

**보안 관제( ), 일반 관제(○) / 공개(○), 비공개( )**

**국토교통기술촉진연구 사업 최종보고서**

발간등록번호

11-1613000-001810-01

R&D /

16CTAP-C085624-03

# **SMA 아스팔트를 이용한 CRCP의 덧씌우기 및 복합포장 시스템 개발 연구 최종보고서**

2017.04.14.

국 토 교 통 R&D Report

주관연구기관 / 중앙대학교 산학협력단  
공동연구기관 / Texas Tech University

국 토 교 통 부  
국토교통과학기술진흥원

## 제출문

국토교통부장관 귀하

'SMA 아스팔트를 이용한 CRCP의 덧씌우기 및 복합포장 시스템 개발 연구'  
(연구개발 기간 : 2014.11.07 ~ 2017.02.28) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2017. 04 . 14 .

주관연구기관명 :

중앙대학교 산학협력단 (대표자) 김 원 용 (인)



공동연구기관명 :

Texas Tech University (대표자) Senadheera, Sanjaya (인)

주관연구기관책임자: 조윤호

공동연구기관책임자: Moon Cheol Won

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

## 보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP-C08 5624-03	해당 단계 연구 기간	2014.11.07 ~ 2017.02.28	단계구분	1/1			
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업						
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업						
연구과제명	대과제명	SMA 아스팔트를 이용한 CRCP의 덧씌우기 및 복합포장 시스템 개발 연구						
	세부과제명	SMA 아스팔트를 이용한 CRCP의 덧씌우기 및 복합포장 시스템 개발 연구						
연구책임자	조윤호	해당단계 참여 연구원 수	총: 27 명 내부: 27 명	해당단계 연구개발비	정부: 700,000천원 계: 700,000천원			
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 27 명 내부: 27 명	총 연구개발비	정부: 700,000천원 계: 700,000천원			
연구기관명 및 소속 부서명	중앙대학교 산학협력단			참여기업명				
국제공동연구	상대국명: 미국			상대국      연구기관명: Texas Tech University				
<연구 내용 요약>				보고서 면수				
<p>▪ <b>연구 핵심 내용</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 덧씌우기 및 복합포장용 재료와 배합 개선</li> <li>- 이질 재료간 부착을 고려한 SMA-CRCP 복합포장 시스템 개발</li> <li>- 개발된 재료의 현장시험을 통한 공용성 분석용 DB 구축</li> <li>- CRCP 및 복합포장 시스템 설계법</li> <li>- 복합포장용 재료·시공품질관리 방법</li> </ul>				145 Pages				
<p>▪ <b>연구 개발 결과</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 콘크리트 위 아스팔트 포장의 주요 파손 형태인 반사균열 저항층(2.5cm)와 러팅 저항층(2.5cm)을 가진 얇은 아스팔트 덧씌우기 기술 개발에 따른 비용합리적인 시공법 개발</li> <li>- 기존 아스팔트 덧씌우기 포장에 비해 러팅저항성 40%, 반사균열저항성 84% 이상 향상된 배합 기술 개발</li> <li>- 순현가법을 적용하여 기존 유지보수 비용과 10년 유지보수 비도로 적용했을 때, 28.6% 경제적 효과 기대</li> </ul>								

## < 국 문 요 약 문 >

연구의 목적 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연구의 목적           <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 덧씌우기 및 복합포장용 재료와 배합 선정 연구</li> <li>▷ 이질 재료 간 역학적 모델링 기법 및 층간 구조해석 모형 개발</li> <li>▷ 시험시공을 통한 단기 및 장기 DB 구축</li> <li>▷ 복합포장시스템 설계 법 마련</li> <li>▷ 복합포장용 재료·시공 품질관리 방법 제안</li> </ul> </li> <li>○ 연구의 내용           <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 국내외 복합포장 관련 자료 조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 복합포장 재료 및 관련기술, 시공사례 조사</li> <li>- 해외 복합포장 설계기준 및 시공지침 조사</li> </ul> </li> <li>▷ 복합포장의 역학적 거동 분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- FEM을 이용한 복합포장의 교통하중 및 환경하중에 의한 역학적 거동분석</li> <li>- 포장의 거동분석을 통해 설계 수명의 결정 및 최적 단면 제공</li> </ul> </li> <li>▷ 상하부 포장층간 부착력 증가를 위한 시공법 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 하부 콘크리트 타설 시 표면을 거칠게 하여 물리적 마찰력을 증대시키고 부착력을 증가 시킬 수 있는 시공법 개발</li> <li>- 복합포장용 CRCP 콘크리트와 SMA 및 개질 아스팔트 경계면 부착 거동 연구</li> </ul> </li> <li>▷ 아스팔트 재료 및 배합 선정               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 큰 내구성을 갖는 개질 아스팔트 혼합물 최적배합 선정</li> <li>- 아스팔트 배합에 따른 경계면 이질거동 특성 정량화</li> </ul> </li> <li>▷ 얇은 아스팔트 덧씌우기 복합포장 설계기준 마련               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 설계 기준 마련을 위한 다양한 설계 법의 장단점 분석</li> </ul> </li> <li>▷ 시험시공을 통한 검증 및 개선               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 실제 다양한 현장 조건에서 거동을 파악하여 모델링 결과와 비교</li> <li>- 기존의 포장법과 공용성 비교분석을 통해 우수성 검증</li> <li>- 구간별 배합 및 시공법을 달리 시공하여 비교분석을 통해 설계기준 검증</li> </ul> </li> <li>▷ 복합포장 설계기준, 시공지침 및 품질관리 방안               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 파손을 최소로 하고 유지보수 비용을 최소로 하는 새로운 포장법 개발 및 설계 기준, 시공지침 수립</li> <li>- 아스팔트 포장 층과 콘크리트 포장 층을 통합관리 할 수 있는 품질관리 방안 마련</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 실내실험을 통한 덧씌우기 및 복합포장용 재료와 배합 선정</li> <li>▷ 복합재료의 부착 및 경계면 특성 분석, 비교 및 대안 선정</li> <li>▷ 복합포장의 구조적 안정성 검토 및 거동 특성 정량화</li> <li>▷ 얇은 아스팔트 덧씌우기 시험 시공, 현장 평가 시험을 통한 공용성 검증</li> <li>▷ 복합포장시스템 설계 법 마련을 위한 대안 및 방향 선정</li> <li>▷ 복합포장 재료 및 시공 관련 가이드라인 마련</li> </ul>				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 새로운 형식의 포장시스템의 설계, 시공 및 품질관리 기술을 개발함으로써, 신기술 등록을 비롯한 상용화의 기반을 마련할 수 있음</li> <li>▷ 기존 콘크리트 도로에서 줄눈파손 등 많은 결함으로 주행안전성이 저해된 바, 이를 방지하여 장기 공용성을 확보하고, 그에 따른 편익을 기대</li> <li>▷ 복합포장을 유지보수 구간 뿐 아니라 신설포장 적용가능성을 제고함으로써 국내 도로 인전성 향상</li> <li>▷ 복합포장의 경계면에서의 부착특성을 규명하여 복합포장 개발의 근간 마련</li> <li>▷ 포장 파손으로 인한 도로상 사고 발생 예방 및 사고 발생률 감소 기대</li> <li>▷ 포장파손의 저감으로 도로이용자에게쾌적하고 안정한 포장시스템 제공</li> <li>▷ 고내구성 포장시스템 개발을 통한 신공법 신기술 개발</li> <li>▷ 저소음과 우수한 주행안전성을 바탕으로 한 더 안락하고 안전한 고속도로 제공</li> <li>▷ 복합포장 시공공법, 품질관리기법 등 신기술 개발을 추진하여 창조경제 창출</li> </ul>				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 새로운 형식의 포장시스템의 설계, 시공 및 품질관리 기술을 개발함으로써, 신기술 등록을 비롯한 상용화의 기반을 마련할 수 있음</li> <li>▷ 기존 콘크리트 도로에서 줄눈파손 등 많은 결함으로 주행안전성이 저해된 바, 이를 방지하여 장기 공용성을 확보하고, 그에 따른 편익을 기대</li> <li>▷ 복합포장을 유지보수 구간 뿐 아니라 신설포장 적용가능성을 제고함으로써 국내 도로 인전성 향상</li> <li>▷ 복합포장의 경계면에서의 부착특성을 규명하여 복합포장 개발의 근간 마련</li> <li>▷ 포장 파손으로 인한 도로상 사고 발생 예방 및 사고 발생률 감소 기대</li> <li>▷ 포장파손의 저감으로 도로이용자에게쾌적하고 안정한 포장시스템 제공</li> <li>▷ 고내구성 포장시스템 개발을 통한 신공법 신기술 개발</li> <li>▷ 저소음과 우수한 주행안전성을 바탕으로 한 더 안락하고 안전한 고속도로 제공</li> <li>▷ 복합포장 시공공법, 품질관리기법 등 신기술 개발을 추진하여 창조경제 창출</li> </ul>				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 새로운 형식의 포장시스템의 설계, 시공 및 품질관리 기술을 개발함으로써, 신기술 등록을 비롯한 상용화의 기반을 마련할 수 있음</li> <li>▷ 기존 콘크리트 도로에서 줄눈파손 등 많은 결함으로 주행안전성이 저해된 바, 이를 방지하여 장기 공용성을 확보하고, 그에 따른 편익을 기대</li> <li>▷ 복합포장을 유지보수 구간 뿐 아니라 신설포장 적용가능성을 제고함으로써 국내 도로 인전성 향상</li> <li>▷ 복합포장의 경계면에서의 부착특성을 규명하여 복합포장 개발의 근간 마련</li> <li>▷ 포장 파손으로 인한 도로상 사고 발생 예방 및 사고 발생률 감소 기대</li> <li>▷ 포장파손의 저감으로 도로이용자에게쾌적하고 안정한 포장시스템 제공</li> <li>▷ 고내구성 포장시스템 개발을 통한 신공법 신기술 개발</li> <li>▷ 저소음과 우수한 주행안전성을 바탕으로 한 더 안락하고 안전한 고속도로 제공</li> <li>▷ 복합포장 시공공법, 품질관리기법 등 신기술 개발을 추진하여 창조경제 창출</li> </ul>				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 새로운 형식의 포장시스템의 설계, 시공 및 품질관리 기술을 개발함으로써, 신기술 등록을 비롯한 상용화의 기반을 마련할 수 있음</li> <li>▷ 기존 콘크리트 도로에서 줄눈파손 등 많은 결함으로 주행안전성이 저해된 바, 이를 방지하여 장기 공용성을 확보하고, 그에 따른 편익을 기대</li> <li>▷ 복합포장을 유지보수 구간 뿐 아니라 신설포장 적용가능성을 제고함으로써 국내 도로 인전성 향상</li> <li>▷ 복합포장의 경계면에서의 부착특성을 규명하여 복합포장 개발의 근간 마련</li> <li>▷ 포장 파손으로 인한 도로상 사고 발생 예방 및 사고 발생률 감소 기대</li> <li>▷ 포장파손의 저감으로 도로이용자에게쾌적하고 안정한 포장시스템 제공</li> <li>▷ 고내구성 포장시스템 개발을 통한 신공법 신기술 개발</li> <li>▷ 저소음과 우수한 주행안전성을 바탕으로 한 더 안락하고 안전한 고속도로 제공</li> <li>▷ 복합포장 시공공법, 품질관리기법 등 신기술 개발을 추진하여 창조경제 창출</li> </ul>				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 새로운 형식의 포장시스템의 설계, 시공 및 품질관리 기술을 개발함으로써, 신기술 등록을 비롯한 상용화의 기반을 마련할 수 있음</li> <li>▷ 기존 콘크리트 도로에서 줄눈파손 등 많은 결함으로 주행안전성이 저해된 바, 이를 방지하여 장기 공용성을 확보하고, 그에 따른 편익을 기대</li> <li>▷ 복합포장을 유지보수 구간 뿐 아니라 신설포장 적용가능성을 제고함으로써 국내 도로 인전성 향상</li> <li>▷ 복합포장의 경계면에서의 부착특성을 규명하여 복합포장 개발의 근간 마련</li> <li>▷ 포장 파손으로 인한 도로상 사고 발생 예방 및 사고 발생률 감소 기대</li> <li>▷ 포장파손의 저감으로 도로이용자에게쾌적하고 안정한 포장시스템 제공</li> <li>▷ 고내구성 포장시스템 개발을 통한 신공법 신기술 개발</li> <li>▷ 저소음과 우수한 주행안전성을 바탕으로 한 더 안락하고 안전한 고속도로 제공</li> <li>▷ 복합포장 시공공법, 품질관리기법 등 신기술 개발을 추진하여 창조경제 창출</li> </ul>				
핵심어 (5개 이내)	복합포장시스템	연속철근 콘크리트포장	덧씌우기	경계면특성	이질거동

## ⟨ SUMMARY ⟩

Purpose & Contents	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Purpose<ul style="list-style-type: none"><li>▷ Research on the material selection and mix design development for asphalt overlay (composite) pavement</li><li>▷ Perform a mechanistic structural analysis of the composite pavement using finite element model</li><li>▷ Build a database of the short term and long term performance on construction composite pavement</li><li>▷ Prepare composite pavement system design methodology</li><li>▷ Propose composite pavement materials construction quality control methodologies</li></ul></li><li>○ Contents<ul style="list-style-type: none"><li>▷ Foreign composite pavement research<ul style="list-style-type: none"><li>- Related literature for construction of composite pavement materials and related technologies</li><li>- Related literature for foreign composite pavement design and construction guidelines</li></ul></li><li>▷ Structural analysis of composite pavement<ul style="list-style-type: none"><li>- Structural analysis on composite pavement with traffic and environmental loadings using FEM</li><li>- Determination of design life based on pavement performance analysis and composite pavement thickness design</li></ul></li><li>▷ Construction methodologies for interface performance improvement<ul style="list-style-type: none"><li>- Investigation of interface application methodologies to increased bond strength</li><li>- Interface performance investigation for CRCP composite pavement, SMA and modified asphalt concrete</li></ul></li><li>▷ Asphalt material selection and mix design development<ul style="list-style-type: none"><li>- Determination of an optimum mix design for modified asphalt to yield better durability</li><li>- Investigation of interface behavior for various mixtures</li></ul></li><li>▷ Establishing thin asphalt overlay composite pavement design standards</li><li>▷ Analysis on the advantages and disadvantages of the established design criteria on various design methods</li><li>▷ Verification and improvement through field test construction<ul style="list-style-type: none"><li>- Compare the modelling results with the actual behavior in a variety of field conditions</li><li>- Performance evaluation of optimum mix design versus existing application methodologies</li><li>- Comparative analysis against various construction methods and construction design standards</li></ul></li><li>▷ Composite pavement design criteria, construction guidelines and quality control measures<ul style="list-style-type: none"><li>- Develop a pavement system that minimizes damage and maintenance costs and establish design criteria and construction guidelines</li><li>- Establish an asphalt layer and concrete layer integrated management quality control measures</li></ul></li></ul></li></ul>
Results	<ul style="list-style-type: none"><li>▷ Overlay and composite pavement material and mix design selected through laboratory tests</li><li>▷ Analysis of bond strength and other interface properties of the composite material and comparative analysis with the selected alternative</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ Determination of the structural behavior of the composite pavement</li> <li>▷ Performance verification through thin asphalt overlay construction testing and corresponding field tests</li> <li>▷ Composite pavement system design method identification and determination of research direction</li> <li>▷ Improvement of composite pavement material and construction guidelines</li> </ul>				
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ By developing the design, construction and quality control technology of the new pavement system, we can be able to lay the foundation for the commercialization of these technologies</li> <li>▷ The benefits are expected in preventing and ensuring long-term performance of existing concrete road from a number of defects such as joint damage which affects the driving safety</li> <li>▷ Improve the national road safety by improving the possibilities of applying new composite pavements system with longer maintenance intervals</li> <li>▷ Identification of the bond characteristics of composite pavement interface and include as basis in the development of a design model</li> <li>▷ Reduction and/or prevention of road accidents due to pavement damage</li> <li>▷ Provide a smooth and stable pavement system for road users to reduce pavement cracks</li> <li>▷ Development of a new method and technology of a durable pavement system</li> <li>▷ Comfortable and safer highways by ensuring a lower noise and higher driving safety</li> <li>▷ Promoting economic growth through the development of a new technology such the composite pavement construction process and quality control techniques</li> </ul>				
Keywords	Composite Pavement System	Continuously Reinforced Concrete Pavement	Overlay	Interface Properties	Interlayer Behavior

## < Contents >

1. Overview of Research .....	1
1.1. Goal of Research .....	1
1.2. Necessity of Research .....	3
1.3. Significance of Research .....	6
1.4. Research Scope .....	8
2. State of Art for This Subject .....	9
2.1. Research Trends & Scientific Results .....	9
2.2 Market Analysis & Industrial Trends .....	11
3. Research Contents & Performances .....	13
3.1. Selection of Thin Asphalt Overlay Materials and Mix Design .....	13
3.2. Analysis of Mechanical and Structural Model for Interface .....	43
3.3. Establish of DB from Field Test .....	52
3.4. Development of AC Overlay Design System .....	96
3.5. Construction Guideline of Thin Asphalt on CRCP .....	107
4. Level of Contributions on Objectives .....	114
4.1. Achievements .....	114
4.2. Contribution on Asphalt Overlay Techniques .....	115
5. Application Plan of Research .....	116
5.1. Evaluation of Research Technology Maturity .....	116
5.2. Future Research Direction .....	120
6. Information of Technologies about This Research .....	123
6.1. Development of Design Method in Advanced Organization .....	123
6.2. Analysis of Various Crack Prediction Models .....	124
7. Security Level .....	136
8. Enrollment of the Equipments to National Science and Technology Information System .....	136
9. Results of Safety Actions .....	137
10. Typical Results of Research Project .....	140
11. Others .....	145
12. References .....	145

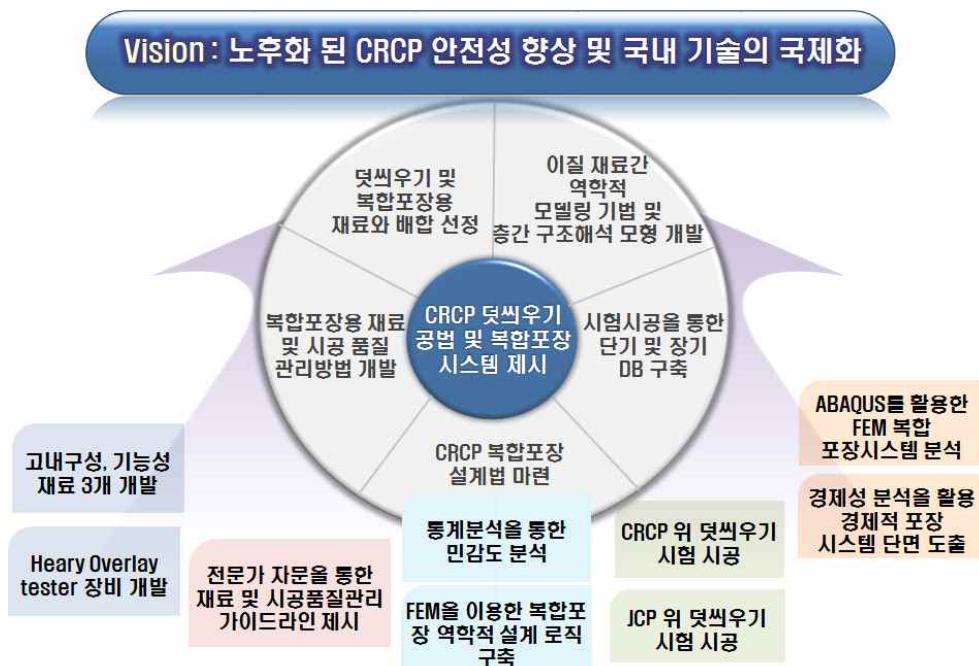
## 〈 목차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요 .....	1
제1절. 연구개발 목적 .....	1
제2절. 연구개발의 필요성 .....	3
제3절. 연구개발의 중요성 .....	6
제4절. 연구개발 범위 .....	8
제2장. 국내외 기술 개발 현황 .....	9
제1절. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과 .....	9
제2절. 국내외 시장분석 및 산업동향 .....	11
제3장. 연구 수행 내용 및 성과 .....	13
제1절. 얇은 덧씌우기, 경계면 부착 향상을 위한 재료/배합 선정 .....	13
제2절. 이질 재료간 역학적 모델링 기법 및 충간 구조해석 .....	43
제3절. 시험시공을 통한 단기 및 장기 DB 구축 .....	52
제4절. CRCP 및 복합포장 시스템 설계법 마련 .....	96
제5절. CRCP 위 얇은 아스팔트 덧씌우기 재료 및 시공 품질관리 지침(안) .....	107
제4장. 목표 달성을 및 관련 분야 기여도 .....	114
제1절. 목표 달성도 (성과지표 및 달성) .....	114
제2절. 관련 분야 기여도 .....	115
제5장. 연구개발성과의 활용계획 .....	116
제1절. 연구의 기술성숙도 평가 .....	116
제2절. 향후 연구 방향 .....	120
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 .....	123
제1절. 선행 연구 기관의 설계법 개발 연구 .....	123
제2절. 다양한 균열 예측 모델 분석 .....	124
제7장. 연구개발성과의 보안등급 .....	136
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 .....	136
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 .....	137
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 .....	140
제11장. 기타 사항 .....	145
제12장. 참고 문헌 .....	145

# 제1장. 연구개발과제의 개요

## 제1절. 연구개발 목적

- 본 연구 개발을 위한 총괄 및 세부 목표 그리고 이에 따른 세부 성과 모식도는 아래 <그림 1-1>과 같음



<그림 1-2> 총괄 연구 목표 모식도

### 1. 덧씌우기 및 복합포장용 재료 및 배합 개발

- SMA 아스팔트를 이용하여 고내구성을 갖는 재료 연구
- 하부 콘크리트 포장과 부착력을 최대화 할 수 있는 재료 및 배합연구
- 이질 재료의 특성을 반영한 복합포장용 재료 및 배합 제공
- 아스팔트 배합에 따른 경계면 이질거동 특성 정량화
- 재료 개발을 통한 포장의 공용성, 기능성 향상 및 경제적 이익 창출

## 2. 이질재료간 부착을 고려한 SMA – CRCP 복합포장 시스템 개발

- 국내 실정에 맞는 한국형 기능성 복합포장 시스템의 개발
- 아스팔트 포장의 장점(저소음, 주행성, 유지보수 용이)와 CRCP 포장의 장점(내구성, 지지력, 줄눈 부파손 우려 없음)을 모두 지닌 신 고급포장도로의 실용화를 통한 국내 포장 기술의 향상
- 개발 기술의 해외 수출을 통한 국가 경쟁력 강화

## 3. 개발된 재료의 현장시험을 통한 공용성 분석 용 DB 구축

- 실제 다양한 현장 조건에서 포장의 거동을 파악하여 모델링 해석 결과와 비교
- 기존의 포장법과 시공성, 경제성, 공용성 비교분석을 통한 우수성 검증
- 구간별 배합 및 시공법을 다르게 적용하여 비교분석을 통한 설계기준 검증

## 4. CRCP 및 복합포장시스템 설계법 마련

- 한국형 CRCP 설계 및 시공 기술력 보유
- 아스팔트 포장의 Perpetual Pavement 개념을 적용한 복합포장 시스템 설계법의 개발
- 신기술을 이용한 해외 사업 참여로 국가 경쟁력 및 경제적 이익 창출

## 5. 복합포장용 재료 · 시공품질관리 방법 제안

- 하부 콘크리트 타설 시 표면을 거칠게 하여 물리적 마찰력 증대 및 부착력을 높일 수 있는 시공법 제시
- 복합포장 CRCP용 콘크리트 재료 배합비 개발
- 복합포장용 CRCP 콘크리트와 SMA 경계면 부착 거동 정립
- 포장의 파손과 유지보수 비용을 최소화 할 수 있는 시공 지침 수립
- 아스팔트와 콘크리트 포장층의 내구성, 공용성을 통합관리 할 수 있는 품질 관리 방안 마련

## 제2절. 연구개발의 필요성

- 국내 고속도로에서 일반적으로 적용되는 콘크리트 포장형식은 줄눈 콘크리트 포장(JCP)이며, <그림 1-2>와 같이 줄눈부에서의 스팔링, 폴팅 등의 파손이 심각하게 발생하고 있음
- 유지보수 방안인 덧씌우기 이후에도 기존 포장 층과 보수 포장 층 사이의 부착 부족 및 하부 층의 부피 변화, 다짐 불량 등의 이유로 내구성, 반사균열 등의 결함이 재차 발생하고 있어 이를 해결 할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요

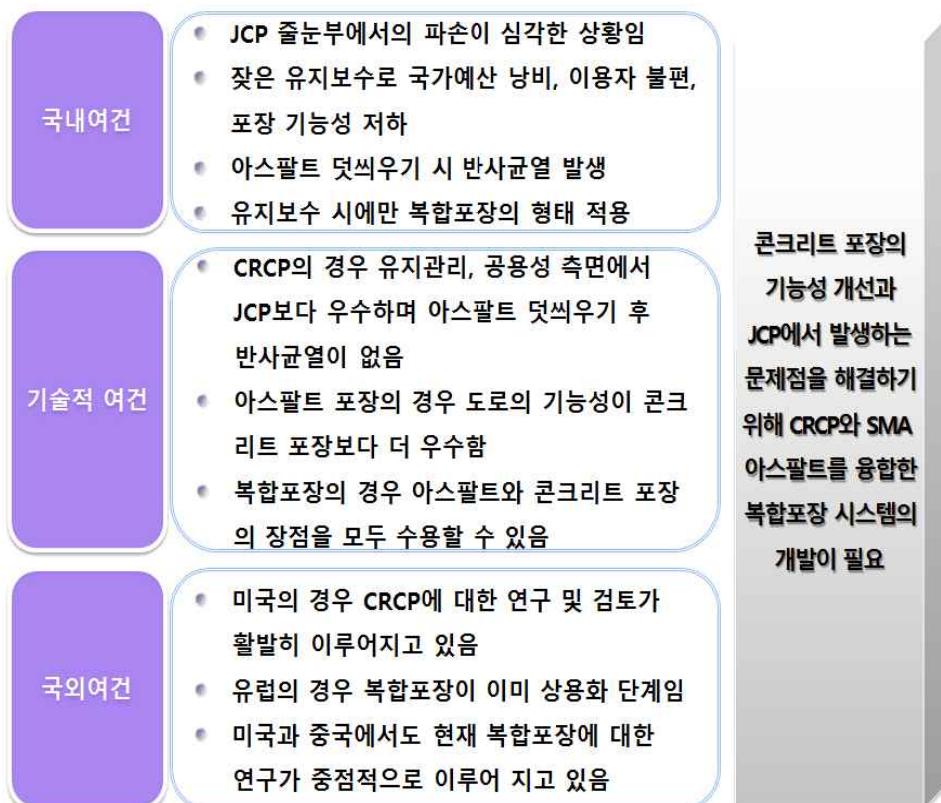


<그림 1-3> 줄눈 콘크리트 포장(JCP)에서 발생한 스팔링

- 잦은 유지보수로 포장의 기능이 약화되는 것은 물론 국가 예산 낭비, 보수 기간 중 고속도로 이용자의 불편 등의 문제 야기
- JCP에 일반적인 아스팔트 덧씌우기 공법을 이용한 보수 시 기존 포장 층과 보수 포장 층 사이의 부착 부족 및 하부 층의 부피 변화, 다짐 불량 등으로 인한 반사균열이 발생
- 한국도로공사는 이러한 덧씌우기 후 2차 파손을 막기 위한 방안으로 콘크리트 포장 유지보수 공법으로 VES-LMC 공법을 채택하였으나 비용이 매우 많이 들고, 재 파손 발생 빈도가 높아 효율성이 떨어짐
- 문제의 근본적인 원인이 JCP의 줄눈부에 있기 때문에 그동안 국외에서는 줄눈을 두지 않는 콘크리트 포장공법인 연속 철근 콘크리트 포장(CRCP : Continuous Reinforced Concrete Pavement)에 대한 연구가 활발하게 이루어졌으며, 많은 고속도로에 적용됨

- CRCP는 종 방향 철근이 슬래브와 기층 사이의 마찰력을 증대시켜 환경하중에 의한 부피 변화를 높은 수준으로 억제하는 방식이며 이로 인해 콘크리트 내부에 높은 응력이 발생하여 많은 횡 방향 균열이 발생하지만 종 방향 철근이 균열 폭을 억제하여 포장의 기능을 확보하게 됨
- 국외의 경우 활발한 CRCP 연구 및 검토성과를 통해 CRCP 도로를 JCP 도로에 비해 유지관리, 기능성 및 공용성 측면에서 우수한 포장으로 평가되었으며, 국내에서도 1987년 건설된 중부고속도로 내의 CRCP와 JCP 구간의 비교 결과 CRCP 구간이 더욱 우수한 공용성을 지닌 것으로 보고되었음
- Texas Tech University의 연구결과, 유지보수의 경우 CRCP에서는 아스팔트 덧씌우기 후 반사 균열이 거의 발생하지 않아 유지관리 및 공용성 측면에서는 JCP보다 뛰어나지만 아스팔트 포장에 비해 소음이나 주행성 등의 공용성이 상대적으로 떨어짐
- 아스팔트 포장의 경우 절대 수명은 콘크리트 포장에 비해 짧으나, 도로 이용자들의 평가는 매우 우수한 편이며 유지보수 시 교통 개방시간이 비교적 짧아 콘크리트 포장에 비해 용이함
- 상대적으로 낮은 콘크리트 포장의 기능성의 개선과 JCP 줄눈 부의 문제점을 해결하기 위해 CRCP와 아스팔트를 융합한 복합포장방식이 대안이 될 수 있으며, 복합포장방식의 경우 아스팔트 포장의 장점(우수한 주행성, 저 소음, 유지보수의 용이)과 콘크리트 포장의 장점(내구성, 지지력)을 적용시킬 수 있어 유럽에서는 복합포장이 이미 상용화 단계에 도달 하였고 미국과 중국에서도 현재 중점적으로 연구가 되고 있지만, 국내의 경우 콘크리트 포장의 유지보수기법으로만 일부 사용 중이며 복합포장에 대한 연구 및 성과 또한 미흡한 실정임
- 현재 국내에서 사용되는 CRCP 설계 법은 미국의 AASHTO 설계법 (American Association of State Highway and Transportation Officials Pavement Design Guide)을 인용한 것이며, 1987년 중부고속도로 개통 이후 CRCP의 적용이 전무해 실제 설계법이 검토되거나 적용된 사례가 없기 때문에 이미 수준급의 CRCP 기술력을 보유한 Texas Tech University와의 공동연구를 통해 국내 CRCP 설계 기준을 정립하고, 나아가 복합 포장 시스템을 적용하기 위한 재료, 시공 및 품질관리 기법을 연구하여 국내 도로의 구조적 특성, 온도 및 수분 등의 환경적 특성, 차량 특성 등 국내 실정에 적합한 재료, 설계법, 공법 및 품질관리 방안 등 전반적인 한국형 기능성 복합포장 시스템을 구축하고자함
- 아스팔트 포장의 Perpetual Pavement 개념과 Texas Tech University의 CRCP 및 CRCP 덧씌우기 경험을 이용한 SMA 아스팔트와 CRCP의 복합 포장은 두 형식의 장점만을 이용한 획기적인 공법이 될 것임

- 복합포장 방식의 연구를 통해 CRCP에서의 덧씌우기, 방수 기능과 미끄럼 저항성을 제공할 수 있는 교면포장 등에 응용하여 적용이 가능하고, 시험시공을 통해 개발 기술의 시공성, 공용성, 경제성 등을 평가하여 기술적으로는 고내구성, 장기 공용성을 지닌 신 포장기술의 개발이 가능하고 이와 함께 소음 저감과 우수한 주행성을 바탕으로 한 안락하고 안전한 고속도로 제공이 가능함
- 경제적으로는 개발 기술의 해외 수출 방안 검토를 통해 국내 업체의 해외 시공을 통한 국가 경쟁력 확보 및 이익 창출, 그리고 포장의 수명주기 동안 유지관리 빈도 및 비용을 절감하여 불필요한 국가예산손실을 줄일 수 있으며 상대적으로 유지보수가 쉬운 아스팔트 층을 표층으로 적용하여 하부 CRCP 층을 영구적으로 사용해 콘크리트 층의 파손을 예방하고 영구적 사용을 가능하게 해 이에 따른 유지관리 비용을 절감할 수 있음
- 복합 포장 형식이라는 새로운 기술을 개발, 보유함으로써 현장 조건에 따라 다양한 포장 형식을 적용할 수 있으며, 이를 통해 포장 기술의 국가 경쟁력을 확보 할 수 있고 더 나아가 국내 CRCP 및 복합포장에 대한 연구의 기반을 마련하여 차 후 이에 대한 활발한 연구 및 검토 수행을 가능하게 할 수 있다. 연구개발의 필요성에 대한 개념도는 아래 <그림 1-3>과 같음



<그림 1-4> 연구개발의 필요성

## 제3절. 연구개발의 중요성

### 1. 기술적 측면

- JCP 방식의 문제점을 해결하기 위해 포장에 줄눈 부를 두지 않는 포장형식인 CRCP에 대한 관심이 국내외로 증가하고 있으나 CRCP 또한 소음과 주행성 등 아스팔트 포장에 비해 포장의 기능성이 상대적으로 떨어지는 한계가 있음
- 아스팔트 포장은 소음과 주행성, 유지관리의 용이함 등 포장의 기능성이 뛰어나지만 내구성이 낮아 수명 주기가 짧은 단점이 있음
- 현대사회에 있어 도로의 기능성이 이용자들에게 있어 매우 중요한 부분을 차지하고 있기 때문에 기존 콘크리트 포장의 안정성, 공용성, 경제성을 지니면서 기능성까지 향상시킬 수 있는 연구가 반드시 필요하며 콘크리트와 아스팔트의 복합포장형식이 이에 대한 대안이 될 수 있음
- 복합포장 시스템의 개발을 위해서는 기술적으로 덧씌우기 및 복합포장용 재료와 배합 개선, 콘크리트와 아스팔트와 같은 이질 재료간의 부착을 고려한 공법, 새로운 기술의 공용성을 위한 장/단기 DB 구축, 그리고 국내에서 연구가 미흡했던 CRCP 포장의 횡 방향 균열이 복합포장에 미치는 영향 등의 문제가 해결되어야함
- 국내 실정에 적합한 복합포장형식을 개발을 통해 우수한 주행성과 저소음, 유지보수의 용이함 등의 장점을 가진 아스팔트 포장과 강한 내구성, 지지력, 공용성 등의 장점을 지닌 CRCP 포장을 융합하여 최적의 포장 시스템을 개발할 수 있음

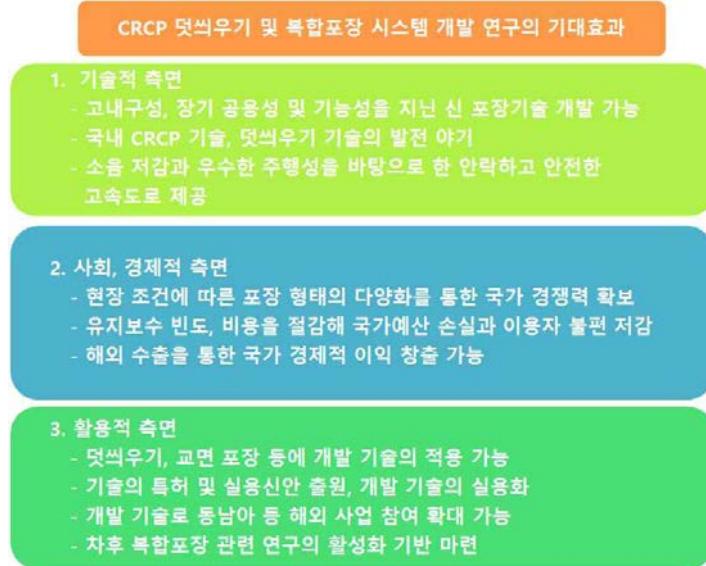
### 2. 경제 산업적 측면

- 국내에 일반적으로 적용되는 JCP 방식에서는 4.5m에서 6m 사이의 간격으로 횡 방향 줄눈을 시공하고, 슬래브와 기층 사이에 Plastic Sheet를 깔아 환경 하중 발생 시 슬래브의 이동을 상대적으로 자유롭게 함으로써 환경하중으로 인한 부피 변화를 허용하여 균열 발생 가능성을 낮추지만 포장 수명 기간 중 줄눈 부에서 스폴링, 폴팅, 균열 등의 결함이 많이 발생하여 잦은 유지보수로 이어지며 그에 따른 높은 보수비용으로 인한 국가예산낭비 또한 적지 않은 상황
- 복합 포장 형식에 적용될 CRCP 방식은 기후 변화에 따른 품질저하 우려가 적고 줄눈 파손 등의 우려가 적어 유지 관리 비용이 적게 소모되기 때문에 국가 예산손실을 막는 동시에 콘크리트 포장의 장기 공용성을 보장 할 수 있는 기반을 마련할 수 있으므로 국내 실정에 맞는 CRCP 연구가 반드시 진행되어야함

