하여 디지털트윈을 구현할 수 있다. 디지털트윈은 현실의 정보를 바탕으로 현실에서 수행하기 어려운 다양한 시뮬레이션을 통한 결과분석으로 보다 분명한 의사결정을 지원할 수 있다. 여기에 VR, AR, MR 등과 같은 XR기술들을 더하여 실감형의 거울세계를 만들어낸 것을 건설 메타버스라고 할 수 있다.[3]

### 3. 건설메타버스 구현을 위한 조건

메타버스라는 개념은 1992년에 처음 나왔지만, 아직 사전적 정의는 수립되지 않았으며, 각 분야에서 필요에 따라 다르게 정의하고 있다.[4] 건설산업을 혁신하는 건설메타버스는 4가지 개념을 바탕으로 창조되어야 할 것이다. 첫째, 실감형 디지털트윈의 구현이 가능한 가시화 성능의 확보가 필요하다. 특히 인프라시설의 경우에는 반드시 갖추어야 할 성능이다. 둘째, 건설공학적 지식정보 기반의 다양한 시뮬레이션 서비스를 제공할 수 있어야 한다. 셋째, 지식의 생산자와 수요자가 자유롭게 상호작용할 수 있는 환경이 마련되어야 한다. 발주자와 건설기술자, 사용자가 같은 공간에서 소통할 수 있어야 한다. 넷째, 건설에 영향을 미치는 다수의 관련자가 참여하여 의사결정 할 수 있는 시스템을 구현하여야 한다. 건설메타버스는 건설기술이 전 유물이 아닌 생활속에서 국민의 요구를 수용하여 필요한 서비스를 제공하는 공공의 기술이 될 수 있도록 하여야 한다.

### 4. 건설기술과 건설엔지니어를 위한 제언

건설산업은 과학기술의 발전을 집약하는 형태로 발전하는 산업으로서, ICT기술의 발전을 발판으로 멋진 도약을 해야 한다. 건설산업의 생태계가 완고하지만, 건설산업의 본질이 바뀌는 것은 부인할 수 없다. 폐쇄적인 전문가들의 영역에서 누구나 참여하는 산업으로 전환되고 있다. 건설엔지니어링산업의 본질이 변화해야 하는 것이다.

건설엔지니어들은 공학기술 기반의 가치를 창출할 수 있는 융복합 능력을 갖춘 준비된 엔지니어로 도약해야 한다. 먼저 디지털전환의 의미를 충분히 이해해야 한다. 단순히 BIM소프트웨어에 익숙해지는 것이 아니라, 건설의 핵심업무를 디지털화하여 무엇부터, 어떻게 전환해야 할지를 판단할 수 있는 능력을 갖추는 것이 중요하다. 업무의 효율을 향상할 수 있는 디지털 기반의 방법을 찾는 능력이 엔지니어의 핵심 능력이 되는 것이다. 디지털전환된 건설산업에서 필요한 디지털 역량을 갖추려는 노력을 지금해야 한다.

### 5. 결론

건설산업의 생산성 향상은 수십년째 1%대를 유지하고 있고, 이를 극복하기 위한 노력은 전 세계적으로 다양한 방면에서 시도되고 있으므로, 건설산업의 혁신은 필연일 것이다. 다만 누가 먼저 가시적인 성과를 내는냐의 문제이다. 2020년 11조USD에 달하는 세계 건설시장과 국내 건설시장에서 해외 기술의 독주를 그냥 지켜볼 것인지, 우리 건설엔지니어의 노력으로 세계건설시장을 선도할 것인가의 문제이다. 건설업계와 건설엔지니어들이 사용할 수 있는 도구의 변화를 실감하고, 건설기술 중심으로 업그레이드해야 한다.

### 감사의 글

"이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 "스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호 21SMIP-A158708-02)"의 지원으로 수행하였습니다."

### 참고문헌

1. 국토교통부, 2018년6월, 건설산업 혁신방안(건설기술·생산구조·시장질서·일자리 혁신)
2. 국토교통부, 2018년10월, 건설생산성 혁신 및 안전성 강화를 위한 스마트 건설기술 로드맵
3. 서성은, 2008, 메타버스 개발동향과 발전전망 연구, 한국HCI학회, pp1450-1457
4. 석왕현, 2021, 메타버스 비즈니스 모델 및 생태계 분석, 전자통신동향분석 제 36권 제4호, pp81-91

# 반지도학습 딥러닝 모델을 이용한 신호기반 이상상태 모니터링

## Signal-based Abnormal Condition Monitoring using Semi-supervised Deep Learning Model

김병현\* · 조수진\*\*

Kim, Byunghyun · Cho, Soojin

국내 중요도가 높은 시설물을 대상으로 다양한 센서를 이용한 모니터링이 수행되고 있으며, 이때 일반적으로 설계기준에서 제시하는 안정성(Safety) 기반 허용치에 기초한 관리기준이 모니터링에 활용되고 있다. 본 연구에서는 데이터 기반의 관리기준치를 만들 수 있는 딥러닝 모델을 이용한 이상상태 모니터링 기술을 제안한다. 이때, 구조물의 일상적 상태를 명확히 알 수 없는 특징을 고려하여, 실측 데이터를 기반으로 반지도학습 모델(Semi-Supervised Learning)을 학습함으로써 다양한 이상 거동을 파악하는 방법론을 제시하고, 이를 수치해석 모델을 이용하여 검증하였다.

---

**핵심용어** : 반지도학습, 딥러닝, 이상상태, 모니터링, 시설물

### 1. 서론

대한민국의 도시화의 역사가 진전됨에 따라, 많은 수의 토목 구조물들의 노후화가 급격하게 진행되고 있다. 일례로 2020년 기준 전체 교량(33,503개소) 중 노후교량(30년 이상)은 10년 이내에 38.2%로 급증할 것으로 예상되며, 유지관리 비용은 연평균 26%씩 증가하고 있어 선제적 유지관리의 필요성이 증대되고 있다. 현재 특수교와 같이 중요도가 높은 시설물에는 가속도계, 변형률계, 변위계, Global Positioning System (GPS) 등의 센서를 이용한 모니터링 시스템이 운영되고 있다. 계측 데이터로부터 이상상태를 탐지하기 위하여 일반적으로 설계기준에서 제시하는 안전성(Safety)에 기반한 허용치를 사용한다. 설계기준의 허용치에 기반한 이상상태 관리기준은 시설물에서 발생하는 허용치 이내의 이상거동, 점진적 손상 등을 감지하는데 어려움이 있어, 축척된 실측 데이터를 기반으로 다양한 이상거동을 파악하는 방법론 개발이 필요하다.

실측 데이터에 기반한 방법은 주로 단일 계측 데이터의 통계자료에 근거하여 관리기준치를 설정하거나, 미리 설정된 한계상태(Limit State)를 넘어설 확률을 계산하여 관리 기준치를 설정하는 방식을 사용하고 있다. 하지만 여전히 다수의 이상상태에 대한 명확한 판정 기준이 없어 종합적인 모니터링 및 교량 유지보수 의사결정에는 활용되지 못하고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 최근 딥러닝 기반의 방법들을 적용하는 시도들이 보고되고 있으며 대부분의 방법론들은 사용자가 직접 라벨링을 수행해야하는 지도학습 기반의 학습 방법론을 사용하고 있다. 하지만 데이터의 대부분은 정상상태에서 계측된 데이터이기 때문에, 명확한 이상상태에서 계측된 데이터가 없어 지도학습시 데이터 불균형에 의한 비정상적 학습이 발생한다. 데이터의 불균형이 심한 시설물 계측 데이터에서 이상상태 판별의 정확도를 높이기 위하여, 정상/이상 상태를 파악 가능한 소수의 계측 데이터만을 라벨링하여 활용하는 반지도학습 기반의 딥러닝 기술 개발이 필요하다.

---

\* 학생회원 · 서울시립대학교 토목공학과/도시빅데이터융합학과 박사과정 - 발표자

\*\* 정회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과/도시빅데이터융합학과 부교수, 공학박사 (E-mail: soojin@uos.ac.kr)

## 2. 반지도학습을 이용한 시설물 이상상태 탐지

본 연구에서는 대표적인 반지도학습 기반 딥러닝 모델 중 하나인 Deep Semi-Supervised Anomaly Detection (Deep SAD)<sup>1)</sup>를 베이스라인 모델(Baseline Model)로 활용하여 연구를 수행한다. Deep SAD는 아래 식(1)과 같은 목적함수를 정의하여 반지도학습을 수행한다.

$$\min \frac{1}{n+m} \sum_{i=1}^n \|\Phi(x_i; W) - c\|^2 + \frac{n}{n+m} \sum_{j=1}^m (\|\Phi(x_j; W) - c\|^2)^{\tilde{y}_j} + \frac{\lambda}{2} \sum_{l=1}^L \|w^l\|_F^2 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

여기서,  $\Phi$  는 딥러닝 모델,  $x_i$  는 라벨링이 되지 않은 데이터,  $x_j$  는 라벨링이 된 입력 데이터,  $w$  는 모델의 각 계층의 가중치(Weight),  $W$  는 모델 전체의 가중치,  $c$  는 미리 설정된 최적화의 중심점 그리고  $\tilde{y}$  는 데이터의 라벨링이다. 여기서 라벨링이 정상일 때  $\tilde{y} = 1$  이며, 비정상일 때  $\tilde{y} = -1$  이다. 따라서 목적함수의 왼쪽 항은 라벨링이 되지 않은 데이터에 대한 학습, 가운데 항은 라벨링이 된 항들에 대한 학습 그리고 오른쪽 항은 모델 각 계층의 가중치에 따른 정규화(Normalization)을 수행한다. 위의 목적함수를 이용하여 Encoder를 학습하게 되며, 수월한 학습을 위하여 Encoder와 Decoder가 결합된 Autoencoder를 사전학습한 뒤, 이 중 Encoder 파트만을 위의 목적함수를 이용하여 재학습하는 과정을 거치게 된다.

## 3. 반지도학습을 이용한 이상상태 탐지 실험 수행

본 연구에서는 이미지 이상치 탐지에 최적화 되어 있는 Deep SAD의 Encoder 부분을 시계열 데이터에 적합한 형태로 변형한 뒤, 수치해석 모델에 의한 데이터와 실제 시설물에서 취득한 데이터를 이용하여 이상치 탐지 가능 여부를 검증한다. 여기서 수치해석 모델로는 2m 길이의 단순지지 보(Simply Supported Beam)가 활용되며, 실제 데이터로는 서울시의 협조를 얻어 실제 공용 중인 교량의 장기계측 데이터를 활용하여 이상치 여부를 감지한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 반지도학습 기반 딥러닝 모델을 이용하여 시설물의 이상상태 탐지를 수행한다. 반지도학습 모델로는 연구의 베이스라인 모델로 Deep SAD가 활용되었으며, 수치해석 데이터와 실제 공용 중인 교량의 장기계측 데이터를 활용하여 이상치 탐지를 수행하였다. 본 연구에서 제안한 반지도 학습 기반 딥러닝 모델이 추후 실제 시설물 모니터링에서 실무자들에게 좋은 가이드라인으로 제시되길 기대한다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C1011119).

## 참고문헌

1. Ruff, L., Vandermeulen, R. A., Görnitz, N., Binder, A., Müller, E., Müller, K. R., & Kloft, M. (2019). Deep semi-supervised anomaly detection. arXiv preprint arXiv:1906.02694.

# FBG 센서를 활용한 교량 성능 평가

## Performance Evaluation of Bridges Using FBG Sensors

조근희\* · 조정래\*\* · 박영환\*\*\* · 김성태\*\*\*\* · 박영수\*\*\*\*\*

Cho, Keunhee · Cho, Jeong-Rae · Park, Young-Hwan · Kim, Sung Tae · Park, Young-Soo

교량의 상시진동 변형률을 FBG 광섬유 센서로 계측하고 모드 식별, 모델 갱신의 과정을 거쳐 유한요소모델을 구축하고 교량의 성능을 평가한다. 비파괴재하시험을 통해 성능을 평가하는 기존 방법에 대해 수행 방법은 유사한 결과를 보여주어 수행 방법은 타당하다고 할 수 있다.

**핵심용어** : FBG (Fiber Bragg Grating), 광섬유 센서(Fiber Optical Sensor), SHM (Structural Health Monitoring), 모드 식별(Modal Identification), 모델 갱신(Model Updating), 성능 평가(Performace Evaluation)

### 1. 서론

최근 계측 데이터 구축 및 이를 통한 교량 모니터링을 위해 여러 교량에 센서들이 설치되고 있다. 이 연구는 교량의 상시진동 변형률을 FBG 광섬유 센서로 계측하고 모드 식별, 모델 갱신의 과정을 거쳐 유한요소모델을 구축하고 교량의 성능을 평가하고자 한다. 그리고 상시진동 계측을 통해 얻은 성능을 기존 방법인 비파괴재하시험을 통해 얻은 성능과 비교하여 수행 방법의 적용성을 확인한다.

### 2. 재료 및 방법

대상 교량은 3경간 연속 RC 라멘교로서 연장은 45 m (14.5+16.0+14.5), 폭은 21 m이다. 가운데 경간에 FBG 20 point를 새긴 광섬유 센서를 내장한 FRP rod 형태의 신경망 센서를 설치하였다. 상시진동은 70분 이상 계측하였으며, 기존 방법으로 안전성 평가할 때 필요한 비파괴재하시험을 실시하였다(그림 1 참조).

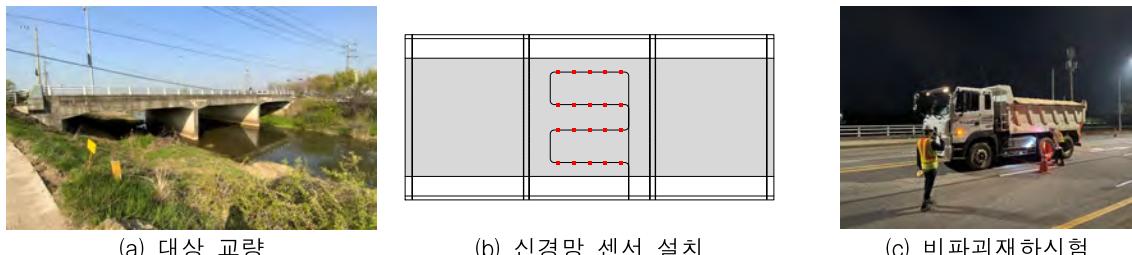


그림 1. 대상 교량의 센서 위치 및 비파괴재하시험 전경

### 3. 결과 및 분석

70분 이상 계측한 상시진동 변형률 데이터를 그림 2(a)와 같이 10분 단위로 나누어 모드 식별을 수행하였다. 모드 식별 방법으로는 부공간 규명법(Subspace Identification Method)을 적용하였으며, 반복 출현 모드만 선

\* 정희원 · 한국건설기술연구원 연구위원, 공학박사 (E-mail: kcho@kict.re.kr) – 발표자

\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 연구위원, 공학박사 (E-mail: chojr@kict.re.kr)

\*\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 선임연구위원, 공학박사 (E-mail: yhpark@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학석사 (E-mail: esper009@kict.re.kr)

\*\*\*\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사 (E-mail: youngsoopark@kict.re.kr)

별하여 모드 2개(고유진동수 5.27Hz, 6.03Hz)를 얻었다(그림 2(b) 참조). 자체개발 유한요소해석 프로그램을 사용하여 대상 구조를 셸 요소로 모델링하고 식별된 모드 2개에 대해 모델을 생성하였다(그림 2(c) 참조). 생성된 모델의 고유진동수는 5.27Hz, 6.38Hz로 식별된 모드 대비 5.8% 이내의 오차만을 보인다.



그림 2. 대상 교량에 대한 유한요소모델 구축 과정

생성된 모델을 사용하여 내하율을 구하고 이를 비파괴재하시험을 통해 구한 내하율과 비교하였다. 수행 방법은 기존 방법 대비 4.2%의 오차율만을 보여 수행 방법은 적절하다고 할 수 있다.

표 1. 기존 및 수행 방법의 (보정) 내하율 비교

| 구분    | 기존 방법(비파괴재하시험) | 수행 방법(상시진동 계측) | 오차율  |
|-------|----------------|----------------|------|
| 정모멘트부 | 2.861          | 2.742          | 4.2% |
| 부모멘트부 | 2.749          | 2.635          | 4.2% |

#### 4. 결론

RC 라멘교에 FBG 광섬유 센서를 설치하고 상시진동에 대한 변형률을 계측하여 내하율 평가를 수행하였다. 수행한 방법의 내하율은 기존 방법의 내하율과 4.2%의 오차율만을 보여 수행한 방법은 적절하다고 볼 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Van Overschee, P., De Moor, B. (2012). Subspace identification for linear systems: Theory – Implementation – Applications. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media.
- 국토교통부, 한국시설안전공단. (2019). 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단 편).

# 5K Bridge 기술 로드맵

## Technology Roadmap for 5K Bridge

김호경<sup>1)</sup> · 박원석<sup>2)</sup> · 이정희<sup>3)</sup> · 김선중<sup>4)</sup> · 조경민<sup>5)</sup> · 문주혁<sup>6)</sup> · 송준호<sup>7)</sup> · 이명재<sup>8)</sup> · 추진교<sup>9)</sup>  
Kim, Ho-Kyung · Park, Wonsuk · Lee, Jungwhee · Kim, Sunjoong · Cho, Kyungmin · Moon, Juhyük  
· Song, Junho · Lee, Myeongjae · Choo, Francois

국토교통부는 “국토교통 2050 미래기술 도출을 위한 조사분석연구(2020)”를 통하여 2050년까지의 건설분야 유망기술 50개를 선정한 바 있으며, 이 중 하나인 “신소재 적용 하이브리드 5K Bridge” 기술에 대한 기술 로드맵을 후속 기획과제를 통하여 개발하였다. 5K Bridge 기술은 주경간 5km의 초장경간 교량을 비롯하여 부유식교량 및 수중교량까지 포함하는 미래형 다변화 연결기술을 의미한다. 이 논문에서는 5K Bridge 기술개발을 위한 향후 30년의 기술 로드맵과 그 도출과정을 소개하였다.

**핵심용어** : 5K, 미래형 교량, 초연결, 초장대교량, 기술 로드맵

### 1. 서론

이 논문에서는 “신소재 기반 하이브리드 5K Bridge 기술개발 사전기획”에서 수행한 내용을 바탕으로 5K Bridge 기술의 중단기 및 장기 전망, 기술개발의 비전과 목표, 중점 추진분야, 추진전략 및 기술 로드맵을 간략히 소개하였다. 이 기획연구에서는 현재의 기술수준을 제고하고, 세계 최고 수준을 뛰어넘어 기술적, 경제적 부가가치가 가장 높은 리딩 플레이어의 위치에 이르기 위해 필요한 기술을 도출하고자 하였으며, 제안된 기술의 체계적이고 신속한 개발을 통하여 해외 건설시장에서의 경쟁력을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

### 2. 5K Bridge 기술의 중단기 및 장기 전망

우리나라의 장대교량 기술은 1970년대부터 해외기술 의존도를 꾸준히 낮춰왔으며, 현재의 기술수준은 기술자립도와 역량 면에서 세계적 수준에 도달하였다. 1970년대 태동기와 1980년대에 걸친 3세대 기술을 지나 2020년대 현재는 4세대 기술이 완성되어 가고 있는 단계이며, 4세대 기술의 완성에 필요한 단증기 요구기술과 4세대 완성 이후 예상되는 장기적 기술을 다음 표 1과 같이 정리하였다.

표 1. 5K Bridge 기술의 중단기 및 장기 전망

| 4세대 완성에 필요한 예상 요구기술<br>(중단기)   | 5K Bridge 장기(2035~2050) 기술 이슈   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 횡단방식 다변화</li><li>- 고성능, 고기능, 고강도, 경량, 친환경 신소재</li><li>- 스마트 팩토리형 유지관리</li><li>- 설계-제작-설치-운영-보수-해체-재활용</li><li>- 차율주행차량 관제 등 사용자/관리자 서비스 플랫폼 구축</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>○ (예상 주요 이슈) 내륙횡단 to 대륙횡단, 탄소중립, 무인화</li><li>○ (예상 주요 기술)<ul style="list-style-type: none"><li>- 신형식교량 (하이퍼루프, 수중교량 등)</li><li>- 신 재료 (초경량+고강도)</li><li>- 신 최적형상 (Morphology optimization)</li><li>- 신 메가스트리쳐 (Civil dome 등)</li><li>- 다기능, 다목적 multifunctional (network, pipeline 등)</li></ul></li><li>○ 탄소배출 규제 및 신재생에너지 연계</li></ul> |

- 1) 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:hokyungk@snu.ac.kr) – 발표자  
2) 정희원 · 목포대학교 건설공학과 교수, 공학박사 (E-mail:wonsuk@mokpo.ac.kr)  
3) 정희원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:jwhee2@dankook.ac.kr)  
4) 정희원 · 서울시립대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (E-mail:sunjoong@uos.ac.kr)  
5) 비회원 · 와이엔글로벌 대표, 공학석사 (E-mail:min.cho@wisenglobal.com)  
6) 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:juhyukmoon@snu.ac.kr)  
7) 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:junhosong@snu.ac.kr)  
8) 정희원 · 유신코퍼레이션 부사장, 공학박사 (E-mail:mj.lee@yooshin.com)  
9) 정희원 · 건국대학교 교수, 공학박사 (E-mail:jfchoo@konkuk.ac.kr)

### 3. 기술개발의 비전, 목표, 중점 추진분야 및 추진전략

5K Bridge 기술개발의 비전은 “세계를 하나로 이어주는 미래형 초연결 기술실현”, 정책목표를 “미래 교통수요와 기후변화에 대비하는 쇄침단 Giga-crossing의 글로벌 경쟁력 확보”로 설정하고, 4대 중점분야, 3대 추진전략을 그림 1과 같이 수립하였다.

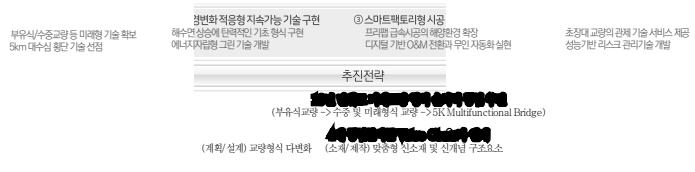


그림 1. 신소재 기반 하이브리드 5K Bridge 기술개발 비전체계

### 4. 5K Bridge 기술로드맵 및 전략과제 도출

중점 분야와 추진 전략을 바탕으로 기술개발 로드맵을 개발하였으며, 6개 전략과제를 선별하였다. 매크로 로드맵을 그림 2에, 전략과제를 표 2에 나타내었다.

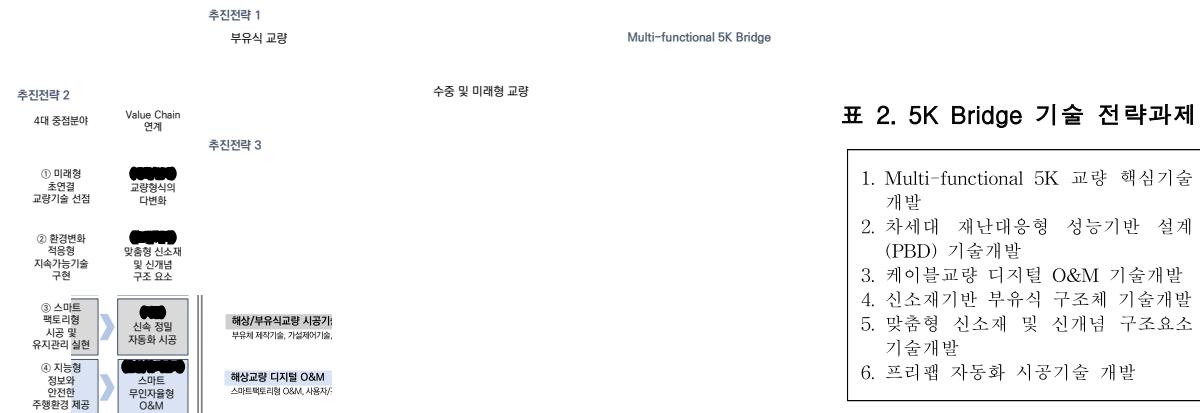


그림 2. 신소재 기반 하이브리드 5K Bridge 중장기 매크로 기술로드맵

표 2. 5K Bridge 기술 전략과제

1. Multi-functional 5K 교량 핵심 기술 개발
2. 차세대 재난대응형 성능기반 설계 (PBD) 기술개발
3. 케이블교량 디지털 O&M 기술개발
4. 신소재기반 부유식 구조체 기술개발
5. 맞춤형 신소재 및 신개념 구조요소 기술개발
6. 프리팹 자동화 시공기술 개발

### 5. 결론

이 논문에서는 장대교량 분야에서 한국의 기술 경쟁력을 확고히 하기 위하여 개발한 기술 로드맵을 소개하였다. 미래형 교량기술은 살아있는 유기체와 같이 시대의 요구에 따라 다변화할 것으로 보이며, 제시된 기술은 현 시점에서 실현 가능성성이 높은 것들로 이루어져 있다. 향후 단계별 기술추이를 반영하되 가능한 한 빠른 시일 내에 집중력 있게 개발함으로써 첨단기술을 바탕으로 하는 해외 건설시장에서의 경쟁력을 높이는 것이 중요할 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “신소재 기반 하이브리드 5K Bridge 기술개발 사전기획”을 통하여 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 국토교통부, 국토교통과학기술진흥원, 2020, 국토교통 2050 미래기술 도출을 위한 조사분석 연구 최종보고서 (R&D/19RDPP-C164189-01)

# 5km급 초장대교량에 대한 시설계

## Concept Design of 5km-class Super Long Span Bridge

김창수\* · 조경식\*\* · 조의경\*\*\*

Kim, Chang Su · Cho, Kyung Sik · Cho, Eu Kyeong

5km급 초장대교량에 대한 실현가능성을 검토하기 위하여 현재까지의 최신기술과 향후 개발될 기술을 토대로 시설계를 수행하여 거동특성과 문제점 등을 분석하였다. 주케이블의 재료로는 강선과 탄소섬유(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)를 적용하여 비교하고, 보강거더 형상은 현재까지 개발된 3,000m급 메시나해협대교의 3실 박스단면 형상으로부터 내풍안정성이 확보될 수 있는 다층(multi-layer) 단면형상을 가정하여 검토를 수행하였다. 또한 주탑 재료는 콘크리트와 강재를 비교 검토하고 이에 따른 시공방법을 검토하였다. 부속 장치에 대해서는 신축이음장치, 받침, 링크슈 등에 대한 적용성을 검토하였다.

**핵심용어 :** 5km급, 초장대교량, 시설계, 탄소섬유(CFRP), 다층(multi-layer) 단면형상

### 1. 서론

주경간장이 5,000m이면 일반적인 주케이블의 규모가 과대해져 주케이블의 시공이 어려워 현수교 시스템 구성이 불가능할 수도 있다. 따라서 주케이블의 재료로써 중량이 작고 인장강도가 높은 CFRP로 대체했을 때의 적용성을 검토한다. 먼저 주경간장의 변화에 따른 기본적인 거동특성을 파악하기 위해 2차원(2D)의 개략검토를 수행하였다. 주케이블 길이를 고려한 기하비선형 해석으로 검토를 수행하고 교량규모에 적합한 주탑 강성을 고려하여 평형해가 구해지는 과정으로 검토를 수행하였다. 이후 시설계에서는 주경간장 5,000m에 대한 시스템을 선정하여 각 하중별 단면력을 산정하였으며 모드해석과 지진해석을 수행하여 거동특성을 분석하였다.

### 2. 2D 개략검토

3경간 현수교의 구성으로 주경간장 2,000m를 기준으로 500m씩 증가시키면서 주경간장 5,000m까지 2차원의 개략검토를 수행하였다. 보강거더 형상으로 2,000m급은 병렬박스(twin box), 3,000m급은 3실 박스단면, 4,000m급은 박스와 원형의 혼합단면, 5,000m급은 다층 단면형상으로 가정하였다. 세그비는 1/10에서 1/12까지의 변화를 고려하였으며, 주케이블의 재료를 인장강도 2,060MPa의 강선 케이블과 인장강도 3,000MPa의 CFRP 케이블을 적용했을 경우 주케이블 장력 및 처짐은 다음 그림 1과 2와 같다.

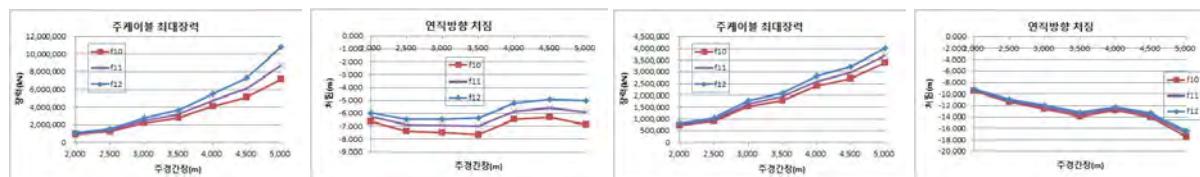


그림 1. 강선 주케이블의 장력 및 연직 처짐

그림 2. CFRP 주케이블의 장력 및 연직 처짐

주경간장이 증가될수록 CFRP 케이블의 자중이 크게 증가되지 않으므로 강선 케이블에 비해 장력수준이 현저하게 저하됨을 보여주고 있으며, 경간장이 증대될수록 강선 케이블 보다는 CFRP 케이블의 적용성이 우수한 것으로 판단된다. 그러나 처짐 측면에서는 CFRP 케이블을 적용할 경우 보강거더 처짐이 크게 발생하고 있다. 이것은 CFRP의 자중이 가볍고 단면적이 작으므로 주케이블의 축방향 강성이 강선 케이블에 비해 훨씬

\* 정회원 · (주)디엠엔지니어링 전무, 공학석사 (E-mail:brideng@dm-eng.com) – 발표자

\*\* 정회원 · (주)디엠엔지니어링 사장, 공학박사 (E-mail:drchoks@dm-eng.com)

\*\*\* 정회원 · (주)디엠엔지니어링 부사장, 공학박사 (E-mail:ekcho@dm-eng.com)

작기 때문인 것으로 판단된다.

### 3. 시설계

주경간장 5,000m의 현수교에 대해 시설계를 수행하였으며, 강선 케이블과 CFRP 케이블을 적용했을 경우의 장력 및 케이블 단면적은 다음 표 1과 같다. CFRP 적용시 최대 장력은 48% 수준, 케이블 단면적은 33% 수준으로 감소된다.

표 1. 주케이블 장력 및 단면적 비교

| 구분       | 강선 케이블(2,060MPa) |               |                     | CFRP 케이블(3,000MPa) |               |                     |
|----------|------------------|---------------|---------------------|--------------------|---------------|---------------------|
|          | 최대장력<br>(kN)     | 기준강도<br>(MPa) | 케이블<br>단면적( $m^2$ ) | 최대장력<br>(kN)       | 기준강도<br>(MPa) | 케이블<br>단면적( $m^2$ ) |
| 사용하중조합   | 6,561,208        | 927           | 7.078               | 3,083,194          | 1,200         | 2.569               |
| 극한한계상태조합 | 7,754,511        | 1,082         | 7.165               | 3,748,974          | 1,576         | 2.378               |

표 2와 같이 모드해석의 결과를 비교하면 CFRP를 적용할 경우 주케이블의 단면적이 작아 강성이 저하되나, 케이블 중량이 작아 교직 및 연직 진동수는 강선 케이블과 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 비틀림 진동수에 있어서는 CFRP 케이블이 강선 케이블에 비하여 1.6배 이상 크게 발생하고 있다. 이는 CFRP 케이블의 중량이 작기 때문에 고차모드에서 비틀림이 발생하는 것으로 판단되며, 비틀림 진동수가 크다는 것은 내풍특성에서 유리한 측면이 있음을 알 수 있다.

표 2. 모드해석 비교

| 구분     | 강선 케이블(2,060MPa) |         | CFRP 케이블(3,000MPa) |               |
|--------|------------------|---------|--------------------|---------------|
|        | 주기(sec)          | 진동수(Hz) | 주기(sec)            | 진동수(Hz)       |
| 교직 1차  | 40.5             | 0.0247  | 38.9 (0.96)        | 0.0257 (1.04) |
| 연직 1차  | 24.3             | 0.0411  | 24.0 (0.99)        | 0.0417 (1.01) |
| 비틀림 1차 | 11.7             | 0.0856  | 7.1 (0.61)         | 0.1402 (1.64) |

CFRP를 적용할 경우 변위가 크게 발생하므로 주탑 높이를 낮추어서(케이블 새그비 감소) 케이블의 축방향 강성, 케이블량, 처짐 등의 경향을 피악하였다. CFRP 케이블을 적용할 경우에는 일반적인 새그비(1/10)가 아닌 주탑 높이를 현저하게 낮춘 새그비를 적용하는 것이 변위 제어에 유리하나, 이 경우 케이블 단면적 증가에 따른 비용분석이 수반되어야 한다.

표 3. CFRP 케이블의 새그비에 따른 결과

| 구분      | 강선케이블<br>(f=1/10) | CFRP<br>(f=1/10) | CFRP<br>(f=1/15) | CFRP<br>(f=1/20) | CFRP<br>(f=1/25) | CFRP<br>(f=1/30) |
|---------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 활하중     | -6.812            | -15.513          | -13.665          | -12.664          | -11.569          | -10.407          |
| 연직처짐(m) | (100%)            | (228%)           | (201%)           | (186%)           | (170%)           | (153%)           |

### 4. 결론

주경간장 5,000m급 현수교에서 CFRP 케이블을 적용한 경우에 적용성을 분석하였다. 케이블 장력과 중량을 감소시키는데 효율적이지만 변위가 크게 발생하는 부분에 대한 상세한 검토가 필요하다. 또한 주탑의 재료에 따른 시공방안 및 부속장치에 대해서는 충분한 가능성은 확인하였다.

### 참고문헌

1. Cable Supported Bridges: Niels J. Gimsing, 2012, John Wiley & Sons, Ltd

# 주경간장 2km 철도도로 병용교 컨셉설계

## Concept Design for the 2km Main Span of the Railroad Combined Bridge

김홍식\* · 이의택\*\* · 조한민\*\*\*

Kim, Hong Sik · Lee, Eui Taek · Cho, Han Min

평화엔지니어링은 케이블교량의 해외진출을 목적으로 케이블교량 글로벌 연구단과 미래형 케이블교량의 개발을 지속적으로 수행하고 있다. 이러한 미래형 케이블교량의 개발을 위하여 주경간장 2km 철도도로 병용교 컨셉설계 과제를 수행하고 있으며, 이를 위해 Test Bed 교량을 선정하여 철도도로 병용교의 설계기준을 정립하고 재료, 미래형 설계항목을 결정하는 컨셉설계를 수행하였다.

**핵심용어** : 케이블교량, 해외진출, 철도도로 병용교, 설계기준, 컨셉설계

### 1. 서론

교량의 설계에 있어 주요 하중은 고정하중, 풍하중, 지진하중 등이 있으며 일반도로교와 철도도로 병용교에 적용하는 하중은 큰 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 활하중인 철도 및 차량하중의 재하방식과 조합방법은 교량의 규모를 결정하는 중요한 요소가 된다. 하지만 현재 도로와 철도가 합쳐진 케이블교량의 설계기준 연구는 부족한 실정이며, 철도도로 병용교는 일반적인 철도교보다 활하중 재하시 보강거더 단부에서 큰 꺾임각이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 미래형 철도도로 병용교의 설계기준 정립 및 개발하고 국내 기술의 해외진출에 대한 발판을 마련하고자 한다.

### 2. 대상교량

철도도로 병용교의 미래형 케이블교량 설계기술 개발 연구를 수행하기 위하여 인도네시아의 Sunda Strait Bridge를 Test Bed로 선정하였다(그림 1). 2014년 건설 예정이었던 Sunda Strait Bridge는 주경간장 2,200m의 현수교로 강재주탑 및 트리플 강재 박스거더로 구성되어 있다. 하지만 이러한 교량은 철도도로 병용교로 활용시 낮은 진동수가 발생하여 강성의 증가가 필요하며, 보강거더 강성 증가시 철도 및 도로의 활하중 증가로 인해 케이블의 강성을 확보하기 위한 중량 증가가 불가피하다. 또한 철도로 인한 신축량 및 단부의 꺾임이 크게 발생하여 별도의 장치 도입이 필요하다.

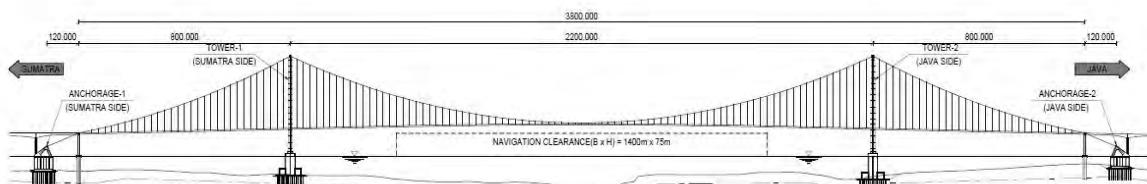


그림 1. Sunda Strait Bridge 개요

### 3. 철도도로 병용교 컨셉설계

Sunda Strait Bridge의 기본모델을 바탕으로 미래형 컨셉인 강합성 거더와 CFRP 케이블에 대한 적용성을 검토하였다. CFRP는 최근 몇 년간 주목받은 재료로 기존 강재에 비해 높은 내구성, 가벼운 무게와 부식에

\* 정회원 · 평화엔지니어링 구조본부 부사장, 공학석사 (kimhs4962@pec.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 평화엔지니어링 구조본부 이사, 공학석사 (etlee@pec.kr)

\*\*\* 정회원 · 평화엔지니어링 구조본부 사원, 공학박사 (chm1247@pec.kr)

대한 저항성이 높아 미래형 재료로 적합하다. CFRP 케이블 적용을 통하여 기존 강재 보강거더 대신 강합성 보강거더를 활용시 사용성이 향상되는 것을 확인하였으며, 추가적으로 현수교의 새그비 1/9과 1/10에 대해 구조해석을 수행하고 결과를 도출하였다. 구조해석 결과 새그비 1/10에 비해 1/9은 주탑 높이를 약 24m 높게 건설해야 하며, 이로 인해 케이블량이 감소하게 되고 감소된 케이블은 사용성 감소로 이어지게 된다. 하지만 이러한 새그비 변화에 대해 철도하중 재하시 종방향 경사는 약 0.5%만큼 증가하여 영향이 미미한 것으로 나타났다. 또한 연구대상 교량은 철도를 지지하기 위한 별도의 종형이 없으며 거더 자체가 철도를 지지하는 형식으로 철도 종형의 2분산 또는 4분산 방식을 적용할 수 없다. 따라서, 신축량은 별도의 Transition Girder로 흡수하고 꺾임각은 수직변형이 가능한 특수 철도 체결장치를 사용하여 곡률을 완화시키는 방법이 적합할 것으로 판단된다(그림 2). 철도로 인한 단부의 꺾임은 기존 일반침목 사용시 과도한 굴절이 발생하여 안정성에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 각 꺾임 분산장치를 개발하여 교량 단부의 일반침목 설치 구간에 각 꺾임 분산장치를 활용하여 철도 굴절에 대한 영향을 최소화하였다(그림 3~5).

