

발간등록번호

11-1613000-001746-01

R&D /  
15TBIP-C084864-02

# 고강도콘크리트를 사용한 분절거더와 말뚝을 이용한 저형고 일체식 교량 최종보고서

2017. 02. 27.

주관연구기관 /

(주)한맥기술

공동연구기관 /

(주)장현산업

(주)피티씨

한라산업개발(주)

고려대학교 산학협력단

국토교통과학기술사업화지원사업

R&D Report

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

## 제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘고강도콘크리트를 사용한 분절거더와 말뚝을 이용한 저형고 일체식 교량’(연구개발 기간 : 2014. 10. 31. ~ 2016. 10. 31.) 과제의 최종 보고서 10부를 제출합니다.

2017. 02. 27.

주관연구기관명 : (주)한맥기술 (대표자) 이 경 훈 (인)

공동연구기관명 : (주)장현산업 (대표자) 서 성 열 (인)

(주)피티씨 (대표자) 최 영 수 (인)

한라산업개발(주) (대표자) 최 영 수 (인)

고려대학교산학협력단 (대표자) 고 제 상 (인)

주관연구책임자 : 이 종 관

공동연구책임자 : 남 점 권

공동연구책임자 : 김 재 수

공동연구책임자 : 김 문 호

공동연구책임자 : 한 상 윤

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

## 보고서 요약서

과제 고유 번호	15TBIP-C084864-02	해당 단계 연구 기간	2015.10.31. ~ 2016.10.30.	단계구분	2차년 / 2차년				
연구사업명	중사업명	국토교통기술사업화지원사업							
	세부사업명	공공구매조건부기술사업화분야							
연구과제명	대과제명	고강도콘크리트를 사용한 분절거더와 말뚝을 이용한 저형고 일체식 교량							
	세부 과제명	주 관	저형고 분절거더-교대 일체형 교량 시스템 개발						
		공동1	저형고 분절거더-교대 일체형 교량 시공 기술 개발						
		공동2	신형식 말뚝과 두부 접합부 시공 기술 개발						
		공동3	신형식 말뚝 두부 접합부 성능 개선 및 평가						
		공동4	일체형교량 설계 요소에 대한 실험 연구 및 시제품 성능 평가						
연구책임자	이 종 관	해당단계 참여 연구원 수	총: 29명 내부: 29명 외부: - 명	해당단계 연구개발비	정부: 289,000천원 기업: 211,000천원 계: 500,000천원				
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 29명 내부: 29명 외부: - 명	총 연구개발비	정부: 550,000천원 기업: 400,000천원 계: 950,000천원				
연구기관명 및 소속 부서명	(주)한맥기술 기술개발부			참여기업명 (주)한맥기술, (주)장현산업, (주)피티씨, 한라산업개발(주)					
국제공동연구	상대국명 : -			상대국 연구기관명 : -					
위탁연구	연구기관명 : -			연구책임자 : -					
요 약		보고서 면수		202					
연구의 목적 및 내용	<p>본 연구개발은 고강도 콘크리트(60~80MPa)를 사용한 PSC I형 분절 거더와 다양한 말뚝을 조합하여 상·하부 일체식 라멘구조를 가지는 교량시스템 개발을 목적으로 한다.</p> <p>근래 이상기후로 계릴라성 폭우가 빈번히 발생하고 그로 인한 홍수피해가 자주 발생하고 있으나 이런 지형에 주로 사용되고 있는 프리플렉스 형식의 교량은 매우 고가로 경제성이 떨어질 뿐 아니라 현장에서 제작 시공하기 때문에 제작기간이 길고 가설 현장 부근에 넓은 제작장이 필요한 점 등의 문제가 있다.</p> <p>따라서 본 연구에서는 고강도콘크리트를 사용한 PSC 분절거더와 고강성 말뚝의 일체화로 인해 발생되는 모멘트 분배 효과를 이용하여 형고를 낮춘 교량형식으로서, 형하 공간 확보가 용이할 뿐 아니라 경제성이 우수하고 상부제작을 위한 별도의 제작장이 불필요하여 시공이 빠르고 유지관리가 우수한 저형고 일체식 교량 공법을 개발 및 보급하고자 하였다.</p>								

연구개발성과	<p>프리플렉스교의 저형고 교량을 구현하기 위하여 PSC I형 분절 거더에 고강도콘크리트(60~80MPa)를 사용하고자 시험배합과 내부 시험을 거쳐 배합비를 개발하여 공인 시험기관의 인증을 획득하였고, 벽체와 상부구조의 강성을 조절하여 형고를 축소하고자 교대의 말뚝을 기존의 H형강 말뚝보다 강성이 큰 말뚝 개발이 필요하다고 판단되어 CFT말뚝과 SC말뚝 등을 대상으로 하여 강재와 콘크리트의 합성 거동 및 말뚝과 확대기초의 연결부 안정성 등에 대한 실험을 진행한 결과 이론적 해석결과와 실험결과가 유사한 거동을 나타내었다.</p> <p>앞서 진행한 요소 실험의 결과를 분석하여 실제교량과 동일한 크기(<math>L=30.0\text{m}</math>)의 실물 실험체를 제작하여 파괴 시까지 하중을 재하 한 결과 구조물이 갖고 있는 능력을 파악하였으며 비선형 해석을 통하여 그 안정성과 실험의 적정성을 검증하였다.</p>					
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<p>본 연구를 통하여 제안된 교량 형식은 단열말뚝과 낮은 교대 및 공장에서 제작된 저형고 분절거더로 구성되어 현장작업이 적고 급속시공이 가능하므로 다음과 같은 기대 효과가 발생 할 것으로 예상 된다.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 저형고 교량으로 도심지 고가도로 또는 고속도로 및 국도 등을 횡단하는 육교에 적용가능</li> <li>- 하부구조는 강관과 콘크리트가 합성된 CFT말뚝을 개발 및 적용 하였으며 개발된 말뚝만 별도로 활용이 가능하여 그 기술적 파급효과가 클 것으로 기대됨</li> <li>- 기존 고가의 저형고 교량인 프리플렉스교에 비하여 약 30%이상 공사비 절감가능</li> <li>- 기존 교량 형식에 비하여 급속시공이 가능하므로 건설 공사로 인한 민원감소에 따른 사회적 비용 감소가 기대됨</li> </ul>					
핵심어 (5개 이내)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">일체형 교량</td> <td style="padding: 5px;">분절거더</td> <td style="padding: 5px;">고강도 콘크리트</td> <td style="padding: 5px;">프리스트레스트 콘크리트 I거더</td> <td style="padding: 5px;">복합말뚝</td> </tr> </table>	일체형 교량	분절거더	고강도 콘크리트	프리스트레스트 콘크리트 I거더	복합말뚝
일체형 교량	분절거더	고강도 콘크리트	프리스트레스트 콘크리트 I거더	복합말뚝		

## 〈 SUMMARY 〉

The objective of this research is to develop an Integral Abutment Bridge system combined with the PSC I-type segmental girders using high-strength concrete (60~80MPa) and a variety of piles.

Lately, There was a lot of heavy rain due to abnormal climate changes. And it cause floods damages frequently. But, pre-flex type that was primarily used for this terrain bridge's construction cost is too expensive. And it manufactured in construction field, so it require a large scale of construction site and long manufacture period.

In this study, a low-depth bridge type is formed by using the moment distribution effect generated by the integration of the PSC segmental girders, which uses high-strength concrete, and high rigidity pile. The low depth Integral Abutment Bridge has numerous advantages including the following; easy construction of the under bridge space, economical, rapid constructability and superior maintenance. Therefore the low depth Integral Abutment Bridge was developed and a design method was put out.

The high-strength concrete(60~80MPa) mixture ratio for low-depth spliced PSC I girder bridge of the Pre-flex degree was developed through the internal test. And this mixture ratio certified from the Public certification test agency.

In order to reduce the depth of the bridge by adjusting the stiffness of the wall or upper-structure, a new type of pile whose stiffness is greater than that of the H-beam was needed. Therefore some tests were conducted to evaluate the stability and connecting performance of the composite behavior between the steel tube and concrete. For CFT piles, SC piles, etc theoretical analysis and experimental results showed a similar behavior.

The results of the previously progressed element experiment are analyzed to produce a real experiment of the actual size bridge ( $L = 30.0m$ ). From the result of the loading experiment until destruction and non-linear analysis, the stability of the real size bridge and experiment method was varified

### Purpose & Contents

### Results

<b>Expected Contribution</b>	<p>The proposed bridge system from this study is composed of one-layered pile, low-abutment and precast segmental girder. So, this type bridge have more less field work and it can be rapid construction. Therefore, the following effects are expected.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- As low-depth bridge, It can be apply to the footbridge which cross the downtown overpass, highway and route.</li> <li>- The substructure of proposed bridge system is apply the composite pile of concrete and steel tube. And the pile may be also applied separately to other type structure. So, It is expected that the technical ripple effect is large.</li> <li>- Reduction of the construction costs by more than 30% compared to Pre-flex Girder bridges.</li> <li>- It is expected that the social costs associated with the construction period will reduce because rapid construction is possible in contrast to the existing bridge type.</li> </ul>				
<b>Keywords</b>	integral bridge	spliced girder	high strength concrete	PSC I girder	hybrid composite pile

## CONTENTS

<b>Chapter 1. Overview of R&amp;D Project .....</b>	1
Section 1 Purpose and Necessity .....	1
Section 2 Definitions, Scope, and Characteristics .....	5
<b>Chapter 2. Domestic and Foreign Technology Development Status .....</b>	23
Section 1 Domestic and Foreign Research Trends .....	23
Section 2 Domestic and Foreign Technology Patent Trends .....	28
<b>Chapter 3. Research Contents and Achievements .....</b>	31
Section 1 Research Stage .....	31
Section 2 High-strength Concrete Production Technology .....	32
Section 3 Development of various new type pile and connection technology .....	33
Section 4 Improved Girder-Abutment Joint Detail .....	81
Section 5 Prediction of Behavior during Pre-Tension Member Construction .....	94
Section 6 Tests on the prototype performance .....	116
<b>Chapter 4. Goal Achievement and Contribution to Related Fields .....</b>	177
Section 1 Goal Achievement .....	177
Section 2 Contribution to related fields .....	179
<b>Chapter 5. Utilization Plan of R &amp; D achievement .....</b>	190
Section 1 R & D Achievement Utilization Plan .....	190
Section 2 Expectations and Impacts of Research .....	192
<b>Chapter 6. Security rating of R &amp; D achievement .....</b>	195
<b>Chapter 7. Research facilities and equipment .....</b>	195
<b>Chapter 8. Performance of Safety Action in Laboratories .....</b>	196
Section 1 Laboratory Safety Action Implementation Plan .....	196

<b>Chapter 9. Representative Research Results</b> .....	199
<b>Chapter 10. Miscellaneous</b> .....	199
<b>Chapter 11. References</b> .....	200

## 목 차

제1장 연구개발과제 개요 .....	1
1절 연구개발의 목적 및 필요성 .....	1
2절 연구개발의 정의, 범위, 특징 .....	5
제2장 국내·외 기술개발 현황 .....	23
1절 국내·외 연구 동향 .....	23
2절 국내·외 기술특허 동향 .....	28
제3장 연구수행 내용 및 성과 .....	31
1절 연구 수행 단계 .....	31
2절 고강도콘크리트 생산기술 .....	32
3절 다양한 신형식 말뚝 및 연결 기술 개발 .....	33
4절 거더-교대 접합부 상세 개선 .....	81
5절 프리텐션 부재의 시공 중 거동 예측 .....	94
6절 시제품 성능 평가 실험 .....	116
제4장 목표 달성을 및 관련 분야 기여도 .....	177
1절 목표 달성을 .....	177
2절 관련분야 기여도 .....	179
제5장 연구 개발 성과의 활용 계획 .....	190
1절 연구개발 성과 활용 계획 .....	190
2절 연구에 따른 기대성과 및 파급효과 .....	192
제6장 연구 개발 성과의 보안 등급 .....	195
제7장 국가과학기술정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 .....	195
제8장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행 실적 .....	196
1절 연구실 안전조치 이행 계획 .....	196

제9장 연구개발과제의 대표적 연구 실적 .....	199
제10장 기타사항 .....	199
제11장 참고문헌 .....	200

## 표 목 차

[표 1.2.1] 동일 계열 교량 공사비 비교 .....	5
[표 1.2.2] 제안기술에 대한 구조 거동특성 검토 .....	9
[표 2.1.1] 해외 고강도 콘크리트 시공 사례 .....	23
[표 2.2.1] 국내 특허 분석 .....	29
[표 2.2.2] 국내 관련 특허 키워드 분석 .....	30
[표 3.2.1] 고강도콘크리트 배합비 .....	32
[표 3.3.1] 복합말뚝 실험체 종류 .....	34
[표 3.3.2] 실험체당 재하 축하중 .....	53
[표 3.3.3] 이종 재료 간 합성거동 수치해석 단면제원 .....	68
[표 3.3.4] CFT 단면의 설계기준별 강성 기준 .....	73
[표 3.3.5] CFT말뚝 시제품의 재료 및 단면 제원 .....	73
[표 3.3.6] 각 설계기준에 의한 CFT말뚝의 단면 영향계수 .....	73
[표 3.4.1] 거더-교대 간 접합부 흡균열강도 평가 결과 .....	91
[표 3.4.2] 거더-교대 간 접합부 흡공청강도 평가 결과 .....	92
[표 3.5.1] 실험체 별 콘크리트 압축강도 .....	99
[표 3.5.2] 솟음량 및 회전량 .....	107
[표 3.5.3] 균열 강도 및 극한강도 .....	114
[표 3.6.1] 실물실험체 제원 .....	117
[표 3.6.2] 공정별 콘크리트 압축강도(MPa) .....	132
[표 3.6.3] 측정 장비 및 센서 .....	134
[표 3.6.4] 게이지 부착 위치와 게이지 번호 .....	135
[표 3.6.5] 실험 전경 .....	139
[표 3.6.6] 재료별 적용 비선형 해석 이론 .....	155
[표 3.6.7] 재료 강도 .....	156
[표 3.6.8] 구조해석 검토 항목 .....	156
[표 3.6.9] 경계조건 .....	158
[표 3.6.10] 재하 하중별 발생변위 .....	158
[표 3.6.11] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 인장응력 .....	159
[표 3.6.12] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 인장변형률 .....	159
[표 3.6.13] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 철근 및 장연선 인장응력 .....	160
[표 3.6.14] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 철근 및 장연선 인장응력 .....	160
[표 3.6.15] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 압축응력 .....	161
[표 3.6.16] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 압축변형률 .....	161
[표 3.6.17] 재료시험결과에 따른 콘크리트 물성치 .....	165

[표 3.6.18] 재료시험결과에 따른 철근 물성치	166
[표 3.6.19] 재료시험 결과에 따른 구조해석 적용 물성치	166
[표 3.6.20] 재하 하중별 발생변위	167
[표 3.6.21] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 인장응력	168
[표 3.6.22] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 인장변형률	168
[표 3.6.23] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 철근 및 강연선 인장응력	169
[표 3.6.24] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 철근 및 강연선 인장변형률	169
[표 3.6.25] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 압축응력	170
[표 3.6.26] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 압축변형률	170
[표 4.2.1] 유사 연구 분석	179
[표 4.2.2] 국가연구개발사업 유사 연구 과제	179
[표 4.2.3] 유사 연구과제와 본 과제의 차이점	180
[표 4.2.4] 최근 5년간 교량 복구비용	181
[표 4.2.5] 각 분야별 SOC 사업 예산	181
[표 4.2.6] 국도 평균 건설 단가	181
[표 4.2.7] 국내 고속도로 노선별 교량 비율	182
[표 4.2.8] 교량 평균 건설 단가	182
[표 4.2.9] 교량 형식별 분포도	183
[표 4.2.10] 공사비 검토	186
[표 4.2.11] SWOT 분석	189

## 그 림 목 차

[그림 1.1.1] 기존 공법(프리플렉스교)과 제안공법의 개략도 .....	1
[그림 1.1.2] 형하 여유 공간이 많지 않은 곳 및 도심지에 가설된 교량 사례 .....	3
[그림 1.1.3] 교량 유지관리 사례 .....	4
[그림 1.2.1] 개발 교량 개략도 .....	5
[그림 1.2.2] 목표 공사비 산정을 위한 기존 교량 공사비 분석 ( $L=40m$ ) .....	6
[그림 1.2.3] 프리캐스트 제작 설비 .....	7
[그림 1.2.4] 분절거더 모멘트도 .....	7
[그림 1.2.5] 분절거더에 프리텐션 도입 후 접합면 거동 .....	8
[그림 1.2.6] 일체형 교량의 거더-교대 접합부 배근 .....	10
[그림 1.2.7] 복합말뚝 .....	11
[그림 2.1.1] 프리플렉스교 시공사례 .....	24
[그림 2.1.2] IAB 교량사례 : 미국 인디애나주 SR18 over Missinewa River .....	25
[그림 2.1.3] 저형고 라멘교 시공사례 .....	25
[그림 2.1.4] PSC I형 거더 .....	26
[그림 2.1.5] 복합말뚝 .....	27
[그림 3.1.1] 신기술 개발 주요 연구 단계 .....	31
[그림 3.2.1] 고강도 콘크리트 생산 설비 및 시험성적서 .....	32
[그림 3.3.1] CFT Pile 실험체 일반도 (Type A, Type B, Type C) .....	35
[그림 3.3.2] SC, Steel, RC Pile 실험체 일반도 .....	36
[그림 3.3.3] CFT Pile 접합부 실험체 일반도 .....	37
[그림 3.3.4] PHC Pile 실험체 개요도 (두부보강 - 원컷팅 방식) .....	38
[그림 3.3.5] PHC Pile 실험체 개요도 (두부보강 - 도로교 설계기준(안)) .....	39
[그림 3.3.6] PHC Pile 실험체 기초 배근도 .....	40
[그림 3.3.7] CFT Pile 실험체 개요도 (Type A) .....	41
[그림 3.3.8] CFT Pile 실험체 기초 배근도 (Type A) .....	42
[그림 3.3.9] CFT Pile 실험체 개요도 (Type B) .....	43
[그림 3.3.10] CFT Pile 실험체 기초 배근도 (Type B) .....	44
[그림 3.3.11] SC Pile 실험체 개요도 .....	45
[그림 3.3.12] SC Pile 실험체 기초 배근도 .....	46
[그림 3.3.13] RC Pile 실험체 개요도 .....	47
[그림 3.3.14] RC Pile 실험체 기초 배근도 .....	48
[그림 3.3.15] 가력부 Zig 개념도 .....	49
[그림 3.3.16] CFT말뚝의 시험 생산과 실험체 제작 전경 .....	51
[그림 3.3.17] 말뚝 실험체 제작 과정 .....	51
[그림 3.3.18] 실험 별 하중 재하 및 경계 지점 .....	52

[그림 3.3.19] 가력 하중 프로그램	53
[그림 3.3.20] CFT말뚝 (Type A - 양단 강판 밀폐형)	54
[그림 3.3.21] CFT말뚝 (Type B - 양단 개방형)	54
[그림 3.3.22] CFT말뚝 (Type C - 양단 철근 보강형)	55
[그림 3.3.23] RC말뚝	56
[그림 3.3.24] SC말뚝	56
[그림 3.3.25] 강판 말뚝 실험 결과	57
[그림 3.3.26] CFT말뚝 (Type-A)	57
[그림 3.3.27] RC말뚝의 전단균열 형태	58
[그림 3.3.28] 말뚝 간 연결부 (CFT-PHC 접합부)	58
[그림 3.3.29] 각 말뚝별 연결부 균열 및 파괴 형태	58
[그림 3.3.30] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 0kN)	59
[그림 3.3.31] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 0kN)의 파괴 양상	59
[그림 3.3.32] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 430kN)	60
[그림 3.3.33] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 430kN)의 파괴 양상	60
[그림 3.3.34] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 860kN)	61
[그림 3.3.35] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 860kN)의 파괴 양상	61
[그림 3.3.36] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 0kN)	62
[그림 3.3.37] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 0kN)의 파괴 양상	62
[그림 3.3.38] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 430kN)	63
[그림 3.3.39] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 430kN)의 파괴 양상	63
[그림 3.3.40] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 860kN)	64
[그림 3.3.41] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 860kN)의 파괴 양상	64
[그림 3.3.42] 하중에 따른 RC말뚝의 두부보강장치 실험 결과	65
[그림 3.3.43] SC 말뚝의 두부보강장치 - 축하중(650kN)	66
[그림 3.3.44] SC 말뚝의 두부보강장치 - 축하중(650kN)의 파괴 양상	66
[그림 3.3.45] PHC 말뚝의 두부보강 - 축하중(720kN)	67
[그림 3.3.46] PHC 말뚝의 두부보강 - 축하중(720kN)의 파괴 양상	67
[그림 3.3.47] 합성구조물 비선형 해석 결과 - 변형형상	69
[그림 3.3.48] 합성구조물 비선형 해석 결과 - 변형률 분포	70
[그림 3.3.49] CFT Type별 하중-변위 곡선	71
[그림 3.3.50] CFT말뚝 강성 분석	72
[그림 3.3.51] CFT말뚝 강성 분석	74
[그림 3.3.52] CFT Pile의 휨 실험과 연결부 실험 결과 비교	77
[그림 3.3.53] CFT말뚝의 두부보강장치(Type B : J형 철근 이음)의 하중-변위 곡선 및 파괴양상	77
[그림 3.3.54] SC Pile의 휨 실험과 연결부 실험 결과 비교	78
[그림 3.3.55] RC Pile의 휨 실험과 연결부 실험 결과 비교	78

[그림 3.3.56] 말뚝 두부접합부의 검토 단면	79
[그림 3.3.57] 말뚝 두부접합부의 강도 분석	79
[그림 3.4.1] 기존 일체형 교량의 거더-교대 접합부 배근	81
[그림 3.4.2] 거더-교대 접합부 실험체 거더 일반도	82
[그림 3.4.3] 거더-교대 접합부 실험체 거더 배근도	83
[그림 3.4.4] 거더-교대 접합부 실험체 일반도	84
[그림 3.4.5] 거더-교대 접합부 실험체 배근도 (1)	85
[그림 3.4.6] 거더-교대 접합부 실험체 배근도 (2)	86
[그림 3.4.7] 거더-교대 접합부 실험체 배근도 (3)	87
[그림 3.4.8] 실험체 제작	88
[그림 3.4.9] 완성된 실험체 형상 및 하중 재하 유압잭	88
[그림 3.4.10] 거더-교대 간 접합부 실험 균열 형상	89
[그림 3.4.11] 실험체 하중-변위 곡선	89
[그림 3.4.12] 접합부 설계 검토 단면	91
[그림 3.4.13] 접합부 FEM 해석	92
[그림 3.4.14] 단면 휨 강도 분석	92
[그림 3.5.1] 분절 거더에 프리텐션 도입 후 접합면 거동	94
[그림 3.5.2] 프리텐션 전달장 개념 및 반력대	95
[그림 3.5.3] 프리텐션 세그먼트 변형량 계측 계획도	95
[그림 3.5.4] 분절거더 접합면 상세 및 시공 사례	96
[그림 3.5.5] 부착률에 따른 프리텐션 거동 예측 실험체 개략도	97
[그림 3.5.6] 부착률에 따른 PVC Pile 배치도	97
[그림 3.5.7] 실험체 제작과정	98
[그림 3.5.8] 긴장력 도입	99
[그림 3.5.9] 3점 재하 실험 Setting	100
[그림 3.5.10] 부착률 100% 긴장력 도입	101
[그림 3.5.11] 부착률 100% 긴장력 도입	102
[그림 3.5.12] 부분 부착률 50% 긴장력 도입	103
[그림 3.5.13] 부분 부착률 50% 긴장력 도입	104
[그림 3.5.14] 부분 부착률 25% 긴장력 도입	105
[그림 3.5.15] 부분 부착률 25% 긴장력 도입	106
[그림 3.5.16] 부착률 100% 3점 재하 실험	108
[그림 3.5.17] 초기 휨 균열 및 파괴	108
[그림 3.5.18] 부착률 100% 3점 재하 실험	109
[그림 3.5.19] 부분 부착률 50% 3점 재하 실험	110
[그림 3.5.20] 초기 휨 균열 및 균열	110
[그림 3.5.21] 부분 부착률 50% 3점 재하 실험	111

[그림 3.5.22] 부분 부착률 25% 3점 재하 실험	112
[그림 3.5.23] 초기 휨 균열 및 파괴	112
[그림 3.5.24] 부분 부착률 25% 3점 재하 실험결과	113
[그림 3.6.1] 실물실험체 개략도(L=30.0m)	116
[그림 3.6.2] 실물실험체(L=30.0m) 일반도	118
[그림 3.6.3] 실물실험체(L=30.0m) 배근도(1)	119
[그림 3.6.4] 실물실험체(L=30.0m) 배근도(2)	120
[그림 3.6.5] 실물실험체(L=30.0m) 배근도(3)	121
[그림 3.6.6] 실물실험체(L=30.0m) 거더 텐던도 및 일반도	122
[그림 3.6.7] 실물실험체(L=30.0m) 거더 배근도 (1)	123
[그림 3.6.8] 실물실험체(L=30.0m) 거더 배근도 (2)	124
[그림 3.6.9] 실물실험체(L=30.0m) 강합성말뚝 두부보강 상세도	125
[그림 3.6.10] 실물실험체(L=30.0m) 거더 분절 상세도 (1)	126
[그림 3.6.11] 실물실험체(L=30.0m) 거더 분절 상세도 (2)	127
[그림 3.6.12] 실험시설 구축 및 CFT 말뚝 시공	129
[그림 3.6.13] CFT 말뚝 두부 보강 및 교대부 시공	129
[그림 3.6.14] 거더 세그먼트 제작 및 조립	130
[그림 3.6.15] 슬래브 시공 및 구조물 완공	131
[그림 3.6.16] 만능 재료 시험기	133
[그림 3.6.17] 센서 부착 위치	134
[그림 3.6.18] 정적하중 재하 위치도	137
[그림 3.6.19] 반력대 개념도	138
[그림 3.6.20] 실험 전경	139
[그림 3.6.21] 하중 재하 프로그램	140
[그림 3.6.22] 실물 실험체 하중 - 변위 그래프	141
[그림 3.6.23] 슬래브 상단 콘크리트 변형률(Con-C1~Con-C3)	141
[그림 3.6.24] 거더 하단 콘크리트 변형률(Con-D-C1)	142
[그림 3.6.25] 슬래브 내부 철근(Top) 변형률(GC5~GC8)	142
[그림 3.6.26] 슬래브 내부 철근(Bottom) 변형률(GC1~GC4)	142
[그림 3.6.27] 거더 내부 철근 변형률(SG-1~SG-4)	143
[그림 3.6.28] 거더 내부 철근 변형률(SG-5~SG-8)	143
[그림 3.6.29] 지간 중앙 단면에서 높이 별 변형률 분포	143
[그림 3.6.30] 거더 세그먼트 접합부(B-L Part, D08~D10)	144
[그림 3.6.31] 거더 세그먼트 접합부(B-R Part, D11~D13)	144
[그림 3.6.32] 슬래브 상단 콘크리트 변형률(B-L Part, Con-L1~Con-L3)	145
[그림 3.6.33] 슬래브 내부 철근 변형률(B-L Part, GJ-L1~GJ-L10)	145
[그림 3.6.34] 슬래브 상단 콘크리트 변형률(B-R Part, Con-R1~Con-R3)	145

[그림 3.6.35] 슬래브 내부 철근 변형률(B-R Part, GJ-R1~GJ-R10) .....	145
[그림 3.6.36] 시공 Joint(C-L Part) 균열 폭(D06~D07) .....	146
[그림 3.6.37] 시공 Joint(C-R Part) 균열 폭(D19~D20) .....	146
[그림 3.6.38] C-L Part 슬래브 상단 콘크리트 변형률(S1~S5) .....	147
[그림 3.6.39] C-L Part 슬래브 상단 콘크리트 변형률(S6~S10) .....	147
[그림 3.6.40] C-R Part 슬래브 상단 콘크리트 변형률(S11~S15) .....	147
[그림 3.6.41] C-R Part 슬래브 상단 콘크리트 변형률(S16~S20) .....	147
[그림 3.6.42] C Part 거더 상치부 콘크리트 변형률(Con-D-R1,L1,) .....	148
[그림 3.6.43] 내부 철근 변형률(C-L Part, A-L1~A-L5) .....	148
[그림 3.6.44] 내부 철근 변형률(C-R Part, A-R1~A-R5) .....	148
[그림 3.6.45] 내부 철근 변형률(C-L Part, A-L6~A-L10) .....	149
[그림 3.6.46] 내부 철근 변형률(C-R Part, A-R6~A-R10) .....	149
[그림 3.6.47] 내부 철근 변형률(C-L Part, A-L11~A-L15) .....	149
[그림 3.6.48] 내부 철근 변형률(C-R Part, A-R11~A-R15) .....	149
[그림 3.6.49] D Part 기초 길이방향 변위(D05, D16) .....	150
[그림 3.6.50] D Part 기초 길이방향 상대변위 .....	150
[그림 3.6.51] D Part 기초 높이 방향 변위(D01, D03) .....	150
[그림 3.6.52] D Part 기초 높이방향 변위(D14, D17) .....	150
[그림 3.6.53] CFT Pile 이음부 보강 철근(In-1~In-4) .....	151
[그림 3.6.54] CFT Pile 이음부 보강 철근(In-5~In-8) .....	151
[그림 3.6.55] CFT Pile J형 갈고리 철근(J-1~J-4) .....	151
[그림 3.6.56] CFT Pile J형 갈고리 철근(J-5~J-8) .....	151
[그림 3.6.57] CFT Pile 강판 (SP-L1~SP-L4) .....	152
[그림 3.6.58] CFT Pile 강판 (SP-L1~SP-L4) .....	152
[그림 3.6.59] 실물 실험체 균열 .....	153
[그림 3.6.60] 구조해석 검토 대상 (실물실험체, L=30.0m) .....	155
[그림 3.6.61] 재료별 응력-변형률 곡선 .....	155
[그림 3.6.62] 구조해석 검토 위치 .....	156
[그림 3.6.63] 시공 단계 .....	157
[그림 3.6.64] 경계조건 .....	158
[그림 3.6.65] 거더 및 교대부의 인장응력 .....	159
[그림 3.6.66] 강연선 및 슬래브 철근의 인장응력 .....	160
[그림 3.6.67] 거더 및 교대부의 압축응력 .....	161
[그림 3.6.68] 구조해석 결과 (재하 하중 30ton) .....	162
[그림 3.6.69] 구조해석 결과 (재하 하중 90ton) .....	162
[그림 3.6.70] 구조해석 결과 (재하 하중 150ton) .....	163
[그림 3.6.71] 구조해석 결과 (재하하중 210ton) .....	163

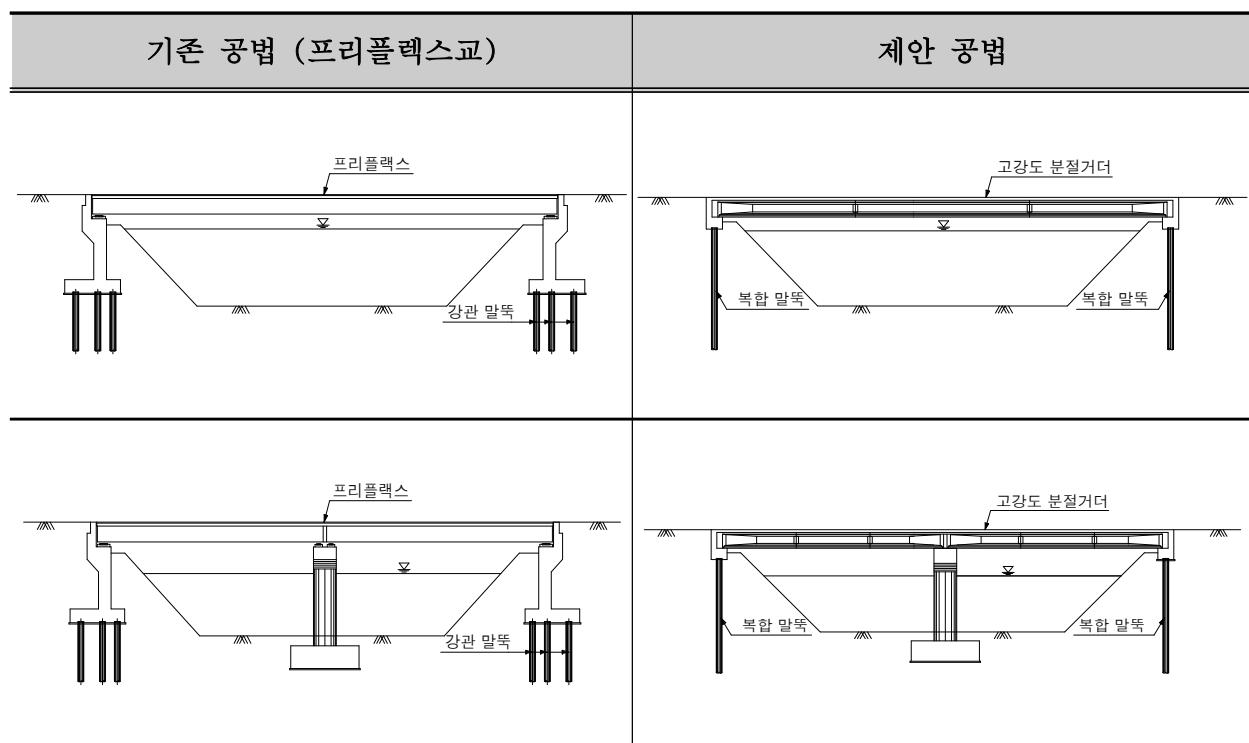
[그림 3.6.72] 구조해석 결과 (재하 하중 270ton) .....	164
[그림 3.6.73] 구조해석 결과 (재하 하중 300ton) .....	164
[그림 3.6.74] 거더 및 교대부의 인장응력 .....	168
[그림 3.6.75] 강연선 및 슬래브 철근의 인장응력 .....	169
[그림 3.6.76] 거더 및 교대부의 압축응력 .....	170
[그림 3.6.77] 구조해석 결과 (재하 하중 30ton) .....	171
[그림 3.6.78] 구조해석 결과 (재하 하중 90ton) .....	171
[그림 3.6.79] 구조해석 결과 (재하 하중 150ton) .....	172
[그림 3.6.80] 구조해석 결과 (재하 하중 210ton) .....	172
[그림 3.6.81] 구조해석 결과 (재하 하중 270ton) .....	173
[그림 3.6.82] 구조해석 결과 (재하 하중 300ton) .....	173
[그림 3.6.83] 시제품 성능 분석 .....	175
[그림 4.2.1] 프리플렉스교 개략도 .....	185
[그림 4.2.2] 프리플렉스 일체식 교량 개략도 .....	185
[그림 4.2.3] 제안공법(고강도 분절거더)교량 개략도 .....	186
[그림 4.2.4] 부산지방국토관리청 구매의향서 .....	187
[그림 4.2.5] 대전지방국토관리청 구매의향서 .....	188
[그림 5.1.1] 형하 여유 공간이 많지 않은 곳 및 도심지에 가설된 프리플렉스 교량 사례 .....	190
[그림 5.2.1] 형고에 따른 교량 개략도 .....	192

# 제1장 연구개발과제 개요

## 1절. 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 연구개발의 목적

본 연구에서는 고강도 콘크리트(60~80MPa)를 사용한 PSC I형 분절 거더와 다양한 말뚝을 조합한 상·하부 일체식 라멘구조를 가지는 교량 시스템을 개발하고자 한다. 제안 기술은 프리플렉스 교량 수준의 저형고를 구현하여 형하 여유 공간이 적은 위치에 적용되고 있는 고가의 프리플렉스 교량을 대체하고 경제성을 향상시킬 뿐 아니라 유지관리 성능이 향상된 교량시스템 개발을 목적으로 한다.



[그림 1.1.1] 기존 공법(프리플렉스교)과 제안공법의 개략도

근래 들어 이상기후로 인한 계릴라성 폭우가 빈번히 발생하고 그로 인한 홍수 피해가 자주 발생하고 있는 실정으로서 이러한 현장은 통수단면 확보를 위해 형고가 낮은 교량 형식이 필수적이다.

그러나 현재 이러한 지형에 주로 사용되고 있는 프리플렉스 형식의 교량은 매우 고가이므로 경제성이 떨어질 뿐 아니라 현장에서 제작 시공하기 때문에 제작기간이 길고 가설 현장 부근에 넓은 제작장이 필요한 점 등의 문제가 있다.

또한 수해복구교량은 연장이 짧음에도 불구하고 교좌장치 및 신축이음장치가 포함된 일반적인 교량 하부형식을 취하고 있기 때문에 상시 유지 관리하여야 하는 시설을 가진다는 문제점이 있다.

따라서 프리플렉스 수준의 낮은 형고와 PSC I 거더 수준의 경제성을 확보하며 유지관리가 양호한 저형고 일체식 교량에 대한 사회경제적 요구가 증대하고 있어 연구 개발을 추진하게 되었다.

본 연구에서 개발하고자 하는 주요 내용은 다음과 같다.

- ① 60~80MPa급 고강도 콘크리트에 기존보다 더 많은 프리스트래싱을 도입함으로써 형고를 낮추고, 신속한 시공 및 고강도 콘크리트의 품질관리를 위하여 공장에서 제작한 후 현장에서 조립하는 구조인 분절거더의 최적 단면을 결정한다. 공장제작 분절거더는 운반 중 안전성 증대 및 경제성을 향상시키기 위하여 프리텐션(공장) + 포스트텐션(현장조립) 방식을 조합하는 기술을 개발한다.
- ② 상하부 일체로 연결되는 연결부는 상부구조와 하부구조의 강성비를 이용한 모멘트 분배 효과를 고려하여, 프리플렉스 수준의 형고를 구현할 수 있는 상하부 강성비를 추출하고 시공성이 향상될 수 있도록 연결부 상세를 개발하고자 한다.
- ③ 말뚝 재질은 고가의 강재말뚝보다 경제성이 우수한 다양한 복합말뚝을 개발 적용하여 경제성을 극대화시키고자 한다.

이러한 시스템이 개발되면 기존 수해복구 현장에 적용하고 있는 프리플렉스 교량과 유사한 수준의 형고를 유지하면서, 약 20~30%의 초기 공사비를 절감하고 유지관리비도 대폭 절감할 수 있을 것으로 예측된다.

또한 프리텐션과 포스트텐션을 조합한 구조물의 제작기술은 본 연구뿐 아니라 다양한 형태의 구조물에 응용되어 구조물 전반의 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 다양한 형태의 복합 말뚝은 그자체로도 경제성을 지닌 사업화 항목이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연구개발의 필요성

### 가. 경제성 있는 저형고 교량의 필요성 대두

근래 들어 이상기후로 인한 게릴라성 폭우가 빈번히 발생하고 그로 인한 홍수 피해가 자주 발생하고 있는 실정이므로 관계 기관에서는 이에 대한 대비책으로 제방 높이를 상승하는 등의 홍수예방 대책을 수립하고 있다.

하천을 횡단하는 교량은 높아진 홍수위에 대한 여유고 확보와 제방 높이의 상승이 적어지도록 형고가 낮은 교량형식일수록 적용성이 높다. 또한 도심지를 관통하는 교량이나 고속도로 및 국도를 횡단하는 육교에 적용하는 교량도 형고가 낮을수록 형하고 확보가 유리하고 민원 발생이 적다.



(a) 하천 횡단 교량



(b) 도심지에 가설된 교량

[그림 1.1.2] 형하 여유 공간이 많지 않은 곳 및 도심지에 가설된 교량 사례

현재 형하공간 확보가 어려운 지형에서는 형고가 낮은 프리플렉스 계열 교량을 많이 사용하고 있다. 프리플렉스 교량은 형고가 낮은 반면 공사비가 고가이고(PSC I 거더 대비 약 60~70% 고가) 프리플렉션 및 얇은 복부로 인한 복부균열 등의 문제점을 가지고 있다. 이런 문제점을 개선하고자 약 10여 년 전부터 국내에서는 프리스트레싱을 도입한 프리플렉스 계열 교량이 개발되어 구조적 문제점을 개선하고 경제성을 향상시키기는 하였으나 사용하고 있는 교량 주부재가 고가인 강재이므로 근본적인 경제성 문제는 해결하지 못하였다.

따라서 경제성이 우수한 저형고 교량 개발 필요성은 점점 더 증가하고 있다.

#### 나. 신속한 시공의 필요성 대두

수해복구에 사용되는 교량이나 프리플렉스 등 저형고 교량이 가설되는 지역의 특성을 살펴보면 하천을 횡단하거나, 복잡한 도심을 통과하는 교량이 대부분이다. 이러한 지역은 공사 중 자연재해의 위험성이 있고, 교통통제에 따른 민원이 발생할 가능성이 크므로 신속하게 시공할 수 있는 공법이 필요하다.

따라서 현장 작업이 최소화되고 신속한 시공이 가능한 교량 공법에 대한 필요성은 점점 더 증대되고 있는 실정이다.

#### 다. 유지관리비 절감형 구조물의 필요성 대두

수해복구 교량의 특성을 살펴보면 대부분 군도 등 지방도로로서 복구 후 유지관리가 매우 어려운 실정이다.

2014년 국토교통부 보도 자료에 따르면 2013년 현재 30년 이상 된 고령 시설물은 전체 구조물의 9.6%에 달하고 2023년이 되면 21.5%에 달할 것으로 예측되어 예방형 유지관리 시스템을 도입하는 등 유지관리에 만전을 기할 것이라고 보도하고 있다. 그리고 2008년 토목학회에 발표된 “고속도로 유지관리비용 분석을 통한 예비 타당성 조사에서의 적용방안

연구”에서도 구조물이 노후화될수록 유지관리비용이 급격히 증가하는 것으로 검토되었다.

이와 같은 이유로 거의 모든 발주처에서는 늘어나는 유지관리비 때문에 많은 애로를 겪고 있으며, 유지관리비 절감형 구조 형식에 대한 선호도는 점점 더 증가되어, 교량형식 결정시 유지관리 편의성이 중요한 결정 요소가 되고 있다.

2000년 건설교통부에서 발간한 도로교의 공용수명연장방안 연구“에 따르면 교량구조에서 부재별 유지관리 빈도는 난간 및 연석 → 교좌장치 → 신축이음장치 → 바닥판의 순으로 나타났다. 교량에서 난간·연석과 바닥판은 그 기능을 대체할 수 없으나, 교좌장치 및 신축이음장치는 구조형식과 구조거동을 면밀히 검토하면 설치하지 않을 수도 있다.

따라서 유지관리비를 절감하기 위하여서는 교좌장치 및 신축이음장치가 불필요한 교량 형식에 대한 연구개발이 시급히 필요한 실정이다.



(a) 교좌장치 열화

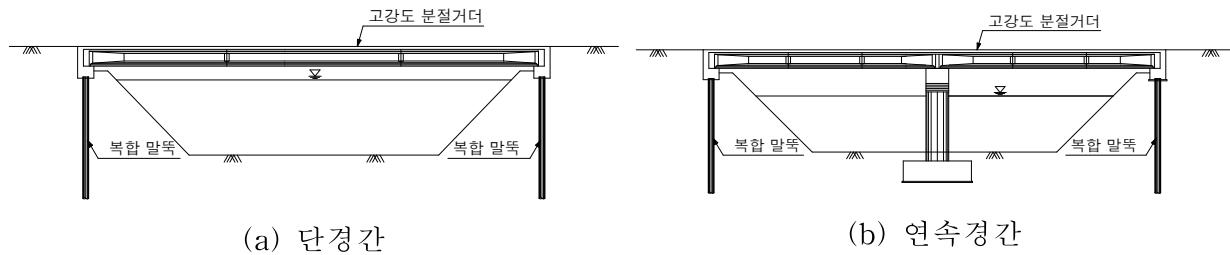
(b) 신축이음장치 손상으로 인한 구조물 열화

[그림 1.1.3] 교량 유지관리 사례

## 2절. 연구개발의 정의, 범위 및 특징

### 1. 연구개발 정의

본 연구에서는 60~80MPa급 고강도 콘크리트를 사용한 분절거더와 말뚝을 이용하여 프리플렉스빔급의 저형고를 구현한 일체형 교량 시스템을 개발하고 이를 이용한 사업화를 목적으로 한다.



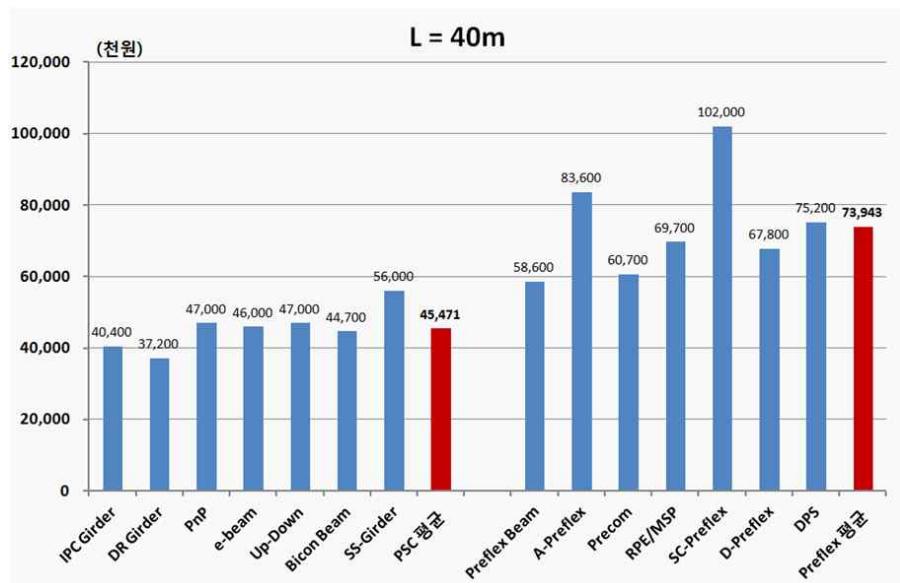
[그림 1.2.1] 개발 교량 개략도

여기서 프리플렉스빔급 저형고란 다음 표와 같은 형고를 목표 값으로 하며, 교량의 총공사비는 상기 [그림 1.2.1]과 같은 일반적인 동급의 프리플렉스 계열 교량 대비 30% 이상 공사비 절감, 동급의 PSC 거더 평균가 대비 동급 혹은  $\pm 5\%$  수준의 공사비 구현을 목표로 한다.

[표 1.2.1] 동일 계열 교량 공사비 비교

\* 바닥판 포함 형고

구 분	25m	30m	35m	40m	45m
제안공법	1.04	1.04~1.14	1.24~1.34	1.54~1.64	1.74~1.84
프리플렉스	1.0~1.2	1.2~1.3	1.3~1.5	1.5~1.7	1.8~1.9
PSC 거더	1.14~1.99	1.34~2.24	1.64~2.44	1.94~2.24	2.24~2.44



[그림 1.2.2] 목표 공사비 산정을 위한 기존 교량 공사비 분석 ( $L=40m$ )

이상의 목표를 달성하기 위하여서는 다음과 같은 4가지 요소기술을 개발하고자 한다.

- ① 고강도콘크리트를 이용한 저형고 PSC I 거더 생산 기술
- ② 프리텐션과 포스트텐션의 프리스트레싱 도입기법이 조합된 부재의 거동 예측 기술
- ③ 상하부 강성비를 고려한 최적 단면 산정 및 연결부 상세 기술
- ④ 다양한 복합말뚝의 개발 및 연결 기술 개발

#### (1) 고강도콘크리트를 이용한 저형고 PSC I 거더 생산 기술

현재 국내에서 PSC I 거더에 사용되는 콘크리트는 일반적으로 40~50MPa급이고, PHC 말뚝에 사용되는 콘크리트는 80MPa급으로 당 컨소시엄에서는 이러한 제품을 생산한 경험이 있다.

또한 단면을 개량하고 긴장력 조절방식을 적용하여 저형고 교량을 개발하고 이와 유사한 분절 거더를 상용화한 실적이 있다.

금번 제안 연구는 이 두 가지 기술을 융합한 것으로 60~80MPa급 고강도 콘크리트를 PSC I 분절 거더에 사용하여 저형고 교량을 개발하고자 하는 것이다.

그리므로 PHC 말뚝 등에 적용하였던 60~80MPa급 고강도 콘크리트 배합을 교량 구조에 적합하도록 조절하고 공장생산 시스템에 맞는 양생 방안을 강구하는 등 제작성 측면에서 연구 개발할 필요성이 있다. 또한 저형고 교량에 적합한 최적 단면과 운반을 고려한 거더 분할과 연결부 상세를 도출하여 최상의 경제성을 갖도록 형상을 연구할 필요성이 있다.



(a) 컨소시엄의 프리캐스트 제작설비

(b) 분절거더 제작

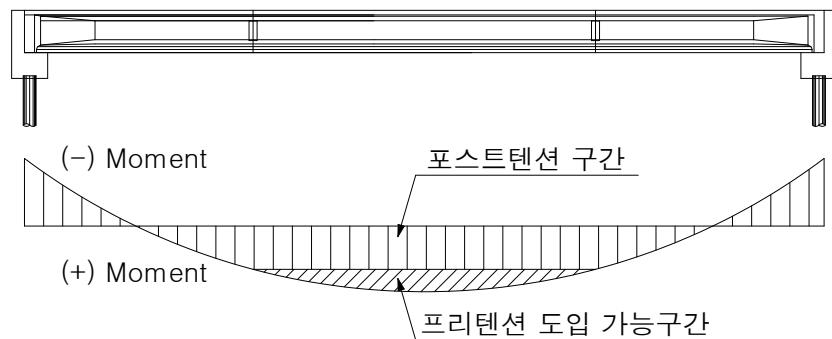
[그림 1.2.3] 프리캐스트 제작 설비

## (2) 프리텐션과 포스트텐션의 프리스트레싱 도입 기법이 조합된 부재의 거동 예측 기술

PSC 구조에 프리스트레싱을 도입하는 방법은 프리텐션 방식과 포스트텐션 방식이 있다. 프리텐션 방식은 경제성이 우수한 반면 반력대 등 고정 설비가 필요하여 주로 공장에서 제작되고, 포스트텐션 방식은 경제성을 불리하나 고정 설비가 불필요하여 주로 현장 제작 시 사용되고 있다.

당 컨소시엄은 공장에서 프리텐션을 도입하는 교량형식과 현장에서 프리텐션을 도입하는 교량형식을 연구 개발하여 상용화하는 등 프리텐션 도입 기술에 관한 한 많은 노하우를 보유하고 있다.

거더를 사용한 연속교에서 하중에 의한 모멘트분포는 아래 [그림 1.2.4]과 같이 중앙부에서 최댓값을 가진다. 그리고 이때 거더에 도입할 프리스트레스의 총량은 거더 중앙부의 합 모멘트를 기준으로 결정하게 된다.



[그림 1.2.4] 분절거더 모멘트도

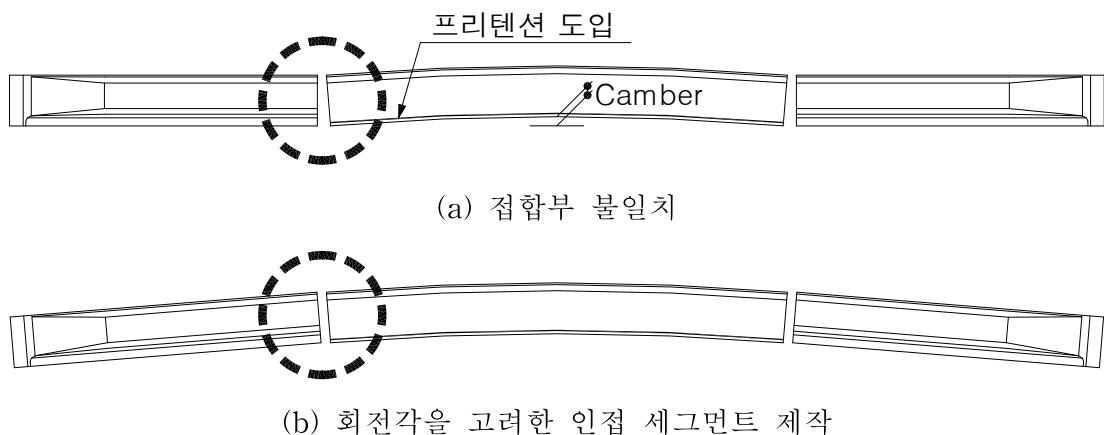
설계 긴장력을 도입하는 방식으로 상대적으로 경제성이 유리한 프리텐션 방식을 적용할 경우 중앙부 이외에는 이보다 적은 프리스트레스만 필요하지만 강선의 연속성 때문에 전 구간 동일한 프리스트레스가 도입되게 되며 이 경우 거더 단부에서 부(-) 모멘트

가 커지는 단점이 있다.

그러나 제안 기술인 분절거더는 공장에서 작은 단위로 분할 제작되고 현장에서 조립되므로 세그먼트 제작 시 필요한 부위에만 프리텐션을 도입할 수 있고, 이렇게 프리텐션 이 도입된 분절 거더는 운반 시 균열을 방지할 수 있으며 필요한 부분에만 프리스트레스를 도입함으로써 경제성을 향상시킬 수 있다.

최종적으로 현장에서 전체 세그먼트를 조립할 때에는 포스트텐션 방식을 적용하게 되는데 인천대교의 경우처럼 단면이 크고 경간 가설을 하는 박스거더교에 프리텐션과 포스트텐션 기법이 병용된 사례는 있으나 PSC I거더와 같이 횡방향 강성이 적고 단면이 얇은 구조에 프리텐션과 포스트텐션 방식을 병용한 경우는 시공 사례가 매우 드물다. 그러므로 이러한 경우에 대한 거동 예측과 실제 거동이 일치하는지에 대한 검증이 필요하다.

한편 제작 시 일부 세그먼트에 프리텐션을 도입하게 되면 프리텐션에 의하여 거더에 캠버가 발생되므로 현장에서 조립 시 아래 [그림 1.2.5]와 같이 연결부가 일치하지 않는 구조적 문제점이 발생할 수 있다.



[그림 1.2.5] 분절거더에 프리텐션 도입 후 접합면 거동

그러므로 공장에서 프리텐션을 도입할 경우에는 프리텐션에 의한 캠버를 고려하여 거더를 제작할 필요가 있고, 공장제작시 도입하는 프리텐션 량과 현장 조립시 필요한 포스트텐션 량을 적절히 조절함으로써 최상의 경제성 및 시공성을 가지도록 하는 연구가 필요하다.

### (3) 상하부 강성비를 고려한 최적 단면 산정 및 연결부 상세 기술

당 컨소시엄에서는 기존 보유 기술을 바탕으로 구조물 강성비 및 시공 단계에 따른 구조계 변화와 지반 구조물 상호 거동 등을 고려하여 다음과 같이 저형고에 적합한 최종 구조계를 도출하였다. 이 과정을 수식과 함께 도식화 하면 다음 페이지의 표와 같다.

[표 1.2.2] 제안기술에 대한 구조 거동특성 검토

구 분	개념도	구조 거동 특성
일반 라멘교		<ul style="list-style-type: none"> <li>지점부와 중앙부가 동시에 하중을 지지</li> <li><math>Ma = \frac{wl^2}{18} &lt; M_b = \frac{5wl^2}{72}</math>로 지점부 형고가 가장 높아 전체 형고를 지배</li> </ul>
일반적인 경우		<ul style="list-style-type: none"> <li>중앙부 : 작용하는 모든 하중 지지</li> <li>지점부 : 2차 고정하중 + 활하중 지지</li> <li>중앙부 모멘트 &gt; 지점부 모멘트 <math>\therefore</math> 중앙부는 PSC구조, 지점부는 RC구조 채택으로 동일 형고 적용</li> </ul>
거더를 이용한 라멘교		<ul style="list-style-type: none"> <li>거동은 일반적인 경우와 동일</li> <li>고강도 재료를 사용하여 형고를 낮출 경우             <ul style="list-style-type: none"> <li>중앙부 : PSC구조로서 추가 긴장력 도입으로 가능</li> <li>지점부 : RC구조로서 유효 높이가 낮아져 균열 문제 발생</li> </ul> </li> </ul>
벽체에 말뚝 적용 경우		<ul style="list-style-type: none"> <li>거동은 일반적인 경우와 유사하나 벽체 강성 감소로 중앙부 모멘트는 증가, 지점부 모멘트 감소             <ul style="list-style-type: none"> <li>중앙부 : 고강도 PSC구조 적용으로 형고 축소</li> <li>지점부 : 감소된 지점 모멘트로 균열 문제 해소</li> </ul> </li> </ul>

1단계 : 재래식 라멘교 → 지점부 발생모멘트가 가장 크므로 전체 형고 지배

2단계 : 라멘교 상부구조에 거더 적용 시 → 시공단계를 고려하면 중앙부는 전체 하중을, 지점부는 2차 고정하중 및 활하중만을 지지하므로 중앙부가 전체 형고를 지배함 → 중앙부 PSC 구조, 지점부 RC구조 적용.

3단계 : 라멘교 상부구조에 저형고 거더 적용 시 → 구조 거동은 2단계와 동일함 → 고강도콘크리트를 사용하여 중앙부에 더 많은 프리스트레스를 도입하면 문제 가 해결되지만 지점부는 RC구조로서 균열 문제 발생.

4단계 : 라멘교 상부에 저형고 거더 + 벽체 말뚝 적용 시 → 2단계와 유사하지만 벽 체 강성이 감소되므로 중앙부 모멘트는 증가하고 지점부 모멘트는 감소함 → 증가된 중앙부 모멘트는 고강도콘크리트를 사용하고 더 많은 프리스트레스를 도입하여 해결하고, 지점부는 감소된 모멘트로 균열 문제 해결

한편 일체식 교량에 대한 국내 외 설계지침 및 사례를 살펴보면 일반적으로 하부구조와 상부구조는 우측 사진과 같이 철근을 이용하여 일체화 한다. 당시에서 상용화한 공법 역시 이러한 방안을 사용하였다. 그러나 우측 아래 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 연결부는 복잡한 철근 때문에 시공성이 매우 떨어지게 된다.

또한 형고가 낮으면 배치되는 철근량이 많아지게 되어 더욱 더 시공 여건이 나빠질 것으로 예상된다. 이러한 점 때문에 저형고를 택한 강합성 및 프리플렉스 일체형 교량은 이 부분에 유공강판을 삽입하는 등의 방안을 강구하여 시공성을 개선하고자 하였다.



[그림 1.2.6] 일체형 교량의 거더-교대 접합부 배근

본 연구에서는 시공성이 떨어지는 이 부분의 시공성 개선을 위하여 커플러를 이용한 RC 연결 방안과 강재를 이용한 방안 등을 비교 검토하고 실험함으로써 시공성·경제성 측면에서 우수한 방안을 강구하고자 한다.

제안 기술이 비록 구조적으로 합리적인 추론을 바탕으로 제안된 기술이지만 실제 상용화를 위해서는 거동에 대한 검증이 필요하며 상하부 구조 접합면에서의 거동을 함께 검증하기 위해서는 실물 규모의 제품에 대한 성능 평가 실험이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

#### (4) 최상의 경제성과 안전성을 가지는 복합말뚝 제작 및 검증

주관연구기관과 공동연구기관(주)피티씨)이 국내 최초로 제안한 복합말뚝은 연직력만 작용하는 말뚝 하부에는 PHC 말뚝을 사용하고 횡하중과 모멘트 발생이 큰 말뚝 상부에는 강관말뚝을 사용함으로써 경제성과 안전성을 동시에 확보하여 수요자들로부터 많은 호응을 얻은 제품이다.



(a) 복합말뚝

(b) CS강관말뚝

(c) FRP confined RC 말뚝

[그림 1.2.7] 복합말뚝

또한 당 컨소시엄은 말뚝 시장에서 수요자 요구 조건에 부응하고자 지속적인 연구를 수행하였으며, Steel confined 말뚝(가칭 CS강관말뚝) 및 FRP confined RC 말뚝에 관한 제조 기술에 관한 1차적 검토를 수행한 상태이다.

제안 기술에서 최상의 경제성을 갖기 위한 방안으로 기초에 복합말뚝을 적용하였으나, 현재 상용중인 복합말뚝이 모든 지형 조건에서 최상의 경제성과 안전성을 가진다고 볼 수는 없다.

특히 상단 강관부는 염해 지역에서 부식에 취약할 수 있고, 다양한 지층 조건에서 최적의 경제성을 발휘하는지 단면효율성을 검토해 볼 필요가 있다. 그러므로 근래 국내·외에 소개된 고성능 건설재료나 신형식 말뚝 단면을 적용함으로써 기존 복합말뚝의 성능을 개선할 시점이 도래한 것으로 판단된다.

본 연구진에서 복합말뚝 성능 개선에 효과가 있을 것으로 판단한 형식은 Steel confined 또는 FRP confined 복합말뚝으로서 이들 말뚝 본체와 구조물 요소 간 접합 장치 성능을 조합하여 평가하고, 기존 복합말뚝 대비 경제성을 비교 검토함으로써 최상의 경제성 및 안전성을 가지는 말뚝 조합에 대한 연구를 수행할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

## 2. 연구 개발 범위

### 가. 성과지표

연번	연구 목표	세부 내용	성과지표	목표치	최종 성과품
1	고강도콘크리트 생산 기술 및 설비 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>본 과제를 통하여 요구조건에 적합한 배합설계를 하고 고강도 콘크리트를 생산 가능하도록 생산 설비를 보완한다.</li> <li>콘크리트 배합 설계시 요구 조건은 생산 단가의 증액 없이 배합비율의 조정만으로 목표 설계기준 강도에 도달하여야 하며 콘크리트의 내구성능은 기존 생산 제품의 성능과 동급 이상이어야 한다.</li> <li>요구 조건에 부합하는 배합설계표를 완성하고 신뢰도 95%에 준하는 생산 기술 및 설비를 구축한다.</li> <li>생산 콘크리트에 대한 재료 시험은 공인 시험 기관에 의뢰하여 시험성적서를 획득한다.</li> </ul>	시험 성적서	1부	시험 성적서
2	프리텐션과 포스트텐션 기법이 조합된 부재의 거동 예측 기술 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존 PSC I 거더는 100% 포스트텐션 방식으로 긴장하던 공법에 비하여 본 연구에서는 형고 축소와 자중 절감, 현장 긴장 작업의 최소화와 공사비 절감을 목적으로 필요한 경우 일부 세그먼트는 공장 제작 시 프리텐션 방식으로 긴장력을 도입하여 제작하고, 현장에서 포스트텐션 기법으로 전체 세그먼트를 조립함으로써 경제성을 향상시키고자 한다.</li> </ul>	실험 평가 건수	2회	실험 보고서
		<ul style="list-style-type: none"> <li>프리텐션 도입 시 발생하는 상향 솟음과 단부 회전각을 예측함으로써 현장에서 접합면이 손쉽게 일치할 수 있도록 하는 분절거더의 제작 기술을 획득한다.</li> </ul>	시제품 제작	1건	시제품
		<ul style="list-style-type: none"> <li>프리텐션 기법으로 긴장력을 도입한 분절 세그먼트의 단부 전달장 구간에서는 교량 완공 상태에서 도입 긴장력이 일반 구간에서의 도입 긴장력과 상이하고 이 값은 단면의 균열 힘 강도와 전단강도 산정에 영향을 미치므로 이에 대한 정확한 평가가 필요하다.</li> </ul>	현장 실험	1건	실험 보고서
		<ul style="list-style-type: none"> <li>시제품 제작 후 공개 실험을 통하여 시제품의 성능이 설계기준의 요구 성능 이상임을 입증하는 한편 세그먼트 접합부의 발현 강도와 예측 강도의 일치 여부를 검증한다.</li> </ul>	시험 성적서	1건	시험 성적서
			학술 회의	1건	논문 발표

연번	연구 목표	세부 내용	성과 지표	목표치	최종 성과품
3	상하부 강성비를 고려한 최적 단면 산정 및 연결부 상세기술이 포함된 교량 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>대상 교량은 소요 지간이 25~45m, 도로교 설계기준에서 정의하는 1등급교이고, 프리플렉스빔 급의 저형고를 가지는 것을 요구 조건으로 한다.</li> <li>시스템 제원은 적용 현장에 따라 변동성이 있을 수 있지만 콘크리트 설계기준강도는 60~80MPa 이내이고, 운반 가능토록 분절하며, 말뚝은 상하부 강성을 고려하여 최적 단면을 선정한다.</li> <li>상하부 연결부는 매우 복잡하므로 시공성 및 구조적 안전성을 고려하여 연결부 상세를 개발한다.</li> <li>프리플렉스교 대비 제안 교량 시스템의 총 공사비는 30% 이상 절감하는 것을 목표로 한다.</li> <li>제품 구매기관과 협의하여 개발 시스템의 효율성을 극대화할 수 있는 하천 구간을 대상으로 시험 교량을 시공한다.</li> <li>개발 시스템에 대한 적극적인 홍보로 과업 기간 내 추가 매출을 실현토록 한다.</li> </ul>	현장 실험	1건	실험 보고서
			원설계 대비 원가 절감	30% 이상	원가 절감 보고서
			특허 출원	1건	특허 출원증
			학술지 논문 게재	1건	학술 논문
			사업화 건수	1회	매출액
4	다양한 지형에 적합한 말뚝 형식 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존 (주)피티씨가 보유한 복합말뚝과 함께 다양한 지형에 적합하도록 CS강관말뚝, FRP 보강 RC말뚝에 대한 성능 및 경제성 평가를 통하여 교대 일체형 교량에 대한 최적 말뚝 형식을 선정하고 설계 조건별 말뚝 형식 선정의 지침을 마련한다.</li> <li>재료와 형식을 변수로 하는 말뚝 실험체의 내하력 평가를 통하여 성능을 상대 평가하고 최종적으로는 기존의 복합말뚝에 대한 실험 결과와 비교함으로써 성능 향상의 여부를 확인한다.</li> </ul>	실험 평가 건수	4회	실험 보고서
			학술 회의	1건	논문 발표

연번	연구 목표	세부 내용	성과 지표	목표치	최종 성과품
5	말뚝 연결부 및 다양한 말뚝형식에 대한 두부 보강 방안 개발	• 기존 IAB 교량은 말뚝을 확대기초 내부로 일정 깊이 이상 근입시키는 방안을 적용하여 시공성이 매우 떨어진다. 따라서 이를 개선할 수 있는 연결방안 강구가 필요하다.	실험 평가 건수	4회	실험 보고서
		• 기존 복합말뚝의 경우 주피티씨의 공인받은 두부 보강 기술이 있으나 신 재료나 신형식 말뚝의 경우 강결접합을 보증하는 적절한 두부 보강 방안이 제시되어야 한다.	특허 출원	1건	특허 출원증
		• 기존 복합말뚝의 두부 보강 공법 대비 신형식 말뚝에 대한 제안 두부 보강법의 성능 비교 실험을 수행한다.	학술 회의	1건	논문 발표
6	설계 도서, 시공 및 관리 지침서	• 거더 단면을 표준화, 객관화하기 위하여 국내 설계기준에 부합하는 설계 도서를 작성한다. • 요소기술에 대한 실험 결과와 시제품 제작을 통하여 습득한 제조 기술을 문서화하여 관리 한다. • 2항의 시제품 공개 실험 결과를 분석하여 개선 사항을 반영하고, 3항의 현장 시험 시공 교량 성과품 최종본에 반영한다.	설계 도서, 시공 및 관리 지침서	1식	설계 도서, 시공 및 관리 지침서
7	전용 설계 프로그램 개발	• 제품 신뢰도 향상과 설계도서 생산 비용 절감을 위하여 개발 제품에 대한 전용 설계 프로그램을 제작한다. • 국내 교량 설계 기술자들은 전체 설계과정을 검증 가능한 프로그램을 선호하므로 범용 구조해석 프로그램과 연동하는 Excel 기반 설계도서 생성 프로그램으로 제작한다.	프로그램	1식	프로그램
8	개발 제품에 대한 신기술 인증 신청	• 개발한 교량 시스템에 대하여 신기술 인증을 신청함으로써 과업 종료 후에 원활하게 사업화가 가능하도록 기반을 마련한다.	신기술 인증	1건	신기술 인증서
9	수요 기반 확대 방안 마련	• 2~5항의 연구 목표와 함께 교량 시스템 개발을 함께 할 전문 연구 인력을 양성한다.	인력 양성	1명	졸업 논문
		• 개발 기술의 신기술 인증과 추가 매출을 위하여 신문광고나 전문 학회에 기술기사를 게재 토록 한다.	연구 개발 관련 홍보	2건	홍보 자료
		• 제품의 신뢰도 향상과 수요 확대를 위하여 제품 정보를 홈페이지에 업로드 한다.	홈페이지	1건	홈페이지

## 나. 최종목표의 성격 및 설정근거

연번	연구 목표	최종 성과품	목표의 성격	목표 설정 근거
1	고강도콘크리트 생산 기술 및 설비 구축	시험 성적서	시공 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>본 연구의 최종 개발 제품은 설계기준강도 60~80 MPa 수준의 콘크리트 강도를 목표로 한다.</li> <li>현재 당 컨소시엄의 당진공장에서 운용하고 있는 배치 플랜트는 40~60MPa 강도에 최적화된 설비를 가지고 있다. 그러나 과거 본 공장에서 PHC 말뚝을 생산한 경험이 있으므로 60~80MPa의 설계 강도를 갖는 콘크리트 생산은 무리가 없을 것으로 판단된다.</li> </ul>
2	프리텐션과 포스트텐션 기법이 조합된 부재의 거동 예측 기술 확보	(요소) 실험 보고서	설계 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>현재 국내에 상용중인 분절 PSC I 거더는 RC세그먼트로 공장에서 제작하여 가설 현장으로 운반한 후, 포스트텐션 기법으로 긴장력을 도입하여 조립하는 공정을 거친다.</li> <li>본 연구에서 개발하고자 하는 제품의 두 번째 핵심 기술은 상부 분절 세그먼트에 공장에서 프리텐션으로 긴장력을 도입한 상태로 제작한 한 후 현장에서는 조립에 필요한 최소한의 긴장력만을 도입하여 거더를 완성하는 기술이다.</li> </ul>
		시제품	시작 품 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>인천대교의 경우처럼 단면이 크고 경간 가설을 하는 박스거더교에 프리텐션과 포스트텐션 기법이 병용된 사례가 있으나 PSC I 거더와 같이 횡방향 강성이 적고 단면이 얇은 구조에 프리텐션과 포스트텐션 방식을 병용하게 되면 프리텐션이 도입된 구간은 캠버가 발생하게 되므로 이를 정밀하게 시공하기는 매우 어려워 시공 사례가 매우 드물다.</li> </ul>
		(실물) 실험 보고서	설계 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>특히 프리텐션 거더는 단부 흡균열강도 및 전단강도는 정착장 내에서 강연선 부착률의 함수로 주어지지만 관련 설계 기술이 국내에는 충분히 확산되지 않은 상태이다. 반면 (주)한맥기술은 프리텐션 거더에 관한 선행 연구를 통하여 충분한 기술 노하우를 축적하고 있다.</li> </ul>
		논문 발표	기술 가치 증대	<ul style="list-style-type: none"> <li>1~5항의 요소기술은 1차년도 내에 모두 실험 검증을 마치고 기술 보고서를 제작할 예정이다. 요소기술에 대한 검증이 종료될 시점에서 시제품을 시공하고 공개 성능 평가 실험을 수행한다.</li> </ul>

연번	연구 목표	최종 성과품	목표의 성격	목표 설정 근거
3	상하부 장성비를 고려한 최적단면 선정 및 연결부 상세기술 이 포함된 교량 시스템 개발	(실교 량) 실험 보고서	설계 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>교대 일체형 교량 시스템의 초기 도입 목적은 상·하부 구조를 강결 접합시킴으로써 거더 받침과 신축이 음장치를 없애고 유지관리 비용을 절감시키기 위함이다.</li> </ul>
		원가 절감 보고서	기술 가치 증대	<ul style="list-style-type: none"> <li>그러나 이러한 구조는 중앙부에 발생하는 모멘트를 축소시켜 형고를 감소시킬 수 있는 장점이 있는 반면 장시간일수록 온도 하중에 의한 영향이 커지는 단점이 있다. 따라서 이를 이론적으로 분석하여 최적의 단면을 선정하고자 한다.</li> </ul>
		특허 출원증	기술 가치 증대	<ul style="list-style-type: none"> <li>이러한 구조물의 거동은 2항의 시제품 성능 평가 실험을 통하여 고정하중과 활하중에 대한 모사는 가능하지만 시간이력의 함수로 주어지는 하중에 대하여는 단시간에 평가가 불가능하다.</li> </ul>
		학술 논문	기술 가치 증대	<ul style="list-style-type: none"> <li>그러므로 장기 거동에 대한 신뢰도를 높이기 위하여 시간이력에 대한 엄밀 해석을 통하여 거동을 예측하고 실교량 계측을 통하여 확인하고자 한다.</li> </ul>
		매출액	실용 화 사업 화	<ul style="list-style-type: none"> <li>시험 교량 설계내역을 기준 공사비와 비교 검토함으로써 공사비 절감 목표의 달성을 여부를 판단한다.</li> <li>장·단기에 대한 구조 성능 평가 결과와 공사비 절감 효과에 대한 분석 보고서를 바탕으로 신기술 인증 및 개발 시스템의 추가 매출을 계획하고 있다.</li> </ul>
4	다양한 지형에 적합한 말뚝 형식 선정	(요소) 실험 보고서	설계 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존 일체형 교량에서는 주로 H형강 말뚝이 사용되었다. 그러나 최근 소개된 고성능 건설재료나 신형식 말뚝을 사용한다면 기존 시스템의 경제성을 향상시키는 한편 상·하부 구조물간의 하중 분담을 설계자가 제어하여 상부 거더 형고를 저감시키는 등 성능 개선의 여지가 있다.</li> <li>따라서 기 개발된 복합말뚝 이외에 다양한 지형에 적합한 CS강관말뚝, FRP 보강 RC말뚝 등을 연구하여 경제성 및 구조물의 내구성을 향상시키는 방안을 강구하고자 한다.</li> <li>복합말뚝은 상용화가 완료되어 이미 다수의 후발업체들이 난립하고 있으나 주피티씨가 원천기술을 보유하고 있으며 타 분야로 접목 가능성에 대한 연구가 충분히 축적되어 있다.</li> <li>CS강관말뚝, FRP 보강 RC말뚝의 경우 해외에는 시공 사례가 있으나 국내는 아직까지 기초 연구 단계이며 상용화 설비를 갖춘 곳은 없는 실정이다.</li> </ul>

연번	연구 목표	최종 성과품	목표의 성격	목표 설정 근거
4	다양한 지형에 적합한 말뚝 형식 선정	논문 발표	기술 가치 증대	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차년도 내에 기존 강말뚝에 비하여 경제성 및 설계 요구 조건 이상의 성능(내하력과 강성) 발현 가능성 여부를 설계 및 실험을 통하여 검증하고 최종적으로 적용할 복합 말뚝을 선정한다.</li> </ul>
5	말뚝 연결부 및 다양한 말뚝형식에 대한 두부 보강 방안 개발	(요소) 실험 보고서	설계 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>「도로교설계기준 해설」(2008)에 의하면 교량 기초의 경우 말뚝과 확대기초의 결합부는 말뚝머리 고정, 즉 강결합으로 설계하는 것을 원칙으로 규정하고 있다.</li> <li>그 이유는 수평 변위에 설계가 지배되는 경우 유리하고, 내진 안정성에 유리하도록 부정정 차수를 높이기 위함이라 해설하고 있다.</li> <li>개발하고자 하는 제품은 말뚝 본체 및 지반 반력계수의 정확한 평가와 상·하부 구조물 간의 하중 분담률에 따라 거더 형고가 좌우된다. 이때 말뚝-교대 접합면에서 강결 구조가 반드시 보증되어야만 구조물이 안전 하며 공용기간 중 강결 구조를 지속할 수 있어야 한다.</li> <li>다양한 형태의 말뚝에 대하여 강결 구조를 보증할 수 있는 적절한 접합 방식이 제안되어야 하며, 새로운 방식에 대하여 1차년도 내에 성능 검증을 마치고 특허를 출원할 예정이다.</li> </ul>
		특허 출원증	기술 가치 증대	
		논문 발표	기술 가치 증대	
6	설계도서, 시공 및 관리 지침서	설계 도서, 시공 및 관리 지침서	제품 표준화	<ul style="list-style-type: none"> <li>개발 제품의 신뢰도를 증진하고 수요를 확대하기 위하여 국내 설계기준에 부합된 제품임을 입증할 필요가 있다.</li> <li>국내 설계기준에 부합하는 표준 설계 도서를 작성하고 시제품의 성능 실험을 통하여 제품의 보유 성능이 설계 목표 성능을 상회함을 입증할 수 있는 객관적이고, 공신력 있는 각종 자료가 필요하다.</li> <li>요소기술과 시제품 제작 과정을 통하여 축적한 제품 제조 기술을 문헌 자료로 기록 보관할 필요가 있다.</li> <li>제작 인력의 변동이나 각종 시공 여건의 변화에도 불구하고 제품의 품질을 일정하게 유지하기 위하여 제조 공정을 표준화하고 이를 기록 문서화 하는 과정이 필요하다.</li> </ul>

연번	연구 목표	최종 성과품	목표 의 성격	목표 설정 근거
7	전용 설계 프로그램 개발	프로 그램	제품 수요 확대를 위한 서비스	<ul style="list-style-type: none"> <li>제품 신뢰도 향상과 설계도서 생산 비용 절감을 위하여 개발 제품에 대한 전용 설계 프로그램이 필요하다.</li> <li>국내 교량 설계 기술자들은 전체 설계과정을 검증 가능한 프로그램을 선호한다는 점을 반영하여 성과품을 작성한다.</li> </ul>
8	신기술 인증 신청	신기술 인증 신청서	기술 가치 증대	<ul style="list-style-type: none"> <li>개발 기술의 가치 보호. 개발 기술의 성공적인 사업화를 위하여 신기술 인증이 필요하다.</li> </ul>
9	수요 기반 확대 방안 마련	졸업 논문	연구 인력 양성	<ul style="list-style-type: none"> <li>공동 연구기관인 고려대학교 산학협력단에서는 2~5 항의 연구 목표와 함께 교량 시스템 개발을 함께 할 전문 연구 인력을 양성한다.</li> </ul>
		홍보 자료	제품 수요 확대를 위한 서비스	<ul style="list-style-type: none"> <li>개발 기술의 신기술 인증과 추가 매출을 위하여 신문 광고나 전문 학회에 기술기사를 게재토록 한다.</li> </ul>
		홈 페이지		<ul style="list-style-type: none"> <li>제품 서비스와 홍보 그리고 신뢰도 증진을 위하여 web 기반의 수요자 접촉 창구가 필요하다.</li> </ul>

### 3. 연구개발 특징

#### 가. 고강도콘크리트 생산 기술 및 설비 구축

정 의	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 목표 강도에 대한 콘크리트 배합 설계표</li> <li>• 개량된 배치 플랜트 설비</li> <li>• 생산 기술 인력의 숙련도</li> <li>• 생산 콘크리트가 목표 강도에 도달하였음을 입증하는 공인성적서</li> </ul>												
목 적	<p>국내에서 현장 제작되는 PSC 교량의 콘크리트 강도는 일반적으로 40~45MPa 정도이고, 공장 제작의 경우 50~60MPa급을 적용하고 있다. 반면 공장 제작하는 PHC 말뚝은 80MPa까지 적용하고 있다.</p> <p>본 과제에서 개발하고자 하는 프리플렉스교 수준의 저형고를 구현하기 위해서는 기준보다 더 많은 긴장력을 도입할 필요가 있고 그러기 위하여 재료 강도 증진이 필수적이다.</p> <p>고강도 콘크리트의 구현 자체는 연구 개발 대상이 아니라, 본 과제가 기술사업화 과제임을 감안할 때 소요 강도에 대한 배합설계를 확보하고 본 칸소시엄이 보유한 기존의 제품 생산설비를 개량하고 생산 기술 인력을 교육하는 등의 과정이 필요하다.</p>												
성능목표	<p>콘크리트의 목표 설계 기준 압축강도는 60~80MPa를 목표로 한다. 목표 설계 기준 압축강도에 따른 배합표를 작성한 후 배합 종류에 따라 30기의 공시체를 제작하여 재령 28일 강도를 기준으로 하여 압축시험을 수행한다.</p> <p>압축시험 결과 표준 정규 분포표에 따라 95%의 공시체가 60~80MPa 이상이 되도록 품질 관리하여 제작한다.</p>												
성과달성 책임자 (소속기관)	남점권 (㈜장현산업)												
소요기간	14.10. ~ 15.03. (6개월, 1년차)												
성과달성 확인방법	배치 플랜트에서 생산한 콘크리트의 압축강도 시험을 공인 시험기관에 의뢰하여 시험성적서를 획득한다.												
성과달성이 따른 정량적 최종성과	<table border="1"> <tr> <td>특허 출원</td> <td></td> </tr> <tr> <td>논문</td> <td></td> </tr> <tr> <td>저작</td> <td></td> </tr> <tr> <td>S/W</td> <td></td> </tr> <tr> <td>신기술</td> <td></td> </tr> <tr> <td>기타</td> <td>공인시험성적서 : 1건</td> </tr> </table>	특허 출원		논문		저작		S/W		신기술		기타	공인시험성적서 : 1건
특허 출원													
논문													
저작													
S/W													
신기술													
기타	공인시험성적서 : 1건												

## 나. 프리텐션과 포스트텐션 기법이 조합된 분절 PSC I 거더

정 의	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최소 3분절 이상의 세그먼트로 구성된 PSC I 거더</li> <li>• 중앙부 세그먼트는 프리텐션 방식으로 제작하고 현재에서 전체 세그먼트를 조립할 때는 포스트텐션 방식으로 거더를 완성한다.</li> <li>• 기술 개발 성과는 시제품을 제작하고 공개 성능 평가 실험을 수행함으로써 입증한다.</li> </ul>												
목 적	<p>본 연구에서 제안하는 최종 제품은 기존 현장 제작하던 포스트텐션 거더에 비하여 재료 강도에 대한 품질관리가 매우 중요하므로 공장 제작한 세그먼트를 현장에서 조립하는 형식으로 거더를 제작한다. 이때 공장제작한 세그먼트는 운반 중 균열 발생에 대한 보강이 필요하고 현장에서 수행하는 긴장 작업을 최소화하기 위하여 최종 긴장력의 일부를 세그먼트 제작 단계에서 프리텐션으로 도입한다.</p> <p>단, 이 경우 각 세그먼트는 프리텐션 효과에 의하여 캠버가 발생하고 접합면은 수직면을 유지할 수 없게 되는데, 포스트텐셔닝 작업 후 일체화 된 거더의 전체 형상과 성능은 단일 거더의 그것과 동급 이상이 되어야 하므로 이에 관한 설계 및 시공 기술이 개발되어야 한다.</p>												
성능목표	1등급 도로교 수준의 시제품(지간 25m 이상)을 제작하고 성능 평가 실험을 수행한다. 계측 결과를 토대로 도로교설계기준의 요구 성능을 초과 만족하도록 한다.												
성과 달성 책임자 (소속기관)	이종관 (주)한맥기술												
소요기간	15.07. ~ 15.12. (6개월, 1~2년차 연속 공정)												
성과 달성 확인방법	시제품에 대한 성능 평가 실험을 공개로 수행한다. 이때 공인 시험 기관의 연구원을 참관시키고 계측 자료에 대한 공인 성적서를 획득한다.												
성과 달성에 따른 정량적 최종성과	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">특허 출원</td> <td style="width: 10px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">논문</td> <td style="width: 10px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">저작</td> <td style="width: 10px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">S/W</td> <td style="width: 10px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">신기술</td> <td style="width: 10px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">기타</td> <td style="width: 10px;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: right; margin-top: -10px;">시제품 : 1건, 공인시험성적서 : 1건</p>	특허 출원		논문		저작		S/W		신기술		기타	
특허 출원													
논문													
저작													
S/W													
신기술													
기타													

## 다. 분절 PSC I거더-교대 일체형 교량 시스템 개발

정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>상부 구조는 최소 3분절 이상의 세그먼트로 구성되며, 프리텐션과 포스트텐션 기법이 병용된 분절 PSC I 거더를 사용한 거더-교대 일체형 교량</li> <li>하부 구조는 신형식 복합말뚝과 강접합 구조를 보증하는 두부보강 장치를 적용한 일체형 교량</li> </ul>																								
목적	<p>본 연구에서 제안하는 최종 제품은 수해 복구를 위하여 신속한 시공이 가능하고, 통수능 확보를 위하여 기존 프리플렉스 거더를 사용한 일체형 교량과 동등한 형고를 유지하는 동시에 경제성을 향상시키는 것을 목적으로 한다.</p> <p>이를 위하여 공장 제작한 분절 세그먼트를 현장에서 일체로 조립하여, 이동 및 조립 공정의 안전성과 시공성을 향상시키기 위하여 프리텐션과 포스트텐션을 병용하는 기술을 개발하고, 기존 일체형 교량에 적용되던 강말뚝을 대체하기 위하여 경제성과 내구성을 향상시킨 신형식 복합말뚝의 제조 기술을 개발한다.</p>																								
성능목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>교량별 시간 대비 목표 형고 (바닥판 포함 형고) (단위:m)</li> </ul> <table border="1"> <thead> <tr> <th>구 분</th><th>25m</th><th>30m</th><th>35m</th><th>40m</th><th>45m</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>제안공법</td><td>1.04</td><td>1.04~1.14</td><td>1.24~1.34</td><td>1.54~1.64</td><td>1.74~1.84</td></tr> <tr> <td>프리플렉스</td><td>1.0~1.2</td><td>1.2~1.3</td><td>1.3~1.5</td><td>1.5~1.7</td><td>1.8~1.9</td></tr> <tr> <td>PSC 거더</td><td>1.14~1.99</td><td>1.34~2.24</td><td>1.64~2.44</td><td>1.94~2.24</td><td>2.24~2.44</td></tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> <li>동급 프리플렉스 교량 대비 최소 30% 이상 경제성 향상</li> </ul>	구 분	25m	30m	35m	40m	45m	제안공법	1.04	1.04~1.14	1.24~1.34	1.54~1.64	1.74~1.84	프리플렉스	1.0~1.2	1.2~1.3	1.3~1.5	1.5~1.7	1.8~1.9	PSC 거더	1.14~1.99	1.34~2.24	1.64~2.44	1.94~2.24	2.24~2.44
구 분	25m	30m	35m	40m	45m																				
제안공법	1.04	1.04~1.14	1.24~1.34	1.54~1.64	1.74~1.84																				
프리플렉스	1.0~1.2	1.2~1.3	1.3~1.5	1.5~1.7	1.8~1.9																				
PSC 거더	1.14~1.99	1.34~2.24	1.64~2.44	1.94~2.24	2.24~2.44																				
성과달성 책임자 (소속기관)	이종관 (주)한맥기술																								
소요기간	16.01. ~ 16.06. (6개월, 2년차)																								
성과달성 확인방법	실 규모(시간 25m 이상)의 test bed를 구축하여 개발 기술을 입증한다.																								
성과달성에 따른 정량적 최종성과	<table border="1"> <tr> <td>특허 출원</td><td>국내 : 1건</td></tr> <tr> <td>논문</td><td>국내 : 1건</td></tr> <tr> <td>저작</td><td></td></tr> <tr> <td>S/W</td><td>1건</td></tr> <tr> <td>신기술</td><td></td></tr> <tr> <td>기타</td><td>매출실적 : 1건</td></tr> </table>	특허 출원	국내 : 1건	논문	국내 : 1건	저작		S/W	1건	신기술		기타	매출실적 : 1건												
특허 출원	국내 : 1건																								
논문	국내 : 1건																								
저작																									
S/W	1건																								
신기술																									
기타	매출실적 : 1건																								

## 라. 교대 일체형 교량에 적합한 하부구조 선정

정 의	<ul style="list-style-type: none"> <li>신형식 복합말뚝 : 기존 복합말뚝 상단에 사용되는 고가의 강재말뚝보다 경제성이 우수한 신 건설재료를 적용한 말뚝 개발</li> <li>기초와의 강접합을 보증할 수 있는 신형식 말뚝에 적절한 두부 보강 기술</li> <li>개발 기술과 제품은 특허출원으로 지적재산권 보호</li> </ul>												
목 적	<p>기존 교대-일체형 교량의 기초는 H빔, 원형강관 등 고가의 강재말뚝을 사용하여 왔으나 본 컨소시엄의 보유기술인 복합말뚝을 사용함으로써 제품의 경쟁력 향상을 도모할 수 있다.</p> <p>그러나 복합말뚝 역시 말뚝 상단 일부 구간은 강재를 사용하므로 모든 토질 및 환경 조건에 최적일 수는 없다. 그러므로 FRP, 고내구성 콘크리트 등의 신 건설재료를 활용하여 기존 복합말뚝의 성능을 개량한 신형식 말뚝을 개발한다.</p> <p>또한 설계기준에 의하면 도로교의 말뚝 두부는 지진 등 횡하중에 적절하게 저항할 수 있도록 강접합 구조를 보증하여야 하므로 개발 제품에 적절한 형태의 두부보강 기술을 함께 개발한다.</p>												
성능목표	<p>국내 건설시장에서 축방향 하중이 지배적인 건축구조물의 기초에는 PHC말뚝을 지진 등 횡하중이 지배적인 교량 구조물에는 복합말뚝을 사용하는 것이 일반적이다.</p> <p>개발하고자 하는 신형식 말뚝은 기존 복합말뚝과 최소한 동일 수준의 단면 성능을 발휘하여야 하며, 기존 강말뚝에 비하여 10% 이상의 제조비용을 절감한다. 두부보강 기술은 강접합 구조를 보증하여야 하며, 여기서 강접합 구조란 말뚝 본체 강도와 동일 이상의 힘 및 압축 성능을 발휘함을 의미한다.</p>												
성과달성 책임자 (소속기관)	김재수 (주)피티씨)												
소요기간	14.10. ~ 15.06. (9개월, 1년차)												
성과달성 확인방법	동일 제원의 PHC말뚝, 복합말뚝과 함께 성능 비교 실험을 수행한다.												
성과달성에 따른 정량적 최종성과	<table border="1"> <tr> <td>특허 출원</td> <td>국내 : 1건</td> </tr> <tr> <td>논문</td> <td></td> </tr> <tr> <td>저작</td> <td></td> </tr> <tr> <td>S/W</td> <td></td> </tr> <tr> <td>신기술</td> <td></td> </tr> <tr> <td>기타</td> <td></td> </tr> </table>	특허 출원	국내 : 1건	논문		저작		S/W		신기술		기타	
특허 출원	국내 : 1건												
논문													
저작													
S/W													
신기술													
기타													

## 제2장 국내외 기술개발 현황

### 1절. 국내·외 연구동향

제안 기술은 고강도 콘크리트에 다량의 프리스트레싱을 도입함으로써 형고를 프리플렉스 교 수준으로 낮추고, 프리텐션 및 포스트텐션방식을 조합한 상부구조와 다양한 형태의 복합 말뚝을 포함하는 하부구조간의 최적의 강성비를 구현함으로써 경제성을 향상시킨 공법이다.