- 개발된 아스팔트 재료를 이용한 CRCP 포장 위 덧씌우기 공법 개발 및 실용화를 통해 유지보수 후 발생하는 2차 파손을 막아 이에 대한 비용을 절감할 수 있고 개발 기술의 특허 및 실용신안 출원을 통해 경제적 이익을 창출이 가능함
- 복합포장 방식의 상세 연구개발 내용 도출 및 추진전략을 통해 국가 예산을 절감하고, 고속도로 운영의 효율성 극대화 시킬 수 있으며, 복합포장 시스템을 개발함으로써 해외 수출 가능성을 평가하고 실용화함은 물론 차 후, 국내 업체의 해외사업 참여로 국가 경제적 이익 창출을 가능함

### 3. 사회문화적 측면

- 복합포장의 국내외 현장 적용 가능성이 확인된 후 국내 도로에 실용화가 이루어지면 도로 포장이 기존 일반적으로 JCP 방식을 사용해왔던 것과 다르게 현장 조건에 따라 포장 형식이 다양화 될 수 있어 창의성과 다양화를 추구하는 현대사회에 부합함과 동시에 국내 도로포장 기술의 발전을 야기할 수 있음
- 국내에서 기존에 사용하지 않았던 신 포장기술에 대한 재료, 설계, 시공, 품질관리 방안을 명확히 제시함으로써 이에 배정되는 예산에 대한 정책결정자와 도로 포장 관리자간의 의사소통 시 신뢰성을 제공
- 복합포장 방식이 적용된 도로는 포장 수명기간에 줄눈 파손 등에 대한 유지보수가 상대적으로 적기 때문에 이로 인한 도로 통제나 교통 지체를 줄일 수 있어 이용자의 불편을 감소시킬 수 있음
- SMA 아스팔트를 이용한 복합포장 시스템은 주행성, 소음문제 등의 기능성이 기존 콘크리트 포장에 비해 뛰어나기 때문에 도로 이용자들을 위해 더욱 안락하고 안전한 고속도로를 제공할 수 있으며 이로 인한 국민 삶의 질 향상 등 사회적 파급효과가 매우 큼
- 복합포장 방식에 대한 시공성, 공용성, 경제성, 기능성 등에 대한 검증이 이루어지고 실용화가 가능하다고 판단 된 후에는 이에 관련한 국내 연구가 더욱 활발하게 이루어질 수 있으며, 따라서 토목 도로 분야 산업에 파급효과가 클 것으로 판단되고, 개발된 복합포장 기술을 통해 국내 도로 포장 기술을 한 단계 발전시킬 수 있으며 국외 수출 방안을 마련함으로써 직간접적인 도로 운영 경쟁력 향상을 도모
- 아래 <그림 1-4>는 위의 CRCP 덧씌우기 및 복합포장 시스템 개발을 통한 기술, 사회, 경제, 그리고 활용적 측면에서의 기대효과를 정리한 개념도임



<그림 1-5> CRCP 덧씌우기 및 복합포장 시스템 개발에 따른 기대효과

#### 제4절. 연구개발 범위

- 본 연구는 착수일로부터 3년간 노후화된 CRCP 콘크리트 위 얇은 SMA 아스팔트 덧씌우기 공법을 통한 유지보수 및 복합포장 시스템을 제시하기 위해서 덧씌우기 및 복합포장용 재료와 배합을 선정, 이질 재료간 역학적 모델링 기법 및 층간 구조해석 모형 개발, 한국도로공사 여주 스마트 하이웨이 시험도로구간에 시험시공을 통한 단기 및 장기 D/B 구축, CRCP 위 복합포장 설계법 마련, 그리고 복합포장용 재료 시방서 및 품질관리법을 개발하는 연구를 진행
- 연구 개발 범위에 대한 개략적인 모식도는 아래 <그림 1-5>와 같음



<그림 1-6> 연구 개발 범위 모식도

## 제2장. 국내외 기술 개발 현황

### 제1절. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

#### 1. 국가 연구개발사업 유사연구 실적

##### 가. 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

- 기존 국내의 복합포장 및 연속철근콘크리트 포장에 관련한 연구는 아래 <표 2-1>과 같고, 복합포장 시스템 및 폴리머 콘크리트 교면포장 개발 연구는 폴리머를 첨가한 다층 콘크리트 포장법 개발에 대한 연구이며, 고성능 연속철근콘크리트 도로포장 적용을 위한 거동 분석 및 해석모델 개발 연구는 CRCP의 도로포장 적용을 위한 구조적 해석 및 콘크리트 포장 자체의 거동을 분석하였음

<표 2-1> 국내 복합포장 또는 CRCP 포장 관련 연구 현황

부처명	사업명	과제명	예산	비고
국토교통부	건설기술혁신사업	복합포장 시스템 및 폴리머 콘크리트 교면포장 개발		
한국연구재단	중견연구자지원	고성능 연속철근콘크리트 도로포장 적용을 위한 거동 분석 및 해석모델 개발	2.97 억 원 (3년)	

##### 1) 연구개발과제의 차별화 방안

- 기존 연속철근콘크리트(CRCP) 포장에 관한 연구는 거동 분석 및 해석모델 개발에 초점이 맞추어져 있는 연구이며, 본 연구에서 달성하려는 성과는 CRCP를 이용한 복합포장시스템이고 설계법 개발, 시공 지침 제안은 기술력의 상용화에 더욱 근접한 연구뿐만 아니라 CRCP 최고의 기술력을 보유하고 있는 Texas Tech 연구기관과의 협력함

##### 2) 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

- 2012년 국토해양부 한국건설교통기술평가원에서는 “복합포장 시스템 및 폴리머 콘크리트 교면포장 개발” 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 연속 철근 콘크리트 포장(CRCP)층과 무근 줄눈 콘크리트 포장(JCP)층 위에 쇄석 매스틱 아스팔트 포장(Stone Mastic Asphalt, SMA)과 CRM(Crumb Rubber Modifier)을 포설하여 공용성 평가를 수행하였다. 그러나 방수층과 부착 강도를 중심으로 연구가 진행되어 복합포장 시스템 개발 대한 폭넓은 연구가 요구

- 한국도로공사 교통연구원에서 2011년 연속철근 콘크리트 포장 상세설계 기준 연구, 한국건설기술연구원에서 연속철근 콘크리트 포장의 품질관리 지침 개발 연구 등이 이루어졌지만 실제 국내 CRCP 도로의 적용 사례가 없어 이에 대한 검토 및 평가가 미흡한 상황
- 일본에서는 1990년부터 연속 철근 콘크리트 포장과 쇄석 매스틱 아스팔트를 활용하여 복합 포장을 시공해왔으며, 다양한 연구를 통해 고기능성과 고내구성을 입증함(국토해양부, 2012)
- 미국에서의 아스팔트 덧씌우기 공법은 주로 콘크리트 포장의 유지보수 시 사용되어왔고, 경제성이나 우수한 시공성으로 인해 연속 철근 콘크리트 포장의 유지 보수에 적합(Manuel Trevino 외 3명, 2004)
- Manuel Trevino 외 3명(2004)은 텍사스 DOT의 연구원을 대상으로 한 인터뷰 결과와 포장 상태 조사를 통하여 아스팔트 덧씌우기 공법 적용에 관한 의사 결정 나무를 개발했지만, 신설 포장으로서 복합 포장을 적용한 사례는 많지 않음
- 신설 복합포장(AC/JPCP)의 시공은 뉴저지, 위싱톤, 위스콘신, 캘리포니아 주의 고속도로에서 수행되었고 신설 복합포장의 추가 연구는 SHRP 2에서 수행 중임(국토해양부, 2012)
- 중국의 Xingyu Gu는 장수지역에서 2004년 연속 철근 콘크리트 포장위에 쇄석 매스틱 아스팔트 포장을 포설하여 시험시공을 수행하였으며 2009년까지 모니터링 작업을 수행하였음
- 그 결과 기존 중국에서 사용하던 아스팔트 콘크리트 포장보다 처짐량이 2배 이상 적은 것으로 나타났으며, 러팅 또한 복합 포장에서 적게 발생
- 미국 텍사스 주는 CRCP를 약 50년 전부터 사용하기 시작하였고, 일리노이 주의 시공 경험을 근거로 텍사스 환경에 맞게 설계인자를 적용하고 있음
- 2004년 CRSI의 보고에 따르면 텍사스에서는 종방향 철근 접착 면적에 따른 횡방향 균열의 간격, 시공시기가 균열 간격에 미치는 영향, 포장 재령에 따른 콘크리트의 응력 및 강도, 종방향 철근비, 균열폭, CRCP 슬래브 거동의 분석, 길어깨와 슬래브 두께 설계, 굽은 골재 종류, 콘크리트 온도, 콘크리트 수분 증발률, CRCP 공용성의 평가, CRCP 단부, 덧씌우기 후 CRCP의 거동 분석 등 설계, 시공, 유지관리 전반에 걸쳐 활발한 연구가 진행 중임
- 미국 일리노이 주는 CRCP가 처음 시공 된지 약 80년이 지났으며 1965년 시공 된 Stevens Highway는 전 구간이 CRCP 구간으로 시공되었으며 2001년 CRSI의 보고에 따르면 약 2000마일에 달하는 고속도로가 CRCP로 건설되고 있음
- 최근 일리노이 주에서는 횡방향 균열의 형태와 패턴, 균열 간격, 균열 폭, 횡방향 균열 제어, 종방향 균열의 원인 등에 대해 집중하여 연구 중에 있음

## 제2절. 국내외 시장분석 및 산업동향

### 1. 국내 현황

- CRCP의 경우 현재 국내에서는 미국 AASHTO 설계 법을 인용한 설계 기준을 사용하고 있으며, 아래 <표 2-2>과 같이 최근 국내 고속도로의 CRCP 적용 사례가 있고, 수명연한이 도래하고 있기 때문에 CRCP에 덧씌워 공법으로 유지보수가 요구됨

<표 2-2> 국내 CRCP 도로 현황

노선	지사	방향	이정(km)		시공차로	시공년도
경부선	양산	양방향	35.30	37.70	1,2,3차로	1969년
	대구	양방향	81.40	83.60	1,2차로	
서해안	함평	서울방향	8.40		1,2차로	1997년
외곽순환	동서울	양방향	19.80	24.4	1,2차로	1991년
중부선	진천, 경안	상행선	생략		1,2차로	1987년
	진천, 경안	하행선	생략		1,2차로	

### 2. 유럽 현황

- 유럽의 콘크리트 포장도로의 설계법은 유럽코드와 영국의 DMRB 방법이 있음
- 벨기에에는 1950년에 처음으로 Leuze-en-Hainaut 지역에 CRCP를 건설하였으며 본격적으로 CRCP를 적용한 것은 70년대 미국 현장 답사 이후이다. 이에 따라 70년대 1800만 $m^2$ 에 달하는 CRCP 도로가 건설되었음(FHWA, 2007)
- 영국은 1975년 이전에는 경험적 설계법으로 CRCP를 설계하였으며 교통량에 따라 포장 층의 설계 두께가 결정되었고, 현재는 콘크리트 휨강도를 이용하여 설계에 적용하고 있으며 종방향 철근비는 0.6%를 사용하고 있음 (FHWA, 2007)
- 네덜란드 고속도로의 콘크리트 포장의 절반이 JCP로 시공되었지만 최근 새로운 콘크리트 포장의 대부분은 CRCP로 시공되고 있으며 Delft University에서 개발된 인장응력 모델이 CRCP의 철근비를 결정하는데 사용되며 설계년수는 30~40년으로 설정하고 있음

### 3. 미국 현황

- FHWA(Federal Highway Administration)에 의하면 미국에서는 35개 주 이상에서 CRCP를 사용하고 있으며 중차량 또는 교통량이 많은 구간에서 CRCP 적용을 적극적으로 검토하고 있음
- 대표적으로 일리노이주와 텍사스주가 CRCP의 사용과 이에 대한 연구를 활발하게 진행 중임
- 미국 TxDoT 에서는 AASHTO Road Test 평가를 기반으로 한 AASHTO 93 설계법을 이용하여 CRCP 설계를 해 왔지만 AASHTO Road Test는 줄눈 콘크리트 포장(JCP)을 기준으로 한 시험으로 연속철근 콘크리트 포장(CRCP) 방식에 적용하는 것이 적절하지 않았고, 이에 Texas Tech University는 역학-경험적 평가를 통한 Mechanistic-Empirical Pavement Design Method를 2012년 5월 개발했으며, 이는 역학, 경험적 원리를 바탕으로 CRCP에 실용화 가능한 최신 설계법임

## 제3장. 연구 수행 내용 및 성과

### 제1절. 얇은 덧씌우기, 경계면 부착 향상을 위한 재료/배합 선정

- 본 연구에서는 <그림 3-1>과 같은 Balanced Mix Design 개념을 이용하여 텍사스 세립도 혼합물 중 F-DGM과 F-PFC에 대한 배합설계를 실시하였으며 50회 선회 다짐 및 용적 특성 평가를 통해 목표 공극률에 도달하는 최적 아스팔트 함유량을 우선 결정
- Hamburg Wheel Tracking Test와 Overlay Test를 실시하여 러팅 저항성과 반사균열 저항성의 공용성을 검토하여 이에 대한 기준 통과 시 배합설계를 종료하는 방향으로 실내 실험을 진행하였음



<그림 3-1> 본 연구에 적용한 Balanced Mix Design 과정 모식도

#### 1. 골재 입도 및 배합 설계

##### 가. 최적 아스팔트 함량 결정

- 본 연구에서는 텍사스의 Balanced Asphalt Mix Design 방법의 개념을 도입하여 국내 CRCP 상부 얇은 덧씌우기 시 적용 가능한 세립도 아스팔트 혼합물 중 Fine DGM 및 Fine PFC와 Fine SMA 혼합물 재료의 배합 개발 및 선정을 목표로 설정함
- 실내 실험과 더불어 국내에서 일반적으로 적용중인 최대입경 13mm DGM 아스팔트 혼합물과 SMA 혼합물과의 비교를 통해 개발 배합의 기술적 우위를 확인하였음
- 기존 국내에서 공용되는 DGM 아스팔트 혼합물, SMA 혼합물과 본 연구에서 개발된 F-DGM, F-PFC, 그리고 F-SMA 아스팔트 혼합물의 골재 합성입도 기준은 <표 3-1>과 같음

<표 3-1> 아스팔트 혼합물 종류에 따른 골재 합성 입도 기준  
(국토교통부, 2014) (TxDOT, 2014)

체크기 (mm)	혼합물 종류				
	DGM(13mm)	SMA(13mm)	F-DGM(10mm)	F-PFC(10mm)	F-SMA(10mm)
통과 중량 백분율(%)					
19	100~100	100~100	100~100	100~100	100~100
13.2	90~100	93~100	100~100	100~100	100~100
9.5	76~90	40~55	95~100	95~100	95~100
4.75	44~74	16~30	70~90	20~55	50~70
2.36	28~58	12~23	40~65	0~15	20~40
1.18	-	-	20~45	0~12	10~25
0.6	11~32	10~18	10~30	0~8	10~20
0.3	5~21	8~15	10~20	0~8	8~15
0.15	3~15	7~14	-	-	-
0.075	2~10	7~12	2~10	0~4	4~10

- 실내 실험 시 골재는 DGM 용 13mm (이하 D13mm) 굵은 골재, SMA 용 13mm (이하 S13mm) 굵은 골재, SMA 용 10mm (이하 S10mm) 굵은 골재, 그리고 잔골재(석분) 및 스크리닝(단입도) 골재가 사용되었으며, 아스팔트 혼합물의 채움재로써 석회석분을 사용함
- SMA와 F-PFC 혼합물에는 0.3%의 셀룰로오스 파이버를 첨가하였다. 시험에는 국내 A 사, B 사, C 사의 골재를 사용하였으며 이를 통해 다양한 골재의 합성입도를 비교 하여 최적의 입도를 선정하고자함
- 각 아스팔트 혼합물의 골재 합성입도 기준에 따라 혼합물 종류 별 골재 합성 비율을 선정함
- <표 3-2>에 정리한 것과 같이 DGM와 SMA의 경우에는 기존 연구 결과를 참고하여 일반적인 골재 합성입도를 적용하여 합성 비율을 결정
- F-DGM의 경우에는 A, B, C 사의 골재를 각각 사용, F-PFC의 경우에는 B와 C 사의 골재를 사용, 그리고 F-SMA의 경우에는 C사의 골재를 사용하여 최적 배합 비율을 선정한 후 시험을 진행
- 바인더는 DGM와 SMA 아스팔트 혼합물에 대해서는 PG 64-22 등급의 AP5를 사용하였으며 F-DGM과 F-PFC 그리고 F-SMA 혼합물에 대해서는 텍사스의 기준에 따라 PG 76-22 등급의 PMA를 사용

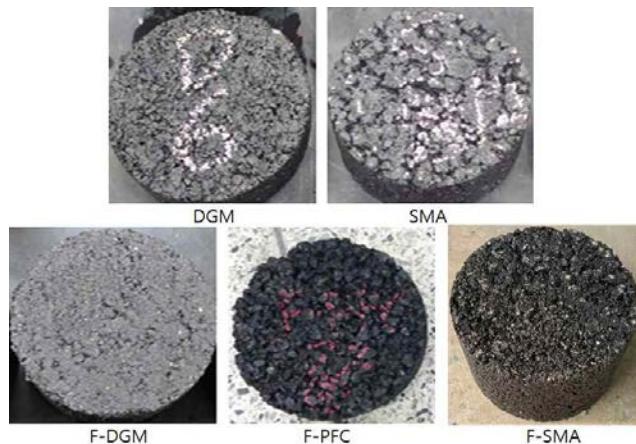
&lt;표 3-2&gt; 아스팔트 혼합물 종류 별 선정한 골재 합성입도

체크기 (mm)	DGM	SMA	F-DGM			F-PFC			F-SMA	
			A	B	C	B	C1	C2	C1	C2
19	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
13.2	99.8	99.5	100	100	100	100	100	100	100	100
9.5	88.3	52.7	99.1	99.6	99.6	98.4	98.6	98.9	99.1	99.1
4.75	57.6	28.1	72.3	79.7	73.7	24.3	27.8	44.7	52.8	50.4
2.36	34.8	21.7	43.2	48.1	51.1	8.5	4.5	5.0	33.0	31.0
1.18	—	—	29.8	28.0	38.0	4.0	3.1	3.2	24.6	23.1
0.6	14.7	15.6	16.3	18.1	25.8	3.0	2.5	2.5	16.8	15.8
0.3	10.8	13.7	11.3	12.4	16.5	2.4	1.9	2.0	10.9	10.3
0.15	8.3	10.6	8.0	9.1	10.6	—	—	—	—	—
0.075	6.2	8.9	5.3	5.8	4.7	1.6	1.2	1.2	3.4	3.2

- 배합설계 방법으로는 기존의 마샬 배합설계법이 아닌 Superpave 배합 설계 법을 사용하였으며, 이는 혼합물의 러팅과 균열 저항성을 동시에 고려할 수 있는 방법임
- 선정된 골재 합성 비율에 대해서 최적 아스팔트 함량을 결정하기 위한 실내 배합 설계를 실시
- 아스팔트 바인더의 함량은 골재 합성 비율을 토대로 추정 아스팔트 함량을 예측하고, 이로부터 각각 0.5%씩 함량을 달리하여 각 함량별로 혼합물을 생산하였음
- 생산한 혼합물은 선회 다짐기를 이용하여 공시체로 제작하였으며 DGM 및 SMA 아스팔트 혼합물의 경우 75회 선회 다짐을 (국토교통부, 2014), F-DGM 및 F-PFC 혼합물의 경우에는 기준에 따라 50회, F-SMA 혼합물의 경우 100회 각각 선회 다짐을 실시(TxDOT, 2014)
- 세부적인 혼합물 생산 및 선회 다짐을 통한 공시체 제작 과정은 <그림 3-2>에서 보이는 것과 같음
- 골재를 건조시킨 후 배합 비율에 맞게 골재, 채움재 및 바인더를 재량하여 오븐에서 혼합 온도로 가열시키는데, 이 때 골재는 12시간 이상, 아스팔트 바인더는 최대 1시간을 기본으로 함
- 재료 가열 후, 골재 및 바인더를 혼합한 후 약 2시간 동안 실험실 다짐 온도에서 단기 노화 후 선회다짐기를 이용하여 공시체를 제작하며 F-PFC의 경우에는 바로 탈형을 했을 경우 시편이 무너지는 현상이 있기 때문에 약 하루가 지난 후 탈형을 실시함
- <그림 3-3>에서는 위 과정을 통해 제작 된 DGM, SMA, F-DGM, F-PFC, F-SMA 아스팔트 혼합물의 공시체 표면의 모습을 보여줌



<그림 3-2> 아스팔트 혼합물 공시체 제작 과정



<그림 3-3> 아스팔트 혼합물 별 모습

- 아스팔트 혼합물의 혼합 및 다짐 온도는 사용되는 바인더의 등급에 따라 결정되며 골재, 바인더 가열 온도 및 혼합 온도는 163°C, 다짐 온도는 149°C 가 기준으로 제시되며, 그 기준은 <표 3-3>과 같음(Walubita, 2008)

<표 3-3> 아스팔트 혼합물 혼합 및 다짐 온도 기준  
(Lubinda F. Walubita, Tom Scullion, 2008)

구 분	온도 기준 (°C)	
	PG 64-22	PG 76-22
골재 가열 온도 (12시간 이상)	149	163
아스팔트 바인더 가열 온도 (최대 1시간)	149	163
혼합 온도	149	163
다짐 온도	135	149

- 공시체 제작 후, 이론최대밀도 시험을 실시하여 각 아스팔트 함량의 이론최대밀도 값을 구하고 아스팔트 함량 별 공극률을 측정함
- 이론최대밀도 시험은 아스팔트 혼합물의 공극이 전혀 없는 상태의 밀도를 측정하는 시험이며 <그림 3-4>는 이론최대밀도 시험 장비의 모습을 보여줌



<그림 3-4> 이론 최대 밀도 시험 장비

- 공시체의 공극률을 구하기 위해서 겉보기 밀도 측정을 실시하였으며, 시험은 혼합물의 종류에 따라 각기 다른 두 가지 방법 중 하나를 택하여 진행하며 이 과정은 <그림 3-5>에 나타낸 것과 같음
- 첫 번째 방법은 공시체의 건조 질량, 표면 건조 포화 상태의 질량, 표면 건조 포화 상태의 수중 질량을 측정하여 겉보기 밀도 계산식을 통해 겉보기 밀도를 구하는 것임
- 두 번째 방법은 코어락(Core-lok) 장비를 이용하여 겉보기 밀도를 측정하는 것으로 코어락 장비를 이용하는 방법은 F-PFC 혼합물에 적용하였는데 그 이유는 해당 혼합물이 배수성 아스팔트 혼합물의 일종으로 다른 혼합물과는 달리 공극이 큰 다공성 재료이기 때문에 일반적인 중량 측정으로는 표면건조 포화상태 조건을 만족시키기 어렵기 때문임



<그림 3-5> 겉보기 밀도 측정 시험 과정

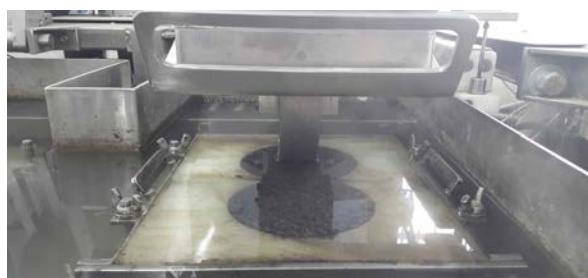
- 이후 공극률을 산출하게 되는데, 공극률은 다져진 시료 내에 존재하고 있는 공기의 체적을 말하며 이론최대밀도와 겉보기 밀도를 이용해서 공극률 계산식을 통해 도출됨
- 위 과정들을 통해 각 아스팔트 함량의 공시체 공극률을 계산하고 목표 공극률을 만족시키는 최적 아스팔트 함량을 선정하게 된며, <표 3-4>는 각 세립도 혼합물의 이론최대밀도, 최적 아스팔트 함량, 공극률, 골재 간극률 등 용적 특성 평가 결과를 요약한 것임
- 그 결과 모든 기준을 만족시키는 F-DGM, F-PFC, F-SMA 세립도 혼합물의 배합 선정을 완료하였음

<표 3-4> Heart 세립도 혼합물 용적 특성 평가 결과

Mixture Types	Binder	Gmm	OAC(%)	AV(%)	VMA(%)	Compaction
Heart F-DGM	기준	PG76-22	N/A	5.5 이상	4.0 이하	16.5 이상 50 Gyration
	결과	PG76-22	2.387	7.5	4.1	20.9 50 Gyration
Heart F-PFC	기준	PG76-22	N/A	6.0 이상	22~26	N/A 50 Gyration
	결과	PG76-22	2.437	6.0	21.8	N/A 50 Gyration
Heart F-SMA	기준	PG76-22	N/A	6.0 이상	3.5 이하	16.5 이상 100 Gyration
	결과	PG76-22	2.419	6.8	3.0	18.6 100 Gyration

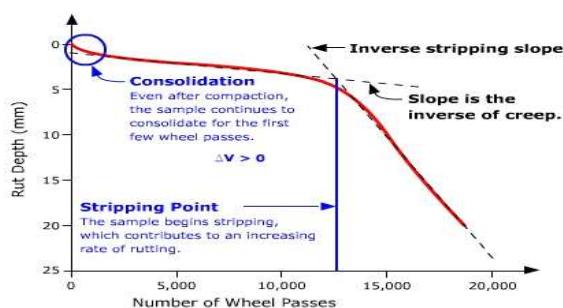
## 나. Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT)

- Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT)는 얇은 덧씌우기 및 복합포장 용 아스팔트 혼합물의 배합 설계 시 수행되는 중요한 시험이며 텍사스에서 모든 HMA 혼합물에 대해서 HWTT를 의무적으로 시행하고 있음
- 러팅 깊이가 12.5mm에 도달할 때까지의 훨 통과 횟수를 통해 수분 저항성 및 러팅 저항성을 평가하고, 아래 <그림 3-6>은 물의 온도 50°C에서 HWTT 시험을 진행하는 것을 나타냄



<그림 3-6> HWTT 시험 진행 모습

- <그림 3-23>은 HWTT의 결과 그래프의 일반적인 형태를 보여주며, 보통 세 영역으로 구분
- 초기 약 1,000회의 훨 통과 횟수까지는 시편이 윤하중에 의하여 다짐되고 단단해지는 구간(Consolidation)임
- 훨 통과에 따른 러팅 포텐셜에 의해 러팅 깊이가 증가하는 구간(Creep slope)이 변곡점까지 나타나게 됨
- 변곡점 이후에는 수분에 의한 박리 (Stripping : 아스팔트 혼합물에 유입된 물이 골재와 아스팔트 피막 사이의 접착력과 부착력을 약화시켜 파손을 일으키는 등 혼합물에 직접적인 영향을 미치게 되는 현상)로 인해 러팅 깊이가 증가하는 구간(Stripping slope)을 나타냄
- Stripping Slope에서 러팅 깊이가 증가하는 기울기는 이전 구간들에 비해 현저하게 큼(Pavement Interactive, 2011)



<그림 3-7> HWTT 결과 그래프 (Pavement Interactive, 2011)

- HWTT 결과에 있어, 본 연구에서 개발된 F-DGM과 F-SMA는 기준 훨 통과 횟수인 20,000회를 통과했음에도 12.5mm에 도달하지 않은 것을 알 수 있었음
- Fiber를 배제한 F-PFC는 통과횟수 8,700회로 기준에 미달하였으며, 수분 민감성 및 혼합물 내 Fiber 분산성을 향상시킨 F-PFC(C1\*) 배합을 사용한 결과 기준치 10,250회로 기준대비 28% 증가하여 기준치 10,000회를 통과하였음
- 기존 DGM 및 SMA 대비 개발된 F-DGM과 F-SMA는 각각 185%, 65% 이상 우수한 러팅 저항성을 확인하였으며, 이는 아래 <표 3-5>와 같이 나타남

&lt;표 3-5&gt; HWTT를 통한 각 혼합물의 압밀지점 및 박리지점

혼합물 종류	압밀지점	박리지점	12.5mm
훨 통과 횟수	밀입도	400	7350
	SMA	360	14400
	F-DGM(A)	940	12600
	F-DGM(B)	340	5250
	F-DGM(C)	1050	>20000
	F-PFC(C1)	860	7000
	F-PFC(C1*)	1000	10250
	F-SMA	820	>20000

- 첨가제에는 소석회(Hydrated lime), 수경성 시멘트(Hydraulic cement), 액상 박리방지제 등이 있음
- 소석회와 수경성 시멘트의 경우 혼합물의 1~1.5%, 액상 박리방지제의 경우에는 아스팔트 바인더 중량의 0.3~0.5%를 사용하는 것이 적절함
- F-PFC와 같은 배수성 아스팔트 혼합물에서 혼합물의 내구성 향상, 혼합물의 수평 저항성능 향상에 따른 러팅 저항성 개선, 아스팔트와 골재 간 결합 성능 등을 향상시킬 수 있는 장점을 지닌 셀룰로오스 파이버를 혼합물의 보강재로 사용(Peltonen, 1991) (Putman, 2011)
- 셀룰로오스 파이버의 적용 시, 분산이 잘되게 하여 고 흡수성과 큰 비표면적을 지닐 수 있게 하는 것이 매우 중요하며 파이버의 분말함량을 높인 재료를 사용함으로써 혼합물 내에서 파이버의 분산성향상을 기대함
- 기존의 셀룰로오스 파이버는 <표 3-6>과 같이 XX사의 셀룰로오스 파이버와 분말로 구성된 A 제품이며, 분산성의 향상을 위해 B 제품을 채택하여 사용

&lt;표 3-6&gt; 실험에 적용한 셀룰로오스 파이버 제품 물성 비교

물 성		A 제품	B 제품
Cellulose content		80%	50%
Average fibre length		1000um	1000um
Average Fibre Thickness		45um	45um
Bulk Density		25~45g/l	50~90g/l
Residue on ignition		18%	50%
pH-value (5g/100ml)		7.5±1	7.5±1
Sieve analysis	500um	max.5%	—
	300um	max.10%	max.20%
	32um	50~80%	max.90%

## 다. Overlay Test (OT)

### 1) 장비 개발

- OT는 노후 콘크리트 포장의 줄눈 또는 균열부에서 아스팔트 덧씌우기를 적용했을 때 발생하는 반사균열을 모사하기 위해 개발되었으나 현재는 아스팔트 덧씌우기 재료의 균열 저항성을 평가하기 위해 개선되고 있음
- 텍사스 주의 경우 TTI에서 개발 한 본 장비를 이용하여 실제 포장에 나타나는 균열을 모사하고 아스팔트 혼합물의 반사균열 저항성을 평가하며 시험 방법은 Tex-248-F의 기준을 따름
- 기존의 TTI OT 실험 장비는 3차원 하중을 경험하는 포장의 다양한 하중 조건을 모사하기 어렵고, 수평방향의 슬래브 거동만 모사할 수 있다는 점에서 한계가 있음
- 전단 및 휨에 의한 균열을 나타내지 못한다는 점과 더불어 반복성이 떨어진다는 단점이 존재하기 때문에 이를 보완하기 위해 1차년도 연구에서는 장비에 대한 제원, 장단점 분석을 통해 자체 제작 방향을 결정 한 후 기본 설계를 실시하였음
- 2차년도에는 기존 장비의 장점을 살리고 단점을 개선할 수 있는 HOT(Heart Overlay Testor)의 실시 설계 및 시제품을 제작하였으며, 3 차년도에서는 x,y,z축의 3차원 포장 거동을 평가하고 다양한 온도에서의 균열 저항성을 평가함

- <표 3-7>은 기존 TTI 장비와 개발 Heart 장비의 설계 제원을 비교했는데, 본 연구에서 개발한 Heart 장비의 경우 더 다양한 시편크기의 평가가 가능하도록 플레이트 크기를 확대하였고, 온도 범위를 -20~80°C까지 조절 가능하게 하여 극한 기상 상태에 대한 평가를 가능하게 했음
- 하중의 형태 또한 기존 모드에 sine, circular 모드를 추가 및 조합을 가능하게 하여 더욱 다양한 하중 상태를 모사할 수 있게 하였으며, 재하 속도 역시 3Hz까지 설정이 가능해 피로 모사 성능이 더욱 향상되었음
- x축 이외에도 y축, z축 및 이들의 조합에 대한 실험이 가능하게 하여 전단 및 휨에 의한 거동 또한 모사를 할 수 있게 설계되었음
- x축에 대한 실험으로 시제품을 제작하여 TTI Overlay Test와 동일한 기준으로 시험을 진행하여 결과를 검토하였으며 기존의 실험 결과의 반복성이 떨어졌던 하중 감소법을 대체할 방법으로 카메라 설치를 통해 이미지 프로세싱으로 균열 진전을 관찰하여 파손에 대한 정의를 하였음

&lt;표 3-7&gt; 기존 TTI 장비와 개발 장비의 제원 비교

	Heart Overlay Tester	TTI Overlay Tester
Specimen Size (mm)	150 x 75 x variable	150 x 75 x variable
Plate Dimensions (mm)	170 x 170 x 20	300 x 150 x 13
Temperature (°C)	-20 ~ 80	0 ~ 25
Opening displacement (mm)	0~2	0~2
Loading rate (per cycle)	0.3 ~ 100 sec	10 ~ 600 sec
Load Cell Capacity (kN)	25	25
Interval	variable	0.1
Testing axis	x, y, z, combination	x only
Loading Control Type	Displacement or Torque mode	Displacement mode
Waveform Type	Cyclic triangular and constant displacement or a combination	
	sine, circular	N/A
Initial Separation of Plate (mm)	variable	2mm
Vertical movement of sample	TBD	N/A

## 2) Round Robin Test

- 기존 TTI OT와의 장비 성능 검증을 위해 동일한 혼합물 및 실험 방법을 적용하여 OT 반복 횟수에 대해 비교분석을 실시
- 그 결과는 <표 3-8>에 나타낸 것과 같으며, TTI OT 결과 평균 초기 하중 1028lb, 최종 하중 44.3lb, 하중 감소율 95.7%, 반복 횟수 7.7회를 나타낸 반면 Heart OT의 경우 평균 초기 하중 1458lb, 최종 하중 394.5lb, 하중 감소율 72.65%, 그리고 300회의 반복횟수를 나타냄
- Heart OT에서 TTI OT에 비해 평균 초기 하중 430lb, 하중 감소율 23%, 반복횟수 292.3회의 차이를 보여주었고 초기 개발 장비가 텍사스와 다른 거동을 하고 있음을 알 수 있었음
- 비록 텍사스 실험 방법 자체가 변동성이 크고 텍사스 도로국의 실험실에서 제작한 밀입도와 결과를 공수 받아 비교 실험한 것이라서 어느 것이 절대적으로 합리적이라고 주장할 수는 없어 상대 평가를 실시하였음
- 장비의 절대적 결과에 대한 신뢰를 위해서는 온도 및 하중 조화에 따른 정확한 FEM 해석 및 계측이 필요해 보이나 우선 장비의 오차 부분을 조정하기로 판단하고 수정 작업을 진행