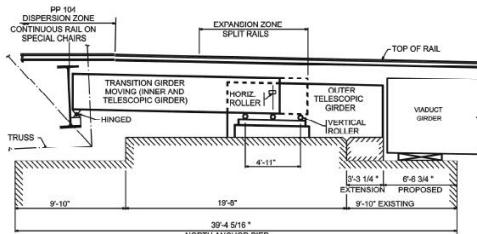


그림 2. Transition Girder 활용방안

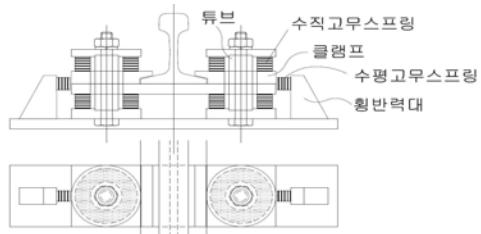


그림 3. 각 꺾임 분산장치 개요



그림 4. 철도의 일반침목 적용

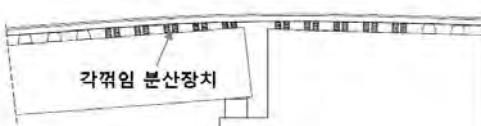


그림 5. 철도의 각 꺾임 분산장치 적용

#### 4. 결론

본 연구는 인도네시아의 Sunda Strait Bridge를 Test Bed로 선정하여 기존 모델에 대한 안정성 분석 및 문제점 해결을 통한 컨셉설계를 수행하였다. Sunda Strait Bridge에 대한 철도도로 병용교 검토를 수행한 결과 강성의 추가 확보 필요 및 보강거더 강성 증가로 인한 케이블의 적용성 검토가 필요하였다. 또한 교량의 신축량 및 단부의 굴절에 의한 꺾임을 방지하기 위한 대책이 필요하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 컨셉설계로 강합성 거더 및 신소재를 활용한 CFRP 케이블 적용으로 철도도로 병용 현수교의 안정성을 확보하였으며, 교량 Transition Girder 및 각 꺾임 분산장치 활용으로 기존 교량 대비 우수한 성능의 안정성을 확보하였다. 하지만 아직까지 철도도로 병용교에 확립되지 않은 도로 및 철도하중 조합방법에 대한 설계기준을 정립해야 하며, 이에 따른 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다. 나아가 설계기준 및 기술에 대한 확보를 통해 국내 건설엔지니어링의 경쟁력을 제고하여 해외진출의 발판을 마련해야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원(16SCIP-B119960-01)에 의해 수행되었습니다. 지원에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- Application of CFRP Cables in Super Long Span Cable Supported Bridges- A feasibility study, Filip Banck & Oskar Rosén Almberg, Sweden 2014

# 수중터널 기술의 최근 연구동향 및 전망 분석 기술의 현재와 미래

## Submerged Floating Tunnel: State of the Art and Perspective

김기영\* · 이행기\*\*

Kim, Kiyoung · Lee, Haengki

대륙간, 대륙-섬간 육상교통 연결수단의 필요성에 따라 최근 수중터널은 다양한 측면에서 연구되어 왔다. 특히 대단위 물류수송이 증가하면서 수중터널이 현실적이고 경제적인 해상연결 수단의 하나로 고려되고 있다. 본 논문은 수중터널의 기술수준 및 연구개발방향과 전망에 대해 간략히 기술한다. 가장 많이 연구되고 있는 계류선 형식 수중터널을 구성하는 터널 함체, 계류선 시스템에 대한 환경적, 기술적 문제점과 함께, 이 문제점을 해결하기 위해 시도되고 있는 연구주제를 소개한다.

**핵심용어** : 수중터널, SFT, 기술현황, 전망

### 1. 서론

해저공간은 인간이 생존할 수 없는 공간으로, 그동안 어둡고 위험하며 언젠가 극복해야 할 자연환경으로 취급받아 왔다. 해저공간은 지금도 지구 상에서 가장 개발이 더딘 곳 가운데 하나이나, 미래 개발이 필수적인 차원의 보고로 떠오르고 있고, 교량 및 터널기술의 발전에 따라 육상교통수단을 통한 물류 수송의 범위도 넓어지고 있는 추세다. 특히 대단위 물류수송의 증가에 따라 해상연결 프로젝트의 현실성과 타당성에 대한 산학계의 긍정적 시선과 실제적 연구가 시작되면서, 다양한 해상연결 수단에 대한 연구, 설계, 검증이 수행되고 있다. 본 논문에서는 이 가운데 수중터널(submerged floating tunnel, SFT)에 관련된 현재 기술수준, 연구개발 방향에 관해 개략적으로 설명하고, 향후 발전방향을 간략히 짚어본다.

### 2. 수중터널 기술동향

#### 2.1. 수중터널의 정의와 구조

수중터널은 거리가 다소 떨어져 있는 두 육지를 경제적이고 빠르게 연결할 수 있는 잠재적 해법이다[1]. 수중터널은 지중터널, 침매터널과는 달리 해저면 위에서 지지 시스템에 의해 수중으로 연결되는 터널이다[2]. 수중터널은 다른 구조물 대비 환경 문제 유발이 적고, 바람, 지진 등 자연외력에 저항력이 크다[1]. 더욱이 수중터널은 일반적으로 해수면에서 40 m 보다 깊은 위치에 건설되기 때문에 선박의 통행을 방해하지 않는다[3]. 세계적으로 아직 수중터널이 건설되거나 운용 중인 사례는 없으나, 우리나라를 비롯해 노르웨이, 이탈리아, 일본 등 여러 국가의 유관기관에서 수중터널 건설에 많은 관심을 보이고 있다[4].

수중터널은 차량이나 열차의 통행경로 역할을 하는 터널 함체와, 터널 함체의 움직임을 구속하는 지지 시스템으로 구성되어 있다. 지지 시스템에는 다양한 종류가 있는데, 크게 자중과 부력의 관계에 따라 크게 (1) 부력을 자중보다 크게 조정하고, 계류선을 통해 터널과 해저면을 연결하는 계류선 방식과, (2) 부력을 자중보다 작게 조정하고 부력 폰툰(pontoon)을 통해 수면 방향으로 지지력을 발생시키는 폰툰 방식의 2가지가 가장 많은 주목을 받고 있다[5].

#### 2.2. 수중터널 함체 연구동향 및 전망

수중터널의 기술적인 난제는 크게 해석/설계, 시공·재료, 안전/유지관리 등 모든 분야에 산재해 있다. 수심 변동이 지속적으로 발생하므로 구조물에 작용하는 압력 역시 변하며, 고염의 해수로 인해 철근 부식과 콘크리트 열화의 위험성 역시 크다. 누수 또는 화재가 발생할 경우 대형 사고가 초래될 위험성이 높을 뿐 아니라, 사고시 폐쇄적 수중환경으로 인해 방재와 안전확보가 어렵다는 단점 역시 존재한다. 또한 수중터널은 내부

\* 한국과학기술원 스마트수중터널연구센터 연구교수, 공학박사 (E-mail:kiyoungkim@kaist.ac.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:haengki@kaist.ac.kr)

폭발, 쓰나미, 지진, 충돌 등 강력한 외부 동적하중에 노출될 위험이 상존한다[6].

### 2.3. 수중터널 계류선 연구동향 및 전망

계류선 방식은 최근 수중터널 지지 시스템으로 많이 연구되고 있는 방식이다. 계류선 방식은 노르웨이 Hgfsjord 프로젝트[7], 일본의 Funka bay, Daikokujima 실험터널[8]에서 지지 시스템으로 채택된 바 있으며, Messina 해협 터널[9], 목포-제주 터널[10]에서도 고려된 바 있다. 계류선 방식은 해저면에 고정된 앵커와, 터널 함체와 앵커를 연결하는 계류선으로 이루어진다. 폰툰 방식이 전체 수중터널계의 수직방향 강성에 영향도 미치지 못하는 반면, 계류선 방식은 터널 함체의 수직 및 수평 거동을 효과적으로 구속할 수 있다[7]. 대신 폰툰 방식은 깊이가 깊고 수면파가 잔잔한 해역에서 가장 적합한 방식으로 평가받고 있다[11].

수중터널이 설치되는 해저공간은 파랑 및 조류 등이 존재하며 지반이 불안정하다는 측면에서 지중터널보다 불리하다. 또 일반적인 지중터널과는 달리 수중터널은 해류에 의해 상당한 크기의 동적 하중이 끊임없이 유발되는 유체동역학적 환경에 설치된다[11]. 이러한 특수한 환경 때문에 수중터널의 계류선 시스템, 특히 함체와 해저면을 연결하는 앵커 부분에 파손의 우려가 큰 것으로 연구된 바 있다.

## 3. 결론

수중터널은 최근 경제적이고 신속한 해상교통수단으로 주목을 받고 있다. 수중터널은 수심이 깊은 곳이나 협곡 등에 적용가능하며, 기후 영향을 최소화할 수 있으며, 연약지반에도 시공이 가능하다는 장점이 있으나, 그러나 고수심 지역에 장거리 시공시 공사비 문제가 발생할 수 있다. 따라서 수중터널은 협곡 등으로 인해 침매터널 및 해저지중터널 시공이 어려운 협곡 등의 지형에 부분적으로 시공되는 방안이 적극 고려되고 있다. 향후 해저환경의 특수성에 의한 기술적 한계가 극복되면, 수중터널은 해상교통수단 건설에 있어서 훌륭한 옵션이 될 것으로 전망된다.

## 감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2017R1A5A1014883)이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Mandara, A., Russo, E., Faggiano, B. & Mazzolani, F. M. (2016), Analysis of Fluid-Structure Interaction for a Submerged Floating Tunnel, Procedia Engineering, 166, 397-404.
2. Time, C. W. (1996), Submerged Floating Tunnels: A Concept Whose Time Has Arrived, Tunnelling and Underground Space Technology, 11(4), 505-510.
3. Chen, Z., Xiang, Y., Lin, H. & Yang, Y. (2018), Coupled Vibration Analysis of Submerged Floating Tunnel System in Wave and Current, Applied Sciences, 8(8), 1311
4. Engebretsen, K. B., Jakobsen, K. K., Haugerud, S. A. & Minoretti, A. (2017), A Submerged Floating Tube Bridge Concept for the Bjørnafjord Crossing: Marine Operations, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, pp. V07BTG6A027.
5. 박우선, 한상훈(2012), 해중터널이란? 2012년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 자료집, 대한조선학회, 5.31-6.1 대구, 2037-2040.
6. Lu, W., Ge, F., Wang, L., Wu, X. & Hong, Y. (2011), On the Slack Phenomena and Snap Force in Tethers of Submerged Floating Tunnels under Wave Conditions, Marine Structures, 24(4), 358-376.
7. Jakobsen, B. (2010), Design of the Submerged Floating Tunnel Operating under Various Conditions, Procedia Engineering, 4, 71-79.
8. Kanie, S. (2010), Feasibility Studies on Various Sft in Japan and Their Technological Evaluation, Procedia Engineering, 4, 13-20.
9. Martire, G., Faggiano, B., Mazzolani, F. M., Zollo, A. & Stabile, T. A. (2010), Seismic Analysis of a Sft Solution for the Messina Strait Crossing, Procedia Engineering, 4, 303-310
10. Jin, C., Chung, W. & Kim, M. (2019), Effects of Submergence Depth of Submerged Floating Tunnel on Global Behaviors under Waves and Earthquakes, OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE, pp. 1-7.
11. Skorpa, L. (2010), Developing New Methods to Cross Wide and Deep Norwegian Fjords, Procedia Engineering, 4, 81-89
12. Martinelli, L., Barbella, G. & Feriani, A. (2011), A Numerical Procedure for Simulating the Multi-Support Seismic Response of Submerged Floating Tunnels Anchored by Cables, Engineering Structures, 33(10), 2850-2860.

# 교량상 화재에 대한 리스크 평가 체계화 연구

## A study on the systematization of risk assessment for fires on bridges

손윤기\* · 정철현\*\* · 김호경\*\*\* · 송준호\*\*\*\* · 조의경\*\*\*\*\*

Son, Yun Ki · Jung, Cheol Heon · Kim, Ho Kyung · Song, Jun Hon · Jo, Eui Kyung

국내 케이블 교량의 화재 리스크를 평가하기 위해 산학의 협업을 통해 리스크 분석방법론을 정립하고 화재해석의 영향인자 분석 및 공용중에 있는 국내 대표적인 사장교와 현수교에 대한 화재해석을 수행하였다. 이 결과를 이용하여 케이블 교량의 화재 리스크를 평가하였다. 교량상 화재에 대한 리스크 분석 결과, 대상 교량 모두 화재 리스크는 기준 리스크보다 낮아 교량 붕괴에는 이르지 않을 것으로 분석되었으나, 추가 통계 자료 분석결과 갓길 차선의 화재확률이 높아지거나 화재 위험차량의 교통량 증가 시 리스크는 높아질 수 있다. 이러한 화재 리스크의 주요 인자에 대한 평가방법은 케이블 교량 이외의 교량형식에 대해서도 적용할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 케이블 교량, 화재 리스크, 리스크 분석, 온도해석

### 1. 서론

사장교, 현수교 등 장대 케이블교량에서 차량 화재가 발생할 경우 케이블(사장케이블, 메인케이블, 행어케이블, 타이다운 케이블), 주탑, 보강거더 등의 손상이 발생할 수 있다(그림 1). 특히 케이블의 손상정도는 화재차량의 종류, 화재의 발생위치, 이때의 풍향 및 풍속 등에 영향을 크게 받는다. 따라서 이러한 케이블 교량의 화재 리스크 평가를 위해서는 리스크 평가 방법, 화재해석, 화재 영향인자 분석 등이 수행되어야 하며, 실 교량의 적용 및 평가도 이루어져야 한다.

본 연구에서는 표 1과 같은 산학 협업을 통해 리스크 분석 방법, 차량화재 해석 및 실 교량(사장교, 현수교)의 적용 및 평가로 국내 케이블교량에 대한 리스크 평가연구를 수행하였다.

| 과업내용              | 소 속     | 대표연구자   |
|-------------------|---------|---------|
| 화재 리스크 평가 방법론     | 서울대학교   | 송준호 교수  |
| 케이블 교량 화재 해석      | 단국대학교   | 정철현 교수  |
| 케이블 교량 화재시 바람의 영향 | 서울대학교   | 김호경 교수  |
| 사장교에 대한 화재리스크 평가  | DM엔지니어링 | 조의경 부사장 |
| 현수교에 대한 화재리스크 평가  | 엔비코컨설팅트 | 손윤기 부사장 |

표 1. 리스크 평가를 위한 업무 및 조직구성



그림 1. 교량상 화재(Bay bridge, 미국)

### 2. 리스크 분석 방법

화재의 리스크는 화재의 발생빈도와 화재 발생 시 시스템의 파괴확률의 곱으로 평가되며, 이렇게 산정된 화재 리스크가 기준 리스크보다 작음을 확인하는 과정으로 수식 (1)과 같이 리스크 분석이 수행된다.

$$\lambda_{Failure} = \sum_{i=1}^{n_H} P(Failure | H_i) \lambda_{H_i} < \lambda_{th} \quad (1)$$

\* 정회원 · (주)엔비코컨설팅트 부사장, 공학석사 (E-mail: yunki@envico.biz) – 발표자

\*\* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail: chchung5@dankook.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail: hokyungk@snu.ac.kr)

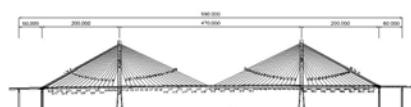
\*\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail: junghosong@snu.ac.kr)

\*\*\*\*\* 정회원 · DM엔지니어링 부사장, 공학박사 (E-mail: ekcho@dm-eng.com)

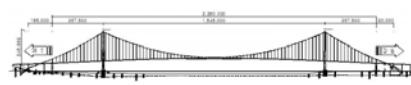
여기서  $\lambda_{Failure}$ 는 화재로 인한 연간 교량 파괴빈도(화재 리스크)이며,  $\lambda_{H_i}$ 는 연간 교량 화재 발생빈도이고,  $P(Failure | H_i)$ 는 화재 시나리오별 화재 시 교량의 파괴확률이다. 위 수식과 같이 화재 리스크  $\lambda_{Failure}$ 를 기준 리스크  $\lambda_{th}$ 와 비교하고, 화재 리스크가 기준 리스크보다 클 경우 리스크 완화 대안을 적용하여 화재 리스크가 기준 리스크보다 작아지도록 한다. 본 연구에서는 기준 리스크  $\lambda_{th}$ 를 0.0001건/년으로 설정하였다. 이는 중요도가 높은 교량의 선박충돌파괴에 대한 AASHTO LRFD 설계기준의 기준 파괴빈도와 동일한 값이다.

### 3. 대상 교량의 리스크 분석

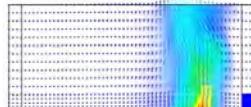
화재 리스크 분석을 위해 그림 2와 같이 공용중에 있는 국내의 대표적인 사장교와 현수교인 서해대교와 이순신대교를 선정하였다. 리스크 분석에 필요한 연간 교량 화재 발생빈도는 크게 위험물 운반 차량(Non-DGV)에 의한 화재와 위험물 운반 차량(DGV)에 의한 화재로 구분하여 산정하였다. 화재 시나리오별 화재 시 교량의 파괴확률은 교량 시스템을 구성하는 주요 부재(주케이블, 주탑, 거더, 타이다운 케이블, 사장 케이블 등)들에 대하여 화재 해석을 수행하여 산정하였다. 특히 케이블 부재들의 경우, 그림 3과 같이 바람의 영향(풍속과 풍향)을 고려한 서울대 및 단국대학교 연구진의 화재해석 결과와 화재 발생 차로 및 화재 발생 위치(교축방향) 등을 고려하였다.



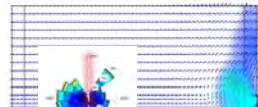
(a) 서해대교(사장교)



(b) 이순신대교(현수교)



(a) 바람의 영향 미고려



(b) 바람의 영향 고려

그림 2. 리스크 분석 대상교량

그림 3. 케이블 화재 해석

### 4. 결론

본 연구에서는 국내 대표적인 사장교 및 현수교에 대하여 여러 가지 통계자료를 활용하여 차량 화재 리스크 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대상 교량의 차량 화재 리스크는 0.000076건/년(서해대교, 사장교), 0.000039건/년(이순신대교, 현수교)로 나타났으며 이는 기준 리스크인 0.0001건/년 이내이므로 교량 붕괴에는 이르지 않을 것으로 분석되었으나, 추가 통계자료 분석결과 갓길 차선의 화재확률이 높아지거나 화재위험차량의 교통량 증가시 리스크는 높아질 수 있음.
2. 화재로 인한 케이블 부재의 영구변형, 리스크 기준값을 넘어서는 경우 이에 대한 내화대책이 필요함.
3. 본 연구에 적용된 화재 리스크 분석 방법론을 타 교량들에도 적용할 수 있을 것으로 판단됨.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 “케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발(과제번호 20SCIP-B119964-05)” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. European Committee for Standardization (CEN). (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures -Part 1-2: General Rules, Structural Fire Design*, CEN, Brussels, Belgium

# 국내 최장 해상 보행현수교의 설계 및 시공

## Design and Construction of Korea's Longest Pedestrian Bridge Installed on the Sea

구기정\* · 신상훈\*\* · 서용교\*\*\* · 이대영\*\*\*\* · 이재강\*\*\*\*\*

Koo, Gi Jung · Shin, Sang Hun · Seo, Yong Kyo · Lee, Dae Young · Lee, Jae Kang

2021년 7월 개통한 울산 대왕암 출렁다리는 무주탑 출렁다리 형태로 해상 구간에 설치된 최초의 보행현수교로 현재까지 국내 최장길이를 자랑한다. 교량은 총 12개의 FLC(Full Locked Coil) 케이블이 지지하는 UCSB(Under Curved Suspension Bridge)로 계획되었고, 보강거더는 단위길이 3.0m의 강재프레임 구조로 구성되었다. 주케이블을 지지하는 앵커리지는 프리스트레스 도입이 가능한 지중 정착식 영구앵커 구조로 직경 32mm 총 25본으로 구성되어 있다.

**핵심용어 :** FLC, UCSB, 출렁다리

### 1. 서론

대왕암 출렁다리는 울산광역시의 대표 관광 명소인 대왕암 공원 내 이색적이고 특색있는 출렁다리 설치로 지역 랜드마크 및 관광객 규모 확대를 위해 2019년 8월 발주되어, 약 8개월의 공사기간을 거쳐 2021년 7월 정식 개통 하였다. 기암괴석과 수려한 해안절경을 배경으로 설치된 본 출렁다리는 개통 100일째 누적방문객 수 70만명을 돌파하여 울산광역시의 새로운 핫플레이스로 자리매김하고 있으며, 야간개장을 통해 또 다른 아름다움을 선사하고 있다.



그림 1. 대왕암 출렁다리(울산광역시, 동구)



그림 2. 위치도

### 2. 교량 설계

교량의 설계는 도로교 설계기준 한계상태설계법(케이블교량편)에 의거하여 진행하였고 극한한계상태, 사용한계상태 및 극단한계상태에 대하여 검토를 실시하였다.

주케이블은 강성 난간 포스트에 의해 지지되는 케이블을 포함하여 직경 40mm, 총 12개의 FLC 케이블 적용하였고, 하중조합을 통한 극한한계상태에서의 U.R(Utilization Ratio)는 0.83으로 검토되었다.

\* 정회원 · (주)케이블브릿지 이사, 토목구조기술사 (E-mail:kgi1977@cablebridge.com) - 발표자

\*\* 정회원 · (주)케이블브릿지 대표이사, 토목구조기술사, 토목시공기술사 (E-mail:james@cablebridge.com)

\*\*\* 정회원 · (주)케이블브릿지 이사 (E-mail:dragonbridge@cablebridge.com)

\*\*\* 정회원 · (주)케이블브릿지 과장 (E-mail:ldy@cablebridge.com)

\*\*\* 정회원 · (주)케이블브릿지 사원 (E-mail:jklee@cablebridge.com)

보강거더는 교량이 설치되는 지역의 특수성을 감안하여 해안 고부식성 환경에 의한 강재의 부식 등을 고려하여 기존의 출렁다리에 적용되던 폐쇄형 단면 구조를 개선하여 개방형 단면 격자 구조의 강재프레임 형식을 적용하였고, 모든 강재는 아연도금+중방식도장을 실시하여 부식에 의한 단면손실 및 유지관리가 최소화 되도록 하였다. 또한, 앵커리지는 직경 32mm 디비닥 Pre-stress Thread bar를 앵커리지 개소당 총 25본(연직 7본, 경사 18본) 기반암에 지중정착하여 전도, 활동 및 지반지지력에 대해 안정하도록 하였다.



그림 3. 아연도금



그림 4. 중방식도장

해상 구간에 설치되는 대상 교량의 내풍성 평가를 위해 서울대학교 산학협력단을 통해 풍환경 분석, 공기력 계수 측정 및 버페팅 해석을 수행하여 내풍안정성을 평가하였으며 한계풍속 63.6m/s(설계풍속 48.9m/s)까지 플러터가 발생하지 않는 것을 확인하였다.

### 3. 교량 시공

교량 가설은 최초 설치된 Cable Way System을 이용하여 앵커리지 설치, 케이블 인출 및 보강거더 가설 등 전공종을 수행하였다. 주케이블 가설 완료후 상·하단 주케이블을 이용하여 3.0m 단위블록 세그먼트를 인출하여 작업자의 공중작업 최소화 및 작업 공종 단순화를 실현하였고, 사전에 공장 제작된 보강거더를 적용하여 품질확보 및 시공속도를 향상시켰다.



그림 5. 교량 시공 전경

### 4. 결론

총연장 303m의 대왕암 출렁다리는 해상 구간에 설치된 국내 최장 보행현수교로서 2021년 7월 성공적으로 개통되었다. 해상 구간에 설치되는 교량의 특수성을 감안하여 교량 계획, 설계 및 개통전까지 다양한 측면에서 검토를 실시하여 구조안전성을 확인하였으며, 풍동실험을 실시하여 동적안정성을 검토하였다.

### 참고문헌

1. 대왕암 출렁다리 조성사업 실시설계 보고서, 울산광역시
2. 대왕암 출렁다리 내풍성 평가 보고서, 서울대학교 산학협력단

# 도로인프라 관리 오픈스퀘어 추진을 통한 노후 인프라 대응

## Response to aging infrastructure by promoting Road Infra Maintenance Open square

박병호\* · 차범진\*\* · 이주현\*\*\*

Park, Byung Ho · Cha, Beom Jin · Lee, Ju Hun

국내 인프라 노후화 문제가 사회적으로 이슈가 되고 있는 상황에서 유지관리, R&D 등 각 분야에서는 거버넌스 구축으로 다양한 기관과 협력을 통한 문제해결 움직임을 보이고 있다. 서울시설공단, 한국도로공사, 국토안전관리원 등 15개 기관은 공공·대학·연구·학회·민간 간 공동대응 협력기구인 도로인프라 얼라이언스를 구성하여 노후 인프라 위기에 대응코자 혁신 기술개발 지원, 정책의 완성기능 수행, 노후 인프라 대응 사회 홍보 추진 등의 도로인프라 관리 오픈스퀘어 사업을 추진한다.

**핵심용어 :** 노후 인프라, 오픈스퀘어, 도로인프라, 얼라이언스, 기술혁신, 정책 환류, 사회적 공감대

### 1. 서론 (노후 인프라 대응을 위한 움직임)

국내는 1970~80년대 급격한 경제성장으로 인프라 건설이 집중되었으며, 2010년에 접어 들면서 교량, 하수도, 열 송수관 같은 지하매설물 등의 노후화가 가속화되어 크고 작은 사고가 발생하고 있다. 국토안전관리원에서 2021년 발간한 '2021 시설물 통계연보'에 따르면 국내 건설 후 30년 이상 경과한 노후 인프라 비중이 2040년 이면 74%에 달할 것이라 한다. 이와 관련하여 노후 인프라 대응을 위해 유지관리 및 연구개발 각 분야에서는 거버넌스 구축 등 다양한 기관과 협력하여 문제를 해결해 보고자 하는 움직임이 보이고 있다.



그림 1. 정릉천고가교 텐던 파단 (서울)



그림 2. 준공 후 30년 이상 노후시설 비중

서울시설공단은 2019년 7월부터 PSC 교량 분야에 집중하여 산학관민 외부 전문가 등이 참여하는 오픈이노베이션을 통해 다양한 경험과 지혜·지식 등을 공유하며 PSC 교량 유지관리 분야의 선도적인 역할을 해나가고 있다. 참여기관의 의견을 수렴하여, 앞으로는 도로인프라 관리 분야로 범위를 확장하고 유지관리 기술개발 및 기술정책의 선순환, 노후 인프라 대응 사회적 공감대 형성 등을 추진해 나갈 예정이다.

### 2. 도로인프라 관리 오픈 스퀘어

협력(cooperation)·공정(impartiality)·상생(coexistence)의 도로인프라 관리 오픈 스퀘어(이하 오픈 스퀘어) 추진을 통해 노후 인프라 공동 대응 체계를 구축코자 한다. 공공·대학·민간·연구·학회 등이 함께 모여 도로인프라 얼라이언스(이하 얼라이언스)를 구성하여 노후 인프라의 안전하고 효율적인 유지관리를 위해 산학관민 모든 주체가 함께 힘을 합쳐 인프라 유지관리 혁신 기술을 개발하고, 관련 정책이 현장 끝선의 현실을 반영

\* 서울시설공단 기술혁신차장, 공학사, 경영학석사, 기술사 (E-mail : littleck@sisul.or.kr) - 발표자

\*\* 서울시설공단 기술혁신센터장, 공학사, 경영학석사 (E-mail : cha0428@sisul.or.kr)

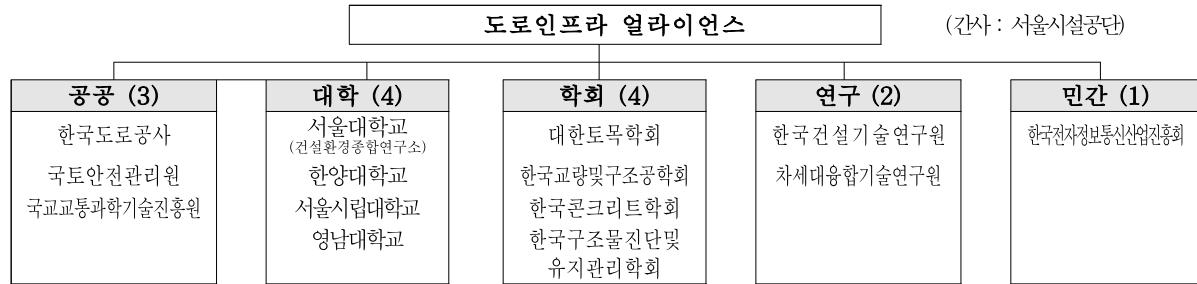
\*\*\* 서울시설공단 기술혁신팀장, 공학사 (E-mail : huny124@sisul.or.kr)

할 수 있도록 선순환 구조를 정립하며, 사회가 인프라 노후화 문제에 지속적으로 관심을 갖도록 공감대를 형성해 나가는 것이다.

### 3. 얼라이언스 출범 및 혁신 기술 지원, 기술정책 환류, 사회적 공감대 형성

오픈 스퀘어 추진을 위해 얼라이언스를 구성하고 2021년 11월 26일 출범행사를 개최한다. 서울시설공단이 간사기관을 맡아 각 종 콘퍼런스를 준비하고 다양한 사업을 기획·운영 하는 등 사업 전반의 책임지고 얼라이언스 참여기관의 협력을 이끌어내는 역할을 한다.

표 1. 도로인프라 얼라이언스 구성



얼라이언스는 협력적 관계를 유지함으로써 다양한 기관의 기술개발 성과 공유를 통해 현장 실증 기회를 제공할 뿐만 아니라 공공(인프라 유지관리자)이 먼저 기술적 니즈(needs)를 공개하고 민간의 기술개발 과정을 지원하는 역할을 수행할 것이다. 또한 도로인프라 관련 정책의 실무 적용에 있어 시설물 관리자 입장의 개선 사항을 발굴·제언하는 경기 기술콘퍼런스를 통해 정책의 선순환 구조를 정립함으로써 국가적으로 정책의 완성에 기여코자 한다. 오픈스퀘어 전용 웹페이지를 개설하여 인프라 관련 알기 쉬운 콘텐츠(영상, 이미지 등)를 공유하는 등 적극적인 홍보를 통해 노후 인프라 대응 필요성에 대한 사회적 관심을 지속 유지시키며 국가적으로 적극적인 자원투입(인력, 예산 등)이 필요하다는 사회적 공감대를 형성해 나갈 예정이다.

### 4. 결론 (노후 인프라 대응을 위해 힘을 합쳐야)

공공·대학·민간·연구·학회 등 산학관민 다양한 기관이 갖고 있는 인프라 관련 시행착오와 극복사례 등 소중한 경험들을 공개·공유하여 동일한 실패가 반복되지 않도록 함께 노력하자. 노후 인프라 대응 소홀은 현재를 살아가고 있는 우리에게 큰 위험이 되며, 미래 세대에게는 위험이 될 뿐만 아니라 막대한 경제적 부담으로도 작용하게 된다. 노후 인프라의 위기를 극복하기 위하여 힘을 합쳐야 할 때이다. 산학관민 공동협력 오픈 플랫폼인 오픈 스퀘어를 통해 위기를 기회로 만드는 도전을 시작하며 다양한 기관과 전문가들의 적극적인 참여와 협력을 제언 드린다.

#### 감사의 글

노후 인프라 대응을 위한 새로운 도전에 응원과 지원을 아끼지 않으시며 함께 열심히 노력해 주신 서울시설공단 조성일 이사장님, 송상영 도로관리본부장님을 비롯한 모든 직원 분들께 감사의 말씀을 드립니다. 묵묵히 지지해 주며 든든한 힘이 되어준 곁의 동료들에게 각별한 마음을 전합니다.

#### 참고문헌

- 2021 시설물 통계연보 : 2021년, 국토안전관리원(경남 진주)

# Young Engineer's Session

---

# 디지털 이미지를 이용한 새그측정 기반 사장교 케이블의 장력 추정 방법 개발

## Development of Sag-based Cable Tension Estimation Method for Cable-Stayed Bridges using Digital Images

조현철\* · 김수형\*\* · 임윤묵\*\*\*

Hyeon Cheol Jo · Soo Hyung Kim · Yun Mook Lim

사장교의 케이블은 교량의 하중을 지탱하는 역할을 하므로 케이블 장력은 사장교의 구조 안전성을 평가하기 위한 중요한 요소이다. 최근 케이블의 장력을 측정하기 위한 영상기반 시스템 및 계측센서가 개발되고 있지만, 온도, 바람 등의 외부 하중에 의해 실시간 변동하는 케이블의 순간 장력을 측정하는 것은 여전히 번거로운 일이다. 따라서, 본 논문에서는 다수의 디지털 이미지 정보를 활용하여 케이블의 새그를 측정하고 이로부터 장력을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 적용성 확보를 위해 시공 중인 사장교 케이블을 대상으로 현장실험을 수행하였으며, 본 방법을 통해 추정된 장력과 lift-off test를 통해 직접 측정된 장력과 비교 검증하였다. 이를 통해 제안한 방법이 사장교 케이블의 실시간 장력 측정에 있어서 기존의 장력 측정 시스템 대비 시간 및 비용 효율적인 옵션을 제공할 수 있음을 확인하였다.

---

**핵심용어** : 사장교, 케이블 장력 추정, 구조 안전성 평가, digital image processing, parabolic cable theory

### 1. 서론

최근 구조분야의 지속적인 기술발전으로 사장교 및 현수교와 같이 케이블을 이용한 장경간 교량의 건설이 증가하고 있다. 케이블 교량은 대부분의 하중을 케이블이 지지하므로 시간이 지남에 따라 구조적 손상을 초래할 수 있기 때문에, 케이블에 도입되는 장력에 대한 정확한 계측 및 유지관리는 구조물의 건전도 및 안전성 확보 측면에서 무엇보다 중요한 핵심요소이다. 이에 따라 최근 레이저 및 영상을 기반으로 장력을 추정하는 비접촉 측정 시스템이 개발되고 있다. 하지만, 이와 같은 방식은 진동법에 근거하여 대상 케이블의 특정 지점의 진동을 계측하고 추출된 고유진동수로부터 장력을 산정하기 때문에, 실시간 장력 계측에 한계가 있으며 다수의 케이블을 계측할 시 측정작업을 반복해야 하는 번거로움이 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 디지털 이미지를 활용하여 실시간 변화되는 다수의 케이블 장력을 추정하는 방법을 제안하고자 한다. 본 방법은 기존의 진동법과 달리, 케이블의 다중 이미지 획득을 통해 새그를 추출하여 장력을 산정하는 방법이다. 제안한 방법의 타당성과 적용 가능성을 검증하기 위해 시공 중인 사장교에 대한 현장실험을 수행하였으며, 본 방법으로부터 추정된 장력을 lift-off test를 통해 직접 계측된 장력과 비교하여 분석하였다.

### 2. 장력 추정 방법

본 방법은 획득한 이미지에서 케이블의 새그를 추출하는 것을 기반으로 하므로, 정확한 새그의 측정이 중요하다. 이미지상의 구조물은 3차원 공간에서 2차원 평면으로 투영되면서 카메라의 내부요인에 의한 왜곡과 원근 투영 영향에 의해 기하학적으로 형상이 변하게 된다. 즉, 이미지로부터 대상의 기하학적 형상을 보다 정밀하게 계측하기 위해서는 구조물에 대한 3차원 좌표 정보를 이용한 이미지 보정이 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 그림 1, 2와 같이 digital image processing을 통해 형상 왜곡을 보정하여 케이블의 3차원 형상을 2차원 평면으로 변화시켰으며, 그림 3과 같은 방식을 통해 케이블의 새그를 추출하였다. 그다음 parabolic cable theory에 근거한 새그( $S$ )와 장력( $T$ )의 관계식(1)을 이용하여 장력을 산정하였다. 여기서,  $L$ 은 케이블의 길이,  $q$ 는 케이블의 단위 중량을 나타낸다.

---

\* 비회원 · K-water연구원 물인프라안전연구소 선임연구원, 공학박사 (E-mail: hcjo@kwater.or.kr) – 발표자

\*\* 비회원 · 연세대학교 건설환경공학과, 박사과정 (E-mail: tngud2515@gmail.com)

\*\*\* 정회원 · 연세대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail: yunmook@yonsei.ac.kr)

$$T = \frac{qL^2}{8S} \quad (1)$$

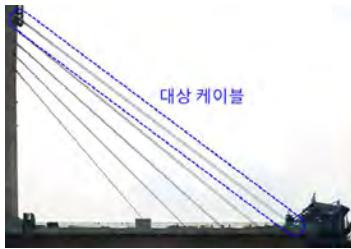


그림 1. 원본 이미지



그림 2. 보정 이미지

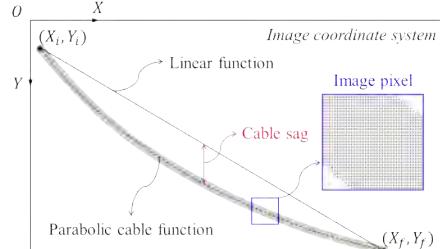


그림 3. 케이블 형상함수 및 새그 추출

### 3. 적용성 검증

제안한 방법의 적용 가능성 검증을 위해, 케이블 시공 중인 사장교(고덕대교, 세종-포천 고속도로)를 대상으로 현장실험을 수행하였다. 제안한 방법으로부터 추정된 케이블 장력은 시공 시 lift-off test를 통해 직접 측정된 장력과 비교 검증하였다. 그림 4는 각각의 이미지로부터 추정된 장력을 나타내며, 그림 5는 누적된 이미지 수에 따른 평균 장력을 나타내고 있다.

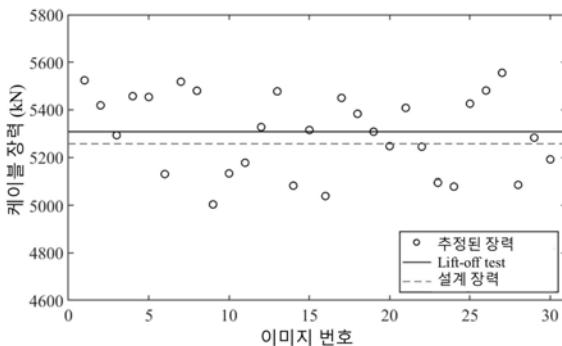


그림 4. 각 이미지에서 추정된 케이블 장력

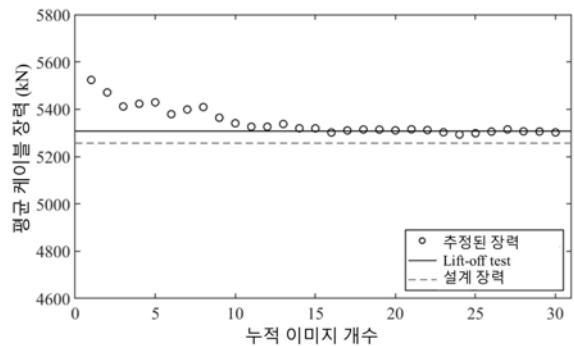


그림 5. 이미지 개수에 따른 평균 케이블 장력

### 4. 결론

본 연구에서는 다수의 케이블 이미지로부터 digital image processing 및 parabolic cable theory를 통해 사장교의 케이블 장력 추정 방법을 제안하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 방법을 통해 실시간 진동하는 케이블의 새그와 장력을 추정할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 케이블의 평균 장력 산정을 위해 사용된 이미지의 수가 증가할수록 직접 측정된 장력 값에 수렴하는 것을 확인하였다.
- 3) 오차 분석 결과, lift-off test와 비교 시 10개 이상의 이미지로부터 추정된 평균 장력의 오차는 약 1.0% 이내로 매우 높은 정확도를 나타내었다.

결론적으로 제안한 방법을 통해 사장교 케이블의 장력을 보다 효율적으로 계측할 수 있으며, 향후 사장교 케이블의 시공, 모니터링, 건전성 및 안전성 평가를 위해 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. S.-W. Kim, D.-W. Yun, S.-H. Park, M.-J. Kong, J.-B. Park, Tension Estimation for Hanger Cables on a Suspension Bridge Using Image Signals, J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp. 24 (2020) 112 - 121.
2. H.M. Irvine, Cable Structures The MIT Press, Cambridge, MA. (1981) 15 - 24.
3. W. Du, D. Lei, P. Bai, F. Zhu, Z. Huang, Dynamic measurement of stay-cable force using digital image techniques, Measurement. 151 (2020) 107211.