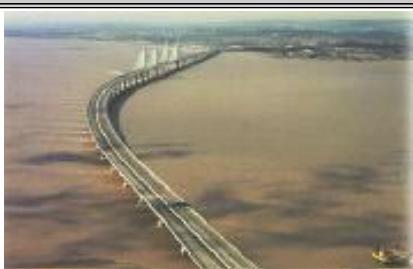
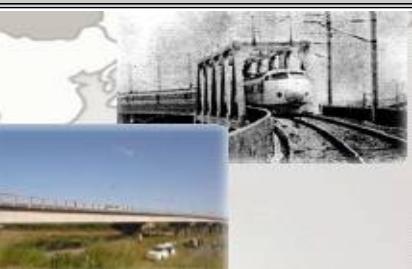
이러한 교량 형식에 대하여 직접적으로 연구한 내용은 국내외적으로 찾아볼 수 없었으나, 각각의 요소기술에 대한 연구는 꾸준히 진행 중이며, 이에 대한 국내외 연구동향을 살펴보면 다음과 같다.

#### 가. 고강도 콘크리트 기술동향

국내 현장 제작 PSC교량에 사용되고 있는 콘크리트 강도는 일반적으로 40~45MPa 정도이고, 공장 제작의 경우 50~60MPa급을 적용하고 있으며, 공장제작하는 PHC말뚝은 80 MPa까지 적용하고 있다.

또한 국내 여러 연구기관에서 60MPa 이상급 고강도 콘크리트를 실구조물에 사용하기 위한 연구가 이루어졌고("60 MPa 이상 현장타설 고강도 PSC 거더연구, 고려대") 현재는 건설기술연구원을 중심으로 80~180MPa급 초고강도 콘크리트를 사용하기 위한 연구가 수행 중에 있다.

해외에서도 High Performance Concrete의 개념으로 고강도 콘크리트를 상용화하고 있다.

유 럽	일 본	미 국						
		<p>&lt;미국내 PSC교량 시공현황&gt;</p> <table border="1"> <tr> <td>35~59MPa</td> <td>60~69MPa</td> <td>70~83MPa</td> </tr> <tr> <td>83%</td> <td>15%</td> <td>2%</td> </tr> </table>	35~59MPa	60~69MPa	70~83MPa	83%	15%	2%
35~59MPa	60~69MPa	70~83MPa						
83%	15%	2%						
<ul style="list-style-type: none"> <li>Second Severn Crossing (UK): 60~70MPa</li> <li>Normandie교(Fr): 60MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Giseki br.: 60MPa</li> <li>PC 콤포교: 50MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Louetta road: 60~90MPa</li> <li>Georgia state route 920. : 70MPa</li> </ul>						

[표 2.1.1] 해외 고강도 콘크리트 시공 사례

상기와 같이 국내외에서 고강도 콘크리트에 대한 연구 및 상용화에 대한 성과는 상당부분 진척이 있었지만 고강도 콘크리트를 현장에서 사용하고자 할 경우에는 여전히 레미콘 수급 불안 및 품질관리에 어려움을 겪고 있는 것 또한 사실이다.

따라서 고강도 콘크리트를 안정적으로 수급하고 양호한 품질관리를 하기 위하여서는 공장에서 제품을 생산하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

#### 나. 저형고 교량의 기술동향

형하 공간에 제약이 있는 곳에는 1949년 벨기에 Lipski에 의해 개발된 프리플렉스교가 많이 사용되고 있다. 우리나라에는 물론 일본에서도 “프레빔”이라는 이름으로 널리 사용되고 있는 공법이다.

이 공법은 강재를 이용하여 개발된 공법으로서 형고는 낮으나 매우 고가의 교량형식으로 알려져 있다.

또한 강재에 프리플렉션을 도입하는 과정과 강재로 합성된 얇은 복부로 인하여 균열이 발생하는 등 유지관리 문제가 상존하는 구조형식이다.



(a) 프리플렉스교



(b) 프리플렉스교의 복부 균열 사례

[그림 2.1.1] 프리플렉스교 시공사례

이러한 문제점을 해결하고자 근래에는 프리플렉션을 생략하고 콘크리트 케이싱에 강선을 도입하는 공법인 프리콤, MSP, RFP공법 등이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 상기 공법은 강재의 사용량을 감소시켜 경제성 향상과 균열문제 등을 다소 해소하기는 하였으나, 기존공법과 마찬가지로 고가인 강재를 사용하고 있어 근본적인 경제성 문제를 해결하지 못하였다.

이와는 다른 한편으로 경제성 있는 저형고 교량을 만들고자, PSC I 거더를 개선하는 노력도 이루어졌다. 예를 들면 하중단계별로 프리스트레싱을 도입하는 IPC, DR거더 공법, 강판을 이용한 E-Beam, 지점 승강을 이용한 Up-Down 공법 등 다양한 공법이 개발되어 상용화 되었지만 모든 기술이 프리플렉스 수준의 형고를 구현하지 못하고 있는 실정이다.

#### 다. 유지관리 최소화 기술동향

교량에서 유지관리가 빈번하게 발생하는 교좌장치 및 신축이음장치를 없애기 위한 노력으로 북미지역을 중심으로 “Jointless Bridge” 또는 “Integral Abutment Bridge”란 이름으로 다수 교량이 건설되어 사용되고 있다.



[그림 2.1.2] IAB 교량사례 : 미국 인디애나주 SR18 over Missinewa River

국내에서는 해외기술을 도입하여 2001년 최초로 대전-통영간 고속도로에 평촌1교가 가설되었으나 설계 및 시공에 관한 자료와 연구 미비 및 장기거동에 대한 검증이 불충분하여 그간 많이 사용되지는 않았다.

그러나 2009년 한국도로공사에서 “일체식 교량설계지침”이 제정된 이후 몇몇 교량이 설계되고 있는 실정이다. 평촌1교 및 일체식 교량설계지침에서는 해외와 동일하게 유지관리 비를 절감하고자 교대 일체화 방법 및 구조물 배면의 지반거동에 초점이 맞추어져 있고, 실제 시공도 형고가 높은 채래식 PSC I 거더를 사용하고 있다. 따라서 형고의 제약이 있는 곳에 그대로 적용하기는 부족하다.

일체식 교량 연구 결과를 반영하여 저형고 교량인 프리플렉스 또는 강재교량의 유지관리 성능을 향상시키기 위한 강합성 라멘교, “유공강판 보강요소를 활용한 프리플렉스 합성형 일체식 단경간 교량 건설공법(PIA공법), 2013년, 신기술 698호”등이 개발되었으나, 이러한 공법은 형고가 낮고 유지관리비는 절감되나 경제성 문제는 해결하지 못하였다.



(a) 합성형 라멘교

(b) 하이콤 라멘교

[그림 2.1.3] 저형고 라멘교 시공사례

## 라. PSC I 거더 교량의 경제성 향상을 위한 기술동향

PSC I 거더는 국내외에서 경제성이 우수하여 많이 사용되는 구조형식으로서 과거 AASHTO에서 개발된 표준단면을 기준으로 약 30m 내외의 경간에 주로 사용되었다.

그러나 1980년대 들어 플랜지폭을 넓힌 Bulb-T형 단면을 적용함으로써 적용 경간장을 50m 내외까지 확대하였다.

해외에서는 운반조건이 비교적 양호하여(길이 40m 내외, 중량 80tonf까지 허용) 북미 지역을 중심으로 경제성이 우수한 프리텐션을 적용한 PSC I 거더교량을 주로 개발하였다.

이에 반하여 운반조건이 엄격한(길이 15m 이내, 총중량 40tonf 이내) 국내 및 일본에서 단면이 크고 정착구 및 쉬스관 등이 필요한 포스트텐션 방식을 주로 사용하여 왔다.

그러나 국내에서도 최근 들어 프리텐션 방식의 PSC I 거더의 경제성에 주목하고 이동식 반력대를 이용한 프리텐션 PSC I 거더에 대한 다양한 공법을 개발하고 있는 실정이다.



(a) 이동식 반력대 및 부분 비부착을 이용한  
단부 형고 증대형 프리텐션거더(한맥기술)

(b) Precast bed Pretension 거더 공법  
(비엔지 컨설턴트)

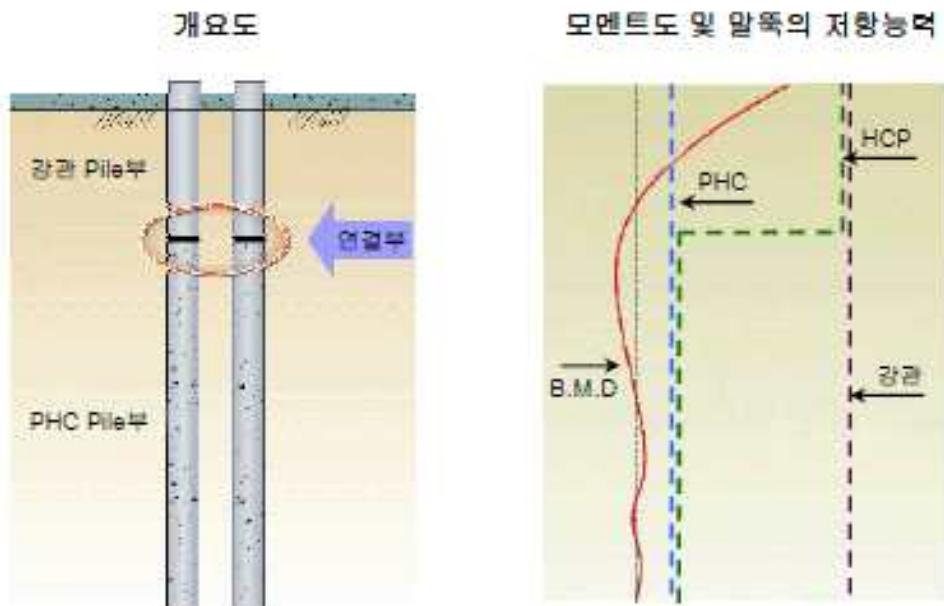
[그림 2.1.4] PSC I형 거더

그러나 이러한 프리텐션 방식을 적용한 PSC I 거더는 경제성은 향상시킬 수 있으나 형고를 축소하는 데는 한계가 발생한다.

#### 마. 말뚝의 경제성 향상을 위한 기술 동향

말뚝구조는 그간 강관 및 PHC말뚝으로 구분되어 사용되어져 왔다. 강관말뚝은 수평 및 모멘트 저항성능은 우수하나 고가이고 PHC 말뚝은 수평 및 모멘트 저항 성능은 다소 떨어지나 경제성이 우수한 특성을 가지고 있다.

국내에서는 이러한 특성을 반영하여 수평력 및 모멘트가 큰 말뚝상부는 강관으로, 연직력만 작용하는 말뚝 하부는 PHC를 조합하여 제작한 복합말뚝이 신기술 556호로 지정되어 사용되고 있다.



[그림 2.1.5] 복합말뚝

이와 같은 동향은 일본 및 미주지역 등 해외도 국내와 동일하게 말뚝 구조의 거동에 따른 이종 말뚝 결합을 통하여 경제성을 확보하는 방향으로 연구 개발되어 사용되고 있다.

그러나 대부분 강 + PHC의 형태를 유지하고 있고, 다양한 형태의 말뚝 조합에 대한 연구는 찾아보기 어려운 실정이다.

## 2절. 국내·외 기술 특허 동향

### 가. 국내외 기술 개발 수준 분석

제안기술의 요소기술인 고강도 콘크리트 기술은 국내외 큰 차이 없이 어느 정도 상용화가 이루어진 것으로 판단된다. 그러나 국내에서는 아직도 고강도 콘크리트를 현장에서 구매할 경우 수급이 불안하고 양생 등 품질관리가 미흡한 실정이다. 따라서 공장에서 고강도 콘크리트를 사용하여 제품을 생산한다면 재료 수급과 품질관리 면에서 해외와 마찬가지로 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다.

저형고 교량 기술은 국내에서는 프리플렉스 형식의 교량이 보편화되어 외국과 비슷한 수준의 기술력을 가지는 것으로 평가된다. 다만 PSC I 교량에 있어서는 북미의 경우 공장에서 고강도 콘크리트를 사용하여 제작된 PSC I 거더가 활성화되어 국내보다는 낮은 형고의 거더를 구현하고 있다. 그러나 아직도 프리플렉스교 수준의 형고에는 미치지 못하는 수준이다.

유지관리를 최소화하기 위한 일체식 교량 기술 수준은 해외에서는 보편화된 반면 국내에서는 도입단계로 분류되어 해외에 비하여 다소 떨어진다고 평가된다.

그 외 경제성 향상을 위한 프리텐션과 포스트텐션 방식을 조합한 프리스트레싱 방식과 복합말뚝 등은 국내에서 일부 개발되어 사용되고는 있으나, 해외에서와 같이 다양한 방법으로 개발되어 사용되고 있지 않은 실정이므로 다소간의 기술 격차가 있는 것으로 평가된다.

### 나. 국내외 관련 기술 특허 동향

특허는 제안기술과 유사한 형태인 일체형교량과 분절거더에 대하여 조사하였다. 제안기술과 관련된 타기관의 특허를 분석한 결과는 다음과 같다.

#### (1) 일체형 교량 시스템에 관한 특허

“무조인트 교량”, “일체식 교대 교량”, “일체식 교대”의 검색어로 조회된 특허는 총 613건으로 최초 특허는 2000년부터 출원되기 시작했는데 이 시기는 도로공사와 동아건설이 국내 최초로 일체형 교량을 선보이고 학계에 관련 연구가 본격적으로 쏟아지기 시작한 시점과 맞물려 있다.

이 중 등록 완료된 경우는 260 건이고 특히 교량 구조물과 직접적인 관련이 있는 내용은 46건이었다.

46건의 특허를 주제별로 분석해보면 상부형식 8건은 프리플렉스 거더, Bulb-T 단면의 PSC I 거더, 상자형 거더를 다루고 있는데 이는 북미 지역에서 사용하는 전형적인 형태

의 일체형 교량용 거더로서 본 과제에서 다루는 형고 저감을 목적으로 하는 분절형 PSC I 거더의 사용과는 차이점이 있다.

말뚝형식에 관한 3건 중 특허명이 “콘크리트 충진 섬유강화 복합소재 말뚝을 이용한 무조인트 일체식 교대구조”인 1건은 제목은 본 제안 기술과 유사한 면이 있으나 그 내용에서 두 가지 차이점이 있다.

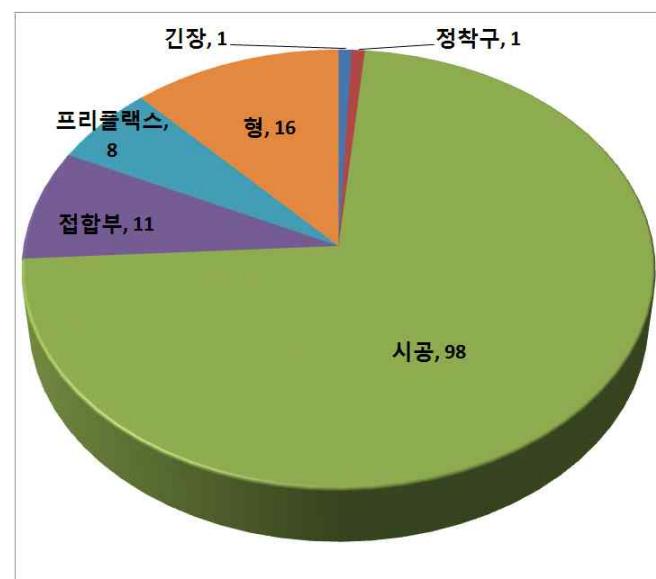
첫째 제안기술은 고강도 콘크리트를 사용한 분절거더를 상부구조로 채택하고 상하부 구조간의 최적의 강성비 조합으로 일체형 교량을 구성한다는 점이고, 둘째 말뚝 형식에 관한 내용에 있어서도 기존 특허가 충진 FRP 말뚝을 사용하되 FRP 소재를 말뚝의 주 재료로 사용하는 반면 본 제안 연구에서는 FRP를 RC 말뚝의 구속효과와 피복 효과를 위한 보조재로로서 효용성을 검토하고자 하는 차이점이 있다.

전문학회의 연구결과 콘크리트 충진 FRP 말뚝의 경우 FRP 재료가 인장강도는 높으나 강성이 낮아서 변형에 취약하므로, FRP를 주부재로 사용할 경우 콘크리트 충진 강관 말뚝(CFT 말뚝)에 비하여 성능이 우수하지 못하다는 내용이 입증된 바가 있다. 그러므로 본 연구에서는 FRP confined 복합말뚝을 제안하는 바이며, RC 말뚝의 구속효과와 피복 효과를 위한 보조재로 FRP 소재를 사용함으로써 기존 복합말뚝의 성능을 개선하고 경제성을 극대화하고자 한다.

그 외 특허의 경우에도 특별히 이번 과제를 통하여 개발하고자하는 제품의 상세와 중복되는 부분은 없는 것으로 검토되었다.

[표 2.2.1] 국내 특허 분석

발명요소	발명수
상부형식	8
교대 뒷채움재 또는 시공 방법	2
말뚝형식	3
반일체식 교량	3
시스템	13
교대-말뚝, 교대-거더간 접합부	11
교량 신축이음부	6
계	46



## (2) 분절거더에 관한 특허

분절거더를 대상으로 본 연구 과제를 통하여 개발하고자 하는 내용은 첫째 분절형 PSC I 거더에서 프리텐셔닝과 포스트텐셔닝 기법을 혼용할 때의 설계 및 시공 기술과 둘째 분절 세그먼트 접합면에 미리 일정량의 회전각을 도입함으로써 프리텐션으로 인한 솟음량을 상쇄시키는 기술이다.

검색어 “분절거더”로 검색한 217건의 기존 특허 중 교량용 거더와 연관이 있으되, 강거더 구조와 관련된 내용을 제외한 135개의 항목을 분석하였다.

강연선 정착구 형상에 관한 내용과 거더의 측면에서 포스트텐셔닝이 가능하게 한 기술이 각각 1건씩 있었고, 분절 거더의 단면 형상을 V형, U형 또는 상자형으로 제안한 특허가 16건이었으며, 프리플렉스 거더의 제작과 시공에 관한 내용이 8건이 있었다.

접합부에 관한 11건은 모두 접합면에 사용되는 연결재나 특수한 연결 구조를 제안하고 있으나 본 과제에서 제안하는 바와 같이 접합면 자체에 회전각을 주어 세그먼트를 제작하는 내용은 없었다.

분절 거더에 관한 시공 기술에 관한 특허가 약 70%로 가장 많았는데 이 중 프리텐션을 언급하는 특허는 단 1건이었으며, 포스트텐션과 연계 기술을 언급하는 특허는 1건도 없어 제안기술과 중복되는 부분은 없는 것으로 검토되었다.

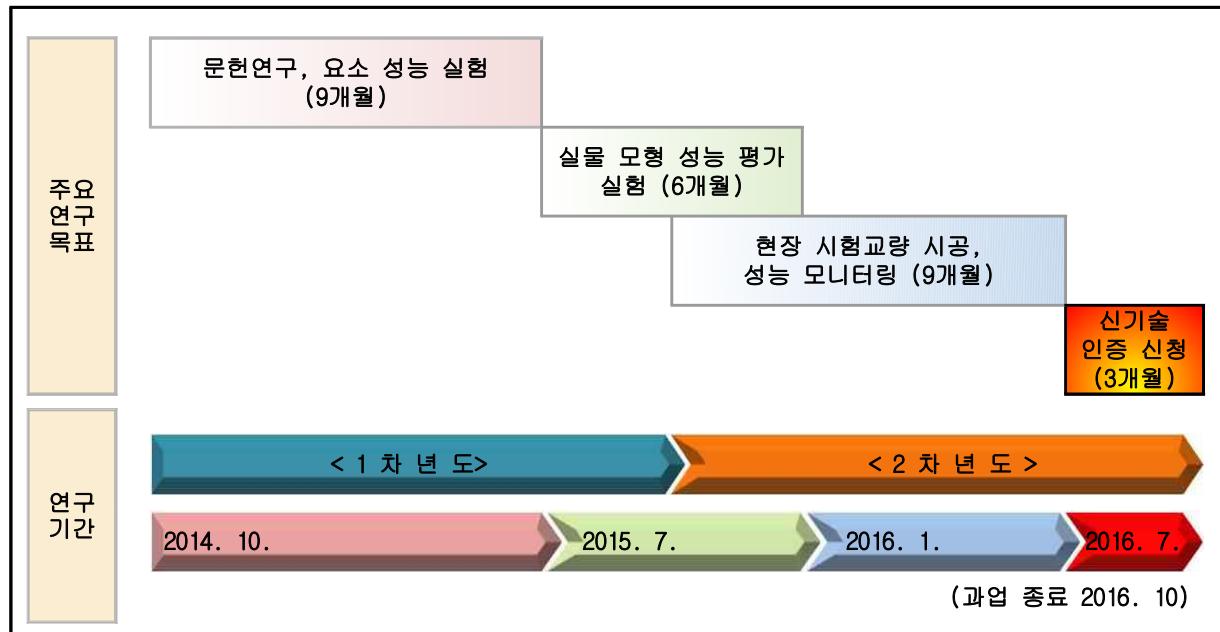


[표 2.2.2] 국내 관련 특허 키워드 분석

## 제3장. 연구수행 내용 및 성과

### 1절 연구 수행 단계

연구의 최종 목표에 도달하기 위한 연구 기간 중 주요한 세부 목표와 추진 일정은 아래 도표와 같다.



본 연구는 60~80MPa급 고강도콘크리트를 이용한 분절거더와 강성 복합말뚝을 이용한 저형고 일체식 교량 시스템으로서 상·하부 부재의 강성비 조절을 통하여 모멘트를 재분배하여 형고를 낮춘 저형고 일체식 PSC I거더교의 설계 및 시공 방법의 개발을 최종 목표로 하고 있다.

그러므로 이 목표에 도달하기 위하여 아래 요소 기술의 개발 또는 개선이 선행되어야 한다.

- ① 60~80 MPa급 고강도콘크리트 생산 기술
- ② 다양한 형태의 고강성 말뚝 및 강절 구조를 보증하는 두부 접합기술 개발
- ③ 일체형 교량 형식에서 거더-교대 접합부 철근 상세에 대한 시공성 개선
- ④ 프리텐션 부재의 긴장력 도입 공정 중 상향 솟음, 단부 회전각에 대한 예측 기술

이상의 요소 기술을 융합한 최종 시제품은 성능 평가 실험을 통하여 구조안전성을 검증한다.

## 2절 고강도콘크리트 생산기술

현재 국내에서 PSC I 형 거더에 사용되는 콘크리트는 일반적으로 40 ~ 50 MPa급이고, PHC 말뚝에 사용되는 콘크리트는 80 MPa급으로 금번 제안 연구는 이 두 가지 기술을 융합하여 60~80MPa급 고강도콘크리트를 PSC I 형 분절 거더에 사용하여 저형고 교량을 개발하고자 하는 것이다.

1차년도 연구 목표는 생산 단가의 증가 없이 기존 말뚝 생산에 적용하던 80MPa 배합설계를 일반 프리캐스트 제품 생산에 적합하도록 변경하고 생산 설비 또한 언제든지 80MPa급 제품을 양산할 수 있도록 개선함에 있다.

연구 초반 4개월에 걸쳐 분절거더에 필요한 강도와 워커빌리티 등을 확보하기 위하여 시행착오법(Trial-error method)에 의한 시합배합과 내부 시험을 거쳐 수정한 최종 배합 설계표는 아래와 같다.

[표 3.2.1] 고강도콘크리트 배합비

조골재 최대 치수 (mm)	슬립프 (cm)	공기량 (%)	물- 시멘트 비 W/C (%)	잔골재율 s/a (%)	단위량 (kg/m³)						
					물 W	시멘트 C	잔골재 S		조골재 G (20mm)	혼화재료	
							세척사	부순 모래		슬래그 미분말	고성능 감수제
20	50	4	25.3	38.0	150	445	355	240	985	148	8.3

아래 사진 왼쪽은 설비 개선 이후의 레미콘 생산 시설이고 중앙은 콘크리트 공시체에 대한 압축강도를 공동연구기관인 (주)장현산업의 내부 시험 결과 88MPa를 달성한 결과이다. 추가 공시체를 생산하여 공인 시험 기관인 한국건설생활환경시험연구원에 의뢰하여 KS F 2405:2010에 의한 시험을 시행하고 시험 성적서를 획득하였다.



(a) 레미콘 생산 설비 개선



(b) 압축강도 자체 시험 결과



(c) 공인시험성적서

[그림 3.2.1] 고강도 콘크리트 생산 설비 및 시험성적서

### 3절 다양한 신형식 말뚝 및 연결 기술 개발

연구 초기에는 steel confined 말뚝과 FRP confined RC 말뚝의 가지 신형식 말뚝의 개발을 목표로 접근하였다.

그러나 (주)한맥기술이 본 과제에 앞서 독자적으로 FRP confined RC 말뚝에 대하여 연구한 결과와 학계 전문가들의 자문의견을 수렴하여 내린 결론에 의하면 FRP 재료의 낮은 강성과 아직까지는 상대적으로 높은 생산 단가로 인하여 단기간 내에 관련 상품을 출시하는 것은 경쟁력이 떨어진다고 판단하여 추가 연구를 보류하기로 결정하였다. 대신 steel confined 말뚝 2종과 RC 말뚝을 우선 제품화하기로 결정하였다.

본 과제의 최종 성과품은 기존 일체형 교량보다 거더 쪽의 하중 분배율을 더 낮추기 위하여 말뚝의 강성을 더 높게 할 필요성이 있기 때문에 기존의 H형 말뚝이나 원형 강관말뚝보다 강성과 강도가 더 높은 범위에 있는 CFT말뚝과 SC말뚝의 2종과 PHC말뚝의 전단 강성을 보완한 RC말뚝 1종을 제안하였으며, 이에 대한 두부접합 기술 또한 새로이 개발하였다.

개발 제품에 대한 성능 평가 실험을 수행하였으며 그 절차와 평가 결과는 다음과 같다.

#### 1. 실험 목적

본 실험 연구의 목적은 이번 연구에서 제안된 ① CFT말뚝, ② SC말뚝, ③ RC말뚝이 개선된 IAB의 요구조건을 만족하는지 그 성능을 입증하는데 있다.

- ① 신형식 말뚝의 흡강성(EI) 및 강도 평가 : 신형식 말뚝에 적용 가능한 이론식이나 설계식을 문헌 조사와 통하여 확인하고 실험결과가 이들 중 어느 쪽에 근접한지를 평가한다. 그리고 한국강구조학회의 허용응력설계(ASD)를 따르는 강구조설계 기준이 충분히 안전함을 입증한다.
- ② 스터드가 없는 상태에서 합성 거동 평가 : 원형 CFT말뚝은 직경의 제한과 경제성의 문제로 내부에 합성용 스터드를 부착하기가 어렵다. 이 경우 말뚝 단부를 강판으로 막는 등의 처리만으로 강과 콘크리트 두 재료간의 합성이 보증되는지를 실험을 통하여 확인한다.
- ③ 이번 연구를 통하여 제안된 ① CFT말뚝, ② SC말뚝, ③ RC 말뚝에 대하여 연결부 즉 ① 기존 PHC말뚝과의 접합부, ② 기초와 연결되는 말뚝 두부 접합부의 성능을 평가하고, 두부 접합 장치에 대하여 개선 방향을 제시한다.

## 2. 실험체 종류 및 개수

PHC말뚝과 강관말뚝의 경우 기존 성능 평가 결과가 많이 있으므로 이를 활용하기로 하고, 신규 개발된 3종의 말뚝에 대한 본체 성능 평가와 실험체를 10개 계획하였다.

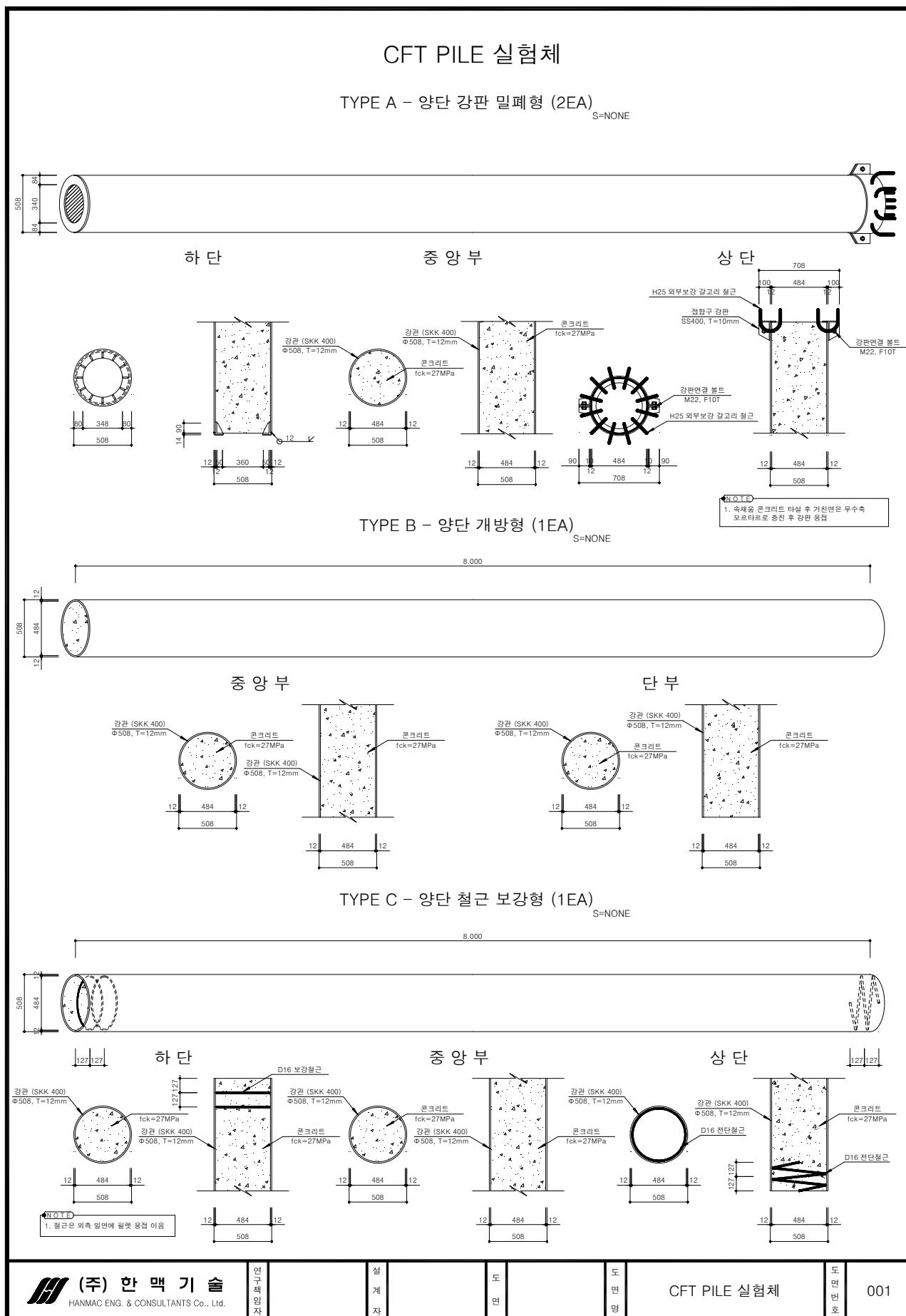
두부접합부 성능에 있어서는 LH공사에서 제안한 PHC말뚝의 원컷팅공법에 대한 검증이 필요하므로 이를 포함하여 모두 12개의 실험체를 계획하였다.

[표 3.3.1] 복합말뚝 실험체 종류

목적	종류					소계	비고
	PHC	강관	CFT	SC	RC		
말뚝 본체	1) 강성·강도 평가	-		2	1	2	5
	2) 합성 겨동 평가	-	1	2	-	-	3
연 결 부	3) 말뚝접합	-		1	-	1	2
	4) 두부접합	2	-	6	1	3	12
소계		2	1	11	2	6	22

Note)

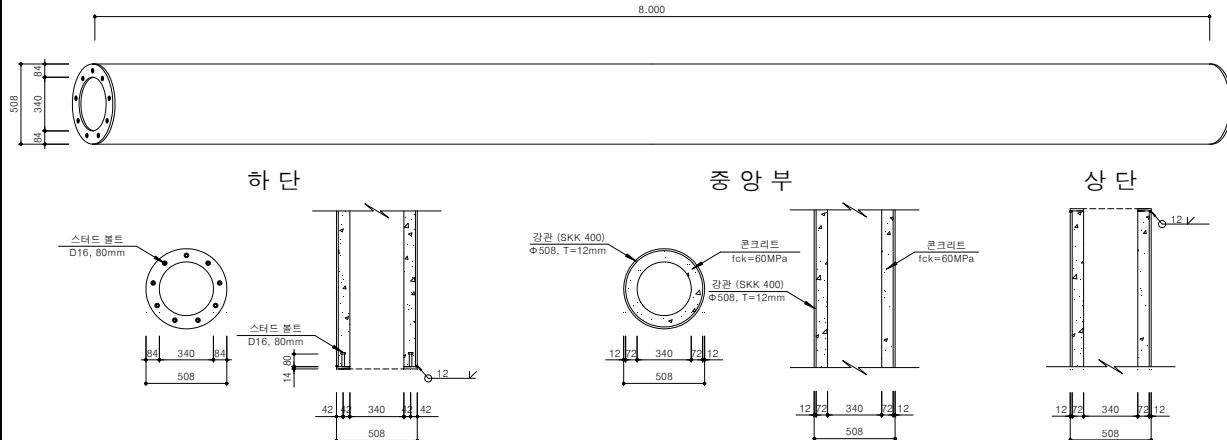
- 1) ① CFT 실험은 실험 2)의 CFT 실험 결과에 대한 비교 기준이 되므로 종료 후 컷팅하여 강과 콘크리트 접합면의 파쇄 상태를 관찰함.  
 ② CFT와 RC는 PHC 말뚝의 KS 규정에 따라 힘 및 전단 실험을 수행하기 위하여 각 2개씩의 실험체를 할당하였음.
- 2) ① 강관말뚝은 내측 좌굴로 재료 강도 이하에서 파괴 예상되며, 실험 1)의 CFT 결과와 비교함으로써 CFT에서 순수한 강관의 기여도를 알 수 있음.  
 ② CFT 단부 막지 않은 비교 실험체 1개, 강관 내부 철근 용접한 것 1개
- 3) ① CFT, SC는 외부가 강관이고, 기존에 강관을 사용한 접합부의 검증 자료는 충분 하므로 본 연구에서는 CFT 제품에 관한 성능 입증 용도로 1개 수행.  
 ② RC는 기존 자료가 없으므로 1개 수행함.
- 4) ① 성능 비교를 위한 기준 실험체. PHC에 대하여 원컷팅 1개, 설계기준 방식 1개 수행함.  
 ② CFT, RC는 축력 0인 것 1개, 10% 이내에서 축력 있는 것 2개로 하여 3개 1조로 제작 실험하고, SC는 연구계획서 상의 목표를 위하여 10% 이내에서 축력 있는 상태로 1개 수행함(축력 0인 상태는 빔 실험 결과로 분석 가능함).  
 ③ CFT는 두부 접합 장치(제안된 2개 안)를 변수로 하여 2개조 실험 수행.



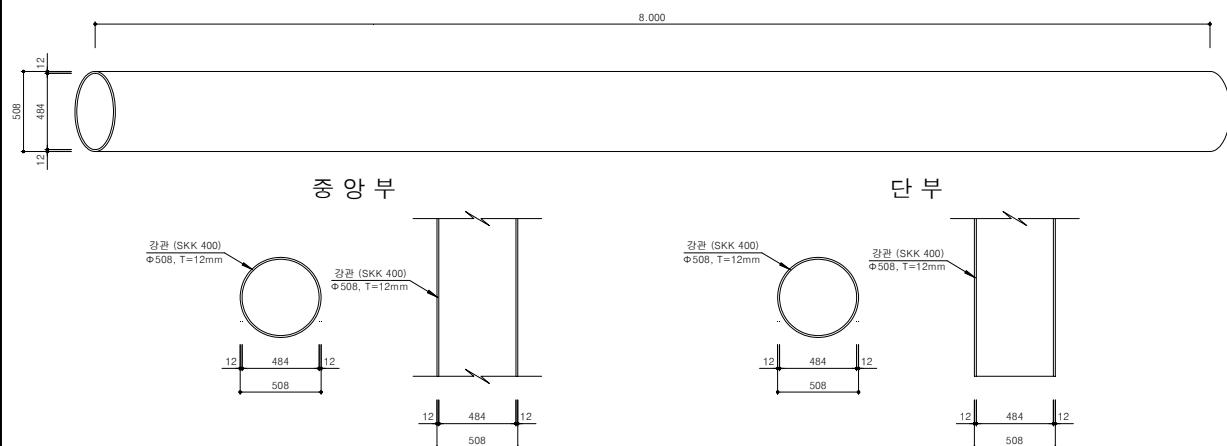
[그림 3.3.1] CFT Pile 실험체 일반도 (Type A, Type B, Type C)

## SC, Steel, RC PILE 실험체

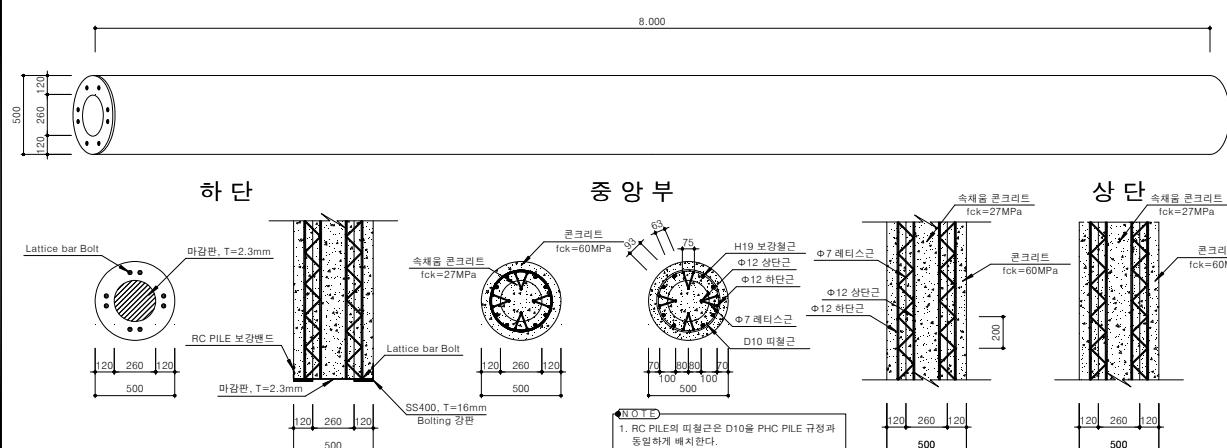
SC PILE 실험체 (1EA)  
S=NONE



Steel PILE 실험체 (1EA)  
S=NONE



RC PILE 실험체 (2EA)  
S=NONE



(주) 한 맥 기 술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

연 구 책 임 자

설 계 자

도면

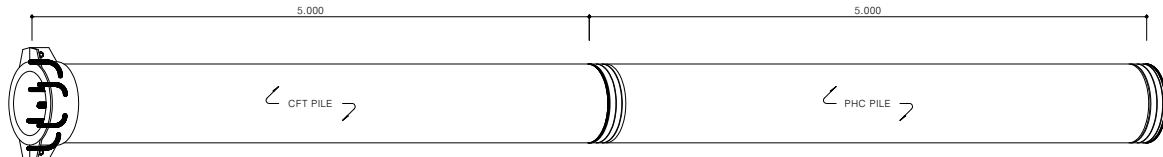
SC, Steel, SC PILE 실험체

002

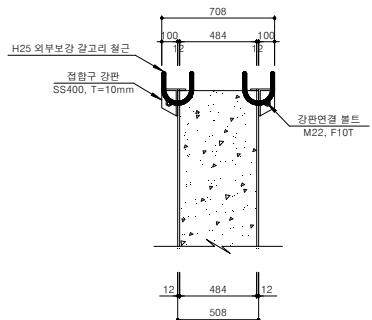
[그림 3.3.2] SC, Steel, RC Pile 실험체 일반도

## 접합부 성능 검토 실험체

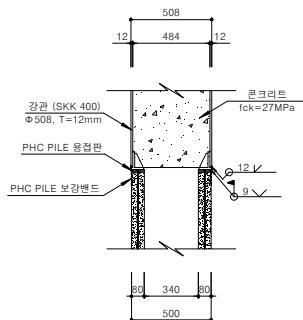
CFT – PHC PILE 접합 실험체 (1EA)  
S=NONE



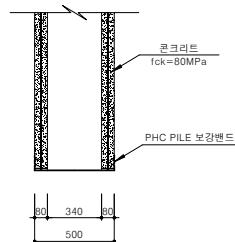
상단부 – CFT PILE



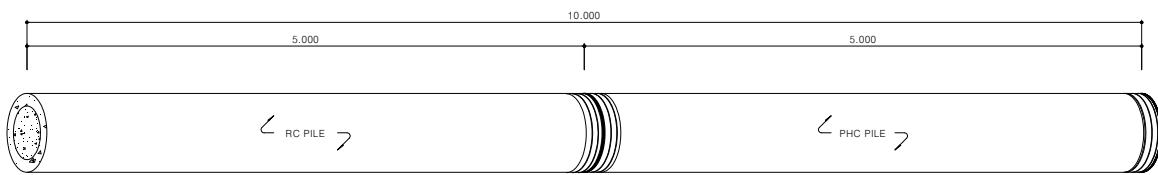
CFT – PHC PILE 접합부



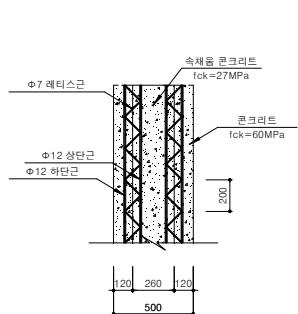
하단부 – PHC PILE



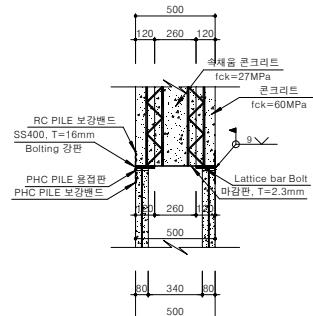
RC – PHC PILE 접합부 실험체 (1EA)  
S=NONE



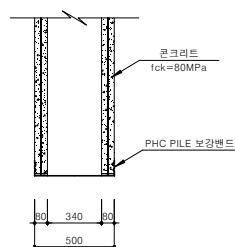
상단부 – RC PILE



RC – PHC PILE 접합부



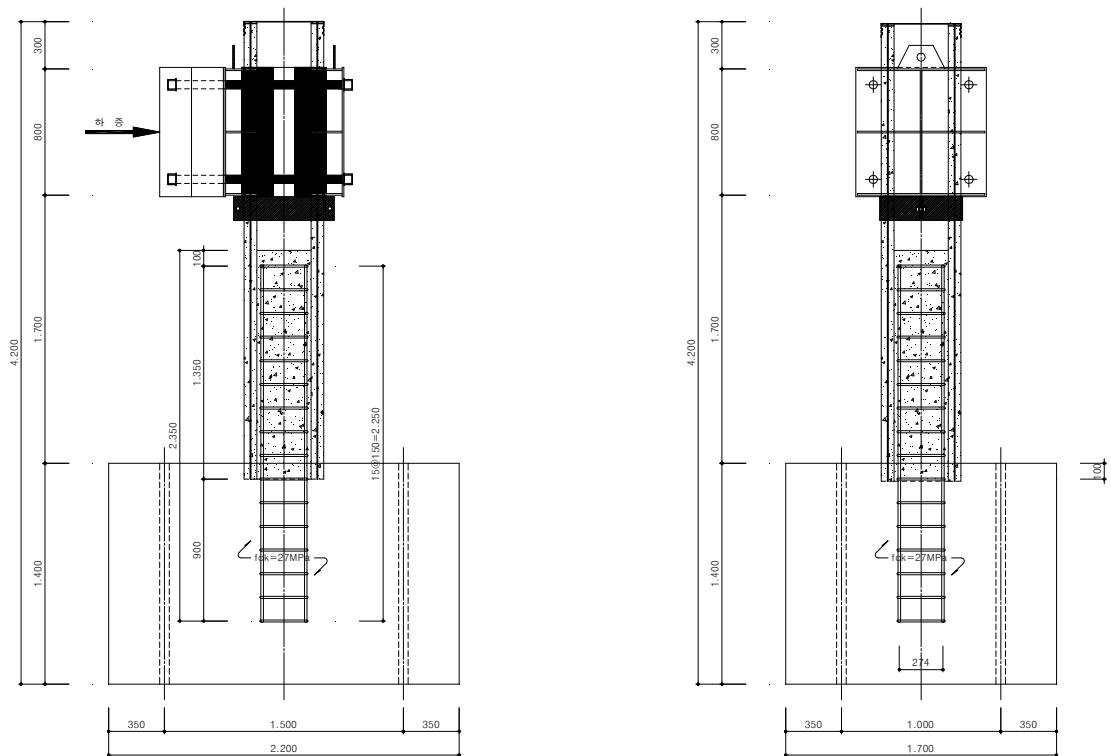
하단부 – PHC PILE



## PHC PILE 실험체 개요도 (1EA) - 원컷팅 방식 -

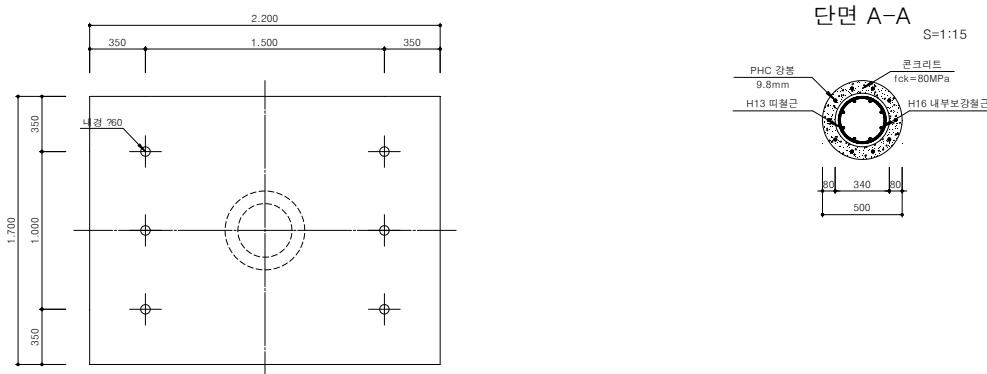
정 면 도  
S=1:15

측 면 도  
S=1:15



단 면 도  
S=1:15

단면 A-A  
S=1:15



(주) 한 맥 기 술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

연구책임자

설계자

도면

PHC PILE 실험체 개요도  
- 원컷팅 방식 -

도면명

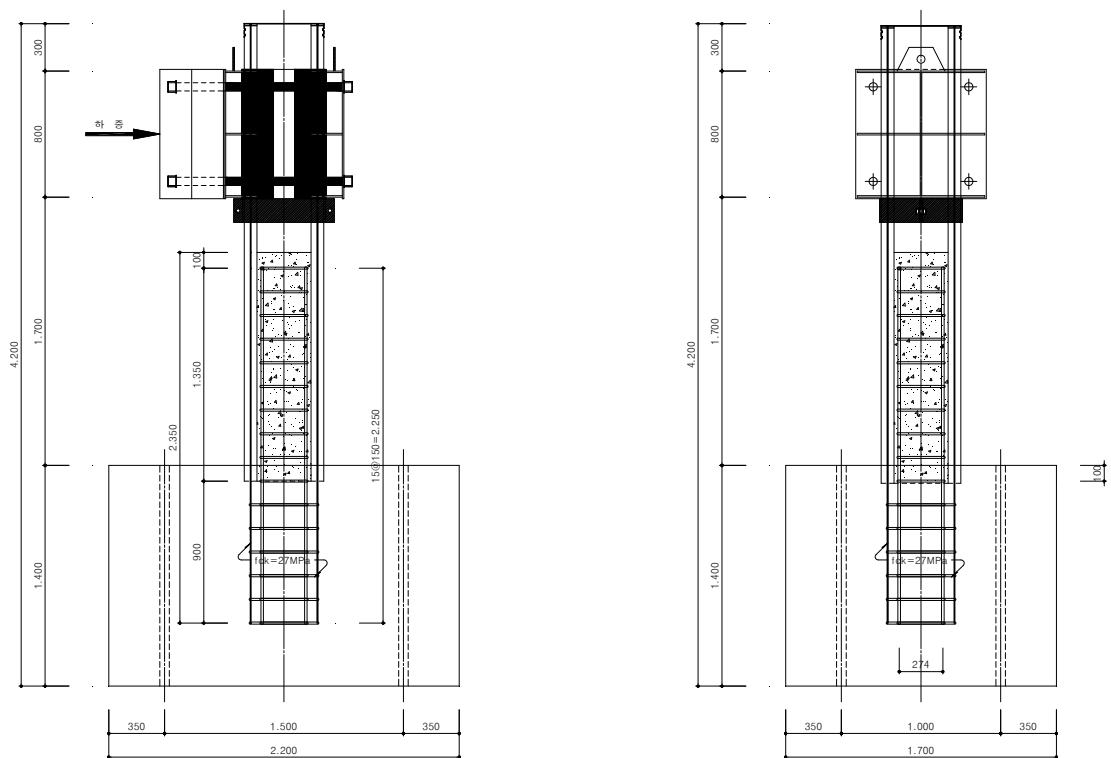
004

[그림 3.3.4] PHC Pile 실험체 개요도 (두부보강 - 원컷팅 방식)

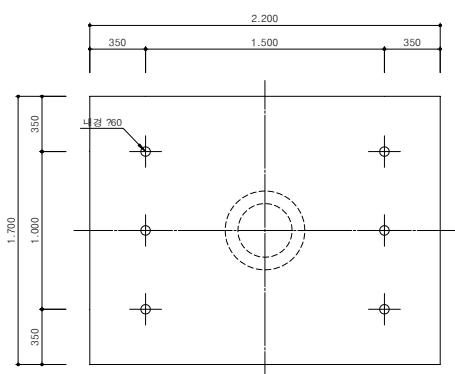
## PHC PILE 실험체 개요도 (1EA) - 도로교 설계기준(안) -

정 면 도  
S=1:15

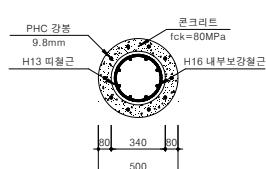
측 면 도  
S=1:15



위 면 도  
S=1:15



단면 A-A  
S=1:15



(주) 한 맥 기 술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

연구책임자

설계자

도면

PHC PILE 실험체 개요도  
- 도로교 설계기준(안) -

도면명

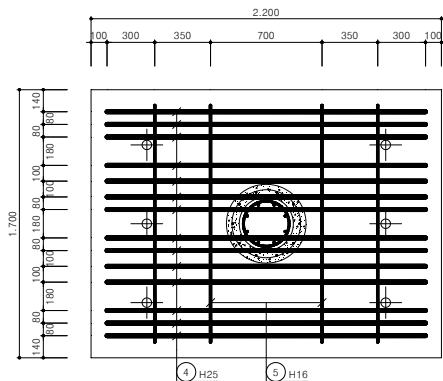
005

[그림 3.3.5] PHC Pile 실험체 개요도 (두부보강 - 도로교 설계기준(안))

## PHC PILE 실험체 기초 배근도

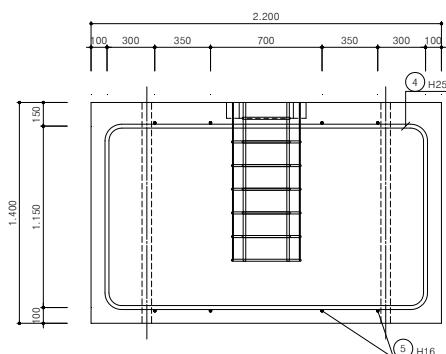
평면도

S=1:15



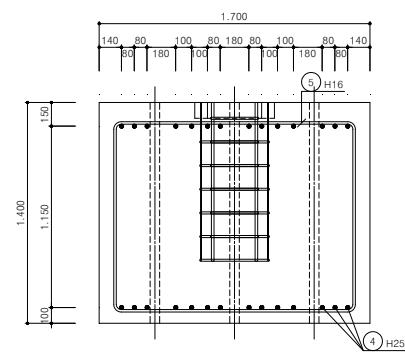
정면도

S=1:15

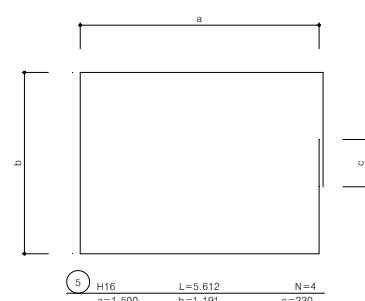
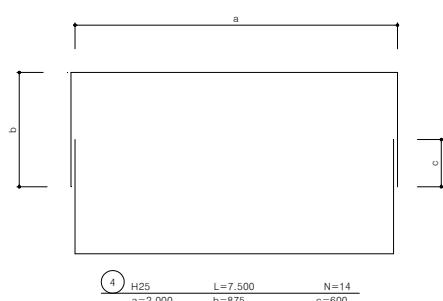


측면도

S=1:15



철근상세도



철근재료표

(SD40)						(전체분)	
번호	직경	길이	수량	총길이	단위중량	총중량	
4	H25	7.500	14	105.000	kgf/m)	0.418	
소	계			105.000		3.980	
5	H16	5.612	4	22.448		0.035	
소	계			22.448		0.840	
총	계					0.453	



(주) 한 맥 기 술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

연구책  
임자

설  
계  
자

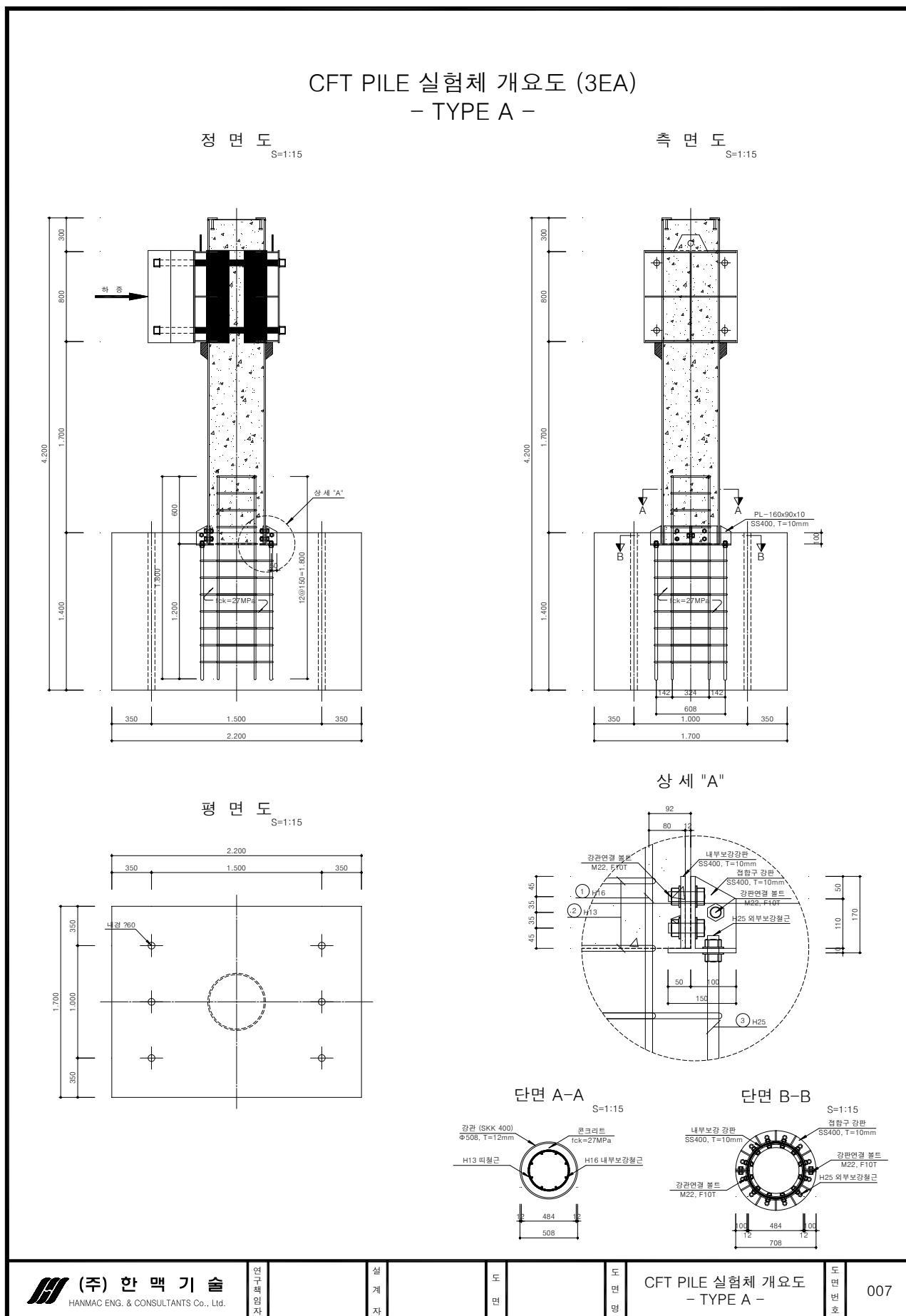
도  
면

PHC PILE 실험체 기초 배근도

도  
면  
번호

006

[그림 3.3.6] PHC Pile 실험체 기초 배근도

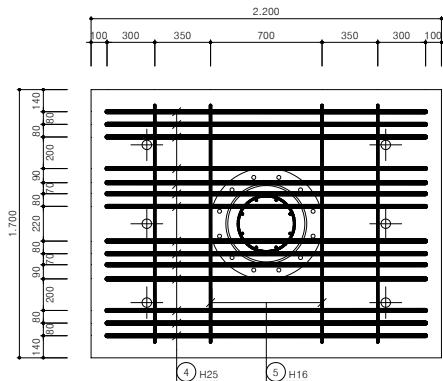


[그림 3.3.7] CFT Pile 실험체 개요도 (Type A)

## CFT PILE 실험체 기초 배근도 - TYPE A -

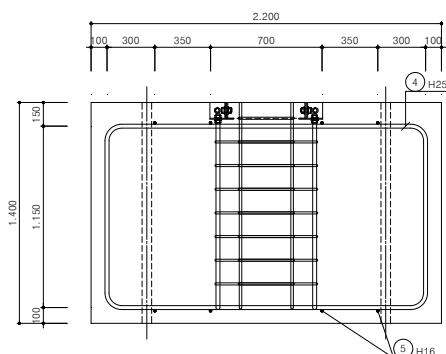
평면도

S=1:15



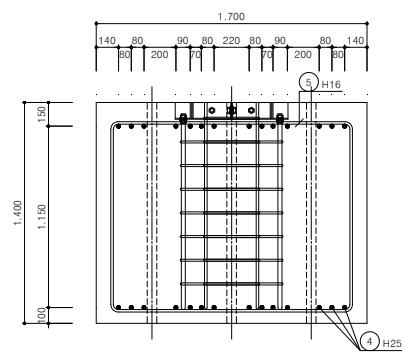
정면도

S=1:15

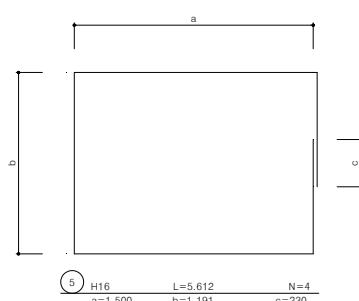
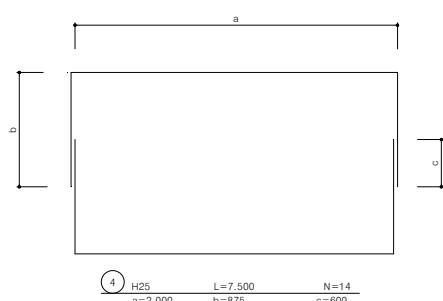


측면도

S=1:15



철근상세도



철근재료표

(SD40)						(전체분)	
번호	직경	길이	수량	총길이	단위중량	총중량	
4	H25	7.500	14	105.000	3.980	0.418	
소 계				105.000			
5	H16	5.612	4	22.448	1.560	0.035	
소 계				22.448			
총 계						0.453	



(주) 한 맥 기 술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

연구책임자

설계자

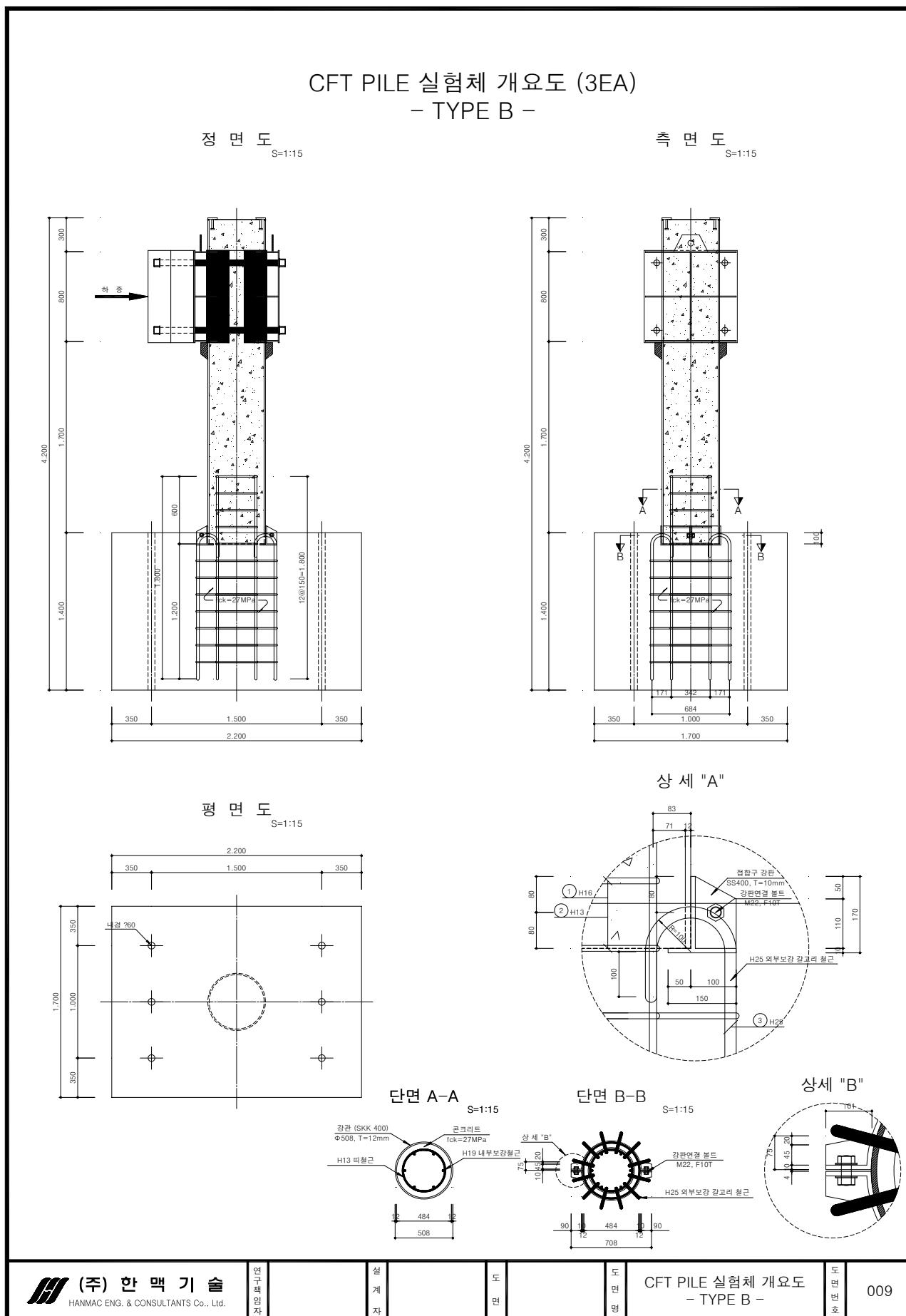
도면

CFT PILE 실험체 기초 배근  
- TYPE A -

도면번호

008

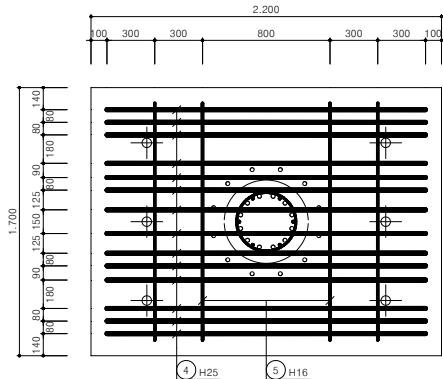
[그림 3.3.8] CFT Pile 실험체 기초 배근도 (Type A)



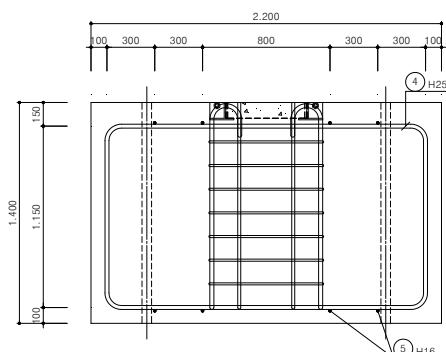
[그림 3.3.9] CFT Pile 실험체 개요도 (Type B)

## CFT PILE 실험체 기초 배근도

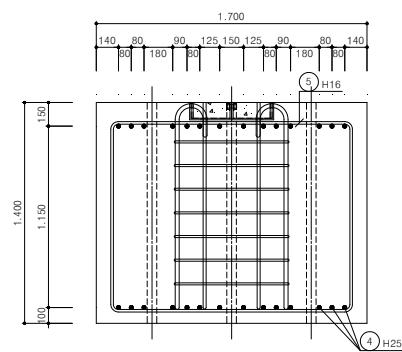
### 평면도 - TYPE B - S=1:15



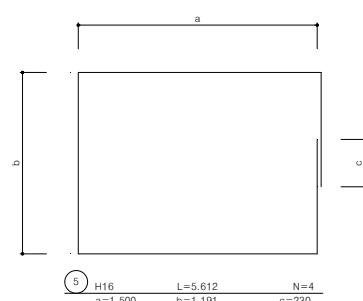
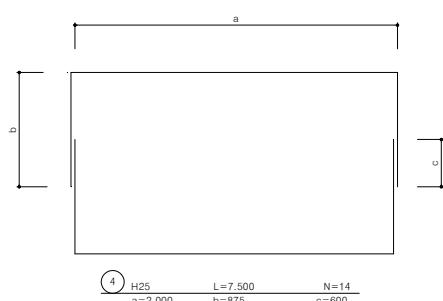
### 정면도 S=1:15



### 측면도 S=1:15



### 철근 상세도

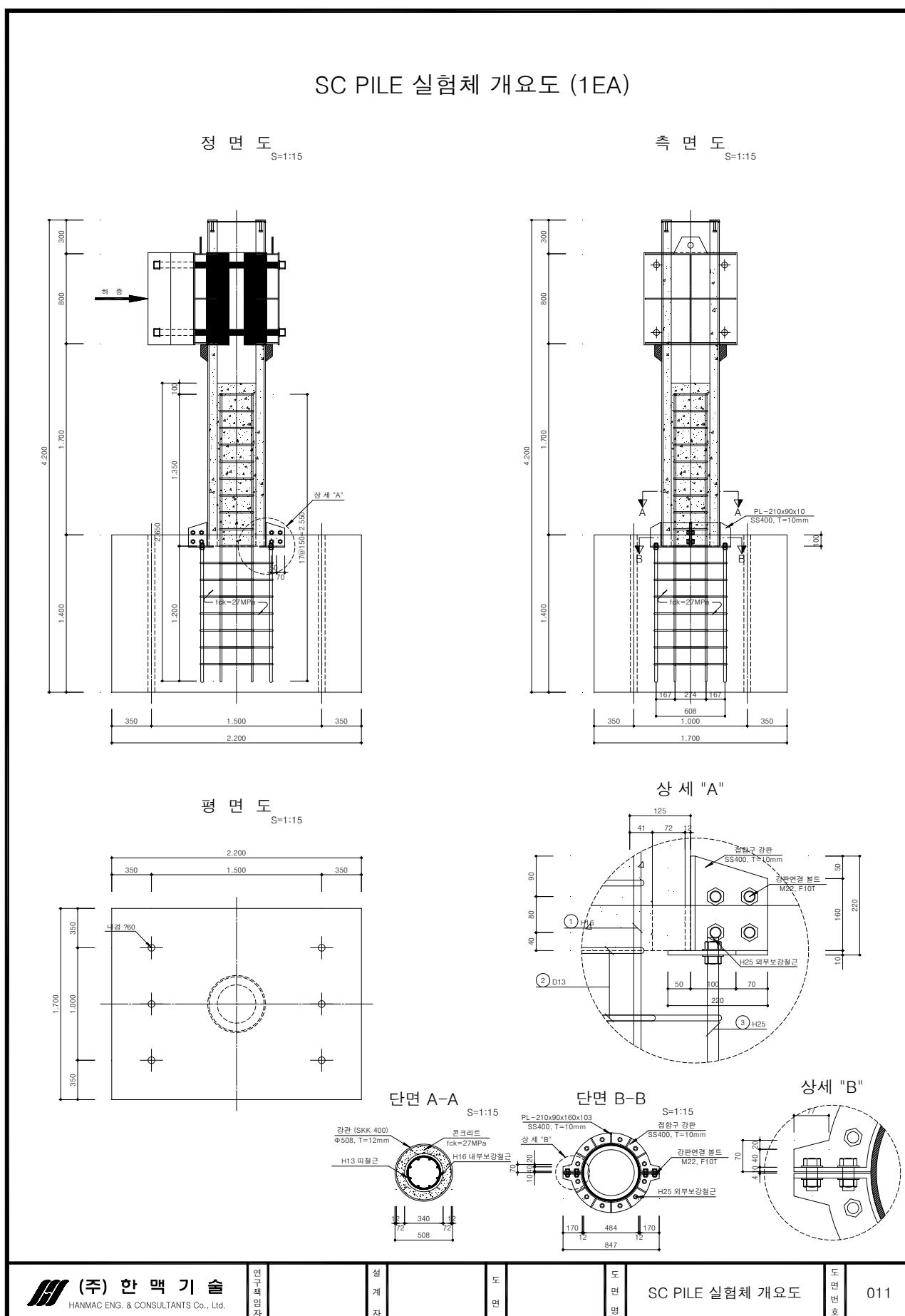


### 철근 재료표

(SD40)						(전체분)		
번호	직경	길이	수량	총길이	단위중량	총중량		
4	H25	7,500	14	105,000	(kgf/m)	0.418		
소	계			105,000		3,980		
5	H16	5,612	4	22,448		0.035		
소	계			22,448		1,560		
총	계					0.453		

	(주) 한 맥 기 술	HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.	연구책임자	설계자	도면	도면명	CFT PILE 실험체 기초 배근 - TYPE B -	도면번호	010
--	-------------	-------------------------------------	-------	-----	----	-----	----------------------------------	------	-----

[그림 3.3.10] CFT Pile 실험체 기초 배근도 (Type B)

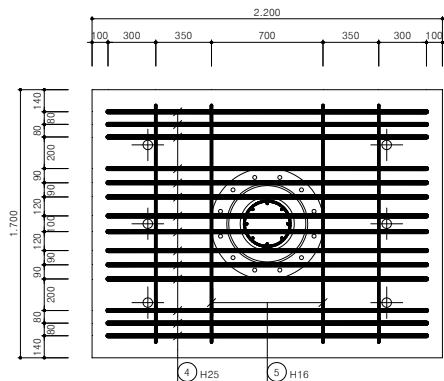


[그림 3.3.11] SC Pile 실험체 개요도

## SC PILE 실험체 기초 배근도

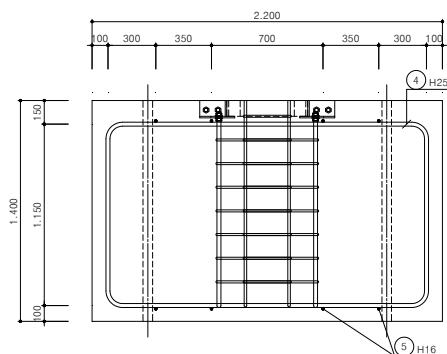
평면도

S=1:15



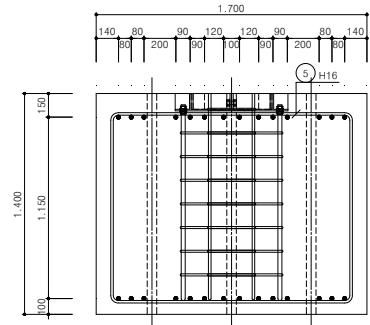
정면도

S=1:15

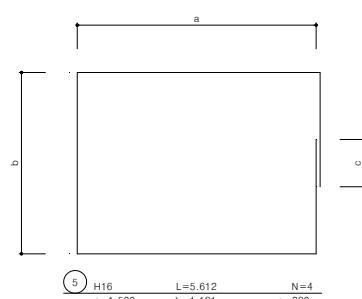
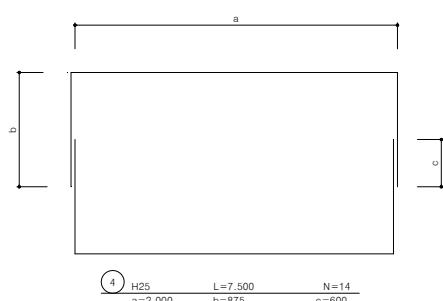