&lt;표 3-8&gt; TTI OT와 Heart OT Round Robin Test 결과

샘플	초기하중 (lb)	최종하중 (lb)	하중감소 (%)	파괴 시 반복횟수 (#)	장비
A-1	1017	35	96.6	6	TTI OT
A-2	1025	53	94.8	9	
A-3	1042	45	95.7	8	
A-4	1091	313	71.3	> 300	Heart OT
A-5	1825	476	74	> 300	

- 플레이트에 시편 부착 시, <그림 3-8>에 나타낸 것과 같은 로드 셀 위치와 시편 부 위치 사이에 에너지 손실이 발생하여 입력 변위와 실제 변위 값 사이에 오차가 발생함을 확인
- 이에 대한 보정을 위하여 변위 보정 시험을 실시하였으며 그 결과는 <표 3-9>에 나타낸 것과 같고, 이를 통해 손실을 줄일 수 있도록 로드 셀 부품 일부를 변경하였으며 로드 셀 변위 값과 실제 변위 값을 동일하게 맞추는 보정 작업 역시 수행함

- 또 다른 문제점은 3축으로 시험 장비를 구성하는 과정에서 발생되었음
- 구체적으로는 실험 후 시간에 대한 변위 및 하중 그래프를 확인한 결과 X 축 실험 시 Z축으로도 변위 및 하중이 발생함을 확인하였고, 변위 및 하중이 분산되어 하중의 손실을 유발함을 의미
- 비록 한축으로 만 변위를 제어하고 있다고 판단하였지만 Z축으로 움직임이 발생하는 형태임을 알 수 있었고, 이를 개선하기 위해 Z축 로드 셀에 고정 가이드를 설치하고 일방향 실험을 진행하는 것으로 개선하였음
- 이를 통해 X축 방향의 0.3% 이내의 크기로 변위 손실을 최소화하였음

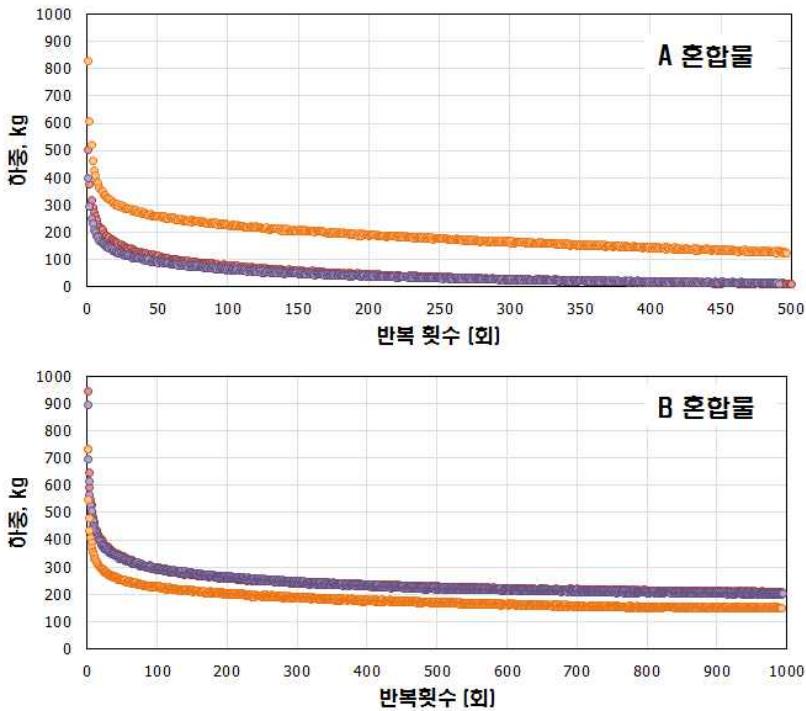


<그림 3-8> Heart OT 로드 셀에서의 변위 오차

<표 3-9> 변위 보정 실험 결과

항 목	로드 셀 변위(mm)	실제 변위(mm)
시편 미 부착	0.64	
시편 부착	0.2	0.12
	0.4	0.24
	0.6	0.36
	0.8	0.50
	0.9	0.65

- 장비 보정 이후 Heart OT의 반복성 검토 실험을 실시하였으며, 서로 다른 두 종류의 아스팔트 혼합물 각각 3개의 시편에 대해 실험을 진행하여 변동 계수 비교를 통해 장비의 반복성을 확인
- <그림 3-9>는 반복성 검토 실험 결과를 반복횟수 vs 하중 그래프로 나타내어 비교한 것이며, 이를 통해 3개 중 1개의 시편에서 상대적으로 큰 편차가 발생되는 것을 확인할 수 있음

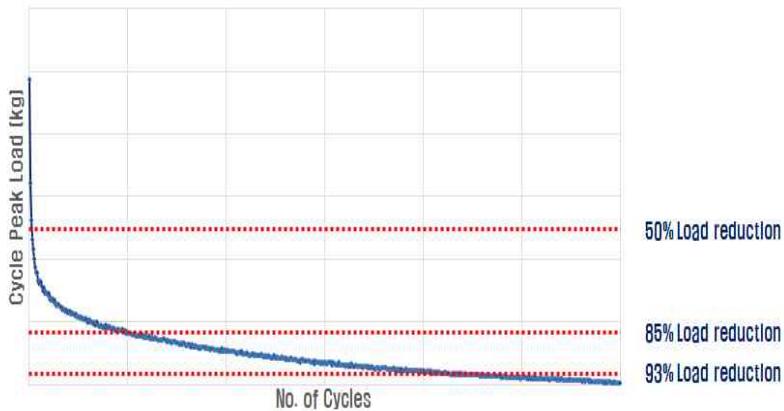


<그림 3-9> Heart OT 반복성 검토 실험 결과

- 실험 결과에 대한 변동계수 값을 비교하여 나타낸 것으로 우선 A 혼합물의 경우 3개 시편의 결과를 모두 고려할 때 41.1%의 비교적 높은 변동계수를 나타낸 반면 편차가 큰 1개 시편의 결과를 제외한 나머지 2개 시편의 결과만을 고려할 때에는 반복횟수에 따른 하중 값이 비슷한 패턴을 나타내었음
- B 혼합물의 경우에는 모든 시편에서 1000회 이상의 반복횟수를 보여 변동 계수를 통한 비교가 불가능했고, 이를 통해 3번의 실험으로는 결과의 변동 성에 문제가 있을 수 있음을 확인하고, Heart OT 역시 TTI OT의 기준과 동일하게 5개의 시편에 대해 실험을 실시하여 그 중 반복성이 우수한 최적 3개의 결과를 사용하는 것으로 제안함
- 이미지 프로세싱을 이용하여 파손의 형태 및 위치 조사를 실시하여 예전시 부착 부 혹은 다짐 불량에 의한 원인 규명 및 합리적인 시편 선정 실시

### 3) TTI OT 반사균열 분석 방법 적용 결과

- 선정된 세립도 혼합물 (이하 Heart F-DGM, F-PFC, F-SMA)에 대해 HOT 시험을 진행하였으며, 실험 온도는 25°C, 그리고 최대개구변위는 현장 계측을 통해 제안한 기준인 0.7mm CRCP, 1.1mm JCP의 평균값인 0.9mm를 적용
- TTI OT의 분석 방법을 적용하여 각 혼합물의 반사균열 저항 특성을 평가 하였으며 이는 <그림 3-10>에 나타낸 것과 같음



<그림 3-10> TTI OT 분석 방법

- 기본적으로 Tex-248-F 기준인 93% 하중감소 법을 평가하였으며 이외에도 변동성이 개선된다고 보고된 85% 하중감소 및 추가적으로 50% 하중감소에 대한 OT 반복횟수 결과를 비교 검토
- 5개 시편에 대해 시험을 실시하였으며 그 중 유사한 결과를 보이는 3개의 결과를 사용하였고, 분석 시에는 각 혼합물간 초기 하중, 반복횟수, 그리고 반복횟수에 대한 변동계수(COV)를 비교
- 변동계수 통과 기준은 30%를 적용하였으며 (Walubita, 2012) 1000회의 반복횟수를 초과한 경우에는 보간법(Interpolation)을 통해 결과를 도출
- <표 3-10>은 TTI OT 분석 방법을 적용한 Heart 세립도 혼합물의 선정된 최적 3개 시편에 대한 OT 시험 결과를 요약한 것으로 하중감소율 93%, 85%, 그리고 50%에서의 피로 반복 횟수를 이용하여 분석

<표 3-10> Heart 세립도 혼합물 Heart OT 시험 결과 (TTI OT 분석 방법)

혼합물 종류	Heart F-DGM			Heart F-PFC			Heart F-SMA			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
초기 하중 (kg)	1011	1071	903	465	512	513	1127	1124	1022	
반복 횟수 (회)	93% 하중 감소	968	>1000 (2073*)	>1000 (1598*)	474	407	296	114	320	210
	85% 하중 감소	324	>1000 (984*)	653	112	167	110	21	95	64
	50% 하중 감소	7	7	6	4	4	4	5	4	

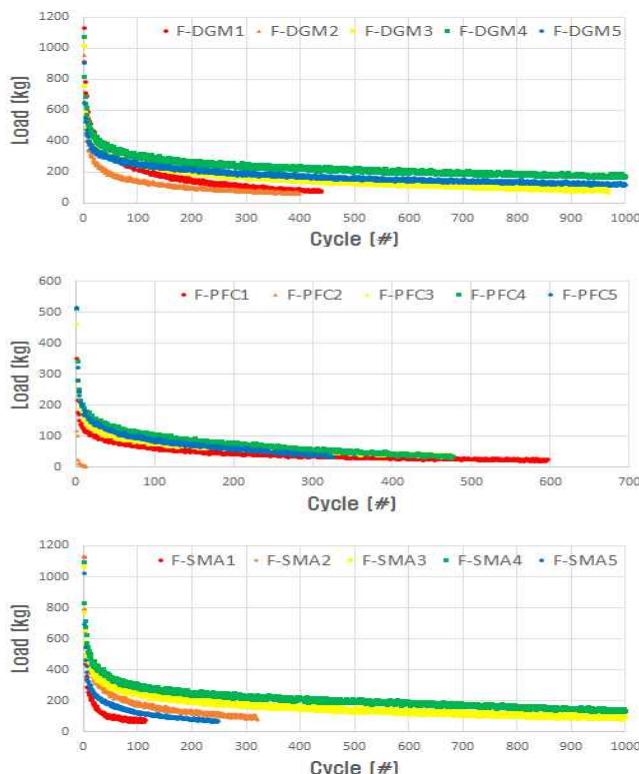
- 평균 초기 하중의 경우 F-DGM 994.8kg, F-PFC 496.7kg, F-SMA 1090.9kg으로 F-SMA > F-DGM > F-PFC 순의 결과를 보였으며 변동계수에 있어서는 F-DGM 8.5%, F-PFC 5.6%, F-SMA 5.5%로 모든 혼합물에서 30% 이하의 우수한 변동성을 나타냄
- 50% 하중감소 시 평균 반복횟수는 F-DGM 6.7회, F-PFC 4회, F-SMA 4.3회로 나타나 F-DGM > F-SMA > F-PFC 순의 결과를 보였으며, 변동계수의 경우에는 F-DGM 8.66%, F-PFC 0%, F-SMA 13.3%의 결과를 보여 초기 하중과 마찬가지로 모든 혼합물에서 우수한 변동성을 확인
- 85% 하중 감소 시 평균 반복횟수는 F-DGM 654회, F-PFC 130회, F-SMA 60회로 F-DGM > F-PFC > F-SMA 순의 결과를 보였으나 변동계수의 결과가 F-DGM 50.48%, F-PFC 24.95%, F-SMA 61.94%로 F-PFC만 기준을 통과하였고 F-DGM 및 F-SMA에서는 기준에 비해 큰 차이로 높은 변동성을 확인
- 마지막으로 93% 하중감소 시 평균 반복횟수 및 변동계수를 비교한 것이다. 이 때 평균 반복횟수는 F-DGM 1546회, F-PFC 392회, F-SMA 215회로 F-DGM > F-PFC > F-SMA의 순의 결과를 보였으며 변동계수의 경우 F-DGM 35.85%, F-PFC 22.91%, F-SMA 48.02%로 앞서 85% 하중감소 시와 마찬가지로 F-PFC에서만 기준을 만족시키는 것을 알 수 있었음
- 그러나 F-DGM 및 F-SMA에서도 85% 하중감소 시에 비해서는 변동계수가 낮아져 기준을 상회하는 것을 확인할 수 있었음
- TTI OT의 기준을 적용한 분석 결과, 변동성에 있어서는 시험 초기인 50% 하중 감소 시에 가장 우수한 결과를 보여주었으며 시험 중반부인 85% 하중 감소 시에 가장 좋지 않은 결과를 나타냄
- 반면 Tex-248-F 기준인 시험 종반부 93% 하중 감소 시 양호한 변동성을 보여주었으며, 반복횟수는 F-DGM이 가장 높은 결과를, 그리고 F-SMA와 F-PFC의 경우 시험 초기에는 F-SMA, 이후에는 F-PFC가 각각 상대적으로 높은 결과를 나타냄
- 아래 <표 3-11>은 하중감소율을 반영하여 반사균열 시험 평가 결과를 나타내며 HWTT 20,000회에서 러팅 깊이가 1.82mm에 불과했던 F-SMA에서 기준 반복 횟수 300회를 통과하지 못한 것으로 나타나 하중 감소율 평가 방법 이외의 이미지 프로세싱을 이용한 평가 방법을 제안

<표 3-11> 하중감소율을 적용한 Overlay Test 결과

혼합물 종류	기준	반복 횟수 (회)	판정
DGM	>300회	543	Pass
F-DGM(C)		1000	Pass
F-PFC(C1*)		555	Pass
F-SMA		215	Fail

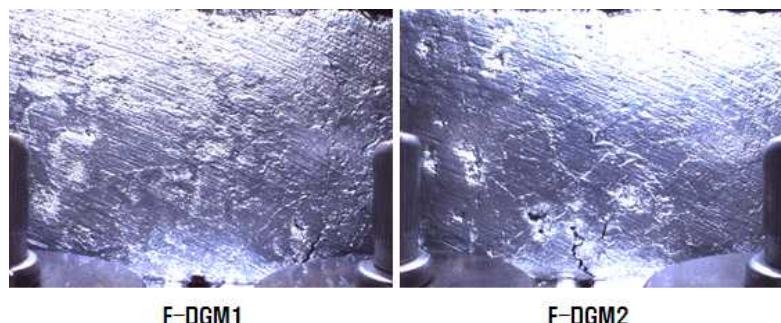
#### 4) 이미지 프로세싱을 이용한 분석 및 평가 방법

- 기존의 TTI OT 분석 방법을 적용한 결과, 각 혼합물들이 일관되지 않은 반복횟수를 나타냄
- 변동계수 역시 일부 혼합물에서 높게 나타나는 것을 확인하였고, 이에 대해 실제 균열 거동 양상에 따라 각 시편들의 반복 횟수가 어떠한 차이를 나타내는지에 대해 확인하고자 하였으며, Heart OT의 이미지 프로세싱을 통해 이를 검토
- <그림 3-11>은 각 혼합물의 HOT 시험 결과를 반복횟수 vs 하중 그래프로 나타낸 것으로 그 결과 하중이 급격하게 떨어지거나 반복횟수가 적은 경우 균열 진전 패턴이 다름을 알 수 있었음

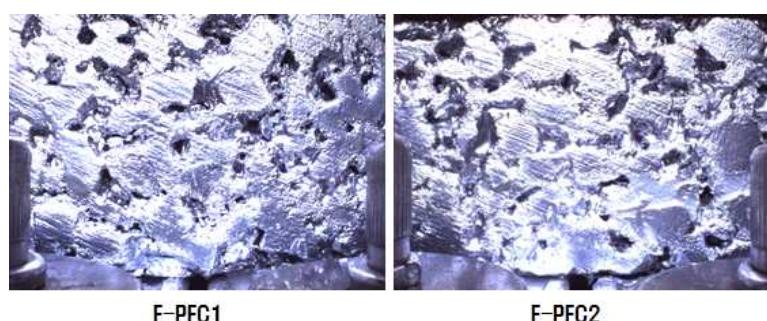


<그림 3-11> 각 혼합물의 Heart OT 시험 결과 (반복횟수 vs 하중)

- 기 실험한 결과를 통해 분석된 균열이 불연속면에서 발생하는 그룹과 다른 그룹으로 구분이 가능하였으며, F-DGM 1번과 2번 시편, F-PFC 1번과 2번 시편, 그리고 F-SMA은 1번, 2번 및 3번 시편이 이외의 시편과 서로 다른 양상을 나타냄
- 이는 <그림 3-12>부터 <그림 3-14>에 나타낸 것과 같으며 반복횟수에서 급격한 차이를 보인 시편들에서 균열 진전 패턴이 다름을 알 수 있었음
- 우선 F-DGM 1번과 2번 시편에서는 균열이 불연속면에서 발생되지 않거나 균열이 진전되지 않은 모습이 확인되었고, 굵은 골재 함량이 상대적으로 많은 F-PFC 및 F-SMA에서는 균열이 진전되지 않는 현상 이외에도 2개 이상의 균열이 발생되거나, 또는 플레이트와 시편을 부착한 에폭시 간의 전단 현상이 발생되기도 한다는 것을 확인
- 이러한 경향을 나타내는 시편의 경우에는 정상적인 시편에 비해 상대적으로 낮거나 높은 반복횟수를 나타냄
- 실험 후 이미지 프로세싱 확인을 통해 균열 거동 양상에 문제를 띠는 실험 결과를 제거하는 필터링 과정을 거친다면 5개의 시편 가운데 예측 균열 발생구간(시편의 가운데 부분)에서 균열이 발생하여 평가 가능한 시편 3개를 선정하여, 기준에 비해 우수한 변동성 결과를 기대할 수 있고, 더욱 명확하게 혼합물간 반사균열 저항성을 비교 평가할 수 있음



<그림 3-12> 이미지 프로세싱을 통한 Heart OT 시편 문제점 확인 (F-DGM)



<그림 3-13> 이미지 프로세싱을 통한 Heart OT 시편 문제점 확인 (F-PFC)



&lt;그림 3-14&gt; 이미지 프로세싱을 통한 Heart OT 시편 문제점 확인 (F-SMA)

- 아래 <표 3-12>는 이러한 이미지 필터링 후 선정된 시편에 대한 Heart OT 시험 결과를 요약한 것으로 F-DGM과 F-PFC의 경우에는 기준과 동일한 시편들이 선정되어 반복횟수와 변동계수 결과 역시 기준과 동일하게 확인
- 반면, F-SMA의 경우에는 서로 다른 시편이 선정되었으며 이에 대한 TTI OT 기준을 적용한 경우, 평균 1446회 반복횟수, 14.53% 변동계수로 기준의 215회 반복횟수, 48.02%의 변동계수에 비해 우수한 반복성을 나타냄
- 이를 통해 이미지 필터링을 통한 시편 선정 시 F-DGM > F-SMA > F-PFC의 일관된 반사균열 저항성 경향을 나타내었고 변동성 역시 우수하게 나타남을 확인

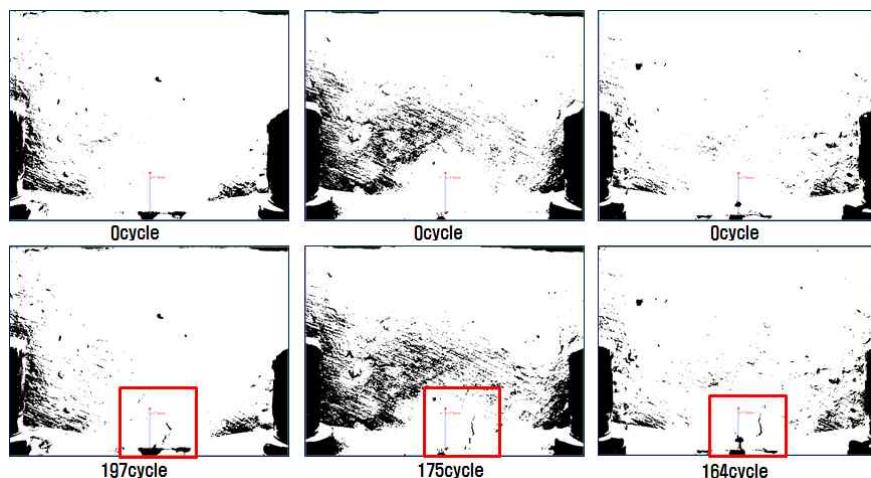
&lt;표 3-12&gt; 이미지 필터링 후 Heart 세립도 혼합물 Heart OT 시험 결과

혼합물 종류	Heart F-DGM			Heart F-PFC			Heart F-SMA	
	3	4	5	3	4	5	3	4
초기 하중 (kg)	1011	1071	903	465	512	513.3	1092	1062
이미지 필터링 후 93% 하중 감소 시 반복횟수 (회)	968	>1000 (2073*)	>1000 (1598*)	474	407	296	>1000 (1594*)	>1000 (1297*)
반복횟수 평균 (회)	1546			392			1446	
반복횟수 변동계수 (%)	35.8			22.9			14.5	

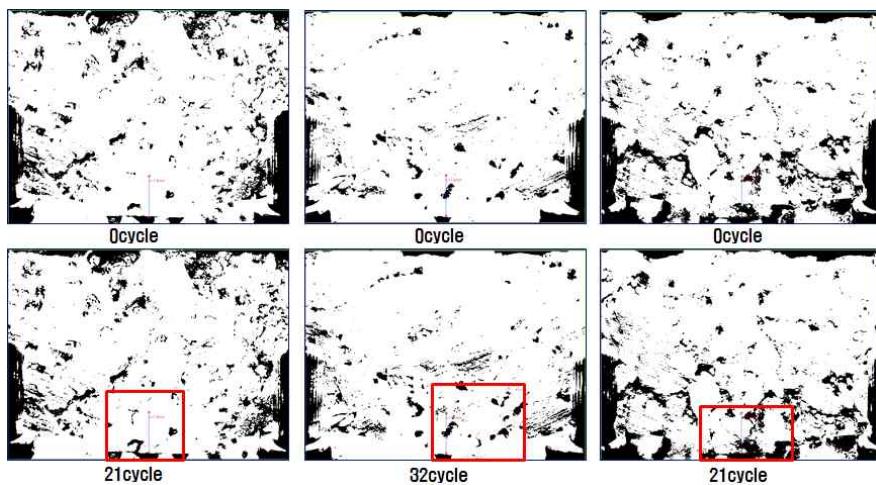
- 이미지 프로세싱 기법을 도입하여 균열 발생 초기의 반복횟수와 하중 감소율 결과를 비교 분석 실시
- 분석 시점인 균열 발생 초기는 균열이 발생하여 시편 높이의 20% 지점까지 진전되었을 때로 정의하였으며, <표 3-13>은 균열 발생 초기 분석 방법을 적용했을 때 각 세립도 혼합물의 반복횟수에 대한 시험 결과를 요약한 것임
- <그림 3-15>부터 <그림 3-17>은 각 혼합물 시편에서 균열이 시편 높이의 20% 지점까지 진전되었을 때의 균열 거동 상태와 반복횟수를 나타낸 이미지 프로세싱 결과를 보여줌

<표 3-13> 균열 발생 초기 Heart 세립도 혼합물 Heart OT 시험 결과

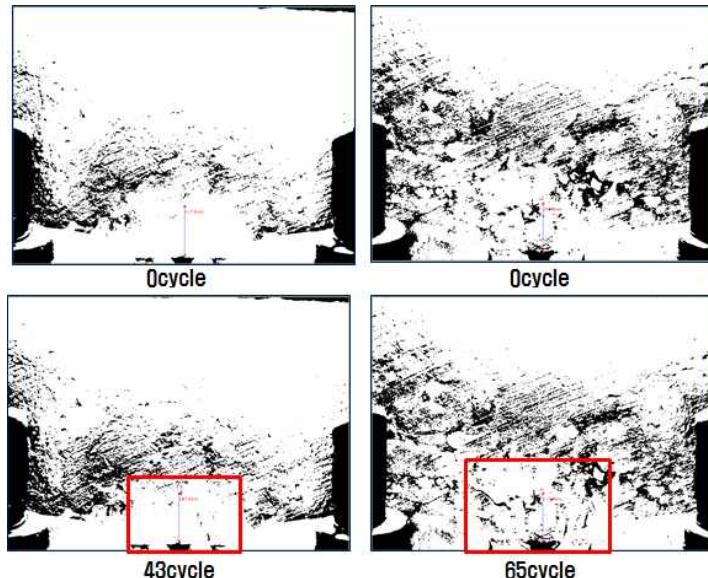
혼합물 종류		Heart F-DGM			HeartF-PFC			HeartF-SMA	
		3	4	5	3	4	5	3	4
균열 초기	반복 횟수 (회)	197	175	164	21	32	21	65	43



<그림 3-15> Heart F-DGM 이미지 프로세싱 결과



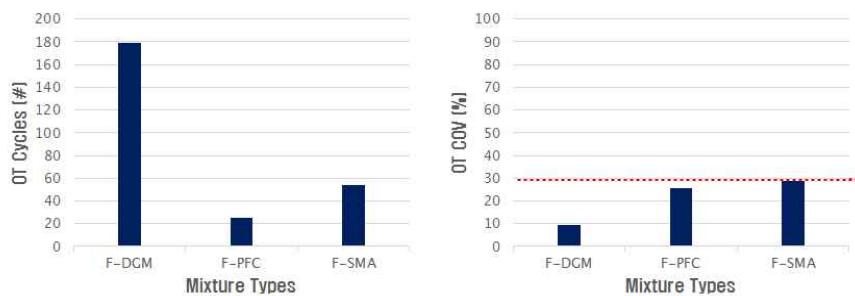
<그림 3-16> Heart F-PFC 이미지 프로세싱 결과



<그림 3-17> Heart F-SMA 이미지 프로세싱 결과

- <그림 3-18>은 균열 발생 초기 각 혼합물의 평균 반복횟수 및 이에 대한 변동계수를 그래프로 비교한 것으로 평균 반복횟수는 F-DGM 179회, F-PFC 25회, F-SMA 54회로 나타남을 확인하였음
- 변동계수는 F-DGM 9.4%, F-PFC 25.7%, F-SMA 28.8%로 모든 혼합물에서 기준 이하의 낮은 변동성을 보였음
- 이미지 프로세싱을 통한 균열 발생 초기 (시편 높이 20%) 반복횟수를 비교 분석할 경우, 우수한 변동성을 나타내며 경향 역시 93% 하중감소 시 반복 횟수를 적용한 결과와 동일하게 나타남을 확인

- 기존 TTI OT 분석 방법 적용 시에는 본 연구 시 적용한 방법인 Heart OT Vision 부를 통해 시편 필터링을 실시하며, 또한 변동성 검토 및 경향의 검증을 위해 균열 발생 초기 반복횟수 결과를 함께 고려하는 것을 최적의 HOT 분석 방법으로 제안
- <표 3-14>는 다양한 균열 피로 시험의 변동계수를 비교하여 나타낸 것이며, 그 결과 기존 균열 피로 시험에 비해 HOT의 변동성이 상대적으로 우수함을 확인



<그림 3-18> Heart 세립도 혼합물 반복횟수 및 변동계수 (균열 발생 초기)

<표 3-14> 다양한 균열 피로 시험의 변동계수 비교 (SHRP, 1994, Walubita, 2012)

Testing Method	Flexural Beam Fatigue	Flexural Trapezoidal Fatigue	Diametral Fatigue	TTI OT (93% Load Reduction)	Heart OT (93% Load Reduction)	Heart OT (Initial Crack)
COV (%)	98.7	171.8	65.5	4~60	24.4	21.3

### 5) 최적 배합 선정 결과 요약

- F-DGM의 경우 HWTT와 OT 기준을 양호하게 통과하여 향후 JCP 위 암은 덧씌우기로 적용 가능
- F-PFC는 CRCP에 F-DGM과 함께 투수 등의 기능성을 목적으로 하여 적용 가능하지만 JCP에 직접적으로 적용은 불가함
- F-SMA는 매우 홀륭한 러팅 저항성을 나타냄과 동시에 반사균열 기준치를 만족하였으며, F-DGM과 함께 러팅 예방 목적으로 적용 가능함
- 아래 <표 3-15>는 최적 배합 선정 기준 및 평가 결과 요약을 나타냄

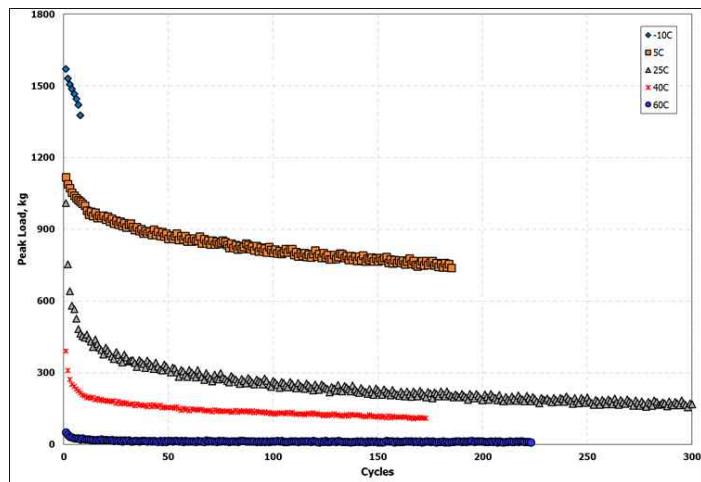
&lt;표 3-15&gt; CRCP 위 얇은 아스팔트 덧씌우기를 위한 최적 배합 선정 요약

혼합물 종류	바인더 등급	Gmm	OAC(%)	공극률(%)	VMA(%)	다짐횟수	HWTT (회)	OT (회)
F-DGM	기준	PG76-22	N/A	5.5 이상	4.0 이하	16.5 이상	50 Gyration	>20,000 >300
	결과	PG76-22	2.387	7.5	4.1	20.9	50 Gyration	>20,000 (10.6mm) >1,000
F-PFC	기준	PG76-22	N/A	6.0 이상	22~26	N/A	50 Gyration	>10,000 >300
	결과	PG76-22	2.437	6.0	21.8	N/A	50 Gyration	10,250 (12.5mm) 392
F-SMA	기준	PG76-22	N/A	6.0 이상	3.5 이하	16.5 이상	100 Gyration	>20,000 >300
	결과	PG76-22	2.419	6.8	3.0	18.6	100Gyration	>20,000 (1.9mm) >1,000

## 2. HOT 추가 시험

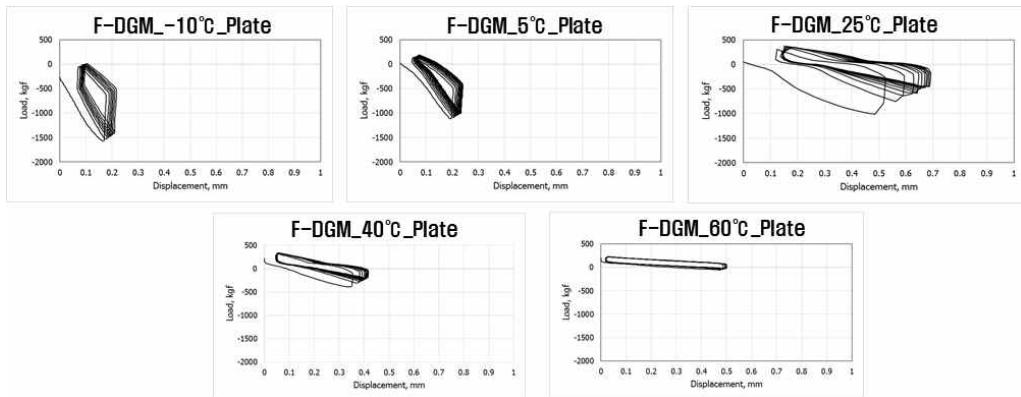
### 가. 다양한 온도에서의 HOT 평가

- 아스팔트 콘크리트의 거동에 있어서 온도는 매우 민감하게 반응하지만, 기존 TTI OT에서는 0~25°C 범위에서 반사균열 모사가 가능
- 개발된 HOT를 이용하여 -10°C부터 60°C까지의 균열 저항성 모사 및 평가를 실시한 결과 아래 <그림 3-19>와 같이 온도가 낮을수록 높은 하중을 견딜 수 있으나 반복하중에 대한 균열 저항성은 떨어지는 것을 알 수 있음



&lt;그림 3-19&gt; 다양한 온도에서 반복횟수에 따른 최대 하중 분포

- 아래 <그림 3-20>은 낮은 온도에서 탄성적인 거동을 보이는 반면에 온도가 60°C까지 올라가면, 변위가 큼에도 불구하고 하중의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있으며, 하중의 크기 역시 매우 작은 것을 발견하였음



<그림 3-20> 제어된 온도에서의 변위 하중 그래프

#### 나. 다양한 축 방향 하중에서의 HOT 평가

- x축 방향 피로 모사만이 가능했던 기존 TTI OT의 방식과는 다르게 본 연구에서 개발된 HOT 3차원 모사 시험을 진행하기 위해 FEM 구조해석을 실시하였음
- 아래 <표 3-16>에서 보이는 바와 같이 y 및 z축에서 x축에 비해 매우 작은 응력을 확인할 수 있었으나, xz와 xyz축 방향 하중 조합 시에 응력이 더 큰 것을 알 수 있었고, 이는 x축 방향 하중은 초기 균열을 발생시키며, y,z 방향 하중이 균열의 확장 속도에 영향을 주는 것을 알 수 있음
- xz축 방향에서 96.70MPa로 오직 x축 방향에서의 응력 90.64MPa 보다 약 6MPa 정도의 차이로 다소 작은 응력차를 보이지만, x축에서 최대 응력이 시편 모서리부에 응력이 집중되어 있는 반면에 xz축에서는 시편 하부 전체에 전체적으로 응력이 분포하고 있음

<표 3-16> 다양한 축하중에 대한 FEM 구조해석 결과표

Loading	Max. Prin. Stress	Stress Contour	Deflection Contour (X axis)
X-Axis	90.64 MPa (모서리부에 응력이 집중)		
Y-Axis	25.51 Mpa		
Z-Axis	23.33 MPa		
XZ-Axis	96.70 Mpa (하부 전체에 응력이 분포)		
XYZ-Axis	105.70 Mpa (하부 전체에 응력이 분포)		