# 궤도 불규칙성 및 공간변이 지진파 작용 다경간 교량의 랜덤 동적 해석

## Stochastic dynamic responses of multi-span bridge under track irregularity and spatially varying ground motions

마춘연\* · 최동호\*\*

Ma, Chunyan · Choi, Dong-Ho

Non-stationary random vibration of a 3D time-dependent train-track-bridge system is investigated using the pseudo-excitation method in this paper. A high-speed train traversing a multi-span bridge under both track irregularities and earthquakes is taken as a case study. The spatial variation of seismic ground motions considered in this study consists of the wave passage effect and the incoherence effect. The results demonstrate that the spatial variation of seismic ground motions has a significant effect on stochastic dynamic responses of the train-track-bridge system and cannot be ignored.

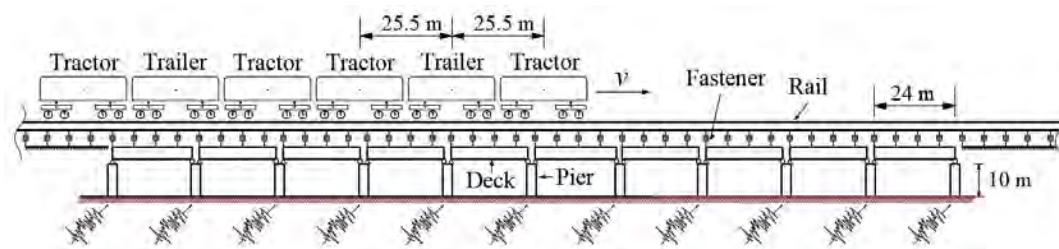
**Keyword:** Random Vibration, Seismic Response, Wave Passage Effect, Incoherence Effect

### 1. Introduction

The increasing number of railway bridges raises the probability of trains encountering an earthquake when running over a bridge accordingly. In this study, random vibrations of a high-speed train traversing a multi-span bridge under both track irregularities and spatially varying ground motions were investigated based on the pseudo-excitation method (PEM). The influences of the spatial variation on the random vibration characteristics of the bridge and train are discussed.

### 2. Train-track-bridge system under spatially varying ground motions

The high-speed train is consists of four tractors and two trailers. All of them are modeled as an independent mass-spring-damper system. The rail, bridge deck, and pier are modeled as the Euler beam elements. The fasteners supporting layers are modeled as spring-damper elements. The Rayleigh damping was considered, and the mode superposition scheme is adopted. The TTB system is simultaneously subjected to track irregularity and spatially varying ground motions, as shown in Fig. 1.



**Figure 1.** Schematic view showing a Train-track-bridge (TTB) system under seismic ground motions

Based on the PEM, the track irregularity and seismic ground motions are transformed into a series of deterministic pseudo-excitations. The equation of motions of the coupled system subjected to these pseudo-excitations are assembled based on the wheel-rail rigid contact relationship, which is shown as

\* 비회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (E-mail: machunyan@hanyang.ac.kr) - 발표자

\*\* 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail: samga@hanyang.ac.kr)

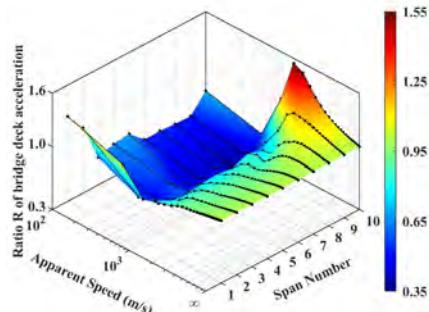
$$\ddot{\mathbf{M}}_r + \dot{\mathbf{C}}_r + \tilde{\mathbf{K}}_r = \tilde{\mathbf{F}}_r(\omega, t) = \mathbf{R} \sqrt{\mathbf{S}_r(\omega)} [e^{i\omega(t-\tau_{w1})} e^{i\omega(t-\tau_{w2})} \dots e^{i\omega(t-\tau_{wN_w})}]^T \quad (1)$$

$$\ddot{\mathbf{M}}_g + \dot{\mathbf{C}}_g + \tilde{\mathbf{K}}_g = \tilde{\mathbf{F}}_g(\omega, t) = \mathbf{E} \sqrt{\mathbf{S}_s(\omega)} \quad (2)$$

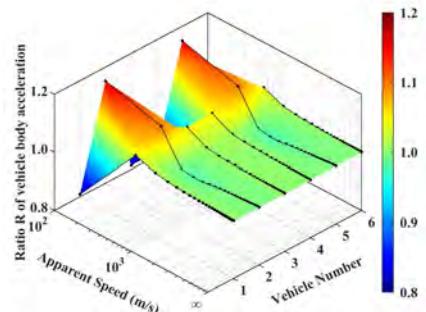
where  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ , and  $\mathbf{K}$  denote the mass, damping and stiffness matrixs of the TTB system;  $\tilde{\mathbf{F}}_r(\omega, t)$  and  $\tilde{\mathbf{F}}_g(\omega, t)$  are pseudo-excitations of track irregularity and seismic;  $\mathbf{R}$  and  $\mathbf{E}$  are coefficient matrixes of pseudo-excitations which can refer to Mu *et al.* (2019);  $\mathbf{S}_r(\omega)$  and  $\mathbf{S}_s(\omega)$  are the power spectral density (PSD) of track irregularity and seismic;  $\tau_{wi}$  and  $\tau_{sj}$  are the phase-lags of  $i$ th wheelset and  $j$ th bridge support;  $N_w$  and  $N_s$  are numbers of train wheelsets and bridge supports;  $\mathbf{I}$  is a matrix which is decomposed from the function caused by the incoherence effect. By solving Eqs. 1 and 2, the response PSD can be computed, and the response standard deviation (SD) is then obtained.

### 3. Numerical example

A 10-span simply supported bridge under a Pioneer train is taken as an example. The 6th class FRA spectrum of track irregularities and Clough-Penzien seismic spectrum with intensity VI are considered. The train speed is 210 km/h. The seismic wave propagation velocities  $v_{app}$  vary from 100 m/s to 10<sup>7</sup>m/s. The uniform seismic excitation is also considered for the comparison. R is defined as the ratio of the maximum SD of the response under the spatial varying ground motions to the maximum SD of the response under uniform seismic excitations. The ratio R of bridge deck acceleration and vehicle body acceleration are shown in Fig. 2 and Fig. 3.



**Figure 2.** Ratio R of the bridge midpoint acceleration



**Figure 3.** Ratio R of the vehicle body acceleration

### 4. Conclusions

In this study, the 3D high-speed TTB system subjected to the spatially varying ground motions was investigated, and its SD of random responses is obtained by PEM. Compare to the random responses under the uniform seismic excitation, it can be seen that the spatial variation of the seismic ground motions has a significant influence on the system's random responses. It is better to consider the spatial variation rather than using the uniform seismic excitation in the train and multi-span bridge seismic analysis unless the results will be underestimated or overestimated.

### Reference

1. Mu D., Ma C., Park M., Lim J.H., and Choi D.H. (2019), "Stochastic Analysis of the High-Speed Train-Track-Bridge System Under Horizontal Spatially Varying Earthquakes", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 31, pp. 369–380.

# Planning and Construction of Pedestrian Suspension Bridge with Environmental and Cultural Heritage Considerations

안정균\* · 신상훈\*\* · 구기정\*\*\* · 서용교\*\*\*\* · 유정수\*\*\*\*\*

An, Jeong Kyoon · Shin, Sang Hoon · Koo, Gijung · Seo, Yong Kyo · Ryu, Jung Soo

Constructed in October 2021, Jecheon Oksun suspension bridge is the first under curved suspension bridge built in a cultural heritage district. In order to attain the Shape Alteration Review by the Cultural Heritage Administration, both minimal environmental impact and a shape that harmonise with the existing cultural heritage were essential. Under Curved Suspension Bridge(UCSB) type was selected to fit such purpose, while consisting rock anchorage in the cultural heritage area to minimise deforestation. Erection of the bridge was performed by using Cable Way system, allowing rapid construction with excellent built quality.

**keywords** : Under Curved Suspension Bridge, UCSB

## 1. Introduction

The Jecheon Oksun suspension bridge was constructed to cross Cheongpung Lake located in Jecheon-si, Chungcheongbuk-do. The construction started in May 2020 and completed in December 2022. The total span of the bridge is 222m with the pedestrian path width of 1.5m. Combined with the scenery provided by the Cheongpung Lake and Oksunbong, the bridge is expected to become a new tourist destination of Jecheon-si.

This paper will explain the environmental considerations and construction method of the Jecheon Oksun suspension bridge.



Picture 1. Jecheon Oksun Suspension Bridge



Picture 2. Location Map

## 2. Brdige Plan

The bridge was planned to provide a new passage to pedestrians visiting the Cheongpung Lake. Since the bridge locates in the cultural heritage district(within 500m from the national cultural heritage region),

\* 정회원 · (주)케이블브릿지 대리, (E-mail:jkan@cablebridge.com) -발표자

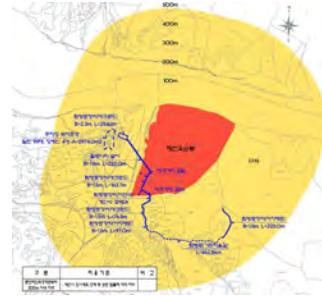
\*\* 정회원 · (주)케이블브릿지 대표이사, 토목구조기술사, 토목시공기술사 (E-mail:james@cablebridge.com)

\*\*\* 정회원 · (주)케이블브릿지 이사, 토목구조기술사 (E-mail:kqj1977@cablebridge.com)

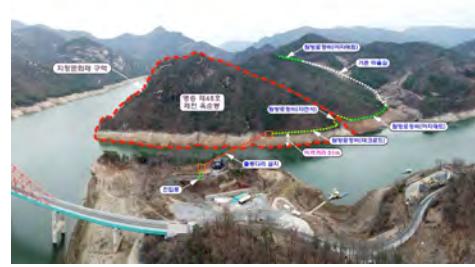
\*\*\*\* 정회원 · (주)케이블브릿지 이사, (E-mail:dragonbridge@cablebridge.com)

\*\*\*\*\* 정회원 · (주)케이블브릿지 차장, (E-mail:jsryu@cablebridge.com)

Shape Alteration Review by the Cultural Heritage Administration was required before the construction of the bridge. Therefore, a bridge with minimal environmental impact and a shape which does not disturb the cultural heritage was required. UCSB style was chosen, because it does not have towers that distracts scenery and also have a natural curvature that fits into the shape of Oksun mountain range.



**Picture 3. Cultural Heritage District**



**Picture 4. Installation Location**

At the bridge terminal, minimal environmental impact was achieved by implementing rock anchoring system. For the rock anchoring system, 8 vertical and 16 diagonal Dywidag Pre-stress Thread bars were installed. Application of rock anchoring system avoided a necessity of having a massive concrete foundation and limited the amount of deforestation to a minimum.

### 3. Construction of the Bridge

3m girder blocks were prefabricated in a factory and then transported to the site to minimise the site welding with improved quality. After the construction of concrete foundation and anchorage, installation of cables and the girder blocks were proceeded by using Cable Way System. This system obviated air works by construction workers, ensured the construction quality and simplified the construction process.



**Picture 5. Construction Stages**

### 4. Conclusion

The Jecheon Oksun Suspension bridge is USBC constructed over a lake. From the planning stage, several aspects of the bridge were considered to produce minimal environment impact to preserve the national monument. Combined with existing tourism attraction, there is no doubt that the bridge will become a proud landmark of Jecheon-si.

### Reference

1. Cheongpung Waterway 100-ri Eco Trail Project - Detailed Project Report, Jecheon-si

# 저속 충돌 하중을 받는 RC보의 최대 처짐 예측

## Prediction of Maximum Deflection of RC Beam under the Low-Velocity Impact Loading

안혁준\* · 유용재\*\* · 조재열\*\*\*

Ahn, Hyukjun · Yu, Yongjae · Cho, Jae-Yeol

극한상황에 대한 구조물의 안전성에 대한 관심이 증가함에 따라 사회기반시설의 내충격 설계 요구가 급증하고 있다. 비교적 저속 충돌 하중 노출 위험이 높은 사회기반시설의 내충격 성능을 파악하기 위해 여러 연구자들은 자유낙하실험을 통해 저속 충돌 하중을 받은 RC보의 최대 처짐을 예측하는 식을 제안하였다. 하지만, 기존에 제안된 경험식들이 고려하고 있는 실험 변수의 범위가 한정되어 있는 한계가 존재한다. 또한, 기존의 식들은 부재의 처짐에 영향을 미치는 부재의 휨 강성을 변수로 고려하고 있지 못하고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 휨 강성이 저속 충돌 하중을 받은 RC보의 최대 처짐에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였으며, 실험 결과를 통해 넓은 변수 범위에서 사용할 수 있는 경험식을 새롭게 제안하였다.

---

**핵심용어** : 사회기반시설, 저속 충돌, 내충격 성능, 최대 처짐 예측

### 1. 서론

사회기반시설에 대한 내충격 설계 가이드라인의 부재로, 성능기반설계의 측면에서 저속 충돌 하중을 받은 부재의 최대 처짐이 주요 내충격 성능 지표로 사용되고 있다. 이에 따라 저속 충돌 하중을 받은 RC보의 최대 처짐을 예측하고자 하는 연구가 계속되었으며 여러 연구자들에 의해 최대 처짐을 예측하는 경험식들이 제안되어 왔다. 하지만, 기존의 연구들은 실제 충돌 하중 상황과 비교하여 비교적 낮은 충돌 에너지 범위에서 수행된 실험 데이터가 활용되었으며, 처짐에 영향을 미치는 부재의 휨 강성의 영향은 고려하지 못하고 있는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 휨 강성을 변수로 RC보에 대해 자유낙하실험을 수행하여 휨 강성이 저속 충돌 하중을 받은 RC보의 최대 처짐에 미치는 영향을 실험적으로 파악하고, 해당 결과를 바탕으로 휨 강성의 영향을 포함한 처짐 예측식 모델을 제안하였으며 이를 선행연구 데이터를 통해 검증하였다. 최종적으로는 기존 자유낙하실험 데이터를 바탕으로 해당 모델에 대한 회귀분석을 수행하여 넓은 변수 범위에서 사용할 수 있는 처짐 예측식을 제안하였다.

### 2. 기존 처짐 예측식

Tachibana et al.[1], Kishi et al.[2]은 식(1)과 같이 충돌 에너지와 RC보의 정적 휨 성능의 비로 최대 처짐을 예측하였다.

$$\delta_{\max} = \alpha \frac{E_k}{P_{static}} \quad (1)$$

그러나 위의 경험식은 비교적 낮은 충돌 에너지 범위(0.2~15kJ)에서 수행된 실험 결과를 통해 제안되었으며, 고려하고 있는 변수가 적기 때문에 Yu et al.[3]은 높은 충돌 에너지(30~50kJ)에서 다양한 변수에 대해 실험을 수행하여 식(2)와 같은 경험식을 제안하였다.

$$\delta_{\max} = 3.86(m^2v^3)^{0.63}(P_s I_{cr} f_c)^{-0.48} \quad (2)$$

이때,  $\delta_{\max}$  : Maximum deflection(mm), m: Impact mass(ton), v: Impact velocity(m/s),  $P_s$  : Static flexural capacity(kN),  $I_{cr}$  : Moment of inertia of cracked section( $m^4$ ),  $f_c$  : Concrete compressive strength(MPa)

---

\* 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, 공학석사 (E-mail:gurwnsdk@snu.ac.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · The university of Texas at Austin Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 박사 후 연구원, 공학 박사 (E-mail:yyjanble@utexas.edu)

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:jycho@snu.ac.kr)

그러나 해당 경험식 모두 RC보의 휨 강성의 영향은 반영하고 있지 못하고 있다. 따라서, 기존 경험식의 수정이 필요한 상황이었으며, 이를 위해 RC보의 휨 강성을 변수로 자유낙하실험을 수행하여 식을 새롭게 제안하고자 하였다.

#### 4. 실험결과 및 예측식 제안

자유낙하실험을 통해 휨 강성과 최대 처짐은 반비례 관계에 있음을 확인하였으며, 해당 결과를 바탕으로 새로운 경험식을 제안하였으며 선행연구 데이터에 대한 Yu et al.[3] 모델과 본 연구에서 제안한 모델의 예측률을 그림 1과 같이 비교하였으며 제안한 모델이 예측률이 높은 것을 확인하였다. 최종적으로는 해당 모델에 대해 검증을 수행한 선행연구 중 파괴모드가 달랐던 케이스를 제외한 모든 데이터를 가지고 회귀분석을 수행하여 처짐예측식을 식(3)과 같이 제안하였다.

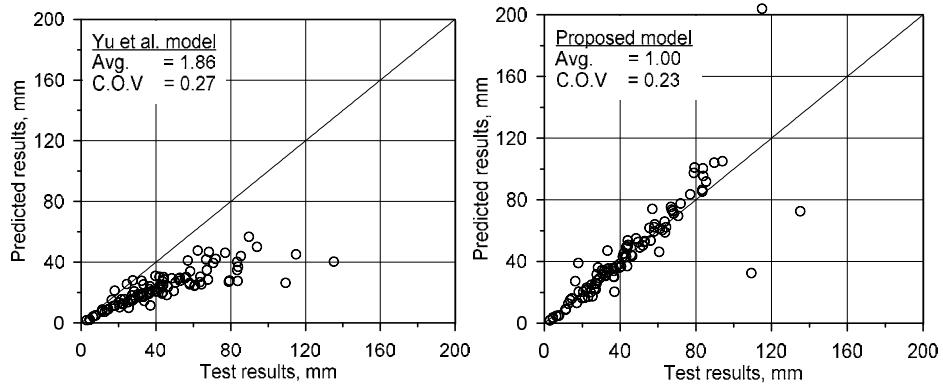


그림 1 선행연구 데이터를 활용한 처짐 예측 모델 비교

$$\delta_{\max} = 0.39(m^2v^3)^{0.51} \Delta_y^{0.27} P_s^{-0.91} f_c^{-0.12} \quad (3)$$

이때,  $\Delta_y$  : Deflection at the yielding of member(mm)

#### 5. 결론

본 연구는 저속충격하중을 받은 RC보의 최대 처짐에 휨 강성이 미치는 영향을 자유낙하실험을 통해 확인하고 해당 영향을 반영한 최대 처짐 예측식을 제안하였다. 선행연구 데이터를 통해 본 연구에서 제안한 예측식이 기존의 예측식 보다 높은 예측률을 보이는 것을 확인하였으며, 이를 통해 해당 예측식은 넓은 변수범위에서의 최대 처짐 예측에 사용 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 국토교통부의 지원(21DPSC-C163238-01)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2020R1A2B5B0200201012) 및 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원(2021R1A6C101B414)을 받아 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Tachibana S, Masuya H, Nakamura S, 2010, Performance based design of reinforced concrete beams under Impact Loading, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 6, 1069.
2. Kishi N, Mikami H, 2012, Empirical Formulas for Designing Reinforced Concrete Beams under Impact Loading, *ACI Structural Journal*, 109 ,4.
3. Yu Y., Lee S., Cho J. Y., Deflection of Reinforced Concrete Beam Under Low-Velocity Impact Loads. *International Journal of Impact Engineering*, 103878, 2021

# 동결융해 및 피로의 커플링 효과를 위한 철근콘크리트 보 피로 실험 연구

Experimental study of fatigue behavior of reinforced concrete beam for  
coupling effect of freezing-thawing and fatigue

안준용\* · 최종권\*\* · 조재열\*\*\*

AN, Jun Long · Choi, Jong Kwon · Cho, Jae-Yeol

인구 증가에 따른 에너지 문제 해결을 위하여 극한지의 자원개발은 필수적이고 북극 지역에는 지구상 개발되지 않은 30%의 천연가스와 13%의 오일이 잠재하고 있다. 하지만 북극과 같은 극한지는 연간 -60~40°C의 온도 범위를 가지며 해안구조물의 경우 동결융해, 염화물 침해 및 외부하중의 반복적인 손상을 받는다. 이와 같은 복합적인 손상 요소를 고려한 실험적 연구가 필요하며 본 연구에서는 우선 동결융해 및 피로의 커플링 효과 연구를 위한 철근콘크리트 보 상온 피로 실험을 수행하였다.

**핵심용어** : 극한지, 동결융해, 피로, 커플링 효과, 철근콘크리트 보

## 1. 서론

콘크리트와 철근은 대표적인 건설재료로서 인프라 구조물 구축에 널리 사용되고 있지만, 온도에 따라 재료물성이 변화하며 외부하중은 염화물 침투와 온도 도입을 가속화 한다. 이러한 복합적인 요소에 따른 손상 메커니즘을 파악하기 위하여 본 연구에서는 우선 반복하중이 RC 부재에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였다. 해안구조물의 경우 국부적으로 휨 거동을 나타내어 RC 보를 사용하여 사용하중 상태에서 피로 성능 평가를 수행하였다.

## 2. 반복하중 이력

본 실험에서 해안구조물의 사용하중 상태를 모사하여 하중 범위  $0.31\sim0.55P_u$ , 진동수 1Hz를 설정하여 그림 1과 같이 반복하중 이력을 수립하였다.

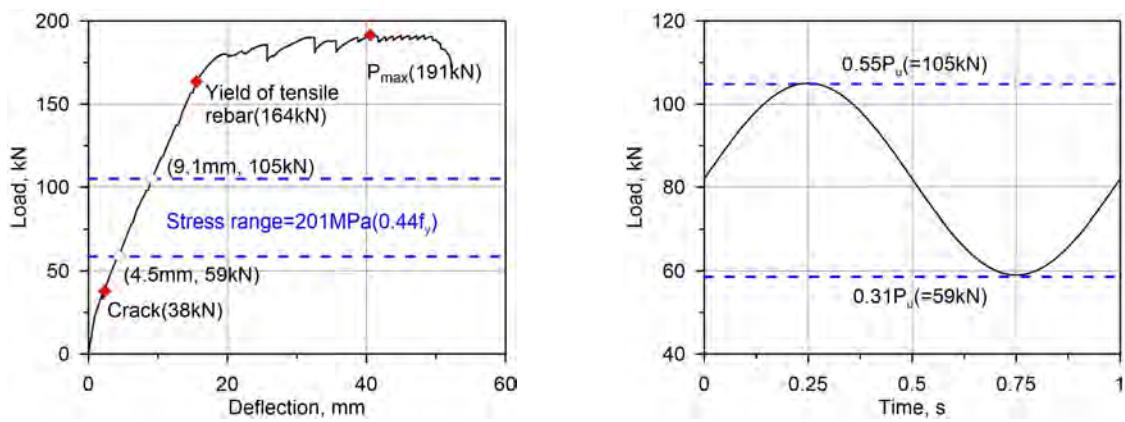


그림 1. RC 보 피로 실험 반복하중 이력 곡선

\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, 공학사 (E-mail:kilagu@snu.ac.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 홍익대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:jongkwon.choi@hongik.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:jycho@snu.ac.kr)

그림 1과 그림 2는 반복하중 횟수에 따른 RC 보 처짐, 인장 철근 변형률 변화를 표시하고 실험 결과는 유한 요소해석, 단면해석 방법을 통하여 유효성 검증을 수행하였다. 반복 횟수가 증가하면서 처짐과 인장 철근 변형률은 증가하는 추세를 보여 반복 가력으로 인한 부재 손상이 누적되는 것을 확인할 수 있다. 중앙부 처짐은 1.8mm 범위에서 반복하는 것을 확인하였고 설계된 4.6mm보다 작은 것이 확인되었고 인장 철근은 반복 횟수에 따라 50MPa 응력 범위에서 반복하는 것을 보였다. RC 보는 200만 회까지 파괴가 발생하지 않았고 정적 휨 가력으로 파괴까지 실험을 수행하였다.

RC 보가 200만 회 이내에서 파괴가 발생하지 않은 이유는 철근은 탄성 범위에서 응력 반복이 발생하지만 콘크리트는 균열 발생으로 인한 소성변형이 발생한 것이 주요 원인으로 판단된다. 콘크리트 소성변형 후 RC 보는 반복 가력 시 복원력 부족으로 원상태로 회복이 안 된 것으로 판단된다.

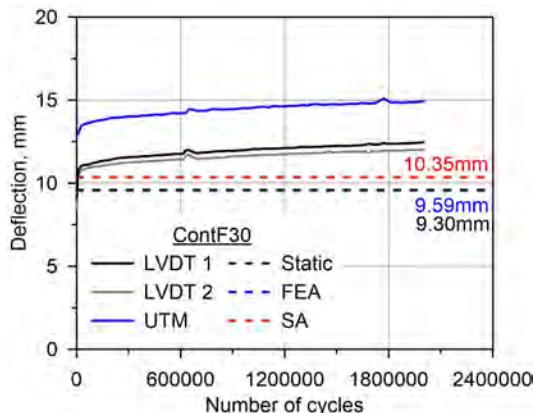


그림1. 처짐-반복 횟수 곡선

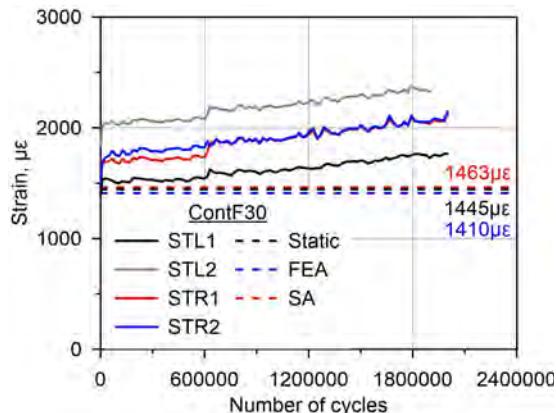


그림2. 인장철근 변형률-반복 횟수 곡선

#### 4. 결론

사용하중 상태에서 해안구조물을 모사한 피로 실험을 수행하였고 결론은 다음과 같다.

- 1) 반복 횟수에 따라 처짐과 변형률은 점차 증가하고 응력 범위는 초기 상태를 유지한다.
- 2) 200만 회 후 정적 휨 실험에서 최대하중은 대조군 실험과 차이가 미약하고 이는 인장 철근이 반복 가력에서 손상을 받지 않은 것으로 추정한다.
- 3) 피로 파괴를 유도하기 위하여 RC 보는 손상 받은 상태에서 응력 반복 구간을 기준으로 하중 이력 수정이 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 진원으로 수행되었습니다.(과제번호 21DPSC-C163238-01)

#### 참고문헌

1. Barnes, R. A. and G. C. Mays (1999). "Fatigue performance of concrete beams strengthened with CFRP plates." Journal of Composites for Construction 3(2): 63–72.
2. Parvez, A. and S. J. Foster (2015). "Fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete beams." Journal of structural engineering 141(4): 04014117.
3. Mirzazadeh, M. M., et al. (2017). "Fatigue behavior of reinforced concrete beams with temperature differentials at room and low temperature." 143(7): 04017056.

# 콜드조인트 및 외력 조건을 고려한 RC 보의 결정론 및 확률론적 염해 내구수명 해석

The analysis of service life in RC girder by deterministic and probabilistic  
analysis method considering cold joint and loading conditions

윤용식\* · 박연철\*\* · 권성준\*\*\*

Yoon, Yong-Sik · Park, Yeun-Chul · Kwon, Seung-Jun

본 연구에서는 결정론 및 확률론적 해석을 통해 염해를 받는 2경간 RC 연속보의 내구수명을 해석하였다. 해석 시 시공 이음부인 콜드조인트와 외력에 의한 응력 조건을 고려하여 콜드조인트 및 응력 조건에 의해 변화하는 내구수명을 정량적으로 평가하였다. 콜드조인트 부에서 매우 큰 내구수명 감소가 나타났으며 결정론적 해석과 확률론적 해석 간의 차이를 내구성 감소계수와 환경계수를 통해 감소시킬 수 있었다. RC 구조물의 유지관리 시 콜드조인트부에 대한 각별한 주의가 필요하다고 판단된다.

**핵심용어** : 염해, 결정론적 해석, 확률론적 해석, 콜드조인트, 외력 조건

## 1. 서론

본 연구에서는 염해를 받는 2경간 RC 연속보의 내구수명을 콜드조인트와 외력 조건을 고려하여 해석하였다. 2수준의 외력조건을 고려한 구조해석 결과와 응력 및 콜드조인트 조건을 고려하여 수행된 염해 내구성능 평가를 통합적으로 고려하여 외력에 의해 변화하는 각 단면의 염소 이온 확산거동을 평가하였으며, 이후 결정론 및 확률론적 해석을 수행하여 0.5 m 간격으로 RC 보의 내구수명을 정량적으로 분석하였다.

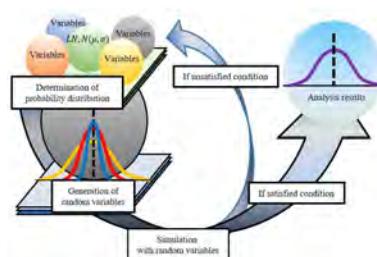
## 2. 염해를 받는 2경간 RC 보의 내구수명 해석 방법

본 연구에서는 선행 연구에서 수행된 콜드조인트 및 응력 조건을 고려한 촉진 염소이온 확산시험 결과(오경석, 2017)와 비선형 구조해석 결과(Yang et al., 2018)를 바탕으로 외력에 의해 각 위치에서 변화하는 2경간 RC 보의 염소이온 확산거동을 평가한 뒤 이를 기반으로 염해 내구수명을 평가하였다. RC 보의 전반적인 염소이온 확산거동 평가 방법은 선행 연구에 자세히 설명되어있다(오경석, 2017; Yang et al., 2018).

결정론 및 확률론적 해석을 통해 2경간 RC 보의 염해 내구수명을 해석하였으며 해석 시 사용한 설계변수를 아래의 표 1에 나타내었다. 결정론적 해석 시에는 각 해석변수의 평균 값을 사용하였으며 확률론적 해석 시에는 각 해석 변수를 확률함수로 가정하였다. 그림 1에는 확률론적 해석을 위한 MCS(Monte Carlo Simulation)의 개요를 나타내었다.

**표 1. 2경간 RC 연속보의 결정론 및 확률론적  
내구수명 해석을 위한 해석 변수**

| $C_s$           | $C_{lim}$         | $D_{app}$  |
|-----------------|-------------------|--|
| N(2.5.0<br>.30) | LN(1.2,<br>0.20)  | N(0.915, 0.21)-Sound concrete<br>N(1.20, 0.21)-Cold joint concrete |
| Cover depth(mm) | Time parameter(m) |  |
| N(40, 0.083)    |                   | N(0.428, 0.25)   |



**그림 1. Monte Carlo Simulation 개요**

\* 정회원 · 한남대학교 토목환경공학과 박사후연구원, 공학박사 (E-mail:humbleyyys@hnu.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 한남대학교 토목환경공학과 조교수, 공학박사 (E-mail:ycpark@hnu.kr)

\*\*\* 비회원 · 한남대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:jjuni98@hannam.ac.kr)

### 3. 염해를 받는 2경간 RC 연속보의 내구수명 해석 결과

염해를 받는 2경간 RC 보 최상단과 최하단의 결정론 및 확률론적 내구수명을 평가한 결과를 그림 2와 3에 나타내었다. 국내 내구성 설계기준(KDS 14 20 40)에서 제안하는 내구성 감소계수와 환경계수의 적용을 통해 두 해석 결과 간의 차이를 줄일 수 있다. 본 연구의 경우 두 계수 간의 비를 0.15로 조정하는 경우 두 해석 결과간의 차이를 최대로 줄일 수 있었으며 이를 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

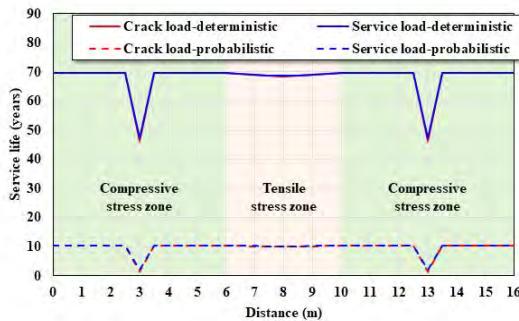


그림 2. 내구수명 평가 결과-상연

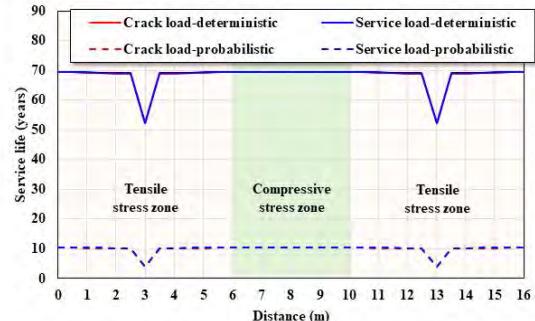


그림 3. 내구수명 평가 결과 하연

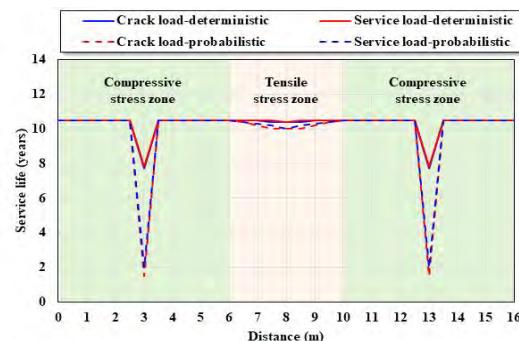


그림 4. 환경계수와 내구성 감소계수를 적용한 결정론적 해석과 확률론적 해석의 비교-상연

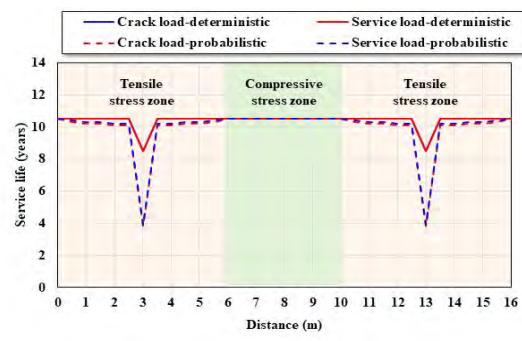


그림 5. 환경계수와 내구성 감소계수를 적용한 결정론적 해석과 확률론적 해석의 비교-하연

### 4. 결론

본 연구에서는 결정론 및 확률론적 해석을 통하여 염해를 받는 RC 보의 내구수명을 해석하였으며 본 연구의 결론은 다음과 같다.

콜드조인트부의 경우 매우 높은 수준의 내구수명 감소가 발생하므로 RC 구조물의 유지관리 시 콜드조인트부에 대한 각별한 주의가 필요할 것으로 사료된다. 또한 합리적인 내구성능 설계를 위해 다 수준의 경계 조건을 고려한 환경계수와 취약부 및 응력 조건을 고려한 내구성 감소계수의 설정이 필요해 보인다.

### 감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2021R1A6A3A01086622).

### 참고문헌

- 오경석, 2017, 하중조건과 슬래그를 고려한 콜드조인트 콘크리트 염해 내구수명 평가, 석사학위논문, 한남대학교.  
 Yang, K. H., Mun, J. H., Yoon, Y. S., Kwon, S. J., 2018, Effects of loading conditions and cold joint on service life against chloride ingress, *Computers and Concrete*, Techno-Press, 22, 3, 319–326.

# 장대 케이블 교량의 장기 감쇠비 특성

## Long-Term Damping Characteristics of a Cable-Supported Bridge

황도연\* · 김선중\*\* · 김호경\*\*\*

Hwang, Doyun · Kim, Sunjoong · Kim, Ho-Kyung

장대 케이블 교량에서 감쇠비는 내풍 안정성과 진동 사용성을 평가하는 것에 중요한 변수이다. 운용 모달 해석은 교량의 통행 제한 없이, 상시 진동 데이터를 사용하여 교량의 동적 특성에 대한 추정치를 얻을 수 있게 한다. 교량에 내장된 구조 모니터링 시스템에서 얻은 장기 데이터를 활용하여 다양한 운용, 환경적 조건에 노출된 장기간에 걸친 감쇠비의 변화를 추적하였다. 감쇠비는 계절, 풍환경 및 가진 정도에 따른 변동성을 보였고, 전반적으로 로그 정규 분포를 따르는 것을 확인할 수 있었다.

---

**핵심용어** : 케이블 교량, 감쇠비, 장기 모니터링, 시스템 식별

### 1. 서론

감쇠비는 장대 케이블 교량의 내풍 안정성과 진동 사용성을 평가하는 것에 중요한 변수이다. 구조 건전도 모니터링 시스템에 축적되는 장기 계측 데이터를 통해 다양한 운용, 환경적 조건에 노출된 교량의 응답을 관측할 수 있고, 이에 따른 교량의 구조적 특성의 변화를 검토할 수 있다. 본 연구에서는 NExT-ERA (natural excitation technique - eigensystem realization algorithm)와 DBSCAN (density-based spatial clustering of applications with noise)을 결합한 자동화된 운용 모달 해석 기법을 제1진도대교의 32개월 가속도 데이터에 적용하여 환경 요인과 함께 감쇠비의 변동성을 추적하였다.

### 2. 대상 교량 및 모니터링 시스템

제1진도대교는 1984년에 시공된 전라남도 진도군에 위치한 사장교로, 344 m 중앙 경간과 두 개의 74 m 측경간으로 구성되어 있다. 이후 통행량의 증가를 수용하기 위해 2005년에 시공된 제2진도대교는 제1진도대교와 유사한 구조 특성을 가진 쌍둥이 교량으로, 제1진도대교의 북동쪽에 위치한다. 제2진도대교에서는 2011년도에 상당히 낮은 풍속 범위인 9.8 ~ 11.5 m/s에 와류 진동이 감지되었다. 주 원인은 유사한 두 개의 교량 데크의 근접한 거리와 제2진도대교의 낮은 감쇠비로 연구되었다. 거의 유사한 구조계를 가진 제1진도대교에서도 와류 진동은 발생하나, 제2진도대교에서 발생하는 와류 진동에 비하면 낮은 진폭을 보였고, 이는 감쇠비가 내풍 안정성과 진동 사용성에 매우 중요한 변수임을 보여준다.

### 3. 자동화 운용 모달 해석

방대한 양의 장기 모니터링 데이터를 효율적으로 활용하기 위해, 자동화된 운용 모달 해석 기법을 적용하였다. 먼저, 약한 가진 상태의 데이터를 제거하였고, 남은 데이터들에 변위 복원을 적용하여 낮은 모델 차수로도 안정적인 감쇠비 추정값을 얻도록 하였다. 다음 단계에는, 복원한 동적 변위에 NExT-ERA를 적용하여 모달 추정값을 얻었다. 이 중에서 spurious poles를 제거하고 자동으로 1, 3, 5차 모드를 식별하기 위해 비학습 분류 기법인 DBSCAN을 적용하였다. 마지막으로, 분류된 클러스터에서 이상치 (outlier)를 제거하고 남은 값들의 중간값을 계산하여 최종 모달 추정값을 얻었다.

---

\* 정회원 · 서울대학교 건설환경종합연구소 연구원, 공학 석사 (E-mail: probus1701@snu.ac.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 서울시립대학교 토목공학과 조교수, 공학 박사 (E-mail: sunjoong@uos.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학 박사 (E-mail: hokyungk@snu.ac.kr)

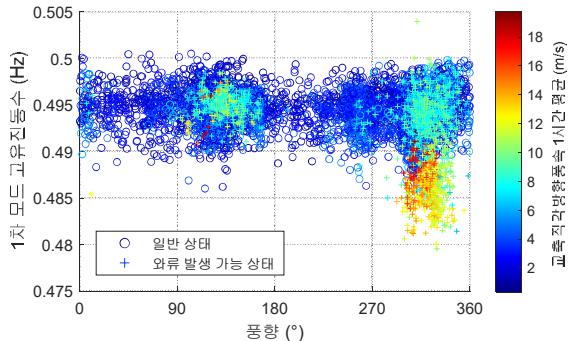


그림 1. 풍향 및 풍속에 따른 고유진동수 값

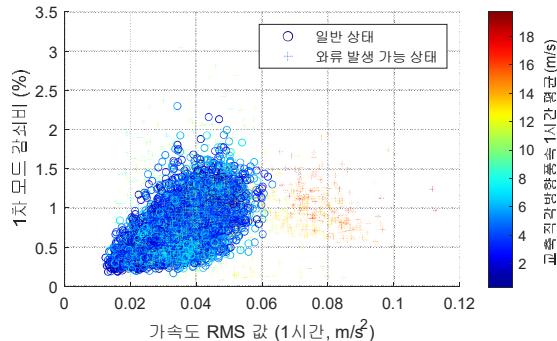


그림 2. 가진 정도에 따른 감쇠비 값

#### 4. 장기 감쇠비 특성

상호 와류 진동 현상에 따라 감쇠비가 상당히 영향을 받는 것을 볼 수 있는데, 이것은 제2진도대교의 와류가 제1진도대교를 가진 할 때 발생한 현상으로 생각된다. 이때, OMA 과정에 주기적인 성분이 포함되면서 감쇠비 예측이 불안정해지므로, 해당 상태 아래의 감쇠비 추정값은 제거하였다. 제거 이후, 감쇠비가 가진 정도에 상당한 의존성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 감쇠비의 확률 분포를 히스토그램 및 Akaike information criterion (AIC)과 Q-Q 플롯을 활용하여 확인해본 결과 전반적으로 로그 정규 분포를 따랐다.