측면도

S=1:15



철근상세도



철근재료표

(SD40)						(전체분)	
번호	직경	길이	수량	총길이	단위중량	총중량	
4	H25	7.500	14	105.000	(kgf/m)	0.418	
소	계			105.000		41.800	
5	H16	5.612	4	22.448		0.035	
소	계			22.448		0.803	
총	계					0.453	



(주) 한 맥 기 술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

연구책임자

설계자

도면

SC PILE 실험체 기초 배근

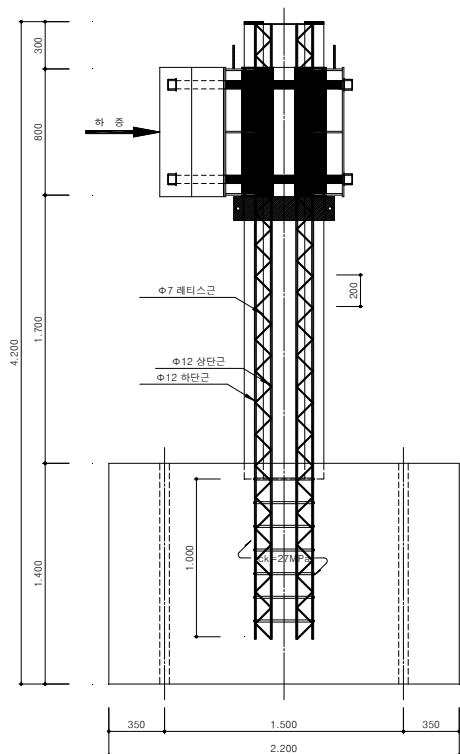
도면번호

012

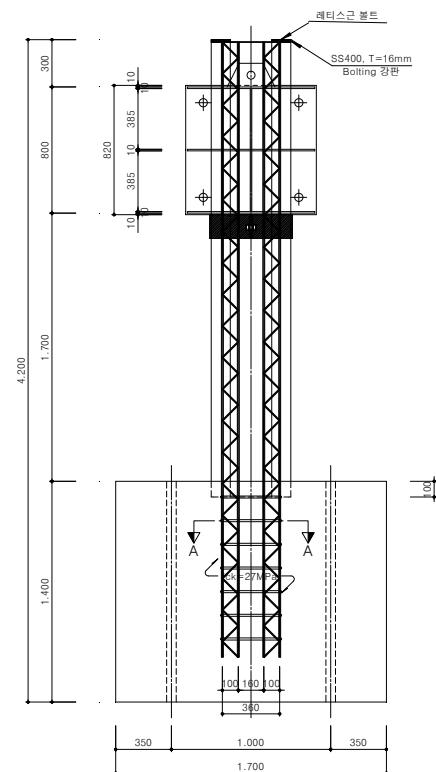
[그림 3.3.12] SC Pile 실험체 기초 배근도

### RC PILE 실험체 개요도 (3EA)

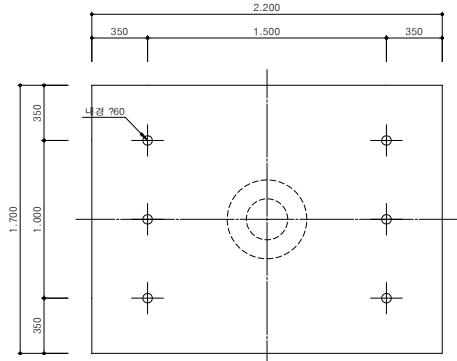
정면도  
S=1:15



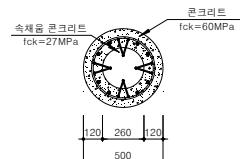
측면도  
S=1:15



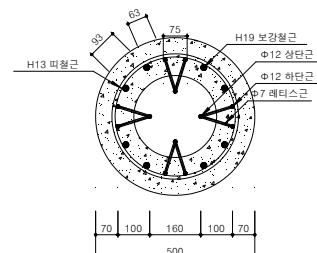
평면도  
S=1:15



단면 A-A  
S=1:15



단면 A-A 철근 상세



(주) 한 맥 기 술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

연구책임자

설계자

도면

RC PILE 실험체 개요도

도면번호

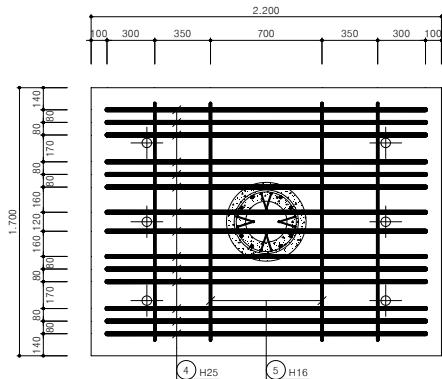
013

[그림 3.3.13] RC Pile 실험체 개요도

## RC PILE 실험체 기초 배근도

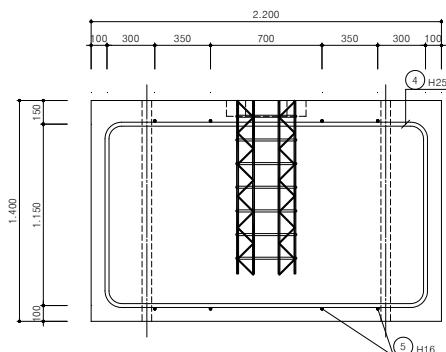
평면도

S=1:15



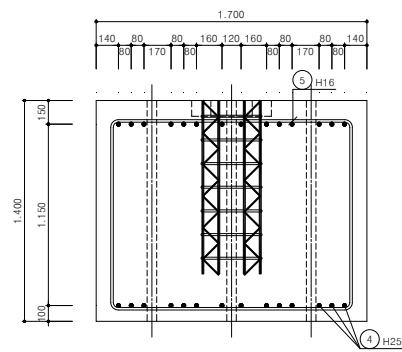
정 면 도

S=1:15

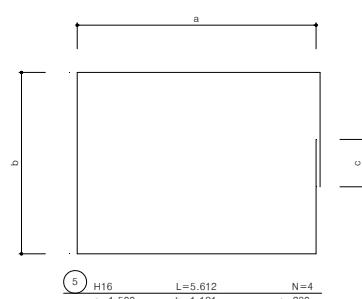
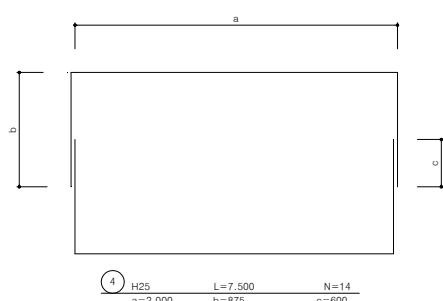


측면도

S=1:15



철근 삼세 두



철근재료표

(SD40)					(천세분)	
번호	직경	길이	수량	총길이	단위중량	총중량
4	H25	7,500	14	105,000	(kg/m)	
	소계			105,000		0,418
5	H16	5,612	4	22,448		
	소계			22,448		1,560
	총계					0,439



(주) 한 맥 기 술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

୧୮

10

도  
면

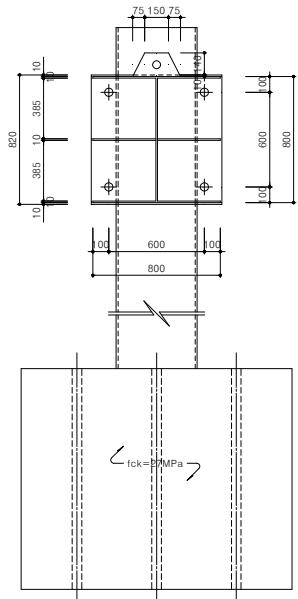
도면 BC BILD 신현체 기초 베크

014

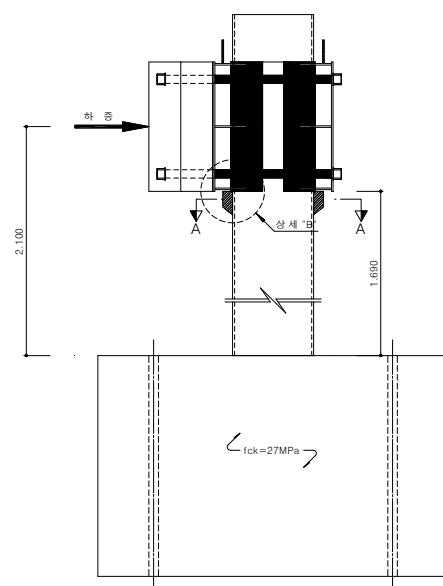
[그림 3.3.14] BC Pile 실험체 기초 배근도

## 가력부 Zig 개념도

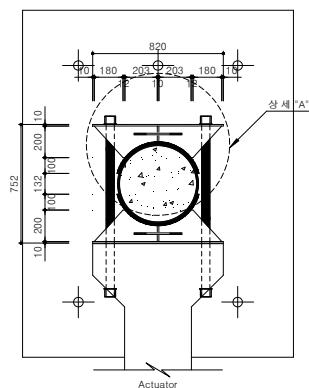
정면도  
S=1:15



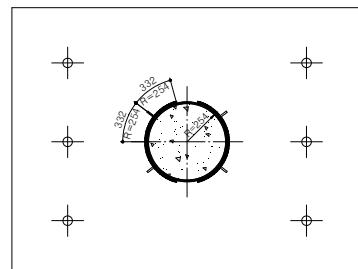
측면도  
S=1:15



정면도  
S=1:15



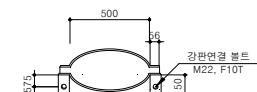
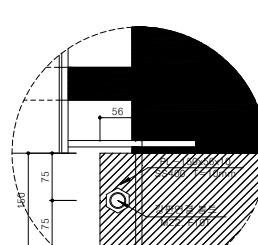
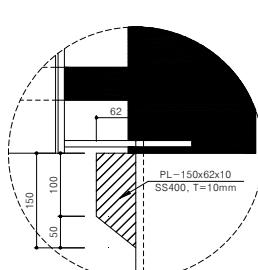
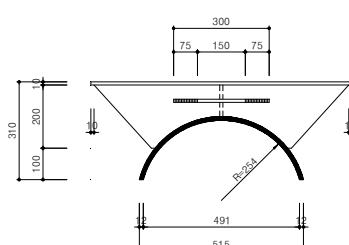
단면 A-A  
S=1:15



상세 "A"

- CFT, SC PILE 경우 -

- PHC, RC PILE 경우 -



(주) 한 맥 기 술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

연구책임자

설계자

도면

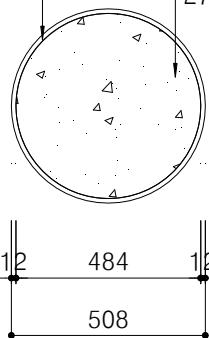
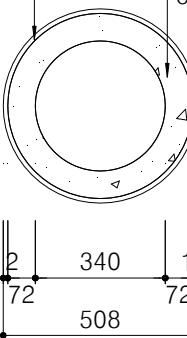
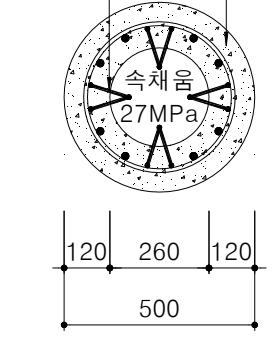
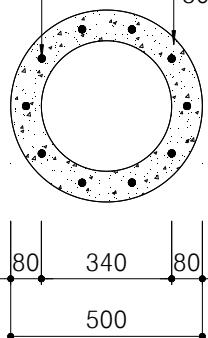
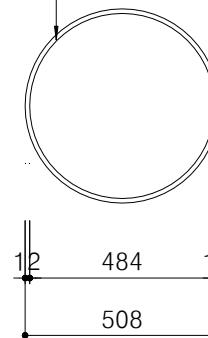
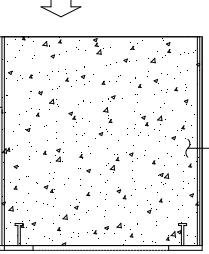
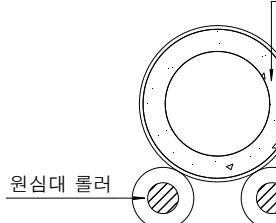
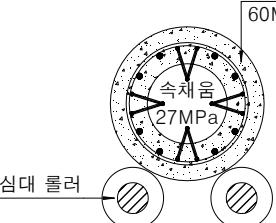
가력부 Zig 개념도

도면  
제작

015

[그림 3.3.15] 가력부 Zig 개념도

### 3. 단면 상세 및 제작 방법

구분	CFT말뚝	SC말뚝	RC말뚝	PHC말뚝	강관말뚝
단면	 <p>강관 D508,12T 콘크리트 27MPa 12 484 12 508</p>	 <p>강관 D508,12T 콘크리트 60MPa 12 340 12 72 508 72</p>	 <p>Lattice bar 콘크리트 60MPa 속채움 27MPa 120 260 120 500</p>	 <p>강봉 9.2mm 콘크리트 80MPa 80 340 80 500</p>	 <p>강관 D508,12T 12 484 12 508</p>
제작 방법	 <p>콘크리트 타설 강관 D508,12T 콘크리트 27MPa</p>	 <p>콘크리트 60MPa 원심대 롤러</p>	 <p>콘크리트 60MPa 속채움 27MPa 원심대 롤러</p>	-	-
검토 제원	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 강관           <ul style="list-style-type: none"> <li>- SKK400, <math>f_y=400\text{MPa}</math></li> </ul> </li> <li>● 콘크리트           <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>f_{ck}=27\text{MPa}</math></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 강관           <ul style="list-style-type: none"> <li>- SKK400, <math>f_y=400\text{MPa}</math></li> </ul> </li> <li>● 콘크리트           <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>f_{ck}=60\text{MPa}</math></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 철근           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미정</li> </ul> </li> <li>● 콘크리트           <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>f_{ck}=60\text{MPa}</math>(외부단면)</li> <li>- <math>f_{ck}=27\text{MPa}</math>(속채움)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 강봉           <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>d=9.2\text{mm}</math></li> <li>- <math>A_{bar}=64\text{mm}^2</math></li> <li>- <math>f_y=1,300\text{MPa}</math></li> <li>- <math>f_u=1,450\text{MPa}</math></li> <li>- <math>PS_{bar}=659.38\text{MPa}</math></li> </ul> </li> <li>● 콘크리트           <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>f_{ck}=80\text{MPa}</math></li> <li>- <math>A_c=105,500\text{mm}^2</math></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 강관           <ul style="list-style-type: none"> <li>- SKK400, <math>f_y=400\text{MPa}</math></li> </ul> </li> </ul>

CFT말뚝의 강관 삽입 공정은 기존 말뚝 시공과 동일한 방법으로 시공하고 내부 충전 콘크리트는 기초 타설과 동시에 이루어진다. 아래는 CFT말뚝의 시험 생산과 실험체 제작 전경이다.



(a) CFT말뚝 시험 제작



(b) 두부접합부 실험체 제작 전경

[그림 3.3.16] CFT말뚝의 시험 생산과 실험체 제작 전경

본 과제를 위하여 말뚝 생산 설비를 구축하였으며, 이를 통하여 SC말뚝과 RC말뚝을 시험 생산하였다.



(a) 말뚝 생산 설비 구축



(b) SC말뚝 시험 생산



(c) RC말뚝의 배근 모습



(d) RC말뚝의 시험 생산

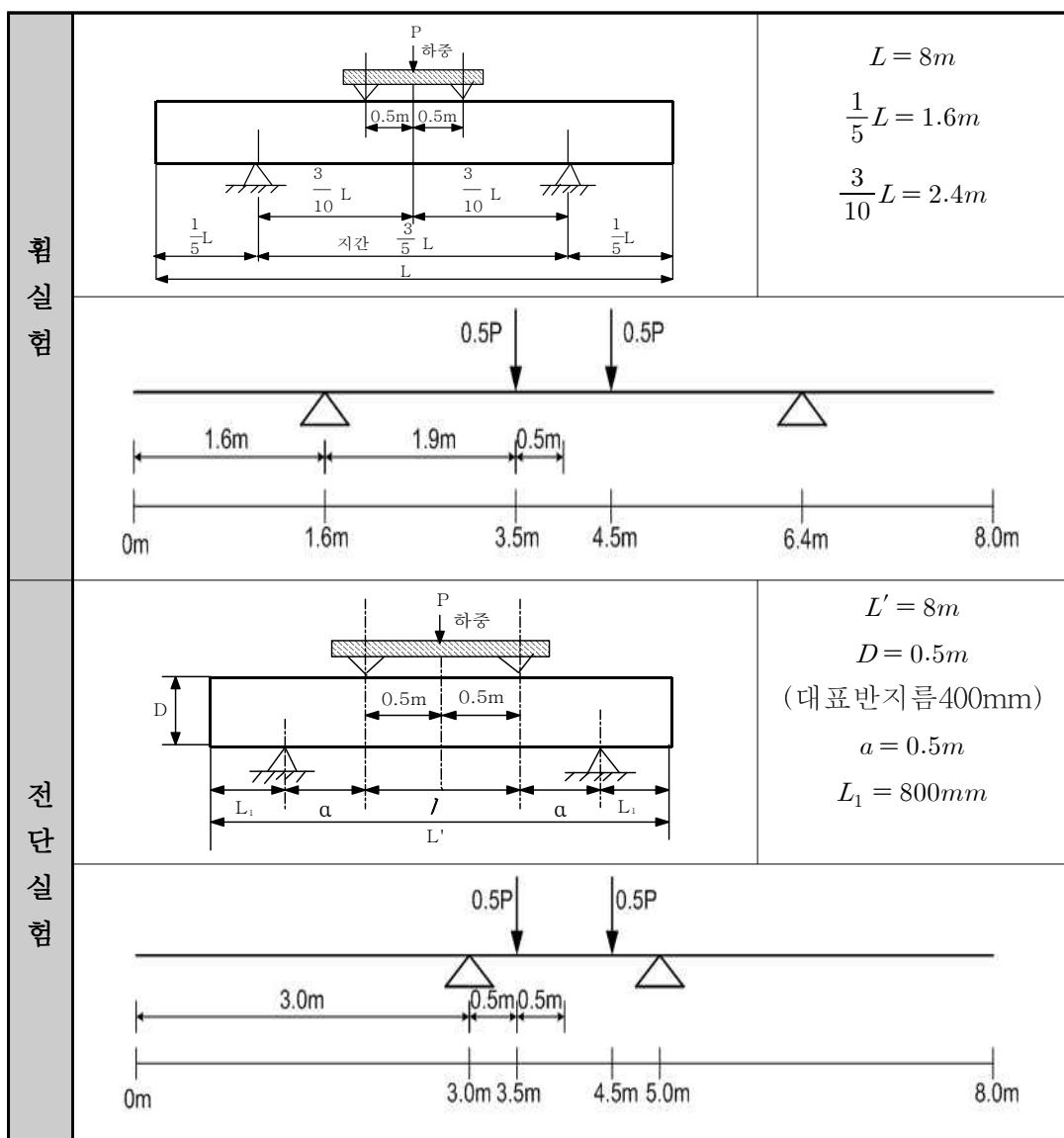
[그림 3.3.17] 말뚝 실험체 제작 과정

#### 4. 실험 수행 결과

### 가. 실험 수행 방안

실험은 용인 명지대 캠퍼스 내에 위치한 하이브리드 구조 실험센터에서 수행하였으며 실험체에 사용한 재료는 한국건설생활환경시험연구원과 한국화학융합시험연구원에 의뢰하여 재료 시험을 수행하였다.

휨 실험 및 전단 실험의 하중 재하 및 경계 지점은 한국산업규격 KS 4306 프리텐션 방식 원심력 고강도콘크리트 말뚝의 실험 방법을 참조하여 아래 표와 같이 설정하였다.

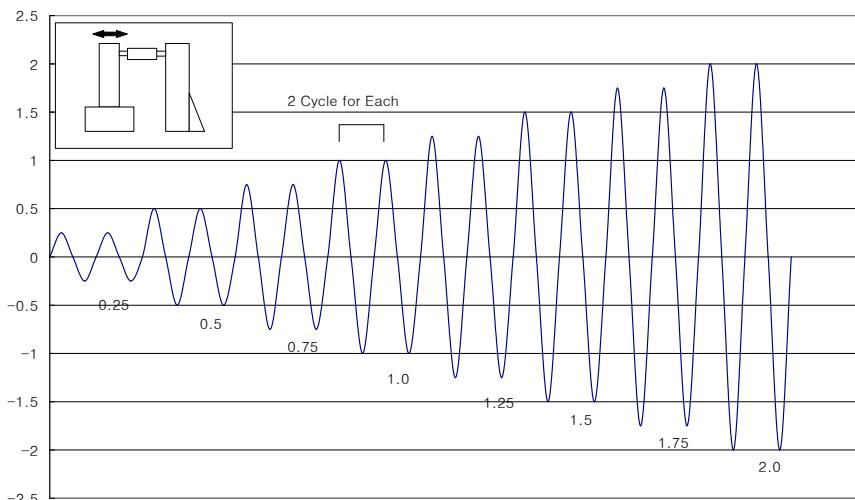


[그림 3.3.18] 실험 별 하중 재하 및 경계 지점

말뚝 두부보강 장치의 성능 평가를 위한 실험은 준정적 실험을 수행하였다. [그림 3.3.19]은 실험체 세팅 모습과 drift level을 이용한 가력하중 프로그램을 나타내고 있다.



(a) 두부보강 실험체



(b) Drift level을 이용한 가력 하중 프로그램

[그림 3.3.19] 가력 하중 프로그램

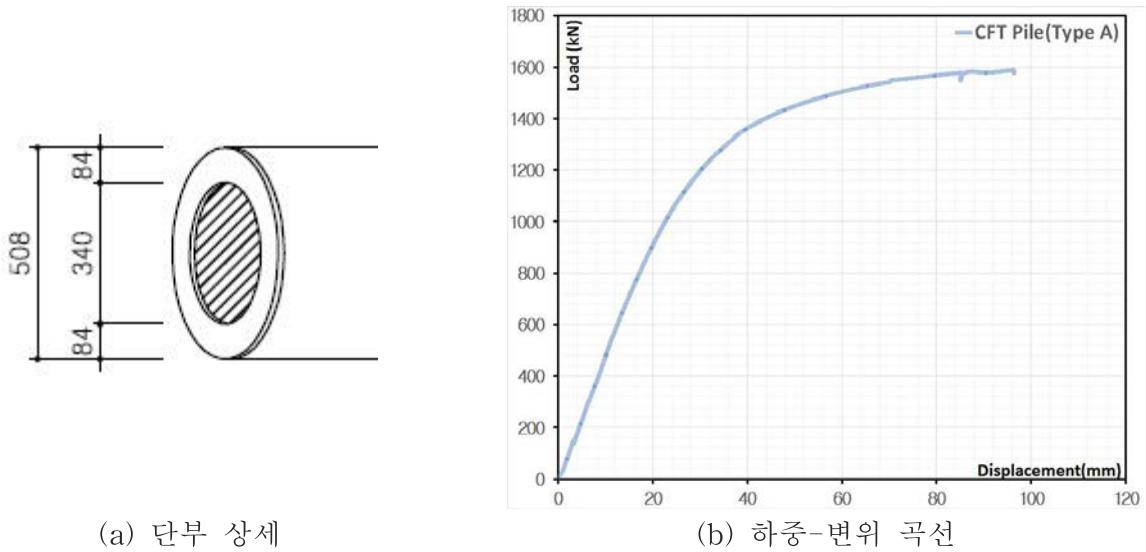
말뚝 두부보강 장치의 성능 평가를 위한 실험체에서 각 실험체당 재하 축하중의 크기는 다음과 같다.

[표 3.3.2] 실험체당 재하 축하중

실험체	말뚝 단면 압축강도(kN)	단면 축 강도 비율(%)	축하중(kN)
CFT 말뚝(6EA)	8,616kN	0%	0 kN
		5%	430kN
		10%	861kN
RC 말뚝(3EA)	8,524kN	0%	0kN
		5%	426kN
		10%	852kN
PHC 말뚝(2EA)	7,177kN	10%	717kN
SC 말뚝(1EA)	6,530kN	10%	653kN

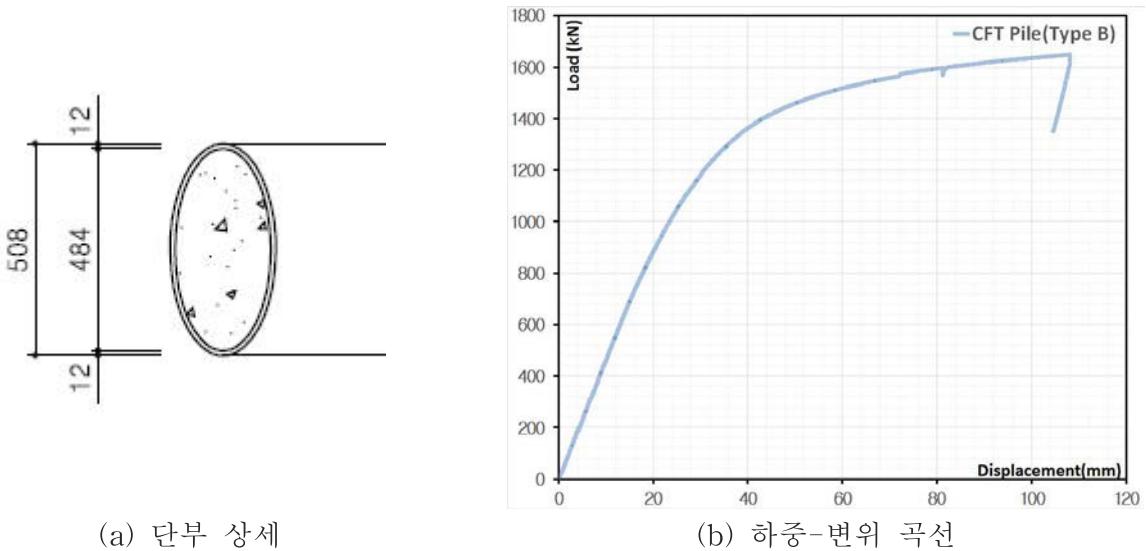
## 나. 수행 결과

CFT말뚝 Type A의 흡성능 평가 실험에서 파괴 하중은 1,588kN이며, 실험체 단부에서 콘크리트와 강관의 상대변위는 최대 0.004mm로서 거의 발생하지 않았다.



[그림 3.3.20] CFT말뚝 (Type A - 양단 강판 밀폐형)

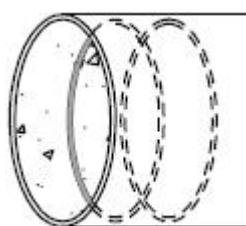
CFT말뚝 Type B의 흡 파괴 하중은 1,648kN이며, 실험체 단부에서 콘크리트와 강관의 상대변위는 최대 0.01mm로서, 양단 밀폐형 보다는 크지만 실용상 의미가 없는 값으로 판단된다.



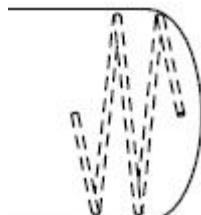
[그림 3.3.21] CFT말뚝 (Type B - 양단 개방형)

CFT말뚝 Type C의 흡 파괴 하중은 1,648kN이며, 실험체 단부에서 콘크리트와 강관의 상대변위는 최대 10mm로 CFT말뚝 중 최댓값이지만 이는 내부 콘크리트의 균열 발생 이후

부재 단부에서 국부적으로 발생한 균열이며 부재 전반에 걸친 이종 재료간의 상대변위가 발생한 것은 아닌 것으로 관찰된다.

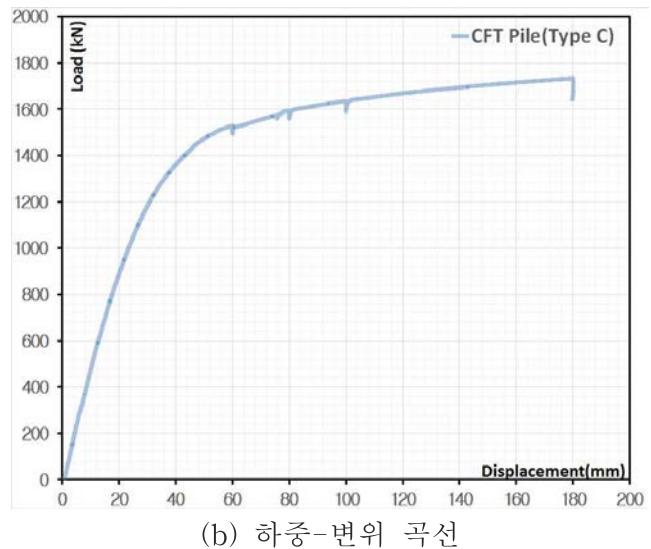


(좌측단 상세)



(우측단 상세)

(a) 단부 상세



(b) 하중-변위 곡선



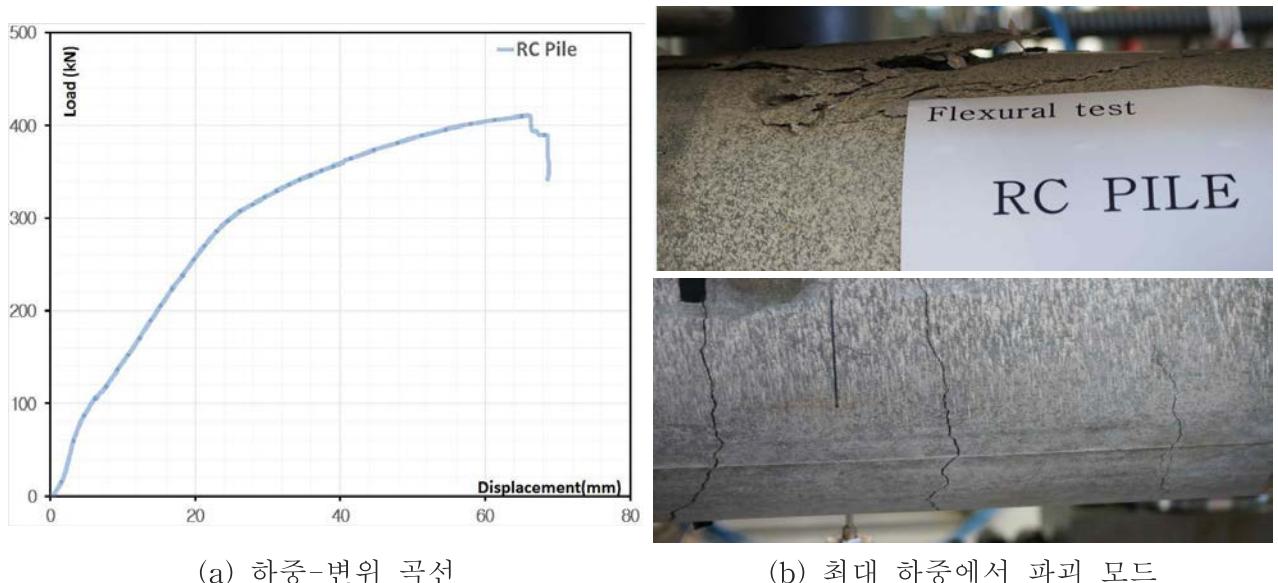
(c) 좌측 단부(상대슬립 관찰)



(d) 우측단부(상대슬립 없음)

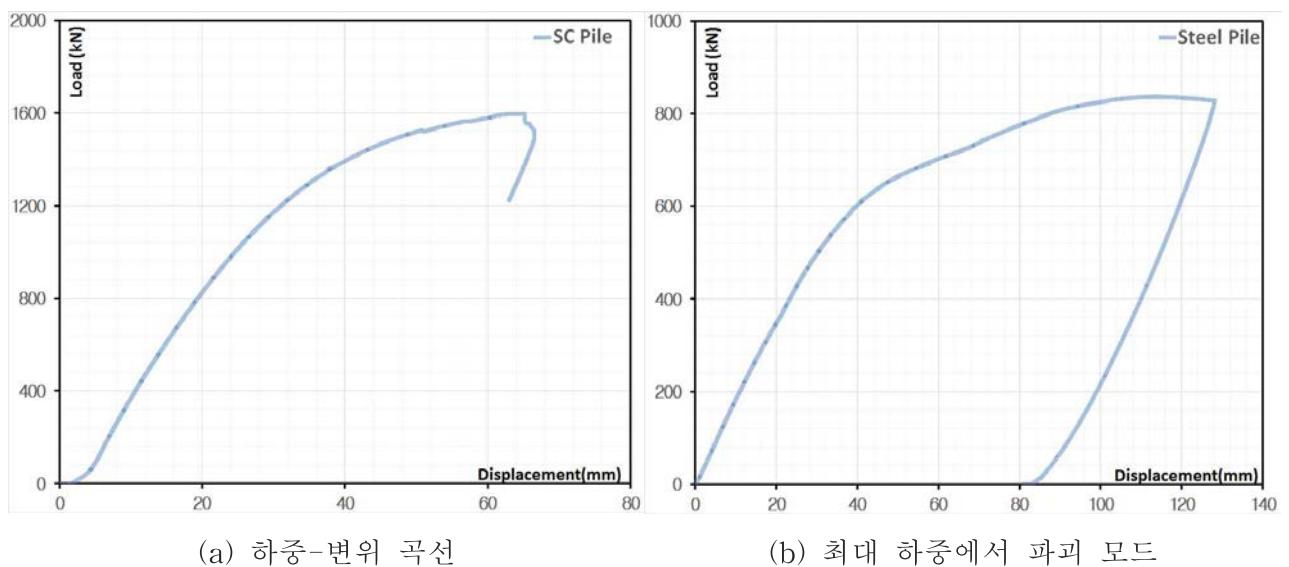
[그림 3.3.22] CFT말뚝 (Type C - 양단 철근 보강형)

RC 말뚝의 흔 파괴 하중은 410kN이다. 100kN에서 중앙 단면 하단부에 흔 인장균열이 발생하였으며 최대하중에서 콘크리트 압축부가 파쇄 되면서 파괴에 도달하였다.



[그림 3.3.23] RC말뚝

SC 말뚝의 흔 파괴 하중은 1,597kN으로, CFT말뚝의 파괴 하중과 비슷하지만 하중-변위 곡선에서 보듯이 연성이 현저하게 떨어진다. 이는 SC말뚝 내부의 중공 콘크리트가 3축 압축상태가 아니므로 콘크리트가 내부로 취성파괴를 일으키면서 급작스런 파괴에 도달하였다기 때문인 것으로 판단된다.

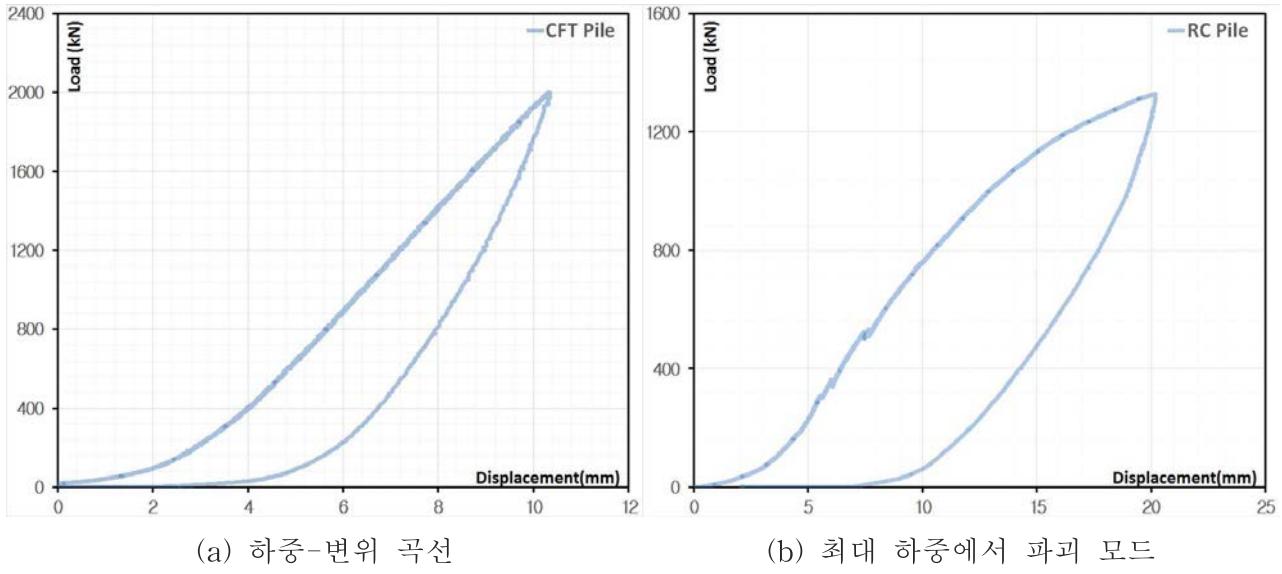


[그림 3.3.24] SC말뚝

내부가 비어있는 강관 말뚝의 경우 파괴 하중은 840kN이며 하중이 600kN에서부터 하중 재하 부위의 관 내면으로 국부좌굴이 발생하면서 파괴되었다. 이로서 콘크리트 충진 효과에 의하여 강관의 국부좌굴이 방지됨으로 인한 강도 증진의 비율이 약 2배 정도임을 가늠 할 수 있게 되었다.



CFT 말뚝의 전단 실험에서는 안전을 고려한 가력장치의 최대용량인 2,000kN까지 재하 하였으나 가력범위 내에서 부재는 탄성거동을 보였으며, 파괴에 이르지는 못하였다.



[그림 3.3.26] CFT 말뚝 (Type-A)

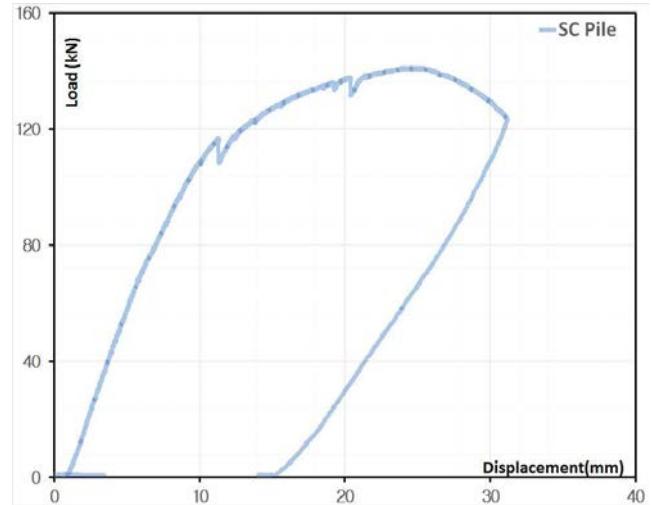
RC 말뚝의 전단 실험에서는 재하하중이 1,000kN이 되었을 때, 전단 지간부(하중 재하부와 경계 지점부 사이)에서 전단 균열이 발생되었으며, 최대 하중은 약 1,350kN까지 지지하였다.



[그림 3.3.27] RC말뚝의 전단균열 형태

말뚝 간 연결부 휨 실험에서는 약에서 균열이 발생하였으나 최종 파괴는 연결부의 용접부가 파손되면서 도달하였다.

연결부의 경우 양 단의 부재강도 이상의 강도를 보여야겠으나 말뚝 단부 마감판의 태그 용접만으로는 부재강도에 달하는 하중을 전달하기에 무리가 있는 것으로 판단된다. 그러므로 태그 용접을 이용한 연결은 주로 축하중을 전달하는데 만 활용하고 휨의 전달이 중요한 경우라면 향후 말뚝 간 접합 장치도 개량이 필요할 것으로 판단된다.



[그림 3.3.28] 말뚝 간 연결부 (CFT-PHC 접합부)



(a) PHC말뚝 하면 인장 균열

(b) CFT-PHC 연결부 파괴

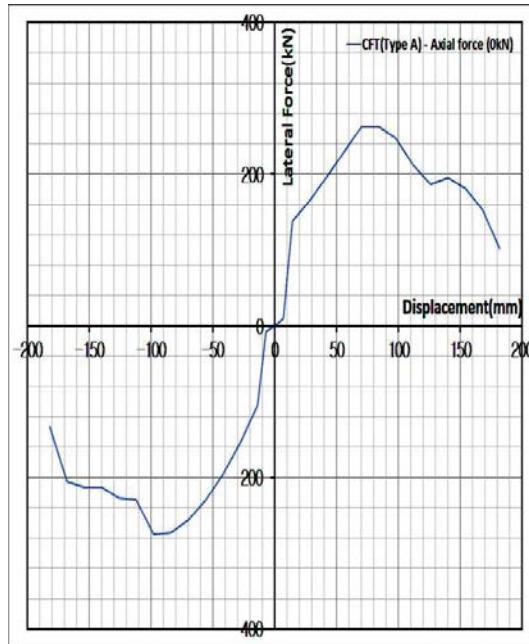
[그림 3.3.29] 각 말뚝별 연결부 균열 및 파괴 형태

볼트 이음식(Type A) 두부보강을 실시한 CFT말뚝 실험체의 파괴는 두부 접합부의 볼트 이음부 슬립으로 인한 것으로 판단된다. 이후의 비선형 구간과 파괴 이후의 거동은 두부보강 철근의 변형률과 움직임이 유사함을 알 수 있다.

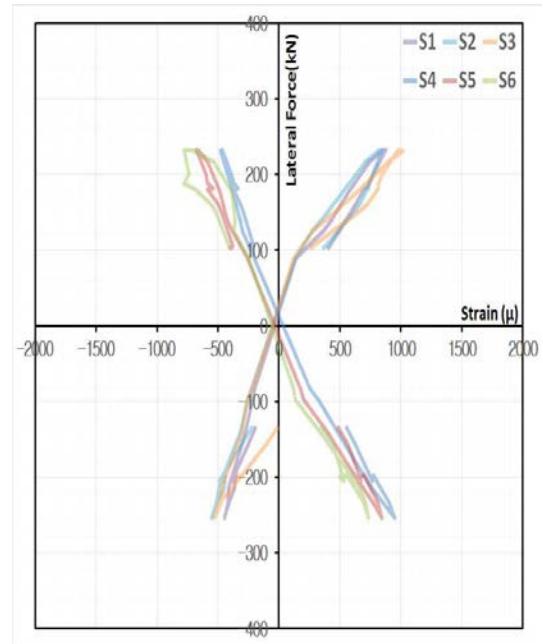
CFT말뚝 본체 강관의 변형률은 실험체 파괴 시까지 선형을 유지하고 있으므로, CFT

말뚝이 교대부에서 뾰하면서, 교대와 말뚝의 연결부가 제 기능을 하지 못한 것으로 판단된다. 그러므로 본 실험체는 볼트 이음부의 파단으로 파괴되었다고 판단된다.

본 실험체의 경우 횡 변위가 98mm 일 때, 최대 횡 하중은 275kN로 나타났다.



(a) 하중-변위 곡선



(b) 두부보강 철근의 변형률

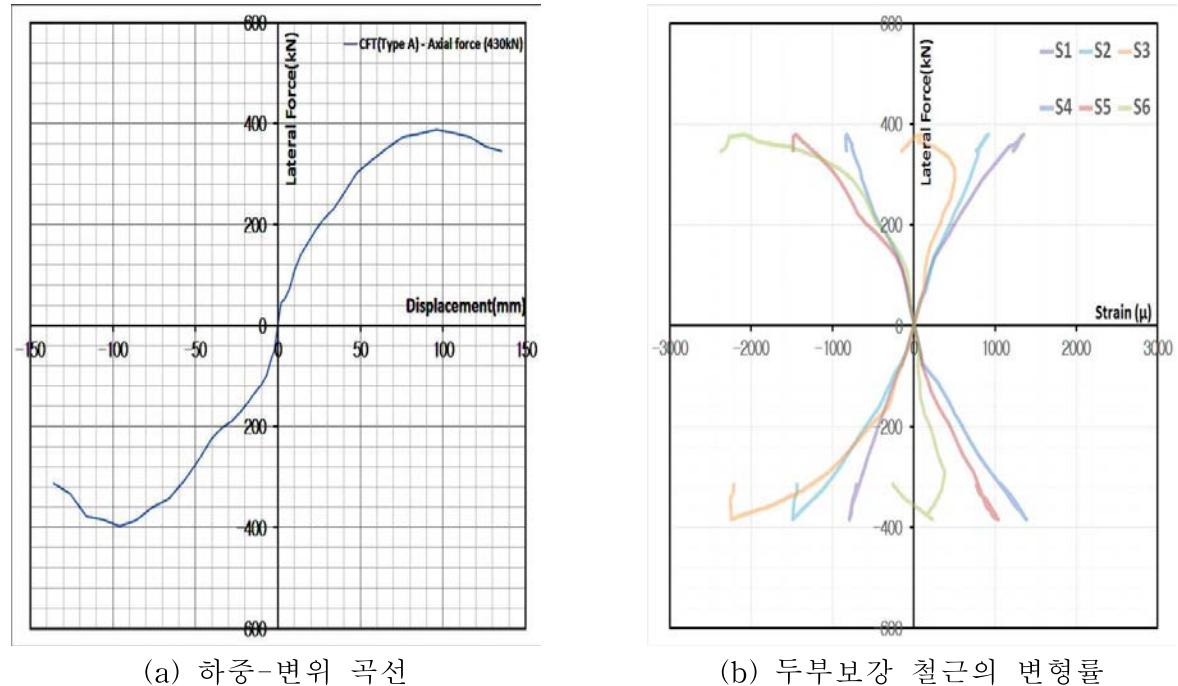
[그림 3.3.30] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 0kN)



[그림 3.3.31] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 0kN)의 파괴 양상

볼트 이음(type A)을 사용한 CFT말뚝 실험체에 축하중이 430kN 재하 된 경우는 횡 변위 96mm 일 때, 최대 횡 하중 397.4kN을 지지하였다.

앞서 축력이 0kN 이고 최대 횡 하중이 275kN 인 경우보다 파괴하중이 약 40% 증가되었는데, CFT말뚝에 가해진 압축력이 휨 거동으로 인하여 발생하는 연결부 철근의 인장력을 상쇄시킨 것으로 판단된다.



[그림 3.3.32] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식,  $P = 430\text{kN}$ )

본 실험체는 축력이 없는 경우의 실험체보다 더 큰 하중을 지지하였으나 역시 연결부 과다 슬립으로 파괴된 것으로 판단되며 CFT말뚝 본체 강관의 변형률은 선형을 유지함을 알 수 있다.

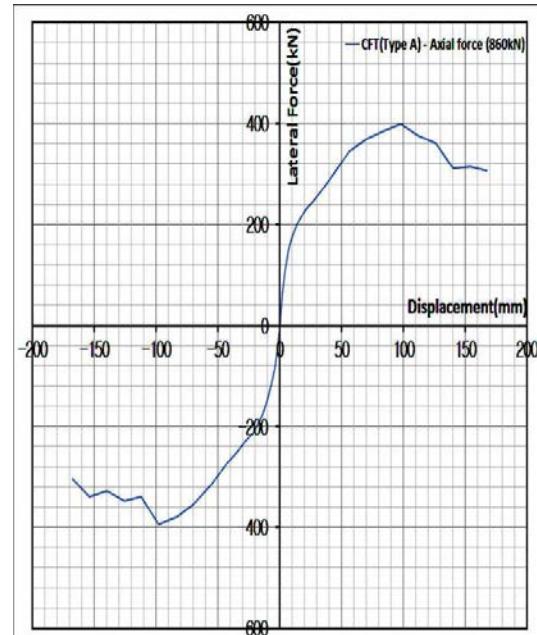


[그림 3.3.33] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식,  $P = 430\text{kN}$ )의 파괴 양상

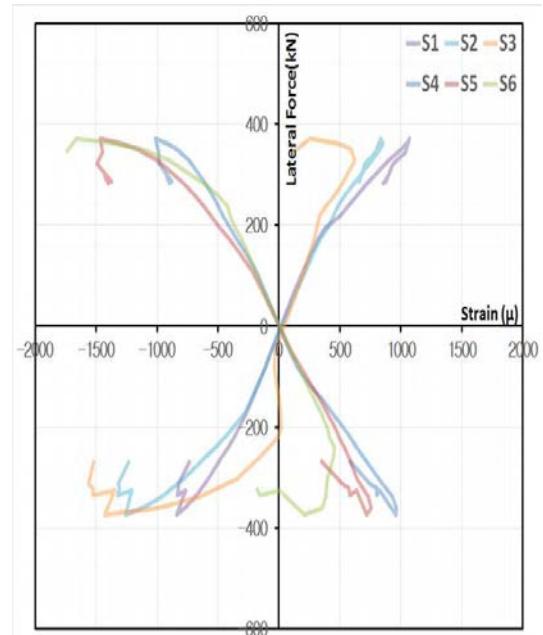
860kN의 축력을 가한 CFT실험체의 경우 횡 변위가 98mm 일 때, 최대 횡 하중은 399kN으로 나타났다.

430kN의 축력을 가한 실험체보다 축력이 두 배 더 큼에도 불구하고 최대 횡 하중은 비슷하게 나타났다. 이음부의 철근이 항복하기 전까지는 같은 변위를 발생시키는데 더 큰 하중이 필요함을 알 수 있고, 실험체 초기 강성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

파괴모드에서 알 수 있듯이 연결부의 과다 슬립으로 부재가 파괴 된 것으로 판단되며, 장관의 변형률은 선형을 유지함을 알 수 있다.



(a) 하중-변위 곡선



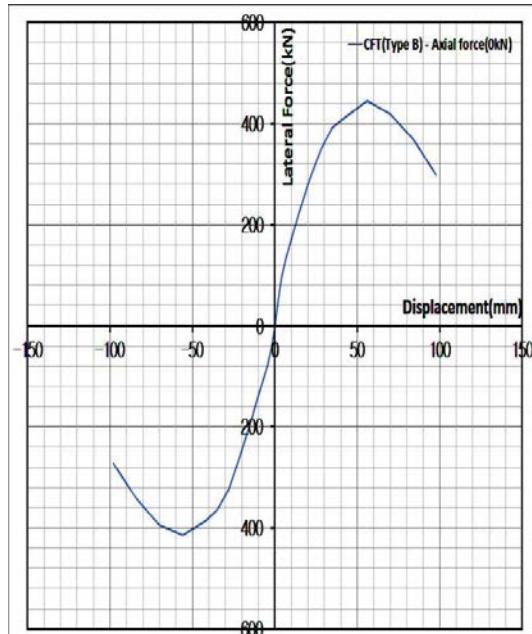
(b) 두부보강 철근의 변형률

[그림 3.3.34] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 860kN)

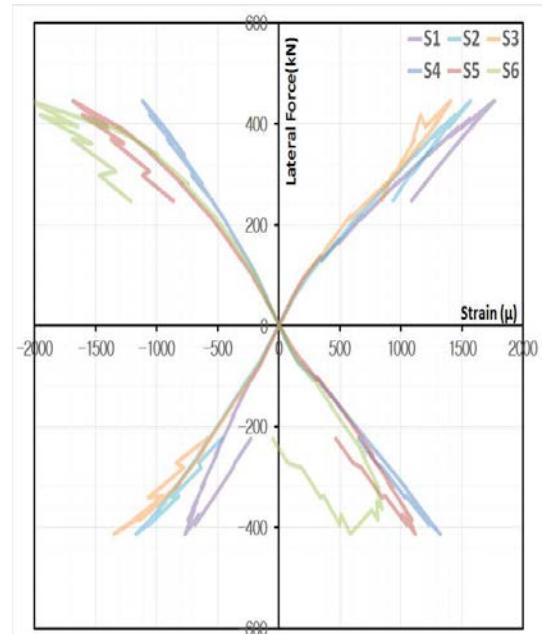


[그림 3.3.35] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type A - 볼트 이음식, P = 860kN)의 파괴 양상

J형 철근 이음식(Type B) 두부보강을 실시한 CFT말뚝의 경우 횡 변위 56mm 일 때, 최대 횡 하중은 445kN으로, 연결 방식만 다른 CFT(Type A)의 최대 횡 하중 275kN 보다 약 60% 증가된 최대 횡 하중 값을 보였다. 그러나 파괴양상은 CFT(Type A)와 같이 CFT말뚝의 강관 좌굴이나 항복에 의한 파괴가 아닌 교대와 CFT말뚝연결부 철근의 항복에 의한 파괴로 판단된다.

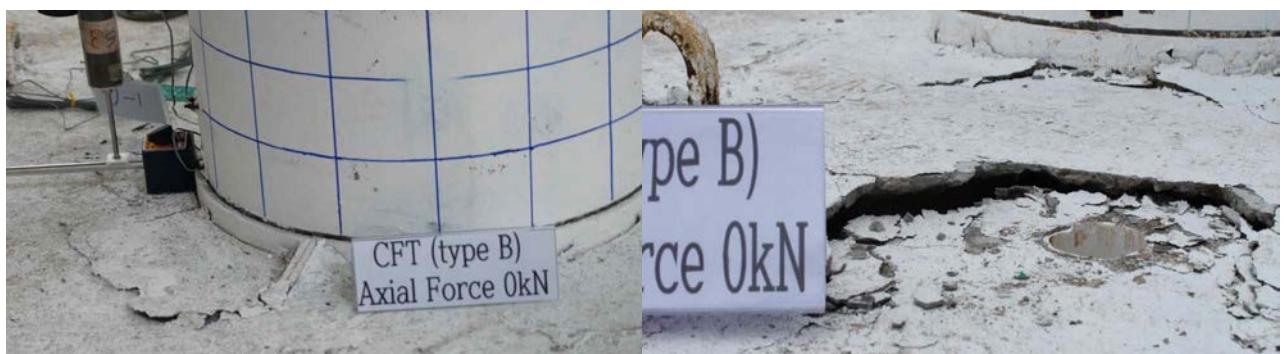


(a) 하중-변위 곡선



(b) 두부보강 철근의 변형률

[그림 3.3.36] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 0kN)

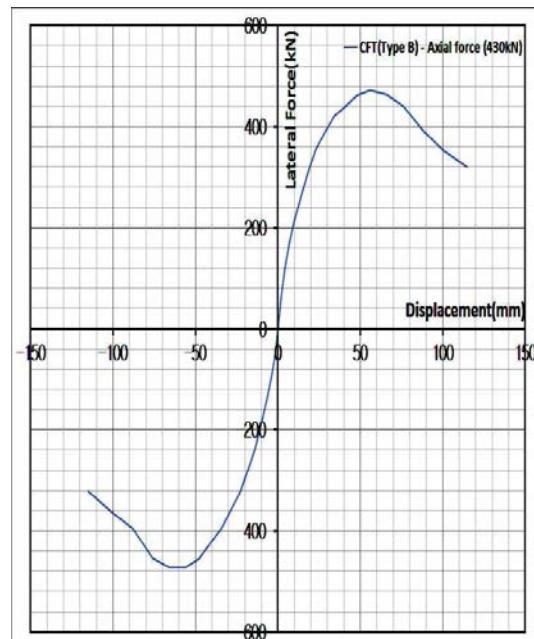


[그림 3.3.37] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 0kN)의 파괴 양상

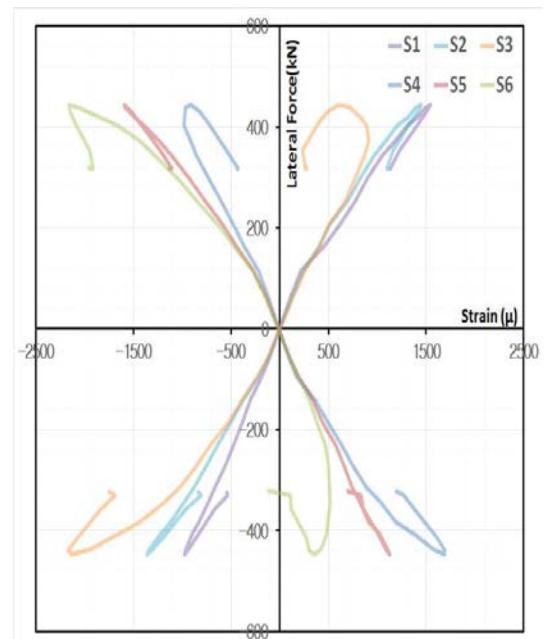
J형 철근 이음을 가지고 축하중을 430kN을 재하 한 경우는 횡변위 56mm 일 때, 최대 횡하중이 445kN으로서, 연결 방식만 다른 CFT(Type A)의 최대 횡하중 275kN 보다 약 60% 증가된 최대 횡하중 값을 보였다.

그러나 파괴양상은 CFT(Type A)와 같이 CFT말뚝의 강관 좌굴이나 항복에 의한 파괴가 아닌 교대와 CFT말뚝 연결부 철근의 항복에 의한 파괴로 판단된다.

축력이 없는 실험체와 비교하면 구조물의 초기강성이 증가함을 알 수 있다.



(a) 하중-변위 곡선



(b) 두부보강 철근의 변형률

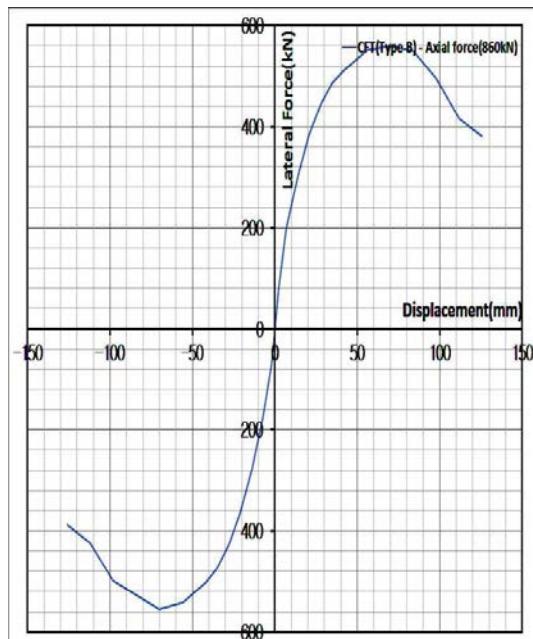
[그림 3.3.38] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 430kN)



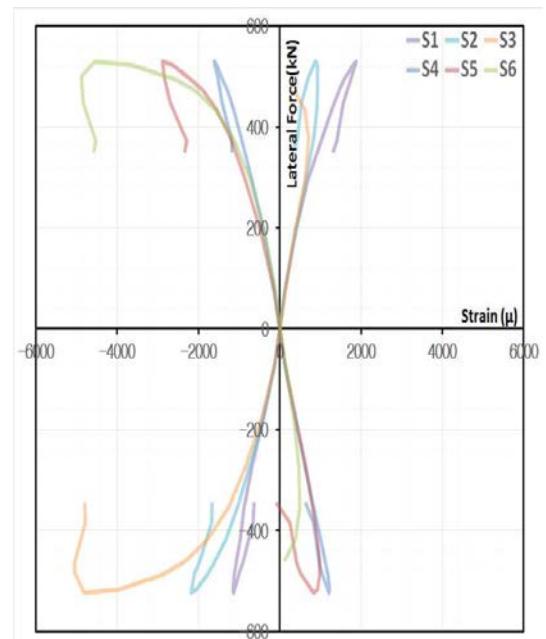
[그림 3.3.39] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 430kN)의 파괴 양상

J형 철근 이음을 가지는 CFT실험체 중 축력이 860kN인 경우는 횡 변위 70mm 일 때, 최대 횡 하중은 560kN으로, 볼트 이음 방식의 축력이 860kN인 경우와 비교하면 최대 횡 하중이 약 40% 증가한 값을 보였으며, 총 6개의 CFT말뚝 머리 보강 실험체 중에서 가장 큰 최대하중을 보여주었다.

그러나 파괴양상은 Type A 이음과 같이 말뚝의 강관 좌굴이나 항복에 의한 파괴가 아니라 연결부 철근의 항복에 의한 것으로 판단된다.



(a) 하중-변위 곡선



(b) 두부보강 철근의 변형률

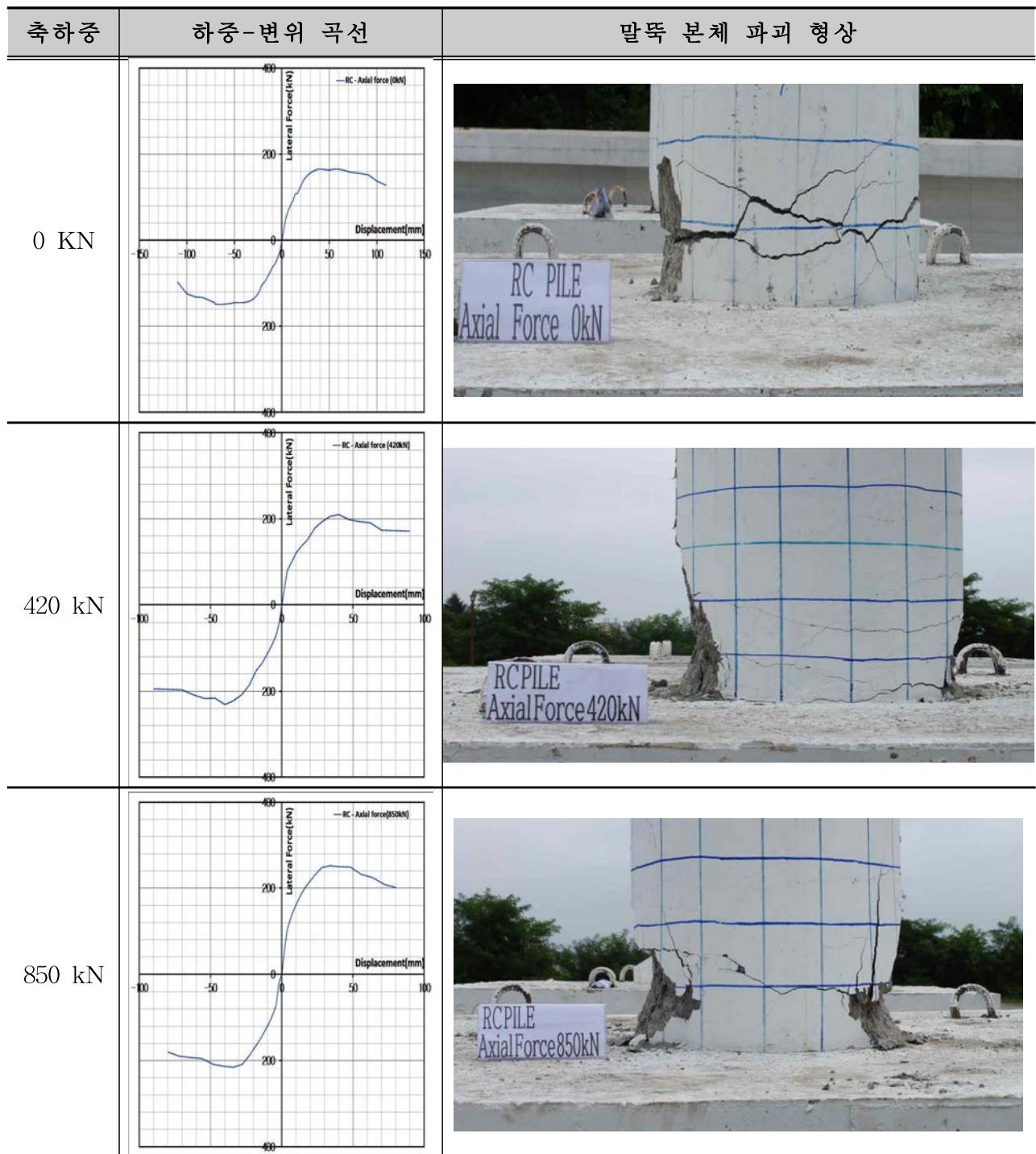
[그림 3.3.40] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 860kN)



[그림 3.3.41] CFT말뚝의 두부보강장치 (Type B - J형 철근 이음식, P = 860kN)의 파괴 양상

RC 말뚝 두부보강 실험체의 경우 재하 되는 축 하중이 증가함에 따라서 최대 횡 하중이 각각 165kN(단면 강도의 0%), 231kN(단면 강도의 5%), 252.6kN(단면 강도의 10%)로 점점 증가하는 것으로 나타났다.

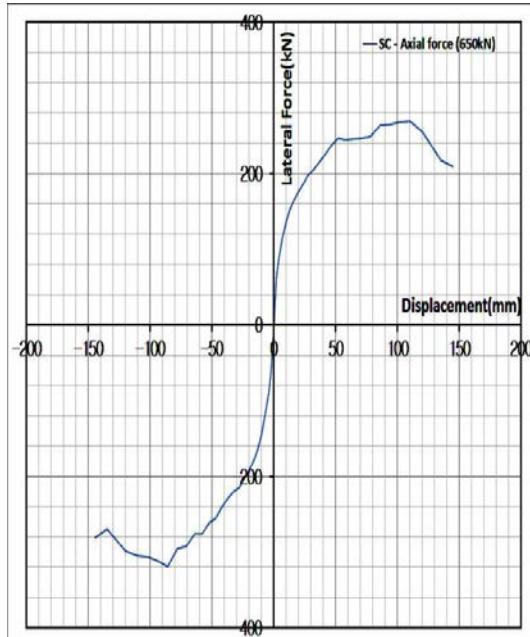
하중-변위 그래프를 살펴보면 철근이 항복하는 시점에서 부재가 비선형 거동을 보이기 시작했으며, 최종 파괴는 세 실험체 모두 말뚝 본체의 압축 축 콘크리트의 파쇄에 의하여 덮개가 탈락되면서 더 이상 하중을 받지 못하는 것으로 나타났다.



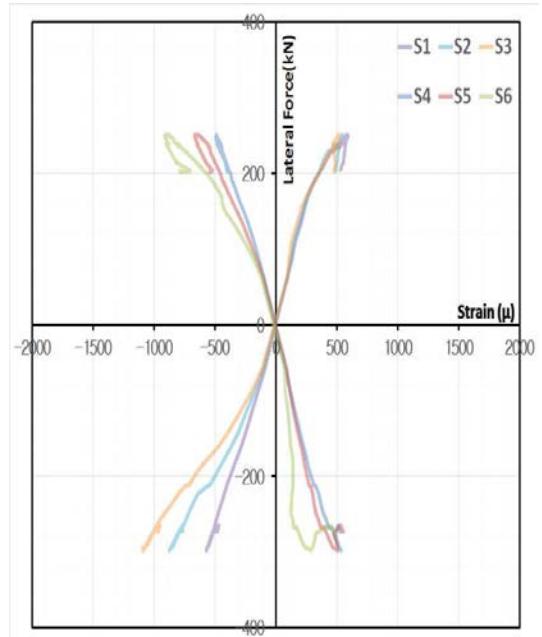
[그림 3.3.42] 하중에 따른 RC말뚝의 두부보강장치 실험 결과

SC 말뚝은 파괴 시까지 말뚝 강판에 부착된 변형률 값은 선형거동을 보여주고 있으며, 교대부의 매립 철근 또한 거의 대부분 항복에 이르지 않는 것을 알 수 있다.

SC 말뚝 두부보강 실험체 역시 CFT말뚝에서의 경우와 같이 파괴거동은 연결부에서의 슬립으로 인한 것으로 판단된다.



(a) 하중-변위 곡선



(b) 두부보강 철근의 변형률

[그림 3.3.43] SC 말뚝의 두부보강장치 - 축하중(650kN)

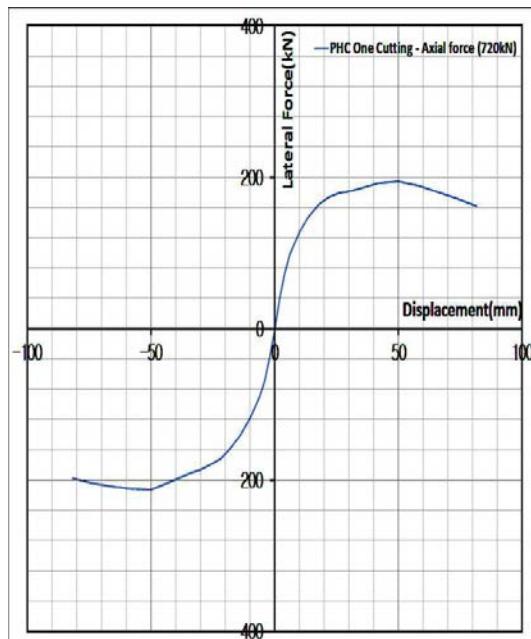


[그림 3.3.44] SC 말뚝의 두부보강장치 - 축하중(650kN)의 파괴  
양상

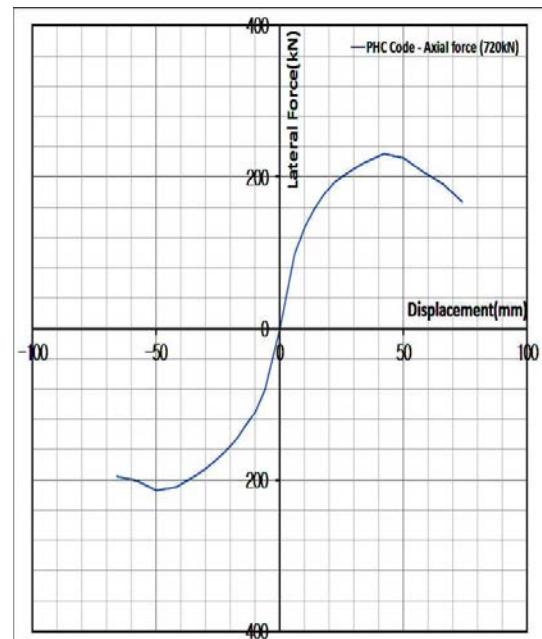
PHC 말뚝 두부보강 실험체의 거동은 RC 말뚝 실험체와 비슷하며, 파괴 또한 콘크리트 압축 파쇄로 인한 것으로 판단된다.

원컷팅 방식의 실험체는 횡 변위 50mm 일 때 최대 횡 하중이 212.4kN이었으며, 도로교 설계기준 방식에 의한 실험체는 횡 변위 42mm 일 때, 최대 횡 하중이 231kN이었다.

파괴 시 원컷팅 방식은 교대와 연결부에서 강선이 끊어졌으며, 이로 인하여 최대 횡 하중이 작게 나타난 것으로 판단된다.



(a) 하중-변위 곡선 - 원컷팅방식



(b) 하중-변위 곡선 - 도로교설계기준방식

[그림 3.3.45] PHC 말뚝의 두부보강 - 축하중(720kN)



(a) 원컷팅방식

(b) 도로교설계기준방식

[그림 3.3.46] PHC 말뚝의 두부보강 - 축하중(720kN)의 파괴 양상

## 5. 결과 분석

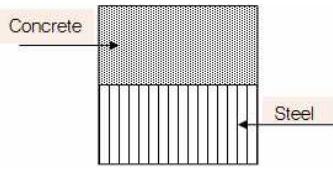
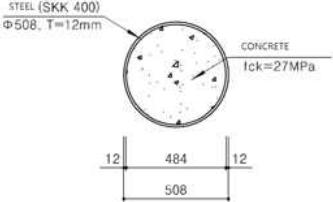
### 가. 원형 CFT 말뚝의 합성 거동 평가

합성구조물은 서로 다른 재료의 장점을 조합하여 최대한의 성능을 발휘 할 수 있는 합리적인 구조형식으로, 단일재료로 구성된 구조물에 비해 설계와 시공에서 많은 장점을 가진다. 특히, 강관 내부를 콘크리트로 충전한 콘크리트 충전 강관은(Concrete Filled Steel Tube, CFT)은 외부 강관의 구속효과에 의해 충전 콘크리트의 내력 상승과 충전 콘크리트에 의한 강관의 국부좌굴 보강 효과에 의해 부재내력이 상승하므로 단면의 크기를 감소시켜줄 뿐만 아니라 구조물의 변형성능 및 내화성능에서도 우수한 부재이다.

본 연구에서 개발한 CFT 말뚝은 이종 재료간의 계면에 전단 연결재 없이 양단을 폐합 또는 개방하거나, 양단을 철근으로 보강하여 CFT 말뚝의 합성 거동을 평가하였다. 본 절에서는 동일한 맥락에서 수치해석을 통하여 CFT 말뚝의 합성 거동 평가를 분석하려고 한다.

수치해석에 사용된 범용 프로그램은 Abaqus 6.13을 사용하여 정적해석을 수행하였다. 수치해석에 적용된 해석 단면은 아래 표와 같다. 일반적인 합성 구조물의 경우는 단면의 형태에 의해 이종재료 간 합성 정도에 따라 중립축이 달라지는 경우이고, 원형 CFT단면은 이종재료 간 합성 정도에 관계없이 항상 동일한 중립축을 가지는 경우로 분류하여 수치 해석을 하였다.

[표 3.3.3] 이종 재료 간 합성거동 수치해석 단면 제원

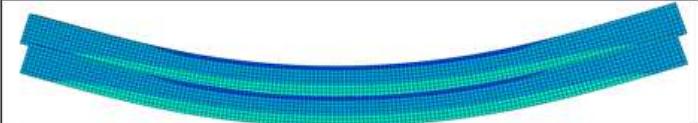
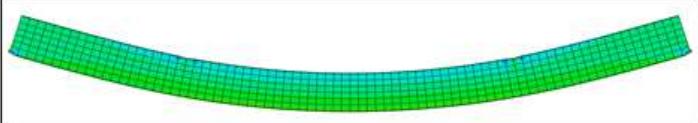
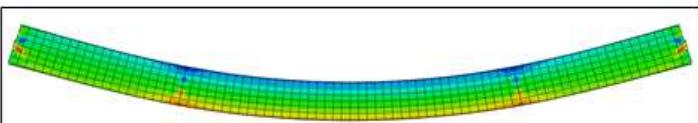
구조물	단면 그림	단면제원
일반적인 합성 구조물		Concrete - 폭 500mm 높이 250mm인 직사각형 Steel - 폭 500mm 높이 250mm인 직사각형
원형 CFT		Concrete - 반지름 242mm인 원 Steel - 외경 반지름 54mm, 폭 두께 12mm인 원형띠

이종 재료 간 합성 정도 즉, 계면 특성은 합성(Full Composite)과 비 합성(Non Composite)으로 총 2가지 Case를 고려하였다.

부재의 길이는 8m로 모델링하였으며, Concrete 및 Steel 부재 모두 8절점 3자유도 Solid 요소를 적용하였으며, 경계조건 및 하중재하 위치는 4점 재하가 되도록 하였다.

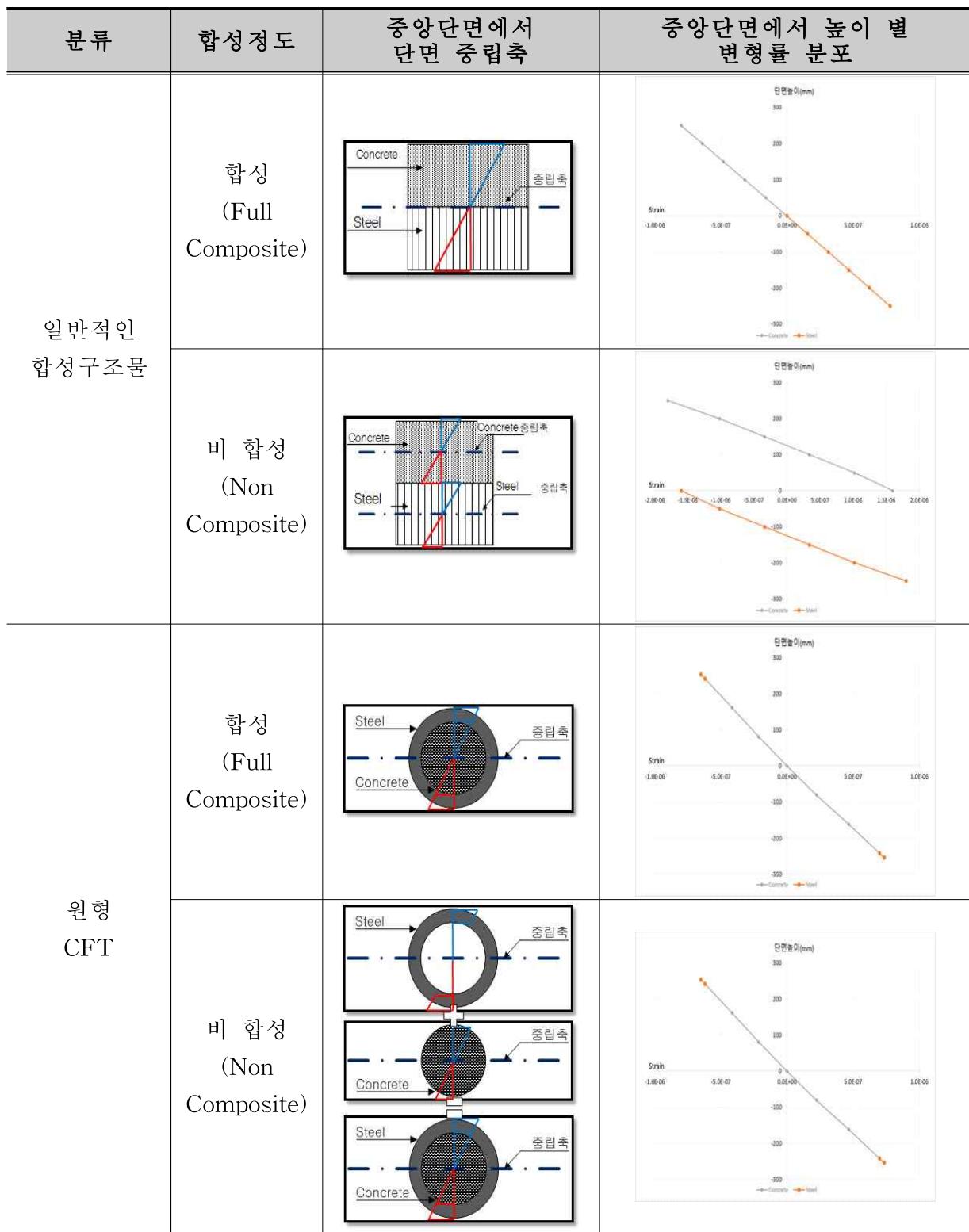
아래 표에서 정적해석의 결과 중 변형 형상을 정리하였다.

일반적인 합성 구조물은 합성일 경우, 이종 재료간의 슬립이 발생되지 않았으며, 이종재료 계면 사이에서 응력의 변화가 없었다. 하지만 비 합성일 경우, 이종 재료 간 슬립이 발생되며, 이종재료 계면사이에서 응력의 변화가 있었다. 그러나 원형 CFT는 합성 또는 비 합성에 관계없이 슬립 및 이종재료 계면사이에서 응력의 변화가 없었다.

분류	합성 정도	변형 형상
일반적인 합성구조물	합성 (Full Composite)	
	비 합성 (Non Composite)	
원형 CFT	합성 (Full Composite)	
	비 합성 (Non Composite)	

[그림 3.3.47] 합성구조물 비선형 해석 결과 - 변형 형상

이에 정확한 현상 분석을 수행하기 위하여 다음 장의 표와 같이 중앙 단면에서 단면 중립축 및 높이 별 변형률 그래프를 나타내었다.



[그림 3.3.48] 합성구조물 비선형 해석 결과 - 변형률 분포

위 표에서 일반적인 합성 구조물 중 이종 재료 간 합성일 경우, 이종 재료는 하나의 구조물처럼 이종 재료 모두 하나의 중립축을 가지게 되므로, 중앙 단면에서 단면 높이별 변형률은 단면 높이에 따라 비례적으로 분포하였다. 그렇지만 일반적인 합성 구조물 중 이종 재료 간 비 합성일 경우, 이종 재료는 각각 독립된 중립축을 가지므로, 중앙 단면에서 단면 높이별 변형률은 단면 높이에 따라 비례적으로 분포하지 않았다.

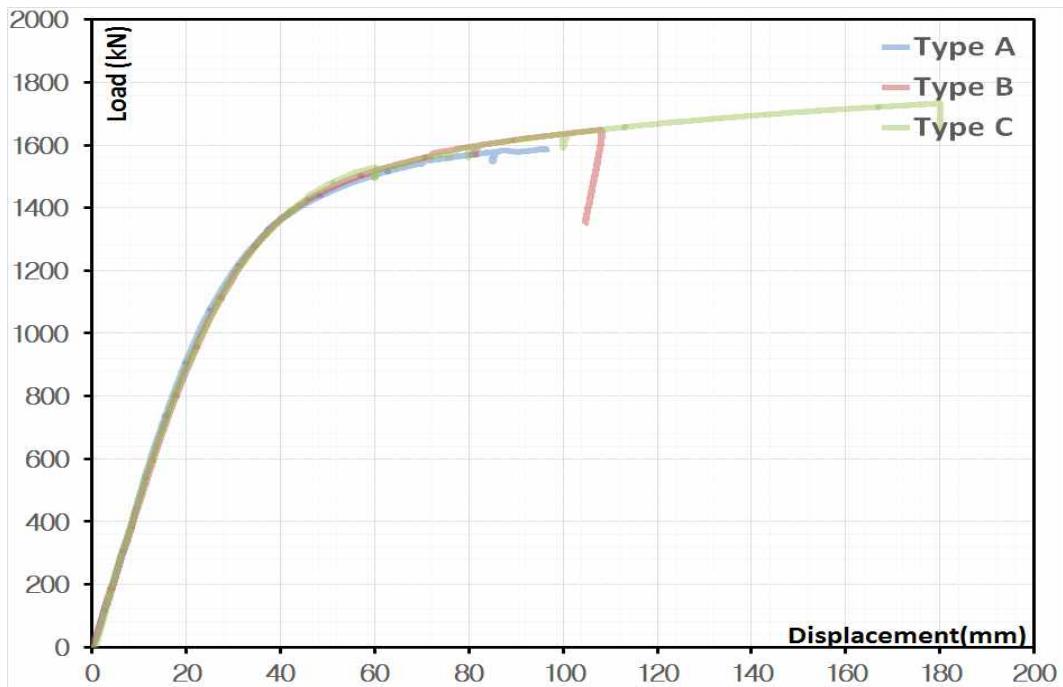
그러나 원형 CFT의 경우, 합성 정도에 관계없이 부재 모두 동일한 중립축을 가지게 되므로, 합성 정도에 관계없이 하나의 부재처럼 거동함을 알 수 있었다.