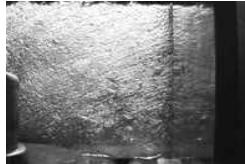
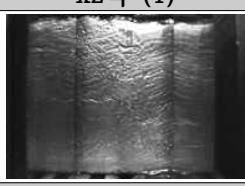
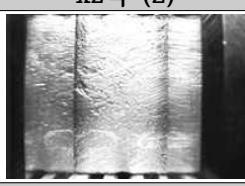
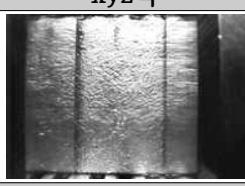
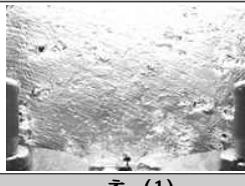
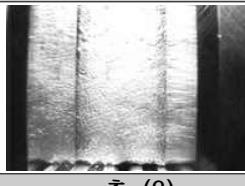
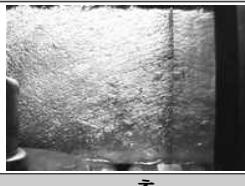
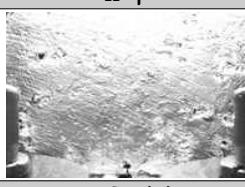
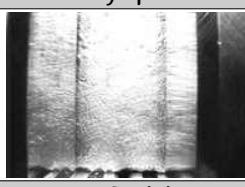
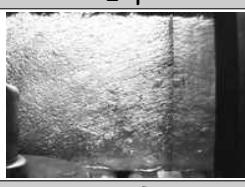
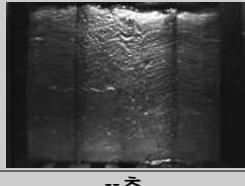
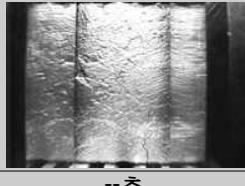
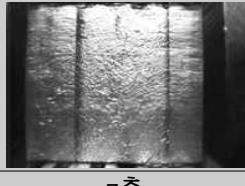
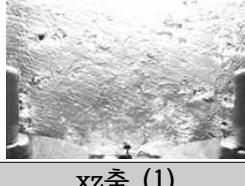
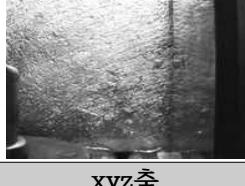
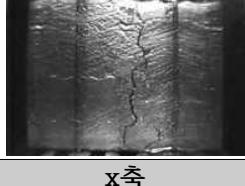
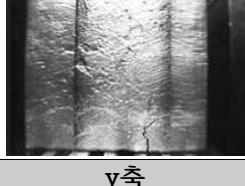
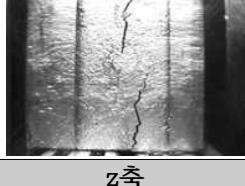
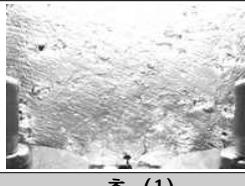
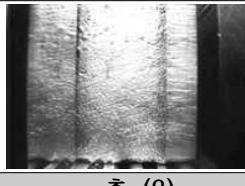
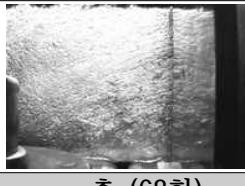
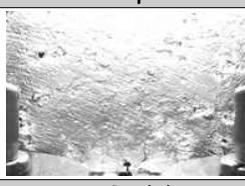
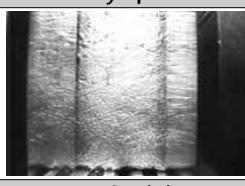
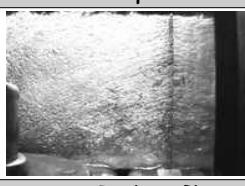
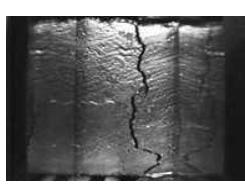
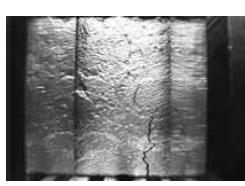
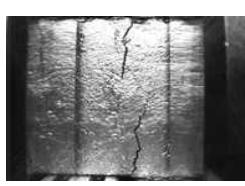
- FEM 구조해석 결과를 바탕으로 HOT 장비를 이용하여 다양한 축 하중에 대해 F-DGM 시편을 이용하여 실험을 진행하였으며, 하중 재하 모드는 아래 <표 3-17>과 같이 6가지로 적용하여 결과를 비교하였음

&lt;표 3-17&gt; 다양한 축 방향 하중 재하 모드 및 목적

모드	플레이트 거동	연구 목적
X-Axis	$\rightarrow\leftarrow$	환경 하중에 의한 수평방향 거동
Y-Axis	$\swarrow\searrow$	굽은길혹은 공항포장에서의 Y축 거동 모사
Z-Axis	$\downarrow\uparrow$	교통 하중에 의한 처짐 및 전단
XZ-Axis(1)	$\rightarrow\leftarrow\downarrow\uparrow$	환경 및 교통하중 통합형 거동 고려 및 실제 포장 거동 확인
XZ-Axis(2)	$\rightarrow\downarrow\leftarrow\uparrow$	
XYZ-Axis	$\rightarrow\downarrow\swarrow\searrow$	

- HOT 시험 결과 반복횟수 100회에서 x축만 균열이 발생하였고, y와 z축은 균열이 발생하지 않아 FEM 해석과 마찬가지로 x축 방향 하중은 초기 균열 발생을 유도하고, y와 z축 방향 하중은 균열 확장에 영향을 미치는 것을 확인
- 다중 하중 적용에서는 x축 방향 하중에 의한 초기 균열 발생과 함께 그 외의 축 방향 하중에 의해 균열 확장이 가속화됨
- 아래 <표 3-18>은 각 하중 재하 모드에 따른 균열 발생 정도를 이미지 프로세싱을 통해서 분석하였으며, 모든 모드의 반복횟수 0회, 30회, 60회, 그리고 100회에 대해서 이미지 프로세싱을 한 결과임
- 30회에서 x축의 경우 미세한 균열이 발생하였으며, xz축 및 xyz축 등의 통합형 모드의 경우 시편 상단까지 얇은 균열이 발생한 것을 확인하였음
- 60회 이상에서는 모든 통합형 모드에서 육안으로 명확하게 균열이 확인이 되며, 이로써 FEM 구조해석을 통해 도출된 y축과 z축이 균열 성장에 가속화를 유발하는 것을 확인하였음
- 기존의 균열 예측 모델에 적용된 실내 실험 방법은 x축 방향 반복 피로를 위한 OT, 노치시편에 인장 하중을 가하는 직접 인장 시험, 그리고 범 시편을 제작하여 피로 휨 응력을 가하는 반복 인장 시험으로 나뉨
- 본 연구에서는 기존의 OT에서 다차원 모드에서의 피로 시험을 통해 보다 실제 도로 포장의 거동을 모사하여 향후 합리적인 균열 확장 예측 모델을 개발할 수 있는 기술적 연구범위를 확장하였음

<표 3-18> 반복횟수 100회에서 다양한 하중 모드에서의 균열 양상

반복횟수	x축	y축	z축
0 회			
			
			
30 회			
			
			
60 회			
			
			
100 회			
			
			

### 3. 아스팔트 혼합물 기본 물성 시험

- 본 연구에서는 투수성 및 기능성 향상을 위해 도입한 F-PFC 혼합물 3개 시편을 이용하여 도로 포장용 배수성 아스팔트 혼합물의 골재 비산 저항성 평가로 칸타브로 마모저항성 시험을 실시하였음
- 다져지지 않은 개립도 아스팔트의 과잉 아스팔트 혼합물의 양을 결정 및 평가하기 위해 드레인 다운 시험을 실시하였으며, 본 연구에서는 섬유질함유로 인해 시험 방법 B를 채택하여 진행하였음
- 아스팔트 혼합물 배합의 수분 민감도를 상대 평가하기 위해 건조상태의 간접인장강도와 수분 포화 상태의 간접인장강도를 측정하여 TSR(Tensile Strength Ratio) 시험을 실시하였음
- 위의 3가지 기본 물성 시험 결과는 아래 <표 3-19>와 같음
- 칸타브로 마모시험의 경우 골재 손실률이 18.87%로 기준치인 20% 이내에 만족
- 드레인 다운 시험 역시 4개의 시편에서 모두 0.2% 이내의 결과 값을 얻었음
- TSR 수분 민감도 시험에서는 F-SMA가 건조 상태에서 F-DGM보다 높은 간접인장강도를 보였으나 간접 인장강도비의 경우 F-DGM은 기준값을 통과한 반면에 비교적 공극이 커 수분 함유량이 높은 F-SMA의 경우 74.7%로 기준을 만족하지 못했음

&lt;표 3-19&gt; 기본 물성 시험 정리

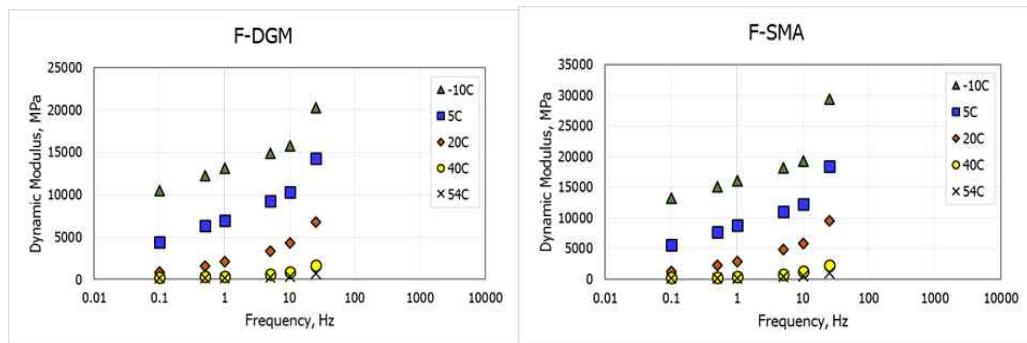
칸타브로 마모시험							
3개 시편	손실률(%)		기준(%)				
평균	18.87		평균 20% 이내				
드레인 다운 시험							
시료 구분	드레인 다운 양(%)			기준(%)			
D_1	0.20			0.2% 이내			
D_2	0.15						
D_3	0.19						
D_4	0.15						
TSR 시험							
아스팔트 혼합물 종류	Dry 평균 간접인장강도 (MPa)	아스팔트 혼합물 종류	Wet 평균 간접인장강도 (MPa)	간접 인장 강도 비	기준값		
F-DGM (3개 평균)	1.062	F-DGM (3개 평균)	0.854	80.4	80 이상		
F-SMA (3개 평균)	1.112	F-SMA (3개 평균)	0.831	74.7			

- 중요한 특성은 아스팔트의 동탄성 계수이며, 이는 온도와 하중 재하 주기에 따른 재료의 강도 특성을 나타내고, NCHRP 1-37A 설계 가이드에서는 표준 시험으로 채택되었으며, AASHTO TP62-07의 동탄성 계측을 위한 축 방향 압축시험법으로 표준화되었음
- 아스팔트 혼합물 시편의 동탄성 계수 마스터커브를 얻기 위해 아래 <표 3-20>과 같이 다양한 온도와 진동수에서 실험을 진행

&lt;표 3-20&gt; 아스팔트 동탄성 계수 실험 변수

실험 기준	온도 변화 갯수	실험 온도(°C)	실험 진동수 (Hz)
NCHRP 9-19	5	54.4, 37.8, 21.1, 4.4, -10	25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1
NCSU	3	35, 10, -10	25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1, 0.05, 0.01
본 실험	5	54, 35, 20, 5, -10	25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1

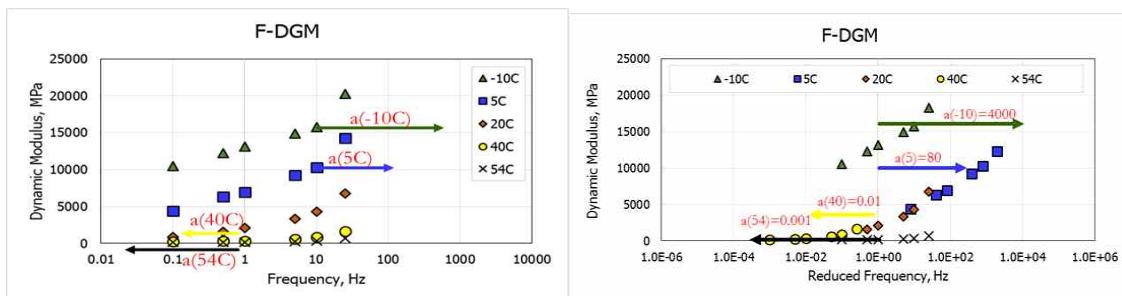
- 아스팔트 혼합물 F-DGM과 F-SMA의 진동수에 따른 동탄성 계수 값을 온도에 따라 도출해낼 수 있으며, 이는 아래 <그림 3-21>과 같이 표현됨



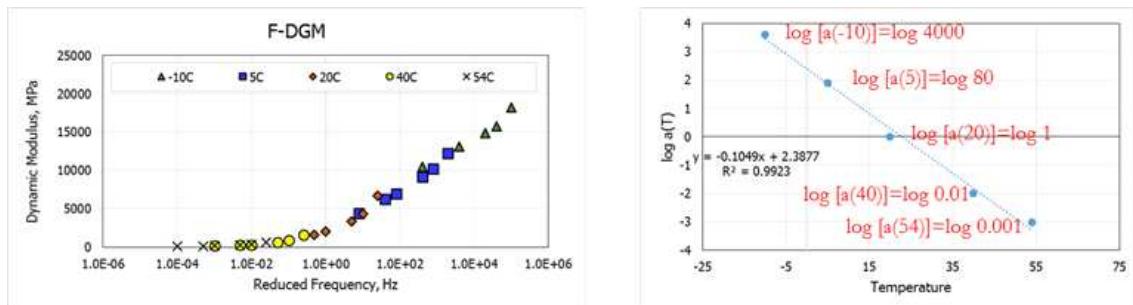
&lt;그림 3-21&gt; 혼합물 진동수 및 온도에 따른 동탄성 계수 그래프

- 위의 그래프를 이용하여 마스터 커브를 도출하기 위해서는 기준 온도(20°C)를 중심으로 나머지 온도의 값들을 횡방향으로 이동시켜 대수함수 모양의 커브로 맞춰야하며, 시프트 팩터의 결정과 관련된 첫번째 단계는 동일한 동탄성 계수 값을 만족하는 기준 온도 및 그 외의 온도에서의 진동수를 결정하였음
- 수평 방향 이동은 대수함수 위에 위치되기 때문에 기준 온도에서의 진동수와 해당 온도에서의 진동수 비율을 계산하여 시프트 팩터를 결정하게 되며, 수평 이동 후에는 기준 온도에서의 진동수를 감소 진동수라고 통칭하며 동일한 동탄성 계수 값을 만족하는 두 온도에서의 진동수를 찾기 위해서는 데이터 값이 겹치는 부분이 존재해야함

- 아래 <그림 3-22>는 대수함수에 맞게 진동수에 따라 횡방향 이동이 이루 어지는 것을 나타내며, x축의은 진동수에서 감소 진동수로 바뀌어야함
- 하나의 커브가 완성이 되면 sin 함수를 이용하여 함수의 계수를 얻게 되며, 오차를 최소화하는 작업을 통해 혼합물의 마스터커브 함수를 도출할 수 있음
- <그림 3-23>은 데이터를 횡방향 이동 시킨 후에 완성된 마스터 커브와 시프트 팩터의 선형관계를 나타내는 그래프를 보여줌

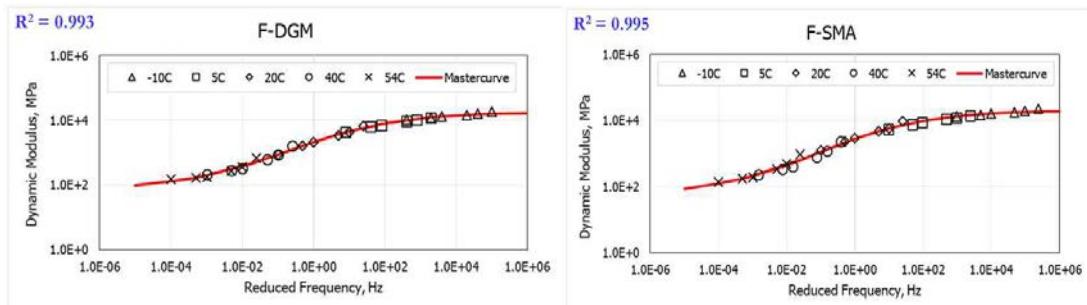


<그림 3-22> 횡방향 시프트 팩터를 도출하여 각 온도의 데이터 값 이동



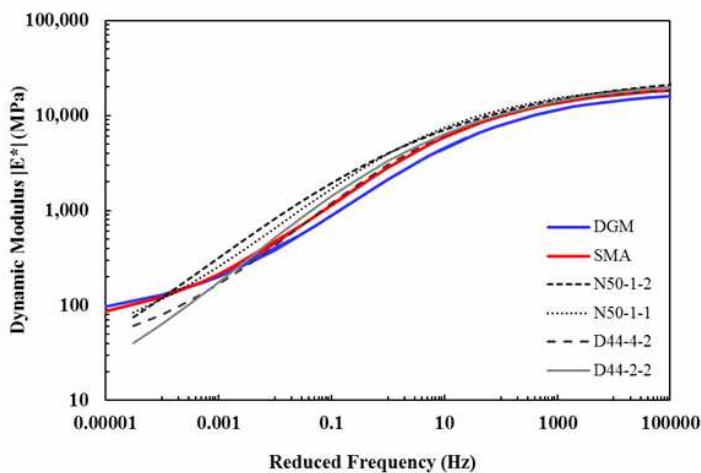
<그림 3-23> 커브 피팅된 그래프와 시프트 팩터의 선형관계 그래프

- Sigmoidal 함수에 실제 횡방향 시프팅 작업이 끝난 데이터를 맞추는 과정 은 Matlab을 이용하였으며, F-DGM과 F-SMA 혼합물의 커브 피팅 그래프는 <그림 3-24>와 같이 나타남



<그림 3-24> 커브 피팅이 완료된 (좌) F-DGM, (우) F-SMA 그래프

- 아래 <그림 3-25>에서 보이는 것과 같이 낮은 감소 진동수에서 F-SMA의 동탄성 계수 값이 F-DGM 값보다 더 높게 나타난 것을 알 수가 있지만, 0.001Hz 이하의 낮은 진동수에서는 F-DGM의 동탄성 계수 값이 더 높게 나타났음
- 세종 대학교에서 기존에 실시했던 아스팔트 혼합물과의 비교를 통해 본 연구의 동탄성 계수 실험 결과를 신뢰성을 확보



<그림 3-25> F-DGM과 F-SMA 그리고 선행 HMA와 비교

## 제2절. 이질 재료간 역학적 모델링 기법 및 충간 구조해석

### 1. 경계면 부착 향상 관련 연구 필요성

- 기존 콘크리트 포장에 아스팔트 덧씌우기를 실시한 복합포장 시공 시 기존 콘크리트 하부 층과 상부의 아스팔트 층 사이의 부착을 위해 국내에서는 일반적으로 RSC-4 Tack Coat 유제를 사용하고 있음
- 기존 콘크리트 포장 층과 아스팔트 포장 층의 부착이 제대로 이루어지지 않을 경우, 차량 하중에 의한 전단력과 휨 응력에 저항하지 못하여 아스팔트 덧씌우기의 수명이 짧아지게 되어 결과적으로 <그림 3-26>과 같은 두 재료 간 층 분리에 따른 파손을 보이게 됨



<그림 3-26> 두 층 사이 부착 미비에 따른 아스팔트 덧씌우기 파손 사례

- 기존 택코팅 유화아스팔트의 경우 <그림 3-27>과 같이 덤프트럭의 타이어에 의해 택코팅 유제가 묻어나가 부착 성능 발현에 문제가 되고 있으며 특히 야간공사 현장이나 절삭 부재포장 등의 교통 개방 시간이 충분치 않은 보수시공 시 충분한 양생시간을 확보하지 못하여 파손이 더욱 심각한 상황임



<그림 3-27> 중 차량 타이어에 의한 Tack Coat 재료의 파손

## 2. 이질재료간의 부착강도 향상을 위한 재료 및 공법

- 짧은 양생 시간 및 덤프트럭과 같은 중 차량 타이어에 묻어나오지 않고 부착력을 향상시킬 수 있는 새로운 택코팅 재료 및 기술이 필요하며, 국내 I 연구소에서도 이들 문제를 해결할 수 있는 개질 유화아스팔트 재인 TF Coat (Tire Free Coat)를 개발하였음
- TF 코팅제의 경우에는, 휘발성 유기 용제가 없어 환경오염을 유발하지 않으며 특수 폴리머를 첨가하여 100°C 이하에서는 녹지 않기 때문에 타이어에 묻어 나오는 현상을 방지할 수 있음
- 100°C 이상에서는 녹아서 부착력을 향상시키게 되는 원리이며, 기존 RSC-4에 비해 양생시간이 1시간 30분 ~ 2시간으로 짧기 때문에 빠른 양생으로 인하여 포장 유지 보수 작업 시 준비 시간을 줄일 수 있어 작업 성능을 향상시킬 수 있음
- 텍사스 북부 Dallas 지역에서는 아스팔트 덧씌우기 시공 시, <그림 3-28>과 같이 기존 콘크리트 포장 면과 덧씌우기 층 사이에 아스팔트 유제와 함께 단 입도의 골재를 포설하는 Underseal 공법을 적용하기도 함



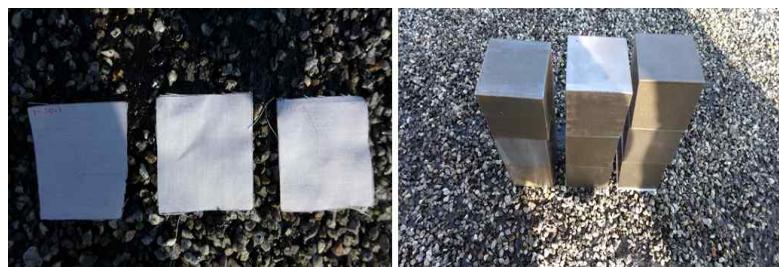
<그림 3-28> Texas 주 Underseal 시공 모습

- Underseal 공법은 1in 이하의 아스팔트 덧씌우기 시에 골재로 인해 트럭 타이어에 Tack Coat 유제가 묻어나오는 현상을 방지하고, 기존 포장과 신규 재료의 접착 강도를 향상시키는 역할을 하여 장기 피로 수명을 증가시킬 수 있음
- 더불어 Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI)의 역할을 하여 아스팔트 층의 덧씌우기 층의 반사균열의 진행을 지연시키는 역할을 할 수도 있음 (TTI, 2007)

### 3. 경계면 처리 공법 부착 특성 비교

#### 가. Trackless 성능 실험

- 현재 Tack Coat 양생 시간의 명확한 기준은 없는 상태이며, 단지 손에 묻어나오지 않을 때 혹은 갈색의 유화 아스팔트가 검은색으로 변하는 것으로 규정되고 있음(JIS K 2208:2000, 2006)
- 양생 시간이 Tack Coat 시공에서 중요한 이유는 덤프트럭 혹은 아스팔트 페이버 등의 건설기계의 통행에 따라 아스팔트 유제가 벗겨져 타이어에 묻어 나오게 되고 그 결과 부착성능의 저하를 초래하고 포장 전체의 공용 수명을 감소시키기 때문
- 본 연구에서는 시험 시공 시 적용한 Underseal, RSC-4, TF Coat 재료에 대해 타이어에 묻어나오지 않는 Trackless 성능을 비교하기 위하여 살포 30분 후와 1시간 후 표면에 3 x 3cm 흡수 면을 설치한 후 3kg 분동의 하중을 15초간 가하여 흡수 면에 재료가 묻어 나온 정도를 평가하는 방법의 실험을 진행하였으며, <그림 3-29>와 같음



<그림 3-29> Trackless 성능 비교 실험 과정

- 재료 살포 30분 후의 경우, <표 3-21>과 같이 Underseal 구간에서는 골재로 인하여 택코팅 재료가 거의 묻어나오지 않았으며 RSC-4 구간에서 가장 많은 양의 유제가 묻어나오는 경향을 나타내었음
- TF Coat의 경우 유제가 묻어나오기는 했지만 RSC-4 구간에 비해 그 양이 적은 것을 확인하였음
- 재료 살포 60분 후의 경우, <표 3-22>와 같이 Underseal 구간에서는 30분일 때와 거의 결과의 차이가 없었으나 RSC-4 구간에선 흡수 면 일부에서만 유제가 묻어 나옴을 확인 할 수 있었고, TF Coat의 경우에는 살포 40분 후 아스팔트 혼합물 포설을 실시하였기 때문에 확인이 불가능했음
- 위 결과를 통해 Underseal 공법이 Tack Coat 유제의 Trackless 현상을 방지하는 데 효과가 있으며, TF Coat 재료의 경우 RSC-4에 비해 Trackless 성능이 더욱 뛰어남을 확인할 수 있었음

<표 3-21> Trackless 성능 비교 실험 결과 (재료 살포 30분 후)

Trackless 성능 비교 실험 결과 (재료 살포 30분 후)		
Underseal		
		
RSC-4		
		
TF Coat		
		

<표 3-22> Trackless 성능 비교 실험 결과 (재료 살포 60분 후)

Trackless 성능 비교 실험 결과 (재료 살포 60분 후)		
Underseal		
		
RSC-4		
		
TF Coat		
		
N/A (양생 40분 후 시공 실시)		

#### 나. Pull-off Test

- 텍사스 도로 교통국 TTI에서는 Tack Coat의 전단 강도 시험, 그리고 직접 인장 부착 시험 (Pull off test : ASTM C-1583)을 통해 실시하고 있음
- 현재 국내 아스팔트 덧씌우기 포장 시 사용하는 택코팅의 접착강도기준은 없는 실정이며, KS F 4932 교면용 도막 방수재의 접착강도 기준에 준하여 사용하고 있으며 이는 <표 3-23>과 같음

<표 3-23> Tack Coat 부착강도 기준 (한국도로공사, 2013)

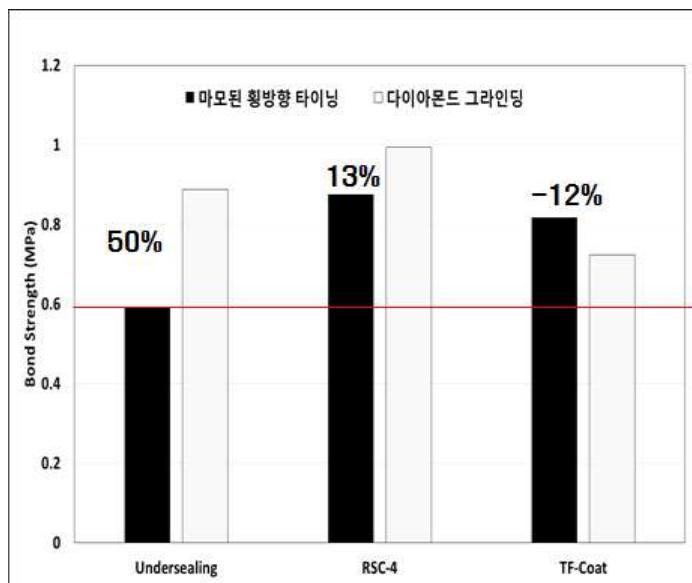
구분	기준(MPa)
Tensile Bond Strength	0.6 이상
Shear Bond Strength	0.15 이상

- 본 연구에서는 시험 시공 시 적용했던 경계면 처리 공법 Underseal, Tack Coat 유제 RSC-4, TF Coat에 대해 Pull-off Test를 실시하여 부착강도를 비교
- 기존 CRCP 콘크리트 포장 표면에 대해, 횡방향 타이닝 (Transverse Tining)과 다이아몬드 그라인딩 (Diamond Grinding) 공법을 적용한 구간에서 각각 실험을 실시하여 표면 텍스처(Texture)과 부착강도의 상관성 또한 비교하였음
- 횡방향 타이닝 및 다이아몬드 그라인딩 공법은 모두 포장 표면 조직 (Texture)을 처리하는 것임
- 아래의 <표 3-24>는 횡방향 타이닝 및 다이아몬드 그라인딩 포장 표면 조직 (Texture) 공법에 대해 요약한 것임

<표 3-24> 횡방향 타이닝 및 다이아몬드 그라인딩 공법 단면 정보  
(한국도로공사, 2014)

단면도	횡방향 타이NING	다이아몬드 그라인딩
단면 모습		
홈 간격(mm)	30	5~6.5
노면 절삭 깊이(mm)	N/A	3.5~5.0
홈 높이(mm)	3±1.5	1.5
홈 폭(mm)	3±0.5	3~4

- 횡 방향 타이닝, 다이아몬드 그라인딩 구간에서 Underseal, RSC-4, TF Coat에 대해 각각 3번 씩 총 18개의 위치에서 실험을 진행하였고, 택코트 양생시간은 각각 1시간 25분, 1시간 10분, 그리고 40분으로 TF Coat의 경우 양생시간이 충분하지 않았음
- <그림 3-31>과 같이 Undersealing 구간에서 표면 텍스처 구조에 따라 부착강도가 크게 나타나 다이아몬드 그라인딩 표면에서 부착강도가 50% 가량 더 높게 나타났으며, 위치 별 높은 편차를 보여 균일한 표면 상태의 시공 및 표면 조직 상태가 중요함을 확인
- RSC-4 구간의 경우 텍스처에 관계없이 양호한 부착 인장강도를 보였으며, 다이아몬드 그라인딩에서 13% 가량 높게 나타남
- TF Coat 구간은 모든 텍스처에서 부착인장강도를 통과하였으며, 유일하게 횡방향 타이닝에서 12% 가량 높은 값을 보였음



<그림 3-30> 마모된 횡방향 타이닝 vs 다이아몬드  
그라인딩 부착강도 결과

- 얇은 아스팔트 덧씌우기 시 부착 파손 단면을 비교한 결과 아래 <그림 3-31>과 같이 비교적 간격이 좁고 흄이 얇은 다이아몬드 그라인딩 표면에서는 혼합물이 아스팔트 포장에 붙어 탈착된 반면에 흄이 깊고 넓은 횡방향 타이닝에서는 기존 콘크리트 포장에 혼합물이 붙어있는 상태로 탈착된 것을 확인하였다



#### 다. Direct Shear Test

- 영국의 Nottingham 대학교에서는 아스팔트 층 사이의 부착 특성을 파악하기 위해 직접전단시험기를 이용하여 부착 전단강도를 평가하였음(Muslich, 2010)
- 덧씌우기 포장의 경계면에서의 부착 파손의 유형은 3가지가 있으며, 그 중 전단에 의한 파손이 가장 결정적인 파손 형태로 보고되었음
- 본 연구진은 직접전단강도 시험을 도입하여 부착면에서의 전단 강도를 평가 하였으며, 보다 시편의 텍스처에 대한 정량적인 기준과 시험의 반복성 그리고 충분히 높은 강성을 가진 재료를 이용하여 경계면이 아닌 부분에서 파손 방지를 제공하기 위해 아래 <그림 3-32>와 같이 알루미늄 실린더를 제작하였음



<그림 3-32> 포장 표면 텍스처 모사 시편

- 모사 시편의 텍스처 깊이(MTD : Mean Texture Depth)를 정량화 하기 위해 Sand Patch Test(ASTM E965)를 실시하였음
- 포장 종류에 따른 샌드 패치 시험의 일반적인 적용 기준 범위는 아래 <표 3-25>와 같으며, 콘크리트 표면 텍스처 모사 시편의 MTD는 <표 3-26>과 같이 정리하였음

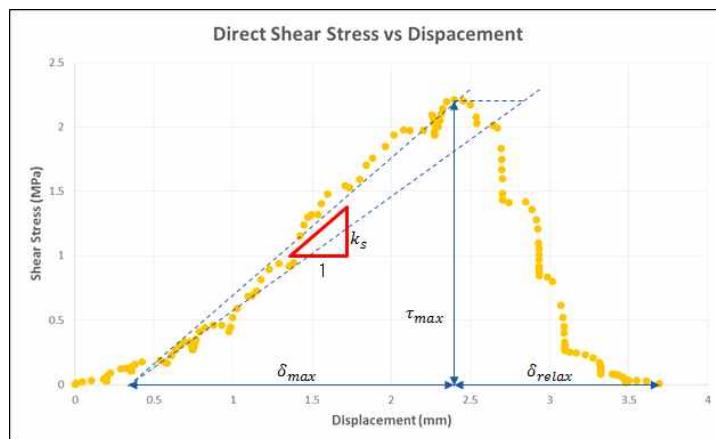
&lt;표 3-25&gt; 포장 종류에 따른 허용 MTD

포장 종류	평균 MTD (mm)	최소 MTD (mm)	최대 MTD (mm)
PCC-Transverse Tinning	2.0	0.3	9.0
ACC-Fine Mix	0.5	0.3	1.0
ACC-Open Graded Friction Course	2.3	1.0	6.0

&lt;표 3-26&gt; Sand Patch Test 실험 결과

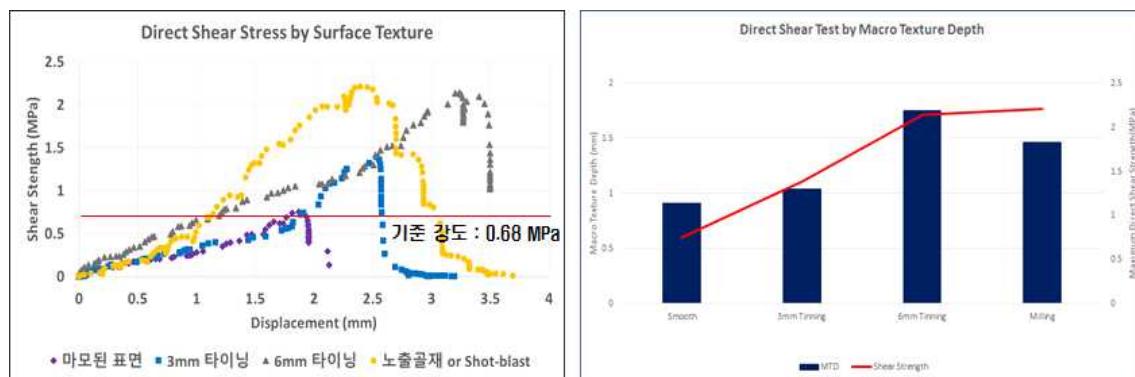
Sand Patch Test ASTM E-965								
Test #	Date	X1_mm	X2_mm	X3_mm	X4_mm	X_Avg_mm	Volume_mm <sup>3</sup>	Macro Texture Depth_mm
마모된 표면	17.02.24	117	120	117	118	118	10,000	0.914
3mm 타이닝	17.02.24	110	110	112	111	110.75	10,000	1.038
6mm 타이닝	17.02.24	85	83	87	86	85.25	10,000	1.752
노출골재 또는 Shot-blast	17.02.24	96	92	92	93	93.25	10,000	1.464

- 텍스처 모사 시편의 MTD를 정의한 뒤 직접전단강도시험을 수행함
- 기존 전단 강도 평가 기준은 아래 <그림 3-33>과 같이 경계면의 최대전단응력( $\tau_{max}$ )과 변위와 하중의 기울기에 해당되는 전단 반력계수( $k_s$ )로 평가되었으나, 본 연구에서는 최대 전단응력에 도달한 뒤 경계면이 완전 탈착되는 순간까지의 변위를 추가적으로 분석하여 완화 변위( $\delta_{relax}$ )를 정의하였음



&lt;그림 3-33&gt; 직접전단실험 결과 분석 방법

- 스위스 SN 671 961을 따르면 부착 최대 전단강도 기준은 0.68MPa로 설정되어 있으며, Florida DoT의 기준 역시 25°C에서 0.7MPa로 설정되어 있음
- 본 연구에서의 시험은 기존 콘크리트 위 직접적으로 덧씌우기가 적용되는 F-DGM 배합으로 제작하였으며, 타이닝 텍스처의 경우 하중 재하 방향과 수직하게 실험을 실시하고, 하중 재하속도는 50mm/min으로 설정하였음
- 직접전단강도 시험 결과 보면 텍스처에서 F-DGM과의 최대 부착 전단강도가 기준치인 0.68MPa을 상회함
- 전단 반력계수의 경우 노출 골재 모사시편이 1.63MPa/mm로 마모된 표면과 비교하여 2배 이상 높음
- 최대 전단강도에서의 변위는 6mm 타이닝 표면에서 3.2mm로 마모된 표면보다 69% 높음
- 하중 완화 변위의 경우 노출골재 표면에서 최대 하중 이후 1.29mm의 변위를 더 가짐
- 텍스처 깊이에 따른 직접전단강도를 비교한 결과 마모된 표면에서 타이닝 크기가 커질수록 전단강도가 크게 나타났으며, 노출골재 표면의 경우 응력 집중이 비교적 적어 가장 큰 부착 전단강도를 가짐