#### 5. 결론

장기 데이터를 통하여 감쇠비의 가진 정도에 대한 의존성과 다양한 환경 요인과의 관계를 확인할 수 있었다. 특히, 와류 진동과 같은 복잡한 공기역학적 현상 발생 시 감쇠비 평가에 유의해야 하였다. 추후 여러 교량의 감쇠비 확률 모델을 구축함으로써, 확률론적 사용성 평가가 가능할 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A2B5B0100165712). 제1진도대교 데이터는 국토안전관리원에서 자료를 제공받아 활용함.

#### 참고문헌

- Hong, Y.H., Kim, H.-K. and Lee, H.S. (2010). "Reconstruction of dynamic displacement and velocity from measured accelerations using the variational statement of an inverse problem:" Journal of Sound and Vibration, Vol. 329, No. 23, pp. 4980–5003.
- Hwang, D., Kim, S. and Kim, H.-K. (2021). "Long-Term Damping Characteristics of Twin Cable-Stayed Bridge under Environmental and Operational Variations:" Journal of Bridge Engineering,American Society of Civil Engineers Vol. 26, No. 9, p. 04021062.
- Kim, S., Park, J. and Kim, H.-K. (2016). "Damping identification and serviceability assessment of a cable-stayed bridge based on operational monitoring data:" Journal of Bridge Engineering, Vol. 22, No. 3, p. 04016123.
- Kim, S., Park, K.-Y., Kim, H.-K. and Lee, H.S. (2020). "Damping estimates from reconstructed displacement for low-frequency dominant structures:" Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 136, p. 106533.

# 밀리미터파 레이더와 가속도계 기반 구조물 변위 계측 방법

## Millimeter-wave Radar and Accelerometer Based Structural Displacement Estimation

Ma Zhanxiong\* · 최재묵\*\* · 손훈\*\*\*

Ma, Zhanxiong · Choi, Jaemook · Sohn, Hoon

In this study, a structural displacement estimation technique was developed by fusing collocated accelerometer and millimeter-wave (mmWave) radar. An automated initial calibration is first performed, and then displacement is estimated in real time from radar measurement. The radar-based displacement is further fused with acceleration measurement using a finite impulse response (FIR) filter for improved accuracy. The performance of the proposed technique was validated on a pedestrian bridge.

**Keywords:** Displacement estimation, millimeter-wave radar, FIR filter, accelerometer, data fusion

### 1. Introduction

Displacement provides crucial information regarding structural integrity and its current condition, and is commonly estimated using accelerometer. However, accelerometer-based displacement has a huge low-frequency drift. Radar has been investigated for structural displacement measurement[1]. However, when measuring displacement using radar, a manual initial calibration is needed to identify the locations of radar-detected targets, and estimate conversion factors necessary for converting the LOS displacements to structural displacements in an actual vibration direction. In addition, phase wrapping may occur, especially when using a millimeter-wave (mmWave) radar, resulting in inaccurate displacement estimation. In this study, a structural displacement estimation technique is proposed using FMCW mmWave radar and acceleration measurements. An automated initial calibration algorithm is proposed to select the best target from the surroundings and estimate its conversion factor, and an acceleration-aided phase unwrapped algorithm is developed and applied in the radar-based displacement estimation process to solve phase wrapping issue.

### 2. Methodology

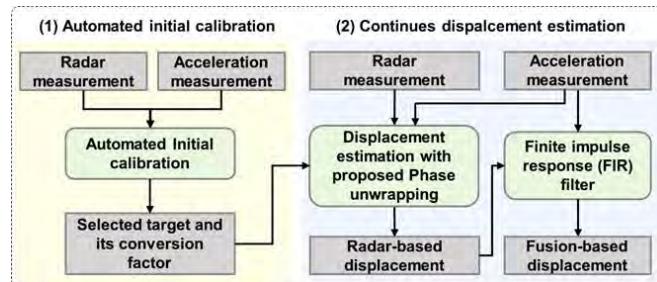


Figure 1. Overview of the proposed technique

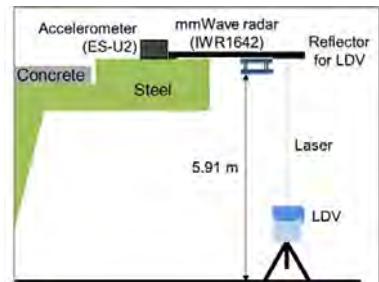


Figure 2. Overview of experimental setup

\* 정회원 · 한국대학교 건설 및 환경공학과 박사과정, 공학사 (E-mail:mazhanxiong@kaist.ac.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 한국대학교 건설 및 환경공학과 박사과정, 공학사 (E-mail:cjmoock@kaist.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail: hoonsohn@kaist.ac.kr)

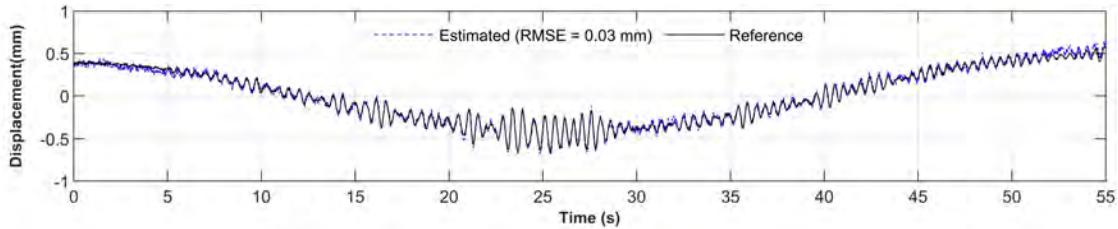
An overview of the proposed technique is demonstrated in Figure 1. A mmWave radar and an accelerometer are placed at the same location, and the proposed technique consists of two parts:

(1) Automated initial calibration: radar and acceleration measurements are initially collected for a short-time period to automatically select the best target and estimate its conversion factor.

(2) Continues displacement estimation: radar-based displacement is first estimated using the selected best target, its conversion factor and the proposed acceleration-aided phase unwrapping algorithm, and then fused with acceleration measurement using a FIR filter [2] for improved accuracy.

### 3. Experimental validation

The displacement estimation performance of the proposed technique is further validated on a pedestrian steel box-girder bridge. As shown in Figure 2, a mmWave radar and uniaxial force balance accelerometer were installed at 1/2 span point of the bridge. The reference displacement was measured using a Polytech RSV-150 laser Doppler vibrometer (LDV). The displacement was estimated when 14 people slowly passing the bridge, and the RMSE is 0.03 mm (Figure 3).



**Figure 3.** Displacement estimation results

### 4. Conclusion

In this study, a displacement estimation technique was proposed through the fusion of collocated FMCW mmWave radar and accelerometer. The main contributions lie in: (1) automated initial calibration and (2) acceleration-aided phase unwrapped algorithms. The performance of the proposed technique was experimentally validated on a steel box-girder pedestrian bridge. The RMSE of the estimated displacements was only 0.03 mm. Currently, the proposed technique was validated with the target distance up to 6 m. A follow-up study is warranted for displacement estimation for long-span bridge.

### Acknowledge

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2017R1A5A1014883).

### Reference

1. Zhang, G., Wu, Y., Zhao, W., Zhang, J., 2020. Radar-based multipoint displacement measurements of a 1200-m-long suspension bridge. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 167, 71 - 84.
2. Lee, H.S., Hong, Y.H., Park, H.W., 2010. Design of an FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low-frequency dominant structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 82, 403 - 434.

# 지진에 의한 단층 발생 시 매설 배관의 안전성 평가

## Safety Evaluation of Buried Pipelines under Strike-Slip Fault caused by Earthquake

최양록\* · 최영진\*\* · 공정식\*\*\*

Choi, Yangrok · Choi, Youngjin · Kong, Jung Sik

국내의 경우 2016년과 2017년에 경주, 포항지진과 같은 강진이 발생하면서, 대한민국은 더이상 약진지역이라는 생각에서 벗어나 강진에 대한 대비가 필요할 것으로 판단된다. 지진이 발생하였을 때, 매설 배관과 같은 지중구조물의 경우 지진파의 효과보다는 단층과 같은 영구지반변형에 의해 더 큰 피해를 받을 것이라 예상된다. 이에 본 연구에서는 대한민국에서 발생 가능한 단층 변위를 Slip-Tendency라는 개념을 도입하여 예측하고, 유한요소해석을 통하여 매설 배관에 대한 구조해석을 수행하였다.

---

**핵심용어** : 매설 배관, 단층, Slip-Tendency, 유한요소해석, 구조해석

### 1. 서론

대한민국의 경우 몇 년 전까지만 해도 이웃한 일본에 비해 상대적으로 지진에 대해서 안전하다고 생각되어 왔다. 하지만 규모 5.8의 경주지진과 규모 5.4의 포항지진이 발생하면서 대한민국은 지진으로부터 안전하다는 생각에서 벗어나 강진에 대한 대비가 필요한 실정이다. 매설 배관의 경우 땅속에 위치해 있기 때문에 지진이 발생하였을 때 지진파에 대해서 충분한 안전성을 확보하고 있다고 판단된다. 하지만 단층과 같은 영구지반변형의 경우 더 큰 피해를 받을 것이라 예상된다. 현재 대한민국에는 약 1,400여 개의 단층 분절이 분포되어 있으며, 매설 배관이 단층을 통과하는 사례 역시 존재하기에 이를 고려하고자 본 연구를 수행하였다.

### 2. Slip-Tendency를 이용한 대한민국 단층 변위 예측

기존 단층의 변위를 예측하는 연구에서는 일반적으로 Wells et al.(1994)에서 제안한 지진 규모와 단층 최대 변위에 대한 관계식을 사용하며, 관계식은 식 (1)과 같이 나타난다.

$$M = 6.69 + 0.74 \cdot \log(MD) \quad (1)$$

여기서, M은 지진 규모, MD는 단층 최대변위를 의미한다. 하지만 해당 관계식을 사용하여 단층 변위를 예측하는 경우 단층이 위치한 지역의 지질학적 특성을 반영하지 못하는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 단층이 발생한 지역의 주응력 방향을 고려한 Slip-Tendency 개념을 사용하여 지질학적 특성을 반영하여 단층 변위를 계산하였다. Slip-Tendency를 고려한 단층 변위 계산식은 식 (2)와 같이 나타난다.

$$D = S \cdot MD \quad (2)$$

여기서, S는 단층별 Slip-Tendency 값을 의미하고, MD는 식 (1)을 사용하여 구한 단층 최대변위, D는 지질학적 특성을 고려한 최종적인 단층 예측 변위를 의미한다.

---

\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정, 공학석사 (E-mail:azsxdc93@korea.ac.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정, 공학석사 (E-mail:dogplus88@korea.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:jskong@korea.ac.kr)

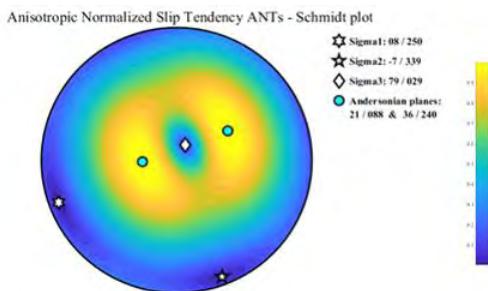


그림 1. 대한민국 Slip-Tendency 분포

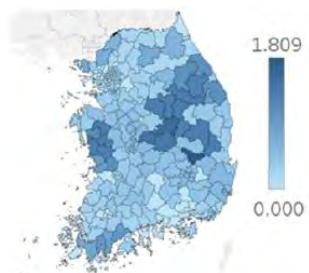


그림 2. 대한민국 단층 변위 지도

그림 1은 대한민국에 작용하는 주응력 방향에 대해서 Slip-Tendency 값들을 평사 투영법의 일종인 Stereonet Projection을 통하여 표현한 것이다. 그림 2의 경우 대한민국에서 발생 가능한 단층 변위에 대해서 행정구역 단위로 시각화하여 나타낸 것이다.

### 3. 매설 배관의 유한요소 해석

단층에 대한 매설 배관의 구조해석을 위하여 ABAQUS/CAE를 사용하였다. ABAQUS/CAE를 이용한 단층 해석모델은 선행 연구인 Vazouras et al.(2010) 문헌을 기반으로 제작하였다. 그림 3과 그림 4는 매설 배관과 지반의 변형 형상 예시를 나타내고 있다.

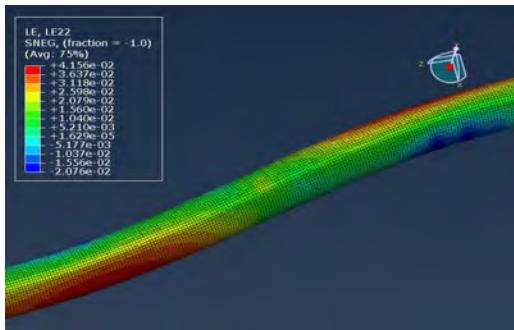


그림 3. 매설 배관의 변형 형상 예시

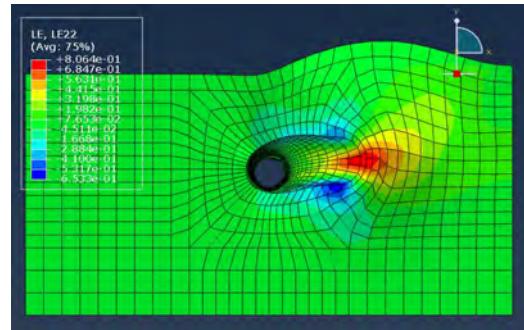


그림 4. 지반의 변형 형상 예시

### 4. 결론

본 연구에서는 국내에서 발생 가능한 단층 변위를 예측하고, 구조해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대한민국의 지질학적 특성을 반영한 Slip-Tendency를 이용하여 단층 변위를 예측하였다.
2. 단층 변위가 매설 배관에 미치는 영향에 대해서 구조해석을 통해 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

1. Morris, A., Ferrill, D. A., & Henderson, D. B. (1996). Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, 24(3), 275–278.
2. Vazouras, P., Karamanos, S. A., & Dakoulas, P. (2010). Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1361–1376.

# CNT 혼입 PVA-ECC의 역학적 거동

## Mechanical Behavior of PVA-ECC with CNTs

이동민\* · 이성철\*\* · 유성원\*\*\*

Lee, Dongmin · Lee, Seong-Cheol · Yoo, Sung-Won

이 논문에서는 CNT 혼입에 따른 PVA-ECC에서의 역학적 거동을 확인하기 위해 CNT 혼입률을 변수로 압축 및 휨인장 실험을 수행하였고, CNT 혼입률 및 철근 지름을 변수로 인발실험을 수행하였다. 실험 결과 CNT 혼입률이 증가할수록 모든 거동에 대하여 향상 효과가 있는 것으로 나타났다. 이 연구 결과는 향후 CNT 혼입 PVA-ECC와 관련된 연구에 유용할 것으로 기대된다. 다만, 실험 결과에서의 편차가 큼에 따라, 적정 CNT 혼입률 선정을 위해서는 추가 상세 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : CNT, PVA-ECC, 압축 거동, 휨 거동, 부착 거동

### 1. 서론

기술의 발전으로 구조물이 대형화 및 초고층화됨에 따라 구조물에 대하여 성능 향상의 필요성이 증가하게 되면서 기존의 콘크리트에 다양한 재료들을 혼입하는 연구가 활발히 진행되어왔다. 이러한 재료 중 나노재료로 알려진 CNT는 혼입 시 콘크리트 강도 증진 효과가 발생하고, 섬유는 혼입 시 균열 발생 후 뛰어난 연성을 발휘할 수 있는 것으로 기존 연구결과들을 통해 확인되었다. 이 연구에서는 CNT와 PVA 섬유의 장점을 합친 CNT 혼입 PVA 섬유 시멘트 복합체(PVA-ECC)에 대하여 CNT 혼입량에 따른 압축 거동, 휨 거동, 그리고 철근 부착 거동에의 영향을 실험을 통해 분석하고자 한다.

### 2. 실험 방법

이 연구에서는 CNT 혼입에 따른 PVA-ECC의 압축거동부터 휨 거동, 철근 부착 거동을 분석하기 위해, 압축거동 시험체는  $\phi 100 \times H 200$  mm 크기로, 휨 거동 시험체는  $100 \times 100 \times 350$  mm 각주형, 부착 거동 시험체는  $150 \times 200 \times 150$  mm 크기의 각주형으로 제작하였다. 실험 변수는 CNT 혼입률의 경우, 결합재 중량 대비 0.0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%로 총 4가지를 고려하였으며, 부착 거동 실험에서는 철근 지름을 D13, D16, D19 등 총 3가지를 추가적으로 고려하여 시험체를 제작하였다. PVA-ECC 배합은 표 1과 같이 배합 후 28일 이상 기건양 생 후 실험을 수행하였다.

**표 1. 실험체 배합표 (단위 : kg/m<sup>3</sup>)**

| Specimen | Binder |     |         | Sand | Filler | SP   | SRA | Water | W/B(%) | PVA(vol.%) | CNT(wt%) |
|----------|--------|-----|---------|------|--------|------|-----|-------|--------|------------|----------|
|          | Cement | BFS | Fly ash |      |        |      |     |       |        |            |          |
| 0.0      | 412    | 220 | 412     | 275  | 14     | 1.92 | 0.4 | 343   | 31.6   | 2.07       | 0.0      |
| 0.1      |        |     |         |      |        |      |     |       |        |            | 0.1      |
| 0.2      |        |     |         |      |        |      |     |       |        |            | 0.2      |
| 0.3      |        |     |         |      |        |      |     |       |        |            | 0.3      |

\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사 (E-mail:knucon@naver.com) – 발표자

\*\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 부교수, 공학박사 (E-mail:seonglee@knu.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 가천대학교 환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:imysw@gachon.ac.kr)

### 3. 실험 결과

CNT 혼입률에 따른 PVA-ECC의 평균 압축강도를 그림 1에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이, PVA-ECC에 CNT를 혼입할 시 0.20%일 때의 압축 거동이 가장 우수한 것으로 나타났다. 휨 거동의 경우, 그림 2를 통해 휨인장 실험에서의 최대 하중을 CNT 혼입률별로 구분하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, CNT 혼입률이 증가할수록 최대 휨강도가 증가하며, CNT 혼입률이 0.2%일 때 가장 우수하게 나타났다. 부착 거동에서는 그림 3에 나타낸 바와 같이, 철근 지름에 관계없이 CNT 혼입률이 증가할수록 부착강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 모든 거동에서의 실험결과에 변동성이 큰 것을 고려할 때, 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

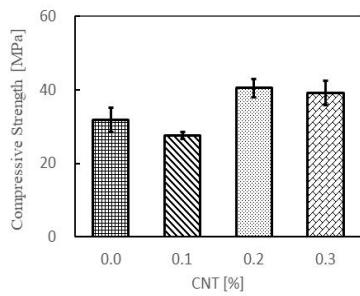


그림 1. CNT 혼입률별 평균압축강도

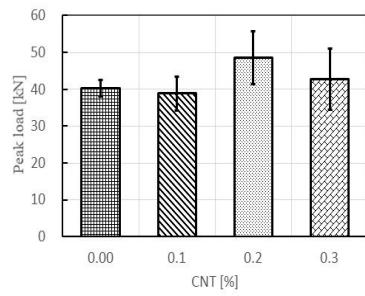


그림 2. CNT 혼입률별 최대 하중(휨 실험)

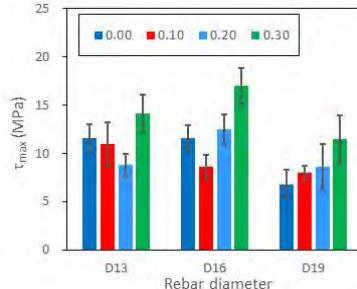


그림 3. CNT 혼입률 및 철근지름별 부착강도

### 4. 결론

이 연구에서는 PVA-ECC에서 CNT 혼입량에 따른 압축 거동, 휨 거동, 철근 부착거동을 실험을 통해 분석하였다. 실험결과로부터 CNT 혼입량이 증가할수록 전반적으로 압축 및 인장강도, 철근부착강도가 증가하는 것으로 나타났으나, 휨 거동 연성 및 실험결과의 변동성을 고려할 때 적정 CNT 혼입량을 설정하는 것이 필요한 것으로 나타났다. 이 연구결과는 향후 CNT 혼입 PVA-ECC의 구조 거동 관련 분야에 유용할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원 (과제번호 21NANO-B156177-02) 및 2020년도 정부(교육부) 재원 한국연구재단의 지원(No.2020R1I1A3073831)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

# 포스터 세션

---

# 국내 엔지니어링의 해외 케이블교량 진출 방안

## Plan for Korea Engineering to Advance into Overseas Cable Bridges

김홍식\* · 이의택\*\* · 박웅기\*\*\* · 조한민\*\*\*\*

Kim, Hong Sik · Lee, Eui Taek · Park, Woong Ki · Cho, Han Min

국내 건설엔지니어링은 2000년대 들어 서남해안을 중심으로 다양한 케이블교량을 건설하며 관련 기술이 비약적으로 발전하였다. 하지만 최근 교량 건설사업은 국내 SOC 사업의 축소로 인해 해외시장에 대한 진출이 불가피한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 국내 건설엔지니어링의 성공적인 해외진출을 위해 해외 및 국내 수주사례를 분석하여 향후 해외시장 진출에 대한 선점의 발판을 마련하고자 한다.

**핵심용어** : 건설엔지니어링, 케이블교량, 해외진출, 수주사례, 분석

### 1. 서론

최근 건설되는 교량은 국가의 랜드마크로서 건설기술에 대한 경제 활성의 원동력이 되고 있다. 국내의 경우 사장교 및 현수교 등 케이블교량 설계 및 시공 실적 증가로 인하여 관련 기술이 비약적으로 발전하였다. 2000년대 들어 서해대교, 인천대교, 영종대교, 이순신대교 등 다수의 장대교량 건설로 인해 4.5조 원의 시장 규모를 형성하였으나 최근 국내 SOC 건설사업의 축소로 인하여 다소 정체되고 있는 실정이다. 반면 해외의 경우 개도국을 중심으로 매년 약 10~30조 원 규모를 형성해왔으며 2025년에는 약 37.2조 원의 규모를 형성할 것으로 예상하고 있다(국토교통부, 2016). 이러한 해외시장에 대해 국내 건설엔지니어링은 기존 기술강국인 미국과 유럽, 일본의 시장 선점 및 중국의 저가 진출전략 사이에서 경쟁해야 한다. 따라서 본 연구에서는 국내외 교량 건설사업의 수주사례를 분석하여 향후 성공적인 해외진출의 발판을 마련하고자 한다.

### 2. 해외 엔지니어링 기업의 케이블교량 수주사례 분석

덴마크의 Great Belt Fixed Link(그림 1)는 주경간장 1,624m의 장대 현수교로서 설계사인 COWI A/S는 1987년부터 Great Belt Fixed Link의 Conceptual Design을 수행하고 1989년 Outline Design을 수행하였으며, 1990년대에 건설사업에 대한 입찰서를 제출하여 최종 수주하였다. COWI A/S는 덴마크 정부의 전략적인 지원아래 장대교량 해석프로그램을 자체 개발하였으며 기술개발을 위한 과감한 투자, 엔지니어간의 창의력 배양 등을 통해 케이블교량 엔지니어링 분야의 선두로서 자리매김하였다.



그림 1. Great Belt Fixed Link



그림 2. The Øresund Fixed Link

The Øresund Fixed Link(그림 2)는 덴마크 코펜하겐부터 스웨덴 말뫼까지를 연결하는 철도·도로 병용 사

\* 정회원 · 평화엔지니어링 구조본부 부사장, 공학석사 (kimhs4962@pec.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 평화엔지니어링 구조본부 이사, 공학석사 (etlee@pec.kr)

\*\*\* 정회원 · 평화엔지니어링 구조본부 차장, 공학박사 (wkpark@pec.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 평화엔지니어링 구조본부 사원, 공학박사 (chm1247@pec.kr)

장교로 국제 설계공모를 통해 해외 컨소시엄(ASO Group 및 ØLC Group)이 수주하여 Conceptual Design을 수행하였다. 하지만 이 컨소시엄은 Project Management 상세설계 입찰에서 탈락하였다. 상세설계는 회사의 규모가 크고 Project Management 및 해상교량 건설 경험이 풍부한 Ove Arup이 최종 낙찰되어 수행하였다. 그 외 홍콩 Stonecutter Bridge, 캐나다 Champlain Bridge 등도 해외 엔지니어링사가 수주하였다. 해외 엔지니어링사의 성공요소는 각 기업의 특성에 최적화된 포트폴리오를 중심으로 우수한 엔지니어 보유, 기술발전을 위한 지속적인 투자 등을 들 수 있다.

### 3. 국내 엔지니어링 기업의 해외 케이블교량 참여 사례 분석

2010년 이전의 국내 건설엔지니어링은 해외 선진국의 기준 및 기술을 활용하여 자체적인 설계능력을 확보하는데 그쳤다. 또한, 국내 케이블교량에 대한 수주를 우선시 했으며 해외진출에 대한 도전은 미미한 수준이였다. 2010년 이후 사회 기반시설의 수요 감소로 국내 건설사는 국내 건설엔지니어링사와 공동으로 해외 케이블교량 입찰에 적극적으로 참여하였다. 하지만 기술적인 한계를 보이며 번번히 실패하였고 단순 업무에 부분적으로 참여하였다. 2015년도 이후 우리나라 자체적으로 한계상태설계법에 대한 설계기준을 확립하고 그 동안의 시공기술 know-how를 터득하여 독자적인 기술력을 가지고 해외진출을 시도하였다. 이에 대한 결과물로 단순 하도급 업무수행이 아닌 해외진출에 대한 공동참여사로 설계 및 감리를 수주하는 발전을 이루었다. 2021년 이후 본격적으로 국내 건설엔지니어링은 주관설계를 시작하게 되었으며 대표적인 성공사례로 필리핀의 Panay-Guimaras-Negros Bridge, Bataan-Cavite Interlink Bridge 사업을 수주하였다(그림 3, 4).



그림 3. Bataan-Cavite Interlink Bridge



그림 4. Panay-Guimaras-Negros Bridge(예시)

### 4. 결론

국내 건설엔지니어링은 지속적인 발전을 거듭하여 자체적인 한계상태설계법의 설계기준 확립, 해외 선진국에 뒤처지지 않는 시공기술을 완비하여 해외 교량 건설사업 수주의 성과가 나타나고 있다. 하지만 해외 건설엔지니어링 대비 부족한 자금력, 유연하게 대처할 수 있는 언어능력, 발주처를 Leading할 수 있는 능력 등이 부족한 실정이다. 따라서 이러한 해외시장의 판도 변화를 위하여 지속적으로 해외 건설엔지니어링의 기술력 및 know-how 등을 분석하고 현지 맞춤 전략을 자세히 수립해야 한다. 또한 발주처 및 관리·감독자를 이끌어 나갈 수 있는 Leading 능력을 배양할 필요가 있다. 이 밖에도 기획, 타당성 조사, 법률 등에 대한 자질 및 능력을 갖추어 향후 해외 건설시장에 대한 발빠른 대응 및 선점에 대비할 필요가 있다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원(16SCIP-B119960-01)에 의해 수행되었습니다. 지원에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

국토교통부 (2016), 케이블교량 성능 최적화 기술 개발 기획 과제 최종보고서

# 해상 이중합성 강박스 거더교의 계획 및 시공

## Design and Marine Construction of Double Composite Steel Girder Bridges

안용수\* · 설대호\*\*

Seol, Dae Ho · Ahn, Yong Soo

이중합성 강박스 거더교는 부모멘트가 작용하는 지점부에 이중합성 단면을 구성함으로써 지점부 하부 압축 플랜지가 두껍고 다수의 보강재를 필요로 하는 일반 강박스 거더교의 단점을 개선한 공법으로 최근 일반 강박스 거더교를 대체하여 활발하게 설계 및 시공되고 있는 강박스 거더교 형식 중 하나이다. 최근 충남 서해상의 난지섬 연도교에 적용하기 위한 교량 상부형식으로 이중합성 강박스 거더교인 DCB거더 공법이 선정되어 중앙경간 95m을 갖는 해상 강박스 거더 교량이 설계 및 시공 완료되어 그 사례를 소개하였다.

**핵심용어** : 이중합성 강박스 거더교, DCB 거더, 연도교, 해상교량 가설

### 1. 서론

난지섬 연도교는 서해상에 위치한 대난지섬과 소난지섬을 연결하여 지역민의 교통소통과 관광자원 활성화를 목적으로 계획된 교량이다. 이 교량은 최초 PSC Box 거더교(FCM, L=57.5+3@95+59.5=400m)로 계획되었으나, 공사기간 대비 공정률이 저조하여 말뚝 및 교각기초 일부가 시공된 상태에서 공사기간 단축을 위해 강박스 거더형식(DCB 거더,(주)효명이씨에스)으로 변경되었다. 상부형식이 변경되었음에도 교각기초 일부가 이미 시공되어 기존 PSC Box 거더교에 대한 지간구성 변경 없이 그대로 교량에 대한 설계 및 시공이 진행되었다. 이러한 이유로 난지섬 연도교는 현재까지 강박스 거더교 형식으로는 국내에서 가장 긴 95m의 중앙경간을 가지면서 해상가설 방법으로 설계 및 시공된 특이 사례로써 교량계획, 거더 가설, 바닥판 시공 등의 주요 공정을 소개하고자 한다.

### 2. 난지섬 연도교 계획



그림 1. 난지섬 연도교 위치 및 현황

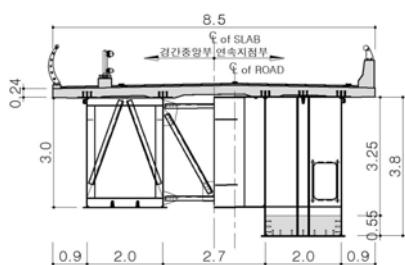


그림 2. DCB 거더교 횡단면

난지섬 연도교는 평면선형이 직선이므로 가설시 비틀림에 대한 우려가 적어 중앙부는 개구형 강박스단면을 적용하고, 지점부는 이중합성단면으로 계획하여 경제적인 설계가 되도록 하였다. 또한 바닥판 시공시 육지에서 대량의 레미콘을 연속으로 공급받기 어려운 조건이므로 전단면 프리캐스트 바닥판 패널을 운반하여 바닥판을 설치하는 것으로 계획함으로써 해상교량설치에 따른 불리한 시공조건을 극복하였다. 다만, 불가피하게 프리캐스트 바닥판의 전단 포켓 및 이중합성부 하부콘크리트에 타설되는 일부 콘크리트 물량에 대해서는 레미콘을 육상 및 해상 운반하여 현장 타설하는 것으로 계획하였다.

\* 정희원 · (주)효명이씨에스 상무, 공학사 (E-mail: tfd@daum.net) - 발표자

\*\* 정희원 · (주)효명이씨에스 부장, 공학박사 (E-mail: sdh0421@nate.com)

### 3. 거더 운반 및 해상가설 / 가설시 구조안전성 검토

DCB 거더를 가설하기 위해 군산항에서 95m 길이의 거더 2본을 가로보 연결한 뒤 12,000P 바지에 선적하여 당진까지 해상 운반하였다.(그림4) 이 때, 거더를 바지에 선적하기 위해 지면의 요철과 관계없이 상차면을 수평으로 유지시켜주는 240t 모듈트랜스포터 4대를 이용함으로써 운반중인 거더가 선착장과 바지선의 단차에 의한 영향을 받지 않도록 하였다.(그림3) 중앙경간 95m 길이의 강박스거더 2본을 가로보 연결하였을 때의 거더 중량은 312ton으로 600ton 해상크레인을 이용하여 인양효율 52%로 가설 계획을 수립하였으며,(그림5) 거더 인양시 케이블, 인양러그, 거더 등의 응력 및 좌굴안전성과 파도의 동적영향을 고려한 검토 등을 수행해 가설시 구조안전성을 확보하였다.(그림6, 7, 8)



그림 3. 거더적재(모듈트랜스포터)



그림 4. 해상운송(12,000P 바지선)



그림 5. 거더해상가설(F/C 600t)

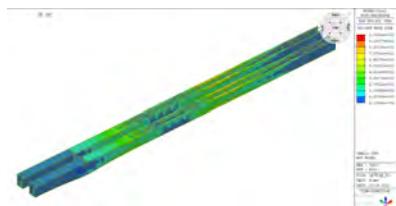


그림 6. 인양시 응력 검토

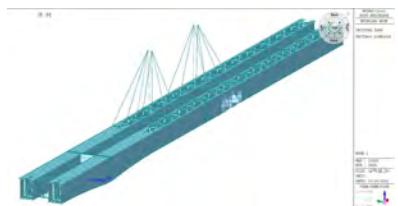


그림 7. 인양시 좌굴안전성 검토

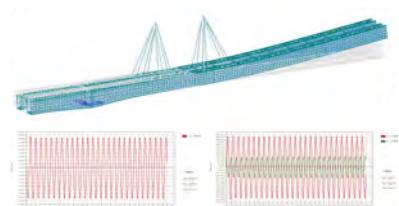


그림 8. 파도의 동적영향 검토

### 4. 이중합성부 및 전단면 프리캐스트 바닥판 설치

이중합성부 하부콘크리트는 총 97m<sup>3</sup> 콘크리트물량을 해상바지를 이용하여 타설하였으며(그림9), 바닥판은 전단면 프리캐스트 패널을 해상 운반하여 교량 상부에서 크레인 전진가설하는 방법으로 설치하였다.(그림10, 11)



그림 9. 이중합성 하부콘크리트 타설



그림 10. 전단면 프리캐스트 바닥판 전진가설



그림 11. 전단면 프리캐스트 바닥판 연결부

### 5. 결론

난지섬 연도교는 국내 최장경간 거더교로서 이중합성 강박스 거더교 형식인 DCB거더교로 계획하여 거더 제작 8개월, 거더 운반 및 거더가설에 3.5개월, 바닥판 설치에 1.5개월 총 13개월에 걸쳐 완공함으로써 공기 단축과 안전성 확보라는 소기의 목적을 달성할 수 있었다. 공사 난이도 측면에서 결코 쉽지 않은 95m 길이의 개구형 강박스 거더에 대한 해상 인양가설을 순조롭게 진행함으로써 빠르고 안전하게 연도교 공사를 성공적으로 완수할 수 있었다.

# 구조용 유리바닥재의 실용성

## Practicality of Structural Glass Flooring

김남희\* · 홍성걸\*\*  
Kim, Namhee · Hong, Sung-Gul

유리는 재료사용 이후에도 재활용이 가능한 지속가능한 재료이다. 또한, 재료의 투명성을 이용하여 기능뿐만 아니라 다양한 디자인 연출이 가능하여 이제는 비구조용 재료이외에도 벽체나 바닥재와 같은 구조용 재료로 그 사용성이 과감하게 확대되고 있다. 그런데 현재 구조물 설계에 이용할 수 있는 지침이나 기준은 주로 건축용 창문이나 커튼월들을 중심으로 마련되고 있다. 최근 교량설계에 유리 사용이 skywalk를 비롯해서 장경간 출렁다리의 바닥재와 난간등에서 증가하고 있다. 이 연구에서는 취성적 특성의 유리부재를 보행교 바닥재로 설계하기 위해서 고려해야 할 주요 사항들을 살펴보고자 한다. 이는 보행교 유리바닥재 설계기준이나 지침을 마련하는데 기초자료로 활용될 수 있으리라 기대한다.

**핵심용어 :** 유리바닥재, 취성파괴, 파괴예측모델, 접합 유리, Weibull 확률분포

### 1. 서 론

유리부재에 대한 연구는 1990년대 전후로 미국과 캐나다의 전문가들이 주도하여 유리창의 파괴예측모델(GFPM, Glass Failure Prediction Model)을 개발하여 건물유리의 하중저항 결정에 대한 표준을 제시하였다. 2010년 이후 유럽 국가들을 중심으로 유로코드의 개편의 일환으로 'Guidance for European Structural Design of Glass Components'가 마련되었고 최근에는 홍콩에서도 유리구조에 대한 설계기준이 마련되었다. 국내에서도 유리의 사용이 건축물의 유리창이나 커튼월뿐만 아니라 보행교의 바닥재로 많이 사용되고 있는 시점에서 구조용 유리바닥구조에 대한 연구가 매우 시급하다. 미국 그랜드캐년의 skywalk(2007)에서 유리를 보행교의 바닥재료로 사용하여 사람들의 관심을 많이 모았다. 그후 중국에서는 장경간 출렁다리형식의 보행교 바닥에 유리구조를 많이 사용하고 있으며, 이러한 국제적 분위기와 맞물려 국내에서도 skywalk등 유리바닥의 사용이 증가하고 있다. 국내 실정에 적합한 유리구조물의 해석, 설계, 또한 재료의 시험법 등을 마련하여 기술문화의 변화에 대응해야 한다.

### 2. 국내 바닥재 유리종류

KS L2004 접합 유리(laminated glass)의 적용범위에서 건축물 내 안전을 요하는 바닥 등에 사용되는 유리는 접합 유리임을 알 수 있다. 또한, 접합 유리는 표 1의 판유리를 2장 이상 전면 겹쳐서 외부하중에 견디도록 하고 있다. 접합 유리의 품질은 겉모양, 만곡, 내광성, 내열성, 내습성, 낙구 충격 박리 특성, 쇼트백 충격 특성을 검사하지만, 구조용 휨강성을 평가할 수 있는 시험은 포함하고 있지 않다.

표 1. 접합 유리에 사용되는 판유리

| 재료 판유리         | 한국산업표준    |
|----------------|-----------|
| 강화 유리          | KS L 2002 |
| 무늬 유리          | KS L 2005 |
| 방 찬유리 및 선 판유리  | KS L 2006 |
| 열선 흡수 판유리      | KS L 2008 |
| 플로트 판유리 및 마판유리 | KS L 2012 |
| 열선 반사 유리       | KS L 2014 |
| 배강도 유리         | KS L 2015 |

### 3. 유리재료의 한계상태와 허용응력

유리구조의 경우에도 강도 측면에서 극한 한계상태와 사용성 측면에서 처짐과 진동을 기준으로 설계한다. 극한 한계상태는 파열(rupture)에 의한 파괴로 파괴역학에 근거해서 파괴강도를 결정할 수 있다. 건축용 유리의 하중저항을 결정하는데 사용되는 기준의 하나인 ASTM E 1300에서는 취성재료에 널리 사용되는 Weibull

\* 정회원 · 서울대학교 건축학과, 객원교수 (namheek@snu.ac.kr) - 발표자

\*\*\* 비회원 · 서울대학교 건축학과, 교수 (sglhong@snu.ac.kr)

화률분포를 이용해서 유리 파괴예측모델을 개발해서 유리의 최대 허용응력을 식(1)과 같이 정의하고 있다.

$$\sigma_{allowable} = \left( \frac{P_b}{k \cdot (d/3)^{7/n} \cdot A} \right)^{1/7} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{allowable}$ =최대 허용 표면응력;  $P_b$ =파괴확률;  $k$ =표면 결합 변수;  $d$ =하중지속기간;  $A$ =유리 표면적;  $n=16$ (annealed glass 보통유리).  $P_b$ (파괴확률)은 식(2)을 이용해서 구한다.

$$P_b = 1 - e^{-B} \quad (2)$$

식(2)의  $B$ 는 대상 유리구조의 판해석을 수행해서 식(3)을 이용해서 구한다.

$$B = k \cdot \sum_{i=1}^N \left( \left( c_i \cdot \left( \frac{t_d}{60} \right)^{1/n} \cdot (\tilde{\sigma}_{max,i} - RCSS) \right)^m \cdot A_i \right) \quad (3)$$

여기서,  $c_i=2축응력 조정계수$ ;  $t_d=하중지속기간$ ;  $\sigma_{max}=최대 주인장응력$ ;  $n=정적 피로상수$ ;  $m,k=표면 결합 특성$ ;  $RCSS=표면잔여압축응력$ ;  $A_i=요소 면적$ .