본 절에서는, 합성 구조물 중 원형 CFT와 같이 이종 재료의 합성 정도에 관계없이 동일한 중립축을 가지는 경우의 합성거동을 정체 수치해석을 통하여 검토하였으며, 원형 CFT 단면과 같이 단일 중립축을 가지는 단면은 합성 정도에 관계없이 이종재료가 동일하게 거동하였다.

#### 나. 신형식 말뚝의 성능 평가 결과

##### (1) 강성 평가

CFT 말뚝의 단부 마감 조건에 따른 3가지 형태 (Type A : 양단 강판 폐합형, Type B : 양단 개방형, Type C : 양단 철근 보강형)에 대한 휨 실험 결과를 종합해 보면 아래와 같이 강성 및 강도에서 거의 차이가 없었다. 세 가지 실험체는 탄성구간에서 완전 합성거동과 같이 압축과 인장의 변형률이 선형을 보여주며, 단부에 발생하는 강재와 콘크리트의 상대변위도 거의 발생하지 않았다. 따라서 세 가지 실험체 모두 완전 합성거동을 보이는 것으로 판단된다.



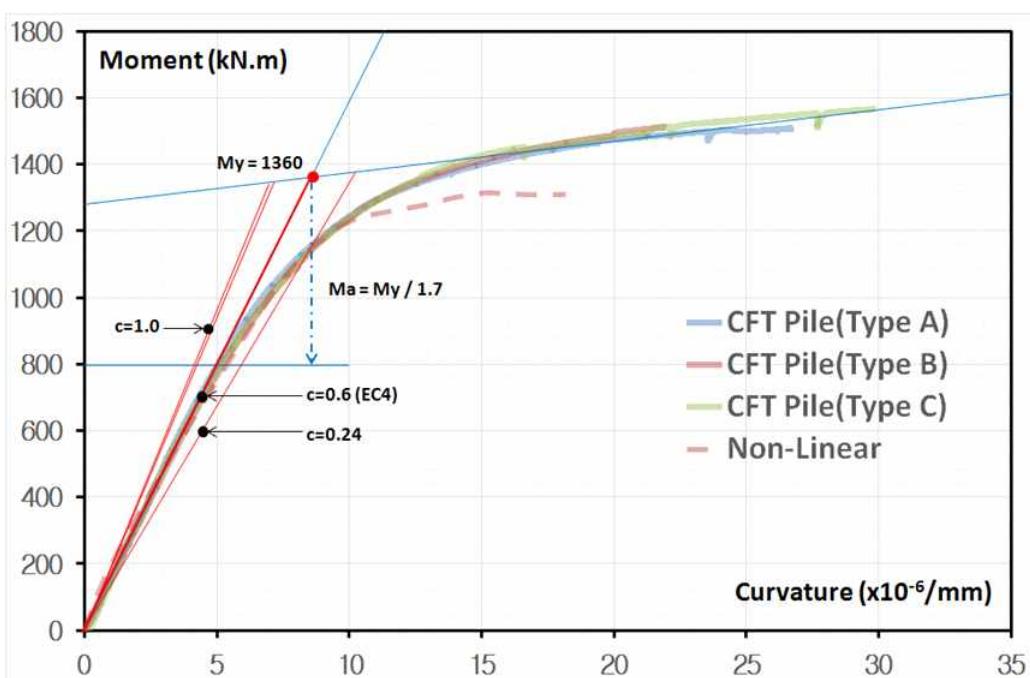
[그림 3.3.49] CFT Type별 하중-변위 곡선

이러한 근본적인 이유는 원형 CFT의 수치해석 결과 분석 통하여 얻은 결론 - 합성 정도에 관계없이 원형 CFT 단면의 강재와 콘크리트의 중립축이 일치하기 때문이다. 하지만 실험 결과에도 나와 있듯이 강재가 항복하고 내부 콘크리트의 균열이 발생하여 두 재료의 중립축이 변하게 되면 완전합성거동을 보이지 않는 것을 알 수 있다. 이상의 실험과 해석을 통하여 콘크리트와 강재가 전단연결이 되어 있지 않아도 CFT말뚝이 완전

합성을 보인다는 판단을 두 가지 가정 하에 내릴 수 있다. 첫 번째는 선형탄성구간에서만 적용되며, 두 번째는 순수 힘이 작용할 때이다.

일체식 교량에 있어서 부재별 강성( $EA, EI$ )에 따라 구조물에 발생하는 단면력의 변화가 발생하므로 구조물 해석시 이 강성값을 어떻게 적용하는가는 설계시 매우 중요한 요소이다. 그러나 CFT구조에 있어서는 이 강성값을 결정하는 식이 설계 기준 및 연구자에 따라 다양한 제안을 하고 있다. 따라서 금번 실험결과를 기준으로 여러 설계기준에 따른 강성산정식과 비교하여 설계시 적용할 강성 산정식을 결정하였다.

먼저 실험체의 단부 마감 조건에 따른 3가지 형태에 대한 힘 실험 결과와 비선형 해석결과를 중첩해 보면 아래 그림과 같이 휨강도( $M_y$ ) 1,360kN·m에 이르기까지 강성 및 강도에서 모두 일치하였다.



[그림 3.3.50] CFT말뚝 강성 분석

또한 항복강도의 1/1.7을 허용응력에 상응하는 사용한계로 가정할 경우 이 범위 내에서 세 가지 실험체는 모두 휨곡률이 선형상태를 유지하였으며, 압축과 인장의 변형률이 대칭으로 선형을 유지하는 완전 합성거동을 보였다.

한편 CFT설계지침(강구조학회), 강구조설계기준(ASD), 강구조설계기준(LRFD), EC4에서는 휨 강성 산정 시 아래 표와 같이 콘크리트 단면의 영향에 대한 감소계수를 제시하고 있다.

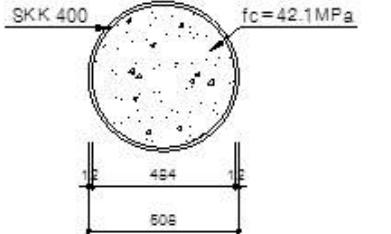
[표 3.3.4] CFT 단면의 설계기준별 강성 기준

	기준방법	CFT설계지침(강구조학회) 강구조설계기준(ASD)	강구조설계기준(LRFD) EC4
강성	$EA = E_s A_s + E_c A_c$ $EI = E_s I_s + E_c I_c$	$EA = E_s A_s + 0.4 E_c A_c$ $EI = E_s I_s + 0.4 E_c \left( I_s \frac{A_c}{A_s} \right)$	$EA = E_s A_s + 0.4 E_c A_c$ $EI = E_s I_s + C_3 E_c I_c$ $C_3 = 0.6 \sim 0.9$

휨에 대한 유효강성을 아래 식과 같은 형태로 통일하고 실험에 적용된 제원을 이용하여 콘크리트 단면의 영향계수  $c$ 를 산정한 결과는 아래와 같다.

$$(EI)_{eff} = E_s I_s + c \cdot E_c I_c \quad (\text{식 } 1)$$

[표 3.3.5] CFT말뚝 시제품의 재료 및 단면 제원

검토 단면	구분	E (MPa)	A ( $\text{mm}^2$ )	I ( $\text{mm}^4$ )
	Steel	210,000	18,700	575×106
	Concrete	29,570	184,000	2,694×106

[표 3.3.6] 각 설계기준에 의한 CFT말뚝의 단면 영향계수

구분	산식	c	비고
재료역학(기준방법)	-	1.00	상한계
CFT설계지침(강구조학회) 강구조설계기준(ASD)	$c = \left( 0.4 I_s \frac{A_c}{A_s} \right) I_c$	0.84	
강구조설계기준(LRFD)	$c = 0.6 + \left( \frac{A_s}{A_c + A_s} \right) \leq 0.9$	0.78	
EC4	탄성 : $K_e$	0.60	
	장기변형해석 : $K_0 \cdot K_e$	0.45	
Roeder et al.	$c = 0.5 + \frac{P}{P_0} + \frac{A_s}{A_c + A_s} \leq 0.9$	0.24	
콘크리트 단면 무시	-	0.00	하한계

계측 모멘트-곡률 곡선에 한국강구조학회의 「콘크리트충전 강관구조설계 및 시공지침」, 「허용응력설계법에 의한 강구조설계기준」에 의한 영향계수  $c = 0.84$ 부터 Roeder et al.에 의한  $c = 0.24$ 에 이르기까지의 휨 강성을 실험 및 해석 결과와 중첩하여 나타내었다.

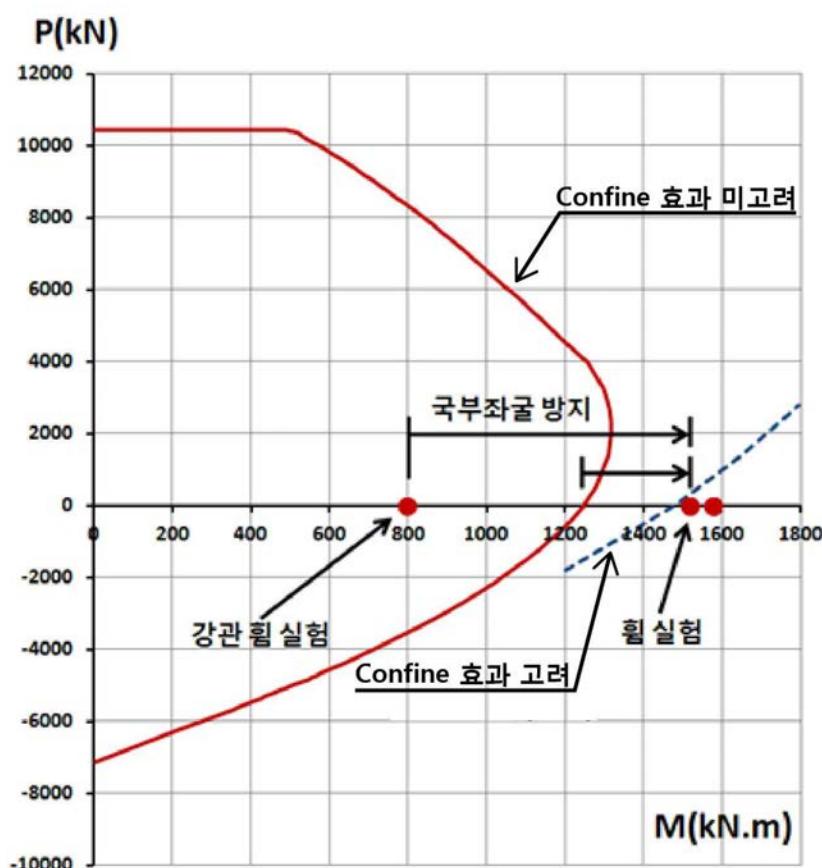
그림에서 보듯이 EC4에 의한 탄성 상태 휨 강성은 실험체의 변형거동을 가장 유사하

게 예측하고 있다. 그러나 국내 기준과 EC4의 영향계수 차이가 크지 않고 강성산정에서만 EC4를 적용할 경우 설계기준 적용 시 일관성을 상실할 우려성이 있다. 따라서 국내 설계기준인 강구조 설계기준을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

또한 CFT설계지침(강구조학회)과 강구조설계기준(ASD)에 의한 영향계수가 실험에 의한 휨강성보다 약 15% 더 크므로, 지점부 발생하는 단면력이 다소 증가되어 보다 안전측의 설계결과를 나타낼 것으로 예측된다.

## (2) 강도 평가

CFT말뚝의 강도 분석을 위하여 아래 그림과 같은 축력-모멘트 곡선을 사용하였다. 그림에서 실선 곡선은 실험체에(CFT말뚝 : 강관의 횡방향구속효과 미고려) 대한 축력-모멘트 성능 곡선이며, 축력이 0인 선상에 표시된 점은 순수 휨 실험 시 계측에 의한 단면의 파괴 강도(최대 계측 하중)를 나타내고 있다. 또한 점선으로 표현된 곡선은 강관이 콘크리트를 구속함으로써 나타나는 횡방향 구속효과를 고려한 CFT말뚝의 이론적 축력-모멘트 곡선이다.



[그림 3.3.51] CFT말뚝 강성 분석

계측결과에 의한 강관말뚝의 파괴하중이 800kN · m인 것에 비하여 CFT말뚝의 파괴하중은 1,500~1,600kN · m로서 강관말뚝 대비 좌굴 방지 효과로 약 2배의 강도 증가가 있었음을 확인하였다.

위의 사실로부터 강관의 좌굴이 방지된 조건에서 변형률 적합조건을 이용하여 말뚝 단면의 강도를 산정할 수 있었으며, 이때 콘크리트 횡방향 구속효과를 고려할 경우(그림의 온선 곡선) 휨 실험 결과와 매우 유사한 결과를 나타내었다. 반면 설계기준과 같이 콘크리트 횡방향 구속효과를 무시할 경우(그림의 실선 곡선) 이론값이 실험 결과의 약 85% 수준으로 안전측의 결과를 제시하고 있음을 확인하였다.

따라서 설계기준에서 제시하고 있는 식을 적용할 경우 실구조물보다 그 능력을 저평 가하는 것으로 판단되므로, 이식을 적용하면 매우 안전한 설계가 될 수 있음을 확인하였다.

### (3) 소결

- CFT말뚝실험 결과 이론적 예측치와 잘 일치하는 결과를 나타내었다.
- CFT말뚝 강성에 대한 실험 결과 분석에서 EC4의 설계기준이 실험값과 가장 근접한 계산 결과를 도출하였다. 그러나 국내 기준과 EC4의 영향계수 차이가 크지 않고 강성산정에서만 EC4를 적용할 경우 설계기준 적용 시 일관성을 상실할 우려성이 있다. 따라서 국내설계기준인 강구조 설계기준을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 또한 CFT설계지침(강구조학회)과 강구조설계기준(ASD)에 의한 영향계수가 실험에 의한 휨강성보다 약 15% 더 크므로, 지점부 발생하는 단면력이 다소 증가되어 보다 안전측의 설계결과를 나타낼 것으로 예측된다.
- 강도평가에서 CFT말뚝은 충전 콘크리트로 인한 좌굴 방지, 콘크리트와 강관의 합성 및 강관에 의한 콘크리트 구속 효과가 있으며, 이로 인하여 약 2배의 강도 증가가 있음을 확인하였고, 변형률적합조건을 이용한 단면강도 산정이 가능한 것으로 검토 되었다. 또한 콘크리트 구속 효과를 고려한 단면 강도 예측값이 실험값에 거의 일치하였음에 비하여 콘크리트 구속 효과를 고려하지 않는 기존 설계 가정은 상당히 안전측임을 확인하였다.

## 다. 두부보강장치의 성능

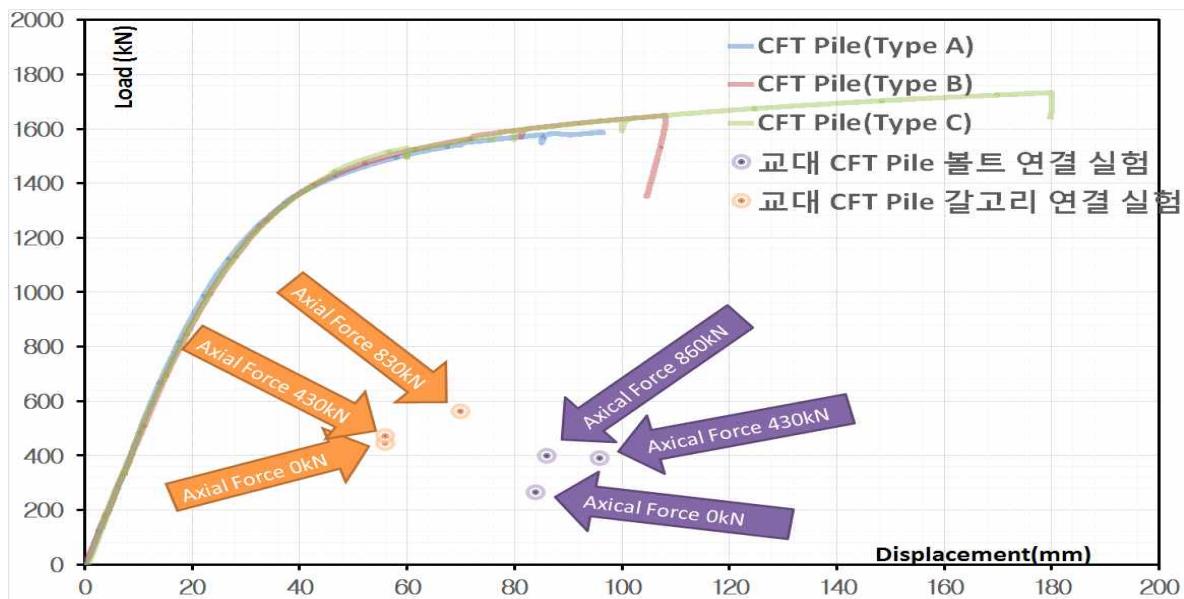
### (1) 실험 결과

두부보강부의 성능 검토를 위한 실험체는 총 12개이며, 각각의 최대 횡 하중과 그때의 횡 변위를 다음 표에 정리하였다.

실험체 종류		축력(kN)	횡 변위 (mm)	최대 횡 하중 (kN)	최대 모멘트(kN·m)	
CFT Pile	Type A	0kN	84mm	263kN	552.3kN·m	
			-98mm	-275kN	-577.5kN·m	
		430kN	96mm	388.4kN	818.4N·m	
			-96kN	-397.4kN	-833.7N·m	
		860kN	98mm	399kN	837.9N·m	
			-98mm	-394kN	-827.4N·m	
	Type B	0kN	56mm	445.7kN	935.9N·m	
			-56mm	-414.2kN	-869.8N·m	
		420kN	56mm	471.2kN	989.8N·m	
			-66mm	-471.6kN	-990.0N·m	
		860kN	70mm	560kN	1,176N·m	
			-70mm	-555kN	-1,165N·m	
RC Pile		0kN	55mm	165.1kN	346.7N·m	
			-65mm	-149.2kN	-313.3N·m	
		420kN	40mm	201.3kN	422.7N·m	
			-40mm	-231kN	-485.1N·m	
		850kN	34mm	252.6kN	530.5N·m	
			-34mm	-215.4kN	-452.2N·m	
SC Pile		650kN	102mm	268kN	562.8N·m	
			-86mm	-318.6kN	-669.6N·m	
PHC Pile	도로교 설계기준	720kN	42mm	231kN	485.1N·m	
			-50mm	-213.8kN	-485.1N·m	
	One Cutting	720kN	50mm	194kN	407.4N·m	
			-50mm	-212.4kN	-446.0N·m	

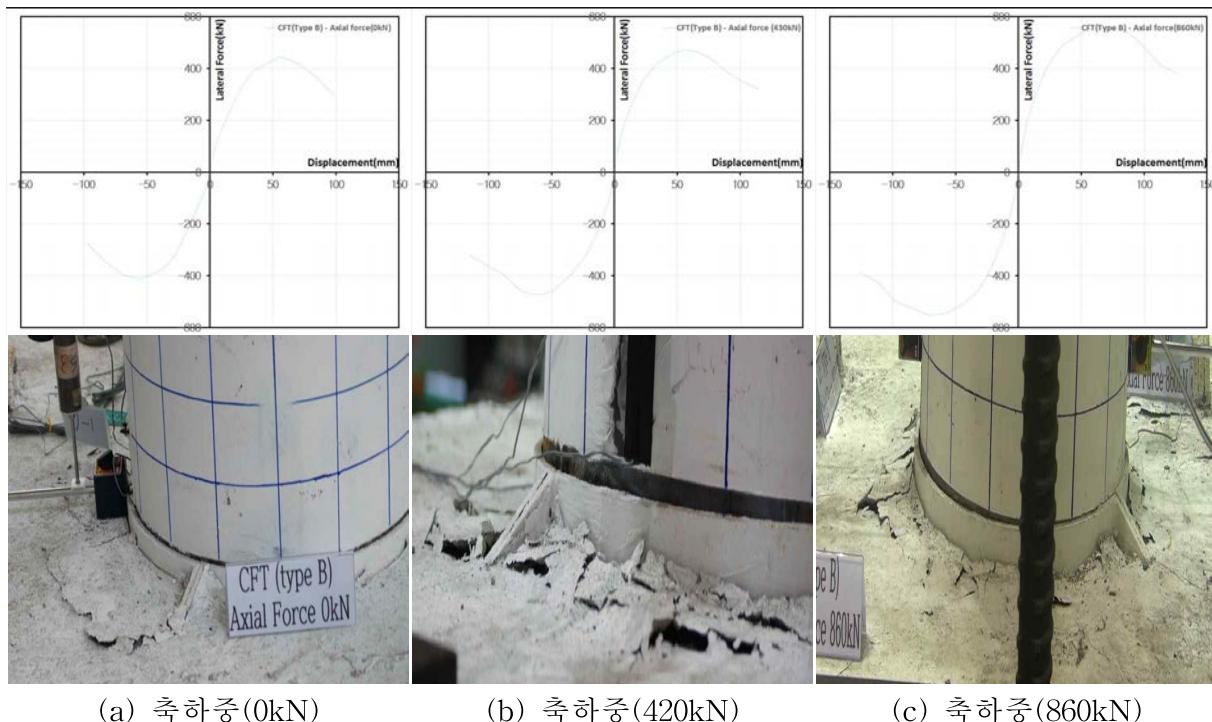
다음의 그림들은 각각 두부보강부의 실험에 사용된 CFT 말뚝, SC 말뚝, RC 말뚝과 동일 단면의 본체 휨 강도 실험에 의한 하중-변위 곡선과 두부 보강 실험에서 계측된 최대 횡 하중을 각 실험체에서의 전단지간을 고려하여 보정한 파괴하중을 중첩하여 나타낸 것이다.

총 6개의 CFT두부보강 실험체는, CFT 말뚝이 여전히 탄성 상태일 때 연결부에서 파괴가 발생하였음을 [그림 3.3.50]에서 알 수 있다. 두부보강 실험체의 환산 하중은 휨 실험 그래프의 선형탄성 부분에 존재함이 이를 뒷받침 해준다.



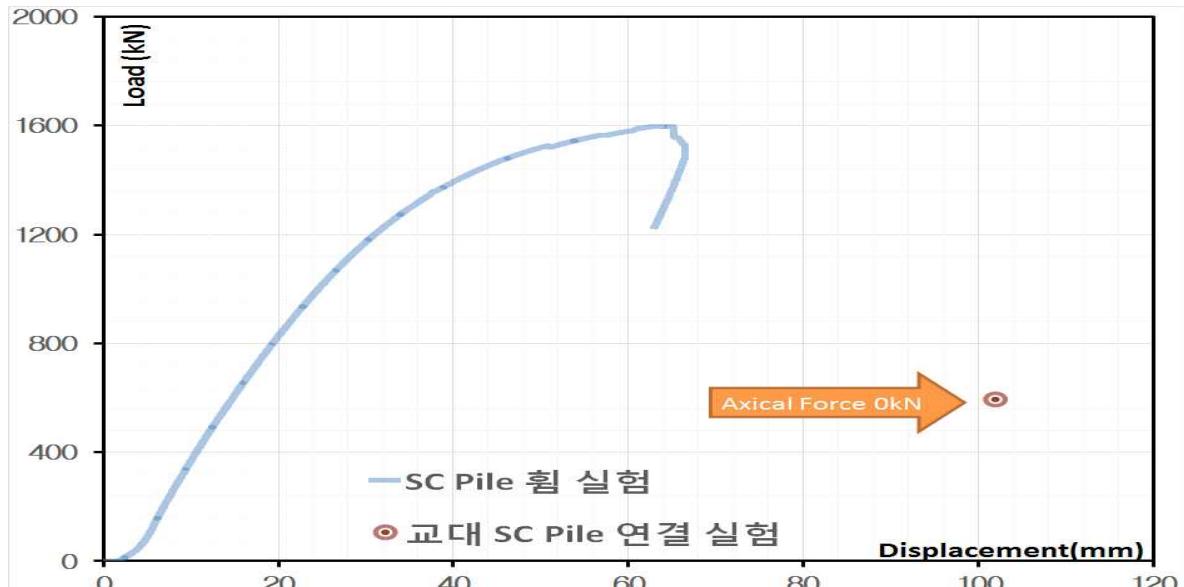
[그림 3.3.52] CFT Pile의 휨 실험과 연결부 실험 결과 비교

CFT 말뚝의 두부 보강 방안 중 볼트연결 방식(Type A)과 J형 철근 보강 방식(Type B)은 전자보다는 후자의 방식이 더 우수한 것으로 판단되지만 추후 실 구조물에서는 연결부의 강성을 더 증대 시킬 필요가 있으며, 연결부 실험체 모두 교대의 균열파괴가 관찰되었으므로, 연결부 및 교대 설계 시 본 실험의 결과를 반영하여 실 구조물에서는 말뚝의 강성보다 연결부와 교대를 더 보강하여야 할 것으로 판단된다.



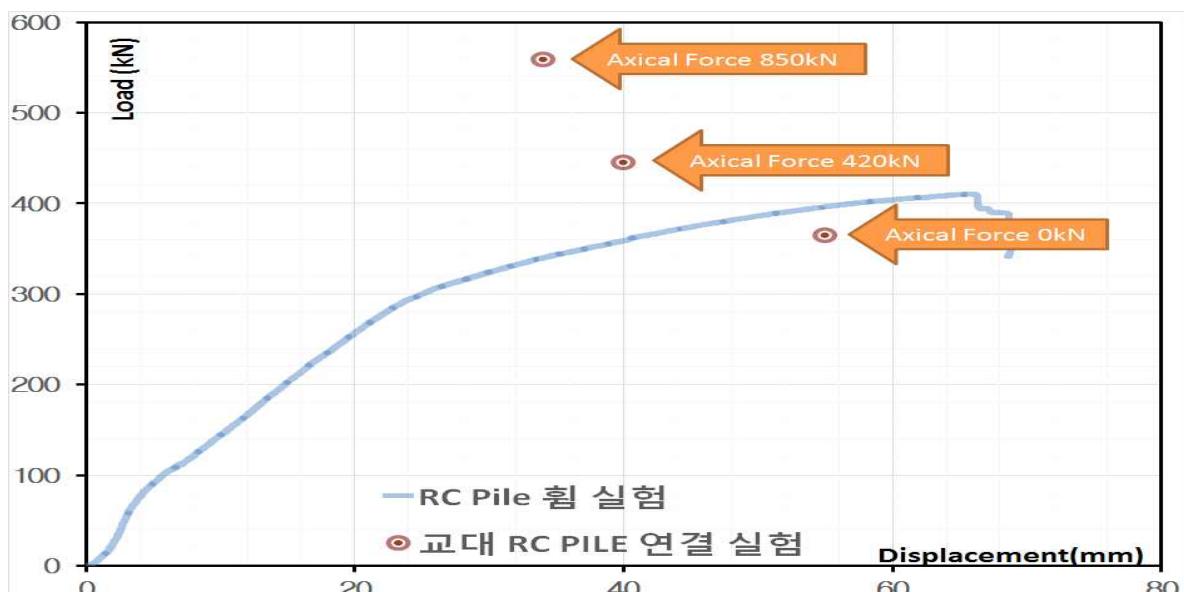
[그림 3.3.53] CFT말뚝의 두부보강장치(Type B : J형 철근 이음)의 하중-변위 곡선 및 파괴양상

SC 말뚝의 두부보강부는 SC 말뚝의 강관과 두부 보강 연결 철근이 모두 항복 하지 않았음에도 실험체는 더 이상의 하중을 견디지 못하였다. 그 원인은 연결부의 과다 슬립으로 인한 것으로 판단된다. 흔 실험과 연결부의 비교 그림에서도 두부 보강 실험에서의 극한하중 값은 흔 실험 그래프의 선형탄성 부분에 존재한다. 따라서 위의 두 가지 실험체의 경우 모두 연결부의 파괴거동이 설명되는 근거이다.



[그림 3.3.54] SC Pile의 흔 실험과 연결부 실험 결과 비교

반면 RC 말뚝의 경우는 축력이 0인 연결부 실험체의 파괴는 연결부가 아닌 흔모멘트가 가장 크게 발생하는 부분에서 RC 말뚝의 파괴가 일어났고, 실험 결과를 비교한 그림에서 실제 흔 거동의 파괴 하중과도 거의 비슷하게 분포하고 있다. 두부 보강 실험에서 축력이 증가함에 따라 최대하중도 증가하며, 콘크리트의 압축부 파괴에 의하여 더 이상의 하중을 받지 못하였다.

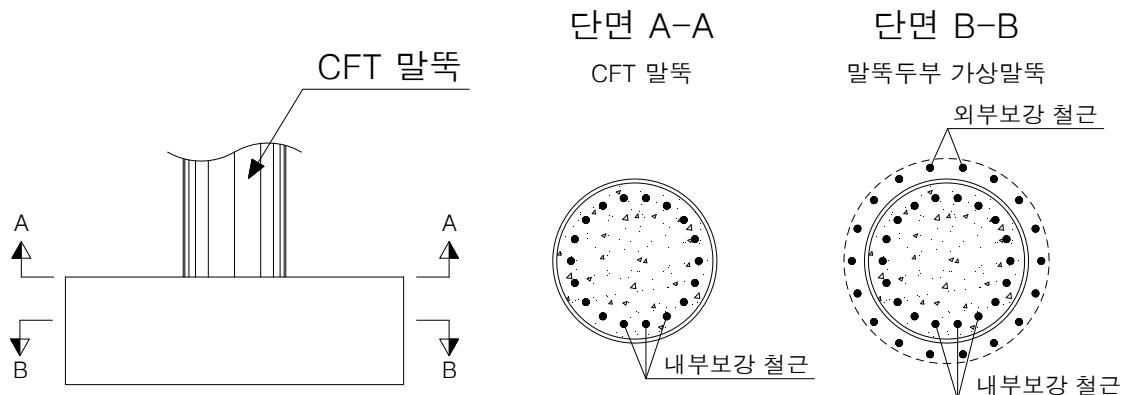


[그림 3.3.55] RC Pile의 흔 실험과 연결부 실험 결과 비교

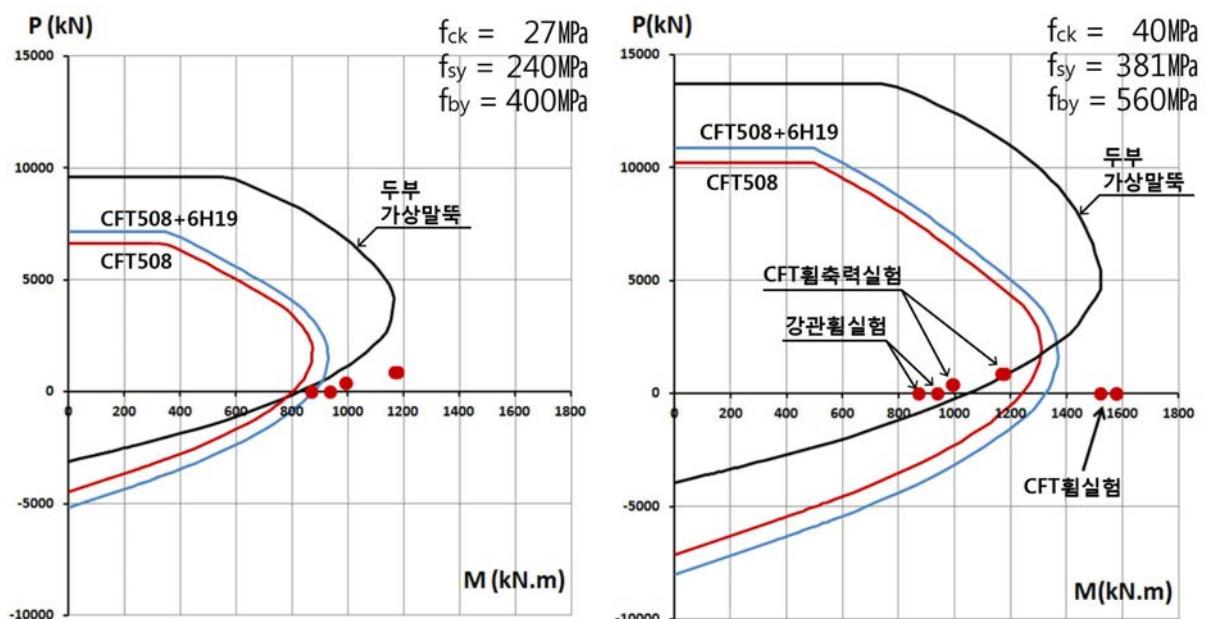
PHC 말뚝 두부 보강 실험체의 경우 도로교설계기준에 의해 말뚝 체 내의 강선을 교대까지 연장하는 실험체가 원컷팅 방식으로 제작한 실험체 보다 최대하중이 더 크게 나왔으며, 파괴양상은 RC 말뚝과 유사하였다.

## (2) 말뚝 두부접합부의 강도 분석

말뚝 두부 접합부 실험 결과 분석을 위한 아래 그림의 좌측은 재료 설계기준강도를 이용하여 말뚝 본체와 두부접합부의 성능을 예측한 곡선이고 우측은 재료 시험결과를 반영하여 부재 성능을 분석한 곡선이다. 양쪽 그림에 공통적으로 두부 접합부 시험체의 재하 축력에 따른 모멘트 강도 계측 결과를 점으로 표시하였다. 우측 그림에는 CFT 말뚝 본체에 대한 순수 휨 실험결과를 함께 표시하였다.



[그림 3.3.56] 말뚝 두부접합부의 검토 단면



(a) 설계강도에 의한 예측값

(b) 실제 재료강도를 반영한 분석

[그림 3.3.57] 말뚝 두부접합부의 강도 분석

실험결과 파괴양상은 CFT말뚝 강관의 좌굴이나 항복에 의한 파괴가 아닌 교대와 CFT말뚝 연결부 철근의 항복에 의한 파괴로 관찰되었다.

재료의 설계강도를 기준으로 이론적으로 분석한 상기 좌측 그림에서 살펴보면 두부 접합부 가상말뚝의 강도가 CFT말뚝 본체강도보다 크므로 말뚝 본체가 설계를 지배하는 것으로 검토되었다. 이는 실험결과와 상이한 결과를 나타내고 있으며 이는 CFT말뚝의 이론적 해석이 강관에 의한 콘크리트의 구속효과를 고려하고 있지 않은데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 말뚝 본체의 강도는 실제 계측한 하중 중 가장 작은 값보다도 적으므로, 계측치를 근거로 할 때 이론값에 의하여 설계를 하면 설계 시 충분한 안전율을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

재료의 시험결과를 반영한 상기 우측 그림에서 두부 접합부의 가상말뚝에 실제 재료 강도를 반영하여 분석한 결과는 계측결과와 일치하는 결과를 보여주었다. 설계기준강도로 분석한 결과에 비하여 말뚝 본체 강도가 접합부의 성능을 초과하는 역전 현상을 보이는데 이것은 강관 본체에 좌굴이나 손상 없이 접합부에서 파괴가 발생한 관찰 내용과도 일치한다. 즉 접합부 가상말뚝의 예측 강도는 실제 강도를 정확히 예측한 반면 CFT 말뚝은 강관의 구속효과로 인하여 예측보다 상당한 강도 증진 효과가 있음을 다시 확인할 수 있다.

### (3) 소결

- 실험결과 재료의 시험결과를 반영한 이론적 예측치와 잘 일치하는 결과를 나타내었다.
- CFT말뚝의 두부 설계에 있어서 설계기준상 강관의 구속효과를 고려하고 있지 않아 설계기준에 의하여 설계를 시행할 경우 CFT말뚝은 충분한 안전율을 확보할 수 있음을 확인하였다.
- CFT말뚝과 확대기초의 연결부인 가상말뚝은 변형률적합조건에 의한 공칭강도는 실험결과와 매우 잘 일치하였으며, 이로써 도로교설계기준에 의하여 가상말뚝을 설계할 경우 충분한 안전율을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.

## 4절 거더-교대 접합부 상세 개선

### 1. 실험 목적

거더-교대 접합부는 강절 시스템을 유지하여야 하며 기존의 접합부 상세는 우측 사진과 같이 철근을 이용하여 일체화 한다. 그러나 그림 3.4.1에서 볼 수 있는 바와 같이 기존의 철근 연결부는 매우 복잡하여 시공성이 떨어진다. 또한 형고가 낮으면 배치되는 철근량이 많아지게 되므로 더욱 더 시공 여건이 나빠질 것으로 예상된다.

그러므로 1차년도에는 기존 거더 라멘교 형식에 적용하는 상세를 기준으로 파괴시의 거동과 응력 분담률을 검토하고 이 실험이 결과를 토대로 도출된 개선안에 대하여 시제품에 적용하여 연결부의 시공성과 구조안전성을 검증하기로 한다.

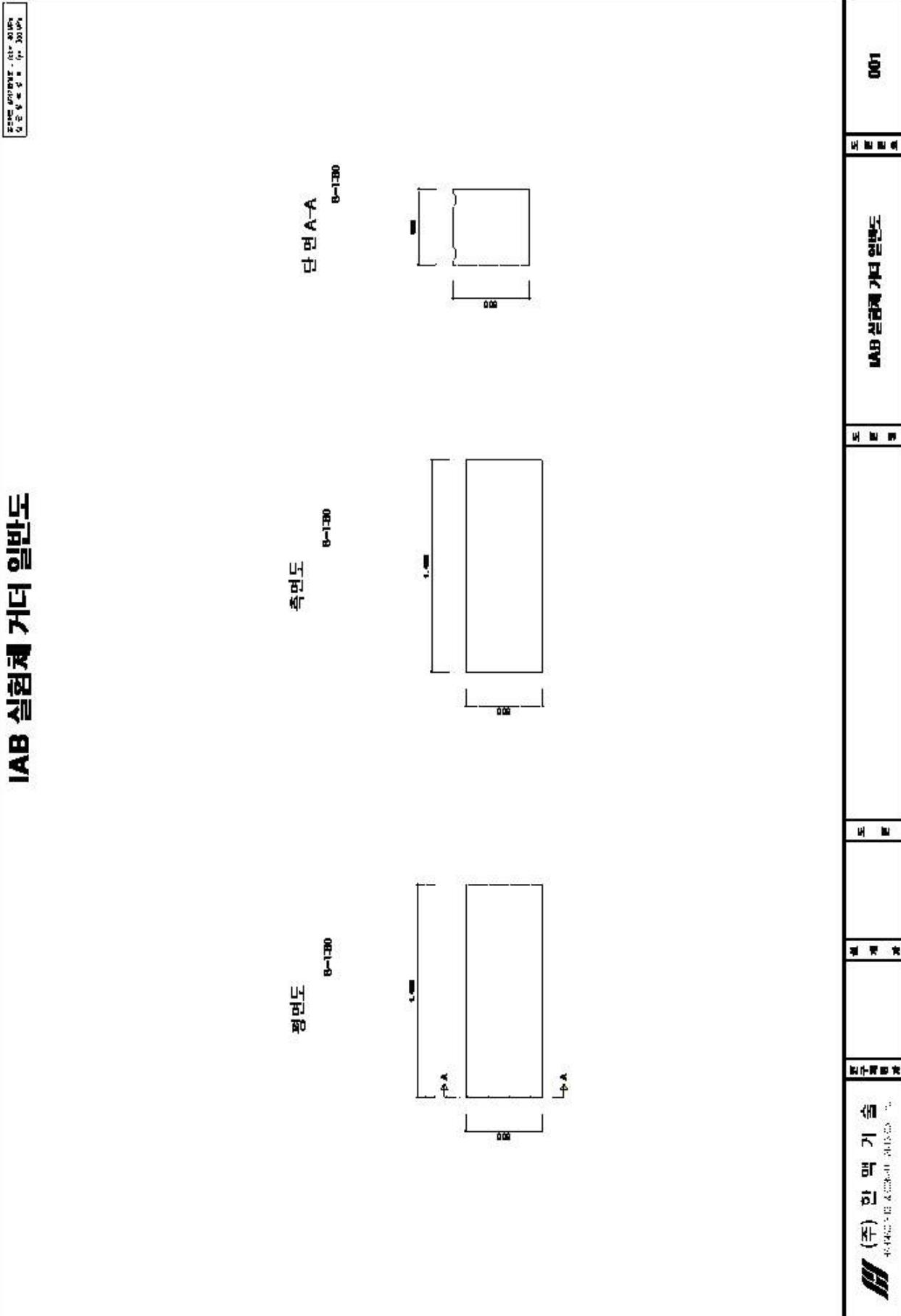


[그림 3.4.1] 기존 일체형 교량의 거더-교대 접합부 배근

### 2. 실험 계획

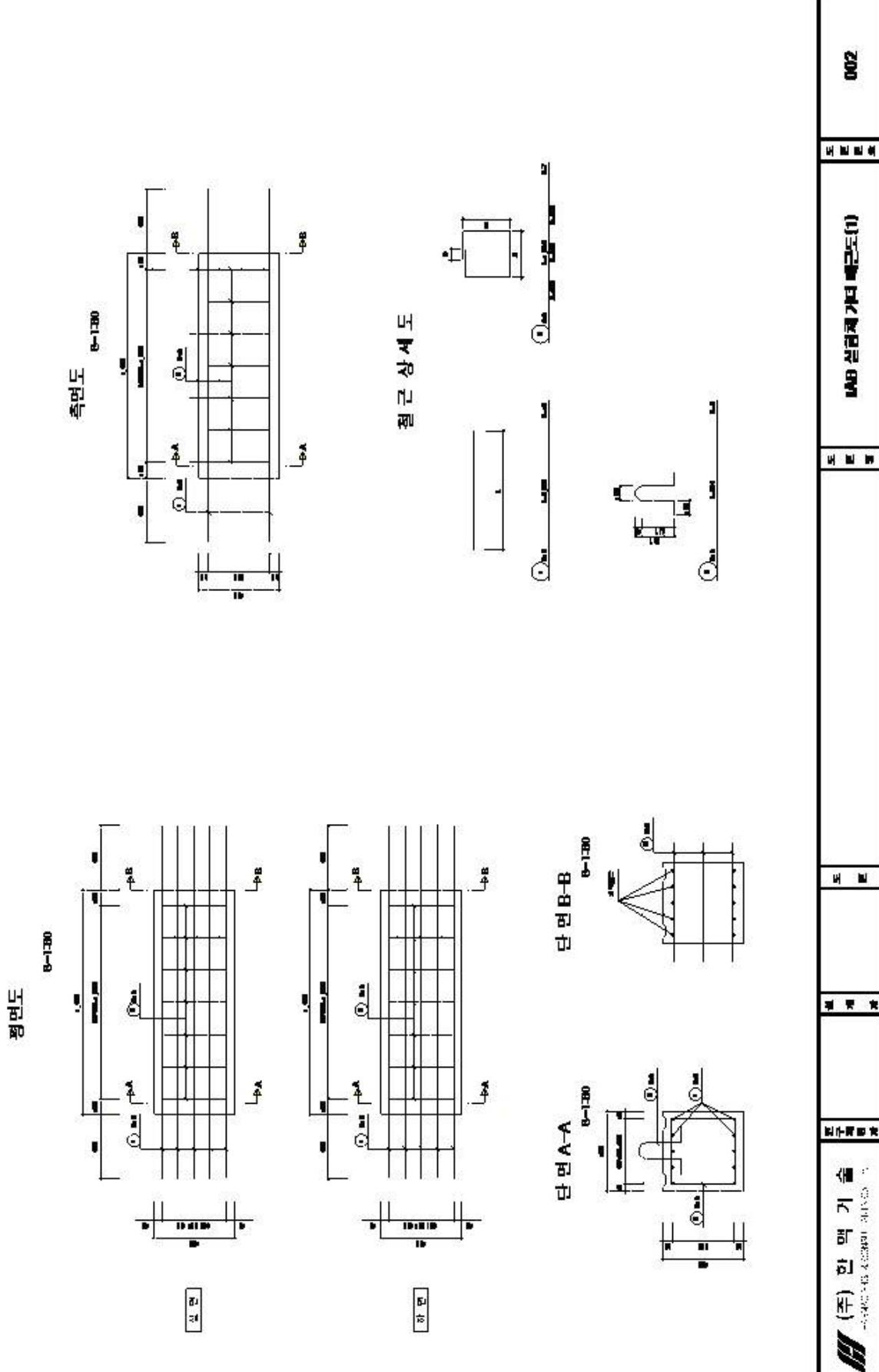
실험체는 접합부 배근을 중심으로 한“ㄱ”자 형태로 제작하고 양단부에 45°로 관통하는 강봉을 긴장하여 하중을 재하 함으로써 거더 및 교대부에 축력과 휨모멘트가 동시에 재하 되도록 계획하였다.

## IAB 실험체 거더 일반도



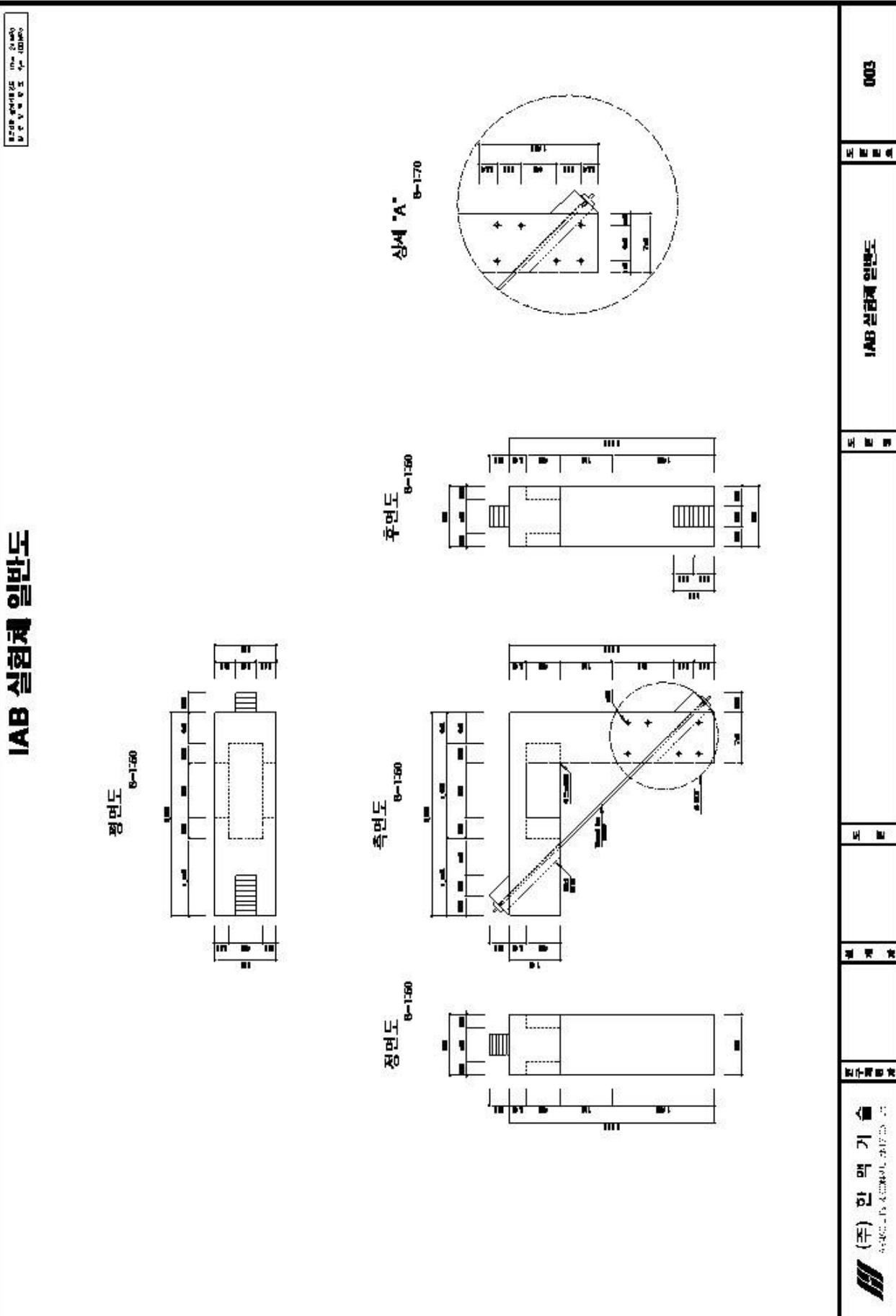
[그림 3.4.2] 거더-교대 접합부 실험체 거더 일반도

## IAB 실험체 거더 배근도(1)



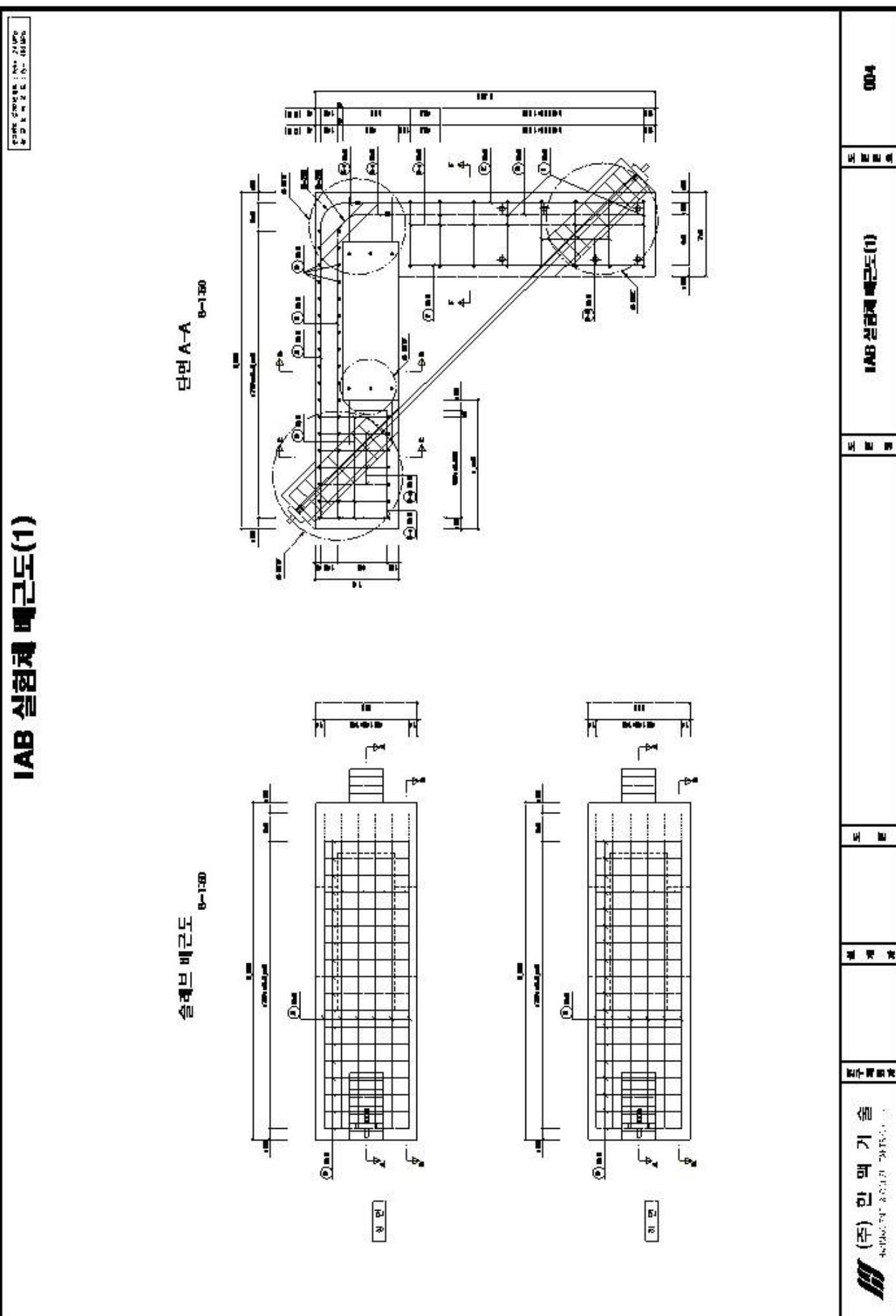
[그림 3.4.3] 거더-교대 접합부 실험체 거더 배근도

## IAB 실험체 일반도



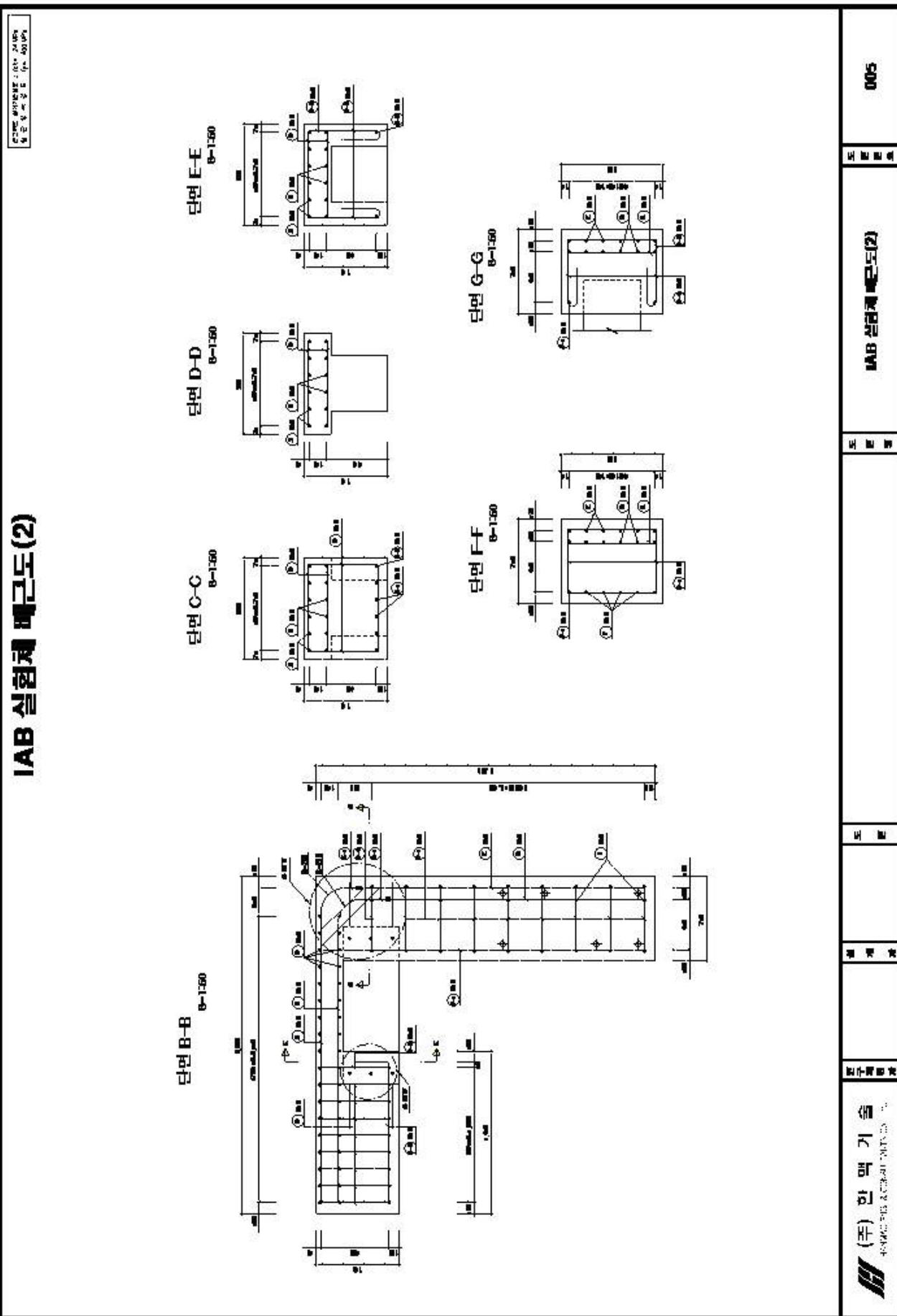
[그림 3.4.4] 거더-교대 접합부 실험체 일반도

## IAB 실험체 배근도(1)



[그림 3.4.5] 거더-교대 접합부 실험체 배근도 (1)

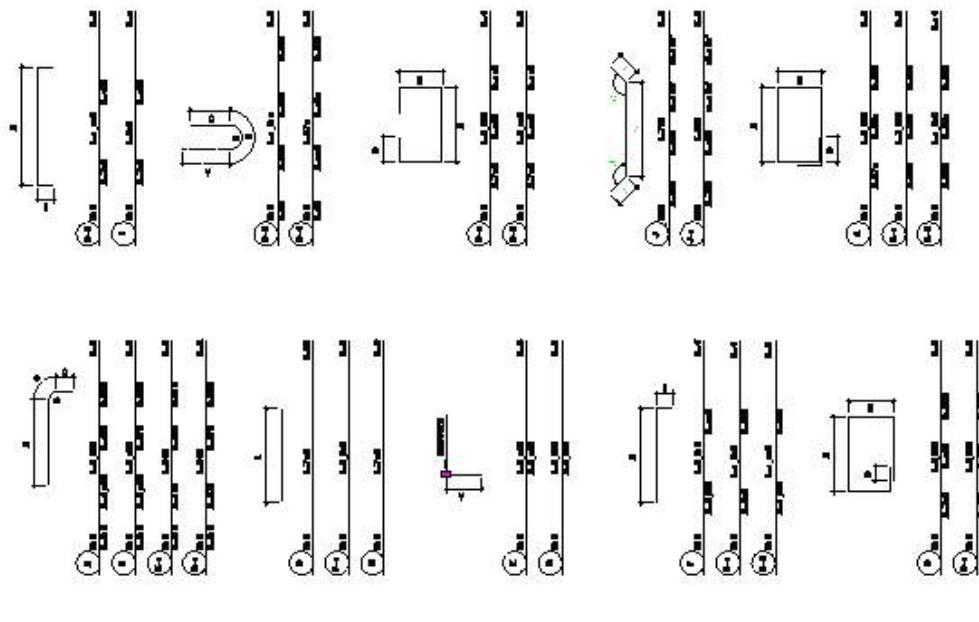
## IAB 실험체 배근도(2)



[그림 3.4.6] 거더-교대 접합부 실험체 배근도 (2)

### IAB 실험체 배근도(3)

철근 상세도



IAB 실험체 배근도(3)

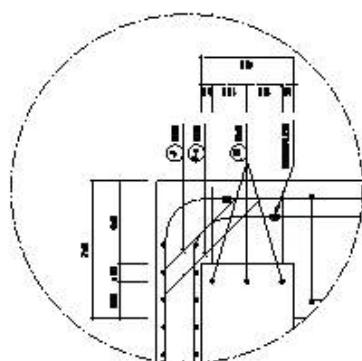
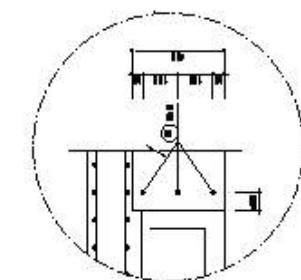
006

**(주) 한맥기술**  
HANMECH TECHNOLOGY INC.

영커싱네  
E-CRIMPING

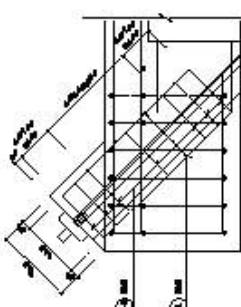
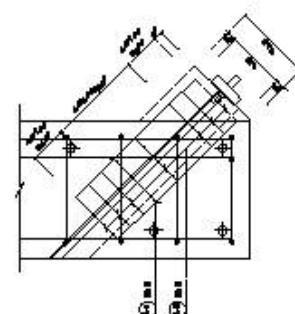
상세 C  
B-170

상세 B  
B-170



상세 E  
B-170

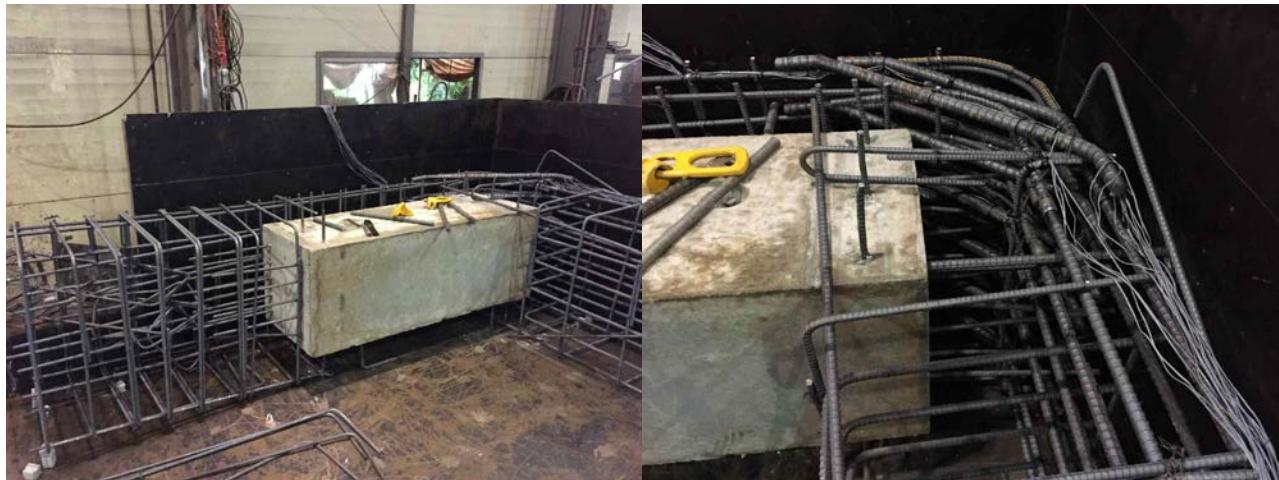
상세 D  
B-170



IAB 실험체 배근도(3)

006

### 3. 실험체 제작 및 실험



(a) 거더부 + 교대 및 슬래브 철근망 조립

(b) 접합부 배근

[그림 3.4.8] 실험체 제작



(a) 완성 실험체

(b) 하중 재하(유압잭)

[그림 3.4.9] 완성된 실험체 형상 및 하중 재하 유압잭

실험방법은 연결부에 모멘트가 발생되도록, 그림과 같이 대각선 방향으로 실험체에 강봉을 삽입하여 유압기 통하여 모멘트 하중이 실험체에 전달되도록 설치하였다. 그리고 실험체와 바닥사이에는 마찰이 적은 테프론을 삽입하여 실험체 전달되는 모멘트 하중에 변위의 구속이 최대한 작도록 실험 Setting을 하였다.

본 실험은 경기도 화성시 팔탄면에 위치한 페트라텍(주) 구조실험실에서 실험을 수행하였다. 흡 실험에 사용된 가력장치는 5,000kN의 Actuator인 Dynamic UTM & Static UTM 을 사용하였다.

#### 4. 실험 결과

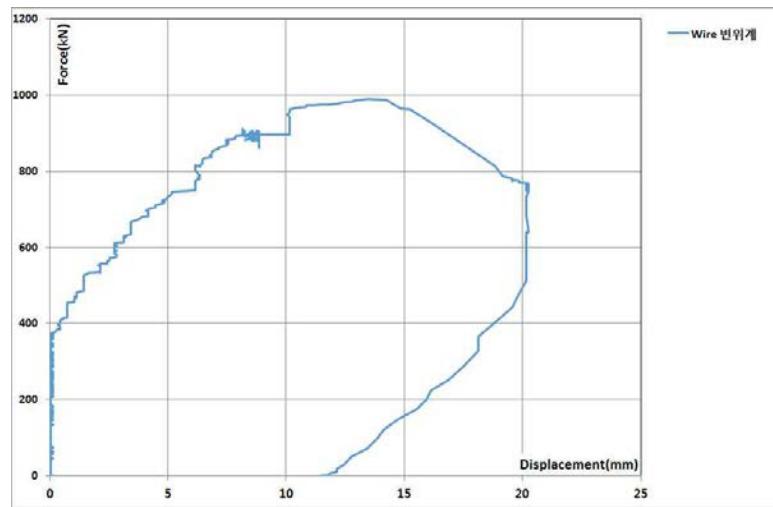
가력부 유압잭의 인장력이 35tonf에서 거더 상단 슬래브의 최초 휨 균열이 발생하였으며, 이후 균열은 슬래브를 관통한 후 거더와 슬래브의 계면을 따라 발달하였다.

교대 측 최초 휨 균열은 40tonf에서 발생하였으며 균열 수와 발생 간격은 슬래브 측에 비하여 적었으나 폭은 교대 측이 더 넓은 것으로 관찰되었다.

파괴는 인장력이 약 90tonf에 이르러 슬래브 상단 측 철근이 항복 변형률에 도달하면서 거더 측 설계단면이 먼저 항복에 도달하였고, 약 98tonf에서 교대 측 단면에 재하 점에서부터 시작되는 사인장 균열이 급격히 발달하면서 파괴에 도달하였다.



그림 3.4.21은 고강도 콘크리트를 사용한 분절 거더와 교대 연결부 실험체의 강봉에 재하된 하중과 Wire 변위계로 측정된 변위를 나타낸 하중-변위 곡선이다. 강봉에 재하 된 하중 크기가 370kN까지는 실험체에 발생된 변위는 매우 미비하였으며, 하중의 크기가 370kN 이상부터 하중이 증가에 따라 실험체도 거동을 시작하였으며, 실험체에 발생하는 변위는 선형적으로 증가하였다.

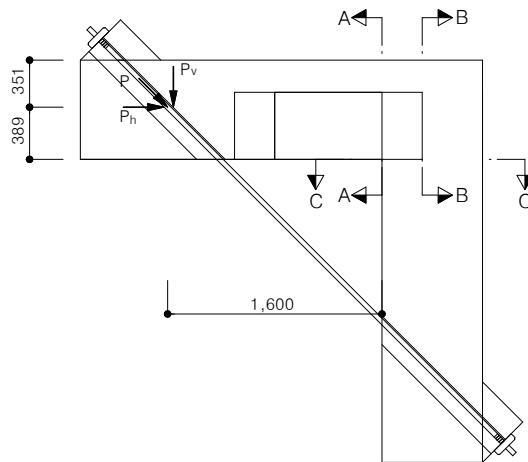


[그림 3.4.11] 실험체 하중-변위 곡선

실험체 파괴는 강봉에 재하 된 하중의 크기가 900kN에서 슬래브 상단 철근 (S1)이 항복변형률에 도달하면서 거더 층 설계단면이 먼저 항복 하였으며, 강봉에 재하 된 하중이 989.24kN(변위 13.5mm) 일 때, 교대 층 단면에 재하점에서 부터 시작되는 사인장 균열이 급격히 진전되어 파괴되었다. 실험체에 발생된 균열은 강봉에 재하 된 하중 크기가 350kN에서 거더 상단 슬래브에 최초 휨 균열이 발생하였으며, 이후 균열은 슬래브를 관통한 후 거더와 슬래브의 계면을 따라 진전되었다. 교대 층 최초 휨 균열은 400kN에서 발생하였으며, 균열 수와 간격은 슬래브 층에 비하여 작으나 폭은 슬래브의 균열보다 큰 것으로 관찰되었다.

## 5. 강도 분석

아래 설계 검토 단면에서 검토단면 A와 B는 각각 교대 내면과 거더 단부에 연하여 슬래브 상단에 휨 균열 발생이 예상되는 단면이고 단면 C는 거더 하면에 연하여 교대 외측면에서 휨 균열 발생이 예상되는 단면이다.



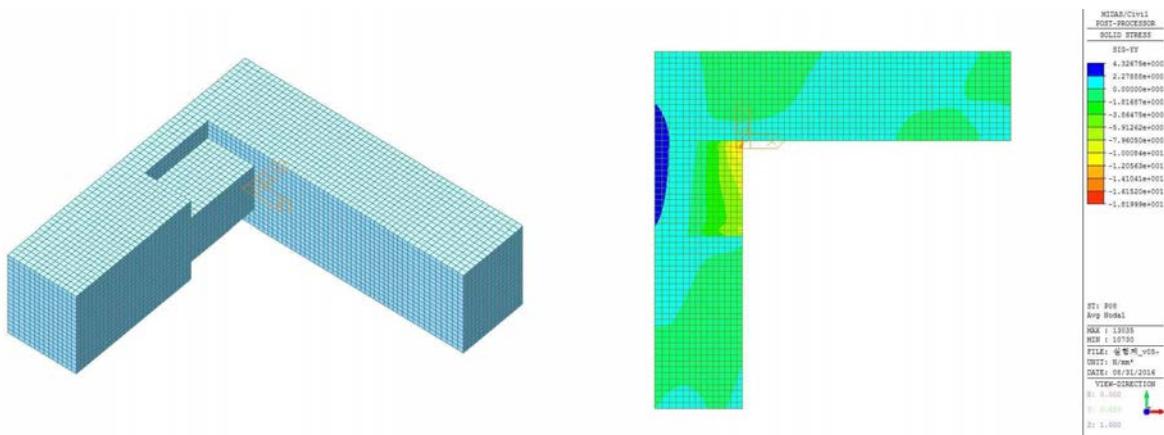
[그림 3.4.12] 접합부 설계 검토 단면

실제 교량에서 휨 균열의 발생은 내구성 저하의 요인이 될 수 있으므로 지중에 묻히는 교대측 단면(단면 C)보다는 외측에 드러나는 단면(단면 A 또는 B)에서 발생하는 것이 유지 관리 면에서 바람직하다.

검토 단면 중 최초 휨 균열의 발생 지점은 설계 값과 동일하게 유한요소해석에 의한 결과에서도 단면 A로 검토되었다. 균열의 발생 시기는 강봉에 도입되는 긴장력의 크기를 기준으로 이론식에 의한 값은 230kN, 유한요소해석에 의한 값은 330kN으로 예측되었으며, 이는 계측 값인 350kN에 비하여 약 66%, 94% 수준으로 평가되었다. 따라서 이론값에 의하여 설계를 수행하면 실구조물은 충분한 안전을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

[표 3.4.1] 거더-교대 간 접합부 휨균열강도 평가 결과

구분	휨균열강도					
	L (m)	$M_{\alpha}$ (kN · m)	V (kN)	$f_r$ (MPa)	P (kN)	
단면 A	이론값	1.6	259.9 (65.6%)	162.5	3.1	229.8 (65.6%)
			373.4 (94.3%)	233.3		330.0 (94.3%)
	계측		396.0 (100%)	-	-	350.0 (100%)



(a) FEM 모델

(b) 휨균열강도 분석

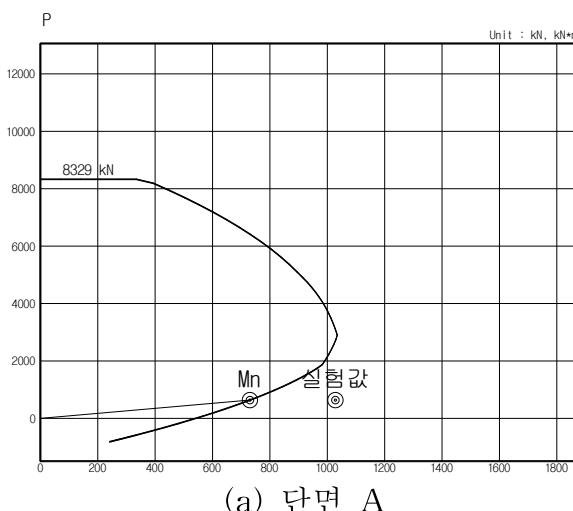
[그림 3.4.13] 접합부 FEM 해석

파괴 거동의 검토는 강보에 도입되는 힘이 부재에는 축력( $P_h$ )과 전단력( $P_v$ )에 의한 휨거동을 동시에 발생시키기 때문에  $P$ - $M$ 곡선의 극한곡선(Nominal Curve)을 통하여 검토하였다.

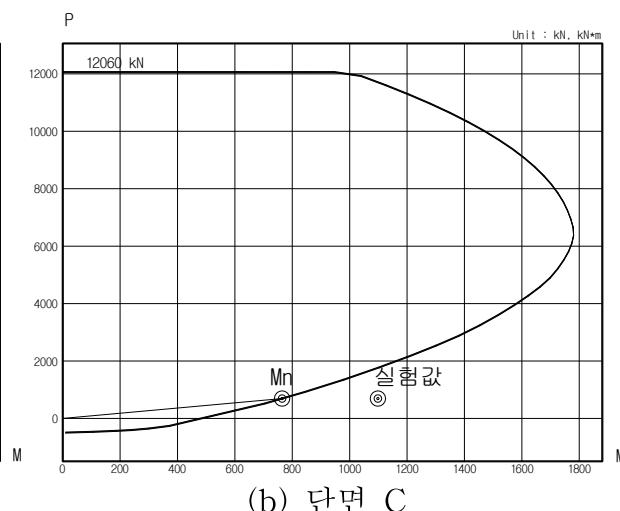
파괴 거동 역시 단면 A가 설계를 지배하는 것으로 검토되었다. 이론적으로 파괴가 관측된 강봉 도입 긴장력이 900kN일 때 단면 A에서는 수직 및 수평분력으로 636.4kN이 작용하게 되고 이때 단면A에서의 설계공칭강도는 730.3kN · m이다. 이에 반하여 실험에서 계측된 모멘트 강도는 1018kN · m이었으므로 설계 값은 계측 강도 대비 71.7% 수준의 안전 측으로 평가되었다.

[표 3.4.2] 거더-교대 간 접합부 휨공칭강도 평가 결과

구분		공칭강도			
		$P$ (kN)	$P_v = P_h$ (kN)	$L$ (m)	$M_n$ (kN · m)
단면 A	이론값	900.0	636.4	—	730.3 (71.7%)
	계측			1.6	1018 (100%)
단면 C	이론값	980.0	693.0	—	764.5 (69.6%)
	계측			1.585	1098 (100%)



(a) 단면 A



(b) 단면 C

[그림 3.4.14] 단면 휨 강도 분석

## 6. 소 결

- 가. 실험 결과 변형률적합조건을 이용한 설계 값이 계측 값에 비하여 훨씬 열 강도는 66% 수준, 파괴에 대한 공칭강도는 72% 수준으로 안전 측의 결과를 도출하였다. 이는 해석 시 사용한 재료의 물성 값이 설계기준강도를 기준으로 검토한 것에 기인한 것으로 판단된다.
- 나. 본 제안 기술에서는 거더가 분담하는 하중을 하부 말뚝 구조로 분산시킴으로써 형고를 낮추었으며, 이로 인하여 거더-교대 접합부에 부모멘트가 증가되었으나 도로교설계기준에서 제시하고 있는 최대 철근 규격 H22이하의 철근만을 배치하여도 충분한 안전율을 확보할 수 있는 것으로 검토되었다.
- 다. 시공의 편의성을 고려하여 커플러 및 우각부 철근을 단순화시킨 철근 배근을 사용하여도 안전성을 확보할 수 있음을 확인하였다.
- 라. 실험결과 바닥판의 최소두께만 적용하여도 충분한 안전율을 확보하고 있음을 확인하였으나 실험결과 및 이론검토 결과 단부 상연 슬래브에 균열이 우선적으로 발생하고 이 부분에 차량의 충격이 큰 점을 감안할 때 단부 슬래브 두께를 다소 증가할 경우 더 큰 안전성과 내구성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 5절 프리텐션과 부재의 시공 중 거동 예측 기술

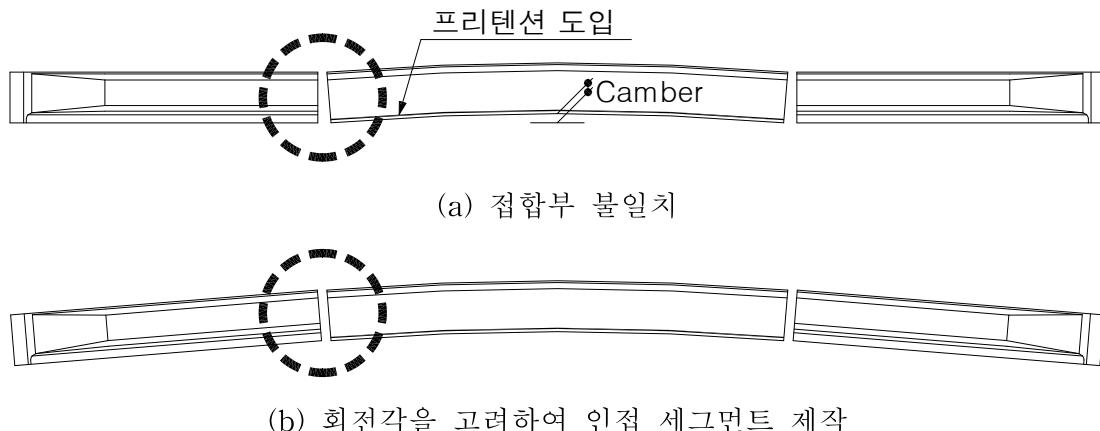
### 1. 연구개요

제안 기술인 분절거더는 공장에서 작은 단위로 분할 제작되고 현장에서 조립되므로 세그먼트 제작 시 필요한 부위에 프리텐션을 도입할 수 있고, 이렇게 프리텐션이 도입된 분절 거더는 운반 시 균열을 방지할 수 있으며 필요한 부분에만 프리스트레스를 도입함으로써 경제성을 향상시킬 수 있다.

최종적으로 현장에서 전체 세그먼트를 조립할 때에는 포스트텐션 방식을 적용하게 되는데 일부 세그먼트에만 프리텐션을 도입하게 되면 프리텐션에 의하여 거더에 캠버가 발생되므로 현장에서 조립 시 연결부가 일치하지 않는 구조적 문제점이 발생할 수 있다.

그러므로 설계 단계에서는 세그먼트 조립 시점에서의 캠버를 정확하게 예측하는 설계 기술이 필요하고 공장에서는 프리텐션에 의하여 발생하는 회전각을 고려하여 인접 세그먼트를 제작하는 시공 기술이 필요하다.

2차년에는 프리텐션이 도입되는 중앙 세그먼트에 대하여 그 거동을 예측하고 계측을 통하여 예측값과 비교함으로써 거더 설계 기법을 검증하는 연구를 추가 수행하였다. 이로써 거더 설계기술의 고도화를 이룰 수 있을 것으로 기대한다.



[그림 3.5.1] 분절 거더에 프리텐션 도입 후 접합면 거동

프리텐션이 도입되는 세그먼트에서 긴장력은 강연선과 콘크리트 간의 부착에 의하여 전달되며 각 단면에서의 휨 및 전단 강도는 유효 긴장력의 크기에 비례하게 된다. 일반적으로 프리텐션 부재의 유효 긴장력은 전 부재에 걸쳐 일정하지만 양 단부에서는 유효 긴장력이 0이고 긴장력이 콘크리트로 전달되는 전달장 구간에서 선형적으로 증가하는 것으로 가정한다. 그러므로 부재 전체에서 전달장의 변동은 강도 뿐 아니라 부재 변형에도 영향을 미치게 된다.



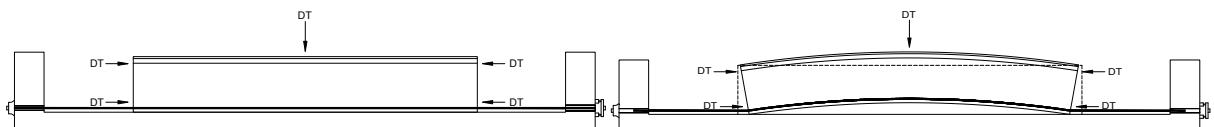
(a) 전달장의 개념 및 설계기준(도설. 2010)

(b) 긴장력 지연 전달이 가능 한 반력대

[그림 3.5.2] 프리텐션 전달장 개념 및 반력대

기존 연구에 의하면 산소 절단기나 그라인더로 강연선을 한 가닥씩 컷팅(cutting)하여 순간적으로 긴장력을 도입하게 되면 전달장이 상대적으로 길어질 뿐 아니라 제품 대량 생산 시 전달장이 일률적이지 않으므로 제품의 신뢰성이 떨어질 수 있다. 반면 전체 강연선을 동시에 천천히 일정한 속도로 이완시켜 부재에 긴장력을 도입하게 되면 상대적으로 전달장을 감소하게 되므로 강도면에서 유리하고 제품 대량 생산의 경우에도 전달장이 일정하여 동일한 변형량을 유발하므로 제품 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

그러므로 프리텐션 도입 세그먼트가 필요한 경우 이를 긴장력 지연 전달이 가능한 반력대에서 제작함으로써 항상 동일한 변형량을 발생하도록 시공 방법을 표준화한 후 이때의 캠버 및 단부 수직면의 회전각을 계측하고 계산에 의한 예측치와 비교함으로써 완성된 프리텐션 거더의 거동 예측 기술을 확보하고자 한다.