<그림 3-34> (좌)변위에 따른 직접전단강도 그래프, (우) 텍스처 깊이에 따른 직접전단강도 비교 결과

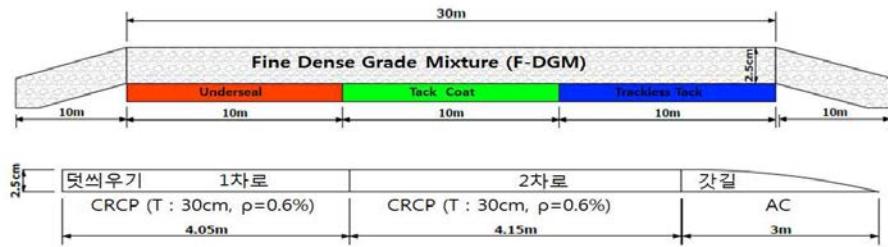
## 제3절. 시험시공을 통한 단기 및 장기 DB 구축

- 앞서 개발된 혼합물의 용적, 러팅 및 반사균열 저항성, 그리고 기본 물성 시험을 통과한 재료를 과제 2차 및 3차년도 두번에 걸쳐 CRCP 콘크리트 포장에 시험시공을 실시하였음
- 실험 변수는 충간 부착 방법과 실내 실험서 정의된 3가지 재료를 선정하였음
- 기존 타이닝 표면과 다이아몬드 구간에 각각 일반 Tack Coat 재료와 TF Coat, Underseal 공법 등의 경계면 처리 공법을 적용하여 충간 부착력을 비교하였음
- 얇은 아스팔트 덧씌우기 재료의 현장 공용성을 평가하기 위해 F-DGM 층을 하부 2.5cm에 응력 완화층으로, F-SMA 및 F-PFC를 소음 및 배수 등의 기능 향상 층으로 총 5cm 두께의 시험시공을 실시하였음

### 1. 중부내륙고속도로 시험도로 시험시공

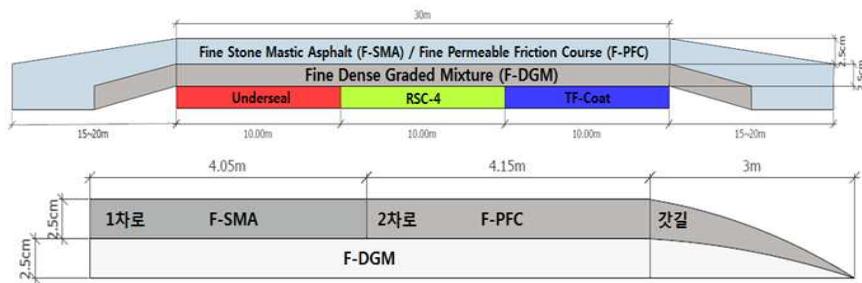
#### 가. 시험시공 개요

- 우선 2차년도에는 경계면 처리 공법 및 실내 실험을 통해 결정된 세립도 배합 중 F-DGM 층 2.5cm를 적용하여 응력 완화층의 역할에 대한 검증 연구차원에서 시험시공을 실시하였으며, 3차 연도에 2개의 구간으로 나누어 F-SMA와 F-PFC로 시공
- 시험시공의 위치는 여주 시 중부내륙고속도로 구간에 설치된 시험도로이며, 콘크리트 층은 30cm의 두께와 0.6%의 철근비를 가진 연속 철근 콘크리트 포장 (CRCP)임
- 아래 <그림 3-35>는 2차년도에 실시한 시험시공 단면 정보를 종단도 및 횡단도로 도식화하여 나타낸 것이며 총 연장 50m, 폭 11.2m (1차로, 2차로, 갓길)에 대해 2.5cm F-DGM 혼합물 덧씌우기를 실시하였고, 경계면 부착 비교를 위해 본선 30m에 대해 Underseal, Tack Coating, TF Coat 를 각각 10m씩 적용



<그림 3-35> 1차 시험시공 단면(종단도 및 횡단도)

- 1년 뒤 기존 F-DGM 덧씌우기 구간 위에 포장의 주행성 및 미끄럼 저항성을 향상시키고 소음을 감소시키는 등 기능적 역할을 수행하는 것을 목적으로 한 F-SMA와 F-PFC 아스팔트 덧씌우기를 추가적으로 실시하였으며, 시공 단면은 아래 그림 <3-36>과 같음



<그림 3-36> 2차 시험시공 CRCP 위 덧씌우기 단면(종단도 및 횡단도)

- 이와 더불어 CRCP와 JCP 상부의 덧씌우기 거동을 함께 비교하고자 해당 시험도로의 JCP 구간 일부에 F-DGM 덧씌우기 시험시공을 실시하였고, 시험시공구간 단면은 아래 <그림 3-37>과 같음



<그림 3-37> 2차 시험시공 JCP 위 덧씌우기 단면(종단도 및 획단도)

- Tack Coat는 국내에서 일반적으로 사용되는 RSC-4, 개질제의 경우 국내 I 연구소에서 개발한 TF Coat 유제, 그리고 Underseal 공법은 RSC-4에 단 입도 골재(5~2.1mm 입경)를 사용함
- <표 3-27>은 택코트 사용 제품(Tack Coat : RSC-4, TF Coat)의 재료 기준 및 물성 시험 결과를 비교한 것으로 두 제품 모두 기준을 통과하는 것을 확인하였으며, 시험시공에 사용된 골재 입도 분포는 아래 <표 3-28>과 같음

&lt;표 3-27&gt; Tack Coat, Trackless Tack 재료 기준 물성 시험 결과

시험 항목		Tack Coat (RSC-4)		TF Coat	
		기준	시험 결과	기준	시험 결과
점도(앵글러도, 25°C)	1~6	2	1~15	3	
체 잔류분(1.18mm) 질량(%)	0.3이하	0	0.3이하	0.1	
저장 안정도(24h) 질량(%)	1이하	0	1이하	0.1	
입자의 전하	양(+)	양(+)	양(+)	양(+)	
부착도	2/3이상	합	2/3이상	합	
지속 건조시간(25°C), (분)	-	-	90이하	80	
증 발 잔 류 물	증발 잔류분 질량(%)	50이상	52.8	50이상	53.1
	침입도(25°C) 1/10mm	60~150	95	5~30	27
	신도(15°C) cm	40이상	100이상	-	-
	톨루엔 가용분 질량(%)	98이상	99.58	-	-
	연화점(°C)	-	-	55이상	58

&lt;표 3-28&gt; FGM (Fine Graded Mix) 배합설계 기준 (TxDOT, 2014)

체 크기	통과량(%)		
	Fine PFC	Fine SMA	Fine DGM
3/8 in.	95 ~ 100	95 ~ 100	95 ~ 100
# 4	20 ~ 55	50 ~ 70	70 ~ 90
# 8	0 ~ 15	20 ~ 40	40 ~ 65
# 16	0 ~ 12	10 ~ 25	20 ~ 45
# 30	0 ~ 8	10 ~ 20	10 ~ 30
# 50	0 ~ 8	8 ~ 15	10 ~ 20
# 200	0 ~ 4	6 ~ 12	2 ~ 7
배합설계방법	Tex-204-F, Part V	Tex-204-F, Part I	Tex-204-F, Part IV
물성	요구조건		
	I	II	III
바인더 함량, % 최소	6.0	6.0	5.5
설계 VMA, % 최소	NA	16.0	16.5
플랜트 생산 VMA	NA	15.5	16.0

## 나. 1차 F-DGM 응력완화층 시험시공

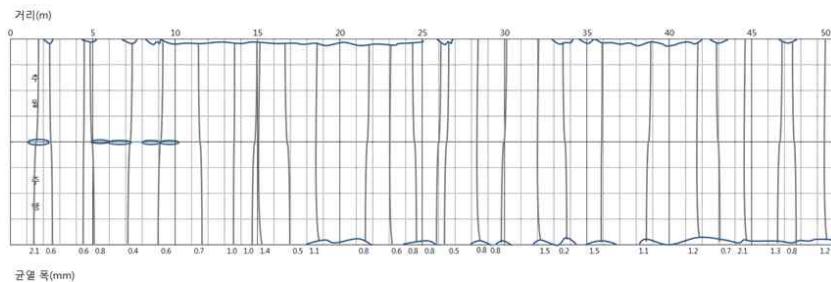
### 1) 시험시공 구간 사전 조사

#### 가) CRCP 표면 육안 조사

- 덧씌우기 시공 전, 해당 CRCP 구간 포장 표면에 대해 포장 파손, 균열 간격 및 균열 폭 등 육안 조사를 실시하였으며, <그림 3-38>은 CRCP 표면에 발생한 포장 파손 모습을 나타냄
- 갓길인 아스팔트 포장과 CRCP 경계 부에서 콘크리트 포장 일부가 떨어져 나가는 스팔링 현상이 주요한 결함으로 목격되었으며, <그림 3-39>는 구간 내 CRCP 균열 간격과 균열 폭을 측정하는 모습을 보여주고 있음
- 위의 포장 파손 조사와 균열 간격 및 폭 측정을 통하여 <그림 3-40>과 같이 시험 시공구간 CRCP 포장의 시험 시공 전 표면 균열 맵을 도식화했음



<그림 3-38> CRCP 포장 파손 육안 조사<그림 3-39> CRCP 표면 균열 간격 및 균열 폭 측정



<그림 3-40> 시험시공 구간 CRCP 표면 맵

- 열 영상 카메라를 이용하여 시공 전 CRCP 표면의 온도를 측정하였으며 최저 7°C에서 일부 위치에 따라 12.5°C까지의 온도를 보였고, 평균적으로 약 10°C의 온도를 나타내었음

- 국내에서는 5°C 이상의 대기 온도를 가열 아스팔트 혼합물의 시공 가능 기준으로 제시하고 있지만 (국토교통부, 2014) 포장 표면 온도에 대한 기준은 미흡한 실정임
- 세립도 혼합물 중 F-DGM 혼합물의 경우, 시공 전 16°C 이상의 기존 포장 표면 온도를 기준으로 제시하고 있기 때문에 (Tom Scullion et al, 2012) 시공 시 포장 온도는 6°C 정도 기준에 미치지 못하는 것을 확인

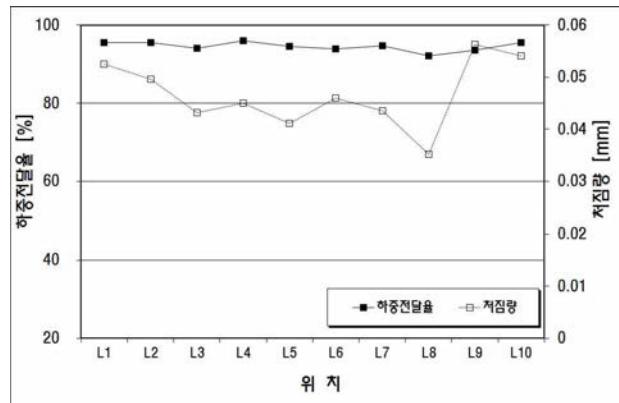
#### 나) 시험시공 전 CRCP 구조적 지지력 평가

- CRCP의 경우 콘크리트 하부 기층의 지지력이 클 경우 포장의 처짐 값은 작으며 대부분의 응력이 세로 철근 근처에서 발생하게 되며, 그 결과 우수한 공용성을 보이게 됨 (Choi, 2015)
- 반면 낮은 지지력에서는 높은 처짐을 보이며 이는 편치아웃(Punch-out)과 같은 포장 결함을 초래할 수 있어 덧씌우기 시 포장의 내구성이 낮아지고 수명이 짧아질 수 있음(Choi, 2015)
- 얇은 아스팔트 덧씌우기의 경우 기존 콘크리트 포장이 큰 처짐을 갖는 경우 즉, 편치아웃 등의 파손으로 발전할 우려가 있으므로 얇은 두께의 덧씌우기로는 한계가 있으며, 이를 평가하기 위해 FWD를 이용하여 처짐량을 측정하였음
- TxDOT에서는 9in 두께 CRCP의 차로 중앙부에서 약 3.5mils(0.0889mm)의 처짐 값을 예상하며, 8in 두께의 IH0045 고속도로에서 FWD를 이용하여 처짐을 분석한 결과 2.5~4.5mils (0.0635~0.1143mm) 사이의 처짐 량을 보였으며 편치아웃 등이 발생한 근처의 처짐 량은 7mils(0.1778mm) 이상의 높은 값을 나타냄(Choi, 2015)
- 시험시공 구간 내 기존 CRCP 포장의 지지력을 파악하기 위하여 FWD 시험을 통해 처짐 량 및 하중전달율 분석을 실시하였고 이를 통해 얇은 덧씌우기 시공 가능성을 판단했음
- 아래 <그림 3-41>은 FWD 시험 과정을 나타내고 있으며, 50m의 시험 시공 구간에 대해 1차로와 2차로 중앙부에서 10m 간격으로 시험을 실시했고, 각 위치에서 300mm의 재하 판을 적용하여 9000lb, 12000lb, 15000lb의 하중을 3번씩 재하 하였음
- 모든 하중에서의 처짐 값은 일반적인 FWD 도로 평가에 사용되는 9000lb 하중으로 정규화 하여 분석을 실시



<그림 3-41> FWD 시험 모습

- <그림 3-42>는 FWD를 이용하여 하중전달율 및 처짐 량을 분석한 결과를 그래프화 한 것임
- 처짐량의 경우에는 1차로 0.041~0.052mm, 2차로 0.035~0.056mm로 평가되었음
- L1~L5는 1차로 10m 간격, L6~L1을 2차로 10m 간격의 결과 값을 보여주고 있고, 1차로의 경우 94.1~96%, 그리고 2차로의 경우에는 92.1~95.5%의 하중전달율을 나타냄
- 모든 위치에서 90% 이상의 높은 하중전달율과 0.035~0.056mm의 낮은 처짐 값 결과를 통해 CRCP 포장 및 하부 지지력은 양호한 상태임을 확인할 수 있다고 판단



<그림 3-42> FWD를 이용한 CRCP 처짐 및 하중전달율 분석 결과

## 2) 응력 완화를 위한 2.5cm F-DGM 시공

- 기존 CRCP 위 아스팔트 덧씌우기 시험시공 과정은 개략적으로 구간 단부 절삭, 표면 청소, 택코트 살포 및 양생, 혼합물 포설 및 다짐 순으로 시공이 이루어졌으며, <그림 3-43>은 노면 파쇄기를 이용하여 시공 구간 좌우 단부 10m 및 도로표지용 페인트에 대해 절삭을 실시하는 과정을 보여주고 있음
- 총 연장 50m중 양쪽 단부에서는 덧씌우기 시공 시 포장에 단차 문제 및 접착 문제가 발생되기 때문에 10m씩 절삭을 실시하였음

- 덧씌우기 포장과 기존 포장의 접촉 불량 및 이물질로 인한 오염을 막기 위해서 기존 포장 표면 청소를 실시하며, 절삭 후 <그림 3-44>와 같이 코어부 및 스팔링 파손 부 되 메우기 작업 및 청소 차, 콤프레셔, 빗자루를 이용하여 작업을 실시



<그림 3-43> 시공 구간 단부 및 <그림 3-44> 기존 CRCP 포장 표면  
도로표지용 페인트 절삭 모습

- 기존 CRCP 포장 표면 청소 후, <그림 3-45>와 같이 아스팔트 디스트리뷰터 장비를 이용하여 택코트 살포 작업을 실시



<그림 3-45> Tack Coat 살포 시공 과정

- <표 3-29>는 각 구간에 대한 택코트 시공 결과를 요약한 것이며, 모든 구간의 재료는 0.4L/m<sup>3</sup>의 양으로 살포하였고, Underseal의 경우 5~2.1mm 단 입도 골재를 4.5kg/m<sup>3</sup>로 적용
- 열 영상을 통해 택코트 재료의 살포가 균일하게 이루어지지 않은 상태인 것 역시 확인할 수 있었으며, 양생 시간은 Underseal 1시간 25분, RSC-4 1시간 10분, TF Coat 재료 40분으로 매우 짧은 양생 시간 후 아스팔트 혼합물 포설이 이루어진 것을 확인할 수 있으며, 아래 그림과 같이 택코트 유제가 양생(택코트 내 수분 증발)하지 못한 상태에서 아스팔트 혼합물 포설이 이루어짐을 알 수 있어 관행을 개선할 필요가 있음

&lt;표 3-29&gt; Underseal, Tack Coat, Trackless Tack 시공 요약

항 목		Underseal	RSC-4	TF Coat
살포 양(L/m <sup>3</sup> )	기준	Variables	0.3~0.6	0.3~0.6
	적용	0.4	0.4	0.4
5mm 단입도 골재(kg/m <sup>2</sup> )		4.5	N/A	N/A
살포 시간		12:02~12:20	12:28~12:35	13:00~13:05
살포 온도(°C)		8.5~24.1	12.2~21.7	9.9~19.3
양생 시간		1시간 25분	1시간 10분	40분

- 부착을 위한 경계면 처리 후, 운반된 혼합물에 대한 포설 및 다짐 시공을 실시하였으며, 시공 장비는 25ton 트럭 2대, 아스팔트 페이버 1대, 그리고 8톤 탠덤 롤러 1대가 사용됨
- <표 3-30>은 F-DGM 혼합물의 생산 및 운반 결과를 요약한 것으로 혼합물 생산은 19ton 중량으로 두 번 생산되었으며, 이 때 생산 온도는 각각 178°C, 179°C로 측정되었음
- F-DGM 혼합물의 혼합 및 생산 온도의 기준은 163°C이지만 시공 당일이 기온이 낮은 동절기(7~10°C로 측정)였고, 동절기에는 운반 시간을 고려하여 혼합물의 생산 온도를 180°C 까지 올릴 수 있고 혼합물의 산화로 인한 품질 저하를 막기 위해 180°C 이상으로는 생산하지 않는다는 시공 지침 (국토교통부, 아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침, 2014)에 따라 온도를 높여 생산하였음
- 혼합물의 온도 손실을 막기 위해 운반트럭에 덮개를 설치하였으며 운반 시간은 1차 40분, 2차 50분으로 기록되었으며, 시공 장소에 혼합물 도착 후 온도를 측정한 결과, 표면 161°C, 내부 179°C임

&lt;표 3-30&gt; F-DGM 혼합물 생산 및 운반 결과

구분	점검내용	점검결과	
1	혼합물 생산온도	1차	178°C
		2차	179°C
2	혼합물 중량	1차	19ton
		2차	19ton
3	운반트럭 덮개	설치	
4	운반 시간	1차	12:15~13:25
		2차	12:44~13:42
5	혼합물 도착온도	표면	161°C
		내부	179°C

- <그림 3-46>과 <그림 3-47>은 F-DGM 혼합물의 포설 및 다짐 시공 과정을 나타낸 것으로 포설 시공은 갓길 부, 2차로, 1차로 순서로 진행되었으며, 페이버의 포설 폭은 3m, 포설 두께는 3 ~ 3.5cm로 측정

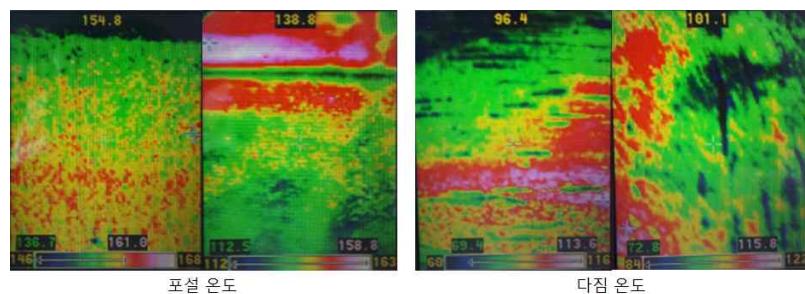
- 페이버와 다짐 롤러의 거리는 2 ~ 5m로 유지되었으며, 텐덤 롤러의 부착 방지제로는 물을 사용
- 포설 및 다짐 시공 시 혼합물의 온도는 <그림 3-48>과 같이 열 영상 카메라를 사용하여 측정하였으며 포설 온도는 최소 95.3°C, 최대 161°C로 측정되었고, 다짐 온도는 최소 69.4°C, 최대 115.8°C로 측정되어 기준 다짐 온도보다 낮은 온도에서 진행되었음
- 혼합물의 온도를 기준에 맞춰 운반시켰음에도 불구하고 초겨울의 날씨 하에 얇은 아스팔트 혼합물의 온도가 급격하게 감소함을 알 수 있어 Warm-mix 아스팔트 적용에 대한 연구를 추가하여 부록에 첨부했으며, 일반 혼합물의 경우 혼합물 대기 시간을 최소화하기 위해 일 방향 포설 및 다짐 후 다음 방향으로 시공을 진행해야함
- Texas에서는 얇은 덧씌우기 아스팔트 혼합물에 대해 Breakdown, Intermediate, Finish의 단계로 다짐 시공을 실시하며, F-DGM의 경우 12 톤 이상의 텐덤 스틸 롤러를 이용하여 목표 밀도에 도달하도록 4~5회, 그리고 F-PFC의 경우 1~3회 다짐을 실시하고 있음(Tx0-6742-1, 2015)
- 시험 시공 시, 혼합물의 온도가 저하되는 상태와 텍사스보다 작은 무게의 다짐 롤러를 사용함으로써 기준보다 많은 횟수의 다짐을 실시하였음



<그림 3-46> F-DGM 혼합물 포설



<그림 3-47> F-DGM 혼합물 다짐



<그림 3-48> F-DGM 혼합물 포설 및 다짐 온도 측정

- <표 3-31>에서는 위에서 언급한 F-DGM 혼합물의 포설 및 다짐 시공 결과에 대해 요약한 것을 나타냄

&lt;표 3-31&gt; F-DGM 포설 및 다짐 시공 결과

구분	점검 내용	점검 결과	
1	혼합물 포설 온도	최소	95.3 ℃
		최대	161 ℃
2	포설 폭	3m	
3	포설 두께	3~3.5cm	
4	페이버와 다짐 장비의 거리	2~5m	
5	다짐 롤러 부착방지제	물	
6	혼합물 다짐 온도	기준	149 ℃
		최소	69.4 ℃
		최대	115.8 ℃
7	다짐 횟수	많은 횟수의 다짐 실시	

- 아래 <그림 3-49>과 <그림 3-50>은 시험 시공 도중 발생한 문제점을 나타낸 것으로 우선 Underseal, RSC-4, TF Coat 등 경계면 처리 후, 40분 ~ 1시간 25분의 매우 짧은 양생 시간으로 인하여 트럭과 페이버 통과 시에 유제가 묻어 손실 되는 현상이 발생함
- TF Coat의 경우 40분의 양생 시간 후 바로 혼합물 포설이 이루어져 유제가 타이어에 묻어나오지 않도록 개질 제를 첨가하여 양생 시간을 단축시키고 접착력을 높인 기술이지만 1시간 30분 ~ 2시간의 양생 시간을 기준으로 하고 있기 때문에 문제점이 발생한 것이라 판단됨
- CRCP 표면 조사 시 언급했던 갓길 부 스팔링 구간, 그리고 갓길과 2차로, 1차로와 2차로 경계 등 페이버 포설 시 겹침 구간 및 도로표지 페인트 절삭 부에 대해서, <그림 3-50>에서와 같이 포설 높이가 부족하여 다짐 후 인력으로 온도가 떨어진 혼합물을 재 포설하여 다짐을 실시하였고, 이로 인하여 <그림 3-51>과 같은 골재 분리 현상이 발생



<그림 3-49> Tack Coat 양생 시간 <그림 3-50> F-DGM 혼합물 포설 및  
부족으로 인한 문제점  
다짐 시공 시 문제점



<그림 3-51> 시공 직후 갓길, 페이버 겹침, 도로표지 페인트  
절삭 부에서 발생한 골재 분리 현상

- <그림 3-52>는 F-DGM 얇은 덧씌우기 시공 직후와 4개월 후의 포장 전경을 나타낸 것이며, 위에서 언급한 골재 분리 현상이 일어난 위치를 제외한 구간에서는 초기 균열 등의 다른 결함이 발생하지 않은 양호한 상태를 나타냄



<그림 3-52> 시공 직후 및 4개월 후 포장 상태

## 다. 응력 완화층 위 F-SMA 및 F-PFC 및 JCP 위 F-DGM 시공

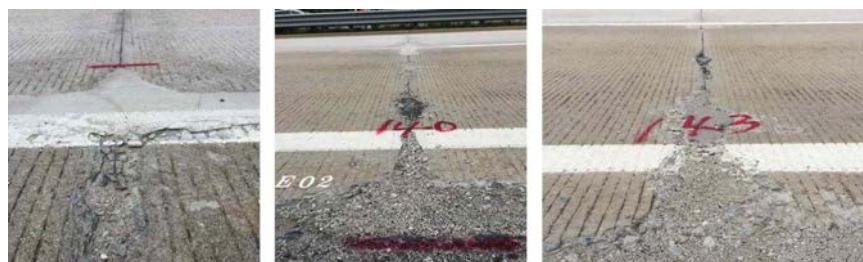
### 1) F-SMA 및 F-PFC 그리고 F-DGM 시공 구간 사전 조사

#### 가) 기존 F-DGM 덧씌우기 표면 육안 조사

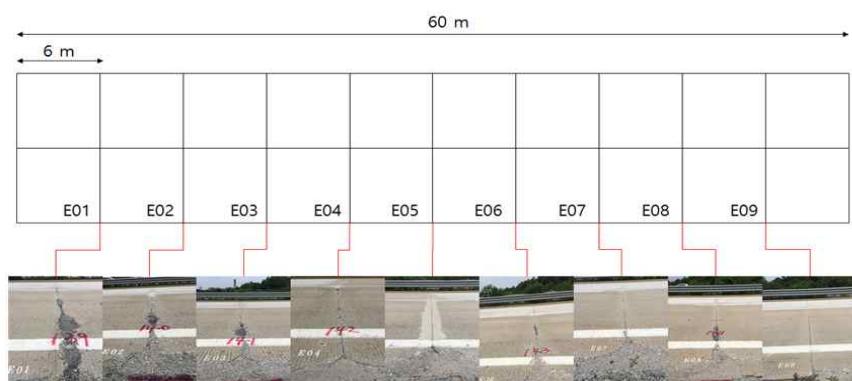
- 아스팔트 덧씌우기 구간 포장 파손 조사를 실시하였으나 기존 CRCP의 균열 폭이 크지 않아 공용기간 8개월이 지났음에도, 반사균열이 발생하지 않았으며, 포트 훌이나 러팅 등의 파손도 관찰되지 않음

#### 나) 기존 JCP 표면 육안 조사

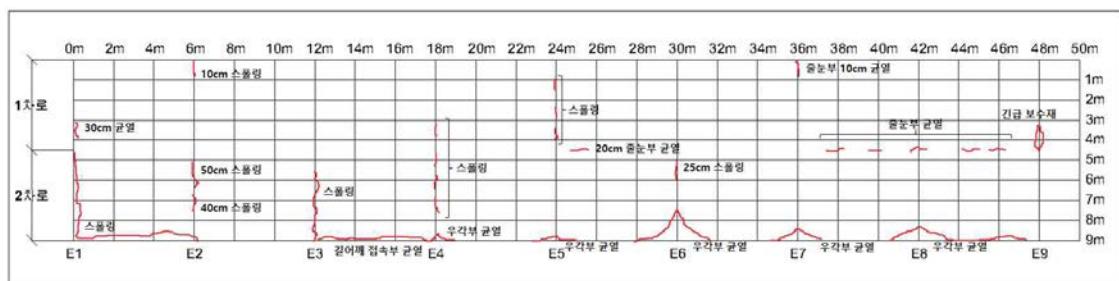
- 국내의 콘크리트 포장의 70% 이상을 차지하는 JCP 위 얇은 아스팔트 덧씌우기를 시험해보기 위해 1차 시험시공에 실시했던 CRCP 구간 옆에 위치한 JCP 구간에 F-DGM 1in(2.5cm) 덧씌우기를 계획
- 아래 <그림 3-53>은 기존 JCP 포장의 상태를 나타내며, 스플링과 줄눈부균열이 상당 수준으로 진행되어있는 상태였으며, <그림 3-54>는 JCP의 취약부인 줄눈의 상태를 나타낸 사진이며, <그림 3-55>와 같이 시험시공 구간의 포장 파손 조사와 균열 간격 및 폭 측정을 통하여 포장 표면 균열 맵을 도식화함



<그림 3-53> 시험시공 전 JCP 구간 포장 상태



<그림 3-54> 시험도로 구간 단면 정도 (JCP)



<그림 3-55> JCP 구간 균열맵

## 2) F-SMA 및 F-PFC 그리고 F-DGM 시험시공 실시

- 2차 시험시공은 중부내륙고속도로 기존 시험도로와 동일한 구간에서 실시되었으며, 시험일기는 2016년 7월 12일부터 14일까지 진행되었음
- 시험 내용으로는 기존 F-DGM 구간 위에 F-SMA와 F-PFC 배합을 2.5cm 추가로 실시하였으며, 기존 JCP 위에서의 덧씌우기 포장 거동을 계측하기 위해 F-DGM 배합을 2.5cm로 구성
- 기존 포장 위 아스팔트 덧씌우기 시공을 위해 우선적으로 기존 포장 표면 및 파손 부 처리 그리고 레벨링을 위해 아래 <그림 3-56>과 같이 구간의 단부와 페인트 부 밀링 절삭을 실시하였으며, 이 후에 <표 3-32>의 기준에 맞춰 포장 표면 청소를 실시하고, <그림 3-57>에서와 같이 스팔링 및 파손 부위를 실온에서 적용 가능한 아스팔트 긴급 보수재를 이용하여 보수 실시



<그림 3-56> JCP 구간 단부 및 페인트부 밀링

<표 3-32> 아스팔트 덧씌우기 기준 포장 표면 청소 기준

구 분	내 용
기준	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 포장 표면을 청소 및 건조시켜 수분, 먼지, 모래, 나뭇잎 및 기타 오염물을 모두 제거</li> <li>- 기존 포장 면에 결함이 있을 경우, 또는 표면이 편평하지 않은 경우 F-DGM 혼합물 혹은 긴급보수재로 레벨링 층을 시공하거나 보수 후 덧씌우기 실시</li> </ul>
청소 장비	청소차 + 불어서 이물질 제거 (건식)



<그림 3-57> 기준 JCP 스플링 파손 부위 부분 보수

- 택코팅 공법으로는 <그림 3-58>과 같이 기준 JCP 구간에 구간을 나누어 RSC-4와 Undersealing을 적용하였으나, 포설이 균일하게 이루어지지 않아 골재 위에 다시 RSC-4 유제를 도포하였으며, 1차 시험시공 F-DGM 표면 위에 RSC-4를 도포하여 양생시켰음



<그림 3-58> 기준 포장 위 택코팅 유제 도포

- 아스팔트 덧씌우기 권장 온도 기준은 아래 <표 3-33>과 같으며, 모든 혼합물의 온도는 기준에 맞게 운반되었고, 현장의 기준 포장 표면 온도 역시 F-PFC의 최소 22°C 이상인 35°C 정도였음
- 1차 시험시공 때와는 다르게 표면 온도가 높아 다짐 기준 온도인 140°C 이상을 유지하며 다짐을 실시하였음

<표 3-33> F-DGM 혼합물 생산 및 운반 결과

구분	점검내용	점검결과	
1	혼합물 생산온도	F-DGM	172°C
		F-SMA	171°C
		F-PFC	171°C
2	혼합물 중량	F-DGM	26ton
		F-SMA	15ton
		F-PFC	18ton
3	운반트럭 덮개	설치	
5	혼합물 도착온도	표면	162°C
		내부	169°C
6	혼합물 기준온도	혼합	163°C
		운반	163°C (최소 : 149°C)
		포설 및 다짐	149°C (최소 : 140°C)

- CRCP 구간에는 1차로 F-SMA 그리고 2차로에 F-PFC를 시공하였으며, JCP 구간에는 F-DGM를 시공하였으며, 이는 아래 <그림 3-59>와 같이 나타남



<그림 3-59> (좌) JCP 위 F-DGM 시공 후,  
(우) CRCP 구간 2차 시험시공(F-SMA&F-PFC)

#### 라. 현장 포장 불연속면 거동 분석

- 일반적인 콘크리트 포장 형식인 JCP와 CRCP는 서로 다른 거동을 보이며, 이는 계절에 따라, 그리고 아스팔트 덧씌우기 유무에 따라 또한 각각 다른 거동을 보일 것이라고 가정

- 이를 검증하기 위해 Crackmeter 센서를 사용하여 덧씌우기 전 연속적인 현장 계측을 통해 온도 차가 분명한 여름/겨울철 서로 다른 포장 형식(JCP, CRCP)의 포장 표면 온도 변화와 불연속면 거동을 알아보았음
- AC 덧씌우기 시, 덧씌우기 두께와 계절에 따라 상하부 포장 층의 온도 변화와 불연속면 거동 특성을 관찰하였으며, 이와 같은 계측 연구를 통해 다양한 조건에서의 현장 콘크리트 포장 불연속면의 거동 특성을 확인하였고, 최종적으로는 국내 조건을 반영한 Heart Overlay Tester 최대개구변위 기준 설정에 대해 고찰함
- 콘크리트 포장의 불연속면 거동을 조사하기 위해서 <표 3-34>와 같은 세 가지 구간에 대해서 현장 계측이 수행되었고, 한국의 겨울 및 여름철인 2015년 3월과 8월, 여주 스마트 하이웨이 시험도로에 위치한 CRCP 및 JCP 구간의 포장표면 온도변화 및 불연속면 거동을 계측하였음
- 환경 조건을 최대한 동일하게 유지하기 위해 CRCP와 JCP 계측 구간은 약 200m 떨어진 근접한 곳으로 설정한 후 2015년 12월 CRCP 구간에 25mm 두께의 미립도 아스팔트 덧씌우기, 2016년 7월 JCP 구간에 25mm 두께의 미립도 및 CRCP 구간에 25mm 두께의 배수성 아스팔트 덧씌우기를 시공함으로써 덧씌우기 후 불연속면 부 위치의 온도 변화 및 거동 계측을 실시

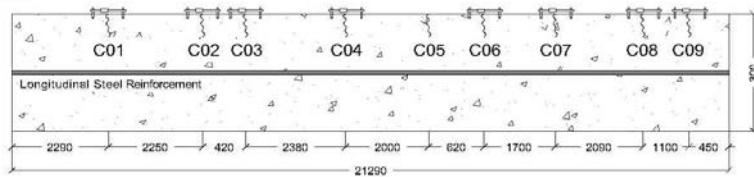
&lt;표 3-34&gt; 계측 구간 상세 정보

포장 형식	JCP	CRCP
계측 구간	여주 스마트 하이웨이 시험도로 구간	
시공 날짜	2002	
철근 비	N/A	0.6%
포장 두께	300mm	
줄눈/균열 간격	6m	N/A
AC 덧씌우기 두께	25mm 미립도 (2016.07)	25mm 미립도 (2015.12) 25mm 배수성 (2016.07)
계측 시기	덧씌우기 전 여름철 (2015.08)	겨울철 (2015.03) 여름철 (2015.08)
	덧씌우기 후 여름철 (2016.07)	겨울철 (2015.12) 여름철 (2016.07)

- <그림 3-60>은 덧씌우기 전 여주 CRCP 및 JCP 계측 구간과 PCC/AC 덧씌우기 구간의 불연속면 센서 설치 레이아웃을 도식화 한 것임