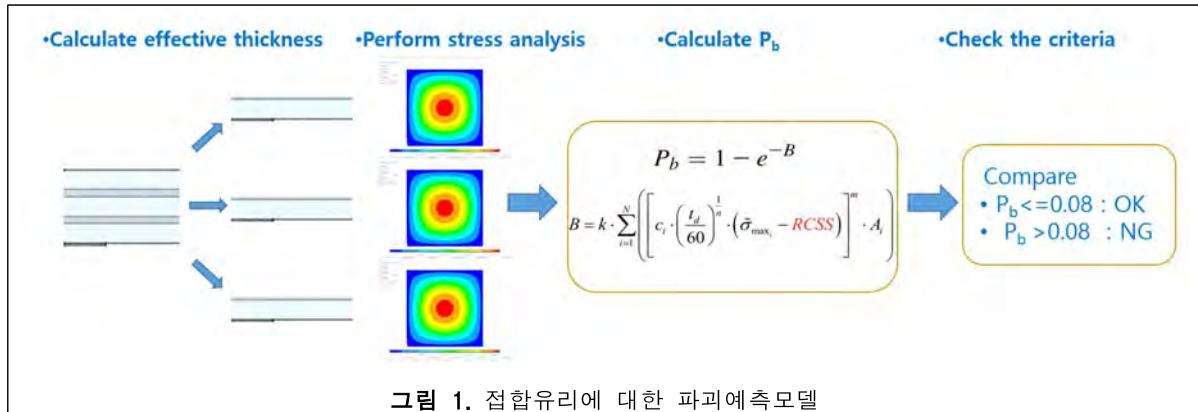


그림 1. 접합유리에 대한 파괴예측모델

한편, 유럽과 홍콩에서는 재료강도의 변동계수  $p_y$ , 강도감소계수  $\gamma_d$ , 유리표면처리에 따른 감소계수  $\gamma_s$ 를 고려한 값에 부분재료계수  $\gamma_m$ 를 적용하여 극한 설계저항치  $R_{ult}$ 를 식(4)와 같이 결정한다.

$$R_{ult} = f \left( \frac{\gamma_d \gamma_s p_y}{\gamma_m} \right) \quad (4)$$

#### 4. 구조용 유리바닥재의 실용성을 위한 방안

유리의 사용은 오래되었지만, 주로 창문 등 건물의 외장재로 사용하였다. 이제 구조용 유리바닥재로 사용하기 위해서는 휨거동에 대한 연구가 집중적으로 이뤄져야 한다. 커튼월이 바람하중을 받는 경우와 유사한 거동을 유추해 볼 수 있지만, 하중 특성이 바람하중과 여러 가지 측면에서 차이가 난다. (1) 하중크기; (2)하중지속시간; (3) 하중재하패턴; (4) 지지구조의 동적 거동; (5) 사용성을 위한 진동과 처짐 진동모드. 이러한 구조적 거동이외에도 유리재료의 품질에 대한 강도, 변동성에 대한 자료분석이 이뤄져야 되고, 지지구조의 접합부 및 시공과 유지관리에 대한 구체적 지침이 마련되어야 한다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 보행교의 유리바닥재 사용 현황을 살펴보고 부재설계를 위해서 고려해야 할 주요 사항들을 살펴보자 한다. 이는 보행교 유리바닥재 설계기준이나 지침을 마련하는데 기초자료로 활용될 수 있으리라 기대한다.

#### 참고문헌

- ASTM International. ASTM E1300-16 Standard practice for determining load resistance of glass in buildings

# 장대 교량의 에너지 자립을 위한 교량상 소형 풍력발전단지 개념 설계

Concept design of a small turbine wind farm on a bridge  
for energy independence of long-span bridge

최도현\* · 김수민\*\* · 김호경\*\*\*

Choi, Dohyun · Kim, Soomin · Kim, Ho-Kyung

장대 교량상에 소형 터빈으로 구성된 풍력발전단지를 조성하여 전력을 생산하고, 교량의 에너지 자립을 달성하기 위한 개념적인 설계 프로세스를 제안한다. 설계의 주요 배경은 해상 교량 주변의 높은 풍속과 거더 주변부 특정 지점의 풍속 할증 현상이다. 국내 공용중인 장대 교량의 6가지 대표 단면에 대한 CFD해석을 통해 풍속 할증 효과를 검증하고, 제시한 설계 프로세스를 하나의 대상교량에 적용하여 개념 설계를 수행하였다.

**핵심용어 :** 소형터빈, 풍력발전, CFD해석, 장대교량, 에너지 자립

## 1. 서론

장대 교량의 운영용 전력은 주로 경관등, 가로등, 케이블건조송기시스템, SHM 센서 등에 기인하며 연간 수백만 MWh가 소비된다. 정부의 녹색발전 기조에 따라 국내 사회기반시설의 에너지 자립을 위한 연구가 수행되어 왔다. 태양광 발전, 교각 주변의 조류 발전, 통행 차량의 하중을 활용한 진동력 발전 등에 대한 기초 연구가 수행되었고, 풍력발전은 국내 기술 수준이 높아 적절한 대안으로 대두되었다. 본 연구는 소형터빈으로 구성된 풍력발전단지 조성을 제안하며, 그에 대한 개념적인 프로세스를 제시하고, 하나의 대상교량에 적용하여 정량적인 검토를 수행한다. 설계에 대한 논리적 배경은 해상 교량 주변의 조도 계수가 낮고, 고도가 높아 풍속이 크며, 거더 주변부 특정 부위에서 풍속 할증 현상이 발생하는 것으로, 특히 CFD해석을 활용하여 최대 할증 지점을 찾아 소형 터빈의 배치도를 찾는 것이 주요 과정이다. 먼저 국내 공용 중인 장대 교량의 6가지 대표단면에 대한 CFD해석을 수행하여, 최대 풍속할증지점, 할증률, 적정 터빈 직경을 제시한다. 이 중 대상교량을 대상으로 개념적인 설계 프로세스를 적용하고, 타당성을 정량적으로 검토한다.

## 2. 국내 장대 교량의 6가지 대표 단면에 대한 풍속할증 효과 검증

풍속의 할증 효과와 발생 지점은 단면의 모양에 따라 크게 달라진다. 일반적인 교량에서 유의미한 할증 효과가 발생하는지 검증하기 위하여 국내 장대 교량의 6가지 대표 단면을 선정하여 CFD해석을 수행하였다. 풍 속의 할증률을 확인하기 위하여 경계조건은 풍속 10 m/s로 설정하여 접근풍속에 대한 최대풍속의 비를 계산하였고, Mesh와 Boundary 크기에 대한 독립성을 확인하여 해석 결과의 유효성을 검증했다.

해석의 결과는 그림 1.에 나타나 있다. 그림 1.에 명시된 ‘구간 높이’는 할증률 125% 이상인 구간의 길이로, 이로부터 터빈 직경을 결정한다. 대상교량의 경우 더블데크 교량의 특성상 Venturi 효과를 받아 할증률이 높지만, 할증 지점이 도로 상에 존재하므로 시설한계고의 영향을 받는 점을 고려해야 한다. 박스거더의 경우 큰 할증률과 큰 직경의 터빈을 활용할 수 있는 조건이 되어 윈드팜 조성 시 효율적이다. 반면 바람의 영향을 적게 받도록 설계된 트원박스거더의 경우 작은 할증률과 구간 높이에 비추어 보아 윈드팜 조성에 불리함을 알 수 있다.

\* 비회원 · 서울대학교 건설환경공학부 학사과정 (E-mail:dada2801@snu.ac.kr) – 발표자

\*\* 비회원 · 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, 공학사 (E-mail:ssominkim@snu.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:hokyungk@snu.ac.kr)

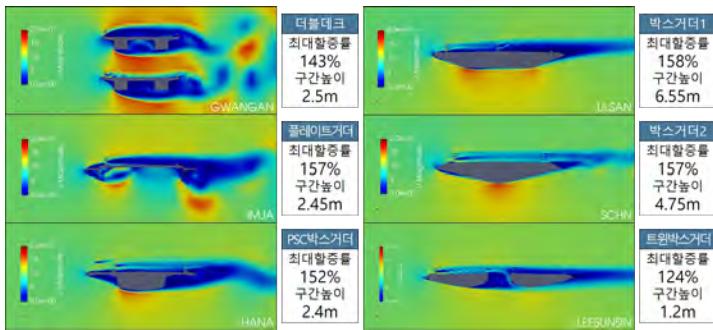


그림 1. 장대교량 6가지 대표단면에 대한 CFD해석 결과



그림 2. 대상교량 터빈 배치 횡단면도

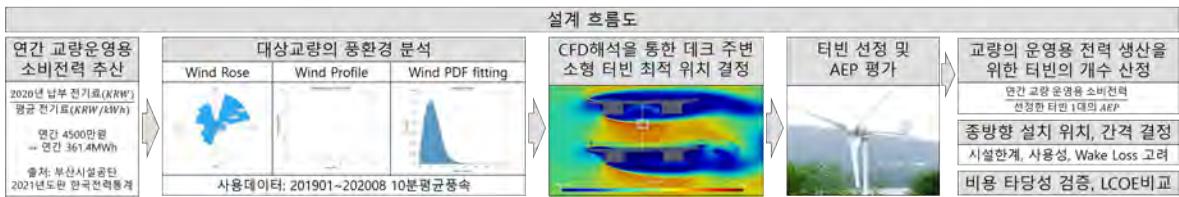


그림 3. 설계 흐름도

### 3. 소형풍력발전단지 설계 프로세스 적용 및 검토 – 대상교량

소형풍력발전단지 설계 프로세스는 그림 3.에 나타냈다. 선정한 터빈은 Rewindagic Factory사의 2 kW급 소형 터빈 M5-2000이다. 이는 최대 풍속 할증 지점에 방해물, 시설한계고를 고려하여 설치 가능한 최대 직경의 터빈이다. 선정 터빈의 Power Curve와 교량 주변 풍속의 확률분포를 수치 적분하여 얻은 터빈 1대의 연간 에너지 생산량(AEP)은 설치 위치에 따라 2.3~2.7 MWh이다. 요구 전력 생산량을 달성하기 위해 북동향 접속교에 115기, 북서향 접속교에 36기를 배치하였다. 전후 터빈 간 간격은 Wake Loss를 무시할 수 있는 최소간격으로 알려진 터빈 직경의 7배, 즉, 15 m로 정하였다. 횡단면 상 터빈 설치 지점은 그림 2.에 나타냈다.

설계 시뮬레이션의 결과, 풍속할증률은 접근풍속대비 최대 143%이고, 연간 전력 생산량은 약 364 MWh로 요구량인 361 MWh를 상회하여 교량 운영용 전력을 전량 회수할 수 있음을 확인하였다.

### 4. 결론

본 연구는 교량상 소형 터빈 윈드팜의 생산전력만으로 교량의 운영 전력을 충당하는 것이 가능함을 분석을 통해 보였으며 향후 다른 교량에 적용할 경우 참고할 만한 일반적인 설계 프로세스를 제시하였다. 추가로 비용적 이익을 도모하였으며, 친환경 에너지를 활용한 교량의 Energy-Free 운영전략을 제안했다. 검토 과정은 개념적인 프로세스에 기반한 것으로, 소형 터빈 설치로 발생하는 공학적 문제점까지는 다루지 않았다.

### 참고문헌

- Kim, S. J., Shim, J. H., & Kim, H. K., 2020, How wind affects vehicles crossing a double-deck suspension bridge., *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, 206, 104329, 1-11.
- Park, J. W., Jung, H. J., Jo, H., & Spencer, B. F., 2012, Feasibility study of micro-wind turbines for powering wireless sensors on a cable-stayed bridge., *Enrgies*, MDPI, 5, 9, 3450-3464.
- Lee, S., & Kwon, S. D., 2015, Improvement of Aerodynamic Performance and Energy Supply of Bridges Using Small Wind Turbines., *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 20, 10, 04014116.

# 웨브가 바닥판에 부분매립된 플레이트거더의 실대형 성능시험

## Full-scale load testing of the plate girder with partially encased web

이지운\* · 최대현\*\* · 조근희\*\*\* · 박재용\*\*\*\* · 강은호\*\*\*\*\*

Yi, Jiwoon · Choi, Dae-Hun · Cho, Keun-Hee · Park, Jae-Yong · Kang, Eun-Ho

본 연구에서는 상부 플랜지와 웨브의 일부를 슬래브에 매립시켜 형고를 낮추고 단면성능을 향상시킨 신형식 플레이트 거더를 개발하고, 피로성능과 극한휨성능을 평가하기 위해 52m 실대형 시험체를 제작하여 하중 재하시험을 수행하였다. 200만회 피로 반복하중 시험을 마치고 동일한 시험체에 극한하중을 재하한 결과, 탄성 범위 내에서는 하중-변위 거동과 단면 높이에 따른 변형률이 선형 관계를 유지하여 설계가정과 부합하는 성능을 보였고, 피로성능과 극한성능도 설계기준에 부합하여 개발된 거더의 안전성을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 플레이트거더, 강합성거더, 피로성능, 휨성능

### 1. 서론

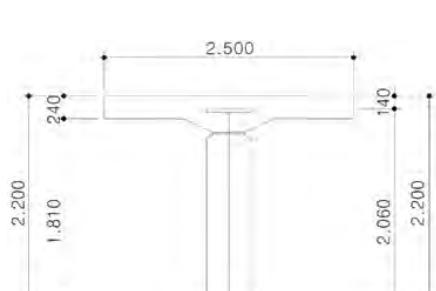
플레이트거더는 다른 거더 형식에 비해 설계와 제작이 단순하고 자중이 가벼워 제작성, 경제성, 시공성 등 여러 측면에서 상대적 강점을 갖는다. 본 연구에서는 상부플랜지와 웨브의 상단 일부를 바닥판에 매립하여 형고를 낮추고 단면강성을 높임으로써 장경간화가 가능하도록 개발된 플레이트거더를 대상으로, 피로성능과 극한성능을 평가하기 위해 실제 크기 시험체를 제작하고 성능실험을 수행하였다.

### 2. 시험체 제작 및 성능시험 개요

먼저 경간 52m, 2차선, 3주형 플레이트거더교를 도로교설계기준 한계상태법에 따라 설계했다. 3개 주형은 모두 동일한 제원으로 설계했고, 길이방향으로 거더와 바닥판의 단면 변화는 없도록 하였다. 사용 재료는 주형

은 HSB380(항복강도 380MPa), 바닥판은 압축강도 35MPa 콘크리트를 사용하였다. 거더 중앙부 단면의 제원은 그림 1에 나타난 바와 같다. 특징적으로 바닥판의 하면까지만 수직보강재가 올라와 있고, 보강재 상단의 양쪽 귀퉁이가 잘려있는 것을 볼 수 있다. 이는 시공 중 인접거더 간에 간편하게 가로보를 설치할 수 있도록 하는 장치로, 거푸집 설치를 용이하게 하고 거더의 전도를 방지하여 시공성과 안전성을 높이는 기능을 한다. 시험 가력하중은 휨모멘트를 집중하중으로 역산하여 산출하였으며, 최대 휨모멘트에서 모든 고정하중으로 인해 발생하는 모멘트를 제외하였다.

그림 1. 시험체 중앙부 단면 제원



주경간의 중앙부에 가력 프레임을 설치하고 양단 지점부는 롤러 헌지인 3점 휨 형태로 시험을 수행했다. 피로시험을 먼저 수행한 후 극한강도 및 공칭강도 정재하시험을 수행하였다. 200만회 피로하중 가력 중 0, 1,000, 10,000, 130,000, 1,000,000, 2,000,000회 등 6회에 걸쳐 사용 하중 정재하시험을 병행하여 시험체의 탄성거동 및 단면 성능을 확인했다. 피로 하중은 KL-510 차량하중으로 인해 거더에 발생하는 휨모멘트를 집중하중으로 환산하여 174.64kN를 최대하중으로 설정하고, 10~184.64kN 범위의 반복하중을 재하했다. 정적재하시험도 마찬가지 방식으로 한계하중 464.9kN을 도출하여 가력했다.

\* 정희원 · POSCO 구조연구그룹 수석연구원, 공학박사 (E-mail:jiwoon.yi@posco.com) – 발표자

\*\* 길교이앤씨 상무 (E-mail:dhchoi.gg@esgroup.net)

\*\*\* 한국건설기술연구원 연구위원, 공학박사 (E-mail:kcho@kict.re.kr)

\*\*\* 길교이앤씨 이사 (E-mail:jypark.gg@esgroup.net)

\*\*\* 길교이앤씨 차장 (E-mail:ehkang.gg@esgroup.net)

### 3. 피로 및 극한성능시험 결과

그림 2는 피로하중 재하 횟수별 하중-처짐 곡선을 함께 그린 것이다. 전체적으로 탄성거동을 하고 있음을 확인할 수 있다. 피로하중이 반복됨에 따라 초기에는 최대 처짐이 감소하는 양상을 보이며, 반복 횟수가 13만회를 넘어가면서 최대 처짐이 안정화되는 것을 볼 수 있다. 이는 시험체가 피로 하중에 의해 안정화되면서 나타나는 현상으로, 피로 누적에 의해 발생하는 처짐 증가의 영향보다 안정화 과정으로 인해 발현되는 처짐 감소 영향이 더 큰 것으로 판단할 수 있다.

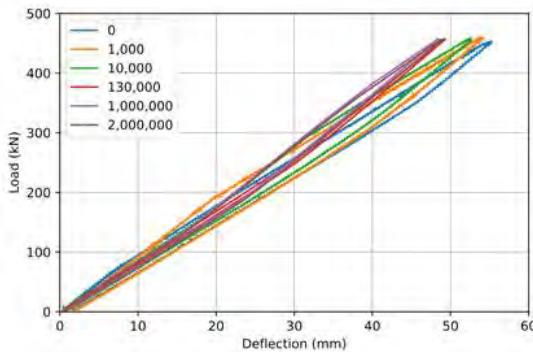


그림 2. 피로하중 재하 횟수별 하중-처짐 관계

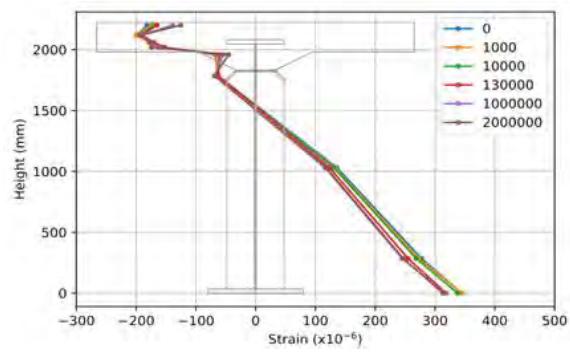


그림 3. 피로하중 재하 횟수별 변형률 분포(중앙부)

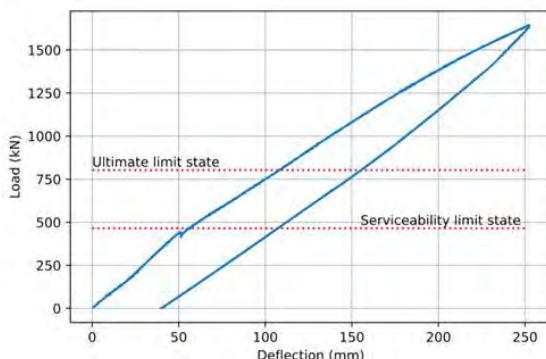


그림 4. 극한강도 시험의 하중-처짐 곡선

### 4. 결론

피로시험 및 극한강도 시험 결과, 개발된 거더는 200만회의 피로하중 반복 후에도 선형성이 유지되어 설계 가정을 그대로 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 특히 극한한계상태 하중의 약 2배인 1,644kN까지 하중을 가력했을 때에도 시험체가 손상의 징후를 보이지 않아 충분히 설계기준을 만족한다고 볼 수 있다. 개발된 거더는 형고가 낮고 자중이 가벼워 50m 전후의 장지간에 대해서 특히 강점을 발휘할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- 조근희 외, 2021, 강교량 경쟁력 향상을 위한 형고저감형 신형식 플레이트거더교 개발, 연구과제 보고서, 한국건설기술연구원.
- 한국교량및구조공학회, 2015, 도로교설계기준(한계상태설계법).

# 준능동 제어가 적용된 지진격리건물에 대한 실시간하이브리드실험

## Real-Time Hybrid Simulation of a Building with a Semi-Actively Controlled Base Isolation System

채 윤병\* · Rabiee, Ramin\*\*

Chae, Yunbyeong · Rabiee, Ramin

지진격리된 건물에서 고감쇠를 사용하는 것은 장주기 지진파에 대해 효과적으로 공진현상을 줄여줄 수 있지만, 이는 단주기 지진파에 대해서 가속도 응답을 증가시켜 오히려 비구조물의 안전성을 해칠 우려가 있다. 이 경우 저감쇠를 사용하는 것이 더 유리한데, 본 연구에서는 구조물 응답에 따라 시스템의 감쇠를 적절히 조절할 수 있는 transmissibility-based semi-active (TSA) controller를 사용해 지진격리된 건물의 내진성능을 실시간 하이브리드 실험을 수행해 평가해 보았다.

**핵심용어** : Base isolation, semi-active control, real-time hybrid simulation, TSA controller

### 1. 서론

지진격리 시스템은 구조물의 주기를 증가시켜 구조물에 작용하는 지진하중을 효과적으로 줄여주는 장치이다. 기존 지진격리장치는 단주기 지진파에 대해서 잘 작동하고 있지만, 장주기 성분이 풍부한 지진파에 대해서는 공진현상으로 인해 구조물 진동이 오히려 증가할 수 있게 된다. 이 경우, 고감쇠를 사용하는 것이 효과적이지만, 이는 단주기 지진파에 대해서는 가속도 응답을 증가시켜 비구조물의 파괴를 유발할 수 있게 된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 magneto-rheological (MR) 감쇠기와 TSA 제어기(Ramin and Chae 2019)를 이용해 지진격리된 건물의 감쇠를 준능동적으로 제어해 보았다. 지진격리된 건물의 지진응답은 실시간 하이브리드 실험을 통해서 얻었고, 실험 결과를 통해 TSA 제어기의 효과를 검토하였다.

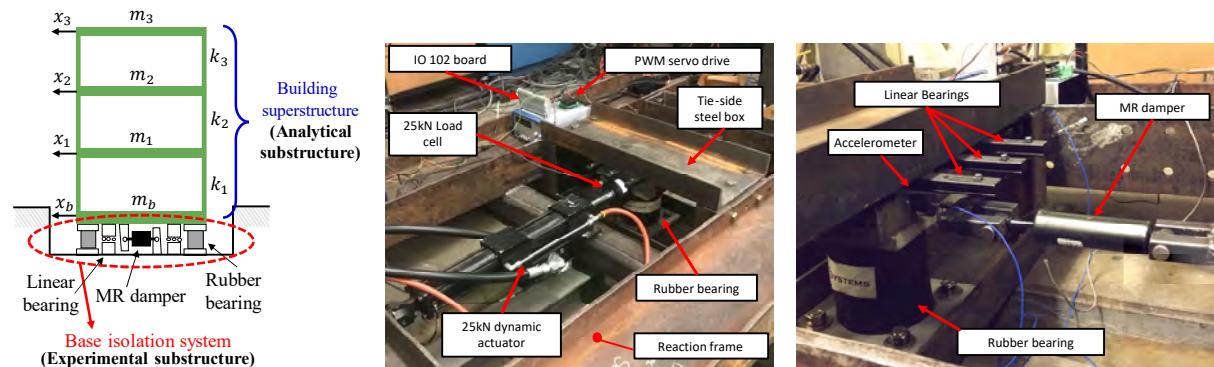


그림 1. 실시간 하이브리드 실험에 사용된 건물 모델 및 실험체 셋업

### 2. 실시간 하이브리드 실험 셋업 및 사용 지진파

그림 1은 본 연구에서 사용된 지진격리된 3층 건물과 실시간 하이브리드 실험을 위한 셋업을 보여주고 있다. 바닥층 이상의 건물구조는 해석적으로 모델링 되고, 바닥층 밑에 있고 비선형성이 심한 MR 감쇠기, 선형 받침, 그리고 고무받침은 실험적 구조물로써 그림 1과 같이 직접 실험을 통해 거동이 분석되었다. 실시간 하이브리드 실험에 사용된 장주기 및 단주기 지진파는 표 1 및 2와 같다.

\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 부교수, 공학박사 (E-mail:ybchae@snu.ac.kr) – 발표자

\*\* Ohio Northern University, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Visiting Professor, Ph.D. (E-mail:r-rabiee@onu.edu)

표 1. Selected long-period earthquake ground motions

| ID | Earthquake           | Year | Station               | Magnitude | Component  | Scale Factor |
|----|----------------------|------|-----------------------|-----------|------------|--------------|
| 1  | Imperial Valley, USA | 1979 | El Centro Array No. 6 | 6.5       | 230        | 0.27         |
| 2  | Northridge, USA      | 1994 | Sylmar Converter      | 6.7       | 052        | 0.29         |
| 3  | Chi-Chi, Taiwan      | 1999 | CHY101                | 6.3       | E          | 0.41         |
| 4  | Northridge, USA      | 1994 | Jensen                | 6.7       | 022        | 0.40         |
| 5  | Manjil, Iran         | 1990 | Abbar                 | 7.4       | Transverse | 0.69         |

표 2. Selected short-period earthquake ground motions

| ID | Earthquake          | Year | Station               | Magnitude | Component | Scale Factor |
|----|---------------------|------|-----------------------|-----------|-----------|--------------|
| 1  | Loma Prieta, USA    | 1989 | Capitola CDMG 47125   | 6.93      | 000       | 1.0          |
| 2  | San Fernando, USA   | 1971 | LA Hollywood Stor Lot | 6.61      | 180       | 1.0          |
| 3  | Cape Mendocino, USA | 1992 | Rio Del Overpass      | 7.01      | 360       | 1.0          |
| 4  | Friuli, Italy       | 1976 | Tolmezzo              | 6.50      | 000       | 1.0          |
| 5  | Northridge, USA     | 1994 | Canyon Country        | 6.69      | 000       | 1.0          |

### 3. 실시간 하이브리드 실험 결과

그림 2는 상기 지진파를 바탕으로 얻어진 실시간 하이브리드 실험 결과를 나타낸다. 장주기 지진파 및 단주기 지진파 응답의 평균값을 나타낸 것으로, 격리받침의 최대 변위, 3층 충간변위, 3층 지붕의 속도, 그리고 3층 지붕의 가속도를 보여준다. 전반적으로 TSA 제어기는 장주기 지진파에 대해서는 passive-on 제어(MR 감쇠기에 항상 최대전류를 입력하는 경우, 고감쇠)와 비슷하게, 그리고 단주기 지진파에 대해서는 passive-off 제어(MR 감쇠기에 전류를 공급하지 않음, 저감쇠)와 비슷하게 거동을 하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 격리받침의 변위, 충간변위에서 고감쇠 및 저감쇠의 장점을 모두 취할 수 있어서 TSA 제어기를 사용할 경우 다양한 지진파에서 효과적으로 지진하중을 저감할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

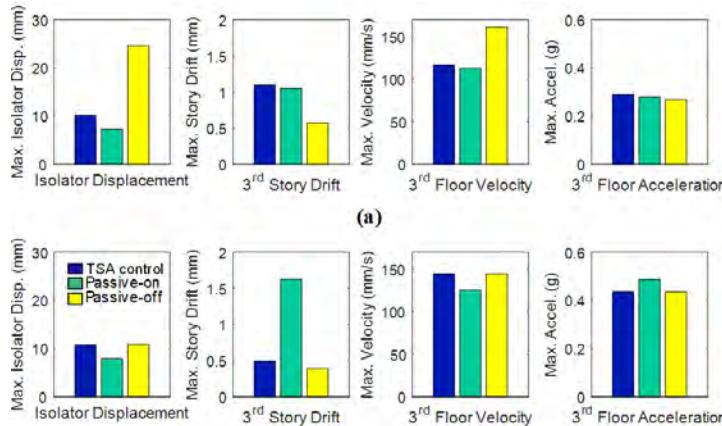


그림 2. 실험 결과 (a) 장주기 지진파에 대한 평균 응답; (b) 단주기 지진파에 대한 평균 응답

### 4. 결론

실시간 하이브리드 실험 결과 TSA 제어가 적용된 지진격리건물은 장주기 성분에서는 감쇠를 증가시키고, 단주기 성분에서는 감쇠를 감소시켜 다양한 지진파에 대해 효과적으로 대처하고 있음을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- Rabiee R and Chae Y (2019) Adaptive base isolation system to achieve structural resiliency under both short- and long-period earthquake ground motions. Journal of Intelligent Material Systems and structures 30(1): 16–31. <https://doi.org/10.1177%2F1045389X18806403>

# 부식 결함이 존재하는 관의 길이 방향 부식 간격에 따른 파열 압력 차이 분석에 관한 연구

## Analysis on Pipe Burst Pressure According to Longitudinally Spaced Corrosion Defects

남영준\* · 김정현\*\* · 배철호\*\*\* · 임윤묵\*\*\*\*

Nam, Young Jun · Kim, Jeong Hyun · Bae, Cheol Ho · Lim, Yun Mook

본 연구는 부식된 관체의 파열 압력 실험 결과를 해석을 통해 도출된 결과와 비교하고 논의하였다. 유한요소 해석을 통해 추정된 결과는 실험값과 비교해 작은 오차율을 보여주었고, 부식의 간격이 줄어듦에 따라 파열 압력 추정값이 작아지는 추세를 나타냈다.

**핵심용어** : 부식, 파열 압력, 유한 요소 해석, 기계적 물성

### 1. 서론

최근 관로의 노후화에 따른 사고가 많이 보도되고 있는데, 노후화 항목 중 물리적, 환경적 영향에 따른 부식이 큰 요인 중의 하나로 분석되고 있다. 부식에 따른 단면 손실은 곧 관로의 성능 저하로 이어지기 때문에 분석의 필요성과 함께 연구가 진행되었다.

### 2. 부식 평가 코드

여러 부식 평가 코드 중 ASME B31G는 현재까지 다수의 연구에 적용된 부식 평가 코드로 1960년대 초기 개발되어 1984년부터 2012년까지 개정이 진행되었다 [1]. 이를 통해 추정하는 파열 압력(burst pressure,  $P_b$ )은 다음의 식으로 표현된다.

$$P_b = 2 \times t \times \frac{S_f}{D} \quad (1)$$

$$S_f = 1.1\sigma_y \left[ \frac{1 - \frac{2}{3}\left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \frac{2}{3}\left(\frac{d}{t}\right)/M} \right] \quad (2)$$

$$\left( \text{여기서, } M = \sqrt{\left(1 + 0.8 \frac{L^2}{Dt}\right)} \right)$$

파열 압력의 추정에 입력되는 변수는 관경(D), 두께(t), 재료의 항복 강도( $\sigma_y$ ), 부식의 길이(L) 및 깊이(d)이다.

### 3. 실험 및 해석

본 연구에서 대상으로 참고한 연구에 따르면, 시험체별 실측치는 상이하지만 관경 508 mm, 두께 9.5 mm의

\* 비회원 · 연세대학교 건설환경공학과 박사과정, 공학사 (E-mail:raden4@yonsei.ac.kr) – 발표자

\*\* 비회원 · K-water 융합연구원, 수석연구원 (E-mail:jhkim@kwater.or.kr)

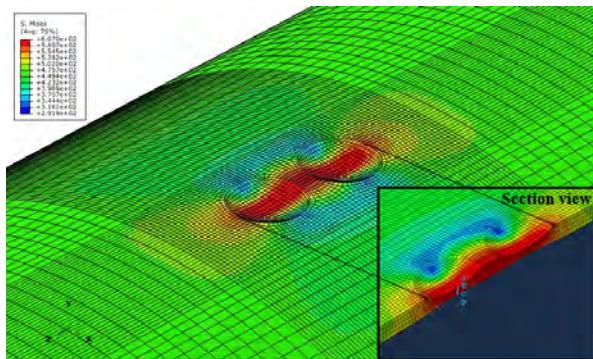
\*\*\* 비회원 · K-water 융합연구원, 책임연구원 (E-mail:baech@kwater.or.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 연세대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:yunmook@yonsei.ac.kr)

관체에 대해 [표 1]와 같이 관 두께의 절반에 해당하는 35mm 크기의 부식을 길이 방향으로 간격을 두어 천공하여 실험을 진행하였다. 네 가지 시험체의 해석을 통한 평행 압력 추정 결과는 실험값과 비교했을 때 1% 내외로 합리적으로 추정되었다. 부식의 간격에 따라 응력 분포 다소 상이하지만 대표적으로 간격이 가장 가까운 실험 19의 경우 [그림 1]과 같이 나타났다. 개정된 ASME B31G의 경우 해석 결과와 더불어 부식의 간격이 줄어들에 따른 평행 압력이 감소하는 경향을 반영하는 것을 볼 수 있었지만, 그 추정값에는 차이가 다소 존재하였다.

**표 1. 부식 형상 관련 정보 및 실험/해석 결과**

| 실험 No. | 부식 갯수 | 부식 간격 | 평행 압력 (MPa) |       | ASME B31G (MPa) | 해석 오차 (%) |
|--------|-------|-------|-------------|-------|-----------------|-----------|
|        |       |       | 실험          | 해석    |                 |           |
| 19     | 2     | 9.90  | 19.11       | 19.38 | 14.86           | 1.41      |
| 20     | 2     | 38.7  | 19.59       | 19.56 | 14.98           | 0.15      |
| 21     | 2     | 48.7  | 19.65       | 19.62 | 15.02           | 0.15      |
| 22     | 2     | 58.2  | 20.08       | 19.78 | 15.12           | 1.49      |



**그림 1. 실험 19의 응력 분포**

#### 4. 결론

단일 부식에 대한 연구는 많이 진행되었지만, 이중 및 다중 부식에 대한 연구는 다소 부족하여 그 중 길이 방향 부식 배치 간격에 따른 평행 압력의 추정에 관한 연구를 진행하였다. 부식의 길이 방향 간격이 감소함에 따라 부식 간의 응력 간섭이 생겨 그 평행 압력이 더 적게 추정되는 경향을 나타내었다. ASME 코드를 통한 추정은 보수적이어서 오차가 다소 크기 때문에, 해석을 통한 정확한 판단이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 물관리연구사업(AWMP)의 지원을 받아 연구되었습니다 (No. 127585). 또한, 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2019R1A 2C1090426).

#### 참고문헌

- ASME. (2012). Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines B31G. *American Society of Mechanical Engineers*.
- Al-Owaisi, S., Becker, A. A., Sun, W., Al-Shabibi, A., Al-Maharbi, M., Pervez, T., & Al-Salmi, H. (2018). An experimental investigation of the effect of defect shape and orientation on the burst pressure of pressurised pipes. *Engineering Failure Analysis*. 93, 200–213.

# 교량 내진보강 강재 전단키의 받침 콘크리트 손상 사례 연구

## A Case Study on Damage of Concrete Pedestal of Steel Shear Key for Seismic Retrofit of Bridge

강상규\*

Kang, Sang Gyu

최근 내진보강을 위해 교대 및 교각에 강재 전단키를 설치한 교량에서 전단키 받침 콘크리트의 균열 및 파손 등 손상이 발생하는 사례가 자주 보고되고 있다. 본 논문에서는 해당 손상이 발생한 실제 고속도로 상 교량을 대상으로 손상 원인을 파악하고 유지관리 방안에 대해서 검토하였다.

**핵심용어** : 내진보강, 강재 전단키, 받침 콘크리트, 손상

### 1. 서론

몇 년 전부터 국내에서는 기존 교량의 내진성능 보강을 위해 강재 전단키가 많이 사용되고 있다. 강재 전단키는 기존에 설치된 교량 받침과 함께 교축직각 방향 지진력에 견딜 수 있는 성능을 발휘하도록 설계되고 있으며, 수직하중을 제외하고 교량 받침과 동일한 설계 절차를 따르게 된다. 최근 내진보강을 위해 강재 전단키를 설치한 교량에서 전단키 받침 콘크리트의 균열 및 파손 등 손상이 발생하는 사례가 자주 보고되고 있으며, 이렇게 손상이 발생한 전단키에서는 내진성능의 충분한 발휘를 기대할 수 없기 때문에 추가적인 보수 및 보강이 요구되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 해당 손상이 발생한 실제 고속도로 상 교량을 대상으로 내진성능 보강을 위해 교대 및 교각에 설치된 강재 전단키의 받침 콘크리트부에서 발생한 균열 및 파손 등의 손상 원인을 파악하고 유지관리 방안에 대해서 검토한다.

### 2. 교량 손상 현황

#### 2.1 교량 현황

대상 교량은 1999년 준공되고 2008년 내진보강된 총연장 480m(45.0+3@50.0+45.0+45.0+3@50.0+45.00)의 연속 강박스 거더 교량으로서 3개의 강박스 거더(높이:2.7m)로 구성되어 있으며 교량 유효 폭원 및 사각은 17.2m, 0°이며, 받침 형식은 포트받침, 신축이음장치는 강평거 조인트가 설치된 교량이다. 또한, 강재 전단키는 그림 1에서 보이는 것처럼 모든 교대 및 교각 위치에 1개소(단, 신축이음장치가 위치한 P5에는 2개소)씩 총 12개소에 설치되어 있다.

#### 2.2 손상 현황

총 12개소 중 받침 콘크리트 하부 균열 및 파손이 4개소(A1, A2의 각 1개소와 P5의 2개소)에서 발생되었으며, 손상이 발생한 위치는 모두 신축량이 제일 큰 신축이음장치가 설치된 곳이었다.

모든 강재 전단키의 표면에는 부식이 발생하였으며 손상이 발생한 전단키 상·하부 본체의 유격에서는 유간 힙착이 관찰되었다. 하지만, 손상이 발생한 전단키의 앵커볼트는 절단이 되지 않은 상태였으며, 인접한 가동 받침에서도 앵커볼트와 받침 콘크리트 모두 상태가 양호하였다. 또한, 신축이음장치와 바닥판의 온도신축 유간은 여유량을 확보하고 있는 것으로 관찰되었다.

\* 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 (E-mail:kevin@ex.co.kr) – 발표자

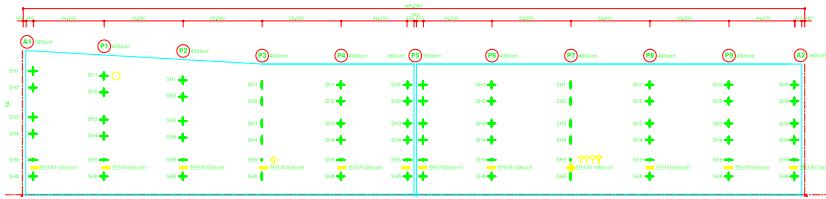


그림 1. 교량받침(연두색) 및 전단키(노란색) 배치도

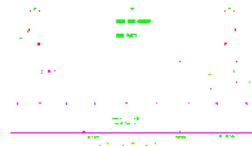


그림 2. 전단키 보강 상세 도면 및 설치 사진



그림 3. 신축이음장치 유간(A1)



그림 4. 바닥판 유간(A1)



그림 5. 전단키 상태(A1, P5)



그림 6. 전단키 상태(P5, A2)

### 3. 손상 원인 및 유지관리 방안

받침 콘크리트가 파손된 전단키들은 상·하부 전단키 본체의 유간 협착으로 교축방향 거동이 제한된 상태이며, 교량 온도신축 거동을 따라 전단키의 교축방향 이동이 발생하지 않고 저항이 발생하면서 받침 콘크리트 하부에 손상이 발생한 것으로 판단된다. 또한, 전단키 받침 콘크리트 하부의 들뜸은 전단키 하부 본체와 받침 콘크리트 및 교각 코평부(또는 교대 구체) 콘크리트와의 연결 상세 불량이 원인인 것으로 판단된다. 받침 콘크리트의 연단거리가 높이에 비해 과도하게 짧으며, 앵커소켓을 교각 코평부(또는 교대 구체) 상부철근까지 연장하여 용접하여야 하나 시공 사진에서는 단순히 콘크리트 천공 후 철근을 삽입하여 에폭시 충진으로 마무리 한 상태인 것으로 판찰되었다.