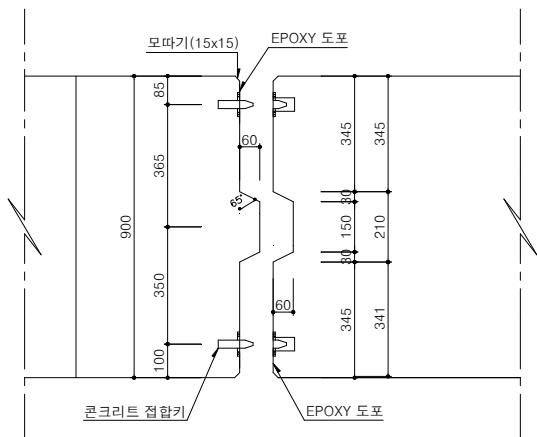
(a) 긴장력 도입 전

(b) 긴장력 도입 후

[그림 3.5.3] 프리텐션 세그먼트 변형량 계측 계획도

중앙부 세그먼트에 프리텐션을 도입한 경우에는 양 단부 세그먼트와 포스트텐션으로 조립하였을 때 거더가 일체화 된 선형을 유지할 수 있도록 세그먼트를 단부를 정밀하게 제작하고, 조립하는 기술을 습득해야 한다. 전자에 기술한 프리텐션 거더의 거동 예측 기술을 확보한 상태라면 중앙 세그먼트의 양 단 접합면에서 회전각을 고려하여 거더 조립 후에도 일체의 선형을 유지하도록 시공 가능할 것으로 기대된다.

거더 접합면에서는 전단력과 축 압축력의 조합 하중을 안전하게 전달할 수 있는 신뢰성 높은 구조 상세가 필요하다. 공동연구기관인 (주)장현산업은 기존에 자사의 분절거더 접합면에 적용해 오던 전단 저항 상세 기술을 보유하고 있으며 이미 수차례의 현장 적용을 거치며 성능 검증을 마친 상태이므로 현재 적용하고 있는 상세를 적용하고자 한다.



(a) 접합면 상세

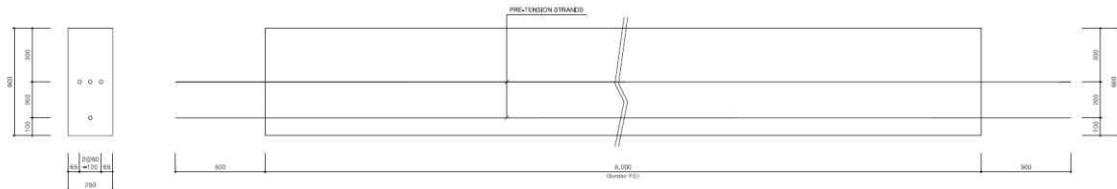


(b) 접합면 시공 사례

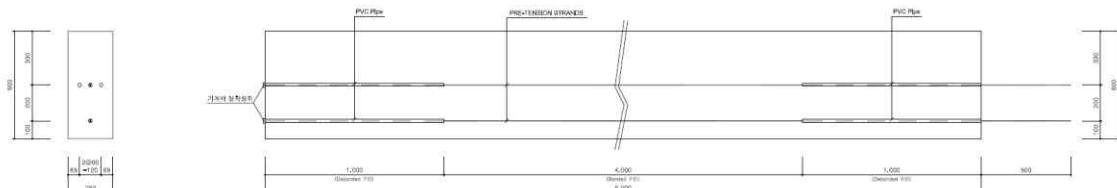
[그림 3.5.4] 분절거더 접합면 상세 및 시공 사례

## 2. 실험체 설계

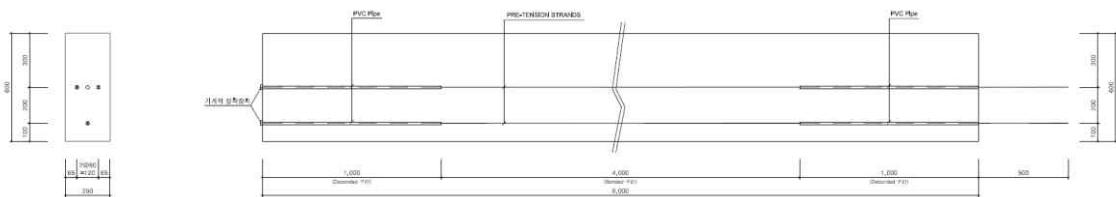
프리텐션 철근에 콘크리트 부착에 따른 거동 분석을 하기 위하여, 그림 1~3과 같이 3개의 실험체를 설계하였다. 3개의 실험체는 가로 250mm, 높이 600mm의 직사각형 단면으로 총 8,000mm 으로 길이로 설계하였다. 프리텐션 철근은 단면의 최 하단에서 300mm에 간격 60mm 간격으로 3개의 철근을 단면의 최 하단에 100mm 중간지점에 1개 총 4개의 철근을 배치하였다. 이렇게 배치한 이유는 실험체에 따라 단면 중립축의 변화가 크게 없도록 하도록 하기 위해서이다. 프리텐션 철근에 콘크리트 부착은 100%라 가정하였을 경우, 총 8,000mm 의 길이에 양단에서 1,000구간은 Debonded구간으로 설정 부착률에 따라 PCV Pile을 설치하여 철근과 콘크리트가 부착이 없도록 하였다.



(a) 부착률 100% 실험체 도면



(b) 부착률 50% 실험체 도면



(c) 부착률 25% 실험체 도면

[그림 3.5.5] 부착률에 따른 프리텐션 거동 예측 실험체 개략도

### 3. 실험체 제작

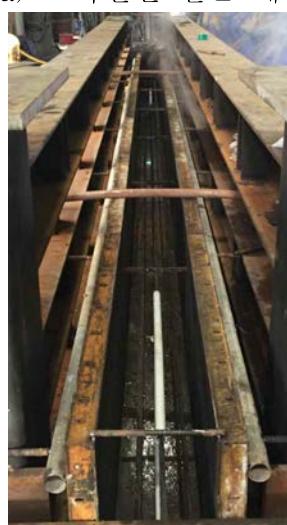
프리텐션 실험체 제작 과정은 첫 번째로 프리텐션을 도입할 수 있는 지그를 제작하였다. 이후, PS 강선을 배치 후, PS 강선에 부분 부착을 하기 위하여 PVC관을 삽입하였다. PS 강선을 항복강도의 70%인 1680kN으로 긴장 후, 콘크리트를 타설하였으며, 양생 이후 디텐션을 통하여 PS 강선에 긴장력을 도입하였다.



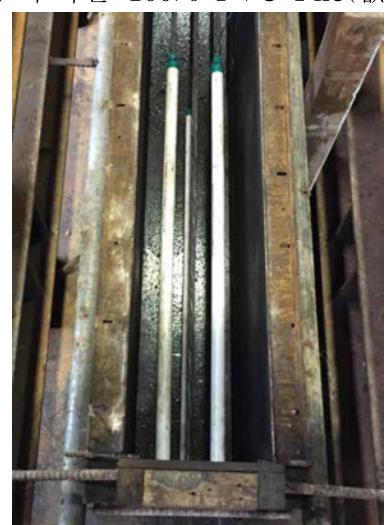
(a) 프리텐션 철근 배치



(b) 부착률 100% PVC Pile(없음)



(c) 부착률 50% PVC Pile



(d) 부착률 25% PVC Pile

[그림 3.5.6] 부착률에 따른 PVC Pile 배치도



(a) 거푸집 설치



(b) PS 강선 배치



(c) PS 강선 고정



(d) PS 강선에 변형률 게이지 부착



(e) PS 강선 긴장력 도입



(f) 콘크리트 타설



(g) 디텐션에 의한 긴장력 도입

[그림 3.5.7] 실험체 제작과정

실험체 제작에 사용된 콘크리트 재료 특성은 콘크리트 공시체를 제작하여, 대우건설기술 연구소에서 콘크리트 압축 강도 실험을 수행하였으며, [표 3.5.1]에는 대우건설기술연구소에서 수행된 실험체 별 콘크리트 압축강도를 정리하였다.

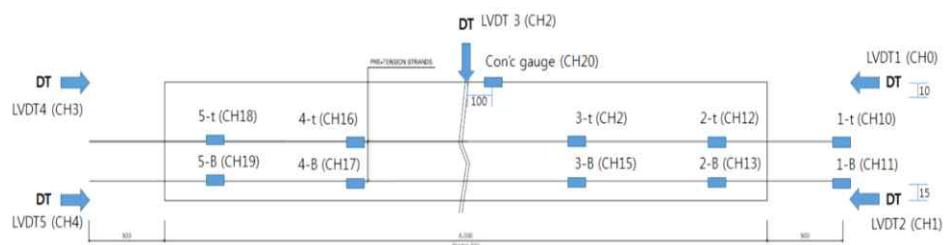
[표 3.5.1] 실험체 별 콘크리트 압축강도

실험체	설계강도 (MPa)	콘크리트 압축강도(MPa)	
		긴장력 도입 시	재하 실험 시
부착률 100%	40	32.7	49.2
		35.9	46.8
		34.6	47.6
부착률 50%	40	35.4	44.1
		34.5	37.5
		33.9	38.1
부착률 25%	40	30.0	38.3
		21.2	31.1
		28.9	33.0

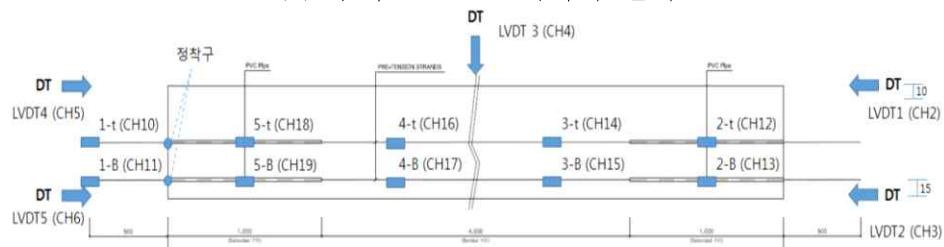
#### 4. 실험방법

##### 가. 긴장력 도입

긴장력 도입 시 실험체 충격이 가해지지 않도록 1분 간격으로 50kN씩 긴장력을 도입하였다. 긴장력이 도입되면서 실험체 중앙부 솟음량과 단부 회전각을 측정하기 위하여 그림 4와 같이 실험 중앙부 및 양단에 LVDT를 설치하였다. 또한, 긴장력이 도입되면서 강선의 변형률을 측정하기 위하여 변형률 계이지를 [그림 3.5.8]과 같이 부착하였다.



(a) 부착률 100% 계이지 설치



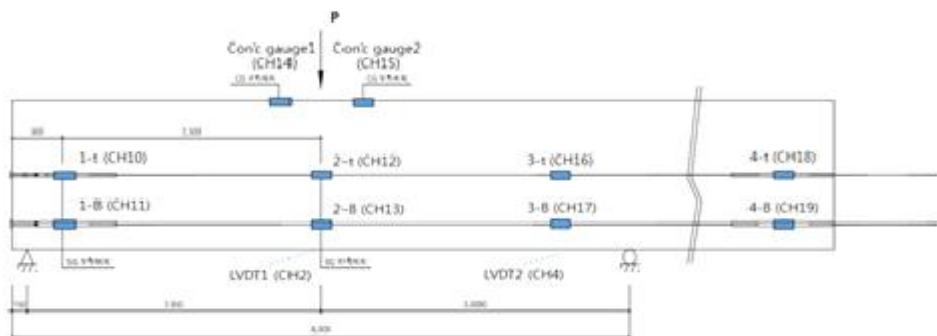
(b) 부분 부착률 50%, 25% 계이지 설치

[그림 3.5.8] 긴장력 도입

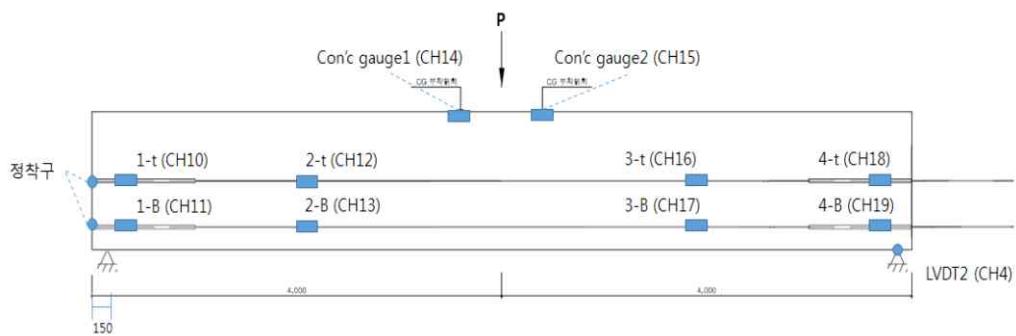
### 나. 3점 재하 실험

3점 재하 실험 방법은 [그림 3.5.9]와 같다. 부착률 100% 실험의 경우 지점사이의 거리를 6m으로 하여 실험을 수행하였으며, 부분 부착률 50%, 25% 실험의 경우 지점사이의 거리를 8m으로 실험을 수행하였다. 실험에 수행된 가력장치 200kN의 유압실린더를 사용하였으며, Load Cell을 설치하여 재하 되는 하중을 측정하였다. 하중은 최초 휨균열이 관측될 때까지는 2kN/min 으로 재하 하고, 균열 발생 이후 4kN/min으로 재하 하였다. 부착률 100% 실험과 달리, 부분 부착률 50%, 25% 실험의 경우 3점 재하실험에서 왼편 끝단 강선에 정착구를 설치하여 긴장력 도입 이후 정착구 설치가 미치는 영향을 알아보았다.

실험에서 재하 되는 하중-변위 곡선을 그리기 위하여, 하중 재하점에 LVDT를 설치하여 실험체의 처짐을 계측하였으며, 재하 되는 하중에 따라 강선의 변형률을 측정하기 위하여 변형률 게이지를 [그림 3.5.9]와 같이 부착하였다.



(a) 부착률 100% 실험 Setting 및 게이지 설치



(b) 부착률 50%, 25% 실험 Setting 및 게이지 설치

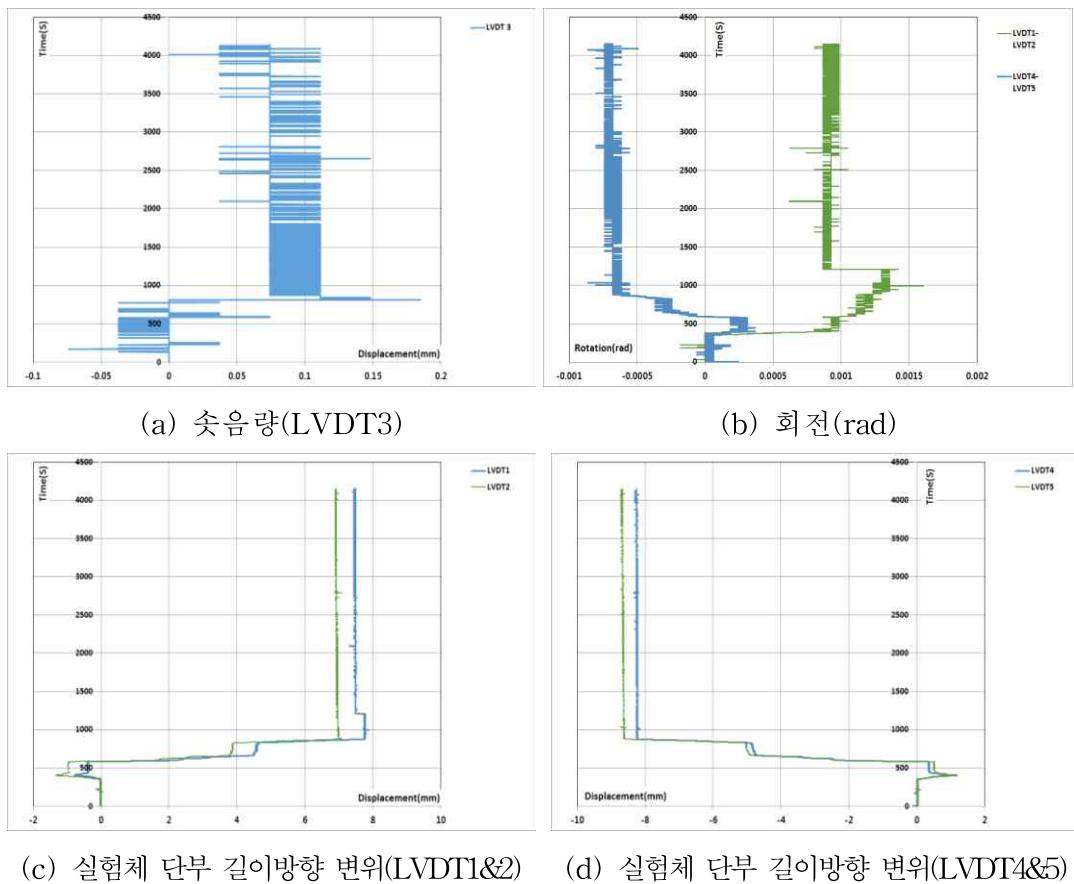
[그림 3.5.9] 3점 재하 실험 Setting

## 5. 실험 결과 및 분석

### 가. 긴장력 도입

#### (1) 부착률 100%

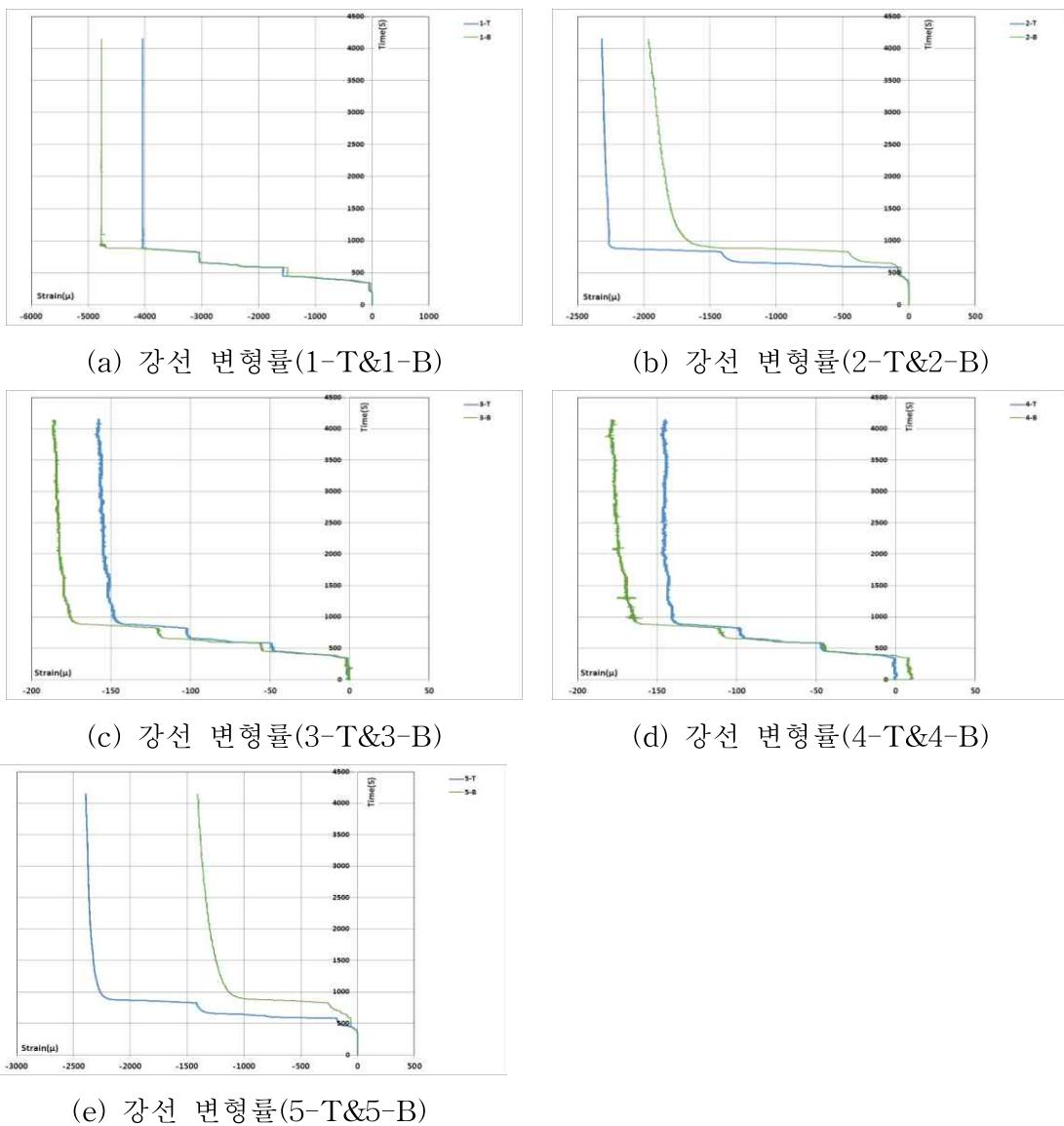
##### (가) 변위



[그림 3.5.10] 부착률 100% 긴장력 도입

긴장력 도입에 따라 부착률 100% 실험체의 거동을 보여주는 변위 및 회전량을 [그림 3.5.10]에 나타내었다. 부착률 100%의 실험체는 긴장력 도입에 이론 솟음량 0.99mm의 18%인 최대 0.18mm의 솟음량을 보였다. 또한, 이론 회전량은 0.001672(rad)으로, 오른쪽 끝단에서 0.0016(rad) 이론식과 비슷한 회전량을 보였으며, 왼쪽 끝단은 0.0008(rad)만큼 회전하였다.

#### (나) 변형률

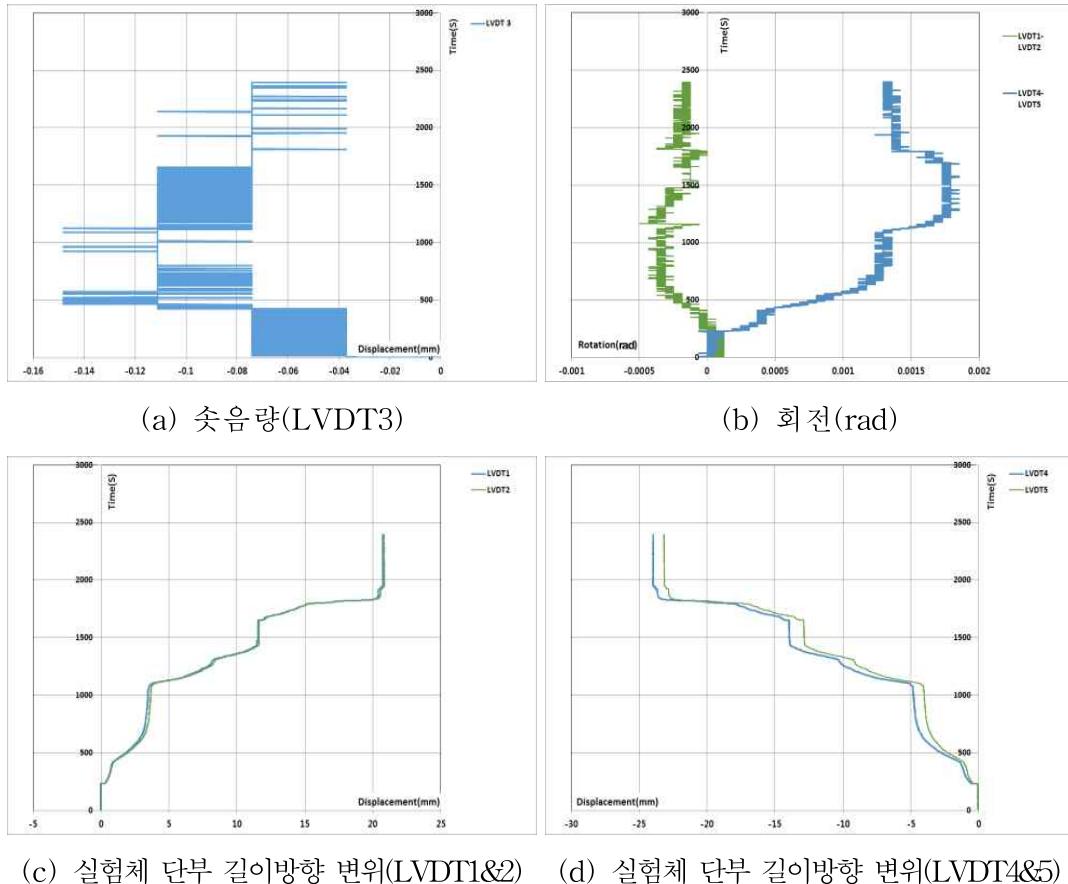


[그림 3.5.11] 부착률 100% 긴장력 도입

긴장력 도입에 따라 부착률 100% 실험체의 강연선에 발생하는 변형률을 [그림 3.5.11]에 나타내었다. 콘크리트와 부착되지 않은 강선 1-T와 1-B는 도입되는 긴장력에 따라 압축 변형을 발생하고 있으며, 콘크리트와 부착된 2-T부터 5-B까지는 실험체 단부로부터 떨어진 거리에 따라 발생하는 변형률이 작아졌다. 실험체 양단에 가까운 2-T, 2-B & 5-T, 5-B는 1-T와 1-B에 가까운 변형률이 나타났으며, 실험체 양단에 멀리 떨어진 3-T, 3-B & 4-T, 4-B는 작은 변형률을 나타냈다.

## (2) 부분 부착률 50%

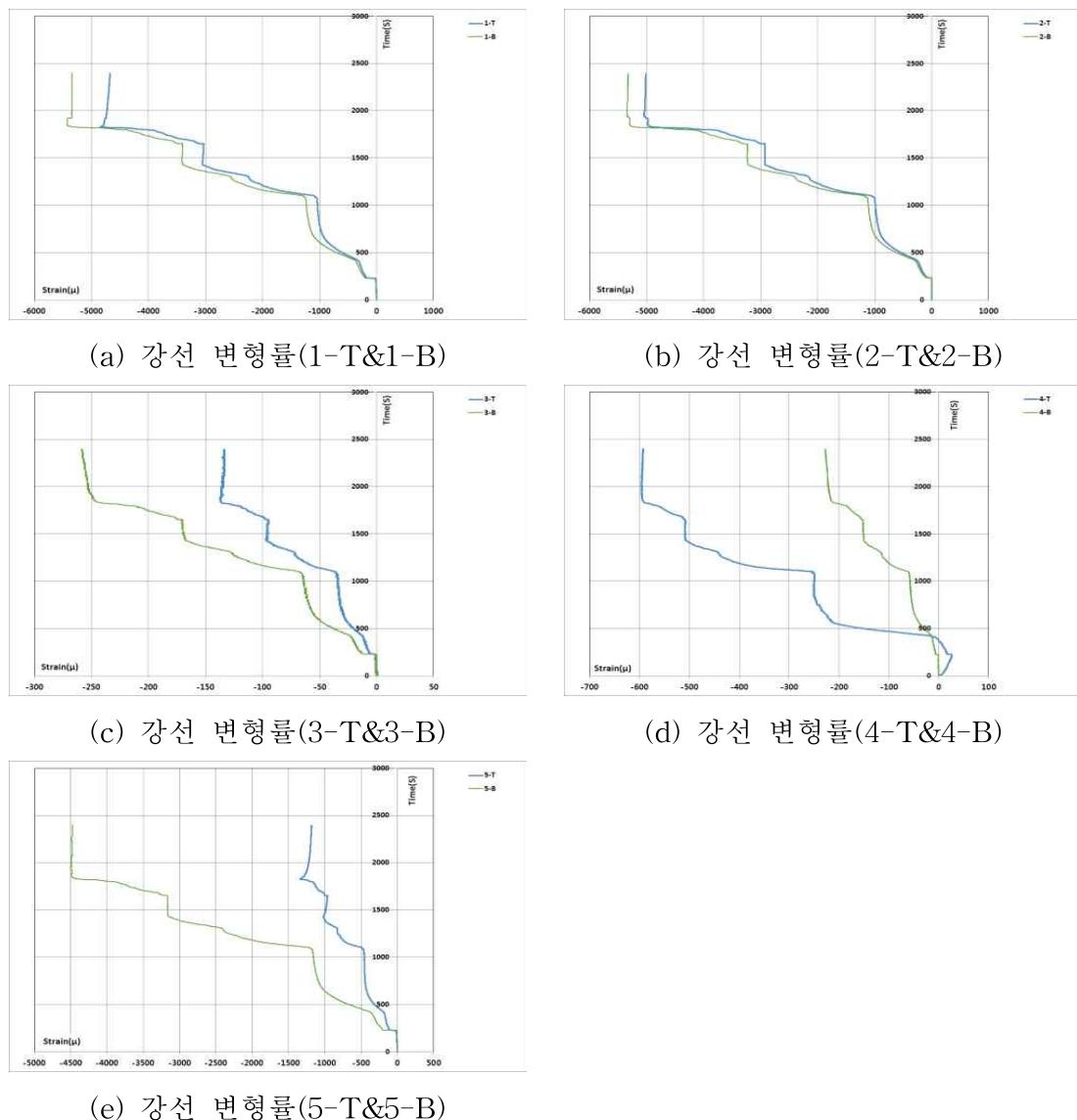
### (가) 변위



[그림 3.5.12] 부분 부착률 50% 긴장력 도입

긴장력 도입에 따라 부분 부착률 50% 실험체의 거동을 보여주는 변위 및 회전량을 [그림 3.5.12]에 나타내었다. 부분 부착률 50%의 실험체는 긴장력 도입에 따라 최대 0.15mm의 쳐짐을 보였다. 또한, 이론 회전량은 0.001672(rad)으로, 왼쪽 끝단에서 0.0018(rad) 이론식과 비슷한 회전량을 보였으며, 왼쪽 끝단은 0.0005(rad)만큼 회전하였다.

## (나) 변형률

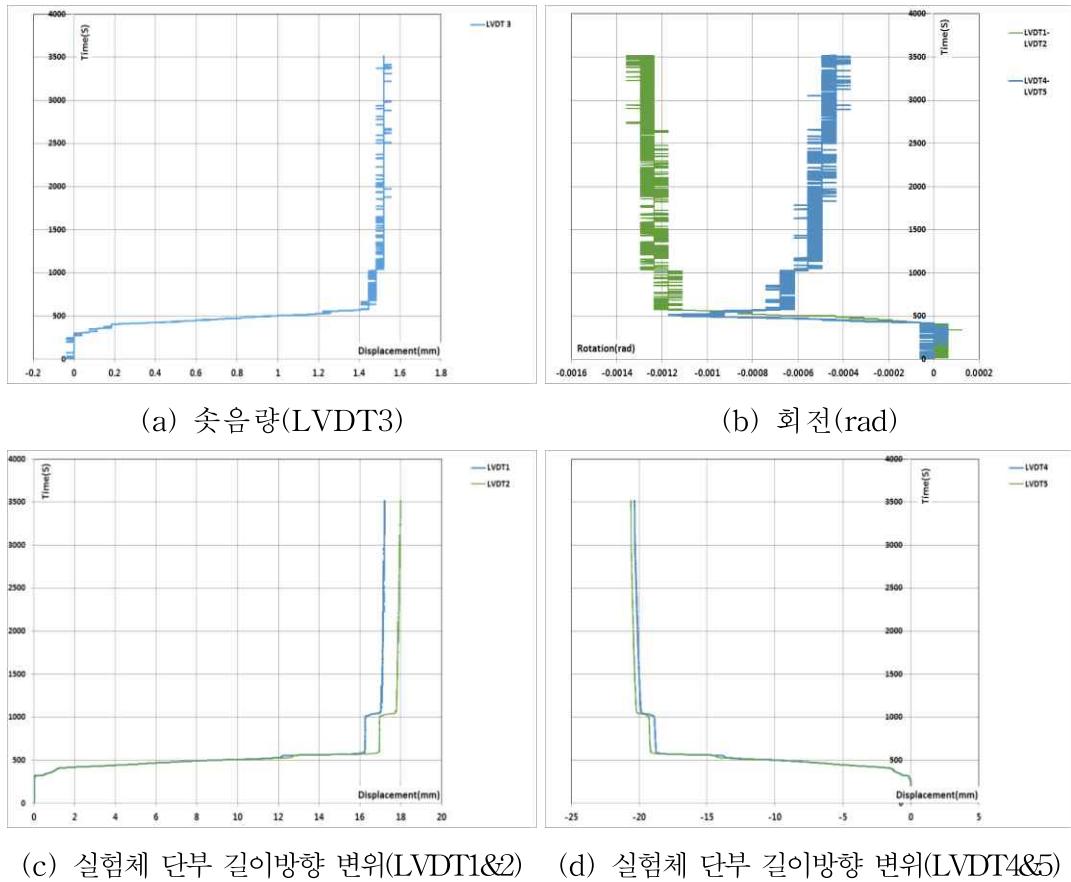


[그림 3.5.13] 부분 부착률 50% 긴장력 도입

긴장력 도입에 따라 부분 부착률 50% 실험체의 강연선에 발생하는 변형률을 [그림 3.5.13]에 나타내었다. 콘크리트와 부착되지 않은 강선 1-T와 1-B는 도입되는 긴장력에 따라 압축 변형을 발생하고 있으며, 콘크리트와 부착된 2-T부터 5-B까지는 실험체 단부로부터 떨어진 거리에 따라 발생하는 변형률이 작아졌다. 실험체 양단에 가까운 2-T, 2-B & 5-T, 5-B는 1-T와 1-B에 가까운 변형률이 나타났으며, 실험체 양단에 멀리 떨어진 3-T, 3-B & 4-T, 4-B는 작은 변형률을 나타냈다.

### (3) 부분 부착률 25%

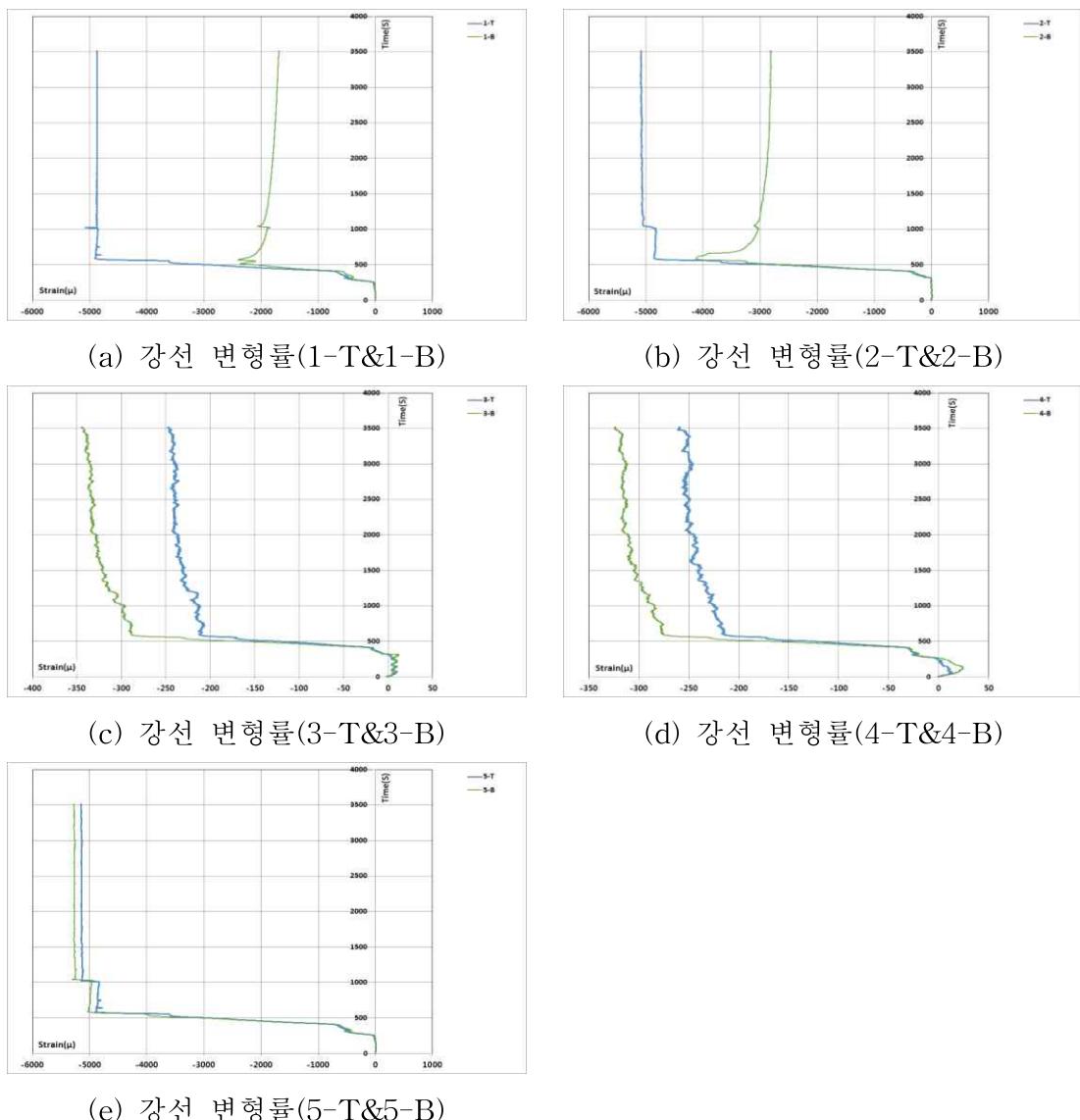
#### (가) 변위



[그림 3.5.14] 부분 부착률 25% 긴장력 도입

긴장력 도입에 따라 부분 부착률 25% 실험체의 거동을 보여주는 변위 및 회전량을 [그림 3.5.14]에 나타내었다. 부분 부착률 25%의 실험체는 긴장력 도입에 이론 솟음량 0.99mm의 155%인 최대 1.56mm의 솟음량을 보였다. 부분 부착률 25%의 실험체는 긴장력 도입에 따라 최대 1.5mm의 처짐을 보였다. 또한, 이론 회전량은 0.001672(rad)으로, 원쪽 끝단에서 -0.00135(rad) 이론식과 비슷한 회전량을 보였으며, 원쪽 끝단은 -0.0011(rad)만큼 회전하였다.

## (나) 변형률



[그림 3.5.15] 부분 부착률 25% 긴장력 도입

긴장력 도입에 따라 부분 부착률 25% 실험체의 강연선에 발생하는 변형률을 [그림 3.5.15]에 나타내었다. 콘크리트와 부착되지 않은 강선 1-T와 1-B는 도입되는 긴장력에 따라 압축 변형을 발생하고 있으며, 콘크리트와 부착된 2-T부터 5-B까지는 실험체 단부로부터 떨어진 거리에 따라 발생하는 변형률이 작아졌다. 실험체 양단에 가까운 2-T, 2-B & 5-T, 5-B는 1-T와 1-B에 가까운 변형률이 나타났으며, 실험체 양단에 멀리 떨어진 3-T, 3-B & 4-T, 4-B는 작은 변형률을 나타냈다.

## (4) 소 결

긴장력 도입에 따라 부착률 100%, 50% 25% 실험체의 솟음량 및 회전량을 표 1에 정리하였다. 3개 실험체의 솟음량은 이론식으로 계산된 솟음량과 상당히 큰 오차를 보였다. 이는 철근 콘크리트 흔 부재의 캠버가 크리프 콘크리트 및 강선의 이완 수축 등의 실험조건 등이 부재에 영향을 미쳐 발생된 오차라고 판단된다. 프리스트레스 거더의 캠버는 시공오차를 줄이기 위하여 지속적인 유지관리가 필요하며, 캠버의 정확한 산정은 실험체의 온도 및 습도 등 부재에 영향을 미치는 인자가 고려되어야 할 것으로 판단된다.

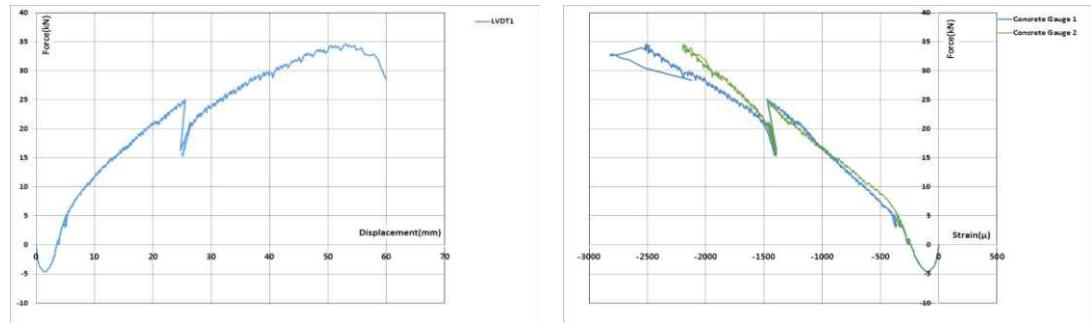
[표 3.5.2] 솟음량 및 회전량

		솟음량(mm)		회전각(rad)		비고
이론값		0.997	(100%)	0.001672	(96%)	
계 측 값	부분부착률 100%	0.18	(18%)	0.0016	(95%)	
				0.0008	(47%)	
	부분부착률 50%	-0.15	(-15%)	0.0018	(107%)	
				0.0005	(30%)	
	부분부착률 25%	1.56mm	(155%)	-0.00135	(-80%)	
				-0.0011	(-65%)	

## 나. 3점 재하 실험

### (1) 부착률 100%

#### (가) 변위



(a) 하중-변위 곡선(LVDT1)

(b) 상단 콘크리트 변형률(Concrete Gauge 1&2)

[그림 3.5.16] 부착률 100% 3점 재하 실험

3점 재하 실험을 수행하여 부착률 100% 실험체의 하중-변위 곡선 및 상단 콘크리트 변형률을 [그림 3.5.16]에 나타내었다. 하중의 크기가 5kN 일 때, 중앙 거더 하부면 초기 휨 균열이 발생하였다. 이후 하중이 증가함에 따라 전단지간에서 휨 균열 발생이 진전되었다. 하중의 크기가 34kN 일 때, 콘크리트 상단에서 압축 파괴가 발생되면서, 단부 끝까지 균열이 발생되어 실험이 종료되었다.



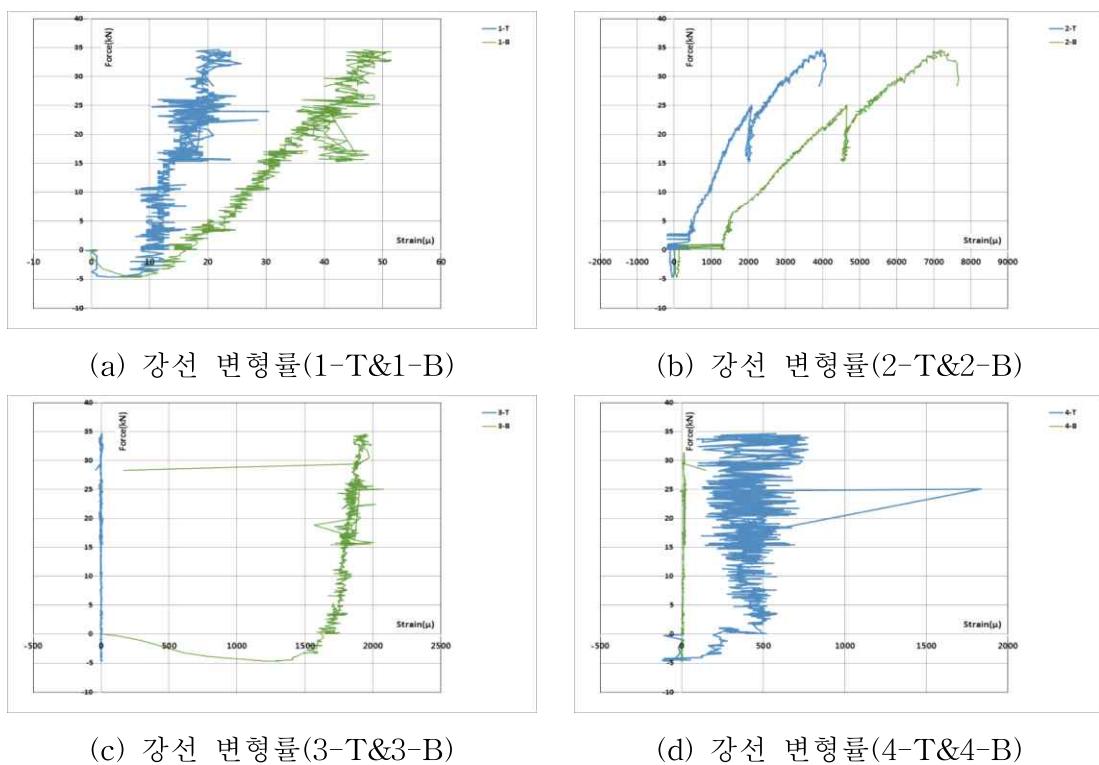
(a) 초기 휨 균열



(b) 실험체 파괴

[그림 3.5.17] 초기 휨 균열 및 파괴

#### (나) 변형률

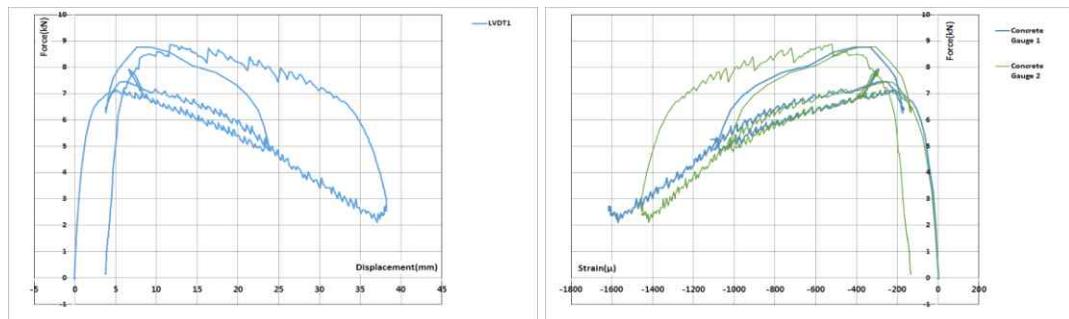


[그림 3.5.18] 부착률 100% 3점 재하 실험

3점 재하 실험을 수행하여 부착률 100% 실험체 강선에 부착된 변형률을 [그림 3.5.18]에 나타내었다. 재하 되는 하중의 크기가 증가 할수록, 양단에 가까운 강선은 변형률이 작은 반면, 실험체 중앙에 가까운 강선에서는 많은 인장 변형률이 발생하였다.

(2) 부분 부착률 50%

(가) 변위



(a) 하중-변위 곡선(LVDT1)

(b) 상단 콘크리트 변형률(Concrete Gauge 1&2)

[그림 3.5.19] 부분 부착률 50% 3점 재하 실험

3점 재하 실험을 수행하여 부분 부착률 50% 실험체의 하중-변위 곡선 및 상단 콘크리트 변형률을 [그림 3.5.19]에 나타내었다. 하중의 크기가 7.7kN 일 때, 중앙 거더 하부면 초기 휨 균열이 발생하였다. 이후 하중이 증가함에 따라 중앙 지간에서 휨 균열이 진전되어 실험의 안전상 최대 하중 9kN까지 재하 하였다.



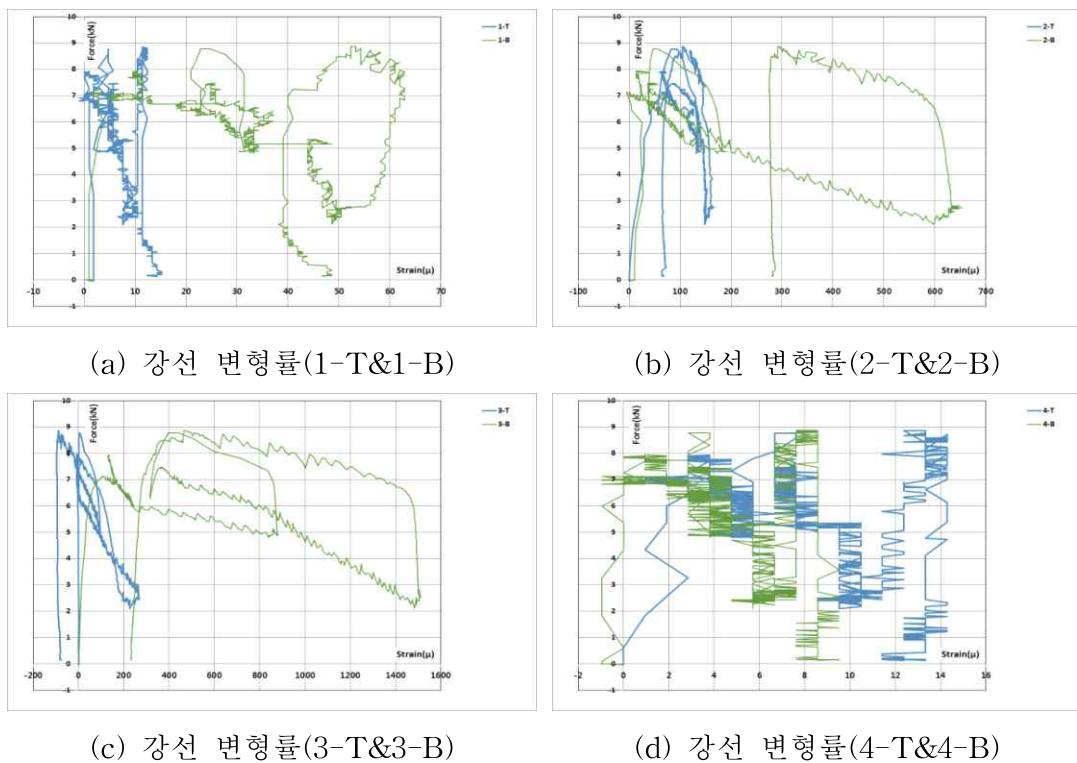
(a) 초기 휨 균열



(b) 최대 하중(9kN) 균열

[그림 3.5.20] 초기 휨 균열 및 균열

## (나) 변형률

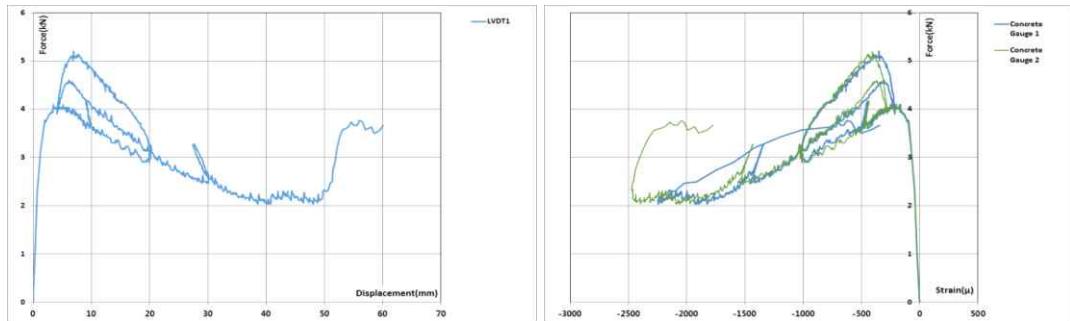


[그림 3.5.21] 부분 부착률 50% 3점 재하 실험

3점 재하 실험을 수행하여 부분 부착률 50% 실험체 강선에 부착된 변형률을 [그림 3.5.21]에 나타내었다. 부분 부착률 50%인 3점 재하 실험에서도 하중의 크기가 증가 할수록, 양단에 가까운 강선은 변형률이 작은 반면, 실험체 중앙에 가까운 강선에서는 많은 인장 변형률이 발생하였다. 부착률 100%인 3점 재하 실험체와는 달리, 부분 부착률 50%인 3점 재하실험에서는 왼편 끝단 강선에 정착구를 설치하여 긴장력 도입 이후 정착구 설치가 미치는 영향을 알아보았다. 실험체 왼편 끝단 강선에 정착구를 설치한 1-T와 1-B에 발생한 변형률은 실험체 오른편 끝단 강선에 정착구를 설치하지 않은 4-T와 4-B에 발생된 변형률보다 다소 크게 발생하였다.

(3) 부분 부착률 25%

(가) 변위



(a) 하중-변위 곡선(LVDT1)

(b) 상단 콘크리트 변형률(Concrete Gauge 1&2)

[그림 3.5.22] 부분 부착률 25% 3점 재하 실험

3점 재하 실험을 수행하여 부착률 25% 실험체의 하중-변위 곡선 및 상단 콘크리트 변형률을 [그림 3.5.22]에 나타내었다. 하중의 크기가 4kN 일 때, 중앙 거더 하부면 초기 흠 균열이 발생하였으며, 하중의 크기가 5.13kN 일 때 콘크리트 상부에서 압축파괴가 발생되면서, 부착된 철근까지 균열이 발생되어 파괴되었다.



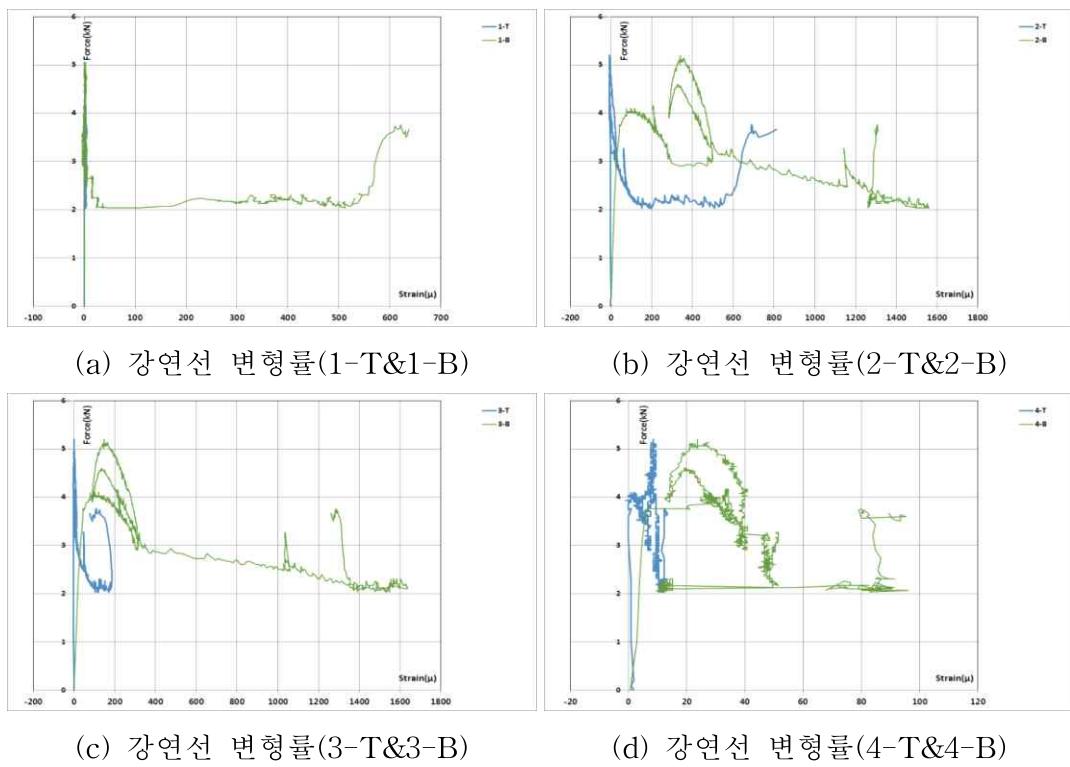
(a) 초기 흠 균열



(b) 실험체 파괴

[그림 3.5.23] 초기 흠 균열 및 파괴

## (나) 변형률



[그림 3.5.24] 부분 부착률 25% 3점 재하 실험결과

3점 재하 실험을 수행하여 부착률 25% 실험체 강선에 부착된 변형률을 [그림 3.5.24]에 나타내었다. 부착률 25%인 3점 재하 실험에서도 하중의 크기가 증가 할수록, 양단에 가까운 강선은 변형률이 작은 반면, 실험체 중앙에 가까운 강선에서는 많은 인장 변형률이 발생하였다. 부착률 100%인 3점 재하 실험체와는 달리, 부착률 25%인 3점 재하 실험에서는 왼편 끝단 강선에 정착구를 설치하여 긴장력 도입 이후 정착구 설치가 미치는 영향을 알아보았다. 실험체 왼편 끝단 강선에 정착구를 설치한 1-B에 발생한 변형률은 실험체 오른편에 끝단 강선에 정착구를 설치하지 않은 4-B에 발생된 변형률보다 다소 크게 발생하였다.

## (4) 소 결

강선의 부착률 100%, 50% 25% 실험체의 3점 재하 실험의 결과를 표 4에 정리하였다. 실험체 강선의 부착률은 구조물의 응력에 영향을 미치며, 구조물의 균열 및 파괴 거동에 영향을 미친 것으로 판단된다. 특히 부분 부착률 50%, 25%의 경우 중립축 하단에 배치된 강선의 비 부착구간 영향으로 강선의 정착 길이가 더욱 짧아져서 실험체의 강도가 감소되는 원인이라 판단된다.

[표 3.5.3] 균열 강도 및 극한강도

		균열강도(kN·m)	극한강도(kN·m)	비고
계 측 값	부착률 100%	15	102	
	부분 부착률 50%	30.8	36	
	부분 부착률 25%	16	20	

부착률 100%인 3점 재하 실험체와는 달리, 부분 부착률 50%와 25%인 3점 재하실험에서는 원편 끝단 강선에 정착구를 설치하여 긴장력 도입 이후 정착구 설치가 미치는 영향을 알아보았다. 실험 결과 정착구를 설치한 강선은 정착구를 설치하지 않은 강선보다 큰 변형률을 발생시키며 정착구의 구속효과는 있는 것으로 판단된다. 하지만 정착구 설치로 인한 정량적인 정착구의 구속효과는 추가적인 수치해석 및 실험적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

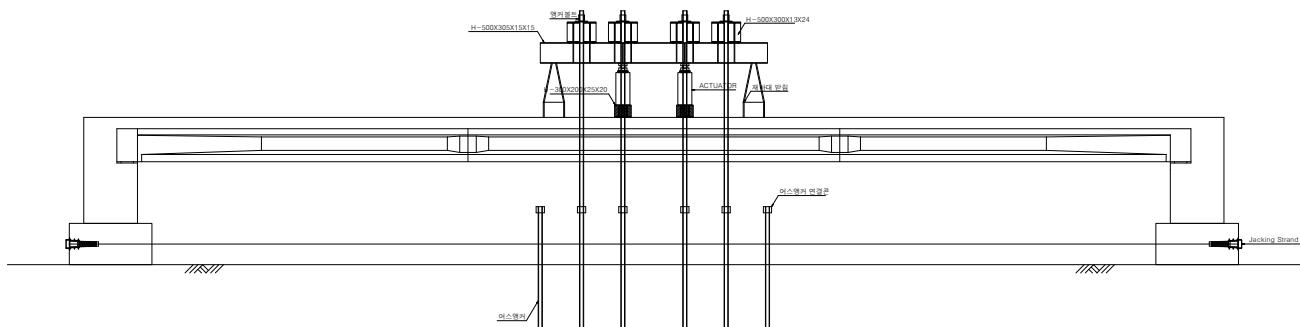
- 프리텐션 거더는 도입되는 긴장력에 의하여 거더 중앙부의 솟음량 및 양단부에 회전각이 발생하여 시공오차를 발생시킨다. 특히 프리텐션 거더에 발생되는 솟음량과 회전각은 강선의 이완, 콘크리트 크리프 등의 재료특성과 온도, 습도 등의 주변 환경의 영향을 받기 때문에 정확히 예측할 수 없다. 본 실험에서 3개 실험체의 솟음량은 이론식으로 계산된 솟음량과 비교 하였을 경우, 상당히 큰 오차를 보였다. 프리스트레스 거더의 캠버는 시공오차를 줄이기 위하여 지속적인 유지관리가 필요하며, 프리텐션 거더의 정확한 솟음량 및 회전각의 정확한 산정을 위해서는 실험체의 온도 및 습도 등 부재에 영향을 미치는 인자가 고려되어야 할 것으로 판단된다.
- 프리텐션 거더에서 PS 강선을 직선으로 배치할 경우, PS 강선의 일부를 부분 비부착하는 기법은 거더 단부 상연의 균열을 억제하지만, 프리텐션 거더의 강도가 저하되는 단점을 가진다. 부분 비 부착 기법에 따라 프리텐션 거더를 제작하였으며, 3점 재하 실험을 수행하여 프리텐션 거더의 강도와 파괴형상을 분석하였다. PS 강선의 부착률 100%, 50% 25% 3점 재하 실험의 결과를 부분 부착률에 따라 상당히 감소된 휨 강도를 나타내었다. 이는 부분 부착률 50%, 25%의 경우 중립축 하단에 배치된 강선을 비 부착구간으로 인하여 강선의 정착 길이가 더욱 짧아져서 프리텐션 거더의 휨 강도가 감소된 것으로 판단된다.
- 또한, 부착률 100%인 3점 재하 실험체와는 달리, 부착률 50%와 25%인 3점 재하실험에서는 원편 끝단 강선에 정착구를 설치하여 긴장력 도입 이후 정착구 설치가 미치는 영향을 알아보았다. 실험 결과 정착구를 설치한 강선은 정착구를 설치하지 않은 강선보다 큰 변형률이 발생하며 정착구의 구속효과는 있는 것으로 판단된다. 하지만 정량적인 정착구의 구속효과는 추가적인 수치해석 및 실험적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 실험체의 제작 과정으로부터 당초 계획처럼 분절거더의 중앙 세그먼트에 프리텐션을 도입하는 계획은 실제 도입해야 할 긴장력이 미미하여 추가되는 공정과 증가되는 인건비 대비 비용 손실이 더 큰 것으로 판명되었다. 그러므로 최종 개발 제품은 포스트텐션 단독 기법으로만 긴장력을 도입하기로 결정하였다.

## 6절 시제품 성능 평가 실험

### 1. 시제품 제작 목적 및 실험 계획

분절 거더의 접합부에서 구조적 안정성, 거더 자체의 휨강도 및 처짐을 포함한 사용성 평가를 위하여 실 교량과 동일한 규모의 시제품을 설계 완료하고, 제작하여 성능 평가 실험을 공개로 수행하고자 한다.

처짐이나 단면 파괴 강도 등 계측 값은 설계를 통하여 예측한 실구조물의 거동과 일치하는지는 검토하고 이를 통하여 설계 단면의 적정성을 평가하도록 한다.



[그림 3.6.1] 실물 실험체 개략도(L=30.0m)

실물 실험을 통하여 검토하고자 하는 또 하나의 주제는 상부 거더와 교대 및 말뚝의 하중 분담률에 대한 가정이 계측량과 일치하는가 하는 문제이다. 본 연구의 핵심적인 기대성과 중 하나는 기존 일체형 교량시스템에 비하여 고강성의 말뚝기초를 사용함으로써 거더 하중의 일부를 말뚝으로 전이시키고 거더의 형고를 감소시키는 것이다. 그러므로 설계 단계에서는 PSC 거더의 사용하중 범위 내에서 상하부 구조 간 하중 분담률을 정확히 예측하고 말뚝의 적정 소요 강성을 제시할 수 있어야 하고, 극한하중 범위 내에서는 전체 시스템에 걸쳐 연성 파괴를 유도할 수 있는 설계가 필요하다. 본 실험에서는 시제품에 대한 이러한 설계가 실제 거동과 일치하는가를 비교 검토하게 된다.

부재 강성비에 따른 내력 분배율과 사용하중을 초과한 이후 파괴까지의 시스템 전체의 거동을 파악하기 위해서는 비선형 유한요소해석 등의 기법이 필요한데 이때 구성한 해석 모델을 대상으로 거더 접합면, 거더-교대 접합면, 교대-말뚝 접합면 등 취약구조로 예상되는 각 접합부의 최대응답도 함께 파악할 수 있을 것으로 기대한다.

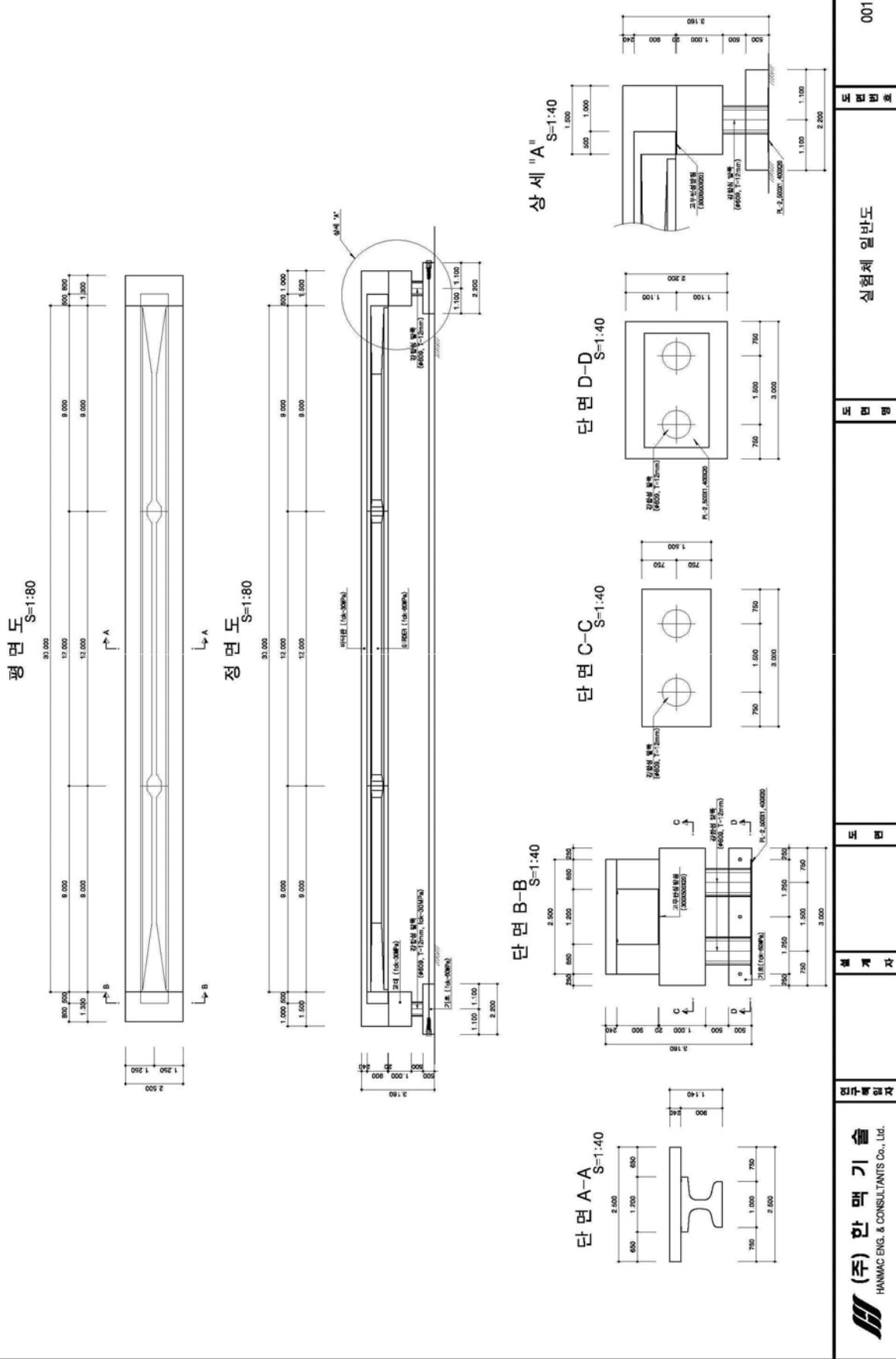
## 2. 실험체 설계

실물 실험체는 총 지간 30m의 일체식 교량으로, 총 3개의 분절거더로 구성되며, 교량의 말뚝은 강합성 말뚝으로 설계되었다. [표 3.6.1]은 실물 실험체의 제원이며, [그림 3.6.2] 부터 [그림 3.6.11]까지는 각 부재별 제원을 보이고 있다.

[표 3.6.1] 실물실험체 제원

지 간	30m ( 9m + 12m + 9m)
실험체 높이	3,160mm
거더 높이	900mm
슬래브 높이	240mm
Tendon(3EA)	Φ 15.2mm - 11가닥
강합성 말뚝 높이	500mm
강관 직경	Φ 609mm
강관 두께	12mm

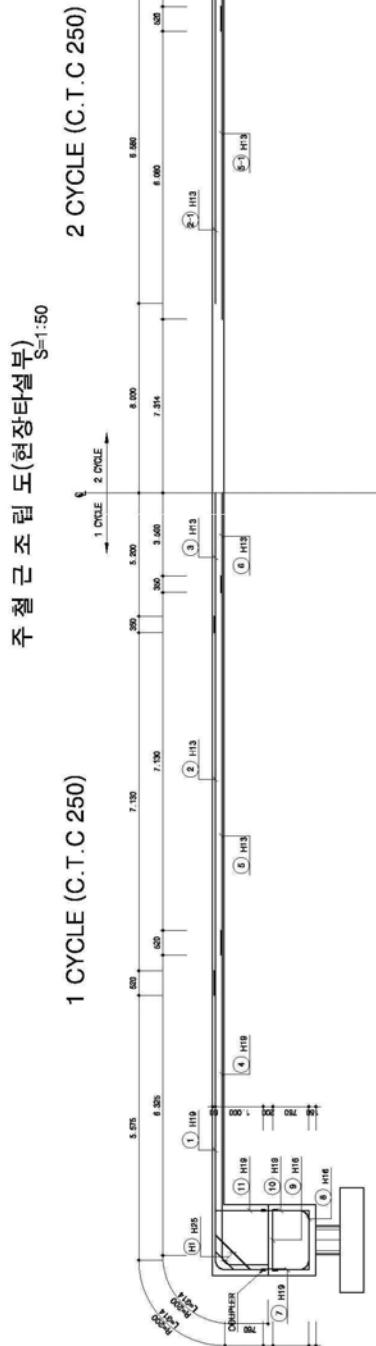
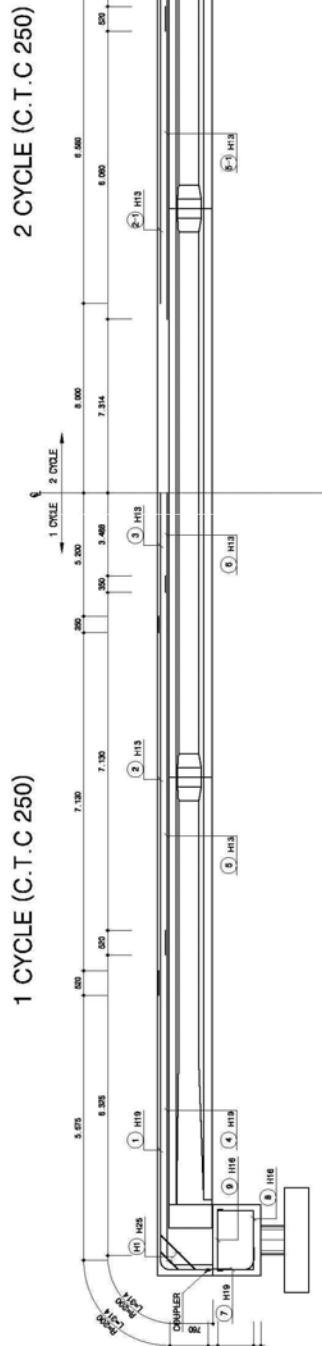
## 실험체 일반도



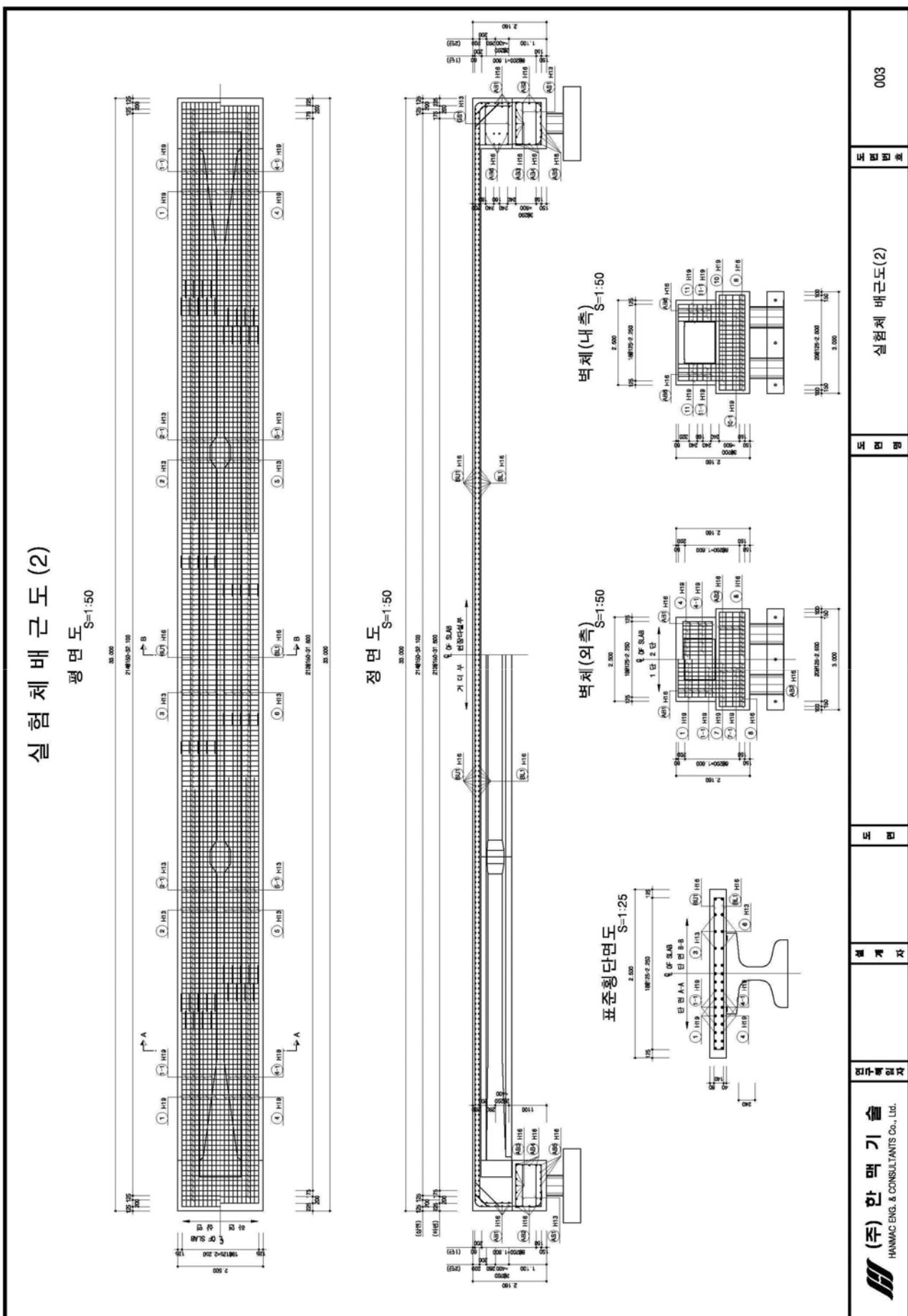
[그림 3.6.2] 실물실험체(L=30.0m) 일반도

실험체배근도(1)

주 철 근 조 립 도(거 더 부)  
S=1:50



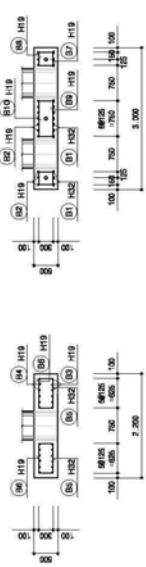
[그림 3.6.3] 실물실험체( $L=30.0\text{m}$ ) 배근도(1)



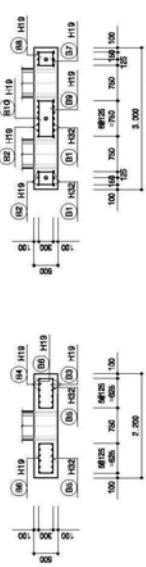
[그림 3.6.4] 실물실험체( $L=30.0m$ ) 배근도(2)