- CRCP 구간의 경우 여름철 및 겨울철 각각 6개, JCP의 경우 각각 3개의 센서를 설치하였으며 AC 덧씌우기 시에는 상하부 불연속면 위치에 각각 3개씩의 센서를 설치했으며, 설치 위치는 줄눈 및 균열의 상태, 간격 등을 고려하여 선정했음
- 아스팔트 덧씌우기에 의한 센서 손상 방지를 위해 스틸 커버와 실리콘을 이용하였으며, 줄눈 및 균열 부에 2cm 깊이의 얇은 흙을 만든 뒤 센서를 설치하고 이를 스틸 커버 및 실리콘으로 보호한 후 AC 덧씌우기를 실시함
- 계측은 여름 및 겨울철 모두 시작 날 12:00pm부터 끝나는 날 12:00pm까지 약 1주일간 실시하였고, <그림 3-61>은 계측 기간 동안 포장 표면의 온도 및 개별 불연속면 계측 지점의 상대 변위를 나타낸 것으로 CRCP 겨울철 C08번의 경우 계측 중 센서 오류가 발생하여 본 데이터 분석에 값을 포함시키지 않음
- 전체적인 경향은 기존 연구결과들과 마찬가지로 온도가 감소할수록 콘크리트 슬래브가 수축하여 상대변위가 커지고 온도가 증가할수록 팽창하여 상대변위가 감소하는 일관된 형태를 보여주었음
- 세부적으로는 포장 표면 온도 변화의 크기는 겨울철 평균  $-6 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 까지 약  $30^{\circ}\text{C}$ , 그리고 여름철 평균  $17 \sim 42^{\circ}\text{C}$ 까지 약  $25^{\circ}\text{C}$ 로 기록됨
- 일간 불연속면 움직임의 크기는 겨울철의 경우 일정하진 않았지만 평균 1.5m의 균열 간격을 보인 CRCP가 0.54mm, 그리고 6m 줄눈 간격의 JCP 가 0.71mm의 값을, 여름철의 경우에는 CRCP 균열 부 0.05mm, 그리고 JCP 줄눈부가 0.48mm로 약 10배의 차이를 보여주었음
- 겨울철에는 CRCP 균열 부의 움직임이 JCP 줄눈 부에 비해 약 24% 작은 값을 보인 것에 비해 여름철에는 그 비율이 약 90%까지 증가한다는 것이 관찰됨

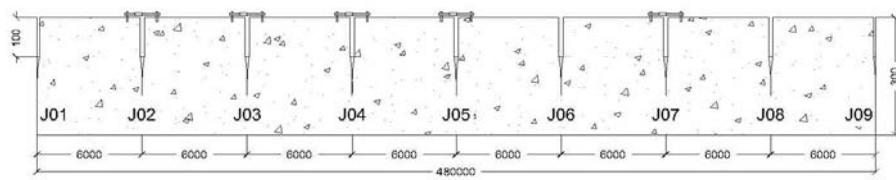
< CRCP >



Summer Crackmeter : C02, C03, C04, C06, C07, C09

Winter Crackmeter : C01, C02, C03, C04, C07, C08

< JCP >



Summer Crackmeter : J04, J05, J07

Winter Crackmeter : J02, J03, J04

: Crackmeter

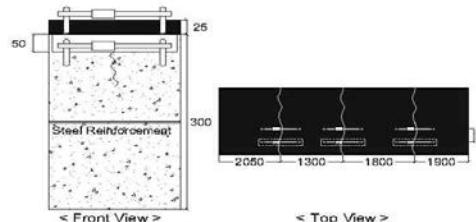
: Con'c

: Longitudinal Steel

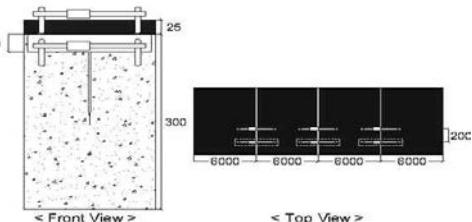
• All measurements are in millimeters (mm)

a) Sensors installation layout (Non Overlay Sections)

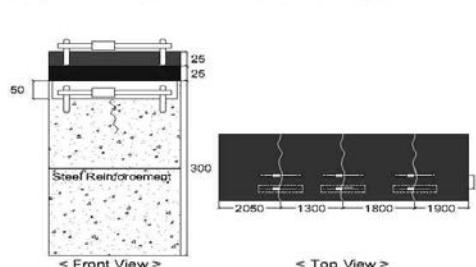
< Yeoju CRCP + AC (Dense 25mm)\_Winter >



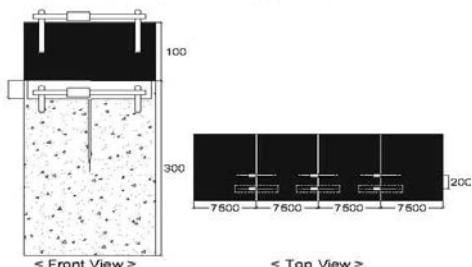
< Yeoju JCP + AC (Dense 25mm)\_Winter >



< Yeoju CRCP + AC (Dense 25mm + Porous 25mm)\_Summer >



< Gimpo Airport JCP + AC (Dense 100mm)\_Summer >

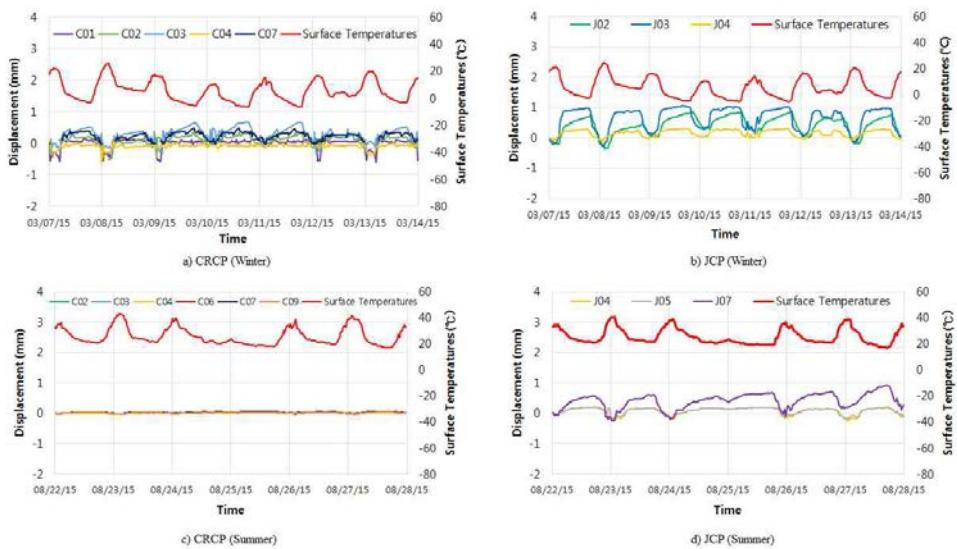


: Crackmeter : Con'c : Longitudinal Steel : Dense : Porous : Under Crackmeter

• All measurements are in millimeters (mm)

b) Sensors installation layout (Overlay Sections)

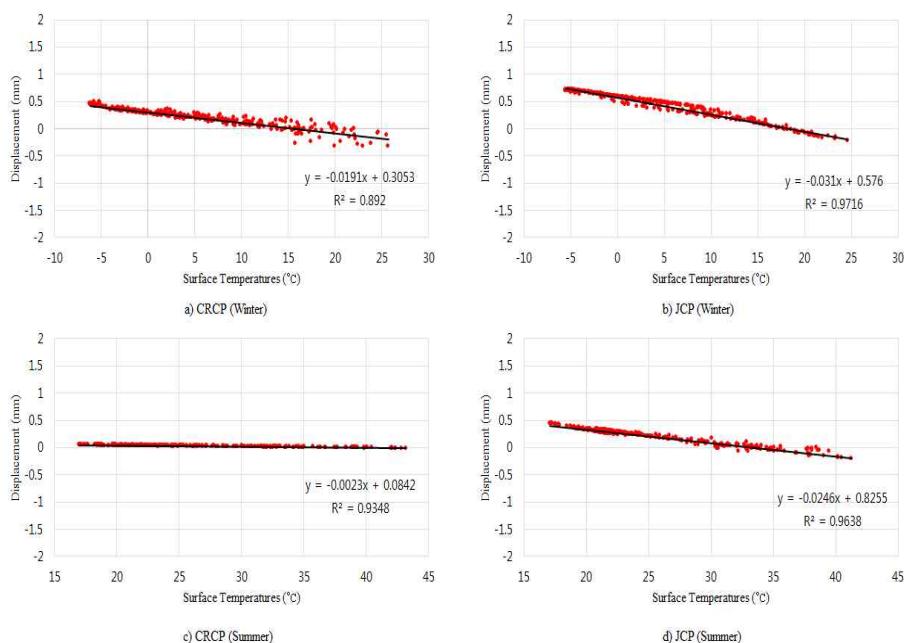
<그림 3-60> 센서 설치 상세 정보



<그림 3-61> 각 구간의 포장 표면 온도 및 불연속면 상대 변위 계측 결과 :

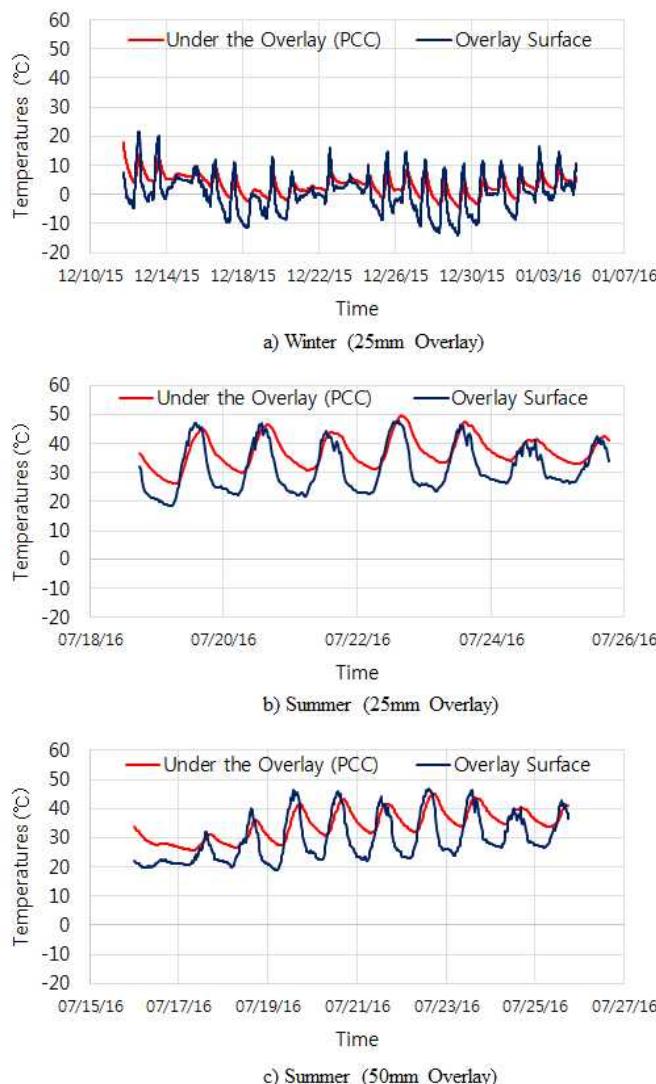
a) CRCP/겨울, b) JCP/겨울, c) CRCP/여름, d) JCP/여름

- 온도 변화와 움직임의 상관관계를 더욱 명확하게 확인하기 위해 <그림 3-62>와 같이 포장 표면 온도에 대한 각 불연속면의 평균 상대 변위 그래프로 나타냄
- 이후 선형회귀분석을 통해 1차식으로 표현된 기울기를 DMR(Discontinuity Movements Rate)로 정의하였으며, 이 값 역시 앞서 계측 기간 동안 개별 불연속면의 일 평균 거동을 분석한 결과와 유사한 경향을 나타냄
- 계절 간 비교에 있어서는 CRCP (Winter : 0.0023 mm/°C, Summer : 0.0191 mm/°C)와 JCP (Winter : 0.0310 mm/°C, Summer : 0.0246 mm /°C) 불연속면 모두 겨울철에 비해 여름철에 작은 DMR 값을 나타내었으며, 포장 형식 간 비교에 있어서는 여름의 경우 CRCP가 JCP에 비해 약 90% 작고 겨울의 경우에는 CRCP가 약 38% 작은 DMR 값을 나타내었으나, CRCP 겨울철의 경우에는 측정 기간 동안 동일한 온도에서 다소 흘어진 변위를 나타내어 상대적으로 낮은 결정계수(Coefficient of Determinant) 값을 나타냄



<그림 3-62> 표면 온도와 상대 변위와의 상관관계 분석

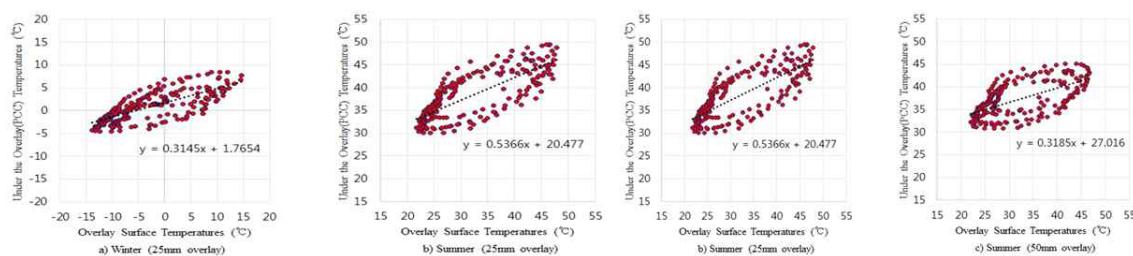
- 본 연구에서는 AC 덧씌우기가 불연속면 거동에도 영향을 미칠 것이라고 가정하고, 앞서 설명한 계측 방법을 통해 기존 콘크리트에 아스팔트 덧씌우기를 시공한 복합 포장의 서로 다른 포장 형식, 계절, 덧씌우기 두께에 따른 Thermal Insulation 효과의 차이를 확인하고 덧씌우기 전후 불연속면의 거동 차이 또한 비교분석 했음
- <그림 3-63>은 각 구간의 계측 기간 중 비교적 계절의 온도 특성이 뚜렷하게 나타나는 기간 동안의 데이터를 적용하여 덧씌우기 표면 온도에 대한 하부 콘크리트 포장의 온도를 비교하여 나타낸 것임
- a)는 콘크리트 포장 상부에 25mm 두께의 덧씌우기를 실시한 겨울철 계측 결과이며 b)는 25mm 두께의 덧씌우기를 실시한 여름철 계측 결과이고 c)는 같은 여름철 50mm 두께의 덧씌우기를 실시한 계측 결과임
- 그래프를 통해 겨울철 AC 덧씌우기 하부 콘크리트 포장의 평균 온도 변화는 약 15°C (-5~10°C), 덧씌우기 표면에서는 약 30°C (-15~15°C)인 것을 확인하였고 25mm 덧씌우기를 실시한 여름철의 경우에는 약 20°C (30~50°C)의 하부 콘크리트 포장 평균 온도 변화, 그리고 25°C (22.5~47.5°C)의 덧씌우기 표면에서의 평균 온도 변화를 보여줌
- 50mm 덧씌우기를 실시한 여름철의 경우에는 약 15°C (30~45°C)의 하부 콘크리트 포장 평균 온도 변화, 그리고 25°C (22.5~47.5)의 덧씌우기 표면에서의 평균 온도 변화를 나타냄



<그림 3-63> 덧씌우기 표면 및 하부 온도 변화 비교

- <그림 3-64>와 같이 선형회귀분석을 통해 얻어진 기울기 값을 통해 덧씌우기 하부에서의 온도 변화 감소율을 확인하였으며, a)의 경우 약 0.31의 기울기를 나타내어 덧씌우기 표면 대비 69%의 온도변화 감소율을 보여주었고 같은 방법으로 b)에서는 약 0.54의 기울기를 보여 덧씌우기 표면 대비 46%의 온도변화 감소율을 나타냄
- 이를 통해 여름철과 겨울철 모두 하부 콘크리트 포장의 평균 온도 변화 크기가 덧씌우기 표면에 비해 감소되는 현상을 확인하였고, 계절 간 차이는 여름철에 약 23% 작다는 것을 알 수 있었음
- 다음으로 아스팔트 덧씌우기 두께에 따른 온도 변화 감소율의 확인하기 위해서 b)와 c)를 비교하였고, 앞에서 언급했듯이 b)는 25mm 두께의 AC 덧씌우기 구간, 그리고 c)는 동일시기 50mm 두께를 적용한 AC 덧씌우기 실시 구간임

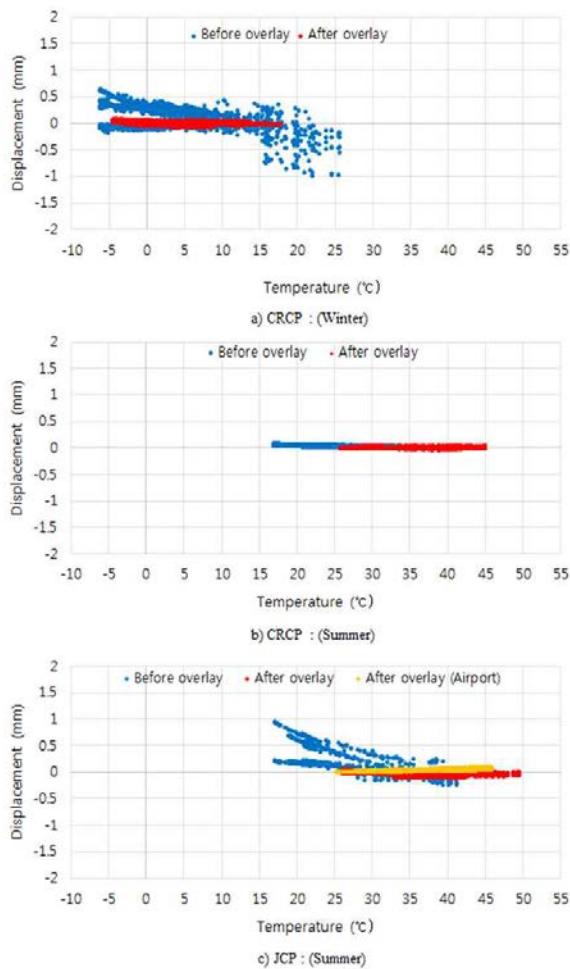
- 그래프에서 c)는 약 0.32의 기울기를 보여 68%의 온도변화 감소율을 보여 주어 50mm 덧씌우기 시 25mm 덧씌우기에 비해 22% 더 높은 온도변화 감소율을 보여주었고, 이는 덧씌우기 두께가 증가할수록 더 큰 Thermal Insulation 효과가 있다는 사실을 나타냈음
- 위 두 결과를 통해 AC 덧씌우기를 적용할 경우 하부 콘크리트 슬래브가 Thermal Insulation 효과를 가지게 되며 이에 따라 불연속면의 움직임 또한 작아질 것이라는 결론을 도출할 뿐만 아니라 Thermal Insulation 효과는 두께가 증가할수록 커진다는 것을 확인하였고 반사균열 발생가능성 역시 더 낮을 것으로 예측함



<그림 3-64> 덧씌우기 표면 온도에 대한 하부 콘크리트 층 온도와의 상관성 비교

- 동일 구간 및 계측 기간 동안의 온도 변화에 대한 AC 덧씌우기 시공 전후 불연속면 움직임의 크기를 비교하였으며 이를 <그림 3-65>와 같이 나타내었음
- 그래프를 통해 육안으로도 덧씌우기 후 움직임의 크기가 매우 작아졌음을 확인 할 수 있으며, 여름철 JCP 덧씌우기의 대해서는 기존 6m 줄눈 간격 및 25mm 덧씌우기가 적용된 여주 시험도로 구간에서 검토를 실시
- 결과는 DMR 값을 통해 비교분석 하였으며 덧씌우기 전 후로 나누어 <표 3-35>에 정리하였음
- 각 DMR은 개별 불연속면 거동의 평균값을 사용하였으며, a); 겨울철 덧씌우기 후 CRCP 구간은  $0.00260\text{mm}/\text{°C}$ 의 DMR을 나타내어 덧씌우기 전의  $0.0191\text{mm}/\text{°C}$ 에 비해 약 86% 감소되었고, b); 여름철 덧씌우기 후 CRCP 구간은  $0.00006\text{mm}/\text{°C}$ 의 DMR 값을 보였으며 이는 덧씌우기 전의  $0.0023\text{mm}/\text{°C}$ 에 비해 약 97% 감소되었음
- 여름철 CRCP는 덧씌우기 전 DMR 값이 이미 매우 작은 수준이었으므로 실제 덧씌우기 전후 균열 폭 거동의 크기를 비교해 본 결과 큰 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있었음
- 이는 앞서 언급했듯이 본 CRCP 측정 구간의 경우, 여름철 고온에 의해 균열 폭이 닫혀 덧씌우기 유무와 관계없이 움직임이 억압 되었다고 할 수 있으며, c); 여름철 덧씌우기 후 JCP 구간은 평균  $0.0013\text{mm}/\text{°C}$ 의 DMR 값을 보였으며 이는 덧씌우기 전의  $0.0246\text{mm}/\text{°C}$ 에 비해 약 95% 감소됨

- 즉 덧씌우기 후에 모든 구간에서 덧씌우기 전보다 최소 86%, 최대 97% 까지 감소된 움직임의 크기를 나타냈으며 이는 Thermal Insulation의 효과 그 이상의 큰 수준으로 확인
- 이는 기존 콘크리트 덧씌우기 상부 AC 덧씌우기가 Thermal Insulation 효과, 상부 아스팔트 층 재료의 콘크리트 상부 부착으로 인한 움직임 억압 효과 및 기타 요인들 인해 하부 콘크리트 포장 불연속면의 움직임 상당한 수준으로 감소된다는 사실을 보여줌



<그림 3-65> 덧씌우기 전후 온도 변화에 따른 하부 콘크리트  
불연속면 거동 비교 a)CRCP/겨울, b)CRCP/여름, c)JCP/여름

&lt;표 3-35&gt; 각 구간의 Discontinuity Movement Rate 분석 결과

Section	Season	DMR (mm/°C)	
		Before Overlay	After Overlay
CRCP	Winter	0.0191	0.00260
	Summer	0.0023	0.00006
JCP	Winter	0.0310	N/A
	Summer	0.0246	0.0013

- 실제 반사균열이 발생하기 전 아스팔트 층이 경험하는 거동은 덧씌우기 후의 하부 콘크리트 불연속면의 움직임이기 때문에 얇은 덧씌우기 포장의 반사균열 저항성 평가를 위해 현재 적용되는 기준 텍사스의 기준이 상당히 보수적이며, 또한 JCP와 CRCP이 서로 다른 거동을 보였기 때문에 기준 또한 각각의 포장형식에 대해 따로 제안되어야 한다는 사실을 확인
- JCP/AC 덧씌우기 시 반사균열 저항성 평가를 위한 출눈 최대 기준은 반사균열 발생의 주요 계절인 겨울철 JCP 포장의 덧씌우기 시 거동을 측정하지 못하였기 때문에 본 연구에서는 균열 발생에 주요 계절이 겨울이라는 현장 계측 결과를 고려하여 불연속면 부 결함 평가를 위한 기준 및 CRCP/AC 얇은 덧씌우기 시 Heart OT에 적용될 새로운 최대개구변위 기준을 제안하는 바임
- 최대개구변위 (MOD : Maximum Opening Displacement)는 본 연구를 통해 얻어진 DMR 값에 최대 포장 표면 온도 변화  $\Delta T$  값인 30, 그리고 안전율 SF(Safety factor)를 곱하여 계산되었으며, 포장의 온도 변화는 기상 조건에 많은 영향을 받기 때문에 안전율은 국내 대기 온도 일교차를 고려하여 설정
- 기상청 통계자료를 통해 계측 구간인 여주의 계측 시기 최대 일교차는 21°C, 년 간 최대 일교차는 2월 철원에서 24°C로 확인되었으며 이에 따라 이 비율인 1.15를 SF 값으로 적용(KMA, 2015)
- 위 과정을 통해 계산된 결과는 <표 3-43>에 나타내었으며, JCP의 경우 1.1mm, CRCP의 경우 0.7mm의 MOD 값을 나타내었으며, 추가적으로 CRCP에 AC 덧씌우기를 한 경우에는 최대 0.1mm의 매우 작은 움직임을 나타낸다는 것이 확인됨

<표 3-36> 불연속면 결합 평가를 위한 거동 관련 제안 기준

포장 형식	제안 최대 개구 변위 (mm)
JCP	1.1
CRCP	0.7
CRCP/Thin Overlay	0.1

- 본 연구를 통해 포장 형식, 기상 조건 및 덧씌우기 유무에 따라 PCC 포장 불연속면 거동특성 역시 달라진다는 사실을 확인하였음
- 일반적으로 겨울철의 경우 여름철보다 큰 불연속면의 움직임을 보여주어 균열 발생에 있어 주요한 계절이라는 것을 확인하였고 그 차이는 CRCP에서 극명하게 드러남
- 덧씌우기 상하부의 온도변화 및 덧씌우기 전 후의 불연속면 거동 특성은 큰 차이가 있음을 확인
- 덧씌우기 후 콘크리트 층 불연속면의 움직임이 매우 작아진다는 것은 주목 할 만한 발견임
- 불연속면 부 결합 평가를 위한 기준을 JCP, CRCP, 덧씌우기 등 포장형식에 따라 다르게 제시하였고, 본 연구 결과는 차후 FEM 분석에 따른 보정 등 추가 연구를 통해 더욱 신뢰도 높은 기준을 마련할 수 있을 것임

## 마. 시험시공 구간 공용성 평가

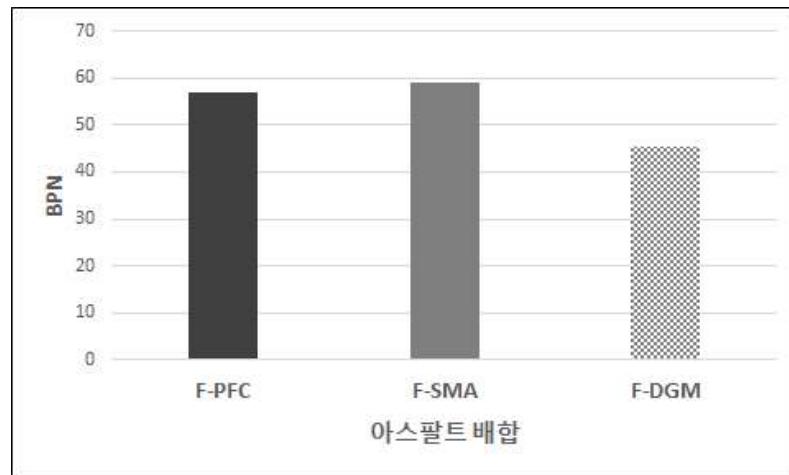
### 1) 미끄럼 저항성 시험

- 포장의 미끄럼 저항성은 도로의 안정성을 평가하는데 가장 중요한 지표 중 하나이며, 우천 시 안정적인 미끄럼 저항성 확보 여부를 평가할 수 있음
- BPT(British Pendulum Test)를 이용하여 포장 종류별로 미끄럼 저항성 실험을 KS F 2375에 준하여 실시하였으며, 평가기준은 <표 3-37>과 같이 미국 인터로킹 블록 협회(ICPI)에서 제시한 BPN 실험 판정 기준을 사용

<표 3-37> BPN 판정 기준(ICPI TECH SPEC, 1998)

BPN	판정
45~55	양호한 기상 및 차량 상태일시 미끄럼에 저항
56~64	심각한 기상 상태만 제외한 조건에서 미끄럼에 저항
65 이상	모든 조건에서 미끄럼에 저항

- BPT(British Pendulum Test)를 F-DGM, F-SMA, 그리고 F-PFC에서 임의의 3지점을 선정한 뒤 구간별 10번의 반복 시험을 한 뒤 평균을 내어 분석하였으며, 실시한 결과는 아래 <그림 3-66>과 같이 정리됨
- F-PFC와 F-SMA의 경우 각각 57 BPN과 59 BPN을 나타내 양호한 미끄럼 저항을 보여주었으며, F-DGM의 경우 위의 두 배합에 비해 상대적으로 낮은 46 BPN을 나타냈고, 모든 배합에서 기준 미끄럼 저항 값 45 BPN 이상을 나타냄



<그림 3-66> 덧씌우기 재료에 따른 BPN 결과 비교

## 2) 현장 투수성 시험

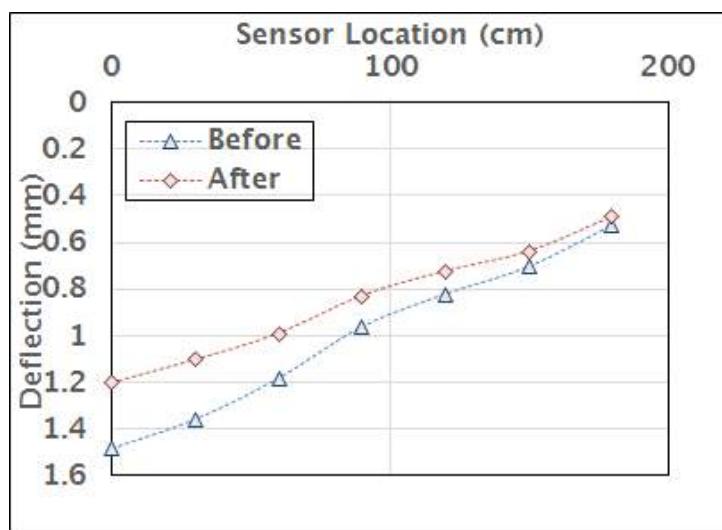
- 투수성 포장체에 대한 현장 투수 시험방법에는 KS F 2394에 의한 투수성 포장체의 현장 투수 시험 방법이 있으며, 본 시험 방법은 품질 관리 담당자가 서로 다른 방법으로 투수성을 산출 했을 경우, 투수성 포장 구조체의 시공 및 전반적인 품질관리를 위해 도입(기술표준원, 2009)
- <표 3-38>과 같이 F-DGM은 400mL의 물이 유하되는데 5분 정도의 시간이 걸려 차수성 확보를 확인하였으며, F-PFC는 4~5초로 투수성이 매우 뛰어나고, F-SMA의 경우에는 위치에 따른 편차가 발생했지만 양호한 결과를 나타냄

&lt;표 3-38&gt; 혼합물 종류에 따른 투수계수 결과

혼합물 종류	투수 계수 (ml/15s)		
F-DGM	25.72	24.21	26.33
F-SMA	244.90	171.43	45.11
F-PFC	2,000	1714.29	1,500

### 3) 아스팔트 덧씌우기 전후 FWD 구조적 지지력 평가

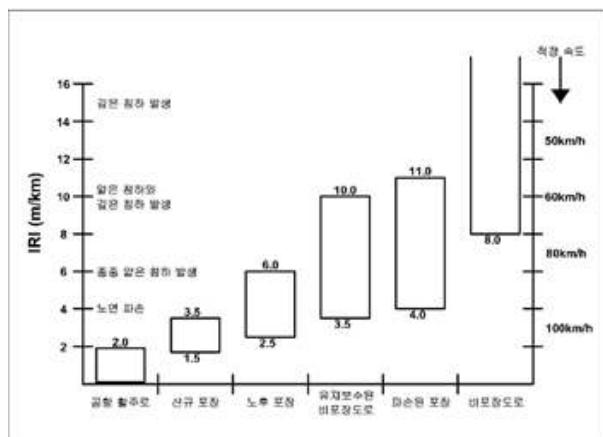
- 현장 시험시공 구간에서 덧씌우기 전후로부터 FWD 시험을 통해 쳐짐량을 얻어내었으며, 장비는 Carlbro를 사용했고, 각 지점에 150mm 지름의 하중판을 이용해 3가지 하중(45KN, 70KN, 90KN)으로 실험을 진행했음
- 쳐짐량 데이터는 10개의 포인트로부터 얻어지며, 3번의 시험을 통해 목표하중을 결정했고, FWD 쳐짐 데이터는 1차적으로 2015년 12월 10일 덧씌우기가 시행되기 전 CRCP 표면 위에서 오후 시간에 진행이 되어 2016년 4월 12일 F-DGM 덧씌우기 시행 후 오전 9시 경 진행이 되었음
- 덧씌우기 전후의 수집된 쳐짐량 데이터를 비교하기 위해서 AC 150/5370-11B에서 제안된 일반화 공식을 사용하여, 일반적으로 사용되는 재하 하중인 9,000lb(40KN)에서의 쳐짐량을 사용했음
- 아래 <그림 3-67>은 하중판이 재하되는 위치부터 7개의 포인트 시험구간에서의 그래프를 나타내며, 덧씌우기 전후의 포인트를 비교해본 결과 쳐짐정도가 덧씌우기 이후에 더 감소된 것을 볼 수가 있었음



&lt;그림 3-67&gt; 덧씌우기 전후의 FWD 쳐짐량 그래프 비교

#### 4) 도로 포장 평탄성 평가

- 국제 평탄성 지수인 IRI(International Roughness Index)는 신규 및 보수된 포장 상태 및 건설 품질 관리 / 품질 보증을 목적으로 평가하는데 사용됨 (Wang, 2006)
- 차량 반응에 영향을 미치는 표면 평탄성 품질을 정의하는데 사용될 수 있으며, 전반적인 사용자 비용, 승차 품질 및 표면 상태와 관련된 조도 측정이 필요할 때 적합한 시험임 (Sayers and Karamihas, 1998)
- 표면 평탄성 측정은 일반적으로 km에 따른 수직방향 m (m/km)로 표시되며, IRI는 표준 차량에 탑재된 서스펜션 동작의 필터링된 비율을 측정 중 차량이 주행한 거리로 나눈 평균 대조 기울기(ASR : Average Rectified Slope)를 기반으로 함
- 본 연구에서는 다양한 표면의 거칠기를 분석하기 위해 워킹 프로파일러미터를 사용하여 계측하였으며, 데이터는 해당 IRI를 계산하기 위해 PROVAL 프로그램을 통해 분석되었음
- 평탄성의 평가 기준은 아래 <그림 3-68>과 같이 포장 적용 구간 및 적정 속도에 따른 기준 IRI를 제시하고 있으며, 덧씌우기가 실시된 모든 구간에서 아래 <표 3-39>와 같이 신규 포장 기준 범위 1.5~3.5m/km를 만족하였음



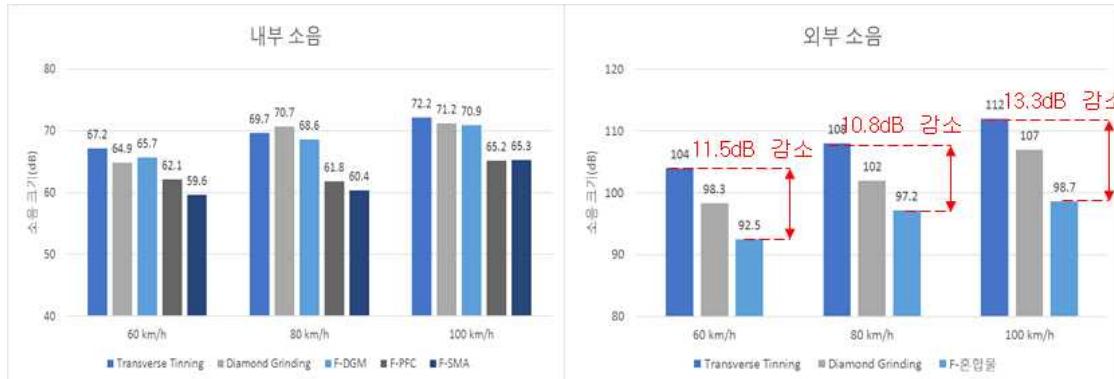
<그림 3-68> 포장의 종류 및 속도에 따른 IRI 평가 기준

<표 3-39> PROVAL 프로그램을 통해 도출된 표면에 따른 IRI 결과

Rigid Pavement		Flexible Pavement		
Transverse Tinning	Diamond Grinding	F-DGM	F-SMA	F-PFC
1.11	1.44	1.52	1.41	1.74