내진보강을 위한 전단키의 정상적인 성능을 확보하기 위해서는 단순한 보수가 아니라 강재 전단키의 재설치가 필요하였으며, 전단키 재설치 시에는 한국도로공사의 ‘교량 받침부 설계지침(2012)’에 따라 설계 및 시공하도록 하였다. 또한, 전단키의 원활한 교축방향 거동을 위해서 전단키 상·하부 본체 유간에 미끄럼판(PTFE판)을 설치할 것을 추천하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 실제 고속도로 상 교량의 내진보강을 위해 교대 및 교각에 설치된 강재 전단키의 받침 콘크리트부에서 발생한 균열 등의 손상 원인을 파악하고 유지관리 방안에 대해서 검토하였다.

1. 상·하부 전단키 본체의 유간 협착으로 교축방향 거동이 제한된 상태로 온도신축에 따라 저항이 발생하였으며, 전단키 하부 본체와 받침 콘크리트 및 하부 콘크리트와의 연결 상세 불량이 손상 원인인 것으로 판단되었다.
2. 정상적인 내진 성능을 확보하기 위해서는 단순한 보수가 아니라 강재 전단키의 재설치가 필요하였으며, 전단키 재설치 시에는 한국도로공사의 ‘교량 받침부 설계지침(2012)’에 따라 설계 및 시공하도록 하였다.

### 참고문헌

1. 한국도로공사, “교량 받침 유지관리 매뉴얼”, 2004.

# 철근콘크리트 보의 휨 파괴 실험 시 음향방출 신호 분석

## Analysis of Acoustic Emission Signals in Flexural Experimental of Reinforced Concrete Beam

박승민\* · 김다위\*\* · 박원석\*\*\* · 이성로\*\*\*\*

Park, Seungmin · Kim, David · Park, Wonsuk · Seonglo Lee

콘크리트 구조물의 손상 및 파괴를 모니터링하기 위한 방법으로 음향 방출 기법(Acoustic Emission Method)을 적용하는 연구가 수행되어 왔다. 이 연구에서는 철근 콘크리트 보의 파괴에 따른 역학적 거동과 구조물 손상이 진행됨에 따라 방출되는 음향방출신호 특성의 관계를 분석하고 여러 하중재하 방식을 통해 AE 누적 에너지와 누적 이벤트 신호를 구조물의 하중 단계별 손상상태 평가방법인 손상지수에 적용하였다.

**핵심용어** : 음향 방출, 철근 콘크리트 파괴, 손상도 평가, 손상지수

### 1. 서론

음향방출(Acoustic Emission) 기술은 철강 및 기계 분야에서 비파괴 검사로써 폭넓게 사용되고 있다. 일반적으로 구조 부재가 하중을 받고 파괴될 때는 부재 내부에 축적된 에너지가 해방되면서 탄성파 형태로 음파가 발생하게 된다. 이 탄성파는 AE 센서에 의해 감지될 수 있으며 이를 이용하여 구조물의 손상을 탐지하게 된다[1, 2]. 이 연구에서는 철근콘크리트 보의 파괴나 손상 시 발생하는 음향 방출 신호의 기초적 특성을 파악하고 각 하중 단계별 정적, 동적 파라미터와 AE 파라미터의 분석을 통해 휨 파괴 과정과 탄성영역에서의 손상 특성을 파악하였다.

### 2. 철근 콘크리트 보의 휨 가력 시험

이 실험의 AE 모니터링 시험에서는 2개의 철근 콘크리트 보 시험체에 대해 4점 휨 반복하중 실험을 수행하였다. 콘크리트 평균압축강도는 60Mpa이며, 철근인장강도는 400Mpa로 하였으며, 각 시험체 별로 변위제어(2mm/step)와 하중제어(15kn/step)로 실험을 실시하여 콘크리트의 물리적인 파괴거동과 AE신호특성을 분석하였다. 실험과정으로는 1.가속도응답 계측을 위한 임팩트 헤머 가진 - 2.Load Step 시작 - 3.Step 별 최대하중에서 Holding: 균열 측정 - 4. Unloading - 5. Load Step 종료 - 6. 잔류균열 측정 순으로 이루어졌다. AE 신호 특성 분석에는 손상지수 평가를 위해 AE 누적 에너지-이벤트(Hit) 관계를 이용하였다. AE 센서는 그림2와 같이 부착하고 검출 조건은 AE 신호가 일정 Threshold (40 dB)를 넘을 때로 하였다.

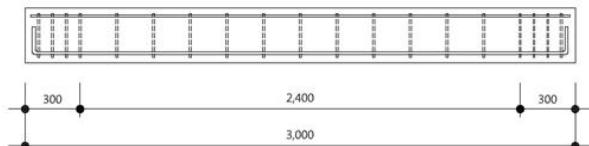


그림 1. 철근콘크리트 보



그림 2. 철근콘크리트 보의 휨 가력 시험

\* 정희원 · 목포대학교 토목공학과 석사과정, 공학사 (D20141701@365.mokpo.ac.kr) – 발표자

\*\* 정희원 · 한경대학교 사회시스템공학부, 공학박사 (E-mail:davidkim@hknu.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 목포대학교 토목공학과 부교수, 공학박사 (E-mail:wonsuk@mokpo.ac.kr)

\*\*\*\* 정희원 · 목포대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (E-mail:sllee@mokpo.ac.kr)

### 3. 실험결과

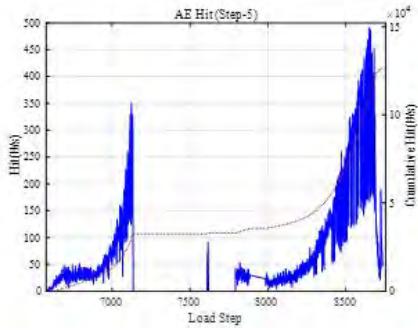


그림 3. AE\_Hit

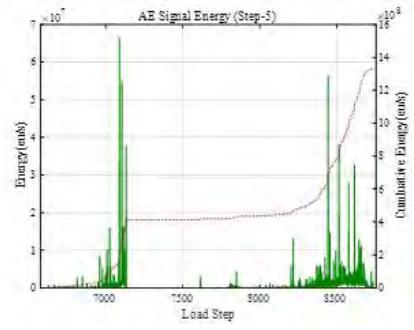


그림 4. AE\_Signal Energy

그림3,4 에서와 같이 반복하중에 의한 균열전파, 균열 생성이 진행됨에 따라 AE 신호가 증가하였고 인장철근 항복에 의한 급격한 AE신호가 발생되었다. 위의 하중 단계별 구조물의 손상상태를 평가하기 위한 방법으로써 AE파라미터를 통해 손상지수(Index od Damage, ID)를 적용하였다. 손상지수는 식(1)에서와 같이 철근콘크리트의 소성 변형에너지(Plastic strain energy)와 누적 AE 에너지의 상관관계에 기반한다.

$$ID_E = \frac{E_t^{AE}}{E_t^{AE}} \quad ID_H = \frac{H_t^{AE}}{H_t^{AE}} \quad (1)$$

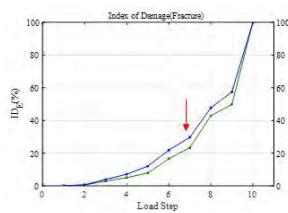


그림 5. 변위제어 콘크리트 손상지수

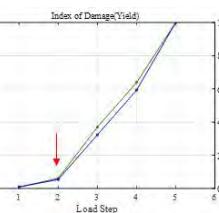


그림 6. 변위제어 철근 손상지수

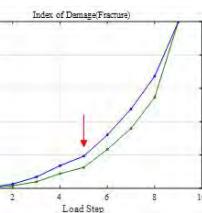


그림 7. 하중제어 콘크리트 손상지수

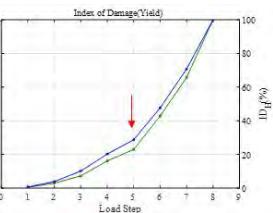


그림 8. 하중제어 철근 손상지수

### 4. 결론

- 1) 철근콘크리트 보의 휨 거동에 따른 물리적 특성과 하중 단계별 음향방출(AE) 파라미터의 상관관계를 분석하여 손상도 평가에 적용하였고, 도출된 손상지수는 하중재하 단계에서의 균열의 특성을 잘 모사하고 있다.
- 2) AE 파라미터와 물리적 특성의 상관관계 분석 결과 누적 AE 에너지의 변화와 휨 거동의 손상 과정은 매우 유사한 상관관계를 보이며 이 결과는 균열과 변위 패턴 분석을 통해 검증하였다.
- 3) 철근콘크리트 보의 AE 데이터 분석과 손상도 데이터를 발전시켜 향후 벽체실험 결과 분석에는 구조물의 손상도와 손상위치 탐지가 가능할 것으로 판단된다.
- 4) AE 파라미터의 특성 분석을 통하여 휨을 받는 철근콘크리트 보의 손상 및 파괴 과정을 분류할 수 있으며, 이 결과를 바탕으로 구조물의 건전성 및 위험도를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업(20191510301470)의 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 한상훈, & 이옹종. (2017). 음향방출 (Acoustic Emission) 기법에 의한 콘크리트 균열발생원 위치결정에 관한 연구. 콘크리트학회 논문집, 29(6), 571–580.
2. Benavent-Climent, A., Gallego, A., & Vico, J. M. (2012). An acoustic emission energy index for damage evaluation of reinforced concrete slabs under seismic loads. Structural Health Monitoring, 11(1), 69–81.

# 소형 풍동을 활용한 산악 계곡 지형의 풍환경 특성 변화 분석

## Analysis of Wind Characteristics of Mountain Valley Topography Using Small Wind Tunnels

정우진\* · 박주현\*\* · 최도현\*\*\* · 김호경\*\*\*\*

Chung Woo-Jin · Park Joo-Hyun · Choi Do-Hyun · Kim Ho-Kyung

본 연구는 소형 풍동을 활용하여 산악 계곡 지형에서의 풍환경 특성을 정성적으로 평가하는 것을 목표로 한다. 고도 변화가 심한 산악 계곡 지형의 풍환경 특성을 분석하기 위하여 청량산 국립공원에 있는 산악 계곡 지형을 모사한 지형모형을 제작하여 소형 풍동 내에서 제한적 실험을 시행하였다. 풍동 내에서 모사한 지역의 풍속 프로파일을 구현하기 위하여 스파이어와 조도블럭을 설치하였으며, 풍속할증률은 지형모형 중앙부에서 모형의 유무에 따라 평가하였다.

**핵심용어** : 풍동실험, 산악 지형, 지형모사 실험, 풍환경, 풍속할증율

### 1. 서론

최근 발전을 거듭하며, 경사지 또는 산악 지형에 구조물을 건설하는 빈도가 높아지고 있다. 특히 국립공원과 도립공원 내 산악 지형에 케이블리지 보행교 건설 빈도수가 높아지고 있다. 산악 지형에서는 기류 변화, 지형효과 그리고 차폐효과로 인하여 풍속이 증가하거나 감소하는 현상이 일어나므로 산악 지형에 건설되는 구조물은 내풍 안정성 확보가 중요하다. 본 연구는 청량산 국립공원의 V자형 산악 계곡 지형을 모사하여 산악 계곡 지형의 풍환경 분석을 정성적으로 평가하는 데에 집중하였다.

### 2. 검토 모형과 실험 방법

본 연구에서는 각각 0.67과 0.71의 기울기를 형성하는 V자형 계곡 구간 660 m를 중심으로 가로 2 km × 세로 4 km 구간을 모사한 지형모형을 활용했다. 모형의 축소율은 길이 스케일 1:2000, 시간 스케일 250:1을 적용했다. 풍동 측정부 단면은 폭 1 m × 높이 1.5 m이다. 인근의 기상대와 무인기상관측장비의 장기 데이터 분석과 태풍시뮬레이션을 적용해 풍환경 분석으로부터 기본풍속을 산정하였다. 기본풍속 20.8 m/s(지표조도 II)에 해당하는 경도풍 40.05 m/s(지표조도 III) 풍동내 경도풍 5 m/s로 환산하여 등류 조건에서 실험을 시행하였다. 본 실험에 앞서 스파이어와 조도블럭을 설치해 지표조도 III에 해당하는 풍속프로파일을 모형 진입부를 기준으로 구현했다. 계곡 구간 1/4지점(기울기 0.67), 1/2지점(기울기 0) 그리고 3/4지점(기울기 0.71)에서의 풍속을 모형 유무에 따라 양방향에 대하여 측정해 변화율을 확인했다.



그림 1. 지형모사 구간



그림 2. 지형모형

\* 비회원 · 서울대학교 건설환경공학과 석사과정, 공학사 (E-mail: woch20019@snu.ac.kr) – 발표자

\*\* 비회원 · 서울대학교 건설환경공학과 석사과정, 공학사 (E-mail: serendipity202@snu.ac.kr)

\*\*\* 비회원 · 서울대학교 건설환경공학과 학사과정 (E-mail: dada2801@snu.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail: hokyungk@snu.ac.kr)

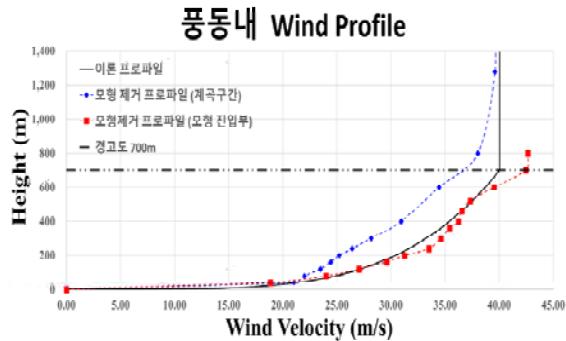


그림 3. 풍동내 Wind Profile

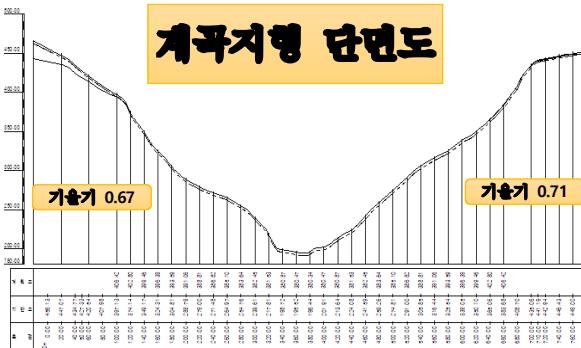


그림 4. V자 계곡지형 단면도 (측정부)

### 3. 풍동실험 결과

풍속할증계수는 풍속계측지점에서 높이 방향으로 모형의 유무에 따라 측정한 풍속의 비로 정의하였다. 세 지점에서 경고도 높이까지의 풍속할증률을 평가하였다. 1/2 지점은 기울기가 없는 위치로, 마을 방향에 위치한 산의 영향을 받아 풍속 저감효과가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 반대로 1/4 지점과 3/4 지점의 결과를 통하여 경사가 급하게 형성되어 있을수록 더 큰 풍속할증이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 더불어, 이러한 경사지형에서는 근처의 국부적인 굴곡 양상의 차폐효과를 크게 받는다는 것을 확인하였다.

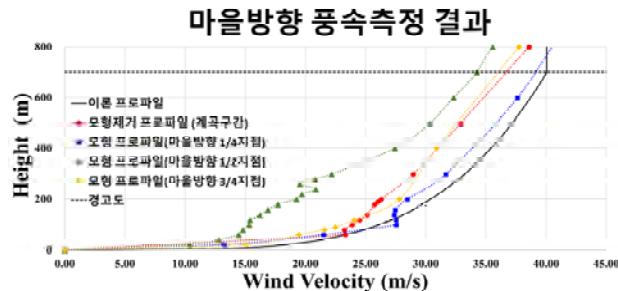


그림 5. 마을방향 실험결과

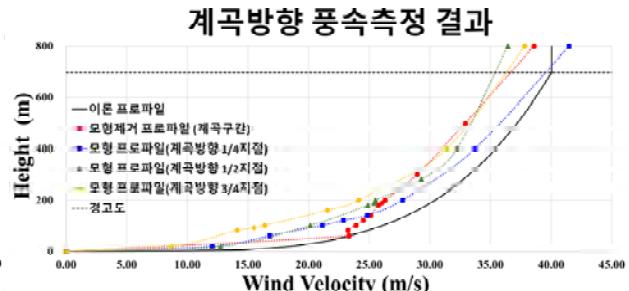


그림 6. 계곡방향 실험결과

### 4. 결론

본 연구에서는 풍동실험을 통해 산악지형에서의 풍환경 특성을 정성적으로 평가하고자 하였다. 전체적인 계곡 지형 안에서 경사가 크지 않은 위치에서는 주변 지형보다는 바람 방향으로 위치한 산이나 언덕과 같은 큰 지형의 영향이 지배적이고, 경사가 크게 진 위치에서는 그 경사가 클수록 풍속할증률이 커지며, 근처의 굴곡 양상으로부터 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 한국교량및구조공학회 (2021), 출렁다리 설계 가이드라인, 국토교통부
- C. G. Li, Z.Q Chen, Z.T Zhang & J.C.K Cheung (2009) Wind tunnel modeling of flow over mountainous valley terrain.
- P. Ostenfeld-Rosenthal, H.O. Madsen and A. Larsen (1992) "Probabilistic Flutter Criteria for Long Span Bridges", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.

# PSC 교량 공동조사를 위한 덕트깊이별 Impact-Echo 분석 연구

## A Study of Impact-Echo Analysis by Duct Depth for Void Investigation of PSC Bridge

이성호\* · 에르덴 솟 반세베루 \*\* · 김기현\*\*\* · 윤석구\*\*\*\*

Lee, Seong Ho · Erdenetsogt, Vanseemberuu · Kim, Ki Hyun · Youn, Seok Goo

국내 교량들이 1970년대에 대거 건설되면서 현재 노후화된 교량들의 유지관리가 중요해지고 있다. PSC 교량에서 덕트 내부의 공동은 강연선의 부식, 파단까지 일으킬 수 있어 PSC 교량 내에서 공동조사가 필요하다. 이 연구는 Impact-Echo 방법으로 덕트 내부의 공동조사를 실시했으며 깊이별 덕트가 매입된 실험체를 제작하여 덕트 깊이별 공극/비공극 부분에서의 Impact-Echo 결과를 분석하였다.

핵심용어 : PSC, Impact-Echo

### 1. 서론

국내 교량들은 1970년대부터 대거 건설되면서 점차 노후화된 교량들의 안전 문제가 중요해지고 있다. PSC(Prestressed Concrete) 교량은 국내 교량의 상부구조 방식 중에서 40% 이상 차지하고 있으며 2016년 정릉천고가교의 외부강연선 파단 사고로 인하여 기존의 PSC 교량들에서 덕트 내부의 공동조사가 필요해지고 있다. 비파괴검사 방법 중에서 Impact-Echo 방법은 콘크리트 내부의 결함을 탐지할 수 있다고 여겨진다. 이 연구는 덕트가 깊이별 매입된 실험체를 제작하여 Impact-Echo 방법으로 덕트 깊이별로 결합/비결합 부분에서 실험하고 결과를 FFT 분석하였다.

### 2. 실험체

실험체는 그림1에 나타내었다. 실험체1에는 덕트가 깊이 200mm, 500mm, 400mm에서 매입되어있고 실험체2에는 덕트가 깊이 100mm, 300mm, 600mm에서 매입되었다. 덕트마다 곳곳에 공극부분을 인위적으로 만들었으며 그림1에 사선 표시로 공극부분을 나타내었다. 그림1에서 단위는 mm이다.

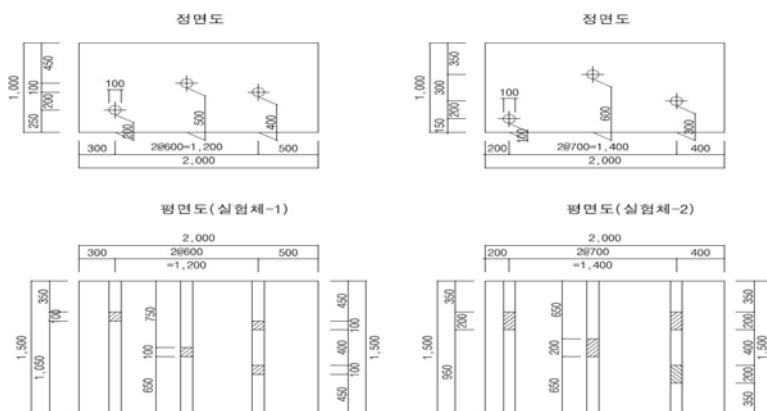


그림1. 실험체 도면

\* 정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정, 공학사 (goodsung93@naver.com) – 발표자

\*\* 준희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정, 공학사 (same.se77@gmail.com)

\*\*\* 준희원 · 컨텍이앤씨(주) 대표, 공학박사 (paullll@nate.com)

\*\*\*\* 정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수, 공학박사 (sgyoun@seoultech.ac.kr)

### 3. Impact-Echo

Impact-Echo 실험에서 타격장치는 19mm의 금속 원형 추를 사용했다. 100mm~600mm의 덕트 깊이별 공극/비공극 부분에서 FFT 변환 결과는 그림2에 나타내었다. 진폭은 공극/비공극 부분에서의 FFT 변환 결과를 같이 비교하기 위해 상대진폭으로 나타내었다.

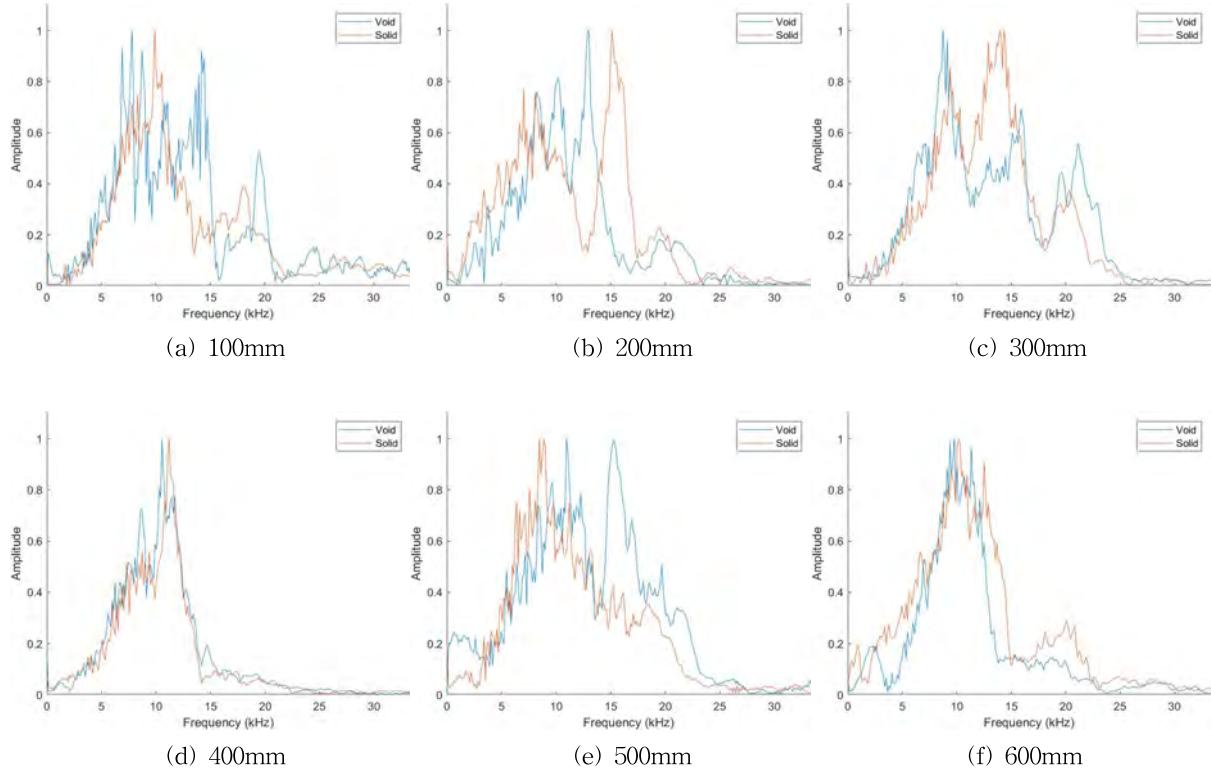


그림2. 덕트 깊이별 FFT 변환 결과

덕트 깊이 100mm, 200mm, 300mm, 500mm에서 공극과 비공극의 FFT 형태는 뚜렷한 차이를 보이지만 덕트 깊이 400mm, 600mm에서 공극과 비공극의 FFT 형태는 구분하기가 어렵다. 이론 주파수의 경우 콘크리트 두께(100mm)에서는 2.1kHz, 100mm~600mm 깊이별 공극에서는 19.2, 9.6, 6.4, 4.8, 3.8, 3.2 (단위: kHz)이다. 공극 부분에서의 FFT 결과, 깊이 100mm에서 19.5kHz, 200mm에서 10.2kHz, 300mm에서 7.2kHz의 이론 주파수와 비슷한 주파수대에서 약간의 피크점이 발생한 것을 확인할 수 있다. 그 외의 더 깊이 매입된 덕트에서는 이론 주파수와 비슷한 피크점을 발견하기 어려웠다.

### 4. 결론

이 논문은 덕트 깊이별 공극/비공극 부분에서의 FFT 변환 결과를 분석하였다. 덕트 깊이 400mm와 600mm를 제외하고 그 외의 덕트 깊이에서 공극/비공극의 FFT 변환 형태가 차이가 나타났다. 덕트 깊이 100mm에서 300mm까지 이론 주파수와 비슷한 부분에서 약간의 피크점을 확인하였다.

### 참고문헌

1. 이상훈 등(2011), 충격탄성파법을 이용한 PC형교의 쉬이스 내부 그라우트 미충전부 탐사, 구조물진단학회지 제15권 제1호.

# 풍하중을 받는 구조물의 가속도와 하중 데이터를 이용한 비선형 감쇠력 추정 인공신경망 개발-작은 감쇠력 추정을 중심으로 Development of Artificial Neural Network to Estimate Nonlinear Damping Force Under Wind Loadings Using Acceleration and Force Data - Focusing on Small Damping Force Identification

전재환\* · 송준호\*\*

Jeon, Jaehwan · Song, Junho

풍하중을 받는 구조물에 작용하는 감쇠력의 추정은 구조물의 손상 파악과 응답 예측에 있어 매우 중요하나, 실제 감쇠력의 크기는 상당히 작고 비선형성도 존재하기 때문에 이를 정확히 추정하기 어렵다. 본 연구에서는 크기가 작은 비선형 감쇠력을 추정하기 위해 인공신경망 모형을 제시하였고, 모델을 통한 응답과 실제 응답 사이의 차이를 최소화하는 방법론을 제시하였다. 제안한 방법론을 풍하중을 받는 단자유도 안테나 구조물에 적용하는 예제를 통해 실제 구조물에의 적용 가능성을 검증한다.

---

**핵심용어** : 비선형 감쇠, 인공신경망, 수치해석, 감쇠력 추정

## 1. 서론

풍하중을 받는 구조물에 작용하는 힘과 응답을 정확하게 추정하는 것은 설계와 유지관리 등 여러 의사결정 과정에서 매우 중요하다. 특히, 구조물의 감쇠력은 구조물의 손상을 나타내는 지표로써 사용될 수 있으며 응답을 정확히 추정하기 위해 매우 중요한 값이지만, 실제 풍하중을 받는 구조물에서 감쇠력의 크기는 상당히 작고 비선형성도 나타나기 때문에 이를 정확하게 추정하는 것에는 많은 어려움이 따르게 된다. 대부분의 감쇠비를 추정하는 방법론들은 감쇠력이 속도에 비례한다는 가정을 기반으로 하였기 때문에 실제 구조물이 나타내는 감쇠력을 정확하게 추정하는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 작은 크기의 비선형 감쇠력을 예측하기 위한 인공신경망 모델을 제시하였고, 이를 학습하는 새로운 방법론을 제시하고 예제를 통해 검증하였다.

## 2. 비선형 감쇠력 추정 인공신경망

시간에 따른 풍하중  $p(t)$ 를 받는 단자유도 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{u} + f_D(u, \dot{u}, \dots) + ku = p(t) \quad (1)$$

여기서  $m, k, u$ 는 각각 구조물의 질량, 강성, 변위를 나타내며  $f_D$ 는 구조물이 받는 비선형 감쇠력을 의미한다.

본 연구에서는 구조물에 작용하는 감쇠력 항에 대한 정확한 이론 및 식이 제시되어 있지 않다는 점에 착안하여 상미분방정식에 내재된 감쇠력 함수를 자유도가 높은 모델인 인공신경망으로 구축하는 것을 제안하였다.

비선형 감쇠력 추정 인공신경망은 1) 구조물의 가속도, 2) 감쇠비를 제외한 구조물의 파라미터, 그리고 3) 구조물에 작용하는 하중 데이터를 이용하여 학습할 수 있다. 첫 번째로 구조물의 측정 가속도  $\ddot{u}$ 를 기반으로 최적화 과정을 거쳐(Lee et al. 2009) 속도  $\dot{u}_{reconst}$  및 변위  $u_{reconst}$ 를 재구축한다. 다음으로 식 (1)의 운동방

---

\* 비회원 · 서울대학교 건설및환경공학부 석박통합과정 (E-mail: dudesup123@snu.ac.kr) - 발표자

\*\* 정회원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (Corresponding Author E-mail: junhosong@snu.ac.kr)

정식을 Runge-Kutta 수치해석 방법으로 끊으로써 나타나는 응답과, 기존 응답 사이의 차이를 손실함수로 구축하여 감쇠력 추정 인공신경망  $f_D(u, \dot{u}, \dots)$ 를 학습시킨다. 이 과정에서 속도, 및 변위의 재구축 오차가 발생하는데 이는 Runge-Kutta 수치해석 방법에서 가속도 초기값 보정을 통하여 억제하였다.

### 3. 풍하중을 받는 구조물의 인공신경망을 이용한 작은 비선형 감쇠력의 시간이력 추정 결과

개발된 비선형 감쇠력 추정 인공신경망 학습능력을 검증하기 위해 30m 높이의 단자유도 안테나 모형 예제에 적용하였다. 해당 인공신경망이 작은 감쇠력도 잘 추정할 수 있는지 확인하기 위해 해당 구조물의 감쇠비는 0.01로 가정하였고, 풍하중에 의한 비선형 감쇠력을 추가하였다. 실험 결과 그림 1에서와 같이 인공신경망 모델이 작은 비선형 감쇠력을 잘 추정한 것을 확인하였다. 해당 감쇠력 추정 인공신경망을 이용하여 초기값과 하중이 주어졌을 경우 발생하는 변위도 식 (1)을 수치해석을 통해 그림 2에서와 같이 구하였고 비선형 감쇠력 추정 인공신경망이 Runge-Kutta와 같은 수치해석에서 사용 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

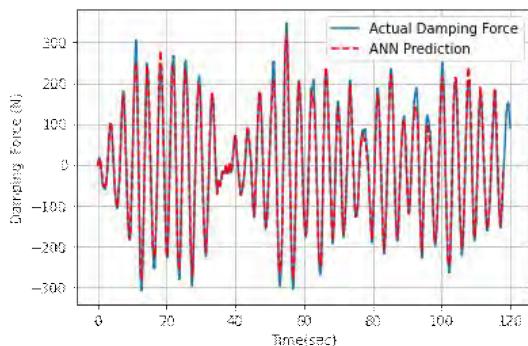


그림 1. 인공신경망의 시간에 따른 감쇠력 추정 결과

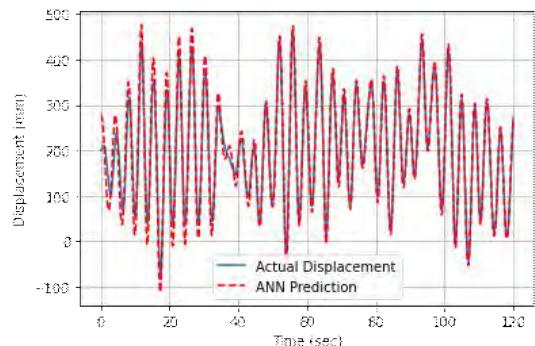


그림 2. 감쇠력 추정 인공신경망을 이용한 변위 추정 결과

### 4. 결론

본 연구에서는 풍하중을 받는 구조물의 비선형 감쇠력을 구조물의 가속도와 하중 데이터를 이용하여 인공신경망으로 모델링하였다. 또한 이를 학습하기 위한 방법론으로 인공신경망이 내재되어 있는 운동방정식을 통해 구해진 응답과 실제 응답간의 오차를 최소화하는 방안을 제시하였다. 해당 학습 방법을 단자유도 안테나 모형에 적용한 결과 인공신경망이 비선형 감쇠력 및 이에 의한 응답을 잘 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 추후 더욱 복잡한 비선형성의 감쇠력을 추정하는 후속 연구를 통해 운용중인 단자유도 구조물의 감쇠력을 실제 데이터에 기반하여 정확히 추정하는 핵심기술을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 스마트 디지털 엔지니어링 전문인력양성사업(No.0667-20210001)의 지원으로 수행되었습니다. 감사드립니다.

### 참고문헌

- Wu, Z. Liu, H. Liu, L. Yuan, D. (2007). "Identification of nonlinear viscous damping and Coulomb friction from the free response data.", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 304, pp. 407-414
- Lee, H.S, Hong, Y.H, Park, H.W. (2009). "Design of FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low-frequency dominant structures.", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 82, pp. 403-434

# 케이블의 계측 데이터 기반 확률론적 거동 예측

## Probabilistic prediction on structural response of cables base on measurement data

김민선\* · 이재범\*\* · 이영주\*\*\*

Kim, Minsun · Lee, Jaebeom · Lee, Young-Joo

센서 계측 기술의 발전으로 인해 케이블 교량의 주요 요소인 케이블에 대한 활발한 건전성 모니터링 시도들이 이뤄지고 있다. 하지만 센서로부터 얻은 다량의 계측 데이터를 활용하는 경우, 데이터마다 설명력이 다르며 또한 불확실성이 존재한다. 이에 본 연구에서는 이 두 가지를 고려한 보다 합리적인 확률론적 거동 예측 기법을 제안한다. 가우시안 프로세스 회귀와 피어슨 상관계수 절댓값을 사용하는 제안 기법은 제2 진도대교의 실제 계측 데이터에 적용되었으며, 정확도 높은 예측값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 케이블 교량, 계측 데이터, 거동 예측, 가우시안 프로세스 회귀, 피어슨 상관계수

### 1. 서론

센서 계측 기술의 발전으로 인해 케이블 교량의 주요 요소인 케이블에 대한 활발한 건전성 모니터링 시도들이 이뤄지고 있다. 그런데 케이블 교량의 경우 다른 사회기반시설들에 비해 다수의 센서로부터 다양한 계측 데이터가 얻어지고 이러한 데이터의 특징들이 모두 다르기 때문에, 데이터 기반 건전성 모니터링에 있어 센서 데이터마다 설명력이 상이하게 된다(Liu and Motoda 2012). 또한 실제 케이블 교량 거동의 변동성 및 센서 오차로 인해 취득하는 계측 데이터에는 불확실성이 존재한다. 이 두 가지는 보다 합리적인 케이블 교량 거동 예측에 있어 중요하게 고려되어야 하며, 이에 본 연구에서는 이를 고려한 보다 합리적인 확률론적 거동 예측 기법을 제안한다.

### 2. 이론 배경

본 연구에서는 데이터 기반 확률론적 거동 예측을 위해 가우시안 프로세스 회귀(Gaussian Process Regression, GPR)를 사용한다(Lee et al. 2018). GPR은 데이터가 가우시안 프로세스 확률 과정을 따른다는 가정 하에 비모수 회귀식을 구축하는 기계학습 기법으로, 자세한 내용은 Williams and Rasumssen (2006)에서 확인할 수 있으며 본 절에서는 간략히 설명한다.

식 1은 GPR에서 다변량 정규분포로 정의된 입출력 데이터 간의 관계를 나타낸다. 이 때  $X$ 는 훈련 입력값,  $f(X)$ 는 그에 대해 주어진 출력값이며, 새로운 입력값  $X_*$ 에 대한 예측 결과는  $f_*(X_*)$ 이다.  $N(\cdot)$ 은 다변량 정규분포를 의미하며,  $O$ 는 영행렬,  $K, K_*, K_{**}$ 는 데이터 간의 관계를 모사하는 커널(kernel) 함수로 구현된 공분산 행렬,  $\sigma_{noise}$ 는 관측 오차이다.

$$\begin{pmatrix} f(X) \\ f_*(X_*) \end{pmatrix} = N\left(O, \begin{bmatrix} K + \sigma_{noise}^2 I & K_* \\ K_*^T & K_{**} \end{bmatrix}\right) \quad (1)$$

그런데 케이블 교량의 경우 다양한 센서로부터 다량의 계측 데이터가 얻어지며, GPR을 활용해 예측 모델을 구축하는 과정에서 전체 데이터를 무조건적으로 활용하는 것은 효과적이지 않다. Liu and Motoda(2012)는 높은 차원의 데이터 분석을 수행하는 경우 특정 선택(Feature Selection)을 통해 관련성 없는 데이터를 제거하는 작업을 제안하였다. 이에 본 연구에서는 특정 선택을 하기 위해 입출력 데이터의 피어슨 상관계수 절댓값을 활용한다. 즉, 예측하고자 하는 케이블의 계측 데이터와의 상관계수 절댓값이 일정 기준치 이상인 데이

\* 정회원 · 울산과학기술원 도시환경공학과 석박통합과정, 공학학사 (minsun741@unist.ac.kr) – 발표자

\*\* 울산과학기술원 도시환경공학과 박사후연구원, 공학박사 (jblee@unist.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 울산과학기술원 도시환경공학과 부교수, 공학박사 (Corresponding Author: ylee@unist.ac.kr)

터들만을 입력 데이터로 선택한 후, 해당 데이터만을 바탕으로 GPR 모델을 구축하여 예측을 수행한다. 이 때 특정 선택을 통해 선택된 설명력 있는 입력 데이터가 식 1의  $X, X_*$ 로 주어지게 된다.

### 3. 적용 예제

본 연구에서의 제안 기법 적용을 위해 제2 진도대교에 부착된 15개의 온도계 데이터와 8개의 풍속계 데이터를 입력값으로, 18개의 케이블 장력 데이터를 출력값으로 고려하였다. 2019년 3월 1일부터 3월 23일까지 계측된 케이블별로 계측된 총 3,345개의 데이터를 훈련 데이터로 사용해 단일출력 GPR을 수행하였으며, 그 결과로 구축된 모델을 바탕으로 3월 24일부터 3월 31일까지 계측된 총 1,117개의 케이블별 테스트 데이터에 대한 예측을 시도하였다. 이 과정에서 장력을 예측하고자 하는 케이블별로 여타 채널 데이터와의 상관계수 절댓값을 구해 일정 기준치 이상의 상관계수 절댓값을 보이는 채널 데이터만을 입력 데이터로 사용하였다. 상관계수 절댓값 기준치에 따른 예측 정확성을 확인하기 위해 그림 1과 같이 기준치를 0부터 0.05씩 증가시키며 예측결과의 평균절대비오차를 확인하였다. 그 결과 낮은 기준치 값에서는 상대적으로 큰 오차를 보이다가 일정 수준 이상으로 기준치를 올렸을 때 케이블 장력 예측값 오차가 최소가 되는 것을 확인할 수 있었다.