### 실험체 배근도 (3)

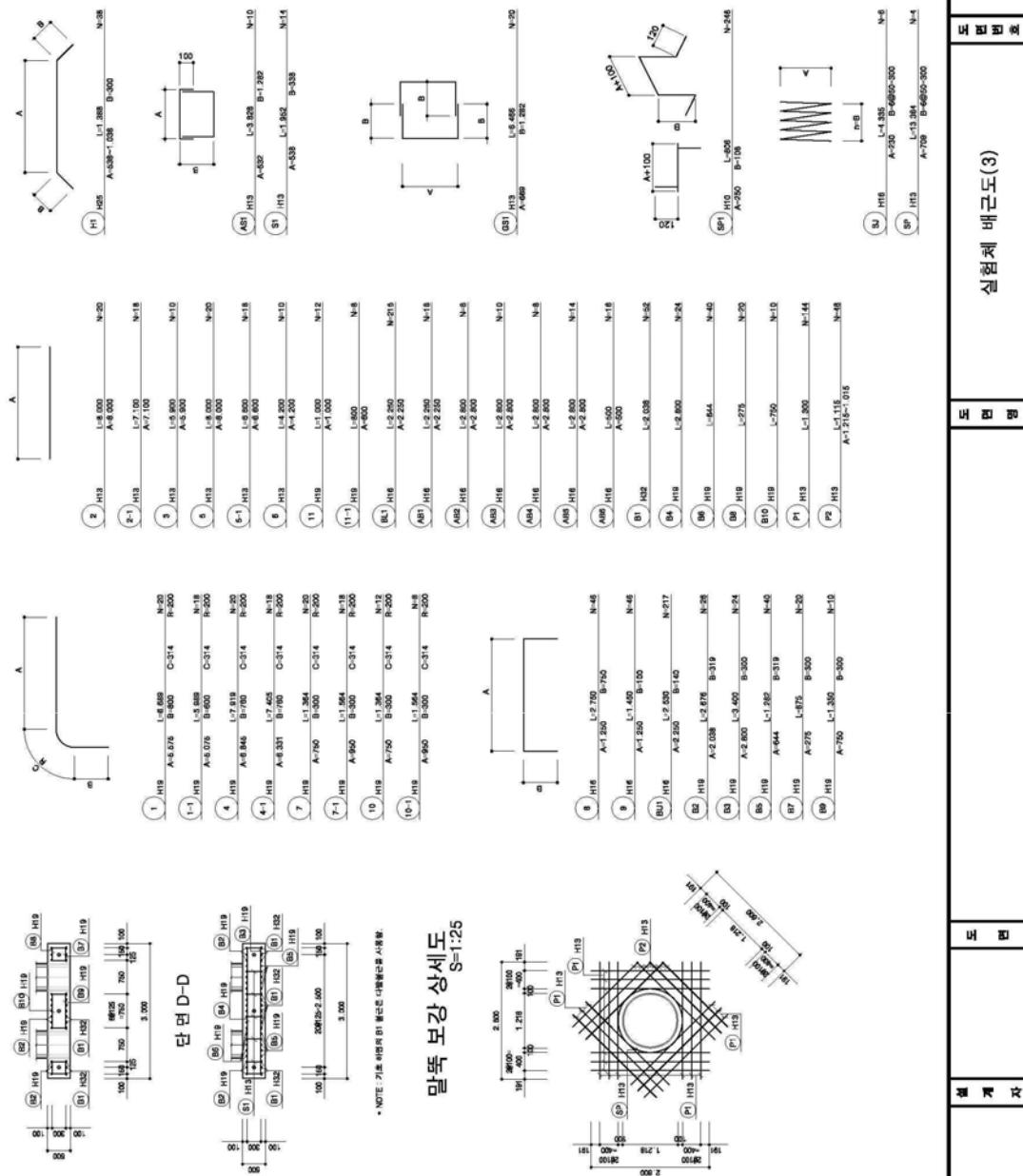
정면도  
S=1:50  
단면 A-A



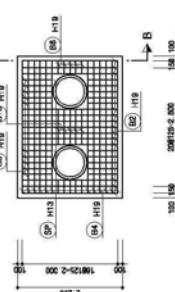
단면 C-C



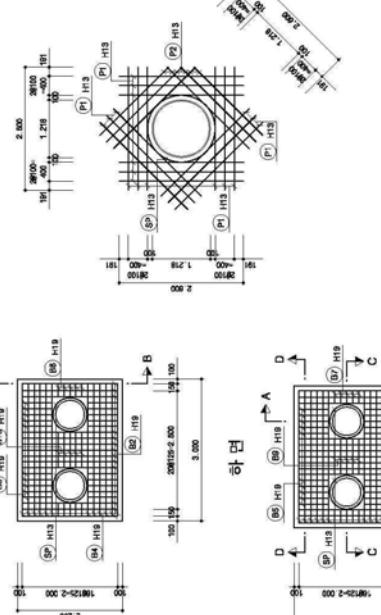
철근상세도



기초 평면도  
S=1:50  
상단

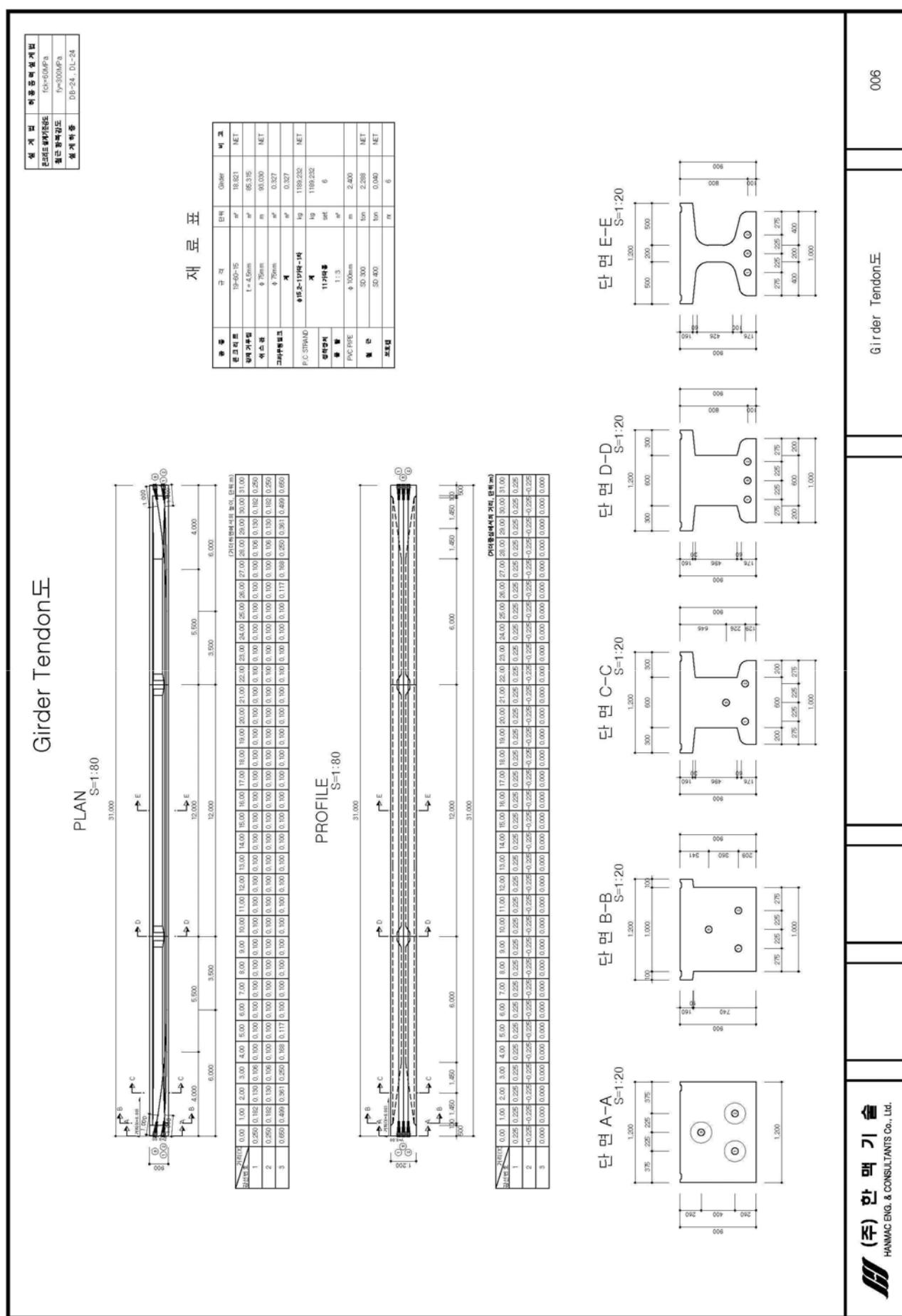


하면

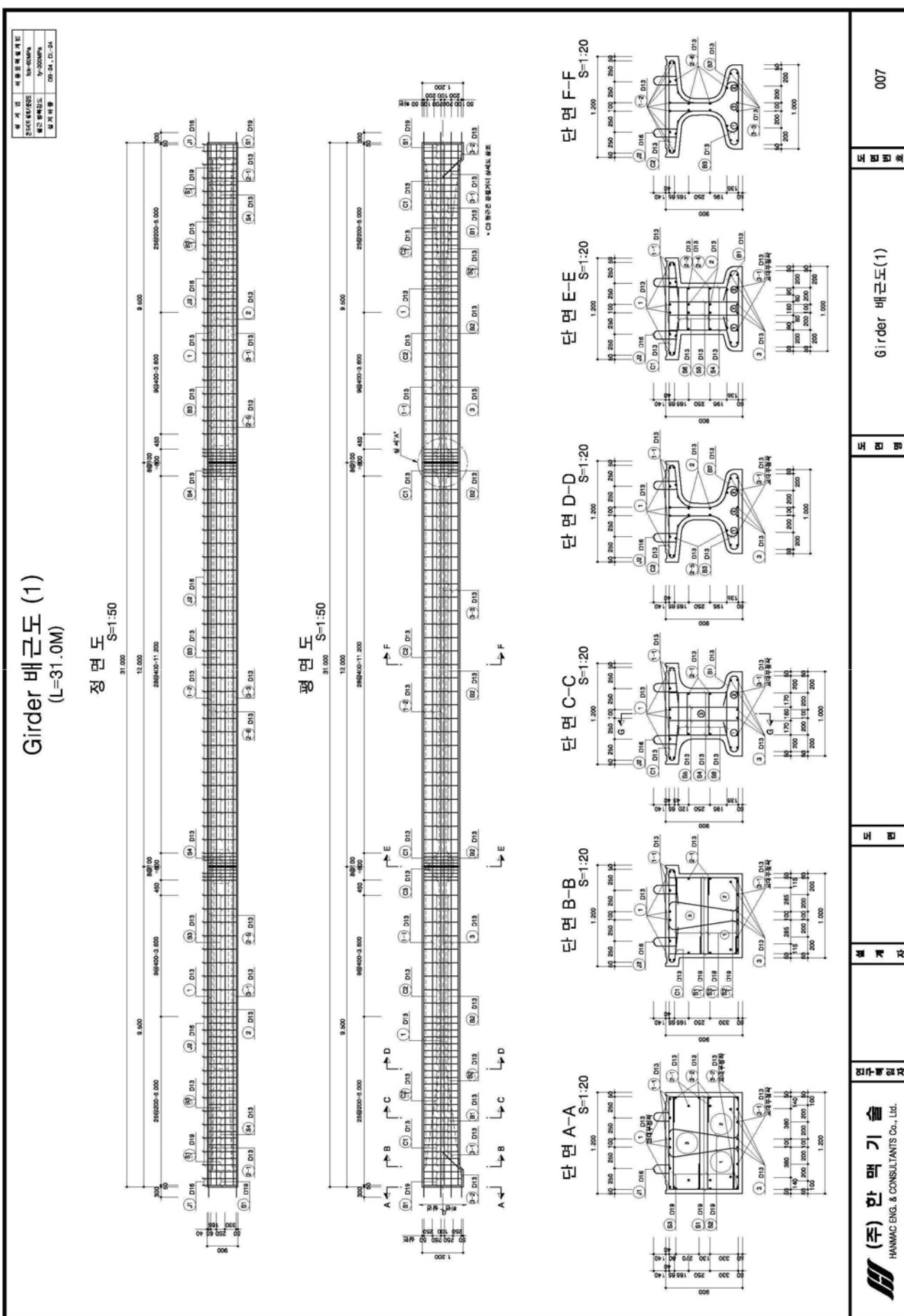


한국기계설계		도면번호	
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.		004	004

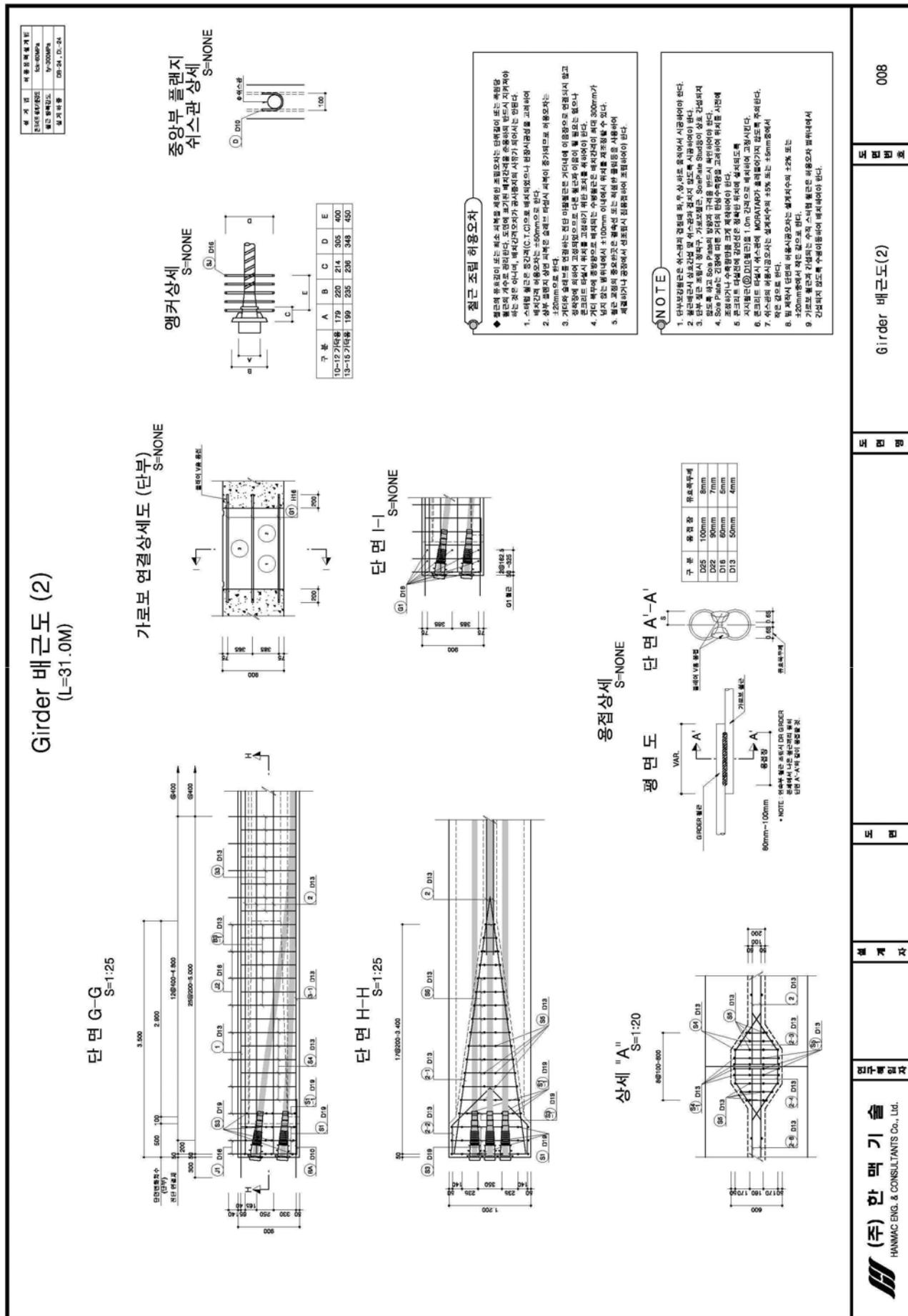
[그림 3.6.5] 실물실험체(L=30.0m) 배근도(3)



[그림 3.6.6] 실물실험체( $L=30.0\text{m}$ ) 거더 텐던도 및 일반도

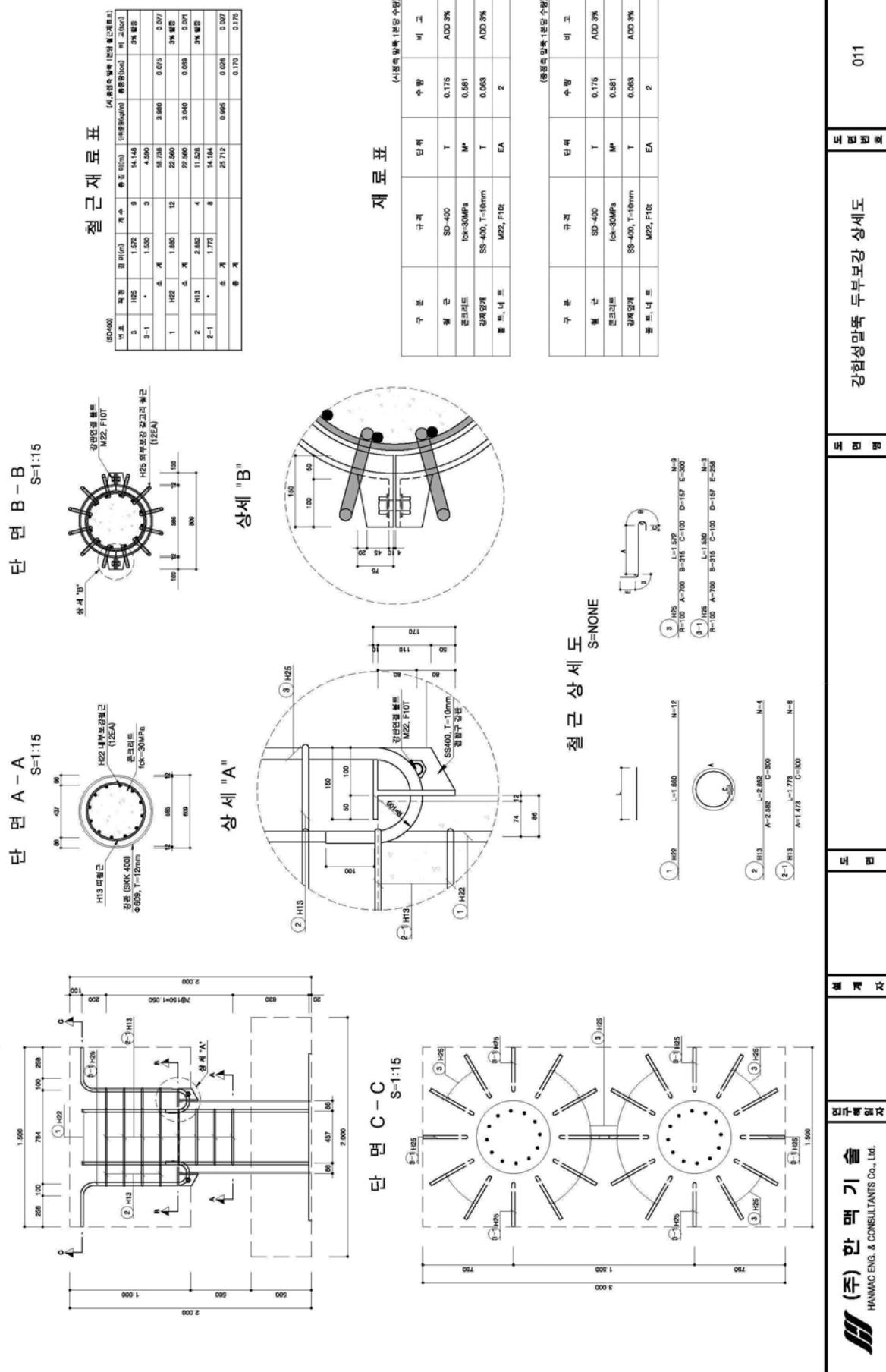


[그림 3.6.7] 실물실험체(L=30.0m) 거더 배근도 (1)

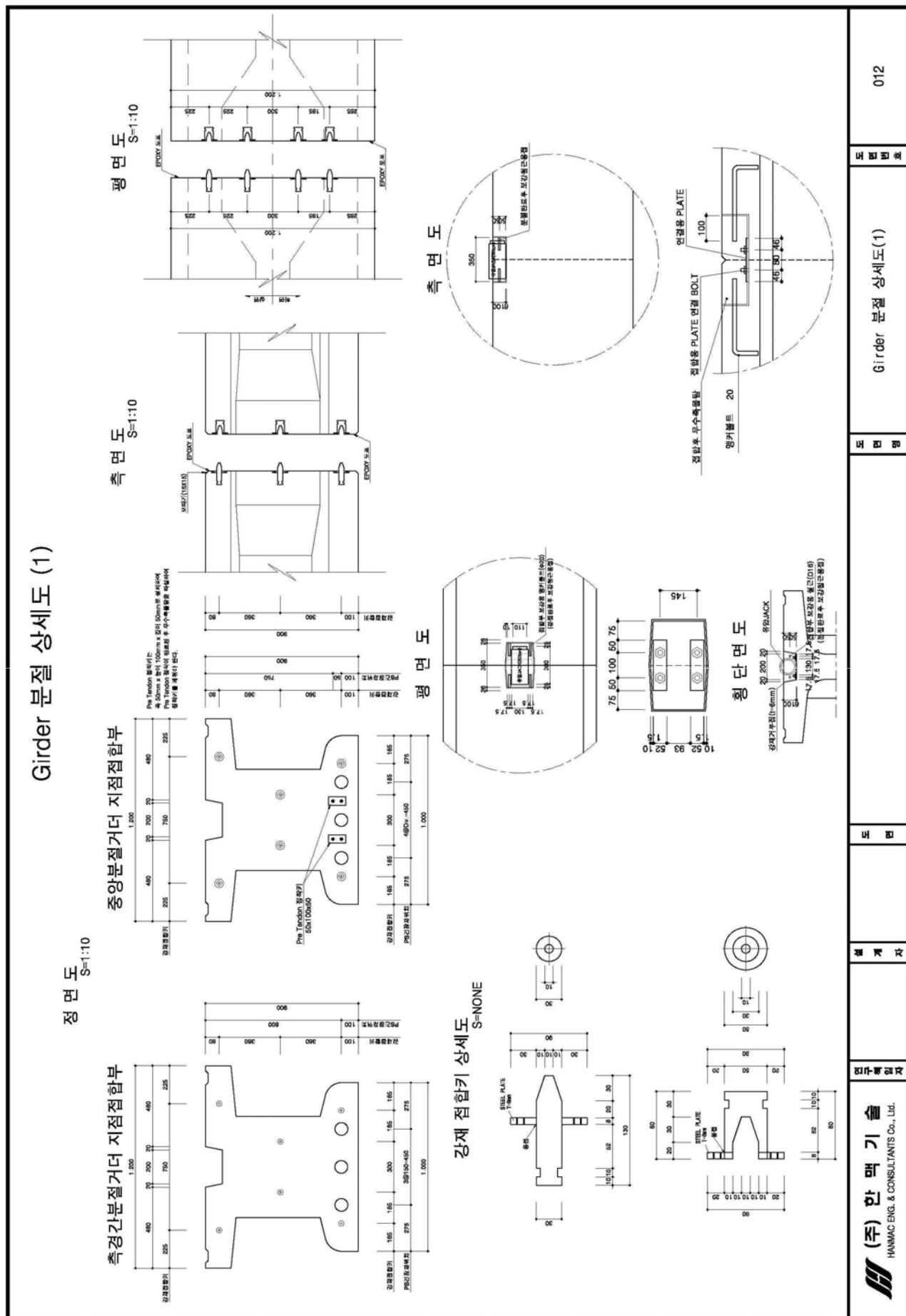


[그림 3.6.8] 실물실험체( $L=30.0\text{m}$ ) 거더 배근도 (2)

강합성말뚝 두부보강 상세도



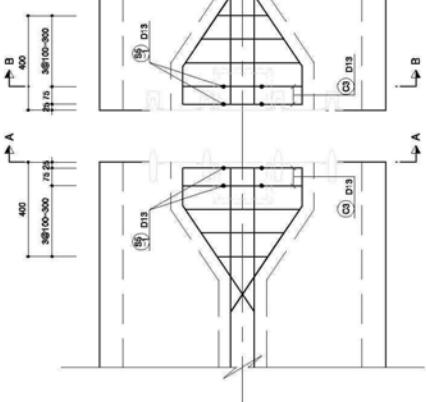
[그림 3.6.9] 실물실험체( $L=30.0\text{m}$ ) 강합성말뚝 두부보강 상세도



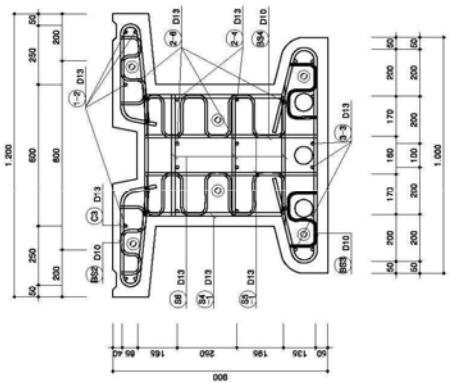
[그림 3.6.10] 실물실험체( $L=30.0\text{m}$ ) 거더 분절 상세도 (1)

Girder 분절 상세도 (2)

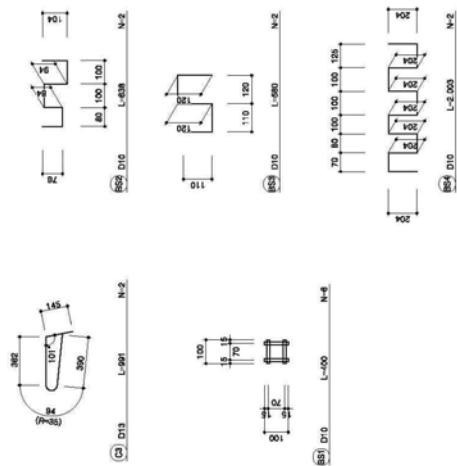
S=1:10



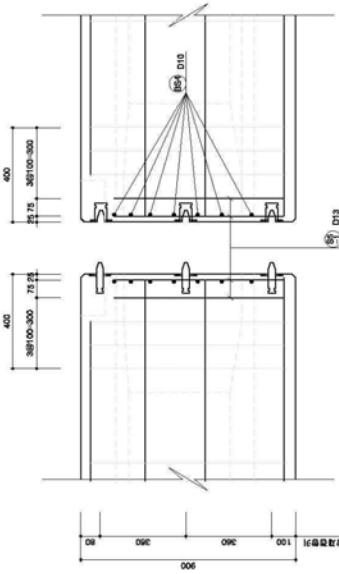
단면 A-A  
S=1:10



S=NONE



정면도 S=1:10



단면 B-B

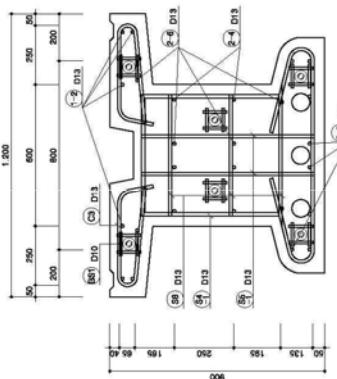


표 료 재 자 근 철

번호	설정부수별 단위				단위별 설정부수	설정부수당부수	설정부수당부수	기단위	비고(비)
	적	설	설	설					
C5	D13	0.881	2	1.882	0.885	0.005	0.005	3% 설정	
B51	D10	0.000	6	2.000				3% 설정	
B52	-	0.636	2	1.276					
B53	-	0.600	2	1.160					
B54	-	2.003	2	4.006	0.860	0.005	0.020	0.021	
소 계				8.842	0.860	0.007	0.028	0.029	

**HANMAC** (주) 한맥기술  
HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.

013  
도법학  
Girder 분절 상세도(2)

[그림 3.6.11] 실물실험체( $L=30.0\text{m}$ ) 거더 분절 상세도 (2)

### 3. 실험체 제작

#### 가. 제작 공정

실물 실험체의 제작 공정은 크게 4부분으로 기초부, 교대부, 거더부 및 슬래브로 구분되었다. 실험체 제작은 제작의 편이성 및 실험을 수행할 수 있는 공간 등의 문제로, 충남 당진에 위치한 (주)장현산업 야지에서 이루어졌다.

기초부 제작은 먼저 레벨 측량을 하여 실험체 제작 후 하중에 의한 처짐이나 기타 변형을 방지하고 수평을 유지하도록 하였다. 기초 하단에 시공한 콘크리트 블록은 실제 교량에서 없는 부분으로 실물 실험에서 CFT Pile의 거동을 관찰하기 위해서 지면 위에 제작하였다. 실험 중 구조물의 과도한 변형 및 안전사고를 방지하기 위하여 콘크리트 블록 사이에 강선을 연결하였다.

CFT Pile의 강관은 설치의 편의와 기초부와의 완전 결합 및 수평과 수직을 유지하기 위하여 강관의 바닥부에 (500mm × 1,400mm × 20mm)의 사각 철판을 위에 용접을 통하여 부착하였다. 교대부 철근 배근과 함께 CFT Pile의 두부 보강을 위한 J형 갈고리 철근 및 이음부 보강철근을 배근하였으며, 교대 콘크리트를 타설하면서 동시에 강관 Pile의 내부를 충진 하여 CFT Pile을 시공하였다.

60MPa의 고강도 콘크리트가 사용된 거더부는 총 길이 30mm으로 3개의 분절거더 (9m + 12m + 9m)에 Φ15.2mm 7연선 11가닥으로 이루어진 3개의 Tendon을 긴장하여 연결하였다. 분절 세그먼트는 Tendon의 항복응력 70%인 1,560kN의 인장력을 포스트텐션 방식으로 도입 체결하여 분절 거더를 일체화 하였으며, 크레인으로 일괄 인양하여 교대에 거치하였다.

실제 교량의 경우 프리캐스트 바닥판 등으로 추가 공기 절감이 가능하겠으나 실험체의 경우 바닥판 하면에 전면 동바리를 설치한 후 슬래브 철근을 배근하였다. 이후 슬래브의 종 방향 철근과 교대의 연직철근을 이음 함으로써 거더와 교대 연결부의 철근 조립을 완성하였다.

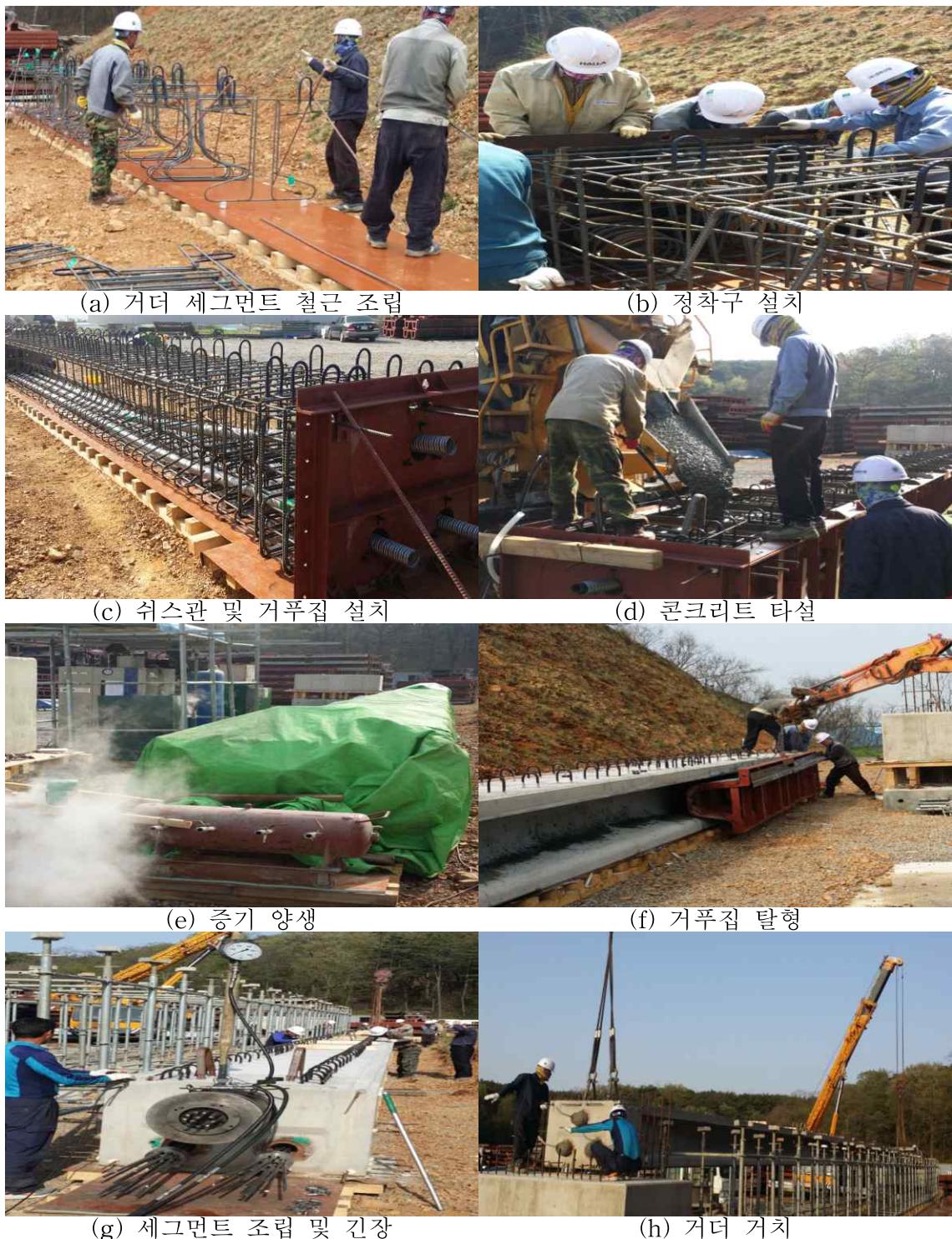
실험은 슬래브 콘크리트 타설 이후 만 34일째 장현산업 제작장에서 수행하였으며, 콘크리트 압축 강도 재료실험은 (주)장현산업의 자체 연구소에서 시험하였다. 실험체 제작공정에 따라 단계별 과정을 사진으로 나타내었다



[그림 3.6.12] 실험시설 구축 및 CFT 말뚝 시공



[그림 3.6.13] CFT 말뚝 두부 보강 및 교대부 시공



[그림 3.6.14] 거더 세그먼트 제작 및 조립



[그림 3.6.15] 슬래브 시공 및 구조물 완공

## 나. 재료 시험 성적

실물 실험체 제작 시, 콘크리트 타설은 제작 공정에 따라 기초부, 교대부, 거더부, 슬래브에 총 4번을 타설하였으며, 공정별 총 22개의 공시체를 만들었다. 콘크리트 압축강도 시험 공시체는 구조 실험체와 동일 장소에서 동일 방법(증기양생)으로 양생하고, 실험체와 동일 장소 동일한 환경에서 보관하였다. 기초부 및 거더부 콘크리트는 28일 설계강도를 60MPa으로 교대부 및 슬래브는 30MPa을 목표로 하였으며, 콘크리트 압축 강도 실험은 (주)장현산업의 만능 재료 시험기를 이용하여 수행되었다. (주)장현산업 자체 연구소에서 수행된 실물 실험체 제작 공정별 콘크리트 압축강도(MPa)는 [표 3.6.2]와 같다.

[표 3.6.2] 공정별 콘크리트 압축강도(MPa)

타설 일	제작 공정	설계 강도 (MPa)	Test No.	공시체 압축 강도 (MPa)	평균 강도 (MPa)	비고
4월 7일	기초부	60	Test 1	67.52	68.53	
			Test 2	75.24		
			Test 3	67.24		
			Test 4	70.17		
			Test 5	62.51		
4월 12일	교대부	30	Test 1	23.23	22.85	
			Test 2	22.21		
			Test 3	22.72		
			Test 4	22.98		
			Test 5	23.11		
4월 19일	거더부	60	Test 1	75.13	70.78	증기양생
			Test 2	67.99		
			Test 3	69.34		
			Test 4	70.67		
4월 29일	슬래브	30	Test 1	25.36	25.43	
			Test 2	24.39		
			Test 3	24.88		
			Test 4	25.12		
			Test 5	25.24		
			Test 6	26.63		
			Test 7	26.10		
			Test 8	25.73		



(a) 콘크리트 강도 실험 전



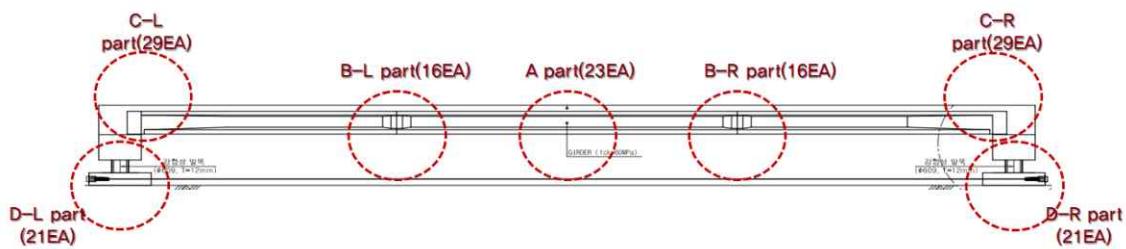
(b) 콘크리트 강도 실험 후

[그림 3.6.16] 만능 재료 시험기

## 4. 실험 계측 및 방법

### 가. 실험체 계측 위치

실물 실험체의 거동분석 및 성능 분석하기 위해서 [그림 3.6.17]과 같이 총 7개의 Part로 구분되어 총 160개의 변위계 및 변형률 게이지를 설치하였다. [표 3.6.3]에는 본 실물 실험체 실험에 사용된 계측 장비를 정리하였으며, [표 3.6.4]에는 실물 실험체 설치된 변위계 및 부착된 변형률 게이지의 부착위치와 게이지 번호를 정리하였다.



[그림 3.6.17] 센서 부착 위치

[표 3.6.3] 측정 장비 및 센서

항 목	Model 및 그림	용도	비 고
스트레인 게이지	FLA-5-11-3L		변형률 측정 (표면부착용)
스트레인 게이지	PL-60-11-3L		변형률 측정 (표면부착용)
변위계	CDP-50		변위 측정용
변위계	DT-100A		변위 측정용
Data Logger	TDS-303		정적 측정 장비 (30Ch)
스위치 BOX	SSW-50C		채널 확장 장비 (50CH)

[표 3.6.4] 게이지 부착 위치와 게이지 번호

게이지 부착위치		게이지 번호	비 고
A Part (23EA)	거더 하단	D21 ~ D23	Wire 변위계 3개
	거더 내부철근	SG-1 ~ SG-8	Steel gauge 8개
	슬래브 내부철근	GC-1 ~ GC-8	Steel gauge 8개
	슬래브 상단	Con-C1 ~ Con-C3	Concrete gauge 3개
	거더 하단	Con-D-C1	Concrete gauge 1개
B-L Part (16EA)	이음부 하단	D08 ~ D10	LVDT 변위계 3개
	슬래브 내부 철근	GJ-L1 ~ GJ-L10	Steel gauge 10개
	슬래브 상단	Con-L1 ~ Con-L3	Concrete gauge 3개
B-R Part (16EA)	이음부 하단	D11 ~ D13	LVDT 변위계 3개
	슬래브 내부 철근	GJ-R1 ~ GJ-R10	Steel gauge 10개
	슬래브 상단	Con-R1 ~ Con-R3	Concrete gauge 3개
C-L Part (29EA)	시공 Joint (교대&슬래브)	D06 ~ D07	LVDT 변위계 2개
	연결부 내부 철근	A-L-1 ~ A-L-15	Steel gauge 15개
	슬래브 상단	S1 ~ S10	Concrete gauge 10개
	거더 거치부	Con-D-L1 ~ Con-D-L2	Concrete gauge 2개
C-R Part (29EA)	시공 Joint (교대&슬래브)	D19 ~ D20	LVDT 변위계 2개
	연결부 내부 철근	A-R-1 ~ A-R-15	Steel gauge 15개
	슬래브 상단	S11 ~ S20	Concrete gauge 10개
	거더 거치부	Con-D-R1 ~ Con-D-R2	Concrete gauge 2개
D-L Part (21EA)	기초	D1 ~ D5	LVDT 변위계 5개
	강합성 말뚝 내부 철근	J-1 ~ J-4 In-1 ~ In-4	Steel gauge 8개
	장판	SP-L1 ~ SP-L4 S25 ~ S28	Concrete gauge 8개
D-R Par(21EA)	기초	D14 ~ D18	LVDT 변위계 5개
	강합성 말뚝 내부 철근	J-5 ~ J-8 In-5 ~ In-8	Steel gauge 8개
	장판	SP-R1 ~ SP-R4 S21 ~ S24	Concrete gauge 8개
이 외 (5EA)	기초 강선	SW-1 S29 ~ S30	Steel gauge 3개
	Load Cell		2 channels
총 게이지 수량 및 channels 수 (160 channels)		Wire 변위계 : 3 channels LVDT 변위계 : 20 channels 철근 게이지 : 85 channels 콘크리트 게이지 : 50 channels Load Cell : 2 channels	

### (1) A part

#### (가) Wire 변위계

- 거더 바닥에 거더 폭을 4등분 하여, 폭의 1/4, 2/4, 3/4지점에 총 3EA의 변위계 설치하여 거더 중앙부 수직변위를 측정함.
- 하중-변위 그래프 작성 및 지간 중앙부 거동 분석.
- 2개의 유압잭에 의해 재하 되는 하중에 편심이 작용하는지 검토.

#### (나) Strain Gauge

- 슬래브 중앙부의 거동 분석하기 위하여 내부 철근에 8EA의 철근게이지 부착
- 거더 중앙부의 거동 분석 및 지간 중앙부의 단면별 응력분포 파악하기 위하여 내부 철근에 8EA의 철근게이지 부착
- 슬래브 상단에 발생하는 압축응력을 측정하기 위하여 3EA의 콘크리트 게이지 부착
- 슬래브 하단에 발생하는 인장응력을 측정하기 위하여 1EA의 콘크리트 게이지 부착

### (2) B part

#### (가) LVDT 변위계

- 분절거더 이음부의 연결성능 파악하기 위하여, 분절거더 하단에 상대변위를 측정하기 위하여 6EA의 변위계 설치

#### (나) Strain Gauge

- 분절거더 이음부 위치한 지점에서 슬래브 거동을 분석하기 위하여 철근 변형률 게이지 20EA 콘크리트 변형률 게이지 6EA 총 26EA를 부착

### (3) C part

#### (가) LVDT 변위계

- 시공 Joint(교대&슬래브)의 균열을 측정하기 위하여 4EA의 변위계를 설치

#### (나) Strain Gauge

- 연결부(교대부 철근&슬래브 철근)의 하중전달 메커니즘을 분석하기 위하여 20EA의 철근 게이지를 부착
- 연결부(우각부)의 발생되는 응력을 측정하기 위하여 10EA의 철근 게이지 부착
- 연결부에서 거더의 솟음에 의한 슬래브 파괴가 예상되는 부분에 20EA의 콘크리트 게이지 부착
- 거더를 교대 상치된 부분의 응력 집중을 분석하기 위하여 4EA의 콘크리트 게이지 부착

#### (4) D part

##### (가) LVDT 변위계

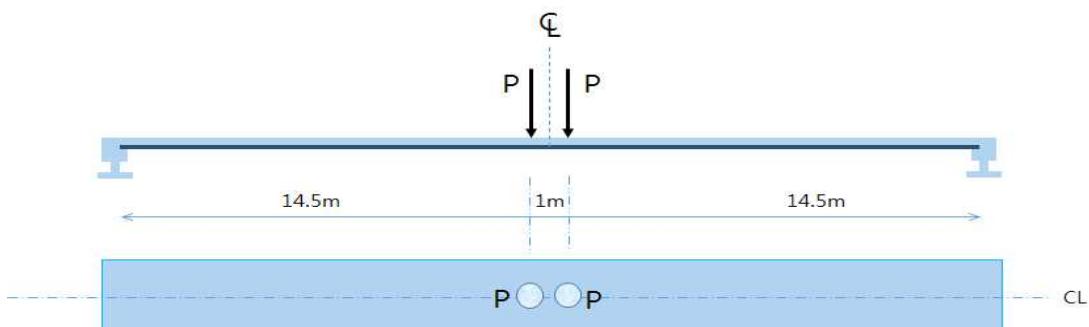
- 실물 실험체에 재하 되는 하중에 따라 기초부에서 변위 발생 여부를 측정하기 위하여 10EA의 변위계를 설치함.

##### (나) Strain Gauge

- 강합성 말뚝과 교대 연결성능 및 하중전달 메커니즘을 분석하기 위하여, J형 철근 및 내부 철근에 32EA의 철근 게이지를 부착함.

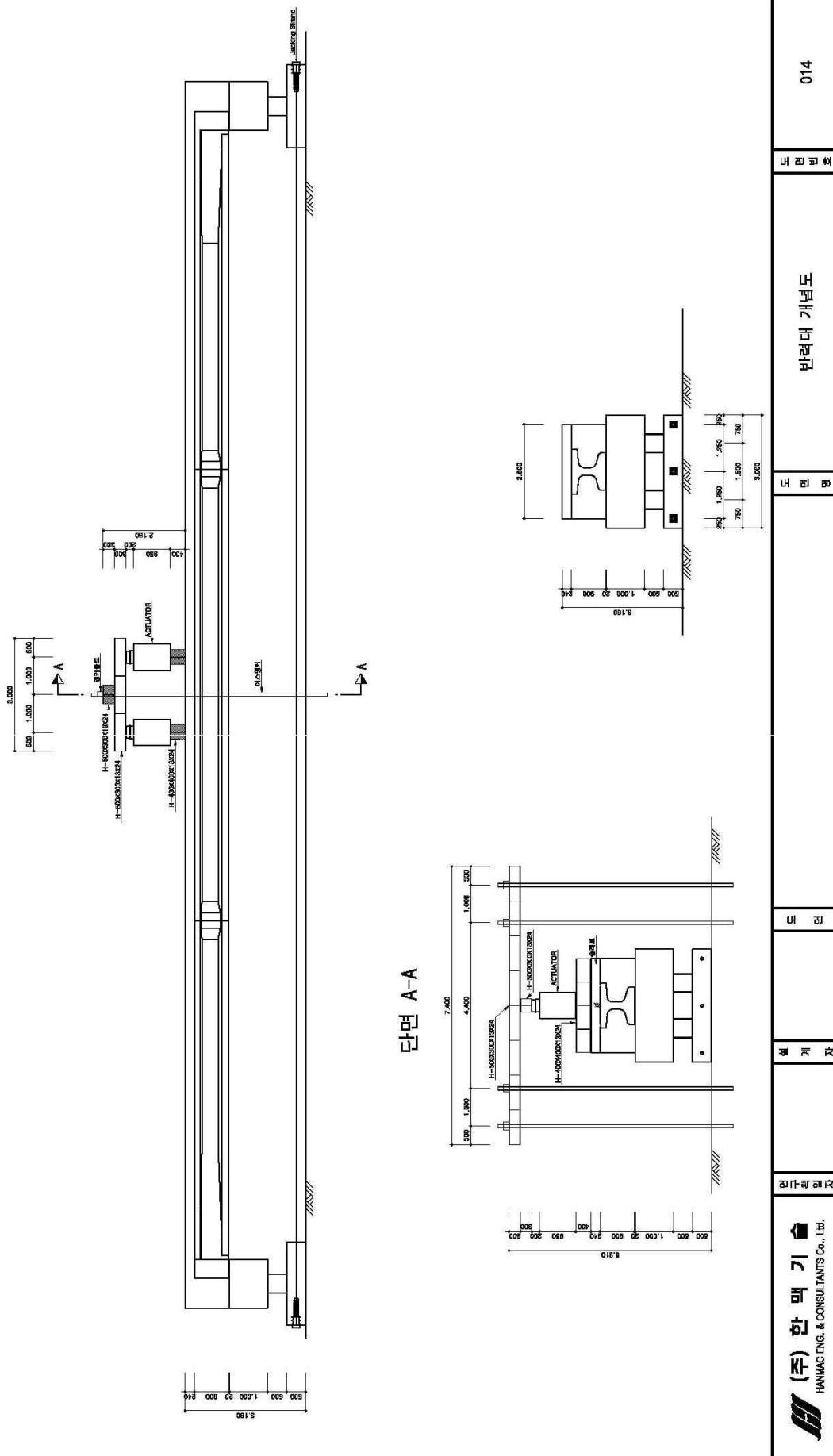
#### 나. 하중 재하

고강도 콘크리트를 사용한 분절 거더와 말뚝을 이용한 저형고 일체식 교량의 30m의 실물 모형 실험체 실험은 충청북도 당진에 위치한 (주)장현산업 공장 야지에서 수행되었다. 실물 모형 실험체에 하중을 재하 하는 방법은 [그림 3.6.19]와 같이 실물 모형 실험체의 슬래브에 2개의 유압 잭(2P, 유압잭 P의 용량 500tonf)을 이용하여 4점 재하 훈 실험이 되도록 설치하였다. [그림 3.6.18]은 정적하중 재하 위치도이고 [그림 3.6.19]는 반력대 개념도이다. [그림 3.6.20]은 실물 실험체의 정적 재하 실험 전경을 보여주고 있으며, [표 3.6.5]는 실험에 사용된 실험 장비 목록이다.



[그림 3.6.18] 정적하중 재하 위치도

반려다 개념도



[그림 3.6.19] 반력대 개념도



[그림 3.6.20] 실험 전경

[표 3.6.5] 실험 전경

항 목	Model 및 그림	용도	비 고
유압 Pump	Multi Pump		유압 공급 한국 (일진유압)
유압실린더			
Load Cell	PLC-500		재하 하중 측정 한국 (ZIS)

### (1) 하중 재하 프로그램

실험 모형 실험체에 하중 재하는 3단계로 계획하였다. 1단계는 균열이 발생하는 하중 까지 재하하며, 2단계는 공칭 흔 강도까지 재하하며, 3단계는 극한강도까지 재하 한다.

#### (가) 1단계

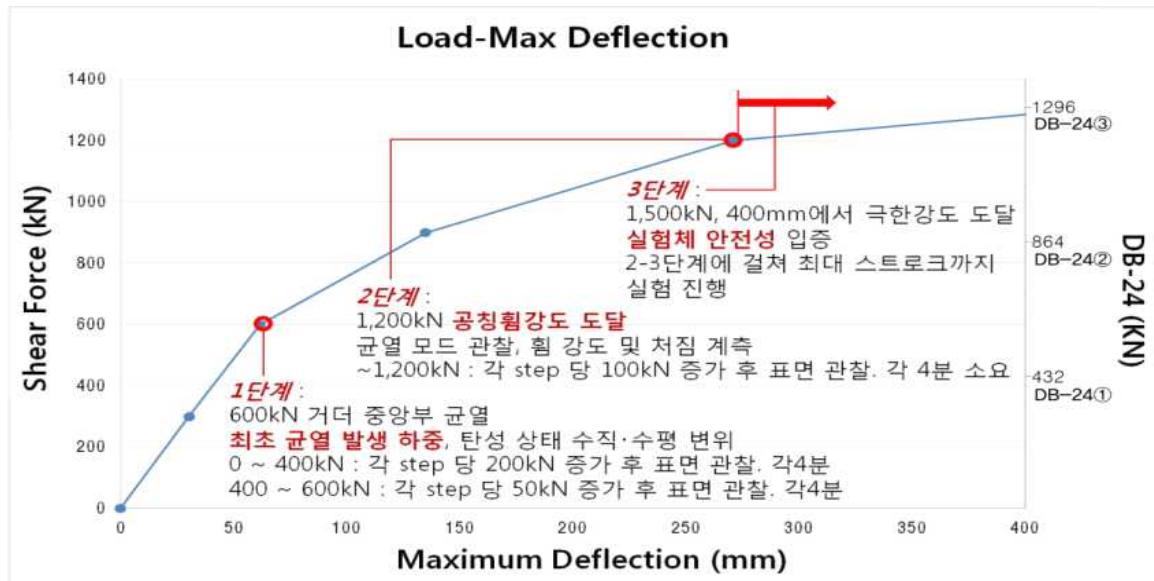
- ① 방법 : 0 ~400kN 까지 각 step 당 200kN씩 증가 시킨 후 표면 균열 관찰.  
400~600kN 까지 각 step 당 50kN씩 증가 시킨 후 표면 균열 관찰.
- ② 목적 : 최초 균열 발생 여부 파악.
- ③ 예상 : 600kN 하중에서 거더 중앙부 균열 발생.

### (나) 2단계

- ① 방법 : 6000 ~ 1,200kN 까지 각 step 당 200kN씩 증가 시킨 후 표면 균열 관찰.
- ② 목적 : 균열 모드 관찰, 휨 강도 및 처짐 계측.
- ③ 예상 : 1,200kN 공칭휨강도 도달.

### (다) 3단계

- ① 방법 : 유압기 최대 스트로크 까지 하중 재하.
- ② 목적 : 실험체 안전성 입증.
- ③ 예상 : 하중 1,5000kN 처짐 400mm에서 극한강도 도달



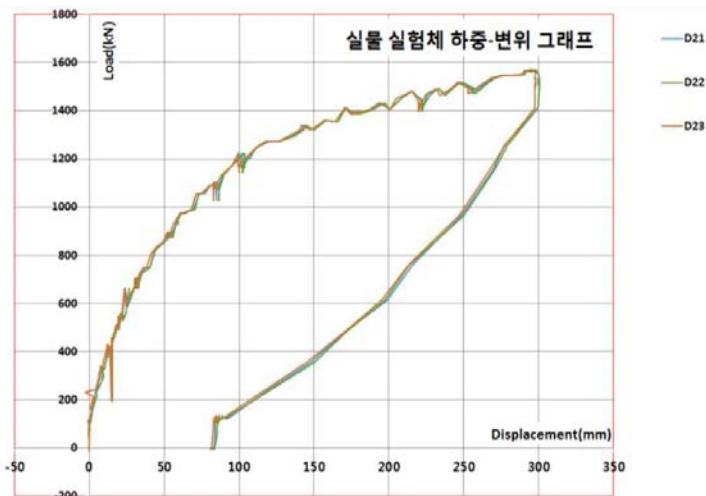
[그림 3.6.21] 하중 재하 프로그램

## 5. 실험 결과

### 가. A part

#### (1) Wire 변위계 (3EA)

##### (가) 거더 중앙 수직 변위(D21~D23)

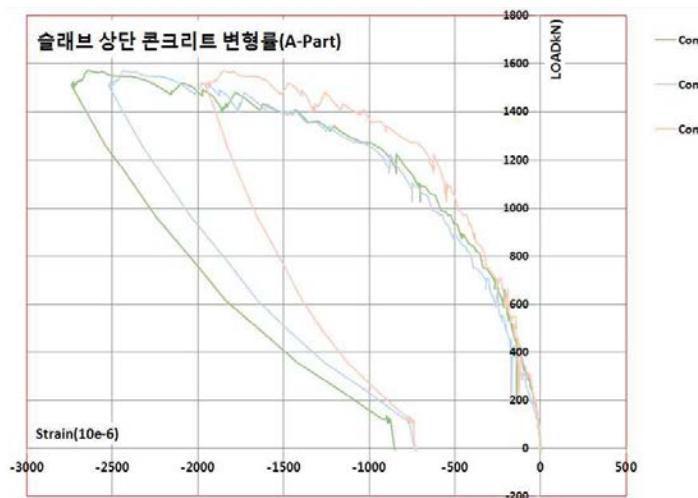


[그림 3.6.22] 실물 실험체 하중 - 변위 그래프

실물 모형 실험체에 재하 된 하중-변위 그래프는 [그림 3.6.22]와 같다. 거더 폭에 따라 설치된 Wire 변위계는 동일한 처짐 변위를 나타내고 있으며, 이를 통하여 2개의 유압잭에 의하여 재하 되는 하중은 편심이 없이 실험체에 하중을 재하 하였음을 알 수 있었다. 한편 본 실험은 오일 잭의 용량 초과로 최대 Stroke 300mm, 하중 1,570kN 까지 실험이 수행되었다.

#### (2) Concrete Strain Gauge (4EA)

##### (가) 슬래브 상단 콘크리트 변형률 (Con-C1~Con-C3)

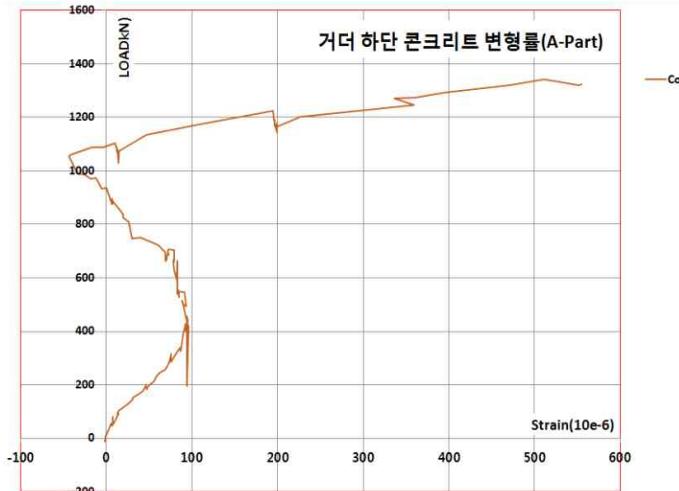


[그림 3.6.23] 슬래브 상단 콘크리트  
변형률(Con-C1~Con-C3)

실물 실험체의 재하 된 하중과 지간 중앙부 상단 슬래브에 계측된 콘크리트 변형률

을 [그림 3.6.23]에 나타내었다. 슬래브 상단은 압축부로 최대 재하 하중 1,570kN 일 때, 최대 압축 변형률이 2,800( $\mu$ )으로 압축 파괴는 발생하지 않았다.

#### (나) 거더 하단 콘크리트 변형률 (Con-D-C1)

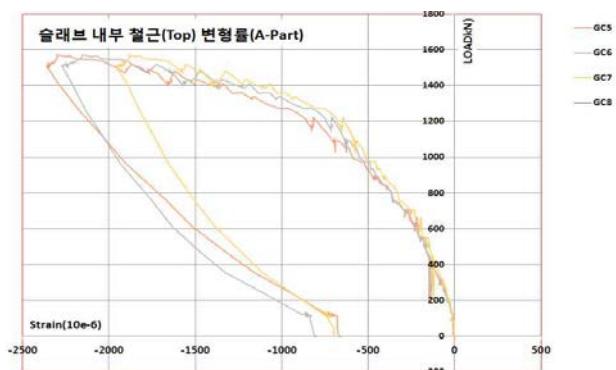


[그림 3.6.24] 거더 하단 콘크리트  
변형률(Con-D-C1)

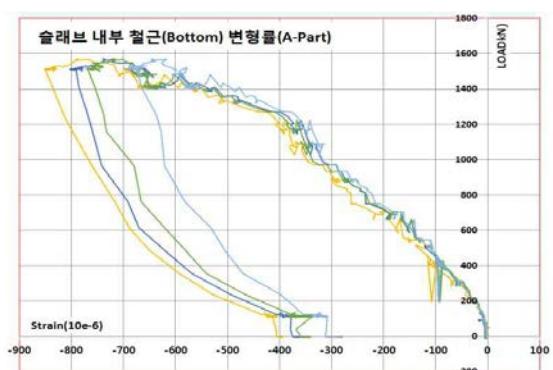
실물 실험체의 재하 된 하중과 지간 중앙부 거더 하단의 콘크리트 변형률을 [그림 3.6.24]에 나타내었다. 거더 하단 인장부는 하중이 재하 됨에 따라 큰 인장응력이 발생되어야 하지만, 거더에 삽입된 Tendon의 포스트 텐션 영향으로 크게 발생하지 않았다. 실험체에 재하 된 하중이 1,000kN 이상부터는 급격하게 인장응력이 증가하였으며 재하 된 하중 크기가 1,350kN일 때, 계이지가 부착된 계측 위치에서 휨 균열이 발생하여 콘크리트 계이지가 Out 된 것으로 판단된다.

#### (3) Steel Strain Gauge (16EA)

##### (가) 슬래브 내부 철근 변형률 (GC1~GC8)



[그림 3.6.25] 슬래브 내부 철근(Top)  
변형률(GC5~GC8)

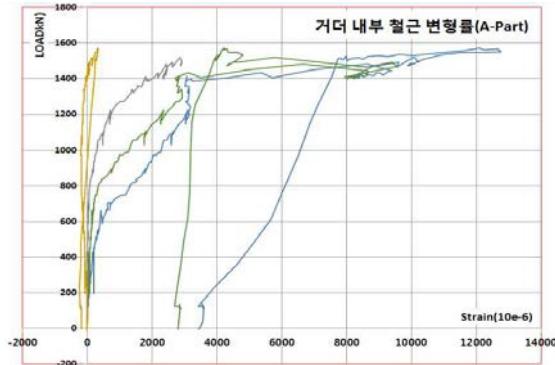


[그림 3.6.26] 슬래브 내부 철근(Bottom)  
변형률(GC1~GC4)

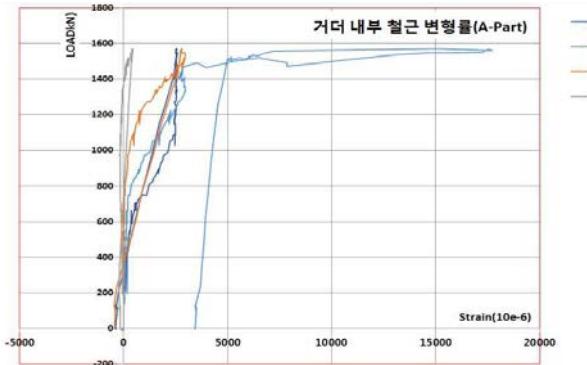
실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 지간 중앙부 슬래브의 내부 철근에서 계측된 변형률을 [그림 3.6.25]과 [그림 3.6.26]에 나타내었다. 슬래브에 배치된 내부 철근은 2

열로 부착된 높이에 따라 Top, Bottom으로 분류하였다. 슬래브 내부 철근에 발생하는 변형률은 내부 철근의 높이가 높을수록 큰 압축 변형률이 발생하였다. 반면, 실험체의 최대 하중에 도달할 때 까지 철근은 항복 하지 않았다.

#### (나) 거더 내부 철근 변형률 (SG-1~SG-8)



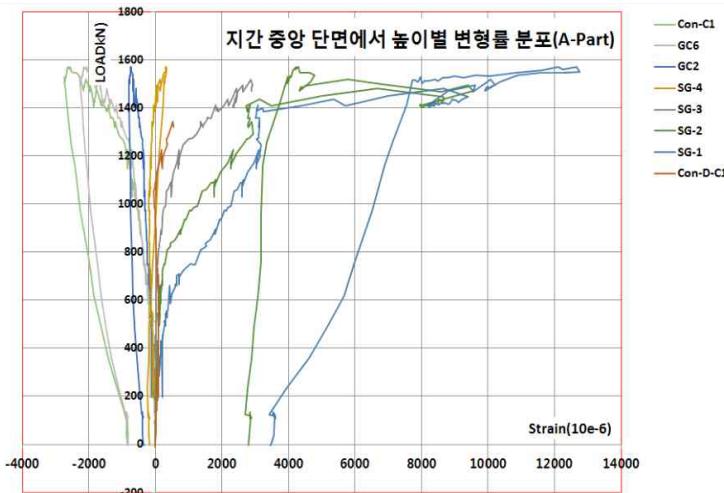
[그림 3.6.27] 거더 내부 철근 변형률(SG-1~SG-4)



[그림 3.6.28] 거더 내부 철근 변형률(SG-5~SG-8)

실물 실험체의 재하 된 하중과 지간 중앙부 거더의 내부 철근에서 부착된 철근 변형률을 [그림 3.6.27]과 [그림 3.6.28]에 나타내었다. 거더 내부 철근의 높이에 따라 변형률 계이지를 부착하였으며, 부착된 높이에 따라 변형률은 비례적으로 분포하였다.

#### (다) 지간 중앙 단면에서 슬래브 및 거더의 높이별 변형률 분포



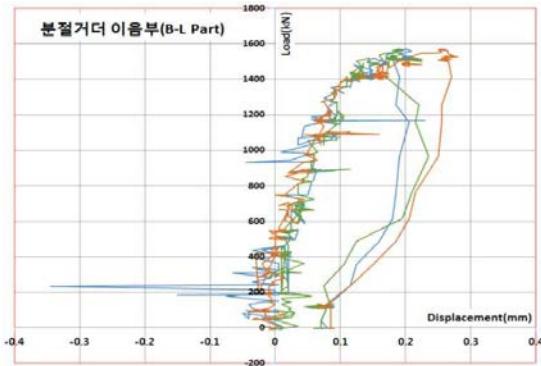
[그림 3.6.29] 지간 중앙 단면에서 높이 별 변형률 분포

실물 모형 실험체에 재하 된 하중과 지간 중앙부 슬래브 및 거더에 부착된 변형률 계이지를 [그림 3.6.29]에 정리하였다. 거더에 삽입된 Tendon의 포스트 텐션 영향 변형률 계이지 SG-4의 위치(거더 상부 플랜지)가 단면 중립축이 위치하는 것으로 판단되며, 센서 SG-4보다 높은 단면의 철근에서는 압축 변형률이 발생하였으며, 센서 SG-4보다 낮은 단면의 철근에서는 인장 변형률이 발생하였다.

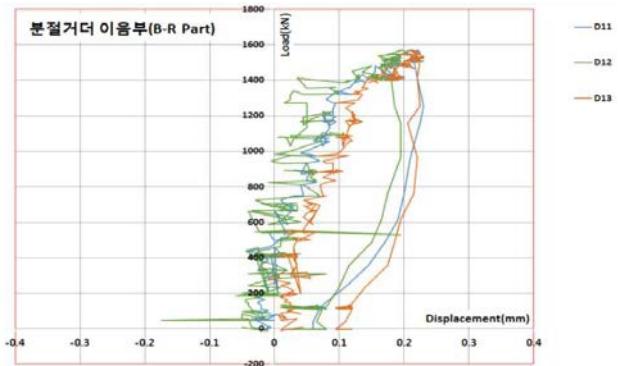
## 나. B part

### (1) LVDT 변위계 (6EA)

(가) 거더 세그먼트 접합부(D08~D13)



[그림 3.6.30] 거더 세그먼트 접합부(B-L Part, D08~D10)

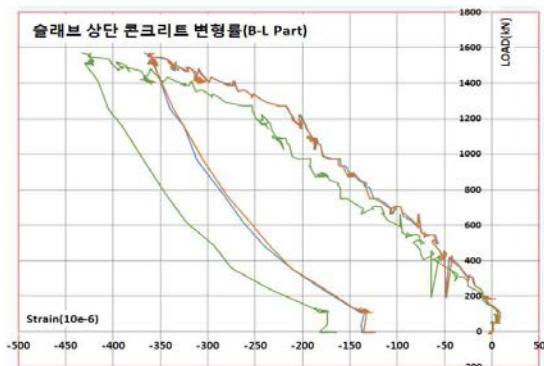


[그림 3.6.31] 거더 세그먼트 접합부(B-R Part, D11~D13)

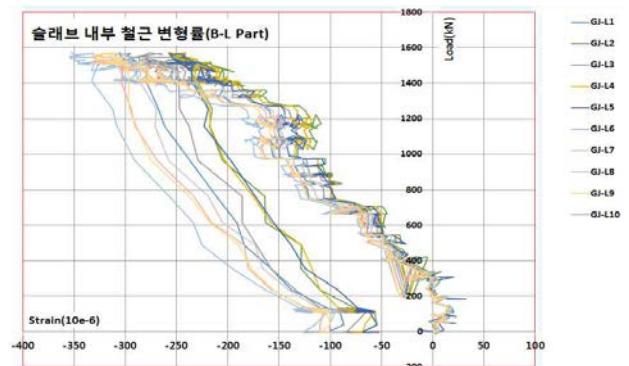
실물 실험체의 재하 된 하중과 분절 거더 이음부에 발생하는 균열의 폭을 [그림 3.6.30]와 [그림 3.6.31]으로 나타내었다. 재하 되는 하중이 증가할수록, 거더 세그먼트 접합면에 발생하는 균열의 폭도 비례적으로 증가하는 추세를 보였다. 하지만, 실험체에 재하 된 최대하중 1570kN에서도 분절거더 이음부의 균열의 폭은 약 0.3mm 미만으로 발생하였다. 즉, 매우 작은 크기의 균열이 발생하였으며, 최대하중이 재하 된 실험체의 분절거더는 하나의 구조물로 거동한 것으로 판단되며 본 실물 실험체의 분절거더 간 이음부 설계 기술은 매우 안전하다고 판단된다.

### (2) Strain Gauge (Steel : 20EA, Concrete : 6EA)

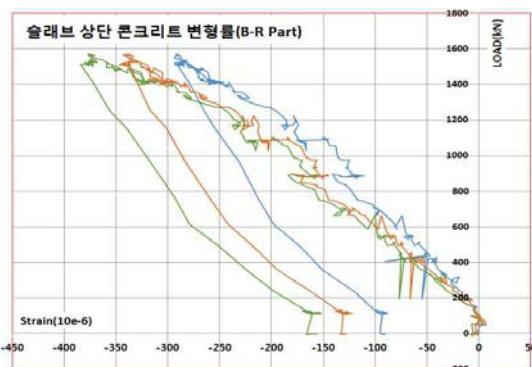
(가) 슬래브 내부 철근 및 슬래브 상단 콘크리트 변형률



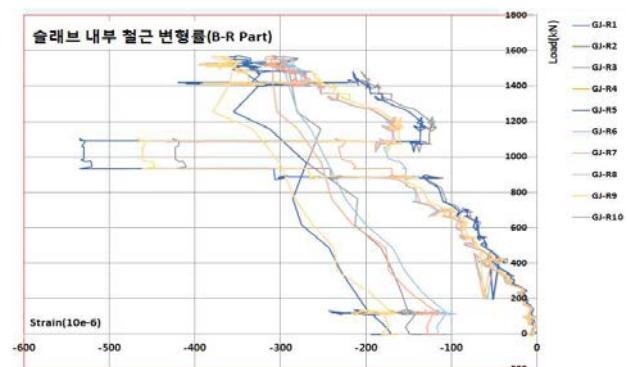
[그림 3.6.32] 슬래브 상단 콘크리트 변형률(B-L Part, Con-L1~Con-L3)



[그림 3.6.33] 슬래브 내부 철근 변형률(B-L Part, GJ-L1~GJ-L10)



[그림 3.6.34] 슬래브 상단 콘크리트 변형률(B-R Part, Con-R1~Con-R3)



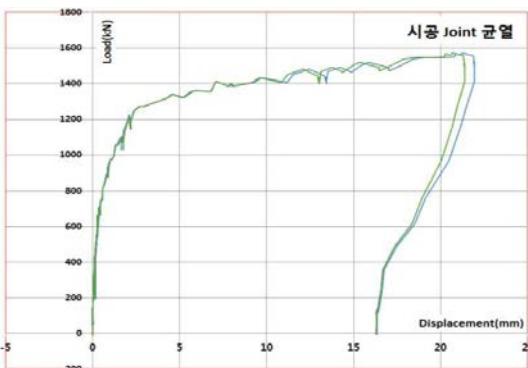
[그림 3.6.35] 슬래브 내부 철근 변형률(B-R Part, GJ-R1~GJ-R10)

실물 실험체의 재하 된 하중과 이음부 슬래브 내부 철근 및 상부 슬래브에 발생한 변형률을 [그림 3.6.34]와 [그림 3.6.35]에 나타내었다. 재하 되는 하중이 증가할수록, 이음부 슬래브의 내부 철근 및 상면 콘크리트 변형률은 비례적으로 증가하였지만, 최대 변형률 크기는  $500\mu\text{m}$ 만 이였다. 이는 거더 세그먼트 간 일체거동을 하여 매우 안전한 것으로 판단된다.

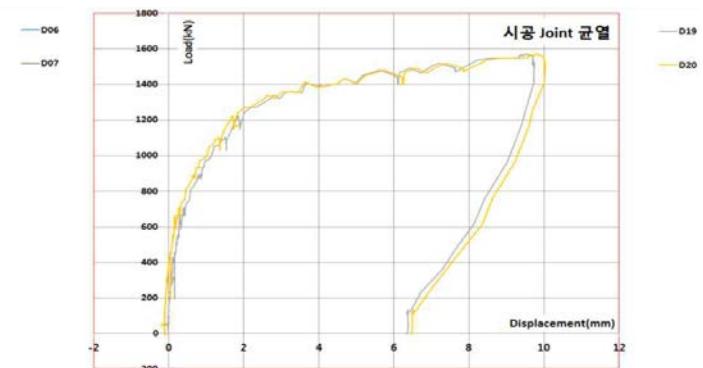
#### 다. C part

##### (1) LVDT 변위계 (4EA)

###### (가) 시공 Joint 균열 폭(D06~D07, D19~D20)



[그림 3.6.36] 시공 Joint(C-L Part) 균열 폭(D06~D07)

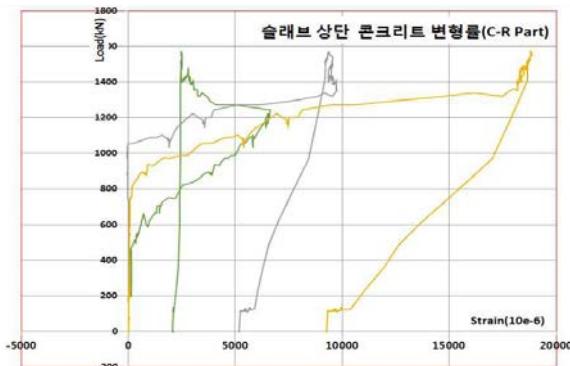


[그림 3.6.37] 시공 Joint(C-R Part) 균열 폭(D19~D20)

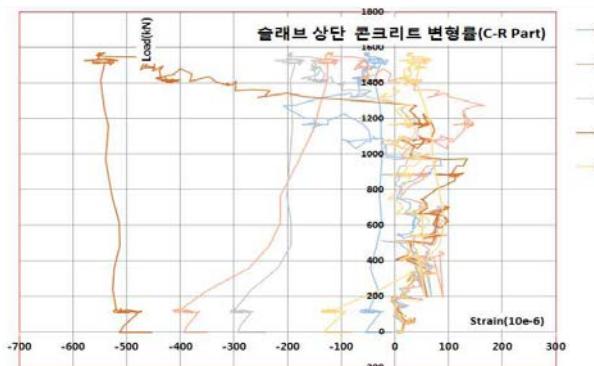
실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 시공 Joint 균열 폭을 [그림 3.6.36]과 [그림 3.6.37]에 나타내었다. 재하 된 하중의 크기가 1,200kN까지 증가함에 따라, 시공 Joint의 균열의 폭은 비례적으로 증가하였다. 하지만, 재하 된 하중 1,200kN 이후부터는 시공 Joint에 발생하는 균열의 폭이 매우 급진적으로 진전되었다. 실험체에 최대하중(대략 1,600kN)이 제하 되었을 경우, (C-L Part)의 시공 Joint의 균열 폭(대략 22mm)이 실험체 (C-R Part)의 시공 Joint의 균열 폭(대략 10mm)보다 2배 정도 더 벌어지는 것을 확인할 수 있었다.

## (2) Concrete Strain Gauge (20EA)

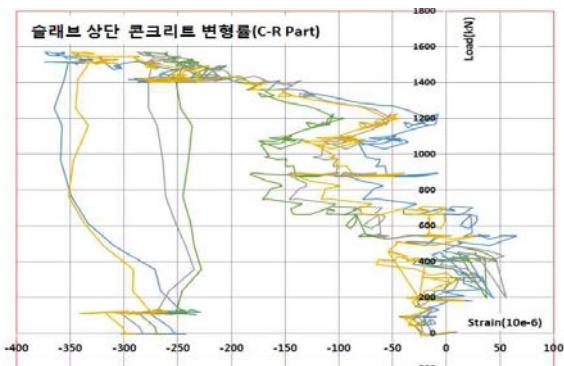
### (가) 슬래브 상단 콘크리트 변형률



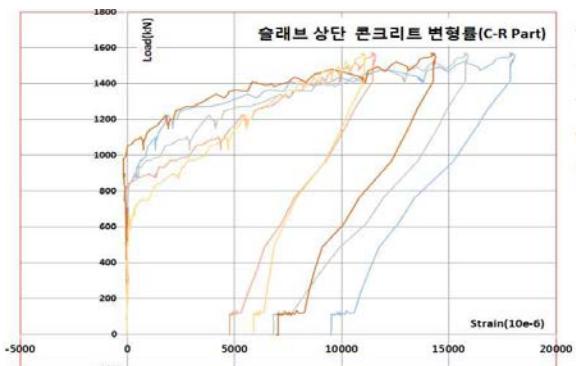
[그림 3.6.38] C-L Part 슬래브 상단 콘크리트 변형률(S1~S5)



[그림 3.6.39] C-R Part 슬래브 상단 콘크리트 변형률(S6~S10)



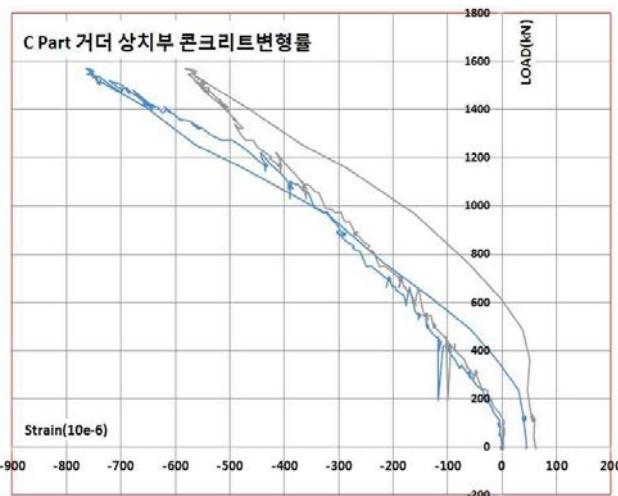
[그림 3.6.40] C-R Part 슬래브 상단 콘크리트 변형률(S11~S15)



[그림 3.6.41] C-R Part 슬래브 상단 콘크리트 변형률(S16~S20)

실물 실험체의 재하 된 하중과 C Part 슬래브에서 거더 솟음에 의한 휨 균열이 발생되는 부분의 상부 슬래브에 부착한 콘크리트 변형률 케이지를 [그림 3.6.38]에서 [그림 3.6.41]까지 나타내었다.

### (나) 거더 상치부 콘크리트 변형률 (Con-D-R1, Con-D-L1)

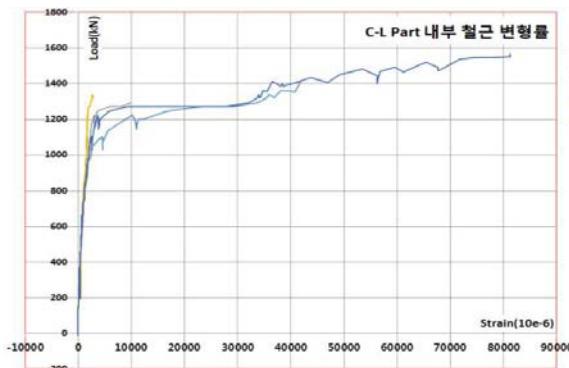


[그림 3.6.42] C Part 거더 상치부 콘크리트 변형률(Con-D-R1,L1,)

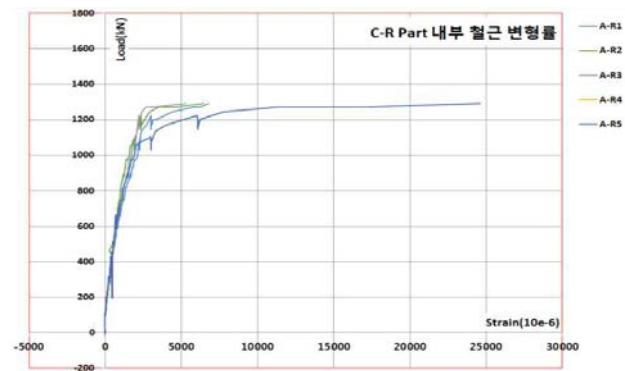
실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 거더를 상치한 교대부의 변형률 계이지를 [그림 3.6.42]에 나타내었다. 재하 되는 하중이 증가할수록, 거더를 상치한 교대에 압축 변형률이 증가하지만 최대 발생은  $1,000\mu\text{m}$ 만으로 국부적인 압축 파괴는 발생하지 않았다.

### (3) Steel Strain Gauge (30EA)

#### (가) 시공 Joint 철근 변형률 (A-L1~A-L5, A-R1~A-R5)



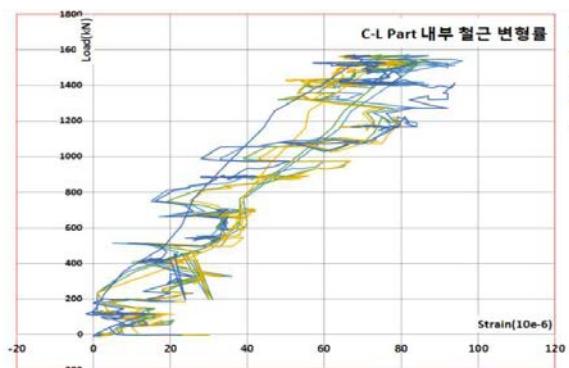
[그림 3.6.43] 내부 철근 변형률(C-L Part, A-L1~A-L5)



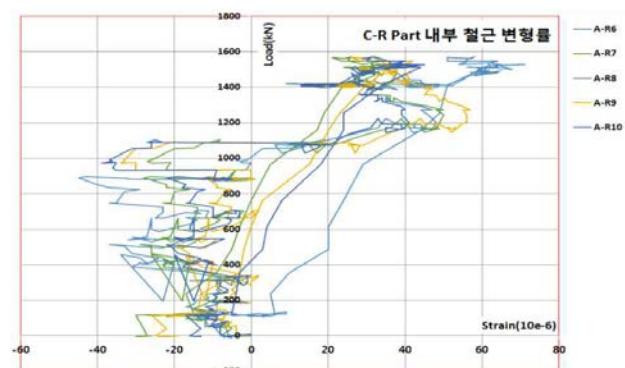
[그림 3.6.44] 내부 철근 변형률(C-R Part, A-R1~A-R5)

실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 시공 Joint 철근에 부착한 계이지의 변형률을 [그림 3.6.43]와 [그림 3.6.44]에 나타내었다. 재하 되는 하중이 증가할수록, 시공 Joint 철근에 발생되는 변형률은 비례적으로 증가하였으며, 하중이(1,200kN)일 때 시공 Joint 부분의 철근은 모두 항복하였으며, 이는 시공 Joint의 콘크리트 균열이 급진적으로 발생한 원인이라 판단된다.

#### (나) 우각부 철근 변형률 (A-L6~A-L10, A-R6~A-R10)



[그림 3.6.45] 내부 철근 변형률(C-L Part, A-L6~A-L10)

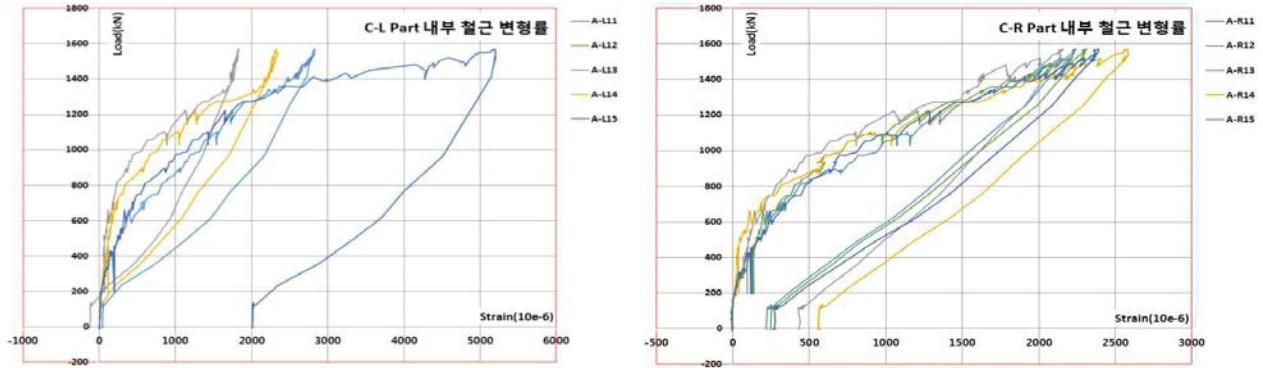


[그림 3.6.46] 내부 철근 변형률(C-R Part, A-R6~A-R10)

실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 슬래브와 교대 연결부 우각부에 부착한 철근 변형률 계이지를 [그림 3.6.45]과 [그림 3.6.46]에 나타내었다. 우각부 철근에서 발생된

변형률은 최대 크기  $100\mu\text{m}$ 만으로 1차년도 연결부(거더&교대) 시험 결과와 비슷하게 우각부 철근에 발생되는 응력을 크지 않은 것으로 나타났다.

#### (다) 교대 상부 슬래브 내부 철근 변형률 (A-L11~A-L15, A-R11~A-R15)



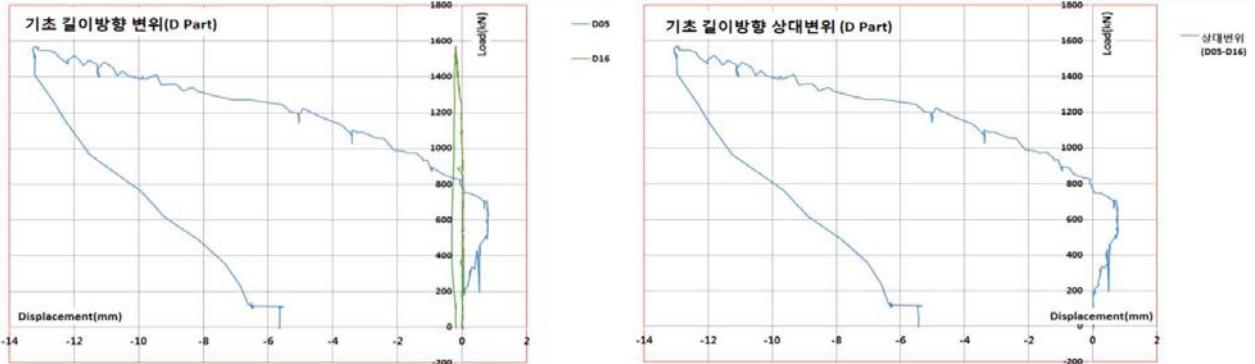
[그림 3.6.47] 내부 철근 변형률(C-L Part, A-L11~A-L15) [그림 3.6.48] 내부 철근 변형률(C-R Part, A-R11~A-R15)

실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 교대 상부 슬래브의 내부 철근의 변형률을 [그림 3.6.47]와 [그림 3.6.48]에 나타내었다. 거더의 솟음으로 슬래브 파괴가 예상되는 취약 단면이지만 실험에서 재하 된 최대하중 1,570kN까지 철근은 항복하지 않았다.