## 5) 재료에 따른 소음 상대 비교 분석

- 아스팔트 장점 중의 하나는 콘크리트 포장에 비해 소음 저감 효과가 있다는 것이며, 콘크리트 포장에서는 소음에 대한 대책 마련을 위해서 타이닝 공법을 이용하고 있고, 본 연구에서 실시된 현장 시험시공 구간에서 횡방향 타이닝과 다이아몬드 그라인딩 표면에 대해서 소음 측정을 실시하였음
- 얇은 아스팔트 덧씌우기 시공 후에도 F-DGM, F-SMA, 그리고 F-PFC 배합에 따른 소음 저감 효과를 분석하기 위해 소음 측정을 실시하였으며, 외부 소음이 차단된 트레일러 박스 내부에서 실시된 것이 아닌 실제 현장에 노출된 상태에서 측정이 되었기 때문에 배합에 따른 상대 비교 분석을 실시하였음
- 기본적으로 포장 소음 감소효과는 3dB 이상으로 정의되고 있으며, 7dB 이상 소음을 감소했을 때 매우 훌륭한 수준의 소음 감소 효과를 정의함 (Hans, 2009)
- 마이크로폰은 실내 운전자가 느끼는 소음을 측정하기 위해 운전석 위에 설치하였으며, 외부 소음 측정은 자동차 타이어에 연결하여 측정을 실시함
- 소음 측정은 차량 속도 60km/h, 80km/h, 그리고 100km/h에서 실시하였으며, 아래 <그림 3-69>와 같이 차량 속도 60km/h에서는 재료에 따른 차이가 크게 나타나지 않았으며, 그 원인으로는 차량의 엔진 소음이 전체 소음을 좌지우지한다고 판단하였음
- 운전자가 느끼는 소음의 정도는 콘크리트 포장과 비교했을 때, 아스팔트 포장에서 속도에 따라 최대 10.3dB 가량 낮아졌음
- 본 연구에서 개발된 혼합물의 소음저감 효과는 F-SMA > F-PFC >> F-DGM 순으로 나타났으며, F-DGM의 경우 그 차이가 충분히 크기 때문에 소음 저감을 위해 기능성 향상을 위한 F-SMA 또는 F-PFC와 병행하여 적용해야함
- 기존 콘크리트 포장과 아스팔트 덧씌우기 후의 소음 정도를 비교 분석한 결과 차량 진행방향과 수직한 횡방향 타이닝에서 가장 높은 소음이 측정되었으며, 아스팔트 덧씌우기 후 최대 13.3dB의 소음 감소 효과

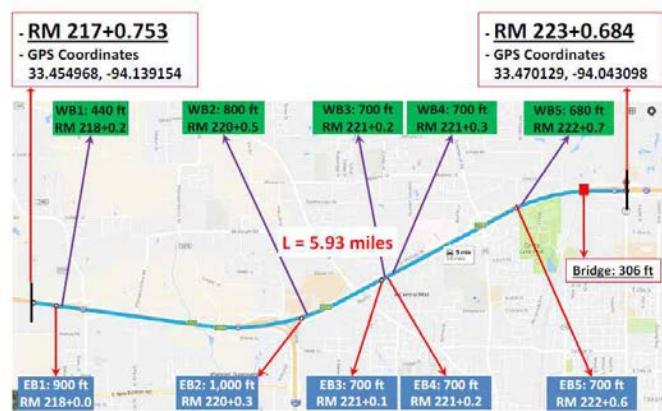


<그림 3-69> 도로 표면 처리 방법 및 속도에 따른 내·외부 소음 결과 그래프

## 2. 미국 텍사스 아스팔트 덧씌우기 및 CRCP 파손 연구

### 가. CRCP 위 아스팔트 덧씌우기 시험시공(IH 30) 개요

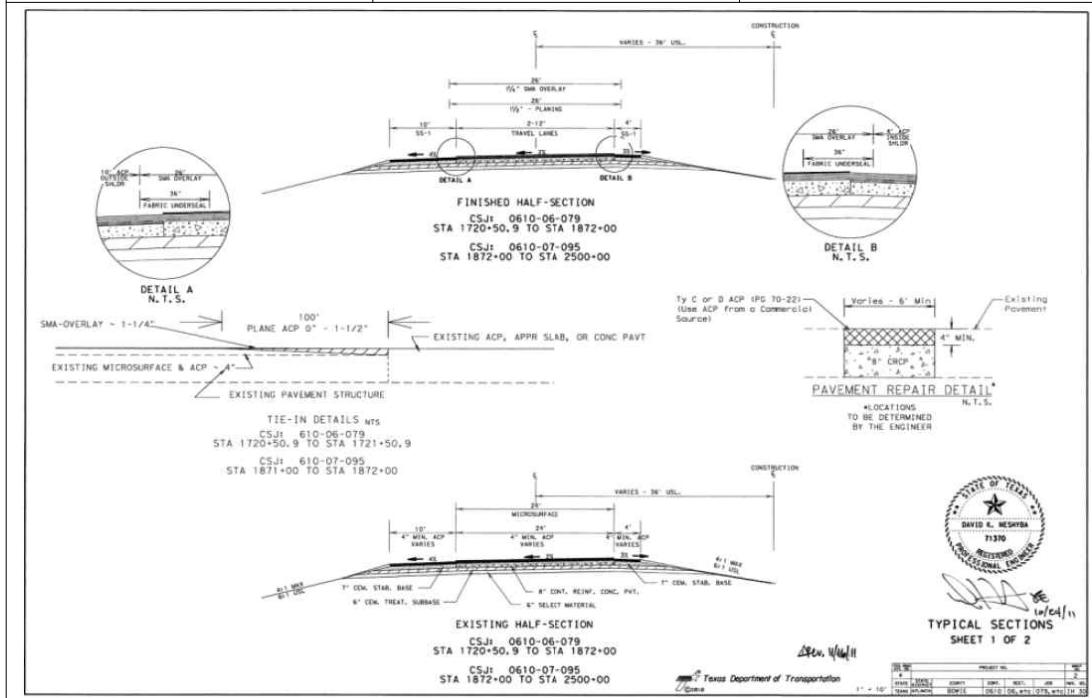
- 2016년 9 월 21 일과 22 일 오후 Atlanta district의 IH 30 구간에서 CRCP 위 아스팔트 덧씌우기에 대한 평가가 수행되었으며, 초기 육안조사를 수행하여 심층적으로 구조 평가를 위한 시험 위치를 결정하고 양방향으로 각각 5개의 시험 구간을 설정하였고, 포장 시험구간은 FM 989 서쪽 0.5 mile에서 Arkansas 주 라인까지 5.9 마일임
- 기존 포장 최적의 유지보수 계획을 개발하기 위해서는 포장 시스템의 구조 평가, 재료 특성 및 각 층의 상태 평가, 파손 메커니즘의 원인 규명을 포함하는 포장의 구조 및 기능적 상태를 정확하게 판단해야하며, 유지보수 계획은 전체적인 포장 상태와 자연 상태에서의 파손을 기반으로 최적의 보수 전략을 포함해야함
- 포장 상태를 평가하고 최적의 포장 유지 보수 계획을 수립하기 위해 현장 시험을 구성하였으며, 현장시험은 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 사용한 구조적 지자력 평가, DCP(Dynamic Cone Penetrometer) 실험 및 코어링을 사용하여 슬래브 상태를 평가하였음
- 콘크리트 코어는 재료의 역학적 성질과 상태에 대해 평가하였고, 아래 <그림 3-70>은 시험시공 위치 및 방향을 나타내며, 포장 구조는 8 in의 석회 처리된 노상, 6 in CTB(Cement Treated Base), 6 in CRCP, 그리고 7 in HMA로 구성되어있다. 기존 포장의 길어깨는 CTB와 HMA로 구성되어있고, 다음 <표 3-40>은 시험 계획으로부터 얻어진 세부적인 포장 정보를 나타냄



<그림 3-70> 시험시공 위치 정보 (IH 30)

<표 3-40> IH 30 시험시공 세부 정보

Attribute	Information	Special Note
CSJ	0610-07-XXXX (CRCP)	
Country	Bowie	
Reference Marker	217+0.753-223+0.684 (5.93 miles)	
GPS Coordinates	33.454968, -94.139154 33.470125, -94.043100	
Construction Year	CRCP (19XX)	2012, FDR + SMA
Pavement Type	4-in var. HMA + 8-in CRCP	
Slab Thickness	4-in var. HMA + 8-in CRCP	
Shoulder Type	4-in var. HMA + 7-in CSB	
Base Type	6-in CTB	
Subgrade Type	8-in LTS	
Drainage Type	Open ditch and,	
Coarse Aggregate Type	Gravel	
Con.Pavement Details	-	



## 나. 현장 육안조사

- 육안조사가 끝난 뒤, 현재 포장 상태를 기반으로 양방향 통합 10개의 구간을 선정
- 두꺼운 아스팔트 덧씌우기가 이 구간에 적용 되어있기 때문에 하부에 존재하는 CRCP와 그 아래층에 있는 구조적 결함과 파손을 나타낼 수 있는 유일한 지표는 아스팔트 표면에 나타난 결함임

- 아스팔트 표면의 결함의 정도가 심각한 구간으로 현장을 선정하여 비교를 목적으로 육안 조사에서 결함이 없는 구간도 선정을 하였으며, <표 3-41>은 단면의 길이와 기준점이 선택된 현장의 위치를 나타냄

<표 3-41> 현장 단면의 포장 상태, 길이 및 기준점 정리표

Test Section	Distresses	Length (ft)	Reference Marker
EB1	No distress	900	RM 218+0.0
EB2	Reflection distress	1,000	RM 220+0.3
EB3	Reflection distress	700	RM 221+0.1
EB4	No distress	700	RM 221+0.2
EB5	No distress	700	RM 222+0.6
WB1	No distress	440	RM 218+0.2
WB2	Reflection crack and distress	800	RM 220+0.5
WB3	No distress	700	RM 221+0.2
WB4	Reflection distress	700	RM 221+0.3
WB5	No distress	680	RM 222+0.7
EB : 동쪽 방향의 현장			
WB : 서쪽 방향의 현장			

- <그림 3-71>은 EB2 구간의 기존 CRCP에서 포장 모서리 편치아웃에 의해 발생 가능한 반사 결함이 보여짐
- 포장구조가 길어깨에 구속되어 있지 않기 때문에 모서리 편치아웃이 발생 되기 쉬운 상태였으며, 아스팔트 길어깨가 사용된 구간으로 모서리 편치 아웃의 전형적인 예시를 보여줌
- 교통 하중이 길어깨로 전달 될 수 없이 때문에 교통 하중으로 인한 포장 모서리의 처짐은 구속된 콘크리트 길어깨가 있을 때보다 상대적으로 크게 나타남
- 외부 차선과 아스팔트 길어깨 사이에서의 평평 현상과 아스팔트 길어깨의 처짐이 관찰되었고, 이는 슬래브 지지력에 결함이 있음을 나타내며, <그림 3-72>는 모서리 편치아웃으로 인한 다른 유형의 파손을 보여줌



<그림 3-71> 기존 CRCP의 모서리 펀치 아웃으로 인한 결함



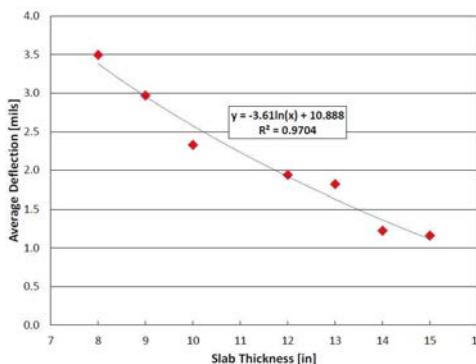
<그림 3-72> 모서리 펀치아웃에 의한 결함

## 다. 포장의 구조적 평가

### 1) FWD 시험

- 포장의 구조적 상태를 평가하기 위해서, FWD와 DCP를 구성하였음
- FWD 시험으로부터 얻은 데이터는 보통 노상 반력 계수를 분석하기 위해 사용되며, CRCP의 장기거동은 슬래브의 지지력에 의존하며, 텍사스에서 실시된 CRCP 전단면 보수에서 기층의 악화는 종종 목격되었고, 대부분 아스팔트 기층 재료가 벗겨지는 현상임
- 악화된 아스팔트 재료는 슬래브 지지력을 감소시켜 펀치 아웃 현상을 유발함
- 본 연구에서는 FWD에 의한 쳐짐 시험을 HMA 표면에서 실시하였지만 적절적으로 노상 지지력 계수 ( $k$ -value)는 도출할 수 없었음
- 쳐짐량 데이터는 큰처짐이 CRCP 포장의 상태가 불량한 상태인지 CRCP와 CTB 사이의 경계 문제인지 여부를 평가하기 위해 실시하는 코어 위치를 결정하는데 사용되었음
- 이 접근 방법의 기본 원리는 슬래브 지지력에 문제가 있을 때, 큰 침하가 발생한다는 것이며, 전반적으로 약한 기층의 상단 또는 콘크리트 포장 도로와 기층 사이의 공극에서의 느슨한 재료에서 발생함

- <그림 3-73>은 기존 TxDOT에서 연구한 처짐량과 콘크리트 포장 두께의 관계를 나타낸 그래프이며, 8-in CRCP에서 일반적으로 3.5mils의 처짐량을 보여주고 있으나, 본 연구에서 선택된 구간에서는 이보다 더 큰 처짐량을 보여줌
- 현재 아스팔트 덧씌우기가 포장의 전반적인 처짐에 미치는 영향에 대한 의견이 서로 충돌하고 있는데, 하나의 보고서에 따르면, 아스팔트 덧씌우기는 CRCP의 처짐에 비해 실제로 포장 처짐량을 증가시킨다는 의견이 있는 반면에, 전체 처짐에 대한 아스팔트 덧씌우기의 효과는 아스팔트 재료의 강성에 따라 달라질 수 있다고 보고되고 있음
- 아래 <표 3-42>는 처짐 데이터를 요약한 것이며, 10개의 구간 모두 평균 처짐은 4.4mils로 8-in CRCP의 전체 평균값보다 크게 나타났고, 7.0mils보다 큰 최대 처짐은 10개의 구간 중 7개의 구간에서 발견되었음
- FWD 시험 동안 상당히 큰 처짐이 발견된 구간에 대해 코어를 실시하였고, 큰 처짐의 발생 원인에 대해 조사하였으며, 여기에는 콘크리트 코어, 경계면 상태 및 DCP 시험 평가가 포함되었음



&lt;그림 3-73&gt; 콘크리트 슬래브 두께에 따른 평균 처짐량 그래프

&lt;표 3-42&gt; 처짐량과 코어 및 DCP 시험 구간에 대한 정보

Test Section	Length(ft)	Reference Marker	Deflection at 9,000lbs(mils)			# of Core	DCP
			Average	Minimum	Maximum		
EB1	900	RM 218+0.0	5.8	4.2	12.7	4	4
EB2	1,000	RM 220+0.3	4.4	2.7	9.5	2	1
EB3	700	RM 221+0.1	4.0	2.1	7.8		
EB4	700	RM 221+0.2	3.5	2.5	5.4	1	1
EB5	700	RM 222+0.6	3.7	2.9	5.0		
WB1	440	RM 218+0.2	4.2	2.7	5.0		
WB2	800	RM 220+0.5	4.8	2.4	9.5		
WB3	700	RM 221+0.2	4.1	2.8	12.0	2	2
WB4	700	RM 221+0.3	4.3	2.9	9.0	3	3
WB5	680	RM 222+0.7	4.9	3.3	7.2		
Average at 9,000lbs(mils)			4.4	2.9	8.3		

## 2) CRCP와 CTB 경계면 조사를 위한 코어

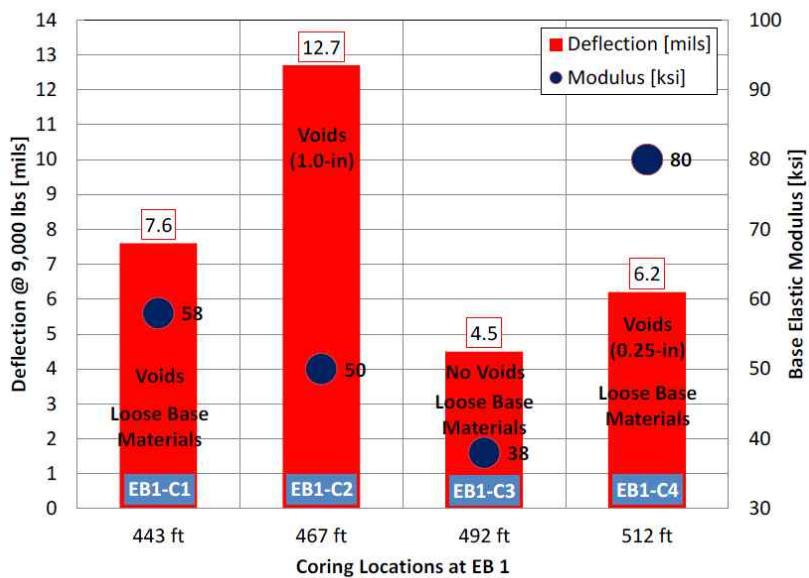
- 신규 포장 및 모든 덧씌우기 설계는 노상 반력 계수가 필요함
- FWD 시험에서 AREA 방법으로 역산된 k-value는 일반적으로 덧씌우기 포장 설계에 적용이 됨
- 본 연구에서는 HMA 표면에서 쳐짐이 측정되었기 때문에 AREA 방법을 사용할 수가 없으며, 아스팔트 덧씌우기 시, 노상 탄성 계수와 k-value의 관계를 나타낸 표로부터 k-value를 구할 수 있지만, 콘크리트 슬래브와 기층 사이의 공극이 있는 경우에는 위의 방법을 사용할 수 없으며, 관찰된 큰 쳐짐은 CRCP 슬래브와 CTB 사이의 잠재적 공극을 나타내므로 도표 적용이 힘듦
- 앞서 설명한 것처럼 콘크리트 코어 위치는 FWD 시험을 통해 선정되었으며, <표 3-43>은 FWD 결과를 바탕으로 선정된 코어 위치와 포장 시스템 정보 그리고 CRCP와 CTB의 경계면 상태의 세부사항을 정리함
- FWD DMI는 각 시험 구간 시작점으로부터의 거리를 나타내며, 카메라를 이용해 경계 조건을 육안으로 관찰하고 직접 확인함으로써 CRCP와 CTB 사이의 경계 조건을 현장에서 조사하여 공극 또는 느슨한 기층 물질이 있는지를 평가함
- 코어 시편 평가 결과 아스팔트 덧씌우기 두께가 6.5in에서 7in까지 변하는 반면에 CRCP 슬래브 두께는 7.5in에서 9in까지 다양하게 존재하는 것을 알 수가 있었으며, CRCP 슬래브와 CTB 사이의 공극은 쳐짐량과 공극 사이의 관계를 더 잘 나타내고 있음

<표 3-43> 코어 위치 및 세부사항 표

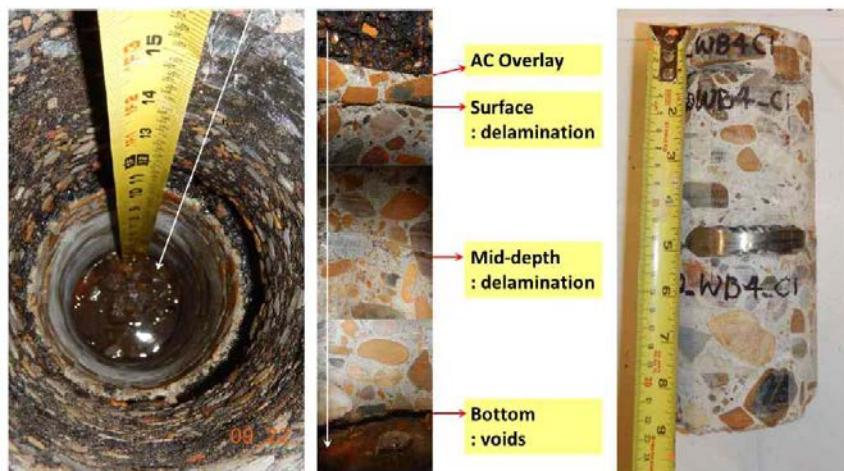
Test Section		Core #	FWD DMI (ft)	Thickness (in)		Deflection at 9,000lbs (mils)	Voids (YES/NO)	Soft base (YES/NO)	Base & subgrade Modulus (ksi)		
Name	Reference Marker			AC	CRCP				Layer #1	Layer #2	Layer #3
EB1	RM 218+0.1	EB1-C1	443	6.5	7.5	7.6	YES	NO	58	126	-
		EB1-C2	467	7.0	7.5	12.7	YES	NO	50	156	-
		EB1-C3	492	6.5	8.0	4.5	NO	LOOSE	38	138	-
		EB1-C4	512	6.5	8.0	6.2	YES	LOOSE	80	80	28
EB2	RM 220+0.4	EB2-C1	154	7.0	8.5	9.5	YES	NO	53	152	-
		EB2-C2	211	7.0	8.0	5.7	NO	LOOSE	-	-	-
EB4	RM 221+0.3	EB4-C1	660	7.5	7.5	5.3	NO	-	54	164	-
WB4	RM 221+0.2	WB4-C1	479	6.5	9.0	9.0	YES	NO	21	89	-
		WB4-C2	501	7.0	8.0	3.3	NO	NO	34	100	-
WB5	RM 222+0.6	WB5-C1	459	7.0	8.5	5.3	NO	YES	7	7	14
		WB5-C2	477	7.5	8.0	7.1	NO	YES	6	6	12
		WB5-C3	518	7.0	8.0	5.8	NO	YES	5	5	12

- EB1의 첫 번째와 두 번째 코어 위치에서의 FWD 처짐은 다른 구간보다 상대적으로 큰 처짐량이 각각 (7.6mils, 12.7mils)이 측정되었음
- 세 번째 코어 위치에서는 앞의 두 구간에서의 처짐량보다 작은 4.5mils의 처짐량이 측정되었고, 추가적으로 첫 번째와 세 번째 구간 사이에 지점에서 6.2mils로 네 번째 코어 위치를 선정함
- 콘크리트의 바닥면이 평평하지 않다는 것이 발견되었으며, EB1-C2에서는 CRCP 슬래브와 CTB 사이에 공극이 관찰되며, 콘크리트 슬래브와 CTB 사이의 1 in 공극은 구간 내 최대 처짐인 12.7mils의 원인으로 볼 수 있음
- 이는 기층의 재료 손실로부터 발생되었다고 볼 수 있는데 코어의 바닥에 있는 골재가 매우 깨끗하게 나타났기 때문에 경계면 사이로 물이 흐른 것으로 추정할 수 있음
- 기층의 느슨한 부위가 발견되지 않은 것은 이미 물에 의해 제거되었다는 증거가 될 수 있으며, EB1-C3의 경우 공극이 발견되지 않았으나, 기층의 재료가 느슨한 것을 볼 수 있었지만 원인이 코어 과정에서 발생한 것인지 기존에 느슨하게 존재했는지 명확하지 않음
- CTB가 건조되고 아스팔트 하부 또는 콘크리트 슬래브에 의해 보호된다면, 기층 재료가 느슨하지 않았을 것임
- EB1-C4의 경우 CRCP와 CTB 사이에 0.25in의 공극이 발견되었지만, 이 위치에서의 처짐은 간극의 깊이뿐만 아니라 공극의 정도가 6.5mils의 처짐량을 일으키는 원인으로 볼 수 있음
- EB1 4개의 코어 시편에 대한 정보는 아래 <그림 3-74>와 같이 나타나며, CRCP와 CTB 사이의 공극이 처짐량에 영향을 크게 미치는 것으로 판단됨
- 위의 분석 결과에 따르면 9,000lb에서의 처짐량이 5.5mils보다 크면 해당 위치에 공극 또는 기층 재료가 느슨해질 가능성이 높다고 할 수 있고, 나머지 구간에서의 데이터 분석은 EB1에서의 가설(5.5mils보다 큰 처짐은 CRCP와 CTB 경계면의 공극 정도에 기반)이 유효한지 여부를 확인하기 위해 실행되었으며, 분석 결과는 가설이 옳다는 것을 나타냄
- 첫째, CRCP 슬래브와 CTB가 완전히 접촉하면 CRCP 시스템의 구조적 지지력은 견고 할 것으로 예상됨
- 둘째, 큰 처짐에 영향을 주는 주된 요인은 공극 또는 기층의 느슨한 재료임
- 공극이나 기층의 느슨한 재료가 없는 경우 WB5 섹션에서 CTB의 강성이 훨씬 낮기 때문에 큰 처짐량이 계측되었음(5~14ksi는 자연 토양의 계수 값과 동일)
- 기층의 강성이 아주 작으면 큰 처짐이 발생할 수 있고, WB4-C1 위치에서 아래 <그림 3-75>와 같이 코어를 실시하였으며, 이 위치에서의 처짐은 9.0mils로 측정되었으며, 예상대로 CRCP와 CTB 사이의 공극이 발견됨

- 콘크리트 슬래브 중간 깊이에서의 수평 균열과 CRCP 표면에서의 얇은 박리가 발생하였으며, 이는 CRCP에서 교통하중이 포장 파손 및 결함의 주요 원인이 아니라는 것을 의미하고, WB4-C1에서 20ft 떨어진 지점의 포장 표면 상태는 좋아 처짐량은 3.3mils에 불과했음



<그림 3-74> 처짐량 vs 공극 그리고 기층 재료 상태



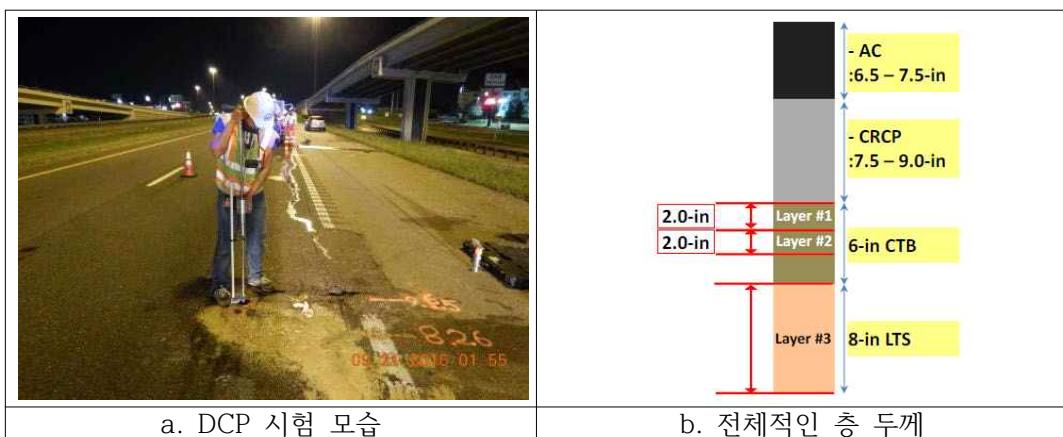
<그림 3-75> 코어부 HMA 육안 조사 및 현장 표면

### 3) DCP 시험

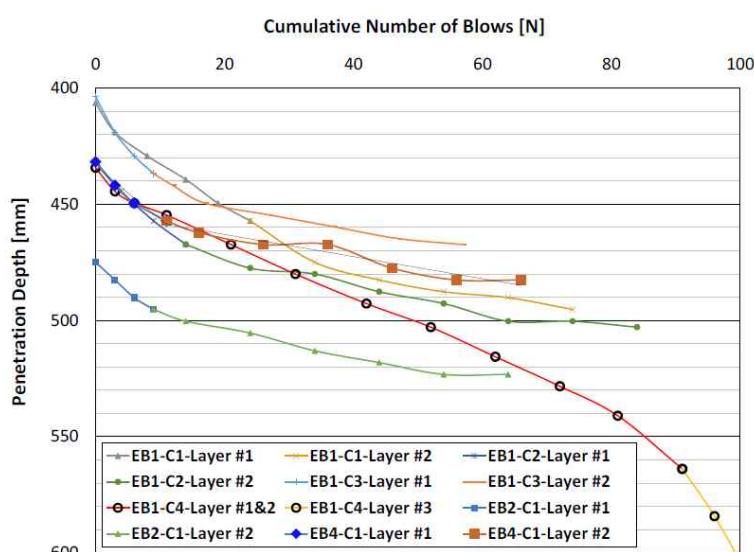
#### 가) 현장 시험 및 데이터 분석

- DCP 시험은 기층과 노상의 강성과 층 두께에 대한 정보를 도출할 수 있음
- 아래 <표 3-44>는 DCP 테스트 모습과 CTB 및 CTS 층의 전체 두께 정보를 보여주며, 이 결과로 HMA 및 CRCP의 평균 두께는 각각 7.0 in와 8.0 in로 나타났음

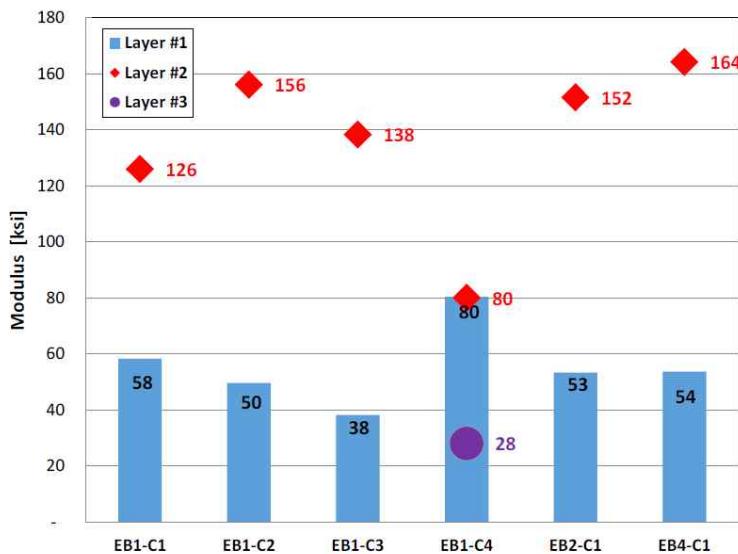
<표 3-44> DCP 시험



- <그림 3-76>와 <그림 3-77>은 동쪽 방향 시험 구간에서의 결과를 나타내며, CTB 상단에서 약 2 in 부분에서의 탄성계수는 다른 층보다 훨씬 낮게 나타났음
- 타이어 휠 하중 및 물의 침투로 인해 상부 CTB에서 손상이 발생한 것으로 해석할 수 있음

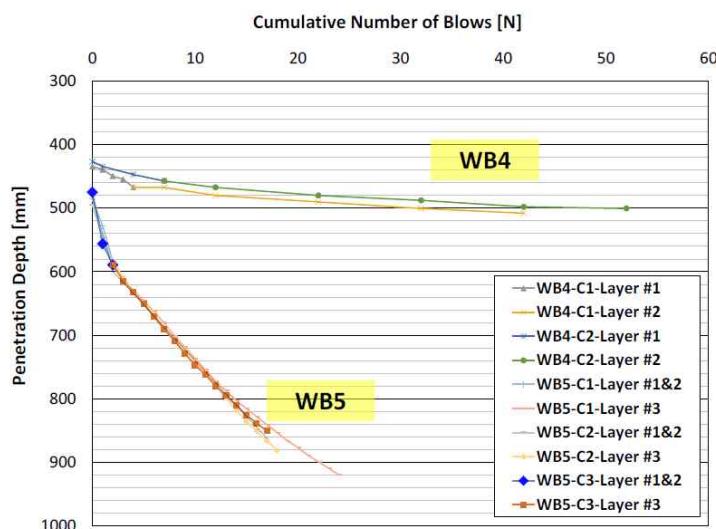


<그림 3-76> 동쪽 방향 DCP 시험 결과

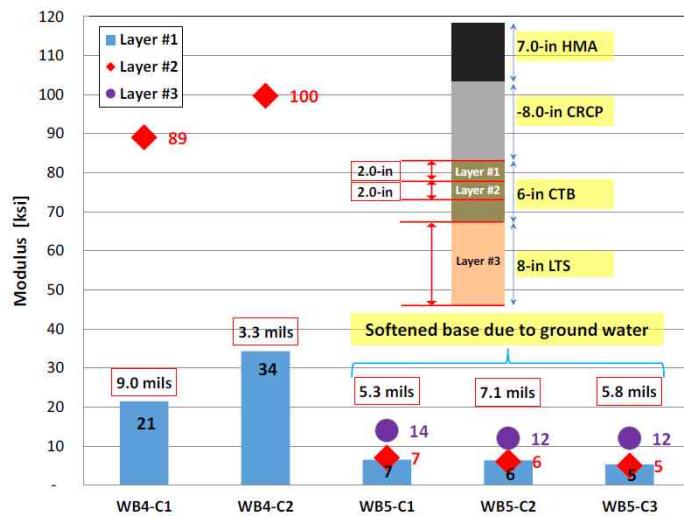


<그림 3-77> 동쪽 방향 탄성계수 그래프

- <그림 3-78>과 <그림 3-79>는 서쪽 방향의 WB4와 WB5에 대한 정보를 나타내며, WB4에서 탄성 계수 값이 높고 예상대로 쳐짐량이 낮게 나타났고, 콘크리트 슬래브와 CTB 사이의 공극으로 인해 WB4-C1이 WB4-C2보다 높은 쳐짐량을 보여줌
- WB5에서 기층의 강성은 매우 작기 때문에 큰 쳐짐량을 보여줬으며, 이는 실제로 CTS의 값보다 더 작게 나타났음
- DCP 시험 결과는 WB5의 위치를 제외하고 전반적으로 기본 품질이 적당하게 나타지 만, CRCP와 CTB 사이의 공극은 여러 구간에서 발견되었으며, 이는 이 연구에서 최적 의 유지보수 공법 선택에 중요한 요소가 될 수 있음



<그림 3-78> 서쪽 방향 DCP 시험 결과 그래프



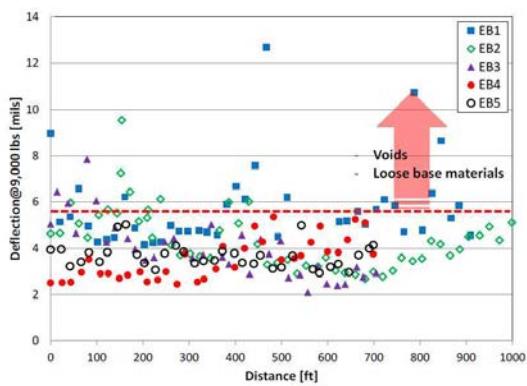
<그림 3-79> 서쪽 방향 탄성계수 그래프

#### 4) 결과 요약

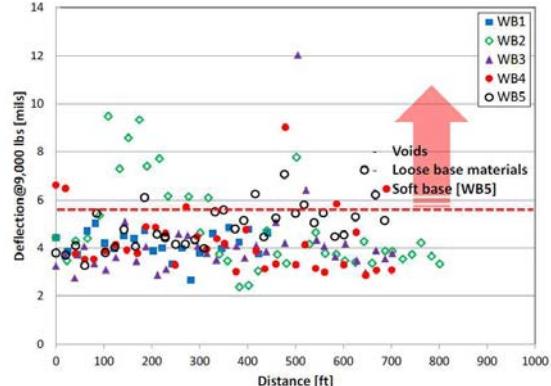
- 현장 시험시공 및 평가로부터 얻은 결과는 아래와 같다.