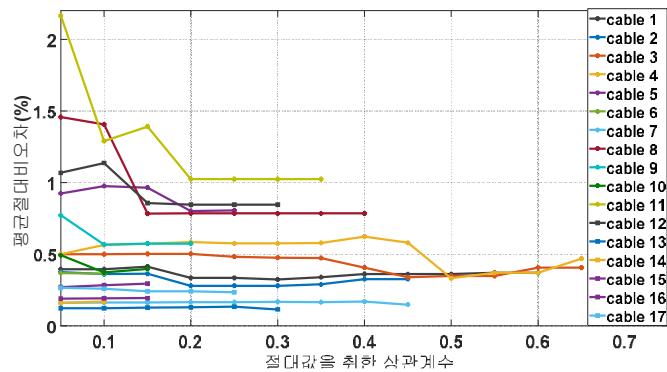


그림 1. 상관계수 절대값에 따른 장력예측 평균절대비오차

### 4. 결론

본 연구에서는 설명력이 다른 케이블 교량 계측 데이터들을 활용한 합리적인 확률론적 거동 예측 기법을 제안하였다. GPR을 사용하는 제안 기법은 특정 선택을 하기 위해 입출력 데이터의 피어슨 상관계수 절댓값을 활용한다. 제안 기법을 제2 진도대교에서의 실계측 데이터에 적용한 결과, 낮은 기준치에서는 상대적으로 큰 오차를 보이다가 일정 수준 이상으로 기준치를 올렸을 때 케이블 장력 예측값 오차가 최소가 되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 상관계수 절댓값 기준의 특정 선택을 통해 해석 비용을 줄이고 예측의 정확성을 높일 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(21SCIP-B138406-06)에 의해 수행되었습니다. 이 성과는 또한 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2021R1C1C2008770). 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- Williams, C. K., & Rasmussen, C. E. (2006). *Gaussian processes for machine learning* (Vol. 2, No. 3, p. 4). Cambridge, MA: MIT press.
- Liu, H., & Motoda, H. (2012). *Feature selection for knowledge discovery and data mining* (Vol. 454). Springer Science & Business Media.
- Lee, J., Lee, K.-C., & Lee, Y.-J. (2018). Long-term deflection prediction from computer vision-measured data history for high-speed railway bridges. *Sensors*, 18(5), 1488.

# 신뢰성-여용성 해석을 통한 서해대교의 유조차 화재 리스크 평가

## Tank Lorry Fire Risk Evaluation of Seohae Grand Bridge using Reliability-Redundancy Analysis

임성현\* · 송준호\*\*

Lim, Seonghyun · Song, Junho

중요 사회기반시설물인 케이블교량은 불확실성이 큰 극한 하중을 유발하는 화재, 충돌과 같은 인위재난에 노출되어 있다. 특히, 교량 상판에서 발생하는 유조차 화재의 경우에는 열에 취약한 케이블 부재의 직접적인 강도 저하를 유발하여 시스템 안전성에 치명적인 역할을 한다. 케이블교량의 유조차 화재 리스크를 평가하기 위하여 먼저 서해대교를 대상 교량으로 선정하였고, 대상 교량과 화재 상황에 맞는 유조차 화재 확률 모델링을 실시하였다. 다음으로, 유조차 화재 확률 모델을 활용하여 Lim et al. (under review)가 제안한 신뢰성-여용성 해석을 수행하여 유조차 화재에 대한 서해대교의 시스템 과제 확률을 산정하였다. 마지막으로 서해대교에서 발생하는 유조차 화재의 빈도를 고려하여 통합적인 유조차 화재 리스크를 평가할 수 있다.

**핵심용어** : 신뢰성, 여용성, 화재 리스크, 재난 레질리언스, 서해대교

### 1. 유조차 화재의 확률 모델링

Shokri and Beyler (1989)가 제안한 열복사모델에 의하면 유출된 기름에 의해 발생한 개방형 화재의 위치와 규모, 측정 장소에 따라 측정되는 열유속( $q''$ )은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$q'' = E \times F_{12} \quad (1)$$

여기서  $E$ 는 유효방출능,  $F_{12}$ 는 화재 지점과 열유속 측정 지점 간의 상대 위치와 관한 형상계수다. 유효방출능은 화재의 반경과 모델의 불확실성으로 표현되는 물리량이며, 형상계수는 상대 위치로 정의되는 파라미터이다. 따라서 화재의 반경, 상대 위치, 모델의 불확실성에 대한 확률 분포를 유조차와 대상 교량인 서해대교에 알맞게 설정을 하여 열유속의 확률 모델링을 실시할 수 있다. 그림 1과 같이 모델링된 열유속은 케이블교량에 가해지는 화재의 영향을 확률적으로 표현할 수 있으며, 이를 통해 케이블교량의 신뢰성-여용성 해석을 수행하였다.

### 3. 신뢰성-여용성 해석을 활용한 화재 레질리언스 평가

케이블교량의 신뢰성-여용성 해석을 수행하기 앞서, 서해대교의  $i$  번째 케이블 부재 과제 사건  $F_i$ 와 유조차 화재 재난  $E_F$ 에 대한 신뢰성 지수( $\beta_i$ )과 여용성 지수( $\pi_i$ )는 다음과 같이 각각 정의할 수 있다.

$$\beta_i = -\Phi^{-1}(P(F_i | E_F)) \quad (2)$$

$$\pi_i = -\Phi^{-1}(P(F_{sys} | E_F F_i)) \quad (3)$$

$$P(F_{sys} | E_F F_i) \times P(F_i | E_F) = P(F_{sys} | E_F) \quad (4)$$

여기서  $\Phi^{-1}$ 은 표준정규분포의 역(逆) 누적분포함수를 나타내고  $F_{sys}$ 는 케이블교량 시스템 과제를 의미한다. 서해대교의 케이블 부재의 개수 만큼의  $\beta$ ,  $\pi$  쌍을 얻을 수 있고, 좌표 ( $\beta$ ,  $\pi$ )를 2차원 평면에

\* 비회원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, 공학사 (E-mail:euler1707@snu.ac.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (Corresponding Author E-mail: junhosong@snu.ac.kr)

도시하여 신뢰성-여용성 도표를 얻을 수 있다. 신뢰성과 여용성 지수의 곱을 활용하면 식 (4)와 같이 유조차 화재에 의한 서해대교의 시스템 파괴 확률을 얻을 수 있다.

#### 4. 유조차 화재 발생 빈도의 고려

유조차 화재 발생 빈도를 고려한다면 식 (4)에서부터 서해대교의 유조차 화재 리스크를 구할 수 있다. 유조차 화재 발생 빈도는 다음 4가지의 사건의 빈도의 곱으로 표현할 수 있다. 1) 주행 거리 당 화재발생빈도, 2) 연간 서해대교의 교통량, 3) 일반 차량에 대한 유조차의 비율, 4) 서해대교의 유조차 빈도 가중치. 4가지의 빈도 곱을 통해 연간 서해대교에서 유조차 화재가 발생할 빈도를  $9.2 \times 10^{-5}$ 으로 추정하였고 이를 3.의 신뢰성-여용성 해석 결과와 통합하여 그림 2와 같이 서해대교의 화재 리스크를 평가하였다.

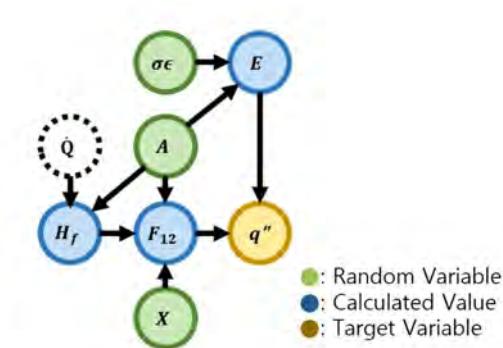


그림 1. 유조차 화재 재난 확률 모델링

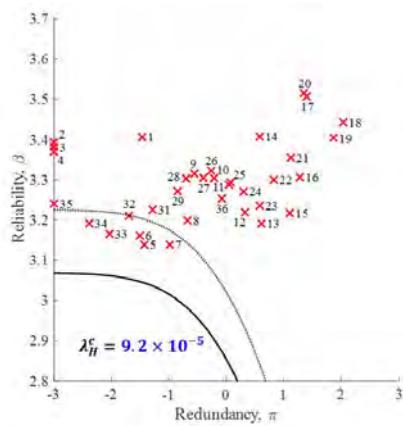


그림 2. 서해대교의 유조차 화재 리스크 평가

#### 5. 결론

본 연구에서는 서해대교 상판에서 발생할 수 있는 유조차 화재 재난 리스크를 신뢰성-여용성 해석을 기반으로 정량화하였다. 유조차 화재 재난을 확률적으로 모델링하여 신뢰성-여용성 해석을 가능하게 하였고, 연간 유조차 화재 발생빈도를 추정하여 통합적인 리스크 평가를 수행하였다. 개발된 방법론을 활용한다면 이후 케이블교량 유조차 화재 발생 시 신속한 의사결정이 가능하도록 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 연구사업 (21SCIP-B119960-06)에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Shokri, M., and Beyler, C.L. (1989). "Radiation from Large Pool Fires." Journal of Fire Protection Engineering.
- Lim, S., Kim, T., and Song, J. (under review). "System-Reliability-based Disaster Resilience Analysis: Framework and Applications to Structural Systems"

# 균열 효과를 고려한 Bouc-Wen 모델 기반 이력 거동 모델링 프레임워크

## Hysteresis Modeling Framework Considering Cracking Effects Using Bouc-Wen Models

오세빈\* · 김태용\*\* · 송준호\*\*\*

Oh, Sebin · Kim, Taeyong · Song, Junho

본 연구는 다양한 하중에 대한 복잡 구조시스템의 응답을 상대적으로 적은 계산 비용으로 정확히 추정할 수 있는 단자유도 시스템 모델링 프레임워크를 제안한다. 균열에 취약한 구조물의 이력 거동을 모의할 수 있도록 기존의 이력 거동 모델을 수정하였고, 단자유도 시스템 매개변수의 일관된 추정을 위해 구조물로부터 주요 이력 거동을 유발하는 하중 프로토콜을 제안하였다. 이를 검증하기 위하여 다양한 이력현상을 보이는 87개의 철근 콘크리트 기둥을 VecTor2 프로그램을 사용하여 비선형 유한요소 모델로 구축하였으며, 그 결과 여러 준정적 하중에 대해 제안한 Bouc-Wen 모델 기반 이력 거동 모델링 프레임워크가 기존의 방법보다 응답을 더 정확히 추정할 수 있음을 확인하였다. 제안한 프레임워크를 이용하여 다양한 지진동에 대한 구조물의 동적 응답 역시 매우 낮은 계산 비용으로 상대적으로 정확하게 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 단자유도 시스템, Bouc-Wen 모델, 하중 프로토콜, 준정적 재하 실험, 비선형 유한요소해석

### 1. 서론

구조시스템의 다양한 이력 거동(Hysteretic Behavior)과 지진동의 변동성을 고려하며 구조물의 지진 성능을 정확히 평가하기 위해서는 신뢰도 높은 수치해석 모델을 이용한 비선형 동해석을 반복적으로 수행하여야 한다. 그러나 구조물의 상세를 모두 포함한 수치해석 모델은 큰 계산 비용을 요구하기 때문에, 구조물의 이력 거동을 근사하는 단자유도 시스템이 많이 활용되고 있다. 단자유도 시스템 모델링 시 수치해석 모델의 다양한 이력현상을 표현할 수 있도록 미연방 재난청에서 제시한 다양한 하중 프로토콜들을 사용하고 있다(FEMA 461, 2007). 하지만 기존의 이력 거동 모델(Kim, 2021)은 균열로 인한 이력 거동을 표현하지 못하여 균열에 취약한 부재의 거동을 모사하지 못하고, 기존의 하중 프로토콜들은 구조물이 가지고 있는 고유의 이력현상 추출에 한계를 보여 같은 구조물에 대해서도 하중 프로토콜에 따라 다른 매개변수가 추정되는 문제를 보인다. 이에 본 연구에서는 균열 효과를 고려한 수정된 이력 거동 모델과 모델의 일관된 매개변수 추정을 위한 최적의 준정적 하중 재하 프로토콜을 제안한다.

### 2. 균열 효과를 고려한 이력 모델

본 연구에서는 다음의 두 가지 균열 효과를 고려하여 새로운 이력 모델을 개발하였다: (1) 강도 및 강성의 저하, 핀칭과 같은 이력현상들이 균열 발생으로 급격히 심화되는 효과, (2) 균열 폐쇄에 의하여 하중이 임계치보다 작아져 핀칭이 발현되지 않는 효과. 이들 효과를 반영하기 위하여 기존의 모델을 다음과 같이 수정하였다. 첫째, 이전에 경험한 최대 변위보다 더 큰 변위를 경험할 경우 축적되는 이력에너지가 증폭될 수 있도록 매개변수를 도입하였고, 증폭 정도는 변위의 차이에 비례하도록 하였다. 둘째, 하중이 균열의 개폐를 결정하는 임계 하중보다 작을 경우 핀칭 효과를 상쇄할 수 있는 매개변수를 도입하였다. 이를 통해

\* 비회원 · 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, 공학사 (E-mail:ohsb1116@snu.ac.kr) - 발표자

\*\* 비회원 · University of Toronto, Department of Civil and Mineral Engineering, Postdoctoral Fellow, 공학박사 (E-mail:tyong.kim@mail.utoronto.ca)

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:junhosong@snu.ac.kr)

점진적으로 축적되는 이력에너지만으로 이력현상의 정도를 결정하는 기존 모델의 한계를 극복하였다.

### 3. 이력 모델 매개변수 추정을 위한 최적의 준정적 하중 프로토콜

제안한 이력 거동 모델의 매개변수 추정을 위한 최적의 준정적 하중 프로토콜을 그림 1과 같이 제안한다. 탄성 거동 구현을 위한 작은 변위와 항복 이후 비탄성 거동의 구현을 위한 큰 변위를 포함하는 기존 프로토콜의 특성을 반영하였고, 진폭이 급격히 증가하는 구간과 비탄성 거동 이후 다시 탄성 거동을 하는 구간을 포함함으로써 균열 효과로 인한 이력 거동을 발현할 수 있도록 설계하였다.

### 4. 유한요소해석을 활용한 모델링 프레임워크의 검증

제안한 프레임워크의 검증을 위해 Pacific Earthquake Engineering Research Center에서 제공하는 416개의 철근 콘크리트 기둥 실험데이터 중 87개에 대한 유한요소 모델을 VecTor2를 활용하여 구축하였다. 구축된 모델에 그림 1의 최적 하중 프로토콜을 재하하여 얻은 힘-변위 데이터에 유전 알고리듬 적용하여 이력 거동 모델의 매개변수를 산정하였다. 그림 2는 파란 실선으로 도시된 새 하중에 대해 구축된 Bouc-Wen 모델을 이용해 추정한 응답과 유한요소 해석 결과를 비교한 결과이다. 제안한 모델의 추정 결과(빨간 파선)가 기존 모델의 추정 결과(파란 파선)보다 유한요소 해석 결과(검은 실선)를 더 잘 모사함을 확인할 수 있다.

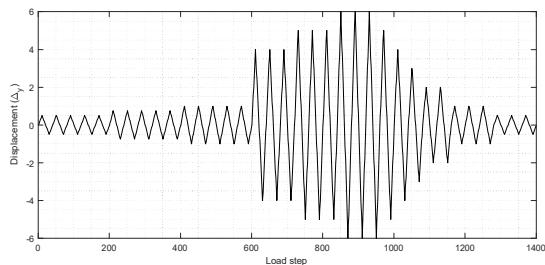


그림 1. 제안한 준정적 하중 프로토콜

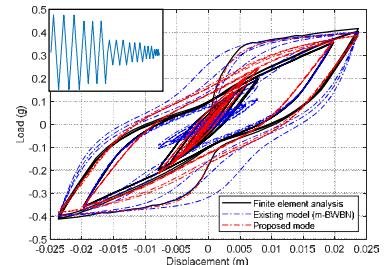


그림 2. 새로운 준정적 하중에 대해 기존 모델과 제안한 모델의 응답 추정 결과 비교

### 5. 결론

본 연구에서는 복잡 구조시스템의 이력 거동을 효율적으로 근사할 수 있는 단자유도 시스템 모델링 프레임워크를 제안하였다. 균열에 취약한 구조물의 거동도 포함할 수 있도록 기존의 이력 거동 모델과 하중 프로토콜을 개선하였으며, 유한요소 해석을 활용한 철근 콘크리트 기둥 예제를 통해 효용성을 검증하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 스마트 디지털 엔지니어링 전문인력양성사업(No.0667-20210001)과 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업의 지원으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. FEMA. 2007, *Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components*, FEMA 461, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
2. Kim, T., 2021, *Deep Learning-based Prediction of Seismic Responses and Losses of Nonlinear Structural Systems*, Ph.D. dissertation, Seoul National University.

# 강체 스프링 네트워크를 활용한 텍스타일 보강 콘크리트 재료의 직접인장 거동 모델링

Modelling of Textile Reinforced Concrete Material Using  
Rigid–Body–Spring–Network Under Direct Tensile Loading

박지운\* · 추본희\*\* · 이정운\*\*\* · 임윤묵\*\*\*\*

Park, Ji Woon · Choo, Bonwhi · Lee, Jeongun · Lim, Yun Mook

본 연구에서는 유사 변형—경화(Pseudo Strain—Hardening)가 발생하고 연성적으로 거동하는 텍스타일 보강 시멘트계 복합재료(Textile Reinforced Cementitious Composites, TRC)의 인장 거동을 모사하기 위한 해석적 방법을 수립한다. 다중 균열이 발생하는 TRC의 인장 거동을 모사하기 위하여 RBSN(Rigid–Body–Spring Network)기법을 적용하여 취성적인 모르타르 매트릭스와 텍스타일의 보강 섬유를 모델링한다. TRC가 가진 섬유의 연속성을 고려하여 축 방향 1차원 요소, 반—이산 모델링(Semi—discrete modelling), 섬유의 단순한 기하학적 정렬과 같은 조건들이 가정되었다. 실제로 직조된 유리섬유 텍스타일이 삽입된 복합재료 시편을 제작하고 실험한 선행연구의 결과들을 바탕으로 적합성을 검증한다.

**핵심용어** : 텍스타일 보강 콘크리트, 수치해석, 강체 스프링 네트워크, 변위-응력해석

## 1. 서론

불규칙적으로 분포된 짧은 섬유로 보강된 일반적인 섬유 보강 시멘트계 복합재료(fiber reinforced cementitious composites, FRCC)와 달리, 텍스타일 보강 시멘트계 복합재료(TRC)의 경우, 연속적인 긴 길이의 섬유가 일정한 방향으로 정렬되어 있어 정해진 하중으로 인해 발생하는 인장력에 대하여 보강 효과를 극대화시키기에 훨씬 더 유리하다. TRC에 관한 다수의 연구를 통하여, 우수한 인장 강도와 연성을 발휘할 수 있도록 제작될 수 있다는 것이 실험적으로 증명되었다. 그러나 직조된 텍스타일이라는 새로운 재료를 사용하고, 인장 실험 과정에서 발생하는 다중균열로 인하여, TRC의 거동을 모사하는 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구는 보로노이 다이어그램을 기반으로 매트릭스를 임의의 기하 구조로 이산하여 섬유 강화 콘크리트의 균열 패턴과 혼합 파괴 모드를 예측하는 RBSN 기법을 적용하여 TRC의 인장 거동을 모사하는 모델을 수립한다.

## 2. 해석 모델링

Ritcher and Zastrau가 수행한 실험의 텍스타일 보강 시편을 대상으로 시뮬레이션의 모델을 선정하였다 [1]. 실험은 200 mm의 측정 길이를 갖는 총 길이 500 mm, 너비 100 mm, 두께 8mm 크기의 시편을 제작하여 수행되었다. 텍스타일은 유리섬유로 직조되었으며, 복합재료 시편은 두께 방향으로 총 3장의 섬유 층이 적층되어진 형태로 제작되었다. 삽입된 섬유의 매트릭스 대비 부피 비는 1.4%로 계산되었다. 모르타르 매트릭스의 경우 물성이  $E_m$ 은 30 GPa,  $\sigma_{mu}$ 는 7 MPa이었으며, 보강 유리 섬유의 물성은  $E_f$ 은 76 GPa,  $\sigma_{fu}$ 는 1300 MPa이었다.

\* 비회원 · 연세대학교 건설환경공학과 박사과정, 공학사 (E-mail:jwp1021@yonsei.ac.kr) – 발표자

\*\* 비회원 · 연세대학교 건설환경공학과 박사과정, 공학사

\*\*\* 정회원 · 연세대학교 건설환경공학과 박사과정, 공학사

\*\*\*\* 정회원 · 연세대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:yunmook@yonsei.ac.kr)

해석 모델은 100개의 강체—스프링 요소를 갖는 1차원으로 단순화하여 모델링되었으며, 해석 시간을 줄이기 위하여 실험된 시편의 섬유비와 크기와 유사하도록 축소되었다. 모델링된 섬유의 분포와 요소들에 대한 간략한 설명은 그림 1에 나타나 있다. 보강 섬유는 반—이산 모델링(Semi-discrete modelling)을 통하여 적용되었으며, 첫 번째 해석에서는 섬유와 매트릭스 계면에서의 탈결합(debonding)으로 인한 결합응력—부착슬립(bond stress—slip) 관계가 적용되지 않았다. 또한 모든 요소는 동일한 물성을 갖도록 모델링하였으나, 하중이 가해지는 곳의 응력집중으로 인한 파괴를 방지하기 위하여 인장 하중 지점 근처는 탄성적으로 거동하도록 가정되었다.

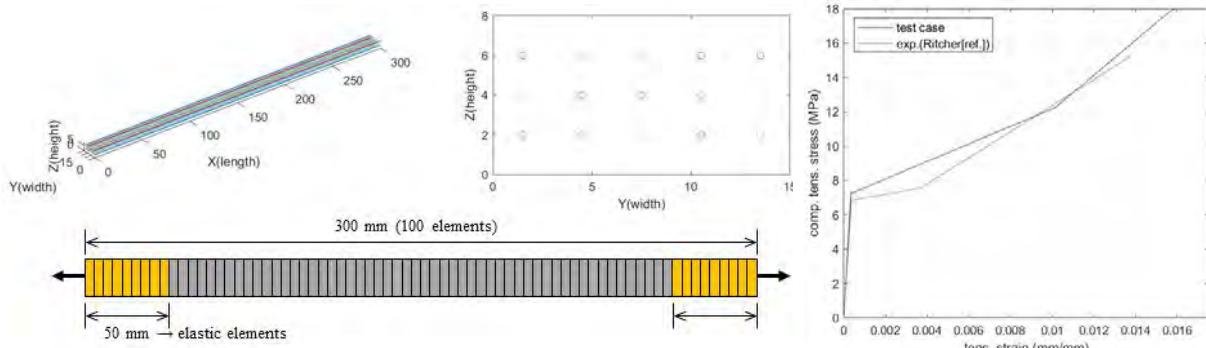


그림 1. 실험된 텍스타일 보강 시멘트계 복합재료 시편의 모델링 요소

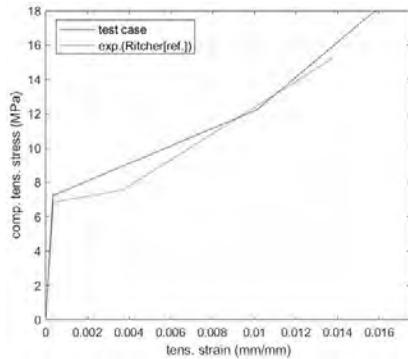


그림 2. 해석 결과

### 3. 분석 및 결론

그림 2의 첫 번째 해석 결과에서 확인할 수 있듯이 첫 균열 이후 다중 균열이 발생하는 구간의 기울기가 잘 맞지 않는 것을 확인 할 수 있다. 이는 섬유 계면이 탈락하면서 발생하는 응력 저하를 고려하지 않았기 때문으로, 추가로 수행된 해석 결과에서 이론적으로 제시된 결합응력—부착슬립 관계식을 토대로 균열에서의 섬유 거동에 대한 파라미터에 관한 연구가 수행되었다. 또한 모든 요소의 균열발생강도가 동일한 해석 조건의 특성상 인장력 하에서 모든 요소가 동일한 변형을 겪으며 파단이 발생하는데, 이는 현실 실험 결과와 괴리가 있다. 따라서 추가 해석 결과에서는 이러한 한계점을 극복하기 위하여 모르타르 매트릭스 요소의 강도에 대한 분포 함수가 적용될 예정이며, 이 과정을 통하여 균열의 분포와 크기에 대한 분석이 수행될 예정이다.

### 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2019R1A2C1090426).

### 참고문헌

1. Richter, M., & Zastraub, B. W., 2006, On the nonlinear elastic properties of textile reinforced concrete under tensile loading including damage and cracking, *Materials Science and Engineering: A*, 422, 1–2, 278–284
2. Soranakom, C., & Mobasher, B., 2010, Modeling of tension stiffening in reinforced cement composites: Part I. Theoretical modeling, *Materials and structures*, 43, 9, 1217–1230
3. Kang, J., & Bolander, J. E., 2016, Multiscale modeling of strain-hardening cementitious composites, *Mechanics Research Communications*, 78, 47–54

# 교량상 특정 변단면의 영향을 받는 차량 풍하중 평가

## Evaluation of vehicle wind loads affected by specific cross-sections on bridges

전형윤\* · 김세진\*\* · 김호경\*\*\*

Cheon, Hyeong-Yun · Kim, Se Jin · Kim, Ho-Kyung

본 연구는 교량상 특정 변단면으로 인해 증감하는 풍하중이 주행하는 차량에 미치는 영향을 실험적으로 평가하는 것을 목표로 한다. 축소모형을 활용한 풍동실험을 통해 변단면 구간에서 차량이 받는 풍하중 변화의 원인을 찾기 위해 차량 위치에 따른 공기력계수 변화를 관측하여 분석하였다. 특정 사장교를 선정하여 연구를 수행하되, 확폭 구간으로 인해 단면 형상이 변화하는 접속교 구간과 단면이 일정한 주경간 구간 모두 모형 제작하여 차량 위치별로 풍하중을 비교·검토 하였다.

**핵심용어 :** 교량, 특정 변단면, 차량, 풍하중, 공기력 계수, 풍동실험

### 1. 서 론

장대교량 위를 주행하는 차량은 일반도로 대비 높은 고도에 위치하는 거더와 거더형상으로 인해 강한 풍하중에 노출될 확률이 높으며 실제로 수년간 국내외 장대교량에서 강풍에 의해 발생한 사고도 여러 번 보도된 바 있다. Kim et al. (2021)의 연구에 따르면, 광안대교 2층 복층 거더 형상 때문에 하부테크상 풍속 가속화 현상으로 인해 풍하중이 급격히 증가하는 것을 실험을 통해 확인한 바 있다. 또한 장대교량의 경우 도로 구간에 따라서도 거더 형상이 바뀌기 때문에 차선, 차량 위치에 따라 도로 위 풍속분포가 달라지고 이로 인하여 주행 안정성이 크게 증감할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 특정 변단면으로 인해 구간에 따라 주행하는 차량이 받는 공기역학적 영향을 검토하여, 2012년 대상교량 접속교 상에서 발생한 전복사고의 원인을 규명하고자 한다.

### 2. 검토 모형 및 측정방법

본 연구에서는 강풍에 의해 실제로 전복사고가 일어난 국내 차종 중 트럭을 대표 차종으로 선정하였다. 차량 모형은 1:70과 1:80의 축적으로 제작하였으며, 차량 모델 내부에 6축 센서를 설치하여 기류간섭을 최소화 한 풍하중 측정 방법을 설계하였다. 실제교량에 적용하는 실험에 앞서, 일반 기류의 흐름을 방해하지 않는(미교란 풍속) 평면 상태에서의 공기력계수를 측정하기 위해 지름 1.2m 높이 0.47m인 흰 원판을 풍동 내에 설치하여 공기력계수를 측정하였다. 이후, 교량상 차량의 공기력계수 측정을 위해 검토 교량의 주경간 구간(1:70)과 접속교 특정 변단면(1:80) 구간을 축소 제작하였다. 그림 1은 기준 특정 변단면(1+2+3) 교량 모형 위에 차량 모형을 설치하여 차선 및 차량 위치별로 공기력계수를 측정하여 가장 위험한 위치를 도출하였고(노란색 원), 그림 2와 같이 미교란 풍속, 접속교, 주경간상에서의 측력계수를 비교하였다. 이때 차량 진행 방향 15° 간격으로 60~120° 사이의 바람 각도(풍각)를 변화시키며 공기력계수를 추출하였고, 풍동 풍속은 10 m/s로 설정하였으며, 차선번호는 중앙분리대를 기준으로 1~3차선으로 지정하였다.

\* 정회원 · 서울대학교 건설환경종합연구소 보조연구원 (E-mail:jeonhysnu@snu.ac.kr) - 발표자

\*\* 비회원 · FAMU-FSU College of Engineering, 공학박사 (E-mail:skim@eng.famu.fsu.edu)

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:hokyungk@snu.ac.kr)

### 3. 실험결과

원판, 주경간, 접속교(특정 변단면)에서 추출한 공기력계수 중 가장 불리한 풍각( $60^\circ$ )과 차량의 차선별 가장 위험한 위치를 선정한 측력계수(Side-force coefficient)를 그림 2에 나타내었다. 결과에 따르면 기류의 흐름을 방해받지 않는 평면상에서의(원판) 측력계수 값이 데크 위에서의 결과보다 대체로 크게 측정되었음을 알 수 있는데, 이는 방호벽과 같이 특정 단면이 차량에 가해지는 풍하중에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 일정한 형태의 연속적인 단면으로 구성된 본선구간의 경우 평면상 대비 측력계수 값이 낮은 것을 알 수 있는데, 이는 일반적인 결과값으로 기류의 흐름이 방호벽에 의해 방풍벽 효과 현상이 일어나 풍하중의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다. 그림 3은 풍속할증의 원인을 찾기 위해 접속교 특정 변단면을 이루고 있는 방호벽을 순차적으로 제거했을 때 측정된 차량의 측력계수를 나타내었다. 기존 특정 변단면과 비교했을 때 풍속할증에 큰 영향을 미치는 방호벽은 2, 1번 순이며 1, 2번을 동시에 제거했을 때 그 효과가 더욱 커짐을 확인할 수 있다. 앞선 실험 결과들을 통해 실제로 사고가 발생하였던 접속교 특정 변단면 구간 차량 공기력계수 추출 실험을 통해 사고가 발생하였던 원인을 규명할 수 있고, 효율적인 방풍벽 설치나 통행 제한 수립을 통해 사전에 사고를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.



그림 1. 사고지점 구간 풍동실험 세팅모습 ( $60^\circ$ )

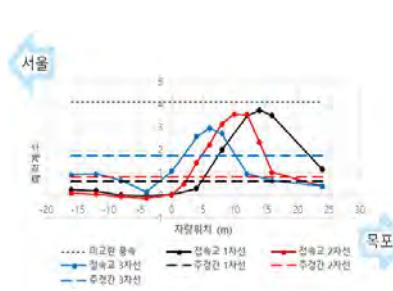


그림 2. 검토 구간별 트럭 측력 계수 변화 ( $60^\circ$ )

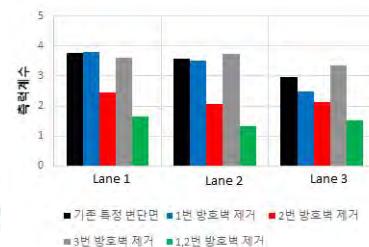


그림 3. 방호벽 유무에 따른 측력 계수 변화 ( $60^\circ$ )

### 4. 결 론

본 연구에서는 풍동실험을 통해 특정 변단면 구간에서 주행하는 차량이 받는 풍하중을 비교·검토하여 사고의 원인을 평가하고자 하였다. 일반적인 단면의 경우 방호벽 자체의 방풍벽 효과 때문에 풍하중 영향을 덜 받지만, 특정 변단면에서는 비교란 풍속 수준의 결과를 얻었다. 이로 인해 특정 각도에서 바람이 불 때 차량에 가해진 풍하중의 크기가 실제로 사고가 발생했던 위치에서 다른 위치 대비 3~4배 큰 것을 알 수 있었다. 같은 교량 내에서도 검토 구간에 따라 특정 변단면으로 인해 거더 형상이 달라지고 이에 따라 공기력계수가 달라지는바, 어떠한 교량에 대하여 강풍에 대한 위험도 평가할 때 모든 거더 구간의 형상을 고려한 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(21SCIP-B119964-06)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다.

### 참고문현

- Se-Jin Kim, Jae-Yeong Lim, Ho-Kyung Kim (2021). "Decision Framework for Traffic Control on Sea-Crossing Bridges during Strong Winds." American Society of Civil Engineers, 26(8)

# 현수교의 차량 화재 리스크 분석

## Vehicle Fire Risk of Suspension Bridge

손윤기\* · 남왕현\*\* · 송상원\*\*\*

Son, Yun Ki · Nam, Wang Hyun · Song, Sang Won

본 연구에서는 교량의 화재 재난에 대한 리스크 분석을 수행하였다. 교량 위에서 발생 가능한 화재 재난 중 차량에 의한 화재를 중점으로 하여 리스크를 평가하는 방법론을 소개하였으며, 국내 대표적인 현수교에 대하여 화재 리스크 분석을 수행하였다. 리스크 분석 결과, 대상 교량의 화재 리스크는 기준 리스크보다 낮은 것으로 나타났다. 다만, 주케이블의 경우 화재로 인하여 붕괴에 이르지는 않지만 손상이 발생할 수 있음을 확인하였으며, 보수보강이 난해한 주케이블의 특성상 보호대책이 필요할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 차량 화재, 재난 리스크, 리스크 분석, 온도해석

### 1. 서론

교량기술의 및 재료의 발달로 장대교량의 설계와 시공이 세계적으로 증가하고 있으며, 이로 인해 교량의 선박충돌, 차량화재 등의 재난발생 확률도 증가하고 있는 추세이다. 현수교와 같은 장대교량의 재난발생은 사회, 경제적으로 미치는 영향이 매우 크기 때문에 이들에 대한 체계적인 평가가 이루어져야 하지만 국내에서는 이에 대한 연구가 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 교량에 발생할 수 있는 여러 가지 재난들 가운데 화재 재난에 대하여 집중적으로 다루기로 하며, 교량 위에서 발생 가능한 여러 가지 화재 사례 중 차량에 의한 화재를 중점으로 하여 화재 리스크를 평가한다. 국내 대표적인 현수교에 대하여 여러 가지 통계자료를 활용하여 화재 리스크 분석을 수행하며, 리스크 분석 결과에 따라 적절한 대응 방안을 제안한다.

### 2. 리스크 분석 방법

화재의 리스크는 화재의 발생빈도와 화재 발생 시 시스템의 파괴확률의 곱으로 평가되며, 이렇게 산정된 화재 리스크가 기준 리스크보다 작음을 확인하는 과정으로 리스크 분석이 수행된다. 이는 아래 수식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{Failure} = \sum_{i=1}^{n_H} P(Failure | H_i) \lambda_{H_i} < \lambda_{th} \quad (1)$$

여기서  $\lambda_{Failure}$ 는 화재로 인한 연간 교량 파괴빈도(화재 리스크)이며,  $\lambda_{H_i}$ 는 연간 교량 화재 발생빈도이고,  $P(Failure | H_i)$ 는 화재 시나리오별 화재 시 교량의 파괴확률이다. 위 수식과 같이 화재 리스크  $\lambda_{Failure}$ 를 기준 리스크  $\lambda_{th}$ 와 비교하고, 화재 리스크가 기준 리스크보다 클 경우 리스크 완화 대안을 적용하여 화재 리스크가 기준 리스크보다 작아지도록 한다. 본 연구에서는 기준 리스크  $\lambda_{th}$ 를 0.0001건/년으로 설정하였다. 이는 고중요도 교량의 선박충돌파괴에 대한 AASHTO LRFD 설계기준의 기준 파괴빈도와 동일한 값이다.

### 3. 대상 교량의 리스크 분석

화재 리스크 분석에 필요한 연간 교량 화재 발생빈도는 크게 위험물 미운반 차량(Non-DGV)에 의한 화

\* 정회원 · (주)엔비코컨설틴트 부사장, 공학석사 (E-mail: yunki@envico.biz) - 발표자

\*\* 정회원 · (주)엔비코컨설틴트 부장, 공학박사 (E-mail: nwh5025@envico.biz)

\*\*\* (주)엔비코컨설틴트 대리, 공학석사 (E-mail: swsong@envico.biz)

재와 위험물 운반 차량(DGV)에 의한 화재로 구분하여 산정하였다. 화재 리스크 분석의 각 단계에 사용된 통계 데이터는 국가화재정보시스템, 한국교통안전공단, 한국교통연구원 등으로부터 취득하여 활용하였다. 화재 시나리오별 화재 시 교량의 파괴확률은 교량 시스템을 구성하는 주요 부재(주케이블, 주탑, 거더, 타이다운 케이블 등)들에 대하여 화재 해석을 수행하여 산정하였다. 특히 케이블 부재들의 경우, 그림3과 같은 단국대학교 연구진의 온도해석 결과(범용 유한요소 해석 프로그램 ABAQUS 및 화재 해석 프로그램 FDS 이용)와 화재 발생 차로 및 화재 발생 위치(교축방향) 등을 고려함으로써 보다 실제적인 분석을 수행하였다. 이와 같은 방법으로 와를 계산하여 최종적인 대상 교량의 차량 화재 리스크를 산정한 결과, 0.000039건/년으로 나타남을 확인할 수 있었다.

- 위험물 미운반 차량에 의한 화재 : 차량화재 event tree, 전국 차량화재 발생빈도, 연간교통량 및 연장
- 위험물 운반 차량에 의한 화재 : 전국 유조차 교통사고 발생빈도, 누유 및 점화 관련 조건부 확률, 대상교량 유조차 연간 교통량, 대상교량 연장

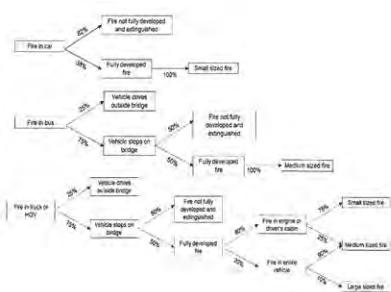


그림 1. 차량 화재 Event Tree

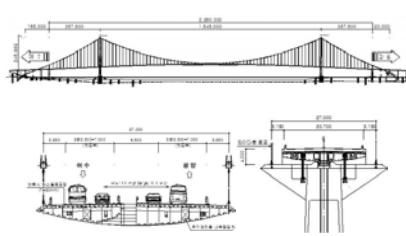


그림 2. 대상교량 종·횡단면도

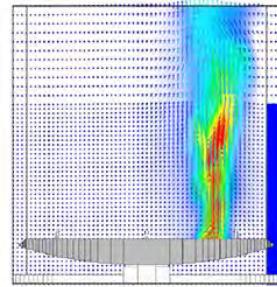


그림 3. 케이블 화재 해석

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내 대표적인 현수교에 대하여 여러 가지 통계자료를 활용하여 차량 화재 리스크 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대상 교량의 차량 화재 리스크는 0.000039건/년으로 나타났으며 이는 기준 리스크인 0.0001건/년보다 낮아 교량붕괴에는 이르지 않을 것으로 분석되었다.
2. 다만, 주케이블을 포함한 각 주요부재에 대하여 화재가 발생할 경우 영구적 변형으로 인한 손상이 발생할 수 있으며, 해당 손상에 대한 보수보강이 어렵기 때문에 보호 대책을 적용하는 것이 바람직하다.
3. 본 연구에 적용된 화재 리스크 분석 방법을 타 교량들에도 적용하여 실제적인 화재 리스크 분석을 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 “케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발(과제번호 20SCIP-B119964-05)” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. European Committee for Standardization (CEN). (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures -Part 1-2: General Rules, Structural Fire Design*, CEN, Brussels, Belgium

# 차량화재에 대한 현수교의 방화벽 시스템 제안

## A Proposal of Firewall System of a Suspension Bridge under Vehicle Fire

최근기\* · 정철현\*\* · 이정휘\*\*\* · 윤재용\*\*\*\*

Choi, Keunki · Chung, Chul-Hun · Lee, Jungwhee · Yoon, Jaeyong

본 연구에서는 현수교에서 발생하는 차량화재에 대한 대책으로 현수교용 방화벽 시스템을 제안하였으며, 이를 위해 방화벽의 내화실험과 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용한 열전달 해석을 수행하였다. 내화실험 결과, 방화벽 시스템으로 고려한 재료(CRC 보드, 에어로겔)에서 발생하는 문제점과 내화성능 및 온도차단 효과를 평가하여 방화벽 시스템에 적용할 재료(FP-steel 보드, 미네랄울)를 결정하였다. 방화벽 내화실험에 대한 열전달 해석 수행 후 내화실험 결과와 해석 결과를 비교, 분석하였으며, 이를 통해 현수교에 적용하기에 가장 적합한 방화벽 시스템을 제안하였다.