#### 라. D part

##### (1) LVDT 변위계(10EA)

###### (가) 기초 길이방향 변위(D-05, D-16)



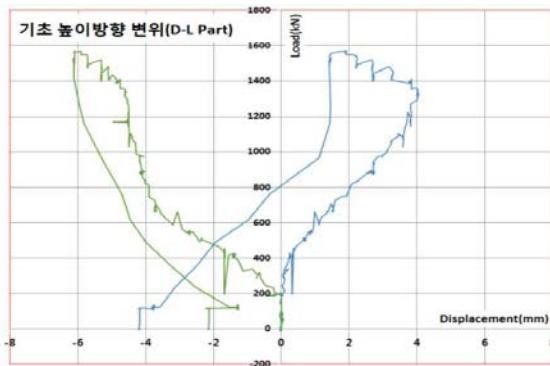
[그림 3.6.49] D Part 기초 길이방향 변위(D05, D16)

[그림 3.6.50] D Part 기초 길이방향 상대변위

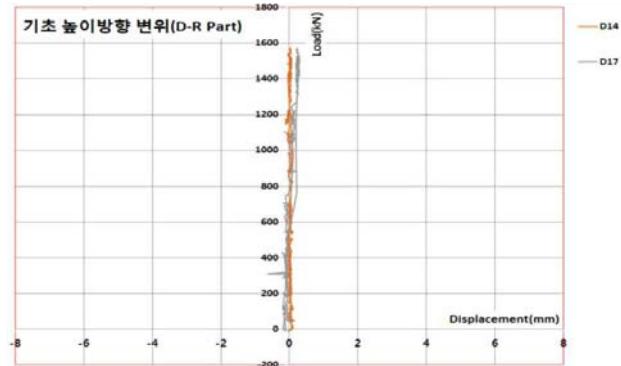
실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 기초의 길이방향 변위를 [그림 3.6.49]에 나타내었다. 재하 되는 하중에 의하여 발생되는 기초의 횡 방향 변위는 0으로 가정하였다. [그림 3.6.49]에서 실물 실험체의 원편에 위치한 기초 변위(D05)에서 최대 13mm 까지 변위가 발생된 것을 확인 할 수 있었다. [그림 3.6.50]은 실물 실험체 왼쪽 기초의 변위(D05)에서 실물 실험체 오른쪽 기초의 변위(D16)를 빼서 상대변위를 나타내었다. 부호는 기초 안 방향의 변위를 (+) 기초 바깥방향의 변위를 (-) 정의하였다. [그림 3.6.50]와 같이 기초 길이방향 상대변위 그래프에서, 하중 800kN 까지 실험체 안 방향으로

거동 하였으며, 하중 800kN 이후부터 실험체 바깥 방향으로 거동을 하였다.

#### (나) 기초 높이방향 변위(D01,D03,D14,D17)



[그림 3.6.51] D Part 기초 높이 방향 변위(D01, D03)

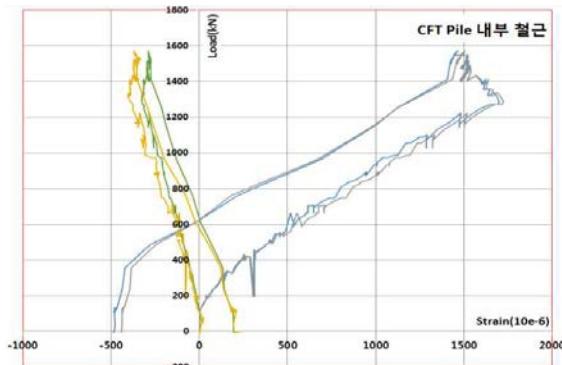


[그림 3.6.52] D Part 기초 높이 방향 변위(D14, D17)

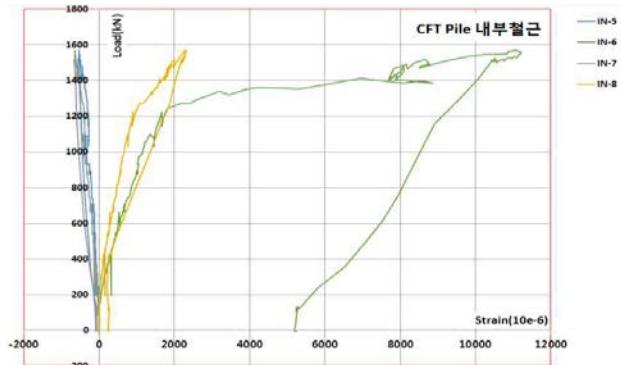
실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 기초의 높이 방향 변위를 [그림 3.6.51]과 [그림 3.6.52]에 나타내었다. D01과 D03은 실물 실험체의 왼편에 위치한 기초의 높이 방향 변위를, D14와 D17은 실물 실험체의 오른편에 위치한 기초의 높이 방향 변위를 계측하였다. 실물 실험체 오른편에 있는 기초에 발생한 변위는 매우 작지만, 실물 실험체 왼편에 위치한 기초는 하중에 따라 반 시계 방향으로 회전 한 것을 확인할 수 있었다.

#### (2) Steel Strain Gauge (30EA)

##### (가) CFT Pile 이음부 보강 철근(In-1~In-8)



[그림 3.6.53] CFT Pile 이음부 보강 철근(In-1~In-4)

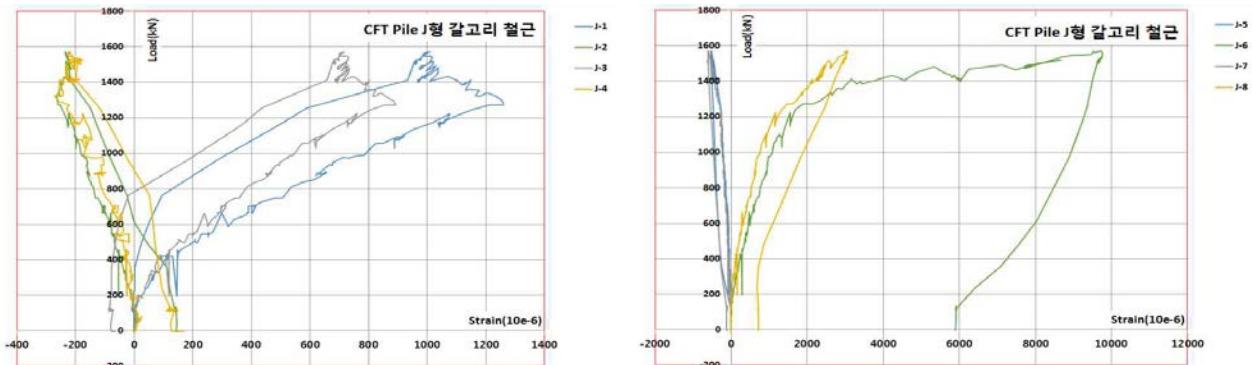


[그림 3.6.54] CFT Pile 이음부 보강 철근(In-5~In-8)

실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 CFT Pile의 이음부 보강 철근에 부착한 변형률을 [그림 3.6.53]와 [그림 3.6.54]에 나타내었다. In-1부터 In-4까지는 실물 실험체의 왼편에 위치한 CFT Pile의 이음부 보강 철근에 부착하였으며, In-1과 In-3은 인장부에 In-2와 In-4는 압축부에 부착하였다. 반대로 In-5부터 In-8까지는 실물 실험체의 오른편에 위치한 CFT Pile의 이음부 보강 철근에 부착하였으며, In-5과 In-7은 압축부에 In-6와 In-8은 인장부에 부착하였다. 재하 되는 하중의 크기가 110kN 까지는 CFT Pile 강관에 발생되는 변형률은 없었으며, 재하 되는 하중의 크기가 110kN 이 후부터

는 하중이 증가함에 따라 강관의 변형률도 증가하는 추세를 보였다. 하중 1200kN에서 실물 실험체의 오른편에 위치한 In-6 내부 철근이 항복하였다.

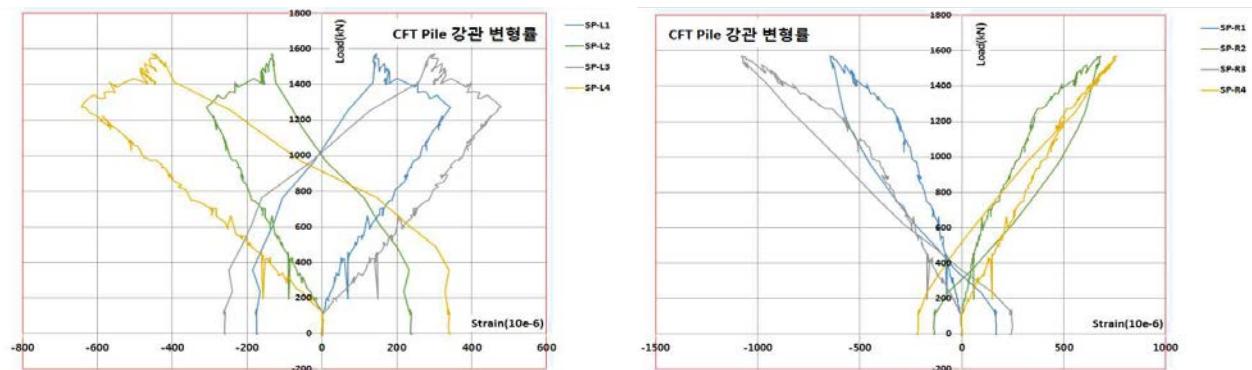
#### (나) CFT Pile 두부 보강 J형 갈고리 철근(J-1~In-8)



[그림 3.6.55] CFT Pile J형 갈고리 철근(J-1~J-4) [그림 3.6.56] CFT Pile J형 갈고리 철근(J-5~J-8)

실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 CFT Pile 두부 보강 J형 갈고리 철근에 부착한 변형률을 [그림 3.6.55]과 [그림 3.6.56]에 나타내었다. J-1부터 J-4까지는 실물 실험체의 왼편에 위치한 CFT Pile의 J형 갈고리 철근에 부착하였으며, J-1과 J-3은 인장부에 J-2와 J-4는 압축부에 부착하였다. 반대로 J-5부터 J-8까지는 실물 실험체의 오른편에 위치한 CFT Pile의 J형 갈고리 철근에 부착하였으며, J-5과 J-7은 압축부에 J-6와 J-8은 인장부에 부착하였다. 재하 되는 하중의 크기가 110kN 까지는 CFT Pile J형 갈고리 철근에 발생되는 변형률은 없었으며, 재하 되는 하중의 크기가 110kN 이후부터는 하중이 증가함에 따라 강관의 변형률도 증가하는 추세를 보였다. 하중 1200kN에서 실물 실험체의 오른편에 위치한 J-6 J형 갈고리의 철근이 항복하였다.]

#### (다) CFT Pile 강관 변형률(SP-L1~SP-L4, SP-R1~SP-R4)



[그림 3.6.57] CFT Pile 강관 (SP-L1~SP-L4)

[그림 3.6.58] CFT Pile 강관 (SP-L1~SP-L4)

실물 모형 실험체의 재하 된 하중과 CFT Pile 강관에 부착한 변형률을 [그림 3.6.57]과 [그림 3.6.58]에 나타내었다. SP-L은 실물 실험체의 왼편에 위치한 CFT Pile 강관으로 SP-L1과 SP-L3은 인장부에 SP-L2와 SP-L4는 압축부에 부착하였다. 반대

로 SP-R은 실물 실험체의 오른편에 위치한 CFT Pile 강관으로 SP-R1과 SP-R3은 압축부에 SP-R2와 SP-R4는 인장부에 부착하였다. 재하 되는 하중의 크기가 110kN 까지는 CFT Pile 강관에 발생되는 변형률은 없었으며, 재하 되는 하중의 크기가 110kN 이 후부터는 하중이 증가함에 따라 강관의 변형률도 증가하는 추세를 보였다. CFT Pile의 강관은 실험의 최대하중 1,570kN까지 탄성구간에 있는 것으로 판단된다.

## 6. 실물 실험체 성능 평가

### 가. 균열

실물 모형 실험체의 초기균열은 RC 구조인 C Part(상부 슬래브)에서 88kN에서 발생하였다. 이후, 547kN에서 A Part(거더 하부)에 발생하였으며, 720kN에서 C Part(교대 배면)에서 균열이 발생하였다. 이후, 재하 하중의 증가와 함께 거더 하면의 균열 발생 범위가 점점 확대되면서 기존의 훨 균열도 진전되었다. 반면 C Part의 거더 단부 상연 슬래브와 교대부 배면의 균열은 신규 균열의 발생 빈도는 낮으며, 기존 균열의 폭이 증가하는 경향을 보였다.



(a) C Part (상부 슬래브) 균열



(b) A Part(거더 하부)



(c) 교대 배면

[그림 3.6.59] 실물 실험체 균열

### 나. 강도

실험 하중은 최대 1,570kN(DB24 하중(432kN)의 약 3.6배), 중앙부 처짐 300mm까지 재하 하였으며, 하중 재하 장치의 한계로 인하여 실물 모형 실험체의 파괴까지는 하중을 재하하지 못하고 실험을 종료하였다. 실험 종료 시까지 거더와 세그먼트간 접합부와 하부 CFT Pile 본체 및 두부 접합면 주변의 손상은 전혀 발생하지 않았다.

## 7. 소 결

실물 모형 실험체의 결과를 정리하면 다음과 같다.

A Part의 실물 실험체의 지간 중앙에서 2개의 유압잭에 의해 재하 되는 하중은 편심이 없이 실험체에 하중을 재하 하였으며, 하중 재하 장치의 한계로 최대 변위 300mm, 재하 최대 하중 1,570kN 까지 실험이 수행되었다. A Part의 지간 중앙부 슬래브 및 거더에 부착된 변형률 계이지를 단면 높이에 따라 도식화 하였을 경우, Tendon의 포스트 텐션 영향으로 거더 상부 플랜지 단면에 중립축이 위치하는 것을 알 수 있었다. A Part의 슬래브 상단 압축부에서는 최대 재하 하중 1,570kN에서 압축 파괴가 발생하지 않았으며, 거더 하단 인장부는 거더에 삽입된 Tendon의 포스트 텐션 영향으로 인장력이 크게 발생하지 않았다.

B Part의 실물 실험체의 거더 세그먼트 접합면에서는 재하 되는 하중이 증가할수록, 거더 세그먼트 접합면에 발생하는 균열의 폭도 비례적으로 증가하였다. 하지만, 실험체에 재하 된 최대하중 1,570kN까지 분절거더 접합부에 발생한 균열의 폭은 약 0.3mm 미만이며, 슬래브 및 내부 철근에 발생한 변형률도 500 $\mu$ m미만으로 발생하였다. 즉, 3개의 분절거더는 하나의 구조물로 거동한 것으로 판단되며, 본 실물 실험체의 분절거더 간 접합부 설계 기술은 안전하다고 판단된다.

C Part의 거더 교대 연결부에서는 재하 된 하중 1,200kN 이하 까지는 교대 배면 시공 Joint에서 작은 균열이 발생되며 진전되었다. 하지만, 재하 된 하중이 1,200kN 이상부터는 균열의 폭이 크게 진전되었다. 교대부 시공 Joint 철근이 항복하면서 발생한 현상으로 판단된다. C Part의 거더 교대 연결부에 설치한 우각부 철근 변형률은 1차년도 연결부(거더&교대) 시험 결과와 비슷하게 철근에 발생되는 응력은 최대 20MPa으로 매우 작게 발생되었다. 거더의 솟음으로 슬래브 파괴가 예상되는 취약 단면에서 철근의 항복은 발생하지 않았다. 거더를 상치한 교대부분은 하중이 증가될 수록 압축 변형률은 증가하지만, 국부적인 압축 파괴는 발생하지 않았다.

D part의 기초에 부착한 LVDT를 분석하여, 실물 실험체의 원편 기초가 길이 방향 및 회전 하였으며, 기초부 밑의 강성이 고정지지 특성을 가지지 못 한 것으로 판단된다. 재하 되는 하중이 800kN 까지 실험체 안쪽으로 거동을 하였으며, 하중 800kN 이후부터 실험체 바깥쪽으로 거동을 하였다. D part의 CFT Pile 내부철근을 살펴보면, 재하 되는 하중이 110kN 까지 CFT Pile에 하중이 전달되지 않은 것으로 판단되며, 110kN 이후부터는 강관 및 내부 철근에 발생하는 변형률은 하중에 비례적으로 발생하였다. 하지만, 재하 되는 하중이 1,200kN에서 실물 실험체의 오른편 앞에 위치한 CFT Pile 내부 철근인 J형 갈고리 철근이 항복하였다. 반면, CFT 강관은 실험 최대 하중 1,570kN 까지 탄성구간에 있는 것으로 판단된다.

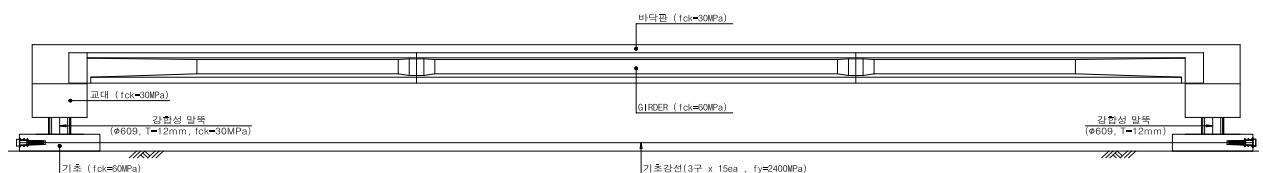
## 8. 비선형 구조 해석 (Non-Linear Analysis)

### 가. 해석 개요

실물실험 전 시공단계를 고려한 재료비선형 구조해석을 통해 재하하중에 대한 구조물의 거동 예측을 위한 구조해석 수행하였다.

### 나. 검토대상단면

본 대상단면은 거더 지간 31m의 PSC거더로써 교대와 일체화구조를 가지는 합성형 라멘교량이다. 구조적 특징으로는 기초에서 합성말뚝구조를 이용하여 일체화된다.



[그림 3.6.60] 구조해석 검토 대상 (실물실험체, L=30.0m)

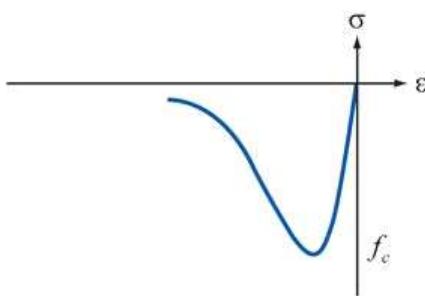
본 실험에 적용된 강연선의 경우 PSC거더에 사용된 강연선은 15.2mm 11가닥을 3ea사용하였고, 기초부에서는 종방향 변위 제어를 위해서 15.2mm 5가닥-3EA를 사용하여 구조해석을 수행하도록 하였다.

### 다. 입력 자료 및 사용프로그램

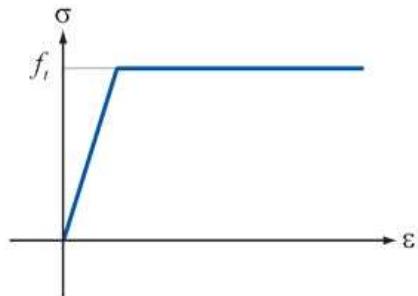
#### (1) 재료 비선형 해석 적용 이론

[표 3.6.6] 재료별 적용 비선형 해석 이론

구 분	콘크리트	강선 및 강재
적용이론	Total Strain Crack (수정압축장 이론)	Von mises



(a) 콘크리트 압축 응력변형률 곡선



(b) 콘크리트 인장 응력변형률 곡선

[그림 3.6.61] 재료별 응력-변형률 곡선

본 해석에는 MIDAS 사에서 개발한 MIDAS FEA를 사용하여 재료 비선형해석을 수

행하였으며, 재료 비선형을 고려하기 위하여 MIDAS FEA에서 지원되는 이론으로 콘크리트의 경우 Total Strain Crack를 적용하였고, 강선 및 강재는 Von mises를 적용하였다.

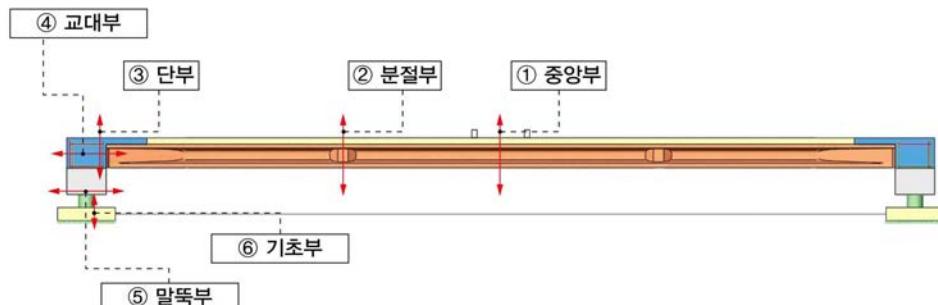
## (2) 재료 적용 강도

[표 3.6.7] 재료 강도

구 분	교 대	슬래브	거 더	합성 말뚝		기초부	강연선	철근
				콘크리트	강재			
설계강도(MPa)	30	30	60	30	400	60	2400	400
균열발생응력(MPa)	3.45	3.45	4.90	3.45	240	4.90	-	180
강선 도입긴장력(MPa)	-	-	-	-	-	-	1680	-
강재 항복강도(MPa)	-	-	-	-	400	-	2400	-

## 라. 구조해석모델링 및 검토위치

본 비선형해석에서는 Solid요소와 beam요소를 이용하여 모델링을 수행하였다.



[그림 3.6.62] 구조해석 검토 위치

검토 항목은 다음과 같다.

[표 3.6.8] 구조해석 검토 항목

구분	콘크리트		철근		강연선	
	응력	변형률	응력	변형률	응력	변형률
① 중앙부	압축·인장	압축·인장	인장	인장	인장	인장
② 분절부	압축·인장	압축·인장	인장	인장	인장	인장
③ 단부	압축·인장	압축·인장	인장	인장	-	-
④ 교대부	압축·인장	압축·인장	인장	인장	-	-
⑤ 말뚝부	압축·인장	압축·인장	인장	인장	-	-
⑥ 기초부	압축·인장	압축·인장	-	-	-	-

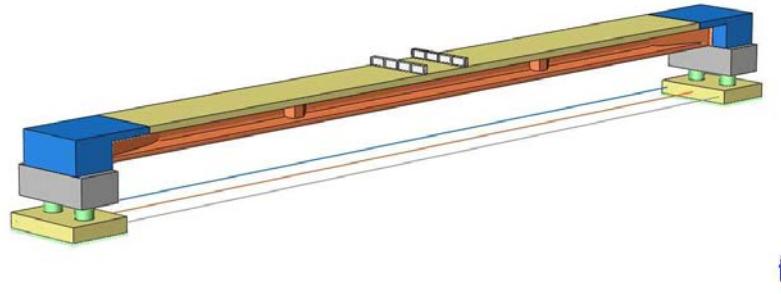
마. 시공단계정의



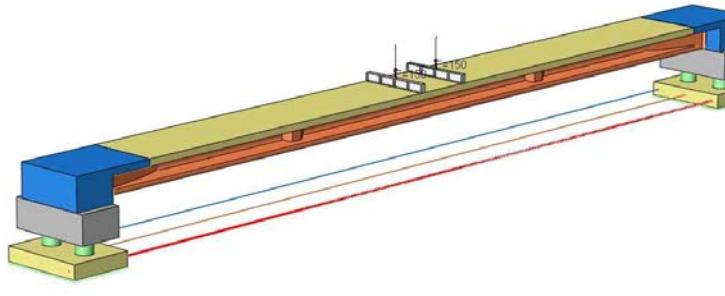
(a) 거더 + 프리스트레스 하중 도입 완료



(b) 기초부+거더 가설 완료



(c) 슬래브 타설 완료 + 기초부 강선 배치 완료

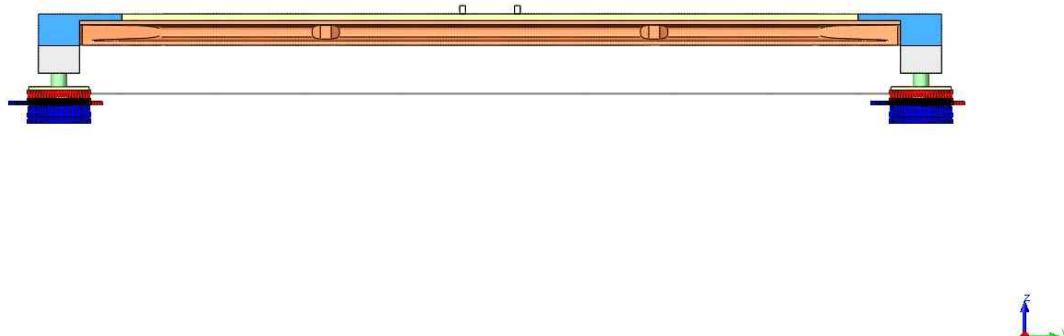


(d) 재하대 설치 및 하중 재하

[그림 3.6.63] 시공 단계

## 바. 경계조건

### (1) 경계조건 (힌지-롤러 조건, 기초부 강선 적용)



[그림 3.6.64] 경계조건

[표 3.6.9] 경계조건

A1(롤러)		A2(힌지)	
DX	FIX	DX	FIX
DY	FREE	DY	FIX
DZ	압축전담스프링(무한강성) 적용	DZ	압축전담스프링(무한강성) 적용

## 사. 구조해석결과 (설계 강도 적용 시)

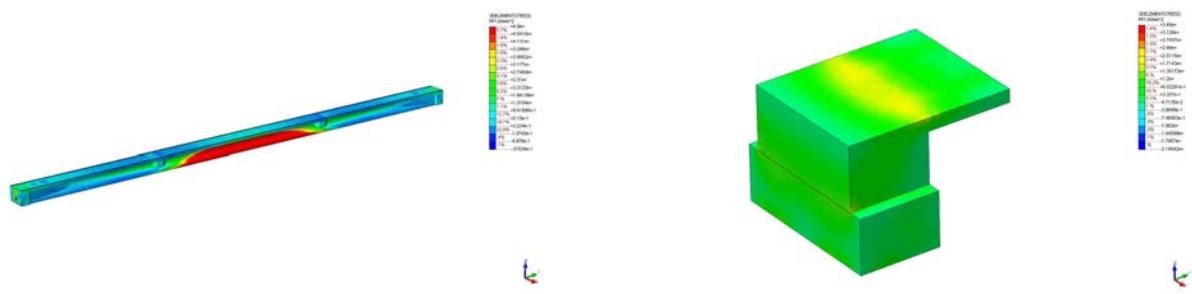
### (1) 해석결과

#### (가) 재하 하중별 발생변위

[표 3.6.10] 재하 하중별 발생변위

재하 하중 (ton)	거더 중앙부 연직 변위(mm)	기초 강선부 횡 변위(mm)	연직변위 그래프 (거더 중앙부)																											
30	30.23	14.71																												
60	61.72	30.25																												
90	134.86	63.04																												
120	271.33	125.86																												
150	10669.31	4172.58																												
180	1264161.71	525386.50																												
210	167284031.71	69776570.00	<table border="1"> <caption>Data points from the graph</caption> <thead> <tr> <th>재하 하중 (ton)</th> <th>연직변위 (ton)</th> <th>횡변위 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>30</td><td>30.23</td><td>14.71</td></tr> <tr><td>60</td><td>61.72</td><td>30.25</td></tr> <tr><td>90</td><td>134.86</td><td>63.04</td></tr> <tr><td>120</td><td>271.33</td><td>125.86</td></tr> <tr><td>150</td><td>10669.31</td><td>4172.58</td></tr> <tr><td>180</td><td>1264161.71</td><td>525386.50</td></tr> <tr><td>210</td><td>167284031.71</td><td>69776570.00</td></tr> </tbody> </table>	재하 하중 (ton)	연직변위 (ton)	횡변위 (mm)	0	0	0	30	30.23	14.71	60	61.72	30.25	90	134.86	63.04	120	271.33	125.86	150	10669.31	4172.58	180	1264161.71	525386.50	210	167284031.71	69776570.00
재하 하중 (ton)	연직변위 (ton)	횡변위 (mm)																												
0	0	0																												
30	30.23	14.71																												
60	61.72	30.25																												
90	134.86	63.04																												
120	271.33	125.86																												
150	10669.31	4172.58																												
180	1264161.71	525386.50																												
210	167284031.71	69776570.00																												

#### (나) 콘크리트 인장 응력 및 변형률



(a) 거더 인장응력

(b) 교대부 인장응력

[그림 3.6.65] 거더 및 교대부의 인장응력

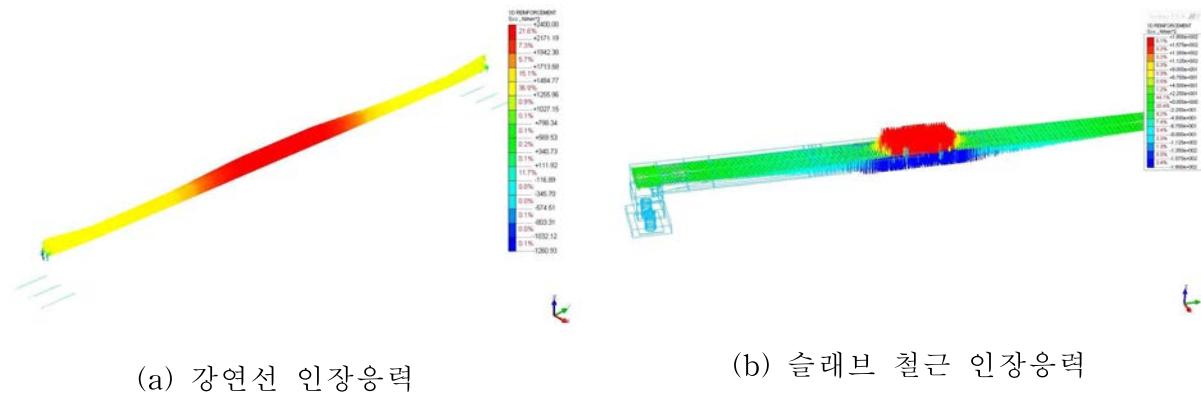
[표 3.6.11] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 인장응력

재하 하중 (ton)	인장응력(MPa) [단위:+인장, -압축]					
	검토위치① (중앙부)	검토위치② (분절부)	검토위치③ (단부)	검토위치④ (교대부)	검토위치⑤ (말뚝부)	검토위치⑥ (기초부)
	거더 하연	거더 하연	슬래브 상연	H19 주철근 주변	10cm 매립 주변부	말뚝 매립주변부
PS	-11.19	-14.32	-		-	-
30	-1.95	-8.94	+0.17	+0.07	+3.45	+4.90
60	+4.79	-3.40	+0.29	+0.08	-	+4.90
90	+4.90	+2.10	+0.45	+0.09	-	+4.90
120	-	+4.90	+0.59	+0.10	-	+4.90
150	-	+4.90	+0.70	+0.12	-	+4.90
180	-	+4.90	+2.08	+1.52	-	+4.90
210	-	-	+3.45	+3.45	-	-
240	-	-	-		-	-
270	-	-	-		-	-
300	-	-	-		-	-

[표 3.6.12] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 인장변형률

재하 하중 (ton)	인장변형률 [단위:+인장, -압축]					
	검토위치① (중앙부)	검토위치② (분절부)	검토위치③ (단부)	검토위치④ (교대부)	검토위치⑤ (말뚝부)	검토위치⑥ (기초부)
	거더 하연	거더 하연	슬래브 상연	H19 주철근 주변	10cm 매립 주변부	말뚝 매립주변부
PS	-3.36E-04	-4.30E-04	-	-	-	-
30	-5.79E-05	-2.68E-04	+7.90E-06	+3.22E-06	+2.19E-03	+5.79E-04
60	+2.49E-04	-1.02E-04	+1.32E-05	+3.88E-06	+0.00327	+7.29E-04
90	+1.75E-03	+6.34E-05	+1.96E-05	+4.59E-06	-	+9.24E-04
120	+0.00415	+2.97E-04	+2.53E-05	+5.28E-06	-	+1.13E-03
150	-	+1.22E-03	+3.02E-05	+5.98E-06	-	+1.32E-03
180	-	+2.85E-03	+2.00E-04	+7.73E-05	-	+0.15686
210	-	+0.01082	+0.06076	+1.56E-03	-	-
240	-	-	-	+0.02955	-	-
270	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-

#### (다) 강연선·철근의 인장 응력 및 변형률



[그림 3.6.66] 강연선 및 슬래브 철근의 인장응력

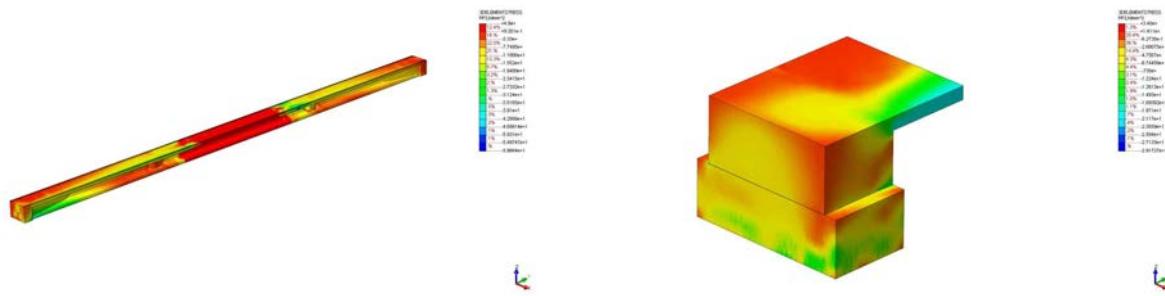
[표 3.6.13] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 철근 및 강연선 인장응력

재하 하중 (ton)	인장응력(MPa) [단위:+인장, -압축]							
	검토위치① (중앙부)		검토위치② (분절부)		검토위치③ (단부)		검토위치④ (교대부)	
	슬래브 하연 H13 주철근	강연선	슬래브 하연 H13 주철근	강연선	슬래브 H19 상연 철근	배면 H19 주철근	10cm 매립 주변부	-
PS	-	+1449.00	-	+1483.00	-	-	-	-
30	-41.63	+1501.00	-27.32	+1509.00	+11.46	+7.463	+113.35	-
60	-61.40	+1562.00	-43.13	+1539.00	+12.90	+8.44	+149.90	-
90	-114.21	+1819.00	-57.47	+1571.00	+14.63	+9.56	+180.00	-
120	-169.66	+2202.00	-74.75	+1662.00	+16.25	+10.54	+180.00	-
150	+180.00	+2400.00	-162.00	+1933.00	+18.02	+10.89	-	-
180	-	-	-164.94	+2354.00	+180.00	+62.14	-	-
210	-	-	+180.00	+2400.00	-	+180.00	-	-
240	-	-	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-

[표 3.6.14] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 철근 및 강연선 인장변형률

재하 하중 (ton)	인장변형률 [단위:+인장, -압축]							
	검토위치① (중앙부)		검토위치② (분절부)		검토위치③ (단부)		검토위치④ (교대부)	
	슬래브 하연 H13 주철근	강연선	슬래브 하연 H13 주철근	강연선	슬래브 하연 H19 주철근	배면 H19 주철근	10cm 매립 주변부	-
PS	-	-3.36E-04	-	3.48E-04	-	-	-	-
30	-2.22E-04	-1.19E-04	-1.33E-04	-2.32E-04	+5.57E-05	+3.62E-05	+5.50E-04	-
60	-3.34E-04	+2.52E-04	-2.93E-04	-8.60E-05	+6.26E-05	+4.10E-05	+7.28E-04	-
90	-5.55E-04	+1.57E-03	-2.53E-04	+8.57E-05	+7.11E-05	+4.64E-05	+9.98E-04	-
120	-0.24E-04	+3.53E-03	-3.64E-04	+5.40E-04	+7.89E-05	+5.12E-05	+0.018	-
150	+0.110	+0.480	-4.53E-04	+1.93E-03	+8.75E-05	+5.29E-05	-	-
180	-	-	-7.59E-04	+4.074E-03	+0.00235	+3.02E-04	-	-
210	-	-	+0.0762	+2.740	-	+0.3474	-	-
240	-	-	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-

(라) 콘크리트 압축 응력 및 변형률



(a) 거더부 압축응력

(b) 교대부 압축응력

[그림 3.6.67] 거더 및 교대부의 압축응력

[표 3.6.15] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 압축응력

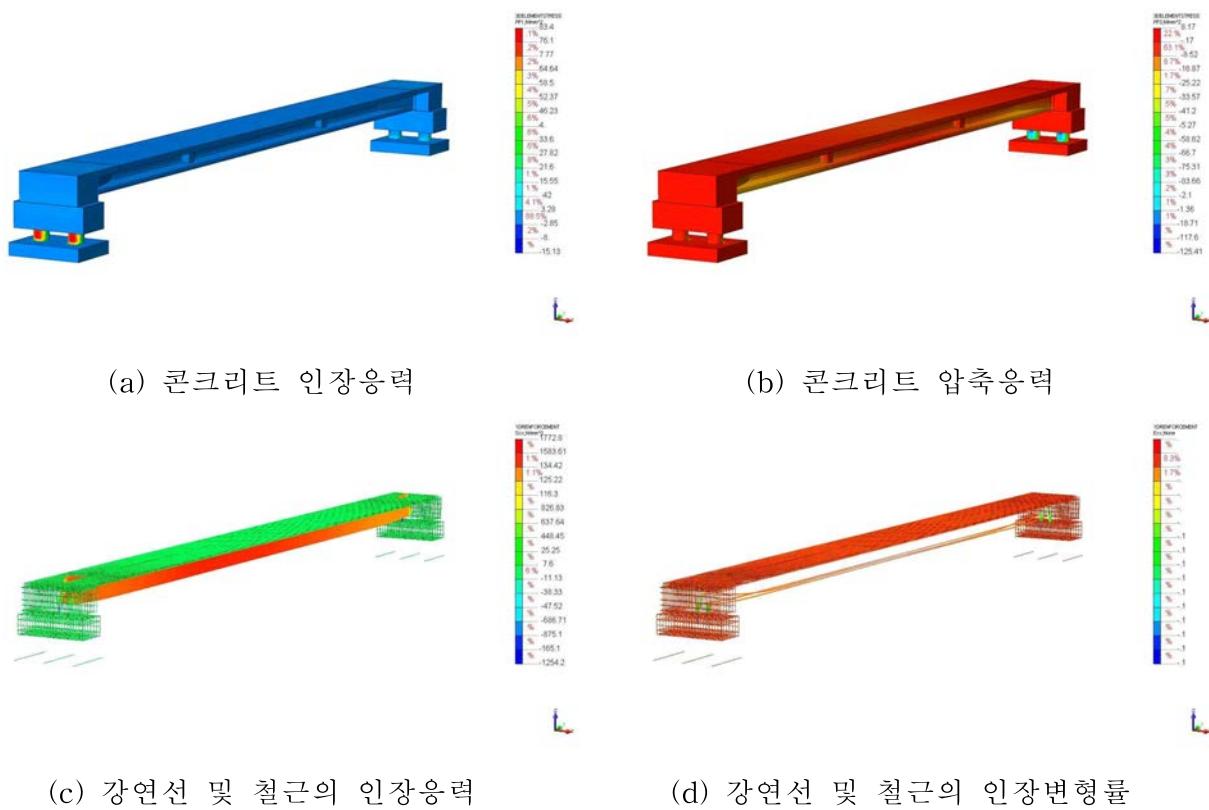
재하 하중 (ton)	압축응력(MPa) [단위:+인장, -압축]							
	검토위치① (중앙부)		검토위치② (분절부)		검토위치③ (단부)		검토위치④ (교대부)	
	거더 상연	슬래브 상연	거더 상연	슬래브 상연	슬래브 하연	전면 H19 주철근 주변	10cm 매립 주변부	말뚝 매립 주변부
PS	-0.47	-	-5.67	-	-	-	-	-
30	-11.54	-7.24	-6.64	-4.77	-18.46	-1.29	-16.05	-20.00
60	-13.73	-11.84	-0.35	-7.50	-21.98	-1.55	-19.75	-23.70
90	-14.47	-20.99	-10.01	-10.14	-25.59	-1.83	-23.55	-27.66
120	-13.36	-28.13	-11.56	-13.11	<b>-29.93</b>	-2.11	-27.02	-31.45
150	+2.18	-0.15	-12.47	-17.80	-	-2.33	-29.43	-35.06
180	<b>+4.90</b>	<b>+0.06</b>	-11.70	-23.33	-	-13.77	<b>-31.07</b>	<b>-59.02</b>
210	-	-	<b>+4.90</b>	<b>+3.45</b>	-	-25.78	-	-
240	-	-	-	-	-	<b>-0.06</b>	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-

[표 3.6.16] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 압축변형률

재하 하중 (ton)	압축변형률 [단위:+인장, -압축]							
	검토위치① (중앙부)		검토위치② (분절부)		검토위치③ (단부)		검토위치④ (교대부)	
	거더 상연	슬래브 상연	거더 상연	슬래브 상연	슬래브 하연	전면 H19 주철근 주변	10cm 매립 주변부	말뚝 매립 주변부
PS	-2.54E-04	-	-1.51E-04	-	-	-	-	-
30	-3.32E-04	-2.80E-04	-1.99E-04	-1.84E-04	-3.23E-04	-4.49E-05	-6.26E-04	-5.57E-04
60	-4.13E-04	-4.63E-04	-2.49E-04	-2.91E-04	-5.45E-04	-5.42E-05	-7.97E-04	-6.12E-04
90	-4.38E-04	-8.80E-04	-2.99E-04	-3.95E-04	-1.03E-03	-6.43E-05	-1.02E-03	-7.75E-04
120	-4.08E-04	-1.41E-03	-3.45E-04	-5.18E-04	-3.23E-03	-7.40E-05	-1.31E-03	-8.76E-04
150	-0.00633	-9.20E-02	-3.83E-04	-7.24E-04	<b>-0.151</b>	-8.22E-05	-1.72E-03	-9.88E-04
180	<b>+0.616</b>	<b>+1.730</b>	-3.52E-04	-1.03E-03	-	-5.14E-04	<b>-1.346</b>	<b>-1.808</b>
210	-	-	<b>+0.048</b>	<b>+0.056</b>	-	<b>-0.144</b>	-	-
240	-	-	-	-	-	-3.620	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-

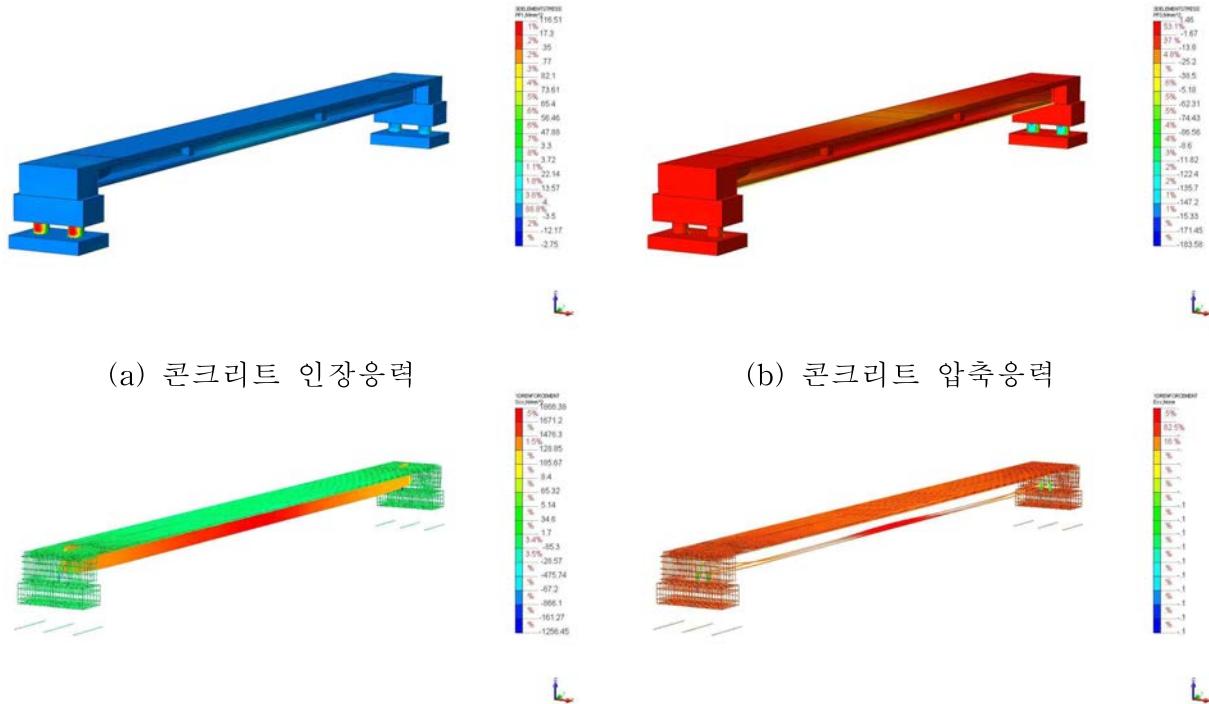
## (2) 구조해석결과

(가) 재하 하중 30ton일 경우



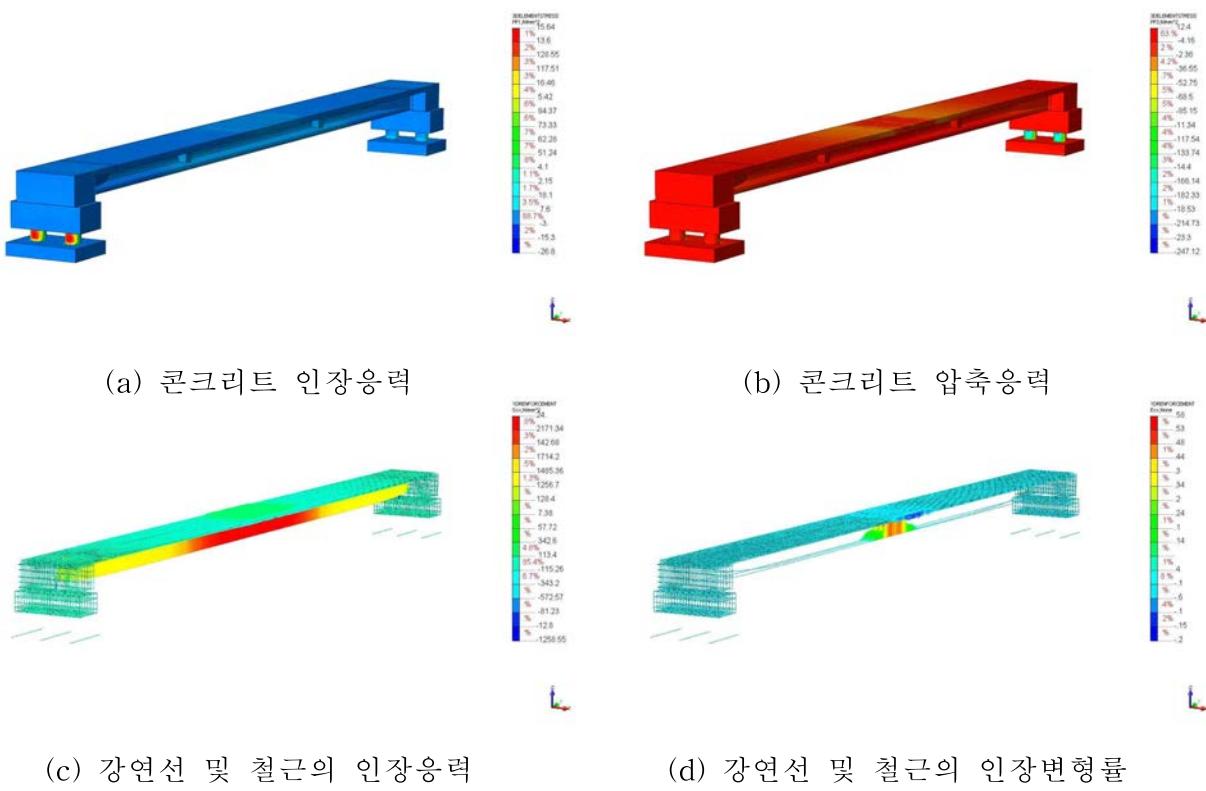
[그림 3.6.68] 구조해석 결과 (재하 하중 30ton)

(나) 재하 하중 90ton일 경우



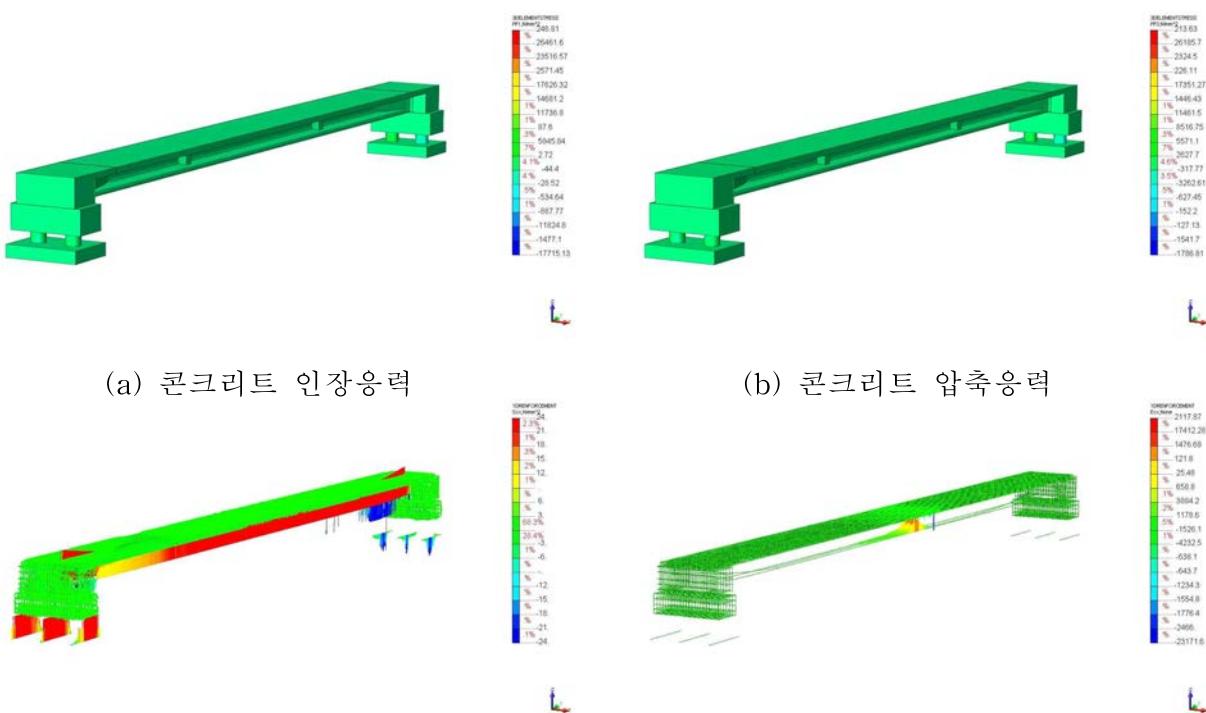
[그림 3.6.69] 조해석 결과 (재하 하중 90ton)

(다) 재하 하중 150ton일 경우



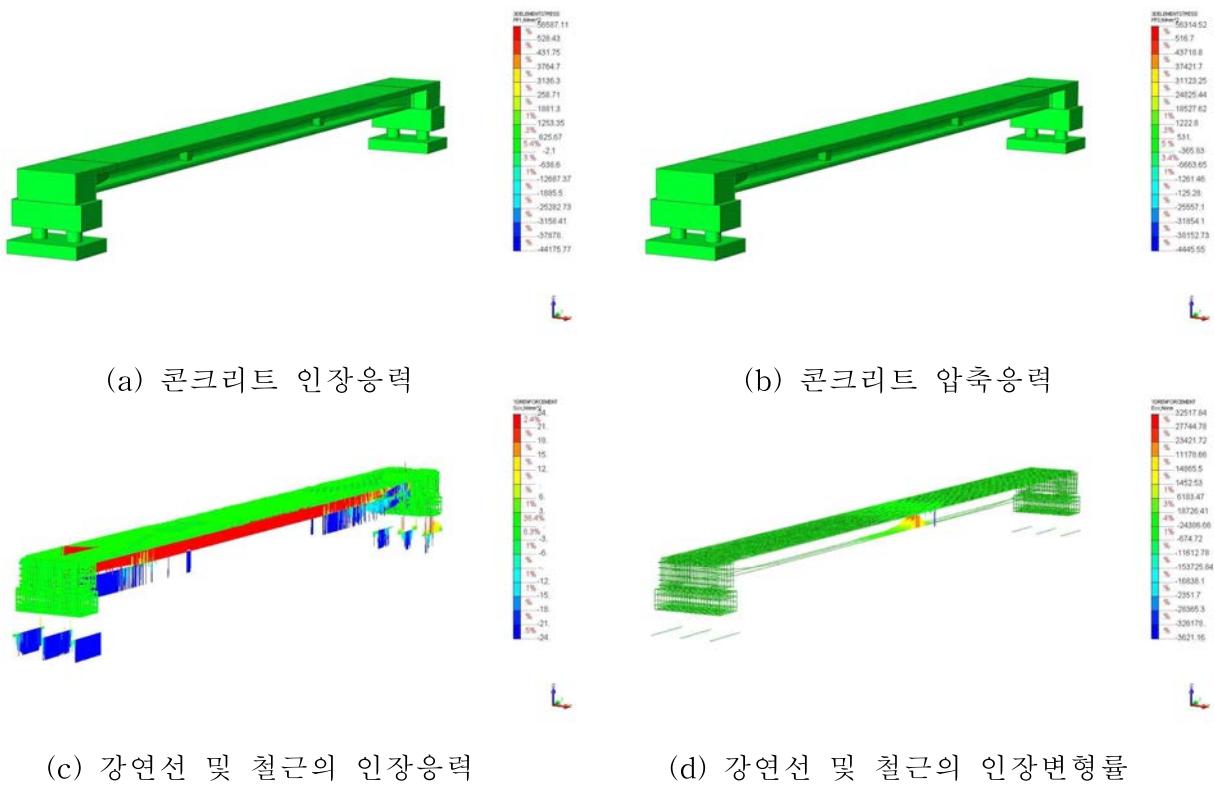
[그림 3.6.70] 구조해석 결과 (재하 하중 150ton)

(라) 재하하중 210ton일 경우



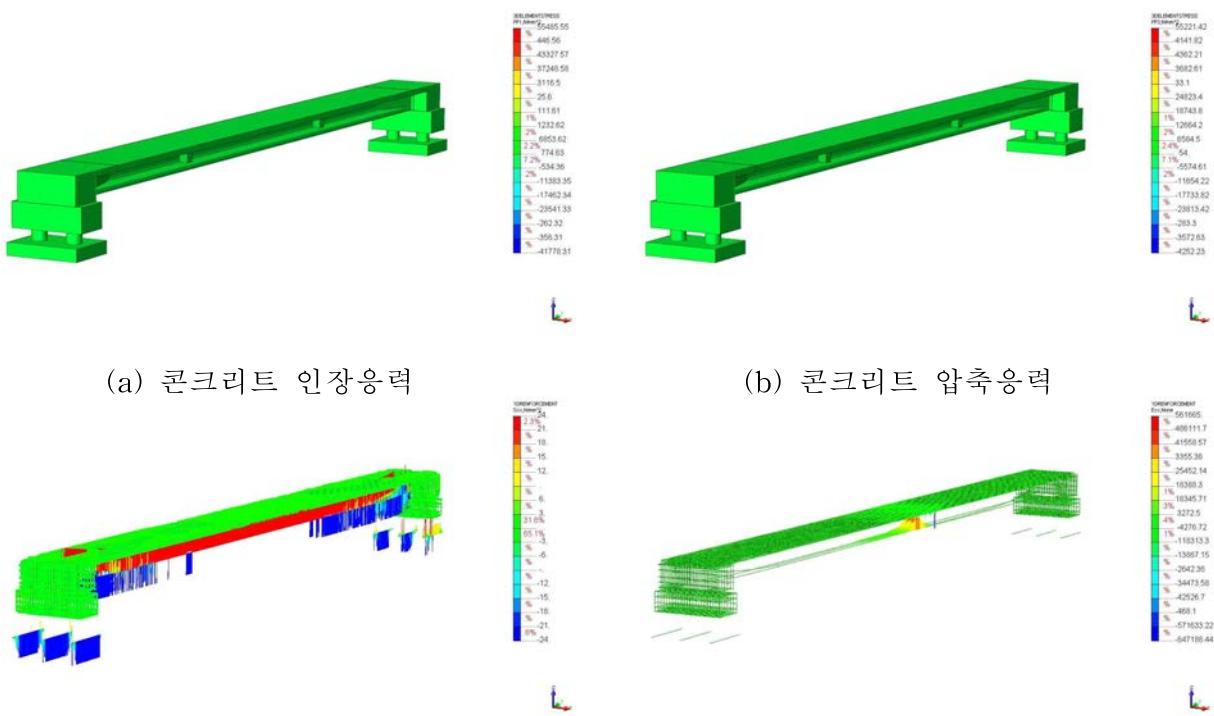
[그림 3.6.71] 구조해석 결과 (재하하중 210ton)

(마) 재하 하중 270ton일 경우



[그림 3.6.72] 구조해석 결과 (재하 하중 270ton)

(바) 재하 하중 300ton일 경우



[그림 3.6.73] 구조해석 결과 (재하 하중 300ton)

## 아. 재료시험 결과

실물실험에 적용된 재료강도시험결과는 다음과 같으며, 재료강도시험에 따른 재료 물성치를 적용하여 추가구조해석을 수행하였다.

### (1) 콘크리트 재료시험결과

[표 3.6.17] 재료시험결과에 따른 콘크리트 물성치

타설 일	타설 Part	설계 강도 (MPa)	공시체 번호	공시체 압축 강도 (MPa)	비 고
4월 7일	기초	60	1번	67.52	
			2번	75.24	
			3번	67.24	
			4번	70.17	
			5번	62.51	
평 균				68.54	적용 값
4월 12일	교대	30	1번	23.23	
			2번	22.21	
			3번	22.72	
			4번	22.98	
			5번	23.11	
평 균				22.85	적용 값
4월 19일	거더	60	1번	75.13	
			2번	67.99	
			3번	69.34	
			4번	70.67	
평 균				70.78	적용 값
4월 29일	슬래브	30	1번	25.36	
			2번	24.39	
			3번	24.88	
			4번	25.12	
			5번	25.24	
			6번	26.63	
			7번	26.10	
			8번	25.73	
평 균				25.43	적용 값

## (2) 철근 재료시험결과

[표 3.6.18] 재료시험결과에 따른 철근 물성치

구분	설계 강도 (MPa)	공시체 번호	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	항복강도 (N/mm <sup>2</sup> )	비 고
H13	400	1번	518	377	
		2번	511	348	
		3번	519	379	
평 균			516.00	368.00	적용 값
H16	400	1번	615	538	
		2번	615	537	
		3번	608	519	
평 균			612.67	531.33	적용 값
H19	400	1번	627	528	
		2번	632	532	
		3번	631	531	
평 균			630.00	530.33	적용 값
H25	400	1번	608	494	
		2번	610	495	
		3번	607	488	
평 균			608.33	492.33	

## (3) 재료 적용 강도

[표 3.6.19] 재료시험 결과에 따른 구조해석 적용 물성치

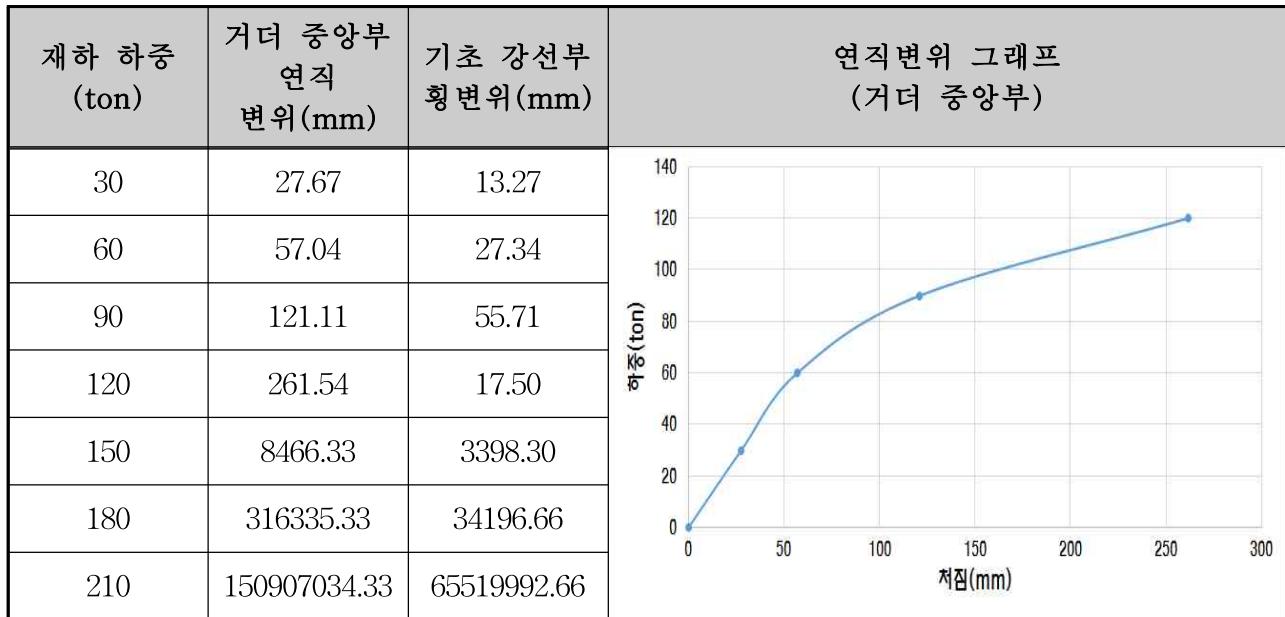
구 분	교 대	슬래브	거 더	합성 말뚝		기초부	강연선	철근
				콘크 리트	강재			
재료강도 (MPa)	22.85	25.43	70.78	22.85	400	68.54	2400	368~530
균열발생응력 (MPa)	3.01	3.18	5.30	3.01	240	5.22	-	368~530
강선도입 긴장력 (MPa)	-	-	-	-	-	-	1680	-
강재 항복강도 (MPa)	-	-	-	-	400	-	2400	-

자. 구조해석결과 (재료시험강도 적용 시)

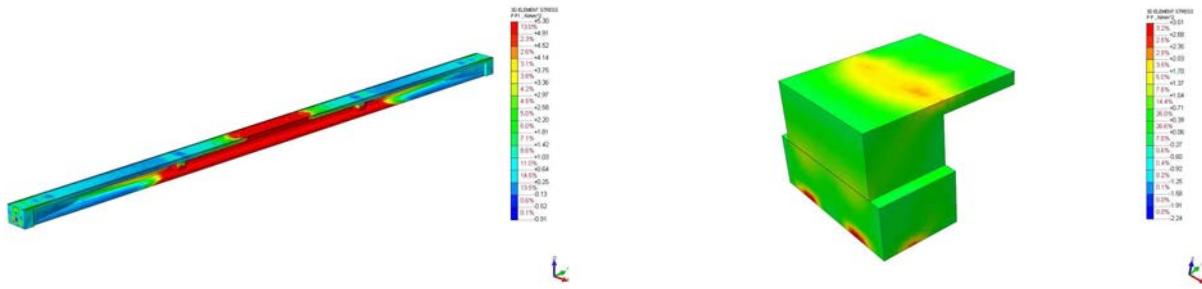
(1) 해석결과

(가) 재하 하중별 발생변위

[표 3.6.20] 재하 하중별 발생변위



## (나) 콘크리트 인장 응력 및 변형률



(a) 거더 인장응력

(b) 교대부 인장응력

[그림 3.6.74] 거더 및 교대부의 인장응력

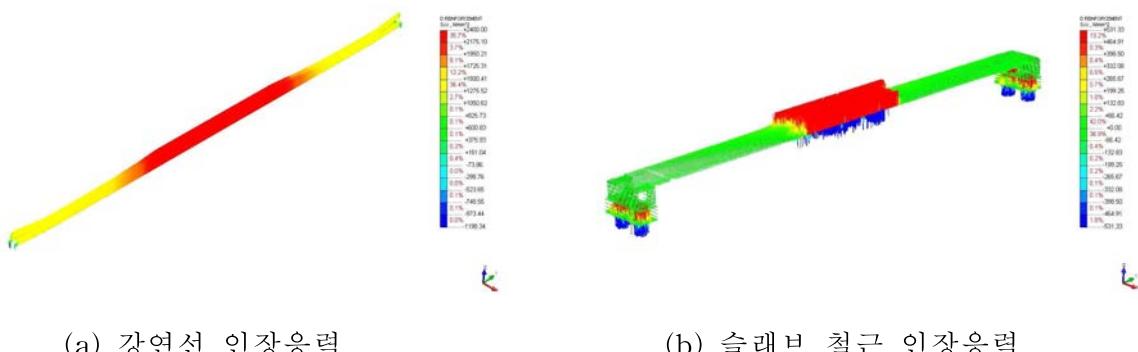
[표 3.6.21] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 인장응력

재하 하중 (ton)	인장응력(MPa) [단위:+인장, -압축]					
	검토위치① (중앙부)	검토위치② (분절부)	검토위치③ (단부)	검토위치④ (교대부)	검토위치⑤ (말뚝부)	검토위치⑥ (기초부)
	거더 하연	거더 하연	슬래브 상연	배면 H19 주철근 주변	10cm 매립 주변부	말뚝 매립주변부
PS	-2.33	-5.24	-		-	-
30	-2.65	-9.78	+1.15	+0.07	+2.58	+2.86
60	+5.28	-4.16	+1.28	+0.07	+2.63	+3.33
90	+5.29	+1.45	+1.42	+0.07	-	+3.60
120	-	+5.29	+1.56	+0.07	-	+3.45
150	-	-	+1.67	+0.61	-	+4.63
180	-	-	+1.88	-0.45	-	+5.22
210	-	-	+3.18	+0.52	-	-
240	-	-	-	+0.72	-	-
270	-	-	-	+0.74	-	-
300	-	-	-	+0.71	-	-

[표 3.6.22] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 인장변형률

재하 하중 (ton)	인장변형률 [단위:+인장, -압축]					
	검토위치① (중앙부)	검토위치② (분절부)	검토위치③ (단부)	검토위치④ (교대부)	검토위치⑤ (말뚝부)	검토위치⑥ (기초부)
	거더 하연	거더 하연	슬래브 상연	배면 H19 주철근 주변	10cm 매립 주변부	말뚝 매립주변부
PS	-3.38E-04	-4.18E-04	-	-	-	-
30	-8.09E-05	-2.68E-04	+4.26E-05	+2.35E-07	+5.38E-06	+2.35E-04
60	+1.91E-04	-1.14E-04	+4.75E-05	-6.27E-08	+5.42E-04	+2.48E-04
90	+1.51E-03	+4.00E-05	+5.31E-05	-3.04E-07	-	+3.74E-04
120	-	+2.12E-04	+5.87E-05	-5.77E-07	-	+4.83E-04
150	-	-	+6.34E-05	-6.67E-07	-	+6.27E-04
180	-	-	+1.63E-04	+6.78E-06	-	+0.035
210	-	-	5.053	-6.20E-02	-	-
240	-	-	-	-5.32E-01	-	-
270	-	-	-	-27.370	-	-
300	-	-	-	-52.030	-	-

## (다) 강연선·철근의 인장 응력 및 변형률



[그림 3.6.75] 강연선 및 슬래브 철근의 인장응력

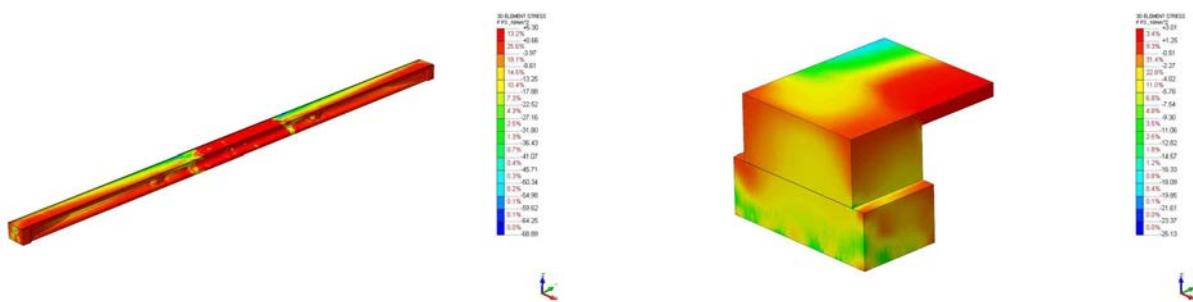
[표 3.6.23] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 철근 및 강연선 인장응력

재하 하중 (ton)	인장응력(MPa) [단위:+인장, -압축]						
	검토위치① (중앙부)		검토위치② (분절부)		검토위치③ (단부)	검토위치④ (교대부)	검토위치⑤ (말뚝부)
	슬래브 하면 H13 주철근	강연선	슬래브 하면 H13 주철근	강연선	슬래브 H19 상연 철근	배면 H19 주철근	10cm 매립 주변부
PS	-	+1450.00	-	+1490.00	-	-	-
30	-37.90	+1500.00	-26.10	+1500.00	+10.18	+5.67	+115.55
60	-63.30	+1560.00	-41.80	+1530.00	+11.49	+6.42	+160.12
90	-108.00	+1820.00	-57.90	+1560.00	+13.07	+7.31	+216.50
120	-181.00	+2300.00	-76.90	+1590.00	+14.66	+8.03	+305.56
150	+368.00	+2400.00	-105.00	+1790.00	+16.76	+5.68	+531.33
180	-	-	-340.00	+2200.00	+234.61	+13.01	-
210	-	-	+368.00	+2400.00	+531.33	+531.33	-
240	-	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-

[표 3.6.24] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 철근 및 강연선 인장변형률

재하 하중 (ton)	인장변형률 [단위:+인장, -압축]						
	검토위치① (중앙부)		검토위치② (분절부)		검토위치③ (단부)	검토위치④ (교대부)	검토위치⑤ (말뚝부)
	슬래브 하면 H13 주철근	강연선	슬래브 하면 H13 주철근	강연선	슬래브 H19 상연 철근	배면 H19 주철근	10cm 매립 주변부
PS	-	-3.12E-04	-	-3.35E-04	-	-	-
30	-1.84E-04	-8.06E-05	-1.27E-04	-2.28E-04	+4.94E-05	+2.76E-05	+5.61E-04
60	-3.07E-04	+2.06E-04	-2.03E-04	-1.12E-04	+5.58E-05	+3.12E-05	+7.77E-04
90	-5.26E-04	+1.55E-03	-2.81E-04	+4.65E-05	+6.34E-05	+3.55E-05	+1.05E-03
120	-8.77E-04	+3.98E-03	-3.73E-04	+2.24E-04	+7.11E-05	+3.89E-05	+1.48E-03
150	-5.28E-02	+0.395	-5.12E-04	+1.22E-03	+8.14E-05	+2.76E-05	+3.81E-03
180	-	-	-1.65E-03	+3.32E-03	+0.00113	+6.32E-05	+1.49E-01
210	-	-	+9.040	+0.290	+39.610	+0.879	-
240	-	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-

(라) 콘크리트 압축 응력 및 변형률



(a) 거더부 압축응력

(b) 교대부 압축응력

[그림 3.6.76] 거더 및 교대부의 압축응력

[표 3.6.25] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 압축응력

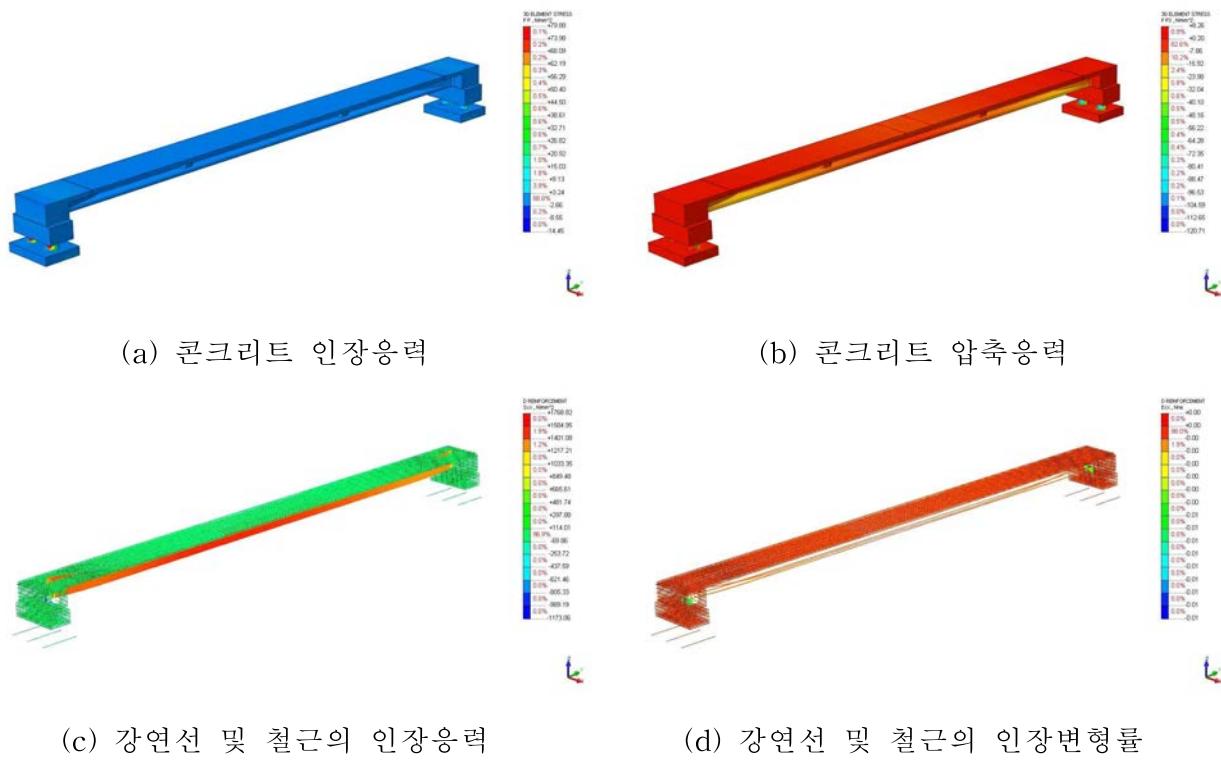
재하 하중 (ton)	압축응력(MPa) [단위:+인장, -압축]							
	검토위치① (중앙부)		검토위치② (분절부)		검토위치③ (단부)		검토위치④ (교대부)	
	거더 상연	슬래브 상연	거더 상연	슬래브 상연	슬래브 하연	전면 H19 주철근 주변	10cm 매립 주변부	말뚝 매립 주변부
PS	-7.64	-	-4.39	-	-	-	-	-
30	-10.36	-6.61	-6.07	-4.59	-2.25	-22.22	-73.81	-11.53
60	-13.28	-10.67	-7.84	-7.25	-2.60	-27.23	-96.58	-13.68
90	-15.2	-17.76	-9.64	-9.79	-4.43	-32.64	-111.89	-15.99
120	-16.87	-22.31	-11.39	-12.33	-6.29	-38.19	-138.54	-18.32
150	-6.20	-0.41	-13.25	-16.18	-9.46	-41.94	-531.33	-21.88
180	+5.30	-0.05	-15.38	-20.12	-189.34	-89.13	-31.07	-12.17
210	-	+0.03	+5.30	+3.18	-	-531.33	-	-
240	-	-	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-

[표 3.6.26] 각 검토단면별 재하 하중에 따른 압축변형률

재하 하중 (ton)	압축변형률 [단위:+인장, -압축]							
	검토위치① (중앙부)		검토위치② (분절부)		검토위치③ (단부)		검토위치④ (교대부)	
	거더 상연	슬래브 상연	거더 상연	슬래브 상연	슬래브 하연	전면 H19 주철근 주변	10cm 매립 주변부	말뚝 매립 주변부
PS	-2.10E-04	-	-1.19E-04	-	-	-	-	-
30	-2.85E-04	-2.44E-04	-1.66E-04	-1.69E-04	-1.09E-05	-1.08E-04	-3.58E-04	-2.45E-04
60	-3.65E-04	-4.08E-04	-2.14E-04	-2.71E-04	-1.26E-05	-1.32E-04	-4.69E-04	-2.90E-04
90	-4.20E-04	-7.74E-04	-2.63E-04	-3.72E-04	-2.15E-05	-1.58E-04	-5.43E-04	-3.40E-04
120	-4.71E-04	-1.31E-03	-3.10E-04	-4.83E-04	-3.05E-05	-1.85E-04	-6.73E-04	-3.90E-04
150	-0.00244	-7.84E-02	-3.61E-04	-6.79E-04	-4.59E-05	-2.04E-04	-2.61E-03	-4.62E-04
180	+0.307	-1.064	-4.24E-04	-1.02E-03	-9.19E-04	-4.33E-04	-	-1.80E-03
210	-	-	+2.953	+4.155	-	-4.090	-	-
240	-	-	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-

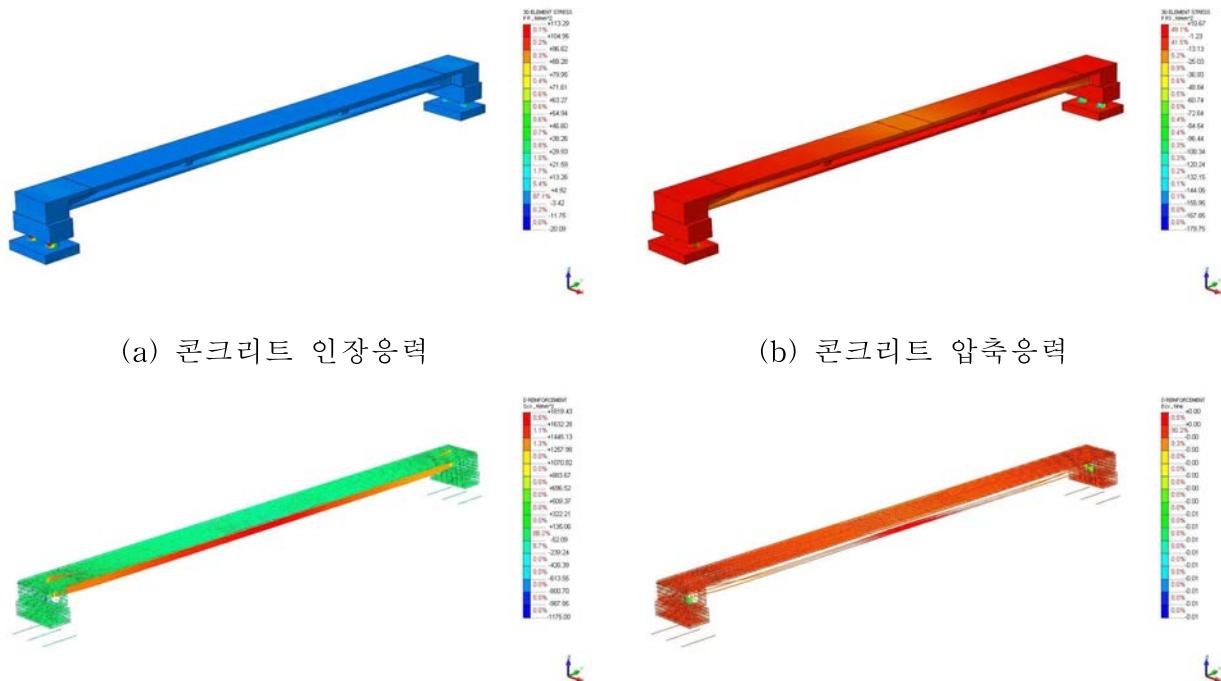
## (2) 구조해석결과

(가) 재하 하중 30ton일 경우



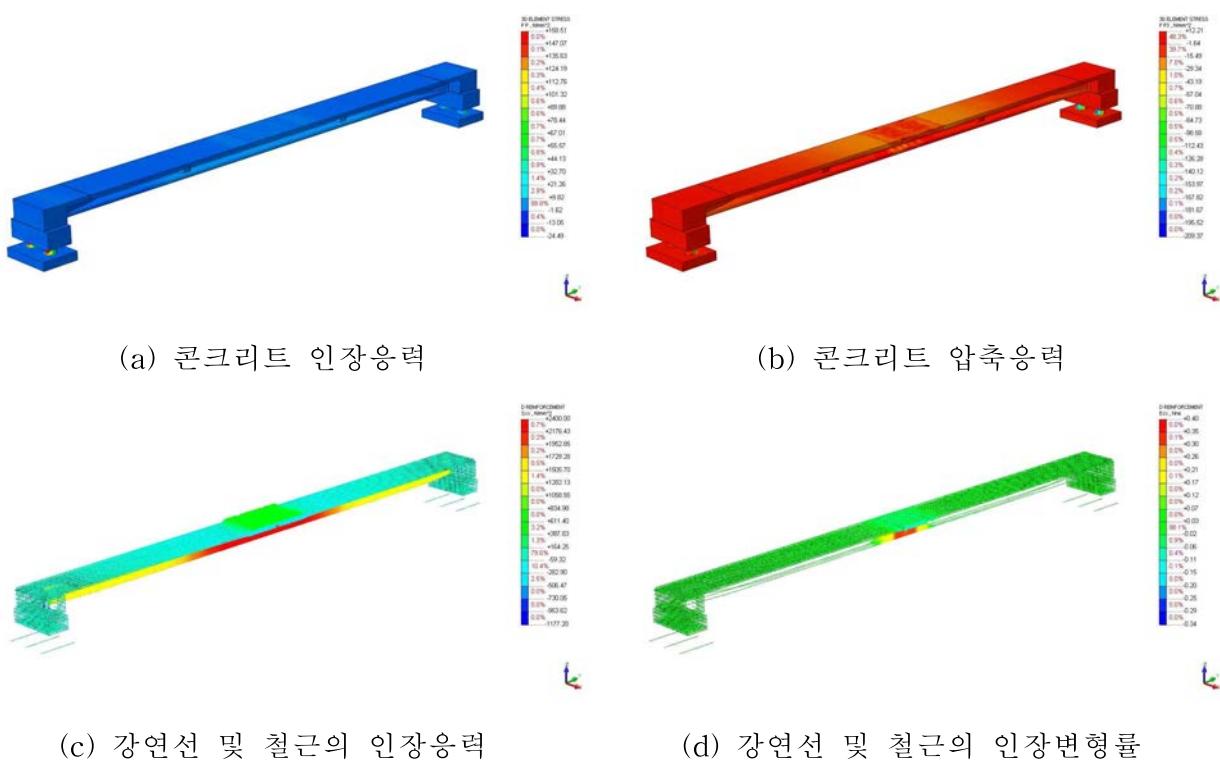
[그림 3.6.77] 구조해석 결과 (재하 하중 30ton)

(나) 재하 하중 90ton일 경우



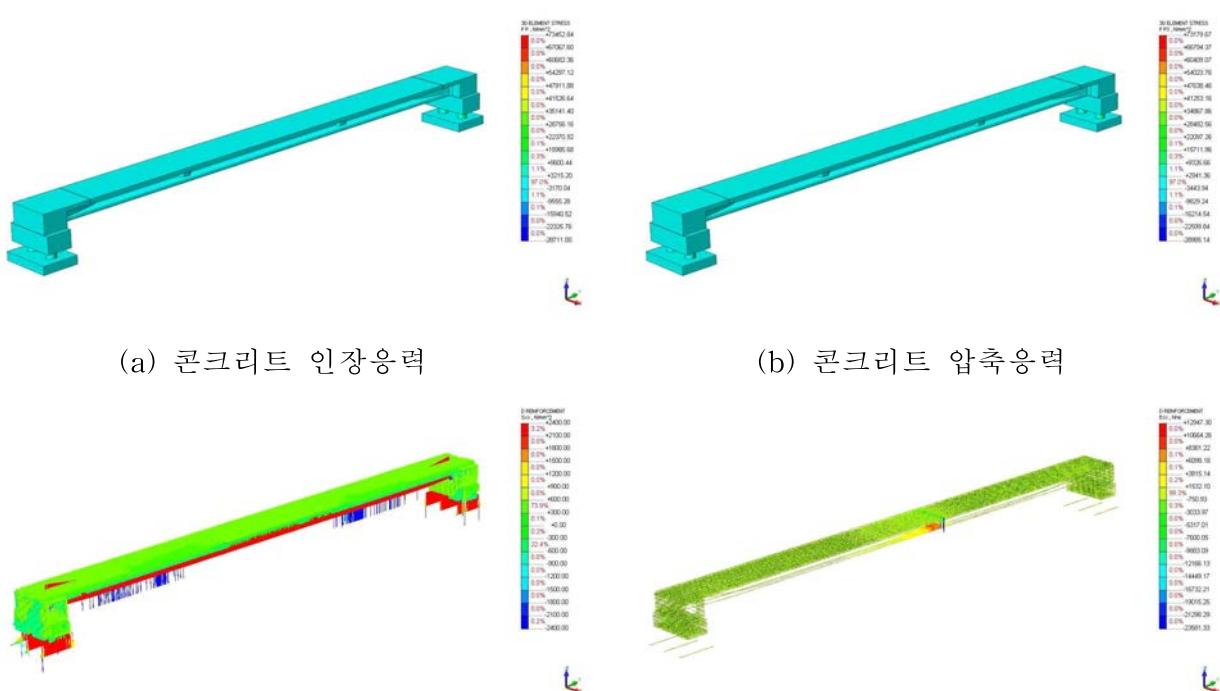
[그림 3.6.78] 구조해석 결과 (재하 하중 90ton)

(다) 재하 하중 150ton일 경우



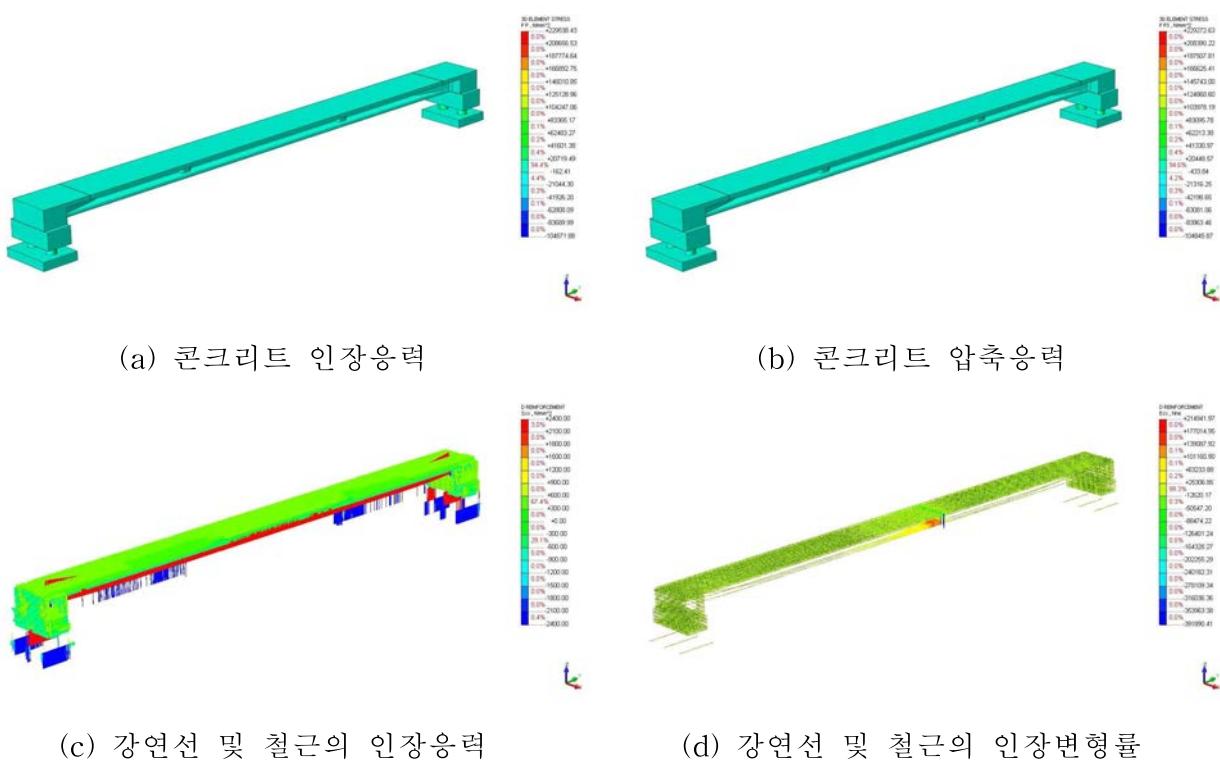
[그림 3.6.79] 구조해석 결과 (재하 하중 150ton)

(라) 재하 하중 210ton일 경우



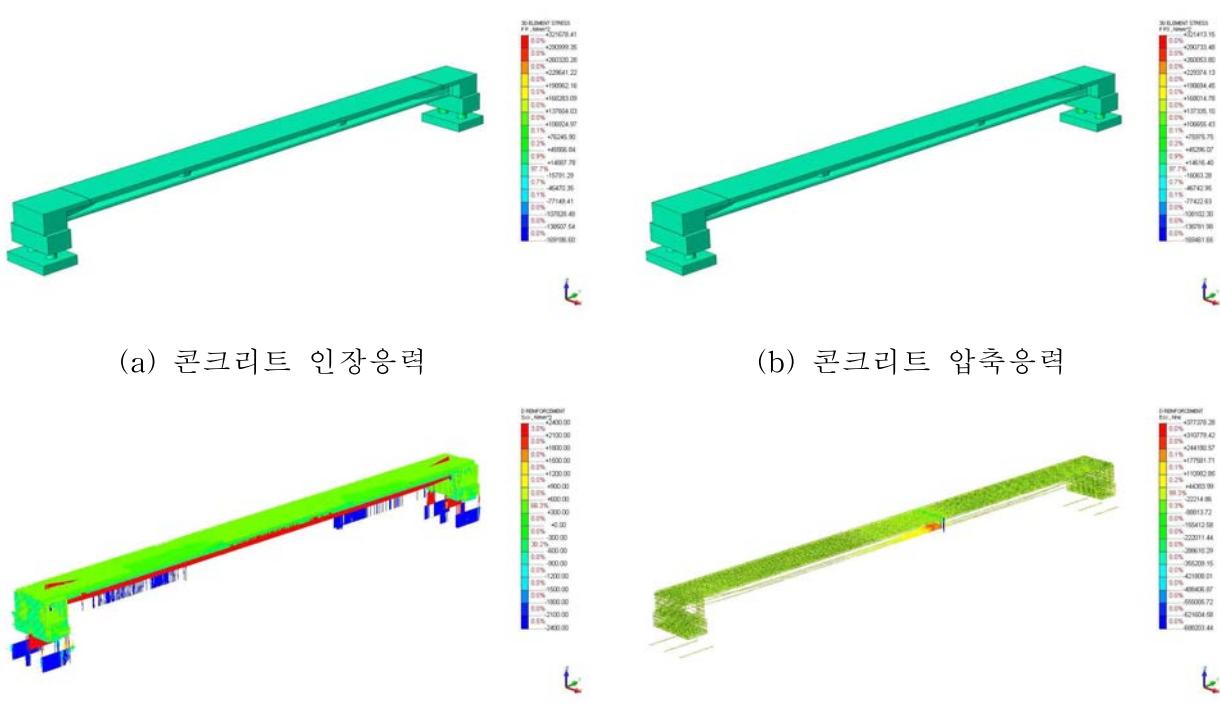
[그림 3.6.80] 구조해석 결과 (재하 하중 210ton)

(마) 재하 하중 270ton일 경우



[그림 3.6.81] 구조해석 결과 (재하 하중 270ton)

(바) 재하 하중 300ton일 경우



[그림 3.6.82] 구조해석 결과 (재하 하중 300ton)

## 9. 선형탄성 구조 해석 (Linear Analysis)

가. 단면 ① (중앙부)

$$-f_r = \frac{M_{cr}}{I} \cdot y + \frac{P_e \cdot e_3}{I} y + \frac{(P_1 + P_2) \cdot e_1}{I} y + \frac{P_e \cdot 3}{A_g}$$

$$M_{cr} = \left( -f_r + \frac{P_e \cdot e_3}{I} y + \frac{(P_1 + P_2) \cdot e_1}{I} y + \frac{P_e \cdot 3}{A_g} \right) \times \frac{I}{y}$$

$$M_{cr} = \left( -0.63 \sqrt{f_{ck}} + \frac{(P_e \cdot e_3) \cdot 3}{I} y + \frac{(P_1 + P_2) \cdot e_1}{I} y + \frac{P_e \cdot 3}{A_g} \right) \times \frac{I}{y}$$

o] 때,  $f_{ck} = 30 MPa$

$$P_e = 2400 \times 0.7 \times 1525.7 = 2,563,176 N$$

$$e_1 = 410 mm$$

$$e_2 = 52 mm$$

$$I = 2.2929 \times 10^{11} mm^4$$

$$y = -514.323 mm$$

$$\therefore M_{cr} = 1,066 KN-m$$

나. 단면 ③ (우각부)

$$-f_r = \frac{M_{cr}}{I} \cdot y + \frac{P_e \cdot e_p}{I} y + \frac{P_e}{A}$$

$$M_{cr} = \left( -f_r + \frac{P_e \cdot e_p}{I} y + \frac{P_e}{A} \right) \times \frac{I}{y}$$

$$M_{cr} = \left( -0.63 \sqrt{f_{ck}} + \frac{P_e \cdot e_p}{I} y + \frac{P_e}{A} \right) \times \frac{I}{y}$$

o] 때,  $f_{ck} = 60 MPa$

$$P_e = 2,563,176 N$$

$$e = 611 mm$$

$$I = 1.425 \times 10^{11} mm^4$$

$$y = 717 mm$$

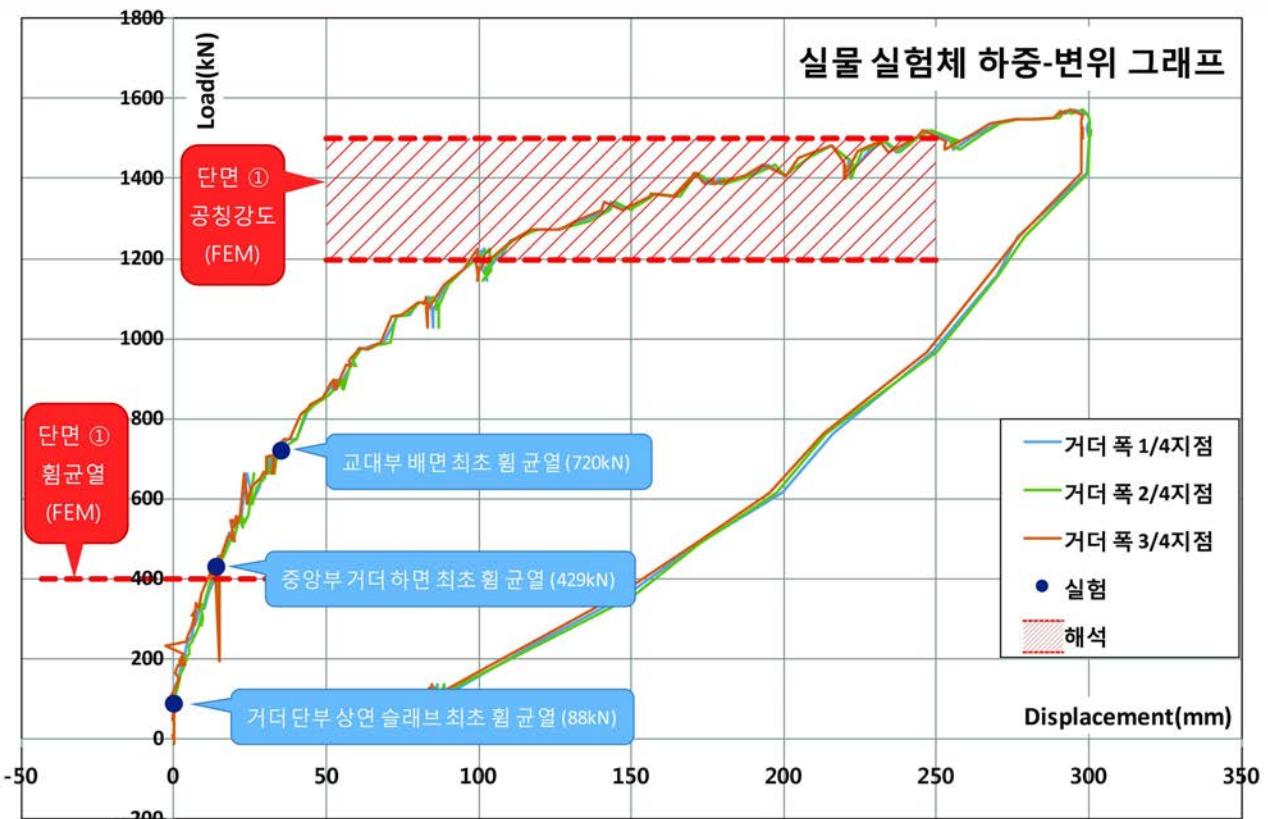
$$\therefore M_{cr} = 5,263 KN-m$$

## 10. 비선형 및 선형탄성 구조 해석 결과 분석

단면 ③ → 단면 ①로 이어지는 휨 균열 발생순서는 설계 시 예측한 순서와 일치하였다. 단면 ③의 설계 휨 균열강도는  $30\text{kN}(\text{Mcr}=1,066\text{kN} \cdot \text{m})$ 로부터 재하 하중으로 환산한 값, 시공 여건을 반영하여 슬래브 자중을 고려함)으로 계측 값  $88\text{kN}$ 의 34% 수준이고 단면 ①의 설계 휨 균열강도는  $500\text{kN}(\text{Mcr}=5,263\text{kN} \cdot \text{m})$ 로부터 재하 하중으로 환산한 값)으로 계측 값  $547\text{kN}$ 의 91% 수준으로 안전 측의 값을 예측하였다. 특히 PSC 거더 중앙부 하면(단면 ①)의 휨 균열강도는 설계하중에 대한 사용한계를 의미하므로 공정 설계 값 대비 실제 거동은 약 109% 수준의 안전율을 보이고 있음을 알 수 있다.

재료 강도 시험 결과를 반영한 비선형 해석 결과와 실제 거동 사이에는 재하 하중  $1,200\text{kN}$ 까지 균열 및 파괴 거동이 거의 일치하고 있음을 아래 [그림 3.6.83]에서 확인할 수 있다.

비선형 해석에서 재하 하중  $1,200\text{kN}$ 에서 인장 연단 강연선이 항복변형률에 도달하고  $1,200\sim 1,500\text{kN}$  범위 내에서 상연 콘크리트 압축변형률이  $3,000\mu\varepsilon$ 을 초과하면서 해석 값이 발산하는, 즉 파괴상태에 이르는 것으로 나타났지만 실제 구조물의 거동은 약  $1,570\text{kN}$ 까지 하중을 지지하였음에도 파괴의 징후를 보이지 않는 충분한 연성을 발휘하였다.



[그림 3.6.83] 시제품 성능 분석

## 11. 결 론

가. 본 제안 기술에 대한 종합적인 안전성 검증을 위하여 실물 규격의 시제품을 제작하여 재하실험을 수행하였다.

나. 거더 중앙 단면(단면 ①)을 기준으로 설계기준 값에 의한 공칭 휨 균열 강도는 계측 값의 91% 수준으로 보수적인 값을 보였으며, 주요 설계 단면의 항복 이후, 비선형 해석에서 도출된 예상 파괴하중인 1,200kN을 초과할 때까지 시스템 파괴의 징후는 없었다.

다. 실험은 재하 하중 1,570kN(DB24 하중의 약 3.6배), 거더 중앙부 처짐 300mm에 도달하여 가력기의 최대 스트로크 제한으로 종료하였으며, 이때까지 시스템 파괴의 징후는 없었으며 이로써 제안 기술이 적용된 교량 형식은 충분한 연성을 보유함을 확인하였다.

라. 실험 종료 시까지 거더 세그먼트 접합부를 가로지르는 균열은 관찰되지 않았다. 또한 CFT말뚝 본체나 말뚝 두부 접합면에서 어떠한 형태의 균열이나 손상도 발견되지 않았다. 그러므로 해당 접합면의 안전성은 충분한 것으로 판단된다.

마. 지점부 거더-교대 접합부에서는 거더 단부 상면 슬래브에서 최초 휨 균열이 발생하였고, 교대 배면에서는 1차 콘크리트 타설 면에서 균열이 발생하였으나 이 부분은 RC 구조로서 설계단계에서 예상한 발생시기와 발생시기가 일치하고 거동 또한 축소모형 실험에서 관찰한 패턴과 일치하게 거동하여 향후 도로교설계기준에 준하여 설계할 경우 충분히 제어할 수 있음을 확인하였다.



## 제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

### 1절. 목표 달성도

연구개발 목표		달성도	내용
1 차 년 도	80MPa급 콘크리트 생산 기술 및 설비 구축	완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 콘크리트 생산기술 및 설비 구축</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 시험성적서</li> </ul>
	프리텐션과 포스트텐션 기법이 병용된 부재의 거동 예측 기술 확보	완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 요소실험</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 보고서</li> </ul>
		완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시제품 제작</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 실물제작(1,2차년 연속공정)</li> </ul>
	교대 일체형 교량에 적합한 신형식 말뚝 개발	완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신형식 말뚝 본체 성능평가</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 분석 완료. 보고서</li> </ul>
		완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 학술회의 발표</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 15년10월 한국복합신소재구조학회</li> <li>• 15년10월 한국철도학회</li> </ul>
	강결 접합 구조를 보증하는 말뚝 두부 보강 방안	완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 두부 보강부 성능 평가</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 분석완료, 보고서</li> </ul>
		완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 학술회의 발표</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 16년 4월 한국복합신소재구조학회</li> </ul>
		완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 특허출원중 (출원번호 10-2016-0133354)</li> </ul>
	시제품 제작 (2차년도 계속공정)	완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 구조물 설계 및 설계도 작성</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 설계도면 1식</li> </ul>
		완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 거더 세그먼트 접합부 성능평가</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 분석 완료. 보고서</li> </ul>
		완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 거더-교대 접합부 성능평가</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 분석 완료. 보고서</li> </ul>

연구개발목표		달성도	내용	
2 차 년 도	프리텐션과 포스트텐션 기법이 병용된 부재의 거동 예측 기술 확보	• 시제품 제작 및 성능평가 시험	완료	• 16.06.02. 성능평가 완료 • 공인시험성적서
		• 학술회의 발표	완료	• 15년10월 한국철도학회
		• 산학연 강좌	완료	• 산학연 강좌(기술 세미나) 개최 1회
	저형고 PSC-I 거더-교대 일체형 교량 시스템	• 현장 시험 시공	진행 중	• 발주처 사정으로 지연 중
		• 실교량 모니터링	진행 중	• 발주처 사정으로 지연 중
		• 원설계 대비 재료비 절감	완료	• 원가비교표 1부
		• 특허출원중	완료	• 특허출원중 (출원번호 10-2016-0111295)
		• 학술지 논문게재	완료	• 16년09월 한국복합신소재구조학회
	설계 및 시공 기술	• 설계도서	완료	• 설계도서 1식
		• 시공 및 관리 지침서	완료	• 시공 및 관리 지침서 1식
	전용 프로그램 개발	• 프로그램	완료	• 프로그램 개발 계약서 1부 • 표준 계산서
	신기술 인증	• 신기술 인증 신청서	완료	• 16년 10월 방재신기술 신청
	제품 홍보	• 광고 게재	완료	• 장현산업 홈페이지에서 검색 가능
	인력양성	• 연구 인력 양성	완료	• 16년 08월 박사학위 취득

## 2절 관련 분야 기여도

### (1) 국가 연구 개발 사업 유사연구 검토

본 연구와 관련하여 국토교통부 소관 및 타 부처 연구개발 사업 중 복성을 검토하기 위하여 국가 R&D사업관리 서비스를 통하여 검색한 결과 유사 과제는 2건 이었다.

그러나 이들 연구는 일체형 교량의 거동 예측을 위하여 해석 방법에 대한 이론적 접근 방안을 제시하고 있으며 설구조물의 설계 및 시공 개선 방안 등에 대한 내용보다는 이론적 연구에 그치므로 성과물 또한 논문, 보고서 등으로 한정된다.

[표 4.2.1] 유사 연구 분석



[표 4.2.2] 국가연구개발사업 유사 연구 과제

(단위 : 억 원)

부처 명	사업 명	과제 명	예산	비 고
중소기업청	산학연공동기술개발	교좌장치 및 신축이음을 제거와 최소 유지 관리하는 교대 일체식 교량의 설계 기술 개발	0.65	
교육과학기술부	신진연구지원사업	장기거동을 고려한 일체식 PSC 거더 교량의 해석과 설계 기법 개발	0.99	

국가 R&D사업관리 서비스를 통한 유사연구 검토에서는 검색이 되지 않았으나 국내 학술 논문 등을 조사한 결과 유사한 과제를 2건 더 찾을 수 있었다. 이 중 한국도로공사 도로연구소(1999)가 주관한 과제는 교량의 유지관리 비용 절감을 목적으로 일체형 교량 시스템을 국내에 도입하는 성격이었다. 상대적으로 최근에 수행된 스마트하이웨이사업단의 세부 과제 역시 일체형 교량이 무조인트인 점으로 인한 주행성 향상, 유지관리비용 절감을 목적으로 수행된 과제였으며, 상하부의 강성을 고려한 형고 저감이나 경제성 향상을 위한 프리텐션 및 포스트텐션 방식의 조합과 다양한 말뚝의 적용을 목적으로 하는 본 과제와는 차이가 있다.

[표 4.2.3] 유사 연구과제와 본 과제의 차이점

연구기관	과제 명	과제 목적	주요 성과품	본 과제와 차이점
도로공사 동아건설	무조인트 교량 실용화 연구	유지관리비용 절감을 위하여 무조인트교량 시스템을 국내 도입	국내최초 현장시공 (평촌교) 일체식교량 설계지침	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일체식교량 개념을 국내에 최초 소개함</li> <li>• 표준 PSC I 거더(지간 30m, 형고 2m)와 H형 강 말뚝을 사용한 일반적인 형태</li> <li>• 교량 형고 및 프리스트레싱 방식과 말뚝의 강성에 관한 연구는 진행된 바 없음</li> </ul>
도로공사 승화E&C	스마트 하이웨이 사업단 1~5세부 Smart structure 설계기술개발	주행성능 향상, 유지관리비용 절감	부재 실험 학술논문 연구 보고서	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 말뚝과 교대 접합부, 거더와 교대 접합부에 대한 실험을 집중적으로 수행하고 접합 기구에 대한 특허 출원</li> <li>• 상부구조는 PSC, 강거더를 대상으로 검토하였으나 형고 감소를 위한 시도와 프리스트레싱 방법 및 상하부 강성에 따른 모멘트의 분배를 고려한 최적화 등은 전무함.</li> </ul>

## (2) 사업화과제의 차별화 내용

상기에 살펴본 바와 같이 그간 국토교통부 및 여타 기관의 유사 연구 과제는 유지관리가 우수하고 경제성이 우수하여 해외에서 상용되고 있는 일체식 교량을 국내에 도입하기 위하여 이론적, 실험적 연구 개발을 수행하였다. 그러나 수해복구 또는 하천을 횡단할 때 필수적으로 필요한 형하 공간 확보를 위한 저형고 교량에 대한 연구는 전무한 상태이다. 또한 경제성 향상을 위한 어떠한 연구도 진행되지 않았으므로 기존 연구를 바탕으로 다음과 같은 연구를 추가로 수행하여 한층 진일보된 성과를 얻고자 한다.

- ① 강도콘크리트를 사용한 분절거더를 이용하여 프리플렉스 급의 형고 구현
- ② 프리텐션과 포스트텐션 방식을 조합한 프리스트레싱 도입으로 경제성 향상
- ③ 상하부 강성 조절로 모멘트 균형을 통한 최상의 경제성을 가지는 단면 선정
- ④ 다양한 강성 및 지형에 적용 가능한 복합 말뚝 개발로 경제성 향상

## (3) 국내외 시장분석 및 사업화 전망

## (가) 국내외 시장 분석

본 연구에서 개발하고자 하는 것은 프리플렉스 급의 저형고를 갖는 일체식 교량이다. 먼저 이러한 형식이 필요한 국내 시장은 1차적으로 형하 여유 공간 확보가 어려운 수해복구 교량과 도로 및 철도 교량에 있어서도 하천횡단 혹은 도심지를 횡단하는 교량이 될 수 있을 것으로 판단된다. 교량 형식별로는 고가의 프리플렉스 교량과 PSC I 형 교량 중 형하 여유고가 부족한 지역에 가설되는 교량이 그 대상이 된다. 시장규모를 분석하기 위하여 구매의향을 밝힌 (구)소방방재청의 최근 5년간 교량 복구비를 분석하면 다음과 같다.

## [표 4.2.4] 최근 5년간 교량 복구비용

구 분	2009	2010	2011	2012	2013	평균
복구비 (억 원)	128	70	117	73	64	91

\* (구)소방방재청 복구지원비 중 교량부분 내역 발췌

가장 1차적인 수해복구 시장 규모는 연평균 약 90억 원 정도가 된다. 2차적인 시장으로는 국토교통부에서 시행하는 국가 예산을 바탕으로 한 SOC사업과 민간 수요에 따라 발생되는 시장으로 구분되나 민간수요는 그 규모를 파악하기 어렵고 일정하지 않으므로, 예측 가능하고 안정적인 수요가 있는 국가 SOC 사업 예산만을 기준으로 그 시장 규모를 산정하였다.

## [표 4.2.5] 각 분야별 SOC 사업 예산

(단위 : 억 원, 국토교통부 보도자료 2014년 1월 2일)

도로	철도	도시 철도	항공 공항	물류 및 기타	수자원	지역 및 도시	산업 단지	주택	계
82,954	61,799	6,233	1,007	12,684	23,830	7,978	8,991	2,682	209,116

제안기술과 같은 교량은 도로, 철도분야 이외에 수자원 및 도시 등 다양한 분야에 필요한 요소이나, 전 분야를 파악하는 것은 매우 어려우므로 발생빈도가 높은 도로 및 철도분야 예산인 14.5조와 낮은 협고를 요구하는 수자원 및 지역 및 도시계획분야의 예산을 기준으로 시장 규모를 파악하였다.

먼저 도로 및 철도분야에 대한 시장 규모를 파악하기 위하여 국토교통부에서 제시한 도로의 평균건설단가를 검토하였다.(도로업무편람 2013년, 국토교통부)

## [표 4.2.6] 국도 평균 건설 단가

(단위 : 억 원/km)

구 分	고속국도	일반국도	적용
신설4차로	376	212	-
4차로확폭	297	152	-
평균	336.5	182	260

따라서 도로 및 철도예산을 4차선 평균건설단가로 나누면 약 550Km 정도를 건설할 수 있다. 도로 및 철도에는 토공, 교량, 터널 등이 포함되어 있으며 가설지역마다 그 비율이 상이하므로 정량적으로 그 비율을 정하는 것은 곤란하다. 따라서 그간 국내에 건설된 고속도로 노선별 교량 연장 비율을 근거로 교량공사비를 추정할 수 있다.

[표 4.2.7] 국내 고속도로 노선별 교량 비율

구 분	교 량		
	개소	연장(km)	비 율 (%)
경부선	862	53.06	12.8
남해선	371	26.11	15.4
88올림픽선	169	14.95	8.2
서해안선	859	98.08	28.8
울산선	24	0.64	4.5
호남선	305	21.94	11.3
대전통영선	692	95.32	44.3
중부내륙선	374	57.03	28.0
영동선	538	54.95	23.4
중앙선	594	77.36	26.8
동해선	174	29.73	49.4
서울외곽선	336	81.2	63.4
제2경인선	103	10.65	39.9
경인선	61	2.36	9.9
구마선	58	5.1	17.0
계	5520	628.48	25.54

※“고속도로 유지관리비용 분석을 통한 예비타당성조사에서의 적용방안연구, 2008, 대한토목학회”

대략 고속도로에서 교량이 차지하는 비율은 전 연장의 약 25%정도이다.

국토교통부에서 제시한 4차로 교량의 평균건설단가는 다음과 같다. (도로업무편람 2013년, 국토교통부)

[표 4.2.8] 교량 평균 건설 단가

(단위 : 억 원/km)

구 分	고속국도	일반국도	적 용
신설4차로	555	500	-
4차로화폭	520	498	-
평균	537.5	499	518

금년 예산과 도로건설 평균단가 및 도로에서 교량이 차지하는 비율을 고려하여 국내 교량 시장 규모를 추산하면 다음과 같다.

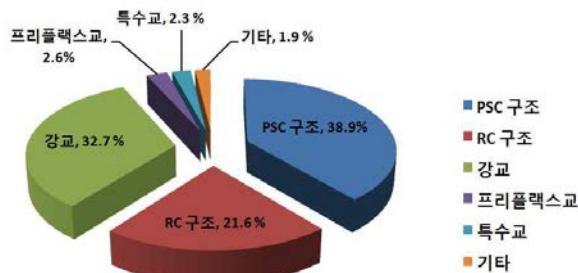
$$\text{교량공사비} : 145,000 \times 0.2554 \approx 3조7천억$$

$$\text{교량 연장} : 145,000 \times 0.2554 \div 518 \approx 71\text{km}$$

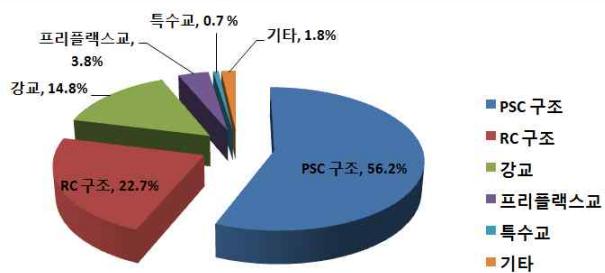
상기공사비는 전체 교량 공사비로서 제안공법의 시장규모를 추정하기 위하여 국토교통부에서 발간한 「교량현황조사(2012년)」의 자료를 이용하여 국내에 건설된 교량

형식별 분포도를 조사 분석하였다.

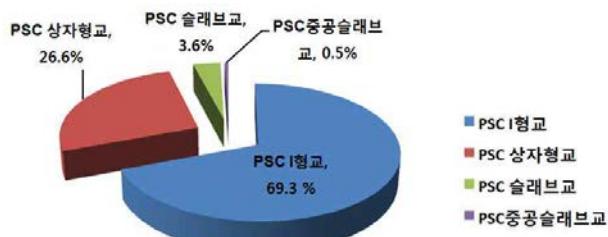
[표 4.2.9] 교량 형식별 분포도



(a) 사용 재료별 교량 분포(연장 기준)



(b) 사용 재료별 교량 기준(개수 기준)



(c) PSC교량 형식별 분포(연장 기준)



(d) PSC교량 형식별 분포(개수 기준)

본 사업의 대상이 되는 프리플렉스교와 PSC I형 거더는 연장 기준이 개수 기준에 비하여 더 적은 비중을 차지하므로 보수적인 시장규모를 산정하기 위하여 연장기준으로 시장을 평가하였다.

$$\text{프리플렉스교량 시장} : 37,000 \times 0.026 = 962\text{억 원/년}$$

$$\text{PSC I형 거더 교량시장} : 37,000 \times 0.389 \times 0.693 = 9,974\text{억 원/년}$$

상기 시장 중 프리플렉스교량 시장은 거의 대부분이 저형고가 필요한 지역에 가설되고 PSC I형 거더는 다양한 분야에 적용되고 있다. 따라서 PSC I형 거더 시장 중 신속한 시공 및 저형고가 필요한 시장과 프리플렉스 시장이 본 연구의 시장 규모가 될 수 있을 것으로 판단되나 보수적으로 시장 규모를 선정하기 위하여 프리플렉스 시장만을 대상으로 삼는다면 도로 및 철도시장은 연간 약 962억 원이 될 것으로 예상된다.

그 외 수자원 및 도시 등에는 더욱 더 저형고 교량의 필요성이 클 것으로 예상되나 그 분야에서는 교량형식별 통계자료 등이 존재하지 않으므로 도로 및 철도와 유사한 방식으로 그 시장 규모를 파악하였다.

$$\text{수자원} + \text{도시 및 산업단지 예산} = 23,830 + 7,978 + 8,991 = 40,799\text{억 원}$$

예산중 교량이 차지하는 비율 :

$$25\%(도로 중 교량 비율) \times 0.5(\text{보수적 평가를 위하여 할인율 적용}) = 12.5\%$$

$$\text{프리플렉스 교량시장} : 40,799 \times 0.125 \times 0.026 = 132\text{억 원/년}$$

이상과 같이 1차적인 수해복구시장과 국토교통부 예산 중 저형고 교량에 필요한 예산을 바탕으로 시장 규모를 평가한 결과 1,184억 원/년(90 + 962 + 132) 정도가 될 것으로 평가된다.

이러한 저형고 교량 형식은 많은 비가 내려 홍수가 빈번한 동남아 지역에 매우 효과적일 것으로 판단되며, 이 기술이 개발되면 본 컨소시엄에서 설계를 추진 중인 미얀마 및 베트남 시장에 적용이 가능할 것으로 판단되므로 그럴 경우 해외 시장에도 널리 보급할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 요소기술인 다양한 복합 말뚝의 개발이 완료되면 1차 시장 이외에도 2차, 3차 시장으로 그 효과가 과급될 것으로 예상되며, 특히 지반상태가 좋지 않은 동남아 지역에는 이러한 요소기술의 수출이 가능할 것으로 판단되므로 그 시장 규모는 예측치보다 훨씬 증대할 것으로 예상된다.

#### (나) 사업화 전망

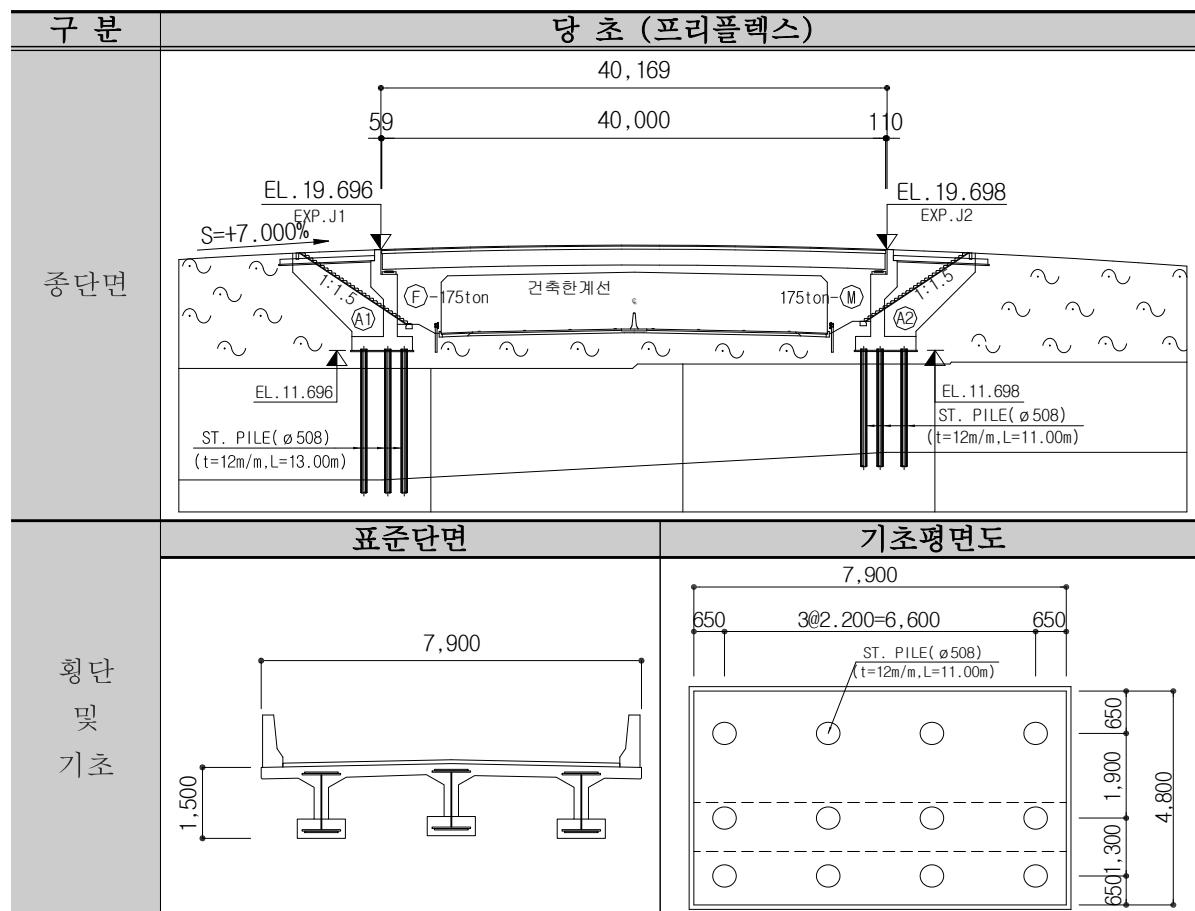
본 연구의 대상은 프리플렉스 급의 낮은 형고를 가지면서 경제성이 우수하고 유지 관리가 양호한 교량 형식이다.

이러한 교량 형식의 유지관리 성능은 교좌장치 및 신축이음장치 등이 불필요하므로 인하여 이미 그 유지관리 성능의 우수성이 검증되었으나 경제성에 대한 부분은 확인된 바 없으므로 확실한 검증을 위하여 다음과 같이 경제성을 평가하였다.

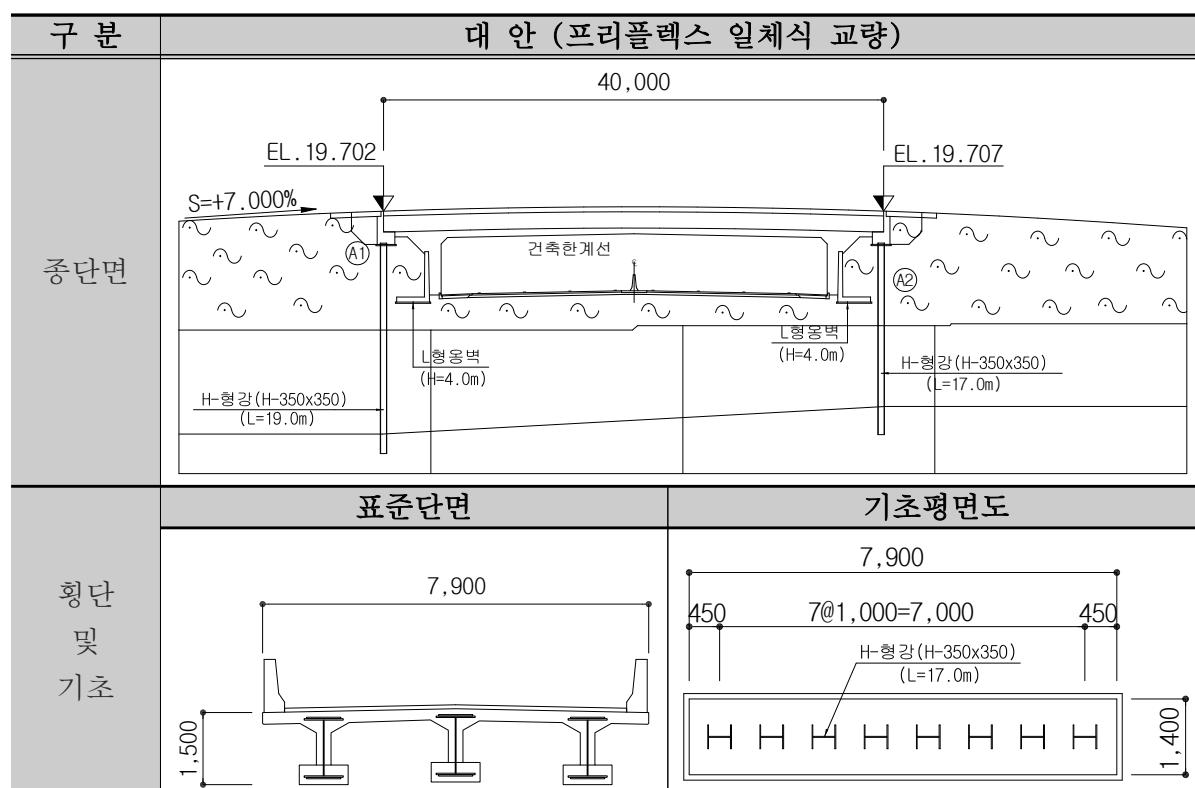
##### ① 경제성 분석

경제성 분석을 위하여 당사에서 기설계하여 공용중인 프리플렉스 교량을 기준으로 동일한 시간을 가지는 프리플렉스 일체식 교량과 대안 교량 형식으로 설계를 시행하였다.

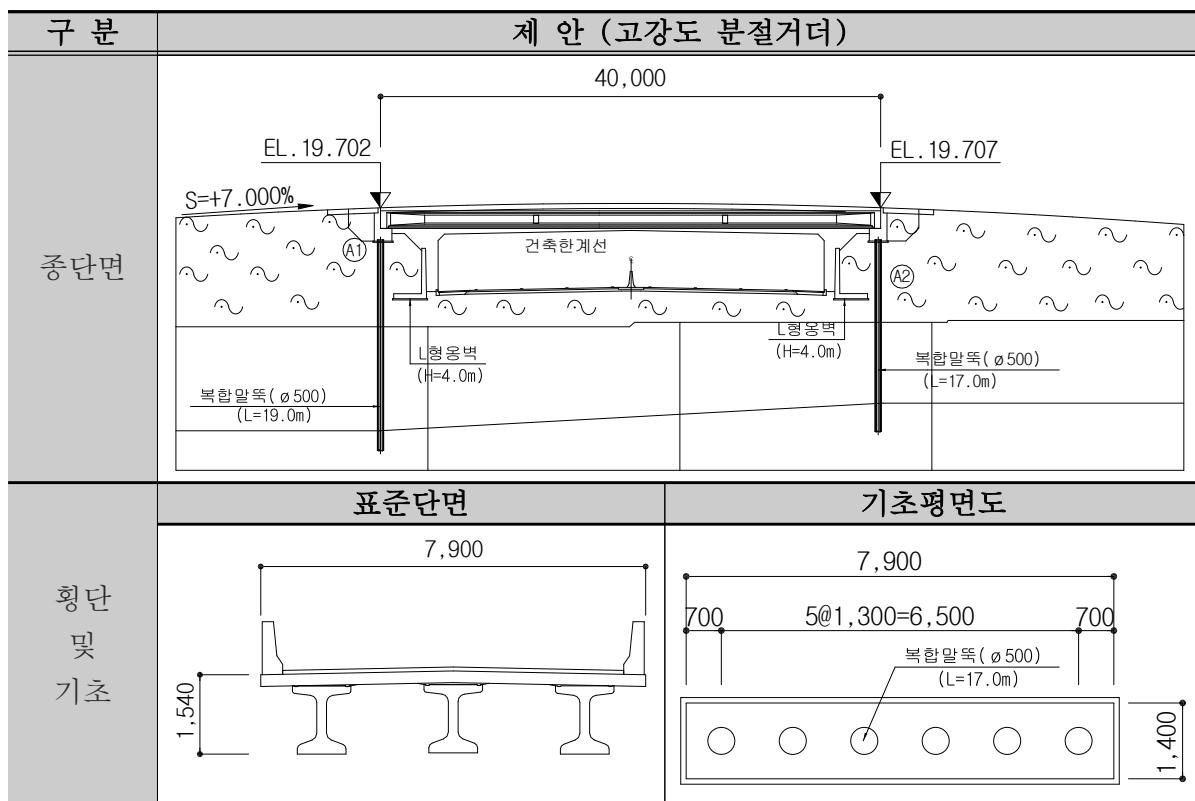
설계를 바탕으로 각각 형식에 대하여 수량을 산출한 후 동일한 단가를 적용하여 교량공사비를 비교 분석하였다.



[그림 4.2.1] 프리플렉스교 개략도



[그림 4.2.2] 프리플렉스 일체식 교량 개략도



[그림 4.2.3] 제안공법(고강도 분절거더)교량 개략도

[표 4.2.10] 공사비 검토

공 종	당 초	대 안	제 안
상 부	거 더	255,914,747	123,296,667
	바닥판	54,857,954	35,793,448
소 계	310,772,701 (100%)	310,772,701 (100%)	159,090,115 (51%)
하부공 및 기초공	교대	118,943,128	35,093,477
	강관말뚝	69,997,309	—
	복합말뚝	—	43,195,248
	H-형강	—	—
소 계	188,940,437 (100%)	90,168,701 (47%)	78,288,725 (41%)
부대공	교좌장치	11,120,861	—
	신축이음	3,895,212	—
	기 타	25,460,404	64,012,202
소 계	40,476,477 (100%)	64,012,202 (158%)	64,012,202 (158%)
총 공 사 비	540,189,615 (100%)	464,953,604 (90%)	301,391,042 (55%)

교량 공사비를 비교 검토한 결과 상부공에서 약 50%, 하부 및 부대공에서 약 40%의 공사비가 절감되었으나 가설지역 현황 및 여건에 따라 공사비의 절감 폭은 변동이 있을 것으로 예상된다.

그러나 상·하부 구조의 수량이 대폭 감소되고, 상·하부 구조에서 고가의 강재 사용이 최소화 되는 점을 감안할 때 제안공법은 프리플렉스교에 비하여 최소 30%이상 공

사비 절감효과가 있을 것으로 기대된다.

## ② 발주처의 구매의향 검토

본 과제는 공공기관 구매조건부 기술사업화 과제로서 제안 기술은 (구)소방방재청 그 필요성을 인지하여 제안하게 된 기술이다. 현재는 국민안전처가 제품구매를 확약한 상태이다. 그러므로 기본적인 사업화는 문제가 없을 것으로 판단된다.

또한 제안기술에 대하여 주요 사용처인 국토교통부의 실무부서와 사전 협의한 결과 기술에 대한 공감대를 형성하였고, 일부 기관에서는 수의계약은 곤란하지만 아래와 같이 기술이 성공적으로 개발될 경우 사용하겠다는 구매의향서를 송부하였다.

따라서 경제성과 유지관리가 양호한 저형고 일체식 교량에 대한 실무 부서의 필요성은 매우 절박한 것으로 판단되며 본 연구개발이 성공적으로 개발되면 사업화는 성공적으로 이루어 질 수 있을 것으로 판단된다.

// 주식회사 한맥기술	
수신자	부산지방국토관리청장
참 조	하현국장
제 목	국토교통과학기술 진흥원 연구개발 관련 기술사용의향 검토 요청
1. 귀 청의 무궁한 발전을 기원합니다.	
2. 당사는 2014년 국토교통과학기술 진흥원에서 시행예정인 국토교통기술사업화 지원 사업에 아래와 같은 사용로 연구 개발에 참여코자 하오니, 연구 개발이 완료되면 본 기술에 대한 사용의향이 있으신지를 문의하오니 검토 후 회신하여 주시기 바랍니다.	
- 아 래 -	
연 구 명 : (가칭) 고강도 불결거더 및 복합밀착을 이용한 저형고 일체식 PSC I 거더교	
제작사유 : 1) 당사는 개량형 PSC거더와 복합밀착분야의 신기술을 보유한 설계사입니다.	
2) 소하침침단 또는 형고에 제약이 있는 교량을 설계할 때 고가의 프리풀렉스 교량을 주로 사용하였는바,	
3) 프리풀렉스 수준의 형고를 갖고 경제성이 있는 교량을 연구 개발하여 넓리 보급코자함.	
첨경 1) 기술사용의향서(안) 1부,	
2) 2014년 국토교통기술사업화지원사업 시행규고 1부,	
3) 기술개요 (고강도 불결거더 및 복합밀착을 이용한 저형고 일체식 PSC I 거더교) 1부, 등.	

국토교통과학기술진흥원장 귀하

기술사용의향서

2014. 2. 10.

주식회사 한맥기술 대표이사 

이면조 한맥제20 넘 - 0p4 (2014.2.6)  
우 138-814 서울특별시 송파구 오금로 554 한맥B/D / http://www.hanmaekeng.co.kr  
전화 02-2141-7315 전传 02-408-1925  
부서 : 기술개발부 담당자 : 신성진

부산지방국토관리청장 

(a) 검토요청서

(b) 회신(기술사용의향서)

[그림 4.2.4] 부산지방국토관리청 구매의향서

### 〃 주식회사 한맥기술

수신자 대전지방국토관리청장  
참조 하천국장  
제목 국토교통과학기술 진흥원 연구개발 관련 기술사용의향 검토 요청

### 기술사용의향서

1. 귀 청의 무공한 발전을 기원합니다.
2. 당사는 2014년 국토교통과학기술 진흥원에서 시행예정인 국토교통기술사업화 지원 사업에 아래와 같은 사용으로 연구 개발에 참여코자 하오니, 연구 개발이 완료되면 본 기술에 대한 사용의향이 있으신지를 문의하오니 검토 후 회신하여 주시기 바랍니다.

- 아 래 -

- 연 구 명 : (가칭) 고강도 분진거더 및 복합말뚝을 이용한 저행고 일체식 PSC I 거더교  
제안사유 : 1) 당사는 개량형 PSC거더와 복합말뚝분야의 신기술을 보유한 설계사입니다.  
2) 소하경횡단 또는 형고에 제약이 있는 교량을 설계할 때 고가의 프리풀렉스 교량을 주로 사용하였는바,  
3) 프리풀렉스 수준의 형고를 갖고 경제성이 있는 교량을 연구 개발하여 넓리 보급코자함.

붙임 1) 2014년 국토교통기술사업화지원사업 시행공고 1부.

2) 기술사용의향서(안) 1부.

3) 기술제작(고강도 분진거더 및 복합말뚝을 이용한 저행고 일체식 PSC I 거더교) 1부. 끝.

우리청은 국토교통과학기술진흥원에서 개발코자 하는 기술 "(가칭) 고강도 분진거더 및 복합말뚝을 이용한 저행고 일체식 PSC I 거더교"가 소요 성능(프리풀렉스교 수중의 형고)과 경제성(프리풀렉스교 대비 70%이내)을 확보하고 건설신기술로 인증되고 현장여건이 충족될 경우 사용할 의향이 있음을 확인합니다.

2014. 2.

주식회사 한맥기술 대표이사

대전지방국토관리청장 (인)

보석번호 한맥제20[4- 1] (2014.2.5)  
부 138-814 서울특별시 송파구 오금로 554 한맥B/D / <http://www.hanmaceng.co.kr>  
전화 02-2141-7315 전송 02-408-1925  
무서 : 기술개발부 담당자 : 신성진

(a) 검토요청서

(b) 회신(기술사용의향서)

[그림 4.2.5] 대전지방국토관리청 구매의향서

### ③ 사업화 전망

본 제안 사업의 시장 규모는 약 1,200억 원/년 정도로 시장 규모는 매우 크다.

기존 교량 형식은 고가로서 이를 대체할 기술이 개발되면 최소 30% 이상의 공사비가 절감되어 SOC예산 부족 문제를 해결할 수 있을 것으로 전망된다. 또한 구조물 건설 후 가장 많은 유지관리비가 소요되는 교량받침 및 신축이음장치가 없는 일체식 구조로서 유지관리비를 절감할 수 있는 제안 형식은 충분한 사업성을 가지는 것으로 판단된다.

뿐만 아니라 신속한 시공이 가능하기 때문에 민원으로 인한 사회적 비용도 절감할 수 있을 것으로 기대되며, 이는 제안 기술에 대하여 발주처와 사전협의 결과에서도 그 타당성을 알 수 있었으며 시급히 사업화하여야 할 기술로 판단하였다.

### (4) 종합결론

제안 기술은 북미의 선진 기술을 국내에 도입하여 상용화하고자 하는 것으로서 본 기술에 필요한 각각의 요소기술은 본 컨소시엄에서 개발 및 경험한 바 있다. 뿐만 아니라 연구조직도 기술 개발에 적합하도록 설계 및 상하부 건설의 전문건설기업과 이를 겸증할 학계로 구성하여 상호 기술이 극대화 할 수 있도록 구성하였다. 따라서 요소기술을 종합하여 개발하는 제안 기술의 개발에는 큰 어려움을 없을 것으로 기대되며, 구매 의향을 밝힌 국민안전처 이외에 여러 기관을 고려하면 사업화도 큰 무리가 없을 것으로 기대된다. 또한 기술 개발이 완료되면 현재 동남아 및 아프리카에 설계가 활발히 추진되고

있는 점을 감안하면 북미 선진 기술보다 앞서서 본 제안 기술을 적용하여 시장을 선점 할 수 있을 것으로 기대된다.

제안 기술에 대하여 기술포트폴리오, 국내외 시장동향, 국내외 인프라 수준, 기술개발 수준, 국제 경쟁력 등을 종합한 SWOT분석 결과는 다음과 같다.

[표 4.2.11] SWOT 분석

구분	내부 / 외부	SWOT	내 용
기술 포트 폴리 오	내부	강점	각 분야에서 경험이 풍부한 설계·시공·연구조직 구성 기술개발 시 직접 제작 시험할 수 있는 공장 보유 유사한 기술 개발 경험 풍부
		약점	일체식 교량에 대한 연결부 검증 부족 배면토의 실제 거동에 대한 실측 자료 부족 고강도콘크리트의 양생기술 부족
	외부	기회	저형고 일체식 교량에 대한 사회적 기술적 요구 증대
		위협	FTA로 풍부한 경험을 갖춘 선진 외국기술의 국내시장진입 용이 다양한 실적을 갖춘 중국이 급속한 기술 성장으로 해외진출 모색
시장 동향	내부	강점	경제성과 유지관리가 양호한 다양한 저형고 교량에 대하여 유연하고 즉각 대처가 가능한 전문 연구조직
		약점	국내시장에서 다양한 형태의 PSC 교량 경쟁 치열
	외부	기회	국내는 물론 해외에서도 꾸준한 저형고 교량에 대한 사업 발주 예상
		위협	북미의 기술 선도 업체들은 대규모 공장을 바탕으로 전 세계를 대상 으로 마케팅 무한 가격 경쟁
인프 라 수준	내부	강점	제작 및 시공이 가능한 프리캐스트 공장 보유 교량 분야 기술 개발을 위한 충분한 연구 및 기술인력 보유
		약점	해외에서 인증 받은 전문기술자 부족
	외부	기회	고강도콘크리트 양생기술 및 일체식 교량 연결부 안전성에 대한 전문 기술 획득
		위협	외국기술 선도업체의 대규모 기술 및 자본투자
기술 개발 수준	내부	강점	저형고 일체식 교량에 필요한 요소기술에 대한 전문 기술 확보
		약점	요소 기술을 융합하였을 경우에 대한 검증 부족
	외부	기회	일체식 교량에 대한 거동 및 안전성에 대한 이해도 증대로 다양한 형 태의 구조물에 확대 적용 가능(EX: 지하차도, 대형 우수저류조 등)
		위협	독보적인 연구개발 실적 미비
국제 경쟁 력	내부	강점	컨소시엄에서 미얀마, 베트남 등 동남아 및 아프리카 가나 등 활발한 해외 설계에 진출 설계 시 필요사항을 즉각적으로 생산할 수 있는 전문조직 구성으로 국제 경쟁 가 능
		약점	해외 인증 전문기술자 부족
	외부	기회	북미의 선진기술에 버금가는 기술 개발로 저형고 일체식 교량의 해외 시장 교두보 확보
		위협	북미의 선진 기술대비 경험 부족으로 인한 발주처의 불신



## 제5장 연구개발 성과의 활용 계획

### 1절 연구 성과 활용 계획

본 연구를 통하여 개발하고자 하는 제품은 고강도 콘크리트 기술, PSC I 거더 설계 및 시공기술, 프리텐션 도입 기술 및 복합말뚝 등 기존 요소기술을 융합한 저형고 일체식 교량 시스템이다.

최근 이상기후로 인한 폭우의 발생과 이로 인한 홍수피해로 인해 관계기관에서는 이에 대한 대비책으로 제방 높이를 상승하는 등의 홍수예방 대책을 수립하고 있다. 따라서 하천을 횡단하는 교량은 높아진 홍수위에 대한 여유고 확보와 제방 높이의 상승이 적어지도록 형고가 낮은 교량형식인 저형고 분절형 거더에 대한 적용성이 매우 높다.

또한 도심지를 관통하는 교량이나 고속도로 및 국도를 횡단하는 교량도 형고가 낮을수록 다리밑 공간 확보가 유리하다. 또한 수해복구시나 프리플렉스 등 저형고 교량이 가설되는 지역은 하천횡단 또는 복잡한 도심지 통과 교량이 대부분으로 이러한 지역은 공사 중 자연재해의 위험성이 있고 민원이 발생할 가능성이 매우 크므로 신속하게 시공할 수 있는 공법이 필요하다. 따라서 거더가 분절형이며 프리캐스트로 선 작업이 가능하므로 위와 같은 곳에 급속시공이 가능한 저형고 분절형 거더의 적용이 매우 유리하다.



[그림 5.1.1] 형하 여유 공간이 많지 않은 곳 및 도심지에 가설된 프리플렉스 교량 사례

개발 제품으로 공략하고자하는 사업화 대상 구간에서 기존에는 고가의 프리플렉스 거더교 외에는 별다른 대안이 없음을 국토교통부, 소방방재청 등 국가기관과 그 산하 기관에서도 일찍부터 인지하고 있었으며 이를 극복하기 위한 방안으로 본 컨소시엄은 경제성이 우수한 PSC I 거더를 주부재로 하는 일체형 교량 시스템을 제안하게 되었다.

사업화 대상 시장의 규모는 보수적으로 평가해도 연간 1,200억 원의 규모가 될 것으로 예상되므로 1차적으로 관계 기관을 상대로 적극적인 홍보를 지속하여 교량 시스템 자체의 판매를 적극 추진하고자 한다.

앞서 언급한 대로 개발 제품은 요소기술을 어떤 식으로 적절하게 융합해내느냐가 기술의

관건이므로 교량 시스템의 판매는 결국 설계, 요소 제품의 납품, 교량 시스템의 시공을 총 망라하게 되어 기존 교량 건설 시스템과는 다른 매출 형태를 띠게 될 것이다.

아울러 본 연구에는 기존 요소기술의 향상을 꾀하는 다양한 시도들이 내포되어 있으므로 이들 요소기술을 독립적으로 판매하는 것도 충분히 가능하다.

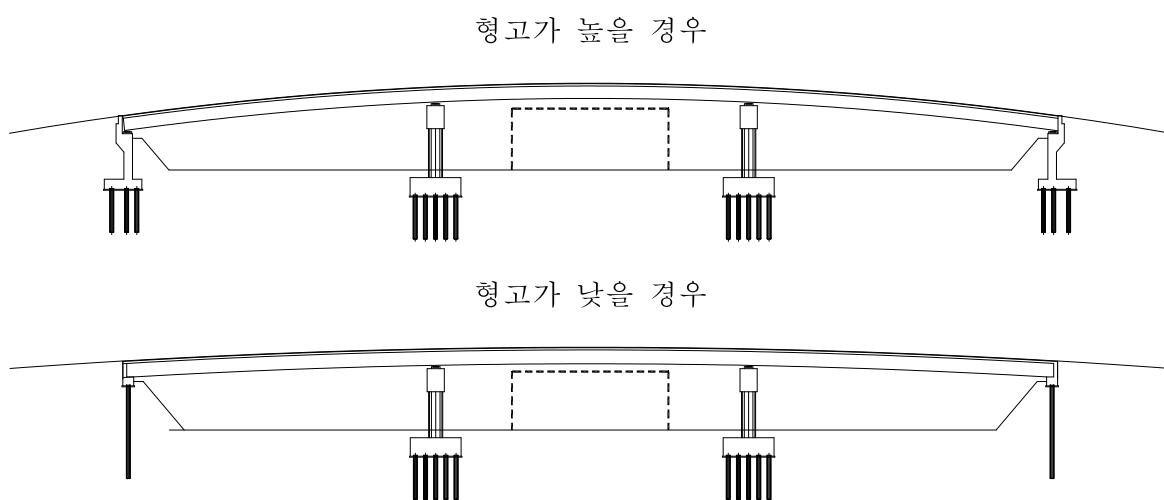
구체적인 상품화 가능 대상으로 고강도 콘크리트 재료 기술과 프리텐셔닝과 포스트텐셔닝 기법을 병용한 분절거더는 그 자체로 기존 PSC I 거더에 비하여 장시간 저형고의 구현과 현장 급속시공이 가능하므로 콘크리트 거더형 교량의 대안으로 제시 가능하다. 또한 국내 최초로 복합 말뚝의 개념을 소개하고 전파한 (주)피티씨에 있어 신소재로 성능을 개선한 다중 복합말뚝은 말뚝 시장에서 피티씨의 위상을 유지하여 줄 신상품이 될 것이며 지반 조건에 따른 복합말뚝의 최적 설계 기술은 복합말뚝 시장의 후발주자들과 기술 격차를 한층 높이는데 일조하게 될 것이다.

## 2절 연구에 따른 기대성과 및 파급 효과

### 가. 과학기술적 측면

#### (1) 고강도콘크리트를 적용한 저형고 일체식 분절거더 설계 및 시공기술

- ① 고강도콘크리트를 적용하여 형고를 낮춤으로서 종단선형을 양호하게 하고 교량 전후 토공물량을 감소시킬 수 있다. 이러한 저형고 교량 기술은 고가의 프리플렉스 교량을 사용하고 있는 국내 뿐 아니라 해외시장에도 진출이 가능할 것으로 판단된다.



[그림 5.2.1] 형고에 따른 교량 개략도

- ② 제안공법은 지반과 구조물간 상호 작용이 고려된 공법으로서 유연한 벽체를 이용하여 경제성을 확보하는 기술이다. 이에 반하여 기존 라멘교는 강성구조로서 하부 구조가 커지는 등 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구결과를 응용하면 강성 라멘교 벽체를 유연한 구조로 대체하여 라멘교 벽체 및 기초규모를 축소할 수 있으므로 라멘교에서도 경제성을 확보하는데 기여할 것으로 기대된다.
- ③ 제안 기술은 친환경 급속시공이 가능한 프리캐스트 공법으로서 국내교량 시장에 일천한 프리캐스트 기술을 보다 확산시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## (2) 다양한 복합말뚝 기술

본 연구에서는 기존 복합말뚝 이외에 강재 및 FRP 구속효과를 고려한 복합말뚝을 연구 개발하고자 한다. 제안된 강재 구속효과를 고려한 SC말뚝은 일본에서 개발되어 사용되는 공법이다. 본 연구를 통하여 그 가능성이 입증된다면 수입 대체 효과를 기대할 수 있다.

FRP 복합말뚝은 그간 국내외에서 연구된 FRP 말뚝과는 상이한 방향으로 적용하고자 한다. FRP는 인장강도가 높은 반면 고가이고, 탄성계수가 적어 변형이 큰 특성을 가지므로 기존 연구에서 사용한 주 부재 대신 높은 인장강도를 활용한 구속효과만을 고려하도록 부부재로 사용하여 개발함으로써 경제성을 향상시키고자 한다.

이러한 제품은 본 과업이외에도 FRP가 내염성이 강한 점을 고려할 때 염해가 우려되는 지역에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 나. 사회·경제적 측면

본 컨소시엄에서 평가한 개발 제품의 시장 규모는 연간 약 1,200억 원 정도가 될 것으로 예측하고 있다. 또한 경제성 평가에서 기존 프리플렉스 교량 대비 개발 제품은 약 40~50% 정도의 공사비가 절감되는 것으로 검토되었다. 가설지역 현황 등에 따라 공사비의 절감 폭은 변동이 있을 것으로 예상되지만 상·하부 공히 물량이 다수 절감되고 고가의 강재가 사용되지 않는 점을 감안할 때 프리플렉스 대비 제안공법이 최소 30%이상 공사비 절감효과가 있을 것으로 기대된다. 그러므로 개발 제품이 예산 전체에 적용된다면 가능한 SOC 사업 예산 절감액은 최소한 연간 360억 원에 이를 것으로 기대된다.

또한 신설 교량의 공사비 외에 완공 후 유지관리 비용을 감안한다면 예산 절감의 폭은 훨씬 더 커질 수 있을 것으로 판단된다.

제안공법이 성공적으로 개발될 경우 사회경제적으로 다음과 같은 효과가 있을 것으로 기대된다.

### (1) SOC 예산 및 유지관리비 절감

제안공법은 기존 공법인 프리플렉스교에 비하여 최소 30%이상 공사비가 절감되는 공법으로 이므로 기존공법을 대체할 경우 SOC사업에서 대폭적인 예산 절감효과가 기대된다.

또한 유지관리가 용이한 일체식 구조이므로 목표 내구연한 동안 많은 유지관리비가 절감될 것으로 예측된다.

이 이외에도 낮은 형고로 인하여 교량 전후구간에 성토 높이가 낮아져 이에 따른 공사비 절감효과도 기대된다.

## (2) 현장작업 감소에 따른 민원 감소

제안공법은 하부구조가 작고 터파기량이 적어 가시설이 거의 필요 없을 뿐 아니라 상부구조도 프리캐스트화 하여 공장에서 제작하기 때문에 현장작업이 적고 신속하게 시공이 가능하다.

따라서 공사현장의 소음, 교통 체증, 비산먼지 등을 최소화할 수 있으므로 민원을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

## (3) 철광석 등 수입대체

기존 저형고 교량에 적용된 프리플렉스교는 주부재가 강재로서 그 원료인 철광석은 국내생산이 되지 않는 반면 제안공법의 주요 자재는 콘크리트로서 그 대부분의 원료가 국내 생산이 되므로 경제성 확보와 더불어 철광석등 원자재의 수입대체 효과를 기대할 수 있다.

또한 아프리카나 동남아등 해외시장을 개척하는 경우 저개발 국가에서는 대규모 설비 및 자금이 필요한 강재는 시급히 조달하기 어려운 반면 콘크리트의 경우 거의 대부분 조달이 가능한 점을 고려할 때 제안 공법은 해외시장 개척에도 큰 영향을 미칠 것으로 기대된다.

### 다. 정책적 측면

일반적으로 건설업은 3D 업종 중의 하나로 인식되어 왔다. 그 사유는 여러 가지가 있으나 대다수의 업무가 현장에서 이루어져지고 비정규직의 비율이 높기 때문이다.

그러나 제안 기술은 거더의 제작과 말뚝 등을 공장에서 제작하고 현장에서는 조립만 하는 시스템을 채택하여 현장작업을 최소화 하였다.

이는 주 작업이 공장에서 이루어지게 되므로 제품의 품질이 향상됨은 물론 그 업무에 숙련된 전문 기술자를 양성할 수 있을 뿐 아니라 공장고용 노동자의 대부분은 임시직이 아닌 정규직으로서 직업의 안정성이 향상되어 사회적 문제가 되고 있는 고용의 안정성 확보에서도 매우 긍정적이다.

따라서 본 제안기술은 국가가 추구하고자 하는 고용의 안정성 확보, 제품의 균일한 품질 및 안전사고 예방에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

또한 국민 삶의 질이 높아질수록 사회간접자본시설 건설로 인한 피해에 민감해진다. 특히 도심지 건설 현장에서는 늘 비산먼지, 교통체증, 시공 중 소음으로 인한 민원이 발생하게 된다.

제안 기술은 많은 부분을 공장에서 제작하는 기술로서 소음, 비산 먼지, 교통 체증 등 일반적으로 도심지 공사에서 유발되는 민원을 최소화할 수 있을 것으로 기대되므로 민원으로 인한 사회 간접비용의 축소에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.



## 제6장. 연구개발성과의 보안등급

1. 공개 가능 여부 : 공개 가능

2. 보안등급 : 일반과제

## 제7장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구 시설·장비 현황

- 등록 연구 시설 및 장비 없음

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

## 제8장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

### 1절. 연구실 안전조치 이행 계획

#### 1. 한맥기술

##### 가. 실험실 안전교육 시행 방안

###### (1) 정기안전교육

(가) 대상 및 시기 : 연구실 출입자를 대상으로 년 2회 실시

(나) 교육 시간 : 2시간 이상/회

(다) 교육 내용 :

- 실험실 안전 수칙 안내
- 실험실 안전사고 사례
- 안전장치 사용방법

###### (2) 수시 교육

① 대상 및 시기 : 실험실 사고 발생 또는 신입 연구원 채용 등의 경우 실시

② 교육 내용 : 실험실 안전 환경 조성 및 사고예방을 위한 환경안전교육

③ 교육 담당 : 안전담당자 및 관리감독자

##### 나. 실험실 안전점검 체계도



#### 다. 실험실 안전점검 실시 방안

##### (1) 안전 점검 시행 시기

(가) 정기 점검 : 매월 1회 정기적으로 시행

(나) 비정기 점검 : 실험 실시 전·후 시행

##### (2) 실험실 안전점검 시행 방법

- 아래의 실험실 안전점검 체크리스트에 의거하여 실시

(양호 : ○ 보통 : △ 불량 : ×)

점 검 내 용	상 태	조치사항
1. 실험실의 정돈 및 청결상태		
2. 주요 실험·실습기자재의 활용 및 관리대장 비치여부		
3. 화재경보기, 소화기 및 모래 등 흡착제 비치여부		
4. 전기 플러그의 과다분지나 피복탈락으로 감전 및 화재사고 발생 가능여부		
5. 비상탈출을 위한 통행로 확보 상태		
6. 원활한 실내 환기시설 설치여부		
7. 화학약품 등 실험실 취급물품의 적절한 보관 상태 여부		
8. 실험 시 필요한 안전보호 장구 착용 여부		
9. 실험자의 비상시 조치요령 숙지 여부		
10. 실험자의 실험규칙 및 안전수칙 숙지여부		
점 검 자		

## 2. 고려대학교 산학협력단

### 법정 '안전교육 실시'

#### ◆ 온라인 안전교육 시스템 구축<1회/월, 12회/년>

1. 홈페이지 구축 : <http://kusafe.korea.ac.kr> (년중 365일 수강 可)
2. 목적 : 편리한 안전교육의 필요성, 법이행 총족 등
3. 교육종류 : 가. 온라인(연구활동종사자 약11,000명)
  - 나. 각 실별 자체교육(실험·실습·수업전 5분 안전교육 / 양식 비치)
4. 기여 : 가. 시간, 장소, 이동의 불편함 해소, 多인원 단시간 교육에 기여함  
나. 24시간 수강 가능, 1년 약64,000,000원 예산절감에 기여함  
다. 컨텐츠 분야 : 기계, 전기, 화공, 소방, 가스, 보건(위생), 생물(LMO), 생활안전 등 (약140개 동영상 탑재)



<온라인 안전교육 효과>

- ① 교육 기간(365일 연중)
- ② 접속 시간(24시간 可)
- ③ 교육 장소 해소
- ④ 교육 이동불편 해소
- ⑤ 多인원 동시교육 가능
- ⑥ 예산 절감
- ⑦ 교육 관련업무 감소



#### 5분 안전교육(양식)

( )월	안전교육 내용	년 월 일
날짜		비고
1		
2		
↓		
30		
31		

※ 안전교육내용 : 지도교수 또는 조교의 지도하에 당해 실험(실습)관련한 안전사고 예방. 양식 작성후 실습실내 자체 비치.

- 건물명 :  
- 연구실명 :  
- 지도교수 :

- 대학명 :  
- 실번호 :  
(서명)

- 연구실 인원 :  
- 연락처 :

## 제9장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역 할	논문 제재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 제재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	원형 CFT 단면 의 기하학적 특 성에 따른 부재 의 힘 거동	고려대학교 산학협력단		한국복합 신소재 구조학회		2016.09.22	단독사사	
2	논문	일체식 교량의 교대와 CFT Pile 연결부 성 능에 관한 실험 적 연구	고려대학교 산학협력단		한국복합 신소재 구조학회		2016.09.22	단독사사	
3	논문	계면 특성에 따 른 CFT의 힘 거동 분석	고려대학교 산학협력단		한국복합 신소재 구조학회		2015.04.23.	단독사사	
4	논문	콘크리트 충전 강관의 힘 강도 실험 분석	고려대학교 산학협력단		한국 철도학회		2015.10.22.	단독사사	
5	논문	CFT Pile이 적 용된 일체식 교 량의 실물실험	고려대학교 산학협력단		한국 철도학회		2016.10.20.	단독사사	
6	논문	일체식 교량의 교대와 CFT Pile의 연결부 성 능 분석	고려대학교 산학협력단		한국복합 신소재 구조학회		2016.04.21.	단독사사	
7	논문	영상기반 변위 계측 시스템을 이용한 구조물 의 변위 계측	고려대학교 산학협력단		한국구조물 진단유지 관리공학회		2016.10.12.	-	
8	특허	부재의 강성비 조절을 통하여 모멘트를 재분 배하여 형고를 낮춘 저형고 일 체식 PSC I형 거더교 및 그 시공방법	(주)한맥기술		대한민국		특허 출원 중		
9	특허	두부가 보강된 PHC 말뚝 및 그 시공방법	(주)한맥기술		대한민국		특허 출원 중		
10	기타	저형고 분절거 더-교대 교량 시스템 실물 실 험체(L=30m)	(주)한맥기술		충남 당진		2016.06.02.		공인시험성 적서 획득

## 제10장. 기타사항

- 기타사항 없음.



## 제11장. 참고문헌

### 1. 교대 일체형 교량

1. 한국도로공사 도로연구소 (1999) “무조인트교량 실용화 연구”.
2. 박영호 (2001) “계측에 의한 무조인트 교량 실용화 연구 보고서(I )”, 한국도로공사.
3. 한국도로공사 도로연구소 (2002) “계측에 의한 무조인트교량장기거동 해석 (II)”.
4. 한국도로공사 도로교통기술원 (2009) “일체식 교량 설계지침(무조인트 교량)”.
5. 김상석 (2004) “단경간 프리플렉스빔-교대 일체식 교량의 설계에 관한 연구”, 흥익대학교 대학원, 석사학위논문.
6. 김상효, 윤지현, 안진희, 이상우 (2009) “일체식 교대 교량의 파일-교대 연결부 거동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, Vol. 29, No. 6A, pp. 651~659.
7. 김상효, 윤지현, 최우진, 김준환, 안진희 (2011) “일체식교대 강교량의 거더-교대 연결부 상세의 거동평가를 위한 실험적 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제23권, 1호, pp. 61~72.
8. 김상효, 이찬구, 윤지현, 원정훈 (2009) “Perfobond Rib을 적용한 강-PSC 혼합구조 연결부의 거동평가”, 한국강구조학회 논문집, 제21권, 제6호, pp. 647~957.
9. 김우석 (2011) “프리스트레스 콘크리트 거더 일체식 교량의 교대 거동 해석과 예측”, 한국콘크리트학회 논문집, 제23권, 제5호, pp. 667~674.
10. 남문석, 박영호 (2007) “일체식 교대의 장기토압 거동”, 한국지반공학회 논문집, 제23권, 제4호, pp. 47~58.
11. 박영호, 정경자, 김성환 (2000) “일체식 교량에 사용된 H 말뚝의 축방향 지지거동”, 대한토목학회 논문집, 제20권, 3C호, pp. 281~290.
12. 박영호 (2000) “기성말뚝의 지지거동”, 한국지반공학회 논문집, 제16권, 제1호, pp. 107~116.
13. 박영호, 정현식, 이영생, 정경자 (2001) “일체식 교대에 사용된 타입 H-말뚝의 횡방향 지지거동”, 대한토목학회 논문집, 제 21권, 3C호, 2001, pp. 207~223.
14. 박종면, 이재혁, 유성근 (1998) “P.C.Beam을 이용한 일체식교대 교량의 설계 및 시공”, 한국콘크리트학회지, 제10권, 3호, pp. 53~61.
15. 안진희, 윤지현, 김상효, 김준환 (2010) “PSC 일체식 교대 교량의 거동특성 평가”, 대한토목학회 논문집, Vol 30, No. 4A, pp. 361~373.
16. 유성근, 정재호, 홍정희, 윤순종 (2003) “교대변위 형상에 따른 일체식교대 교량의 수동토압에 대한 스프링 모델”, 대한토목학회 논문집, 제23권, 제3A호, pp. 449~455.
17. 최용규, 전성기, 권오균 (1998) “개단강관말뚝의 하중전이실험에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제18권, 제4호, pp. 241~250.
18. 홍성걸, 양동현, 정종현, 임병호 (2007) “충고 절감을 위한 하이브리드 보의 휨 거동에 관한 실험적 연구”한국콘크리트학회 논문집, 제19권 제5호, pp. 557-567.
19. Ahmad A.D. (1987) “Pile Capacity Predictions using Static and Dynamic Load Testing,

- Federal Highway Administration, Washington D.C., FHWA-JHRP-87-1.
20. You, S.K. and Park, J.M. (1993) "A Study on Utilization and Application of Integral Abutment PC Beam Bridge", Proceedings of KCI Symposium-Fall, Korea Concrete Institute, Vol. 10, No. 3, pp. 53~61.
21. AISI (1996) "Integral Abutment for Steel Bridges, Highway Structures Design Handbook", Vol. II, Chap. 5.
22. Oesterle, R.G., Refai, T.M., Volz, J.S., Scanlon, A. and Weiss, W.J. (1998) "Jointless and Integral Abutment Bridges Analytical Research and Proposed Design Procedures", Report DTFH 61-92-C-00154, FHWA, US Department of Transportation.
23. Arsoy, S. (2000) "Experimental and analytical investigations of piles and abutments of integral bridges," PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
24. Dicleli, M. (2000) "A rational design approach for prestressed-concrete-girder integral bridge", Engineering Structures, Vol. 22, pp. 230~245.
25. PCI Publication, "The State of Art of Precast/Prestressed Integral Bridges, Precast/Prestressed Concrete Institute", IB-01, 2001.
26. Robert Frosch, Voraniti Chovichien, Katrinnna Durbin, David Fedroff (2006) "Jointless and Smoother Bridges : Behavior and Design of Piles", Joint Transportation Research Program of Purdue University, Final Report.

## 2. 분절거더

1. 이만섭 (1996) "분절 공법에 의해 시공되는 교량의 구조해석", 한국콘크리트학회지 제8권, 5 호, pp. 20~24.
2. 정원석, 김재홍, 정대기 (2007) "분절 PSC 박스거더의 정적거동에 관한 실험적 연구", 한국 콘크리트학회 논문집, Vol. 19, No. 4, pp. 433~439.
3. 김동석, 김경원, 안정생 (2012) "[기술기사] PSC-I형 분절거더 교량", 대한토목학회지, Vol. 60, No. 1, pp. 36~40
4. 대한토목학회 신기술협회 (2013) "[신기술 소개] (제690호) 미리 제작된 고강도콘크리트 접 합블록을 접합단부로 사용하는 PSC-I형 분절거더(SegBeam)제작방법", 대한토목학회지, Vol. 61, No. 9, pp. 79~81.
5. 김재홍, 김장호, 김성배, 이나현 (2010) "휨연결재에 의해 횡방향으로 보강된 분절 프리스트 레스트 거더의 정적거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, Vol. 30, No. 3A, pp. 287~295.
6. 한만엽, 최석환, 전용식 (2011) "분절형 복부 중공 프리스트레스트 콘크리트 교량 거더의 설 계 및 실물크기 휨 실험 분석", 대한토목학회 논문집, Vol. 31, No. 3A, pp. 235~249.
7. 김광수, 서봉원, 박선규 (2005) "건식접합부를 갖는 Multi Spliced 주형의 거동에 관한 실험 적 연구", 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 17, No. 2, pp. 229~236.

8. 김형열, 이상윤, 강창구 (2010) “[기술기사]급속시공이 가능한 PSC T-거더교 소개”, 대한토목학회지, Vol. 58, No. 10, pp. 73~78.
9. 홍성남, 김광수, 박선규 (2006) “Precast PSC-Segmental I형 거더의 휨거동에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 26권, 제 3A호, pp. 421~428.
10. 구민세, 연정흠, 정범석, 김상철 (2004) “[특집]국내 연속 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 거더교”, 한국콘크리트학회지, Vol. 16, No. 5, pp. 35~43.
11. 조병구, 한만엽, 안정생, 김경원, 이홍우, 유상희 (2008) “2분절 Segbeam의 개발 연구”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, pp. 2,488~2,491.
12. 심종성, 한만엽, 오홍섭, 김정구, 김민수 (1998) “장경간 Spliced PSC 거더교량의 개발”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, Vol. 10, No. 2, pp. 680~685.

### 주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.