**핵심용어** : Suspension bridge, Firewall, Vehicle Fire, Fire resistance test, Heat transfer analysis

### 1. 서론

최근까지도 교량에서의 화재사고는 전세계적으로 빈번하게 발생하고 있으며, 화재사고의 원인으로는 차량화재, 낙뢰사고, 유조선 폭발로 인한 화재와 같이 여러 원인에 의해 발생되고 있다. 특히, 차량화재 중 위험차량(유조차)에 의한 화재사고가 대부분이며 이에 대한 대책은 국내외를 막론하고 매우 미비한 실정이다. 또한, 현수교와 같은 케이블교량에서 화재사고가 발생될 시 높은 온도상승으로 인하여 주요부재인 케이블에 심각한 손상 또는 파단이 발생할 수 있으며, 나아가 교량의 붕괴를 초래할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 현수교에서 발생할 가능성이 있는 차량화재의 위험으로부터 대비하기 위한 대책으로 방화벽 시스템을 제안하였으며, 이를 위해 방화벽에 대한 내화실험과 열전달 해석을 수행하였다.

### 2. 방화벽 내화실험

방화벽 시스템을 제안하기 위한 재료는 시공성, 내구성, 내화성능, 경제성 등을 종합적으로 검토하여 외장재로 CRC 보드 및 FP-steel 보드를 선정하였으며, 내장재 단열재로 미네랄울(Mineral wool) 및 에어로겔(Aerogel)을 선정하였다. 제작된 방화벽은 재료, 외장재의 배치 수에 따라 총 8개의 케이스를 표 1과 같이 설정하였다. 그림 1에 내화실험 전경을 나타내었으며, 그림 2에는 내화실험 결과의 예시로 4차 실험에서 확인된 재료의 문제점들과 대표 케이스 D의 온도-시간 이력 결과를 나타내었다. 내화실험 결과, 재료의 문제점(CRC 보드 파손, 에어로겔 발화 현상 발생)과 국가표준 KS 2257-1에서 규정하고 있는 내화성능 기준(비가열면의 평균온도 및 최대 온도가 각각 140°C 및 180°C 이하)을 고려하여 방화벽의 시스템을 구성하는 재료를 케이스 C, D 및 E에 사용되는 FP-steel 보드와 미네랄울로 결정하였다.

표 1. 방화벽 케이스

| 재료   | Case A  | Case B  | Case C | Case D | Case E | Case F | Case G | Case H |
|------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 가열면  | CRC 2ea | CRC 2ea | FP 1ea | FP 2ea | FP 2ea | FP 1ea | FP 2ea | FP 2ea |
| 내장재  | 미네랄울    | 미네랄울    | 미네랄울   | 미네랄울   | 미네랄울   | 에어로겔   | 에어로겔   | 에어로겔   |
| 비가열면 | CRC 1ea | CRC 2ea | FP 1ea | FP 1ea | FP 2ea | FP 1ea | FP 1ea | FP 2ea |

\* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사과정, 공학석사 (E-mail:ckk0204@dankook.ac.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:chchung52@dankook.ac.kr)

\*\* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사 (E-mail:jwhee2@dankook.ac.kr)

\*\* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 통합과정, 공학사 (E-mail:hiroader@dankook.ac.kr)

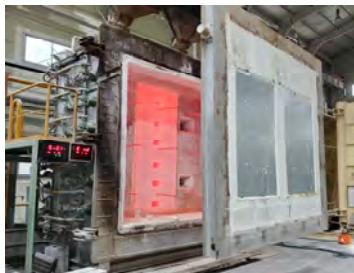


그림 2. 내화실험 전경



그림 3. 내화실험 결과 예시

### 3. 방화벽 열전달 해석

방화벽 내화실험에 대한 신뢰성 확보와 실험 결과와 해석 결과의 비교, 분석을 통한 최적의 방화벽 시스템을 제안하기 위하여 열전달 해석을 수행하였으며, 열전달 해석 수행 시 재료의 열적 특성(비열, 열전도율)을 고려하였다. 해석 결과, 실험 결과와는 다르게 케이스 C에서 비가열면의 평균온도 분포가 내화성능 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타난다. 따라서, 내화실험에서 나타난 재료의 문제점과 경제성 등을 고려하여 케이스 D의 형태로 방화벽 시스템을 제안하였다. 그림 4는 열전달 해석 결과인 케이스 D의 온도분포를 나타내었으며, 그림 5는 본 연구에서 제안하는 방화벽 시스템인 케이스 D를 나타내었다.

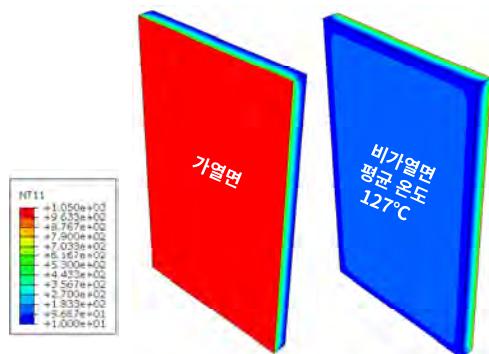


그림 4. 열전달 해석 결과 예시

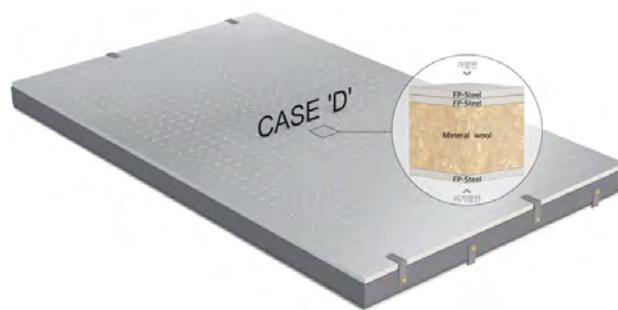


그림 5. 제안된 방화벽 시스템

### 4. 결론

본 연구에서는 현수교에서 발생하는 차량화재에 대한 대책으로 방화벽 시스템을 제안하기 위하여 내화실험과 열전달 해석을 수행하였다. 내화실험 결과, 재료의 문제점(파손, 발화 현상) 및 내화성능 기준을 검토하여 방화벽 시스템을 구성할 재료로 FP-steel 보드와 미네랄울로 결정하였다. 열전달 해석을 수행 후 내화실험 결과와 비교하여 내화실험의 신뢰성을 확보하였으며, 현수교에 적용하기 가장 적합한 방화벽 시스템을 케이스 D(FP-steel 2ea + 미네랄울 +FP-steel 1ea)로 제안하였다. 또한, 대상 교량 선정 후 바람의 영향, 방화벽의 설치 제원 등을 고려한 열유동 해석을 수행하여 본 연구에서 제안된 방화벽의 설치 효과를 분석하는 연구를 진행 중이다.

### 참고문헌

1. 한국산업규격(KS), 2019, 건축 부재의 내화 시험방법-일반 요구사항, 한국표준협회.
2. ABAQUS, 2020, *ABAQUS v2020 User's Manual*, Dassault System, Simulia Corporation.

# 사장교의 차량 화재 리스크 분석

## Vehicle Fire Risk Analysis of Cable–Stayed Bridge

김창수\* · 성민욱\*\* · 조의경\*\*\*

Kim, Chang Su · Seong, Min Wook · Cho, Eu Kyeong

최근 연륙 연도교의 건설이 늘어나면서 장경간 케이블 교량이 많이 건설되고 있다. 이러한 케이블 교량은 케이블의 파단과 같은 손상이 발생할 경우 교량 붕괴로의 위험이 내포되어 있으므로 재난으로부터 안전관리를 할 수 있는 리스크 분석 방법이 필요하다. 이 연구는 케이블 교량인 사장교 중 서해대교를 대상으로 차량 화재가 발생했을 때, 연간 화재 발생빈도와 주구조 부재의 극한성능을 초과할 조건부 확률을 구하여 최종 연간 교량 파괴빈도를 산출하는 화재 리스크 분석 방법을 제안하고 그 결과를 수록하였다.

**핵심용어** : 연간 교량 파괴빈도, 연간 화재 발생빈도, 조건부 확률, 화재 리스크 분석

### 1. 서론

2005년 Rion Antrion Bridge(그리스)와 2015년 서해대교에서 낙뢰로 인한 케이블 파단사고가 발생했으며, 2007년 Mezcala Bridge(멕시코)에서는 트럭이 케이블 근처에서 충돌하여 발생한 화재로 인해 케이블 손상이 발생했다. 이렇게 자연재난과 사회재난은 예기치 않게 발생하고 있으며, 이는 곧 인적 및 물적 피해가 발생할 수 있음을 의미한다. 이렇듯 교량에서 발생하는 재난들의 리스크 관리는 매우 중요하게 다가오고 있으며, 리스크 분석 방법에 대한 체계적인 확립이 필요하다. 이 연구에서는 무작위성이 강한 자연재난은 제외하고 교통사고에 의한 차량 화재로 국한하여 강합성 사장교인 서해대교에 대해 통계자료 및 극한성능 검토 자료를 바탕으로 한 화재 리스크 분석 방법을 제안하고 결과를 수록한다.

### 2. 화재 리스크 분석 방법

화재로 인한 연간 교량 파괴빈도의 기준값은 도로교설계기준(한계상태설계법-케이블교량편) 및 AASHTO에서 제시하는 선박충돌에 대한 파괴빈도와 동일하게 적용하였으며, 화재 발생빈도와 교량이 파괴될 수 있는 조건부 확률을 곱하여 연간 교량 파괴빈도를 구하여 기준값과 비교하는 다음 식으로 검토한다.

$$\lambda_{Failure} = \sum_{i=1}^{n_H} P(Failure|H_i) \lambda_{H_i} < \lambda_{th} \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_{Failure}$ 는 화재로 인한 연간 교량 파괴빈도(/년)이며,  $n_H$ 는 교량 주요부재의 수(케이블, 주탑, 보강거더 등)이고,  $\lambda_{H_i}$ 는 연간 화재 발생빈도(/년)를 나타낸다.  $P(Failure|H_i)$ 는 화재 시나리오별 극한성능을 초과하는 조건부 확률로 교량이 파괴될 수 있는 확률을 의미한다. 즉  $\lambda_{Failure}$ 는 연간 화재 발생빈도와 조건부 확률의 곱으로 연간 교량이 파괴될 수 있는 확률이 된다. 마지막으로  $\lambda_{th}$ 는 기준값으로 0.0001을 적용하였다.

### 3. 연간 화재 발생빈도

교량에서의 연간 화재 발생빈도는 위험물 운반 차량(DGV, Dangerous Goods Vehicles)과 위험물 미운반 차량(Non-DGV)으로 구분하고 통계자료와 화재 발생확률 데이터들을 바탕으로 산출한다. 통계자료는 교통량정보제공 시스템, 국가화재정보센터 등 통계 사이트를 통해 조사하였다. 화재관련 확률은 Non-DGV의 경우 기

\* 정회원 · (주)디엠엔지니어링 전무, 공학석사 (E-mail:brideng@dm-eng.com) – 발표자

\*\* 정회원 · (주)디엠엔지니어링 과장, 공학석사 (E-mail:bluehovel@dm-eng.com)

\*\*\* 정회원 · (주)디엠엔지니어링 부사장, 공학박사 (E-mail:ekcho@dm-eng.com)

존 문헌을 참고하여 차량 종류에 따른 Event Tree를 적용하였고, DGV는 중차량 이상의 화재발생 비율과 누유 및 점화 관련 발생 확률을 적용하여 시나리오별(소,중,대) 연간 교량 화재 발생빈도를 산출하였다.

표 1. 차량화재 발생빈도(건/년)



그림 1. 차량화재 발생빈도 개요

| 구 분     | 화재 발생빈도     |
|---------|-------------|
| Non-DGV | 소규모 0.03558 |
|         | 중규모 0.00824 |
|         | 대규모 0.00039 |
| DGV     | 소규모 0.00166 |
|         | 중규모 0.00055 |
|         | 대규모 0.00055 |

#### 4. 조건부 확률

화재 시나리오별 화재해석 및 케이블 파단 검토를 수행하여 교량 파괴확률을 산출하였다. 단국대학교에서 수행한 케이블의 화재해석 결과와 케이블 파단 시나리오별 구조부재의 안전성 결과를 바탕으로 교량의 극한성능을 초과하는 확률을 산출하였다.

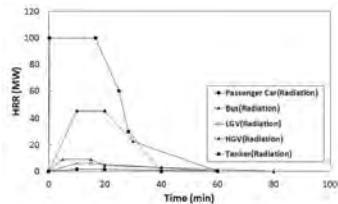


그림 2. 화재강도모델

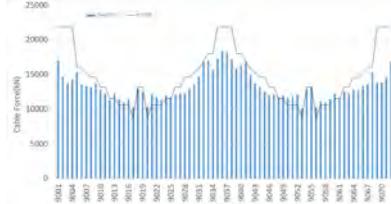


그림 3. 케이블 4개 파단시  
케이블 장력 및 한계장력

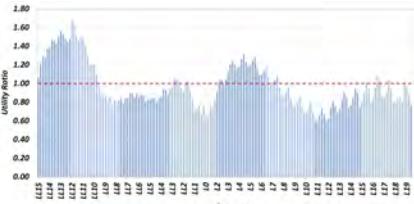


그림 4. 케이블 4개 파단시  
보강거더 UR

#### 5. 결론

이 연구에서는 서해대교를 대상으로 통계자료 및 기수행된 연구자료를 활용하여 차량에 의한 화재 리스크 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대상 교량의 연간 교량 파괴빈도는  $0.000055(\text{화재 발생빈도}) \times 0.01378(\text{조건부 확률}) = 0.0000076\text{건/년}$ 으로 검토되었으며 이는 기준값인 0.0001건/년보다 작으므로 화재 리스크에 대한 안전성을 확보하였다.
2. 기준값을 만족하더라도 화재로 인한 영구적 변형은 무시할 수 없기 때문에 방지대책을 적용하여 안전율을 더욱 확보하는 것이 올바른 방향이라고 판단되며, 이 연구에서 수행한 방법을 통해 향후 사장교에 화재 리스크 분석을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 “케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발(과제번호 21SCIP-B119960-06)” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 2020, 실측 자료를 활용한 서해대교 재해석 및 재난 대응을 위한 손상 영향 평가 연구 용역, 한국도로공사
2. 2018, 인위재난 케이블교량 극한성능 평가 3차년도 최종보고서, 단국대학교

# 신뢰도기반 코드 캘리브레이션을 통한 교량 평가 활하중계수 분석

## Analysis of Live Load Factor of Bridge Evaluation for Code Calibration Based Reliability

김경현\* · 유민선\*\* · 백인열\*\*\*

Kim, Kyunghyun · Yoo, minsun · Paik, Inyeol

기존 도로교설계기준에 기반한 현행 교량 평가법에 한계상태설계법을 도입하기 위한 연구의 일환으로, 신뢰도기반 코드캘리브레이션을 통하여 평가 활하중계수를 개발하는 연구를 수행한다. 공용중인 교량의 평가를 위한 목표신뢰도지수는 신설 교량의 설계에 적용하는 값보다 작게 적용하는 국외 교량 평가지침을 참고하여 이에 상응하는 평가 활하중계수를 개발하였다. 국내에 대표 상부구조 형식의 공용중인 실 교량을 대상으로 구조해석프로그램을 통하여 하중효과를 해석하여 교량의 최소요구강도를 계산하였으며, 평가 목표신뢰도지수에 상응하도록 수행한 코드 캘리브레이션으로부터 계산된 평가 활하중계수는 1.4로 계산되었다.

---

**핵심용어** : 교량 평가법, 한계상태설계법, 코드 캘리브레이션, 평가 목표신뢰도지수, 평가 활하중계수

---

\* 김경현정회원 · 가천대학교 토목환경공학과 박사과정, 공학석사 (E-mail:vvangsang@gachon.ac.kr) - 발표자

\*\* 유민선정회원 · 가천대학교 토목환경공학과 석사과정, 학사 (E-mail:yms5533@hankook.ac.kr)

\*\*\* 백인열정회원 · 가천대학교 토목환경공학과 정교수, 공학박사 (E-mail:pinyeol@gachon.ac.kr)

# 연속 경간을 갖는 콘크리트 사장교의 온도에 따른 장기거동 평가

## Evaluation of long-term behavior according to temperature of a concrete cable-stayed bridge with continuous spans

서정욱\* · 길홍배\*\* · 노한성\*\*\*

Seo, Jung-Wook · Gil, Heung-Bae · Roh, Han-Sung

2017년 준공된 고속도로 사장교를 대상으로 교량 계측데이터와 형상측량 결과를 활용하여 온도에 의한 영향을 평가하였다. 평가대상은 주경간 거더와 주탑 변위, 케이블 장력, 교대 신축유간이며, 분석을 위해 최근 3년간의 계측데이터를 사용하였다. 거더와 주탑 변위는 일일 온도변화에 대해서 반비례하는 경향을 보이며, 연간 온도변화에 대해서는 비례하는 추세로 나타났다. 장기 온도변화는 주탑과 거더의 횡방향 거동에도 영향을 미치는 것으로 분석되어 향후 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

**핵심용어** : 1주탑 사장교, 온도거동, 교량계측

### 1. 서론

약 4년간 공용된 부산외곽선 낙동강대교를 대상으로 온도변화가 교량 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 교량 계측데이터와 형상측량 결과를 분석하였다. 대상교량은 콘크리트 1주탑 사장교이며 상부구조는 PSC 상자형 10경간 연속교 형식으로 총 연장 1,440m, 주경간장 180m이다. 유지관리를 위한 계측센서는 총 9종 39개가 설치되어 있으며, 주탑 2축경사계, 케이블 장력계, 온도계 등이 있다.

### 2. 분석대상 및 방법

분석대상은 계측 중인 주탑 탑정부(교축, 교직), 주경간 거더(연직, 교직), 양측 교대 신축이음(교축)의 변위와 케이블 장력이다. 분석자료는 2019년 1월부터 2021년 9월까지 약 3년간 수집된 교량 계측데이터와 2020년 12월과 2021년 7월에 실시한 교량 주요지점 형상측량 위치데이터를 활용하였다. 온도데이터는 P3 단면 4개소, 주경간 중앙단면 4개소, 주탑 내부 2개소에서 측정된 자료이며, 2020년 12월 이전의 기온데이터는 인근 기상청 자료를 활용하였다. 케이블 장력은 온도영향을 검토하기 위해 동적영향을 제거한 필터링된 데이터를 사용하였다.

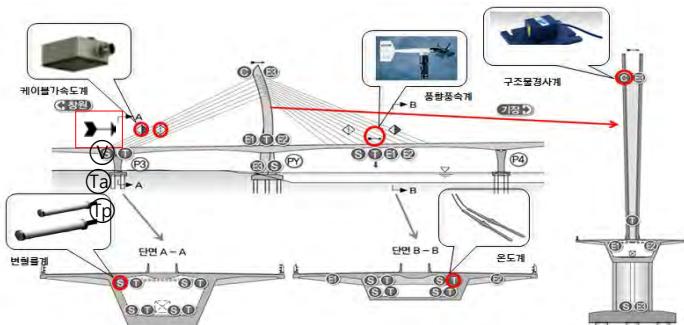


그림 1. 계측센서 설치 위치도

표 1. 계측항목별 계측센서 수량

| 계측항목 | 센서     | 수량(대) |
|------|--------|-------|
| 지진   | 지진가속도계 | 7     |
| 장력   | 가속도계   | 4     |
| 처짐   | 처짐계    | 1     |
| 용력   | 변형률계   | 8     |
| 주탑경사 | 구조물경사계 | 1     |
| 신축량  | 신축이음계  | 2     |
| 온도   | 온도계    | 12    |
| 풍향풍속 | 풍향풍속계  | 3     |
| 시정   | 시정계    | 1     |

\* 정회원 · 한국도로공사 초장대교량연구단 차장, 공학석사 (E-mail:sjwooks@ex.co.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구위원, 공학박사 (E-mail:hgil@ex.co.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국도로공사 초장대교량연구단 연구단장, 공학박사 (E-mail:hsroh@ex.co.kr)

### 3. 온도영향 분석 결과

대상교량의 계측데이터 분석결과 거더와 주탑의 변위, 신축유간은 단기 온도변화에 대한 영향이 반비례하여 나타나고 있으며 30분에서 2시간의 시간지연을 갖는 것으로 분석되었다. 교대 A1, A2의 신축유간 계측데이터로 산정한 온도팽창계수  $\alpha$ 는  $1.11\sim1.13(\times10^{-5})$ 이며, 상관계수  $R$ 은  $0.95\sim0.97$ 로 나타났다. 계측중인 4개 케이블의 장력은 장기 온도변화에 대한 경향은 나타나지 않으나, 일일 온도변화에 따라 최대장력의 약 9% 범위내에서 변동하는 것으로 분석되었다.

주탑의 횡방향변위는 교축방향 변위에 비해 상대적으로 크게 나타났으며, 형상측량시 측정기간 중 최대 82mm의 변위차가 발생하였다. 같은 기간 계측된 기울기차는  $0.066^{\circ}$ 이며 환산 변위량도 유사한 결과를 보였다. 주탑온도는 상시계측 중인 내부 표면온도를 기준으로 동계에 약 2도 차이가 발생하며 하계에는 그 차이가 줄어들어 0에 근접하였다. 구조해석 결과에서 주탑 단위온도변화에 대한 횡방향 변위는 약 10mm이며, 다른 유사형식 사장교의 주탑 평균온도차가 동계에 최대 8도 가량 발생하는 것으로 알려져 있으므로, 대상교량의 평균온도가 같은 경향을 갖는 경우에는 실측된 횡방향 변위가 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

표 2. 연간 케이블장력 변화량(2020.10.1.~2021.9.30.)

| 구분   | 관리기준(a) | 최대장력(b) | 최소장력(c) | 장력변화량(d) | 비율(d/b) |
|------|---------|---------|---------|----------|---------|
| CL12 | 4,714   | 4,344   | 4,091   | 253      | 5.8     |
| CL06 | 8,705   | 7,746   | 7,247   | 499      | 6.4     |
| CR06 | 10,614  | 8,950   | 8,508   | 442      | 4.9     |
| CR11 | 8,705   | 6,633   | 6,034   | 599      | 9.0     |

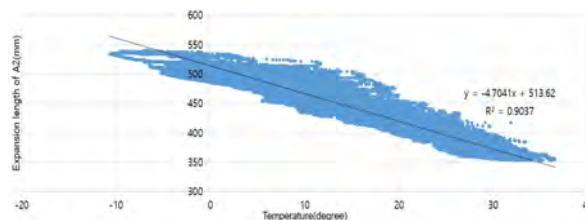


그림 2. 온도와 신축유간 관계(A1)

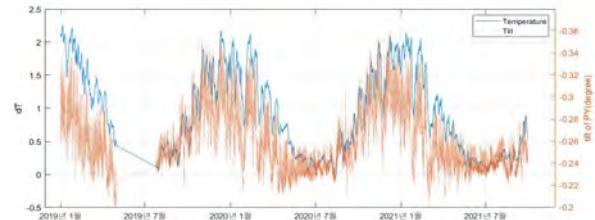


그림 3. 주탑 온도차와 기울기 관계(교직 방향)

### 4. 결론

대상교량의 장기 온도거동을 평가한 결과 거더와 주탑 변위, 케이블 장력, 신축유간은 온도변화에 따른 영향이 크게 나타났다. 주탑은 계절간 온도변화에 따라 횡방향 변위가 크게 발생하고 있으며, 이는 단면의 온도차에 기인하는 것으로 추정된다. 향후 주탑거동에 대한 정밀한 분석을 위해 추가로 주탑 단면의 평균온도측정이 필요하며, 계측관리시 온도영향에 대한 고려가 필요하다.

### 참고문헌

- 황의승, 심재수, 김도영, 2014, 콘크리트 주탑의 온도분포 계측 및 설계규정 제안, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, Vol.34, No.1, pp.1-8
- 박종칠, 2015, 온도와 변위데이터를 이용한 사장교의 온도신축거동 평가, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, Vol.35, No.4, pp.779-789
- 한국도로공사, 2011, 고속국도 제600호선 부산외곽순환 건설공사 구조계산서 제8공구 : 대감~금곡

# 정적 풍하중 증가에 따른 장경간 보행 현수교의 비선형 거동 평가

## Evaluation of Nonlinear Behavior of Long-span Suspended Footbridge According to Increase in Static Wind Load

김정곤\* · 김수민\*\* · 김호경\*\*\*

Kim, Jeong-Gon · Kim, Soomin · Kim, Ho-Kyung

보행 현수교는 횡방향 풍하중에 취약하기 때문에 변위 제어에 대한 상세한 검토가 필요하다. 이에 장경간 보행 현수교의 정적 풍하중 증가에 따른 비선형 거동에 대하여 평가하였다. 풍동실험을 통하여 산간 계곡 지형의 바람 특성을 확인하고 이를 적용하여 수치모델을 해석하였다. 3차원 케이블 구조로 인한 구조계의 거동 특성을 파악함으로써 장경간 보행 현수교의 내풍 안정성에 대한 검토를 수행하였다.

**핵심용어** : 보행 현수교, 정적 풍하중, 3차원 케이블, 비선형 거동

### 1. 서론

보행 현수교는 일반 도로 현수교와 달리 상판이 가볍고 구조계의 강성이 낮다. 이것은 교량 시스템을 횡방향 풍하중에 취약하게 만들기 때문에 변위 제어에 대한 상세한 검토가 필요하게 된다. 그러나 정적 풍하중에 따른 장경간 보행 현수교의 거동특성을 정확히 평가한 연구는 거의 없다. 본 연구에서는 풍동시험과 수치해석기법을 이용하여 경간 600 m 보행 현수교의 내풍특성을 검토하였다. 대상 교량 상판은 3차원 케이블 구조에 의해 지지되는 육각형 단면의 거더이고, 1개의 육각형 모듈은 2개의 행어 케이블과 2개의 크로스 케이블이 연결된다. 산간 계곡 지형의 바람 특성을 조사하기 위해 풍동 실험을 수행하였고, 수치모델 상에서 주요 경간은 지형 변화를 고려한 풍속 특성을 반영하기 위해 모사된 대기 경계층 모델을 적용하여 서로 다른 풍속분포를 가진 5개의 섹션으로 구분하였다. RM Bridge 소프트웨어를 이용하여 정적 풍하중의 변화에 따른 육각형 거더의 거동을 해석하였다.

### 2. 풍속별 변위 응답

활증된 중앙부 거더높이 풍속을 기준으로 구한 풍속별 중앙부의 변위 응답은 그림 1, 2와 같다.

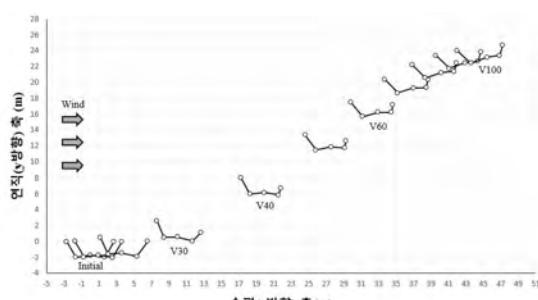


그림 1. 중앙부 거더 수평, 연직 변위

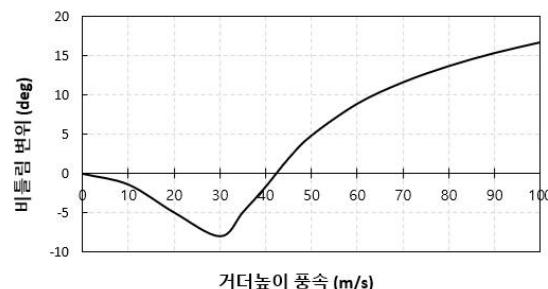


그림 2. 중앙부 거더 비틀림 변위

\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, 공학사 (E-mail:rhs13@snu.ac.kr) – 발표자

\*\* 정회원 · 서울대학 건설환경공학부 석사과정, 공학사 (E-mail:ssominkim@snu.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:hokyungk@snu.ac.kr)

대상 보행 현수교 모델에 대하여 풍동실험으로 얻은 공기력계수와 산간 계곡 지형의 풍속변화에 대한 풍동 실험 결과를 이용하여 풍하중을 산정하였다. 지형 변화에 따라 구분한 5개 섹션에서 각각 풍속 할증률을 도출하여 풍속분포에 적용하였다. 거스트 풍하중을 기준으로 볼 때, 풍속 약 30 m/s부터 수평, 연직, 비틀림 변위 모두 급격한 변화가 시작됨을 확인할 수 있다. 특히, 비틀림 변위의 경우 증감의 방향이 역전되는 현상이 발생하였으며, 약 40 m/s 이상의 풍속부터는 비틀림 변위가 반대 방향으로 바뀌게 된다. 이는 변위의 증가로 인한 3차원 케이블 구조의 기하학적 비선형 거동으로 판단되며, 단면상에서 풍하측 주케이블 노드와 바닥케이블 노드의 간격이 가까워지게 된다.

### 3. 풍속별 케이블 장력 변화

구조물의 응답 변위에 대한 구조계 변화 양상을 이해하기 위하여 케이블 부재력 검토를 수행하였다. 거스트 풍하중 기준 주케이블 중앙부의 장력 변화는 그림 3과 같다. 응답 변위 양상과 비슷하게 구조물의 기하학적 거동으로 인하여 풍상측 주케이블, 행어케이블, 크로스케이블의 초기장력이 빠지다가 풍속 약 30 m/s부터는 장력이 거의 0에 가까워지고, 풍하측 주케이블이 풍하중에 저항하게 된다.

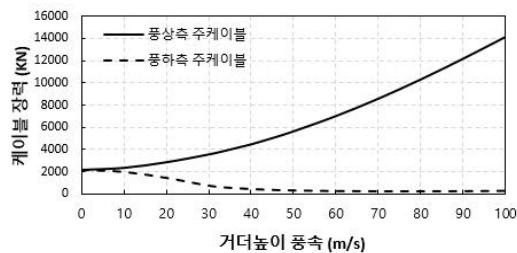


그림 3. 중앙부 주케이블 장력 변화

### 4. 결론

본 연구에서는 정직 풍하중을 받는 장경간 보행 현수교의 거동 특성을 확인하였다. 일정 풍속 이상에서는 횡방향 및 연직방향 변위가 급격히 증가하였고, 비틀림 변위는 nose up 방향에서 nose down 방향으로 역전되었다. 이때 풍하측 케이블의 장력이 0에 가까워지고 풍상측 케이블만 풍하중에 저항하게 된다. 이는 3차원 케이블의 기하학적 거동으로 인한 효과이며, 장경간 보행 현수교의 설계에 있어 이 같은 거동특성과 더불어 재료 특성을 반영한 구조 안정성 검토가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 BK21 인프라스피어 교육연구단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

### 참고문헌

- 한국교량및구조공학회. (2021). 출렁다리 설계 가이드라인. 국토교통부
- 이호, 김호경, & 김기남. (2015). 크로스 브릿지 간격에 따른 캐워크 시스템의 비틀림 거동 평가. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 27(4), 371-376.

# 공용 중 강교량의 현장계측 정보 및 교통통계 자료를 활용한 피로 신뢰도 평가

## Fatigue Reliability Assessment of In-service Steel Bridge Based on Field Measurement Data and Traffic Volume Survey

이상현\* · 안이삭\*\* · 박연철\*\*\* · 김호경\*\*\*\*

Lee, Sang Hyeon · Park, Yeun Chul · An, Lee-Sak · Kim, Ho-Kyung

공용 중 강교량의 피로 평가를 위해 Bridge Weight-In-motion (BWIM) 또는 변형률 계측을 수행하고, 이를 활용하여 피로 상세에 가해지는 유효응력범위 및 반복응력 횟수를 추정한다. 하지만, 현장계측 데이터의 종류 및 처리 방법에 따른 피로 평가결과의 차이를 정량적으로 비교한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 공용 중 교량에서 동시에 계측한 변형률계 및 BWIM 데이터를 활용하여 피로 신뢰도평가를 수행하여 현장계측 데이터의 종류 및 처리 방법과 구조해석모델에 의한 평가결과의 차이에 대해 정량적으로 검토하였다.

**핵심용어 :** 피로신뢰도평가, 현장계측데이터, 변형률계측, BWIM, 유한요소해석

### 1. 서론

교량은 공용연수가 증가함에 따라 차량 통행 시 교량 부재에 발생하는 반복적인 응력에 의해 부재에 피로 손상이 지속해서 누적되며, 피로 균열과 피로 파괴가 발생할 수 있다. 따라서, 차량 하중에 의해 교량 부재에 피로 파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해서 누적된 피로손상을 확률론적 방법에 따라 평가해야 한다 (Ye et al. 2014). 현장계측 데이터의 불확실성을 고려한 공용 중 강교량의 피로 신뢰도평가를 위한 많은 연구가 진행되었지만, 피로 평가 시 활용되는 현장계측 데이터의 종류 또는 Bridge Weigh-In-Motion(BWIM) 데이터를 활용한 평가 시 구조해석모델의 정밀성 및 데이터 처리 방법에 따른 평가결과의 차이에 대해 정량적으로 검토된 연구는 아직 미비한 실정이다. 본 연구에서는, 공용 중 교량에서 동일 기간에 계측한 변형률계 및 BWIM 데이터와 상용 구조해석 프로그램을 통해 구축된 평가 대상 교량의 뼈대요소 해석모델과 유한요소해석모델을 활용하여 피로 신뢰도평가를 수행하였다. 피로 신뢰도평가 결과들을 비교하여, 현장계측 데이터의 종류 및 처리 방법과 구조해석모델에 의한 평가결과의 차이에 대해 정량적으로 검토하고, 일관된 수준의 피로 신뢰도평가를 위한 평가 방법을 제시하였다.

### 2. 현장계측 데이터를 활용한 유효 응력범위 및 반복응력 횟수 추정

수행된 현장계측의 종류에 따라 유효 응력범위( $S_{eff}$ ) 및 일평균반복응력횟수(Average Daily Stress Cycle, ADSC)를 상이한 방법으로 추정한다. 또한, BWIM 계측을 통한 평가의 경우 다음의 두 가지 절차에 따라  $S_{eff}$  및 ADSC를 추정할 수 있다. 첫 번째는, 하중 스펙트럼으로부터 대표 트럭하중 및 일평균트럭통과량을 계산하고 대표 트럭하중을 구조해석모델에 재하하여  $S_{eff}$ 를 계산할 수 있다. 두 번째는, BWIM 데이터로부터 차량 하중 및 통행 특성을 구조해석모델에 적용하여 시계열 응력이력을 생성하고 이로부터  $S_{eff}$  및 ADSC를 추정할 수 있다. 변형률계 계측을 통한 평가의 경우, 평가 대상 피로 상세에서 계측된 응력 데이터를 cut-off 한 후에 Rainflow counting method에 따라 응력 범위 스펙트럼을 생성하고, Miner's rule (Miner, 1945)에 따라  $S_{eff}$  및 ADSC를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 충청남도 아산시에 위치한 용두1교의 백암리 방면 편도

\* 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, 공학사 (hyune7037@snu.ac.kr) – 발표자

\*\* 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, 공학석사 (peacefulan@snu.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 한남대학교 토목환경공학전공 조교수, 공학박사 (ycpark@hnu.kr)

\*\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 포스코석좌교수, 공학박사 (hokyungk@snu.ac.kr)

2차선 구간에 대해 설치된 BWIM 시스템과 피로 취약 상세에 부착된 변형률계로부터 2019년 10월 12일부터 10월 18일까지 일주일 동안 계측된 데이터를 활용하였다.

### 3. 피로 신뢰도 평가

차량 통행 시 피로 상세에 발생하는 응력에 의한 피로 손상 누적 한계상태함수는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다(Kwon and Frangopol, 2010).

$$g(X) = \Delta - e \cdot D = 0 \text{ for } D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 365 \cdot ADSC \cdot \frac{(1+\alpha)^y - 1}{\ln(1+\alpha)} \cdot \frac{(S_{eff})^m}{A} \quad (1)$$

한계상태식을 구성하는 파라미터들에 대한 확률변수의 분포는 표 1에서 기술하였다. 한계상태함수를 바탕으로 공용연수에 따른 피로 신뢰도 지수  $\beta$ 를 First-Order-Reliability-Method (FORM)을 통하여 추정하고, 각 방법에 따른 피로 신뢰도평가 결과들을 비교함으로써 현장계측 데이터 종류 및 처리 방법과 구조해석모델에 의한 평가결과의 차이를 정량적으로 비교하였다.

표 1. 피로 신뢰도 평가 파라미터

| Parameter  | Type          | Value                                    |
|--|---------------|--|
| Fatigue detail coefficient (MPa3), $A$               | Lognormal     | $\lambda_A = 23.113, \zeta_A = 0.145$    |
| Miner's critical damage accumulation index, $\Delta$ | Lognormal     | $\lambda_\Delta = 1, \zeta_\Delta = 0.3$ |
| Measurement error, $e$                               | Lognormal     | $\lambda_e = 1, \zeta_e = 0.03$          |
| Traffic increase rate (per year), $\alpha$           | Deterministic | 0.0104                                   |
| Material constant, $m$                               | Deterministic | 3  |
| Time (year), $y$                                     | variable      | increment = 0.1                          |

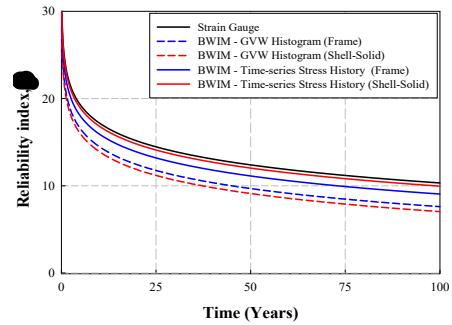


그림 1. 피로 신뢰도 평가 결과

### 4. 결론

본 연구에서는 평가 대상 교량에서 동일한 기간 동안 계측된 변형률 및 BWIM 데이터와 교량의 빼내요소 해석모델 및 유한요소 해석모델을 활용하여 피로 신뢰도평가를 수행하였다. 평가결과로부터 현장계측 데이터의 종류 및 처리 방법과 구조해석모델에 따른 차이를 정량적으로 비교하였다. BWIM 하중 스펙트럼을 통한 평가는 피로에 대한 손상을 실제보다 과하게 보수적으로 평가하며, 유한요소 해석모델의 시계열 응력 이력을 통한 평가 시 변형률계에 의한 평가결과와 가장 유사한 수준으로 평가할 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비(과제번호: 21SCIP-B128568-05)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Kwon, K., and Frangopol, D. M. (2010). Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data. *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, No. 8, pp.1221-1232.
2. Miner, M. A. (1945). Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12, No. 3, pp.159-164.
3. Ye, X. W., Su, Y. H., & Han, J. P. (2014). A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Assessment of Steel Bridges. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, pp.1-13.



(사)한국교량및구조공학회

(08787) 서울시 관악구 관악로13길 25, 1003호

#1003, 25, Gwanak-ro 13-gil, Gwanak-gu, Seoul 08787, Republic of Korea

Tel +82-2-871-8395 | E-mail [kibse@kibse.or.kr](mailto:kibse@kibse.or.kr) | Website <http://www.kibse.or.kr>