1. 8 in CRCP의 시공 중에 적절하지 않은 다짐은 벌집 모양의 콘크리트를 야기함
2. CRCP와 CTB 사이의 공극이 여러 구간에서 목격되었으며, 이는 아스팔트 덧씌우기 시 큰 처짐량을 야기함
3. 느슨한 기층 재료가 CTB 상단에서 관찰되었으며, 낮은 강성이 CTB 상단 2 in 부분에서 목격되었기 때문에 아스팔트 덧씌우기 위에 큰 처짐량이 발생함
4. 아스팔트 덧씌우기 상부 처짐이 5.5mils보다 큰 경우 콘크리트 슬래브와 CTB 사이의 공극 또는 느슨한 기층재료 그리고 CTB의 낮은 강성을 원인으로 할 수 있음

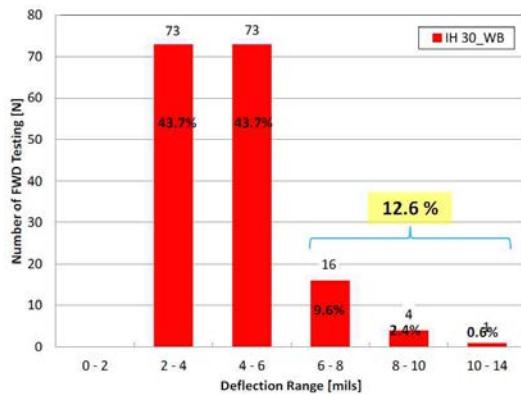
- <그림 3-80>과 <그림 3-81>은 과다한 공극, 느슨한 기층 재료, 그리고 연성의 기층으로 인해 처짐이 5.5mils 이상을 차지하는 구간을 동쪽과 서쪽 방향 각각 나누어 나타내었음
- <그림 3-82>와 <그림 3-83>은 각각 동쪽과 서쪽 방향 차선의 5개 시험 구간에서의 FWD 처짐 빈도를 나타내며, 두 방향 모두 약 10% 구간에서 6mils 보다 큰 처짐이 관찰되었음
- 시험 장소가 무작위로 선택되지 않았기 때문에, 전체 구간의 10%에서 구조적 지지력이 낮다고 분석할 수는 없지만, 수집한 데이터 세트에서 구간의 특정 부분에서 슬래브 구조에 문제가 있음을 나타내기 때문에 최적의 유지보수 전략을 선택하는데 고려해야함



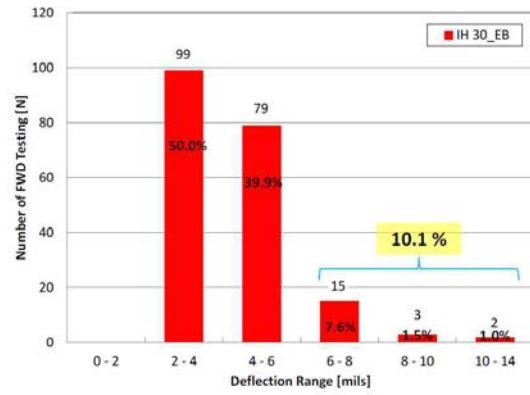
<그림 3-80> FWD 9,000lb에서의 처짐량  
(동쪽 방향 차선)



<그림 81> FWD 9,000lb에서의 처짐량  
(서쪽 방향 차선)



<그림 3-82> 계측 구간 처짐량 분포  
(동쪽 방향 차선)



<그림 3-83> 계측 구간 처짐량 분포  
(동쪽 방향 차선)

### 3. 할인율을 고려한 장기 수명 분석

- 동일한 교통 및 환경조건에서 공용수명 20년을 가정하여 현재 국내 고속도로에서 사용되는 노후 콘크리트 포장의 일반적인 보수방안으로 적용중인 5cm SMA에 동일한 두께의 개질 PSMA를 채택하여 시공하는 단면과 본 연구의 대안 단면인 2.5cm F-DGM + 2.5cm F-PFC 복합 단면 재료에 대한 경제성 분석을 실시하였음
- 아스팔트 혼합물 별 재료 및 시공과 관련된 초기 투자비용과 유지 보수비용을 산출한 것은 <표 3-45>와 같고, 유지보수비용의 경우 재포장을 위한 기존 포장 층 제거 비용을 추가적으로 고려하였으며 이는 사업시행자가 제시한 17,000 /m<sup>2</sup>으로 적용하였음

<표 3-45> 각 재료의 초기 투자 및 유지 보수비용 산정

구분	SMA	PSMA	F-DGM	F-PFC	F-SMA
초기 투자비 (원/ton)	106,481	125,275	114,998	124,999	124,999
유지 보수비	초기 투자비 + 기존 포장 절삭 비용 (17,000 /m <sup>2</sup> )				

- SMA / PSMA 단면의 경우 보수 주기는 10년으로 설정하였으며, F-DGM / F-PFC 단면의 경우 아직까지 장기 공용성 자료가 확보되지 않았지만 기준 단면과의 비교를 위하여 6년으로 가정하였음
- 할인율의 경우, 본 연구에서는 인플레이션 효과를 배제하였으므로 실질 할인율을 적용하였고, <표 3-46>와 같은 통계청(2015)에서 제시한 최근 5년간 물가 상승률 자료, 한국은행에서 통계 산출한 이자율(시장 금리)의 2016년도 기준을 바탕으로 할인율인 1.25%로 적용하였음

<표 3-46> 할인율 적용 근거 (통계청, 2015)

년도	이자율(%)	물가 상승률(%)	실질할인율(%)
2011	3.3	4.0	-0.7
2012	2.8	2.2	0.5
2013	2.5	1.3	1.2
2014	2.0	1.3	0.7
2016	2.0	0.8	1.2

- 본 연구에서 제안한 얇은 아스팔트 덧씌우기에 대한 현행 유지보수 전략의 비용 효율성을 비교하기 위해 초기 비용과 유지 관리 비용을 20년 주기로 적용하여 평가하였음
- 초기 비용의 경우 각 혼합물의 재료비용으로 구성이 되어있음
- 유지보수 전략에 관계없이 장비 및 시공 절차에 필요한 모든 비용은 동일하다는 가정 하에 평가를 실시하였으며, 유지보수 시 밀링 비용과 재료 비용을 합산하여 계산함
- 평가에서 적용된 할인율은 현재 국내 물가 상승률을 기준으로 2%와 실질 할인율 1.25%로 선정함
- 총 유지보수비용은 각 년도 별로 발생하는 비용을 순현가법(Net Present Value Method, NPC)를 이용하여 산출하였으며 <표 3-47>과 같음

&lt;표 3-47&gt; 총 유지보수 비용 산출

구분	총 유지보수 비용 (2015년 순현가)				
	주기(년)	할인율 1.25%		할인율 2%	
		덧씌우기	절삭	덧씌우기	절삭
SMA 5cm + PSMA 5cm	10	25,595	15,024	23,774	13,955
	20	22,614	13,278	19,512	11,457
	계	48,209	28,302	43,287	25,412
F-DGM 2.5cm + F-PFC 2.5cm	6	13,928	15,785	13,325	15,101
	12	12,934	14,657	11,838	13,415
	18	12,011	13,610	10,518	11,918
	계	38,872	44,052	35,681	40,434
F-DGM 2.5cm + F-SMA 2.5cm	6	13,928	15,785	13,325	15,101
	12	12,934	14,657	11,838	13,415
	18	12,011	13,610	10,518	11,918
	계	38,872	44,052	35,681	40,434

- 위 내용을 바탕으로 혼합물 밀도를  $2.4t/m^3$ 로, 폭 3.6m인 1차선, 총 거리 1km인 구간을 가정하고 이에 대하여 LCC(Life Cycle Cost Analysis) 분석을 실시
- 유지보수 조건의 경우 설정한 것과 같이 각 단면 별로 10년 또는 6년마다 누계 비용이 증가하게 되고 이를 고려한 총 생애주기비용은 계산한 것은 <표 3-48>과 같음
- 총 생애주기 20년을 바탕으로 발생한 비용 합계는 할인율 1.25%에서 7% 그리고 할인율 2%에서 10% 가량 낮게 계산됨
- SMA 5cm / PSMA 5cm를 10년 유지보수 빈도로 적용할 경우 할인율 1.25%에서 총 생애주기비용은 약 3억 8천만 원으로 계산되어 약 3억 5천만 원으로 계산된 F-DGM 2.5cm / F-PFC 2.5cm 단면이 km 당 3 천만 원의 비용을 절감할 수 있음

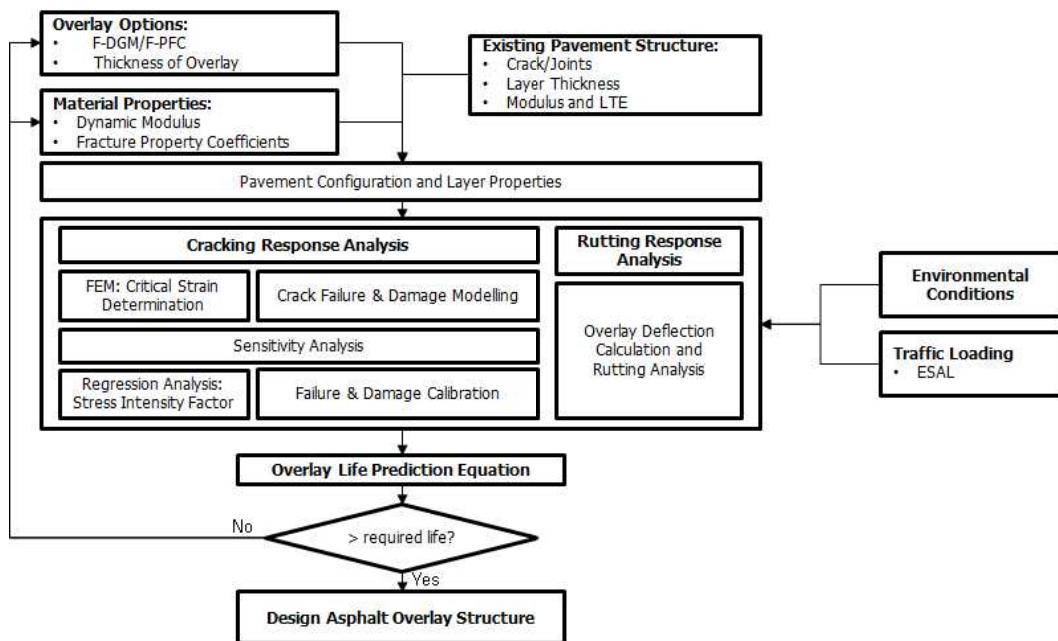
&lt;표 3-48&gt; 총 생애주기비용 산출

구분	총 공사비 (천원)					
	할인율 1.25%			할인율 2%		
	SMA+PSMA	F-DGM+F-PFC	F-DGM+F-SMA	SMA+PSMA	F-DGM+F-PFC	F-DGM+F-SMA
초기투자비	104,290	53,999	53,999	118,133	53,999	53,999
유지관리비	275,438	298,527	298,527	247,316	274,014	274,014
합계(LCC)	379,728	352,526	352,526	365,449	328,013	328,013

## 제4절. CRCP 및 복합포장 시스템 설계법 마련

### 1. 설계법 개발 개요

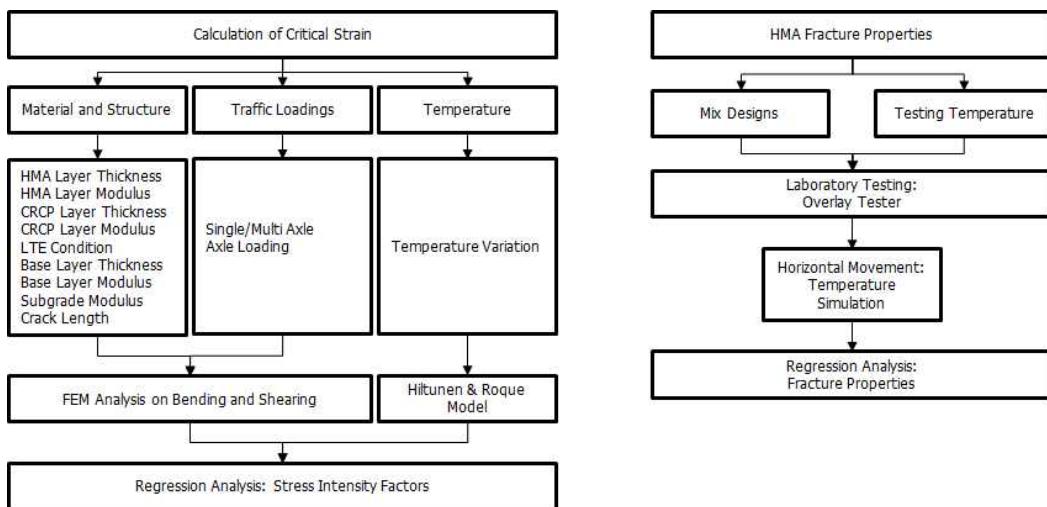
- 기존 콘크리트 포장 위 아스팔트 덧씌우기는 다양한 아스팔트 포장 파손 메커니즘을 적용하고 있으나, 러팅과 반사균열 진전을 주된 기준으로 사용하고 있음
- 아스팔트 덧씌우기 두께는 교통 및 온도 및 습도에 의한 환경 하중 그리고 아스팔트 재료와 같은 다양한 요소에 의해 결정됨
- 이들 요소들을 적용하기 위해서는 복잡한 조건을 고려한 설계 논리를 세워야 함
- 설정된 설계 흐름도는 아래 <그림 3-84>와 같은데 반사 균열과 러팅 저항성 분석을 통해 해당 두께를 설정하는 논리를 따르고 있음
- 아스팔트 덧씌우기의 수명은 반사균열과 러팅 정도가 설계기준에 만족하지 않을 때마다 입력 변수를 조정하고, 요구 수명과의 비교를 통해 두께를 계산하도록 설계되었음



<그림 3-84> 아스팔트 덧씌우기 설계 흐름도

- TTI에서 개발한 포장 구조물의 러팅 성장 모형은 본 연구에 적용하여 평가하였으며, 균열 모델은 재료, 구조, 교통 및 온도 하중 조합을 기반으로 임계변형율을 계산하는 응력 강도 계수(SIF, Stress Intensity Factor) 개념을 사용하였다

- 국내 재료를 가지고 균열 진전상황을 모사하는 HEART-3D 아스팔트 반사 균열 시뮬레이션의 결과는 SIF 방정식을 유도하는 용도로 사용되었으며 회귀 분석을 사용하여 통계적으로 정의하였음
- 아래 <그림 3-85>는 SIF 및 파괴 특성 결정을 위한 과정을 나타내는 데, TTI의 한계 변형율 방정식에 따라 흔 및 전단 변형율을 구하고 이를 이용하여 파괴 응력에서 적용되고 있음 Paris' 법칙을 따라 균열 진전양을 추정하였음



<그림 3-85> 균열 특성 및 응력 강도 계수 산정 및 보정

## 2. Paris' Law를 이용한 반사균열 예측 모델 개발

- 파괴 역학적 접근법은 포장 균열 예측에 널리 사용되었으며, 1963년 Paris 와 Erdogan에 의해 개발된 균열 확장법이 가장 보편적으로 적용되고 있음
- 파괴 역학의 핵심 개념은 균열 확장 모델인 Paris' Law이며, 이는 아래 식과 같이 표현됨

$$\frac{dc}{dN} = A(\Delta K)^n$$

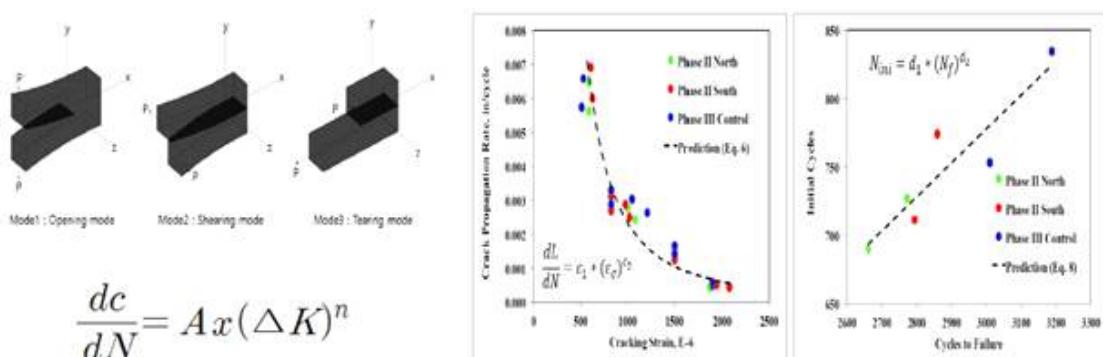
여기서,

$$\frac{dc}{dN} : \text{균열 확장률}$$

$$\Delta K : \text{응력 강도 계수의 변화}$$

$$A \& n : \text{실험을 통해 결정된 재료의 파괴 특성}$$

- 아래 <그림 3-86>은 여러 연구에서 재료의 파괴 특성을 얻기 위한 변수를 결정하는 방법이 제시되어 있음
- 균열 확장 과정은 균열이 벌어지는 것을 모사한 모드 I, 전단에 의해 균열이 발생하는 모드 II, 그리고 양 옆으로 찢어지는 형태의 모드 III 또는 각 모드의 조합으로 이루어져 있음 (Majidzadeh, 1970)
- 이는 균열이 3축 방향 하중에 의해서 발생하는 것을 의미하지만 텍사스에서 는 모드 I에 의한 균열 발생 및 확장에 대한 연구만이 진행되고 있음



<그림 3-86> 재료의 파괴 특성을 위한 변수 도출

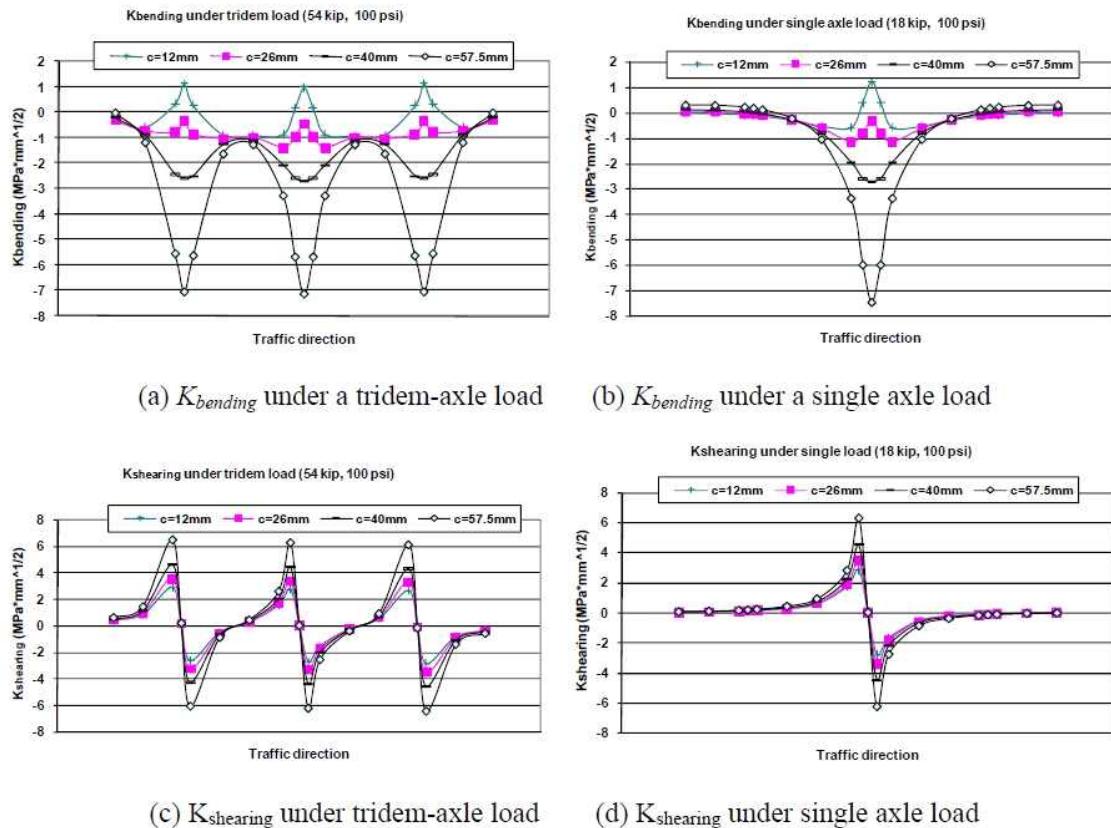
### 3. FEM을 통한 응력인자 또는 K 값 결정

- SIF 계산은 반사 균열 확장 분석에 있어 매우 중요하며, 유한요소 분석은 응력의 특성 또는 K 값을 도출하기 위해 사용됨
- TTI는 3차원 해석에 필적하는 계산 및 결과를 제공하기 위해, 2차원 SIF 계산 프로그램인 유한 용소법을 적용한 균열 확장 프로그램을 개발했음 Zhou et al(2009)
- HMA 오버레이, 기존 JCP, 기초 및 노상으로 구성된 4 층 포장 구조물을 사용하여 전단 SIF에서 중요한 영향을 주는 매개 변수를 확인했으며, 아래 <표 3-49>는 계산에 사용된 포장 구조의 두께와 재료 특성을 포함하는 인 자들의 구성을 나타냄
- 아스팔트 덧씌우기 층, 기존 PCC 콘크리트 층, 기층, 노상까지 4개의 층으로 구성된 포장체는 주요 매개변수로 사용되었고, 재료물성 또한 요소 설계에 포함되었음

&lt;표 3-49&gt; 계산에 사용된 포장 구조의 특성

매개변수	범위	설정값	시험 반복횟수
H1:HMA 두께 inch(cm)	2~8 (5~20)	2, 4, 8 (5, 10, 20)	3
E1:HMA 탄성계수 ksi(MPa)	290~2200 (2000~15168)	290, 870, 2200 (2000, 5998, 15168)	3
H2:기존 PCC 두께 inch(cm)	8~14 (20~35)	8, 10, 14 (20, 25, 35)	3
E2:기존 PCC 탄성계수 ksi(MPa)	2900~5800 (20000~40000)	2900, 5800 (20000, 40000)	2
하중전달률(LTE) (%)	10~90	10, 50, 90	3
H3:기층 두께 inch(cm)	6~18 (15~45)	6, 18 (15, 45)	2
E3:기층 탄성계수 ksi(MPa)	15~500 (103~3447)	15, 100, 500 (103, 689, 3447)	3
E4:노상 탄성계수 ksi(MPa)	4~17 (27~117)	4, 7, 17 (27, 48, 117)	3
c/H1 (c:균열률)	0.2~0.8	0.2, 0.4, 0.6, 0.8	4

- 단순화를 위해 다 축(Dual, Tandem 등) 및 차량 등급에 따른 교통 하중은 포장 설계 절차에서 채택하는 ESAL 개념을 통해 처리됨
- 포장의 반응 및 관련 성능에 대한 전 하중 스펙트럼의 영향은 MEPDG에서 고려한 것들을 채택함
- 굽힘 및 전단 SIF에 대한 다양한 교통 하중의 영향을 고려하였음
- 2축 및 3축 하중의 굽힘 및 전단에 대한 K 값의 결과는 <그림3-87>과 같이 단일 축 하중과 거의 동일하다는 것을 보여주었으므로 다축 하중은 단일 축 하중의 반복 적용하는 것으로 처리하였음



<그림 3-87> 3축과 단축 하중의 K 값 비교 (Zhou et al, 2009)

- 단축 교통 하중의 경우 타이어 압력, 접촉 면적 혹은 둘 다의 변화로 하중 수준은 매우 광범위하며, K값은 동일한 접촉 면적에 대해서는 타이어 압력에 선형적으로 비례하기 때문에 <표 3-50>과 같이 100psi 타이어 압력만을 분석에 사용했음
- 일정한 타이어 압력 하에서 접촉 면적이 변화하는 경우 K값은 각 접촉 면적에 대해 구체적으로 계산되어야 함
- 타이어의 압력이 일정할 경우 하중 수준이 증가함에 따라 타이어 길이 및 관련 접촉 면적이 증가하는 것으로 보고되었지만 유효 타이어 폭은 하중 수준에 따라 거의 변하지 않음(Fernando et al, 2006)
- 6.2인치의 일정한 유효 타이어 폭이 주로 이용되고 있음(Huang, 1993)

&lt;표 3-50&gt; 단축 교통하중의 변수

축하중 kips(키로파운드)	타이어압력 psi(MPa)	타이어 유효폭 inch(cm)	타이어 길이 inch(cm)
4	100 (0.689)	6.2 (15.8)	1.6 (4.1)
11	100 (0.689)	6.2 (15.8)	4.4 (11.2)
18	100 (0.689)	6.2 (15.8)	7.2 (18.3)
25	100 (0.689)	6.2 (15.8)	10.0 (25.4)

- 각 포장 구조물에 대해 4가지 하중 수준 하에서 휨 및 전단 모드의 SIF를 계산하였는데, 굽힘 모드는 균열의 상단에 있는 즉 하중이 균열 중심에 재하된 것을 나타내며 전단 모드는 균열의 모서리에 적용된 것을 가정하여, 전체 factorial 디자인에 따라 32개의 회귀 방정식을 생성함.
- 18-kip(80KN) 단축하중에서의 응력 강도 계수를 회귀식을 이용하여 휨 응력 강도 계수( $K_b$ ) 및 전단 응력 강도 계수( $K_s$ ) 값을 도출할 수 있음
- 온도 하중 하에서 HMA오버레이는 종종 긴 하중 시간으로 인해 강한 점탄성 거동을 나타내어 균열 확산에 Paris' law를 적용 할 수 없지만 Hiltunen과 Roque(1994)는 저온 균열에 대한 하이브리드 접근법을 성공적으로 개발했으며, 이 방법은 온도 하중 모드를 위한 SIF의 개발에 사용
- HMA 오버레이와 기존 PCC 포장 사이에 연속적으로 접촉면이 있는 2층 포장 구조가 사용되었는데, 채택된 반 연속 조건은 PCC 슬래브와 기초 층 사이의 접촉면에 지정되었으며, 유도된 온도 응력 강도 계수( $K_t$ ) 계산식은 <부록 2>에서 다뤄졌음.
- 열 응력의 계산을 위한 핵심은 HMA오버레이 재료에 대한 Relaxation Modulus  $E(t)$ 의 기준 곡선을 개발하는 것으로 HMA 재료의 동적탄성계수 ( $|E^*|$ )는 아스팔트 오버레이 두께 설계의 주요 입력 값 이므로  $E(t)$ 는 선형 점탄성 함수들 사이의 상호변환(Park and Schapery, 1999)을 통해 동적계수 ( $|E^*|$ )로부터 측정됨
- $E(t)$ 를 이용하면 온도 응력은 Boltzmann방정식의 중첩 원리에 기초한 1차 원 점탄성 구성 방정식을 기초로 하여 계산 할 수 있음

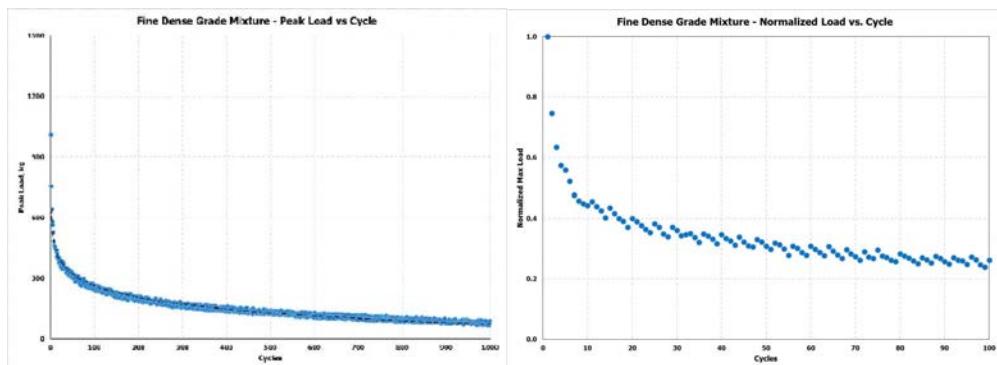
$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} d\tau$$

여기서,

- $\sigma(t)$  : 시간에 대한 응력 또는 온도 응력
- $E(t-\tau)$  :  $t-\tau$  시간에 relaxation 탄성계수
- $\epsilon$  : t 시간에서 변형율

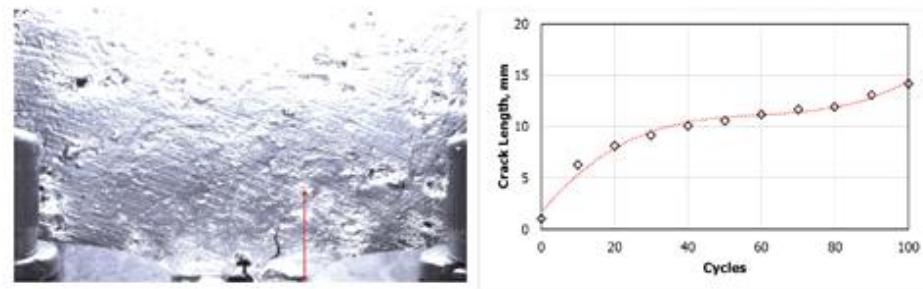
#### 4. OT 시험 결과를 이용한 HMA 파괴 물성 ( $A, n$ ) 결정

- 다양한 하중 조건 상의 SIF를 FEM을 이용해 결정한 후 Pars' law 반사 균열 진전 모델을 적용하기 위해선 아스팔트 혼합물의 파괴 물성 ( $A, n$ ) 결정을 필요함. 1970년대 초 아래로 HMA 혼합물의 파괴 물성에 대한 연구가 수행되어 왔음(Majidzadeh et al, 1970) (Zhou et al, 2009)
- 반복 직접 인장 시험, 간접 인장 시험(IDT), 반원 휨 시험 등 다양한 시험이 적용되었으나 시편 준비와 시험에 많은 시간이 소요되는 문제가 있어 덧씌우기 시험 결과를 이용한 HMA 파괴 물성을 결정하기 위한 분석적 방법론을 제시함 (Zhou et al, 2007)
- 텍사스 방법인 덧씌우기 시험 과정은 오직 파괴 모드 I (발생 및 또는 휨 모드 하중) 만을 반영하는 데 파괴 모드 II (전단 모드 하중)의 특성을 충분히 반영하는 성능 시험이 당시에는 존재하지 않기 때문에 Zhou et al(2009)은 파괴 모드 I과 II가 같은 파괴 물성을 가지는 것으로 가정함
- 최대 하중과 횟수에 대한 그래프를 그린 후 초기 최대 하중이 1이 되도록 y축을 정규화 하며, 최대 하중과 파손에 이르기까지 횟수를 그래프로 표현했는데, 아래의 그래프 <그림 3-88>은 각각 정규화 전 후 그래프를 보여줌



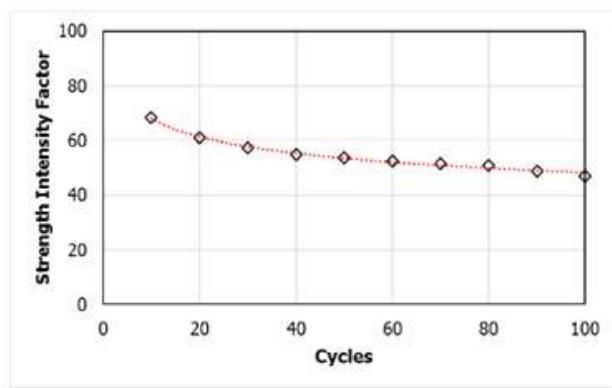
<그림 3-88> 최대하중과 파손에 이르기까지 횟수의 관계

- 정규화 된 최대 하중과 균열 길이에 대한 그래프를 바탕으로, Zhou et al(2009)은 회귀 방정식을 이용하여 하중 감소를 기반으로 균열 길이를 예측함
- 본 연구팀이 개발한 HOT OT장비에는 카메라가 추가 설치되어 있으므로 이를 이용하여 시간에 따른 균열 확장을 모니터링 할 수 있어, 이는 실제 균열 확장 및 길이를 도출해낼 수 있으므로 추정된 길이에 비해 정확한 값을 만들어 낼 수 있음.
- 즉 반복횟수에 따른 균열 길이 계측은 텍사스에서 사용하고 있는 역산 기법을 대체할 수 있으며, 아래 <그림 3-89>와 같이 실제 균열을 적용하여 보다 직관적이고, 균열 확장 현상을 모사할 수 있음



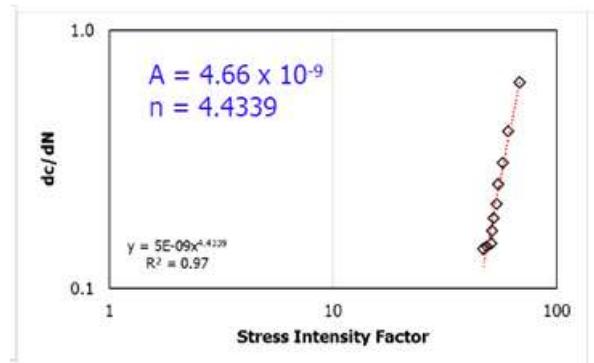
<그림 3-89> HOT 이미지 프로세싱을 통한 균열 길이 도출

- Zhou et al(2009)가 제시한 균열 진전에 대한 SIF 곡선을 산출하며, 균열 길이에 이르는 횟수를 통해  $dc/dN$ (균열 진전 속도)를 계산할 수 있음
- 본 연구진이 선정한 실험의 최대 개구 변위는 0.635mm로, 마스터 커브로부터 도출한 동적 탄성 계수와 균열 길이를 이용하여 SIF를 계산하였으며, 반복횟수와 SIF의 관계는 아래 <그림 3-90>과 같음



<그림 3-90> SIF와 하중 반복횟수의 관계 그래프

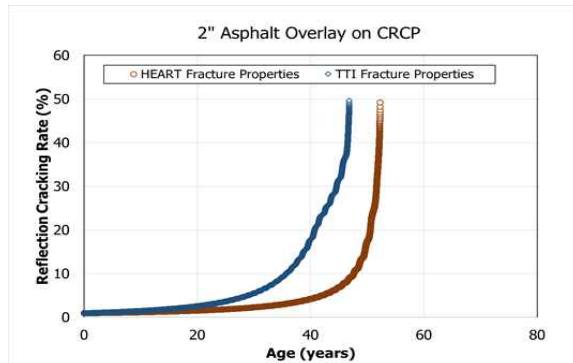
- $dc/dN$ 와 응력 확대 계수를 그래프 상에 나타낸 뒤 회귀 방정식을 도출하여 아래 <그림 3-91>과 같이 개발된 F-DGM 혼합물의 파괴 물성( $A$ ,  $n$ )에 해당하는 계수를 결정하였음
- <표3-51>과 같이  $A = 4.66 \times 10^{-9}$ 이고  $n = 4.4339$ 로 실제 균열 길이를 바탕으로 도출된 결과가 기존의 TTI 연구 결과에 비해 적게 나타났음
- <그림 3-92>와 같이 텍사스의 균열 진전 모형과 본 연구진의 실험 결과를 적용한 아스팔트 덧씌우기 예측 수명을 보여주고 있는데, 기존의 역산 방법을 적용한 것보다 본 연구에서 개발된 방법이 보다 늦게 균열이 진전되는 것으로 나타나 보수적으로 평가를 하고 있음



<그림 3-91> SIF와 균열 길이를 통해 파괴 물성 도출

<표 3-51> 기존 방법과 개발된 방법의 파괴 물성 차이

	A	N
TTI 방법	$2.77 \times 10^{-6}$	4.975
개발된 방법	$4.66 \times 10^{-9}$	4.433



<그림 3-92> 시간에 따른 반사균열율 그래프

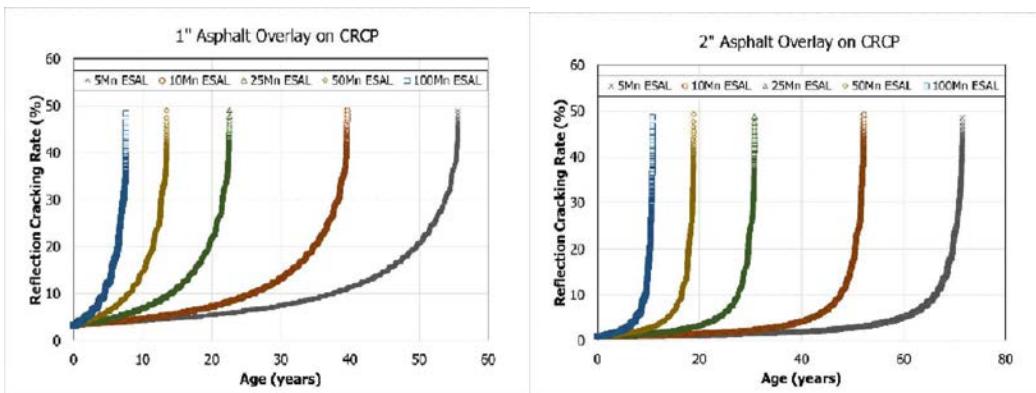
## 5. CRCP 위 아스팔트 덧씌우기를 위한 카탈로그 단면 제시

- 덧씌우기 시험으로부터 도출된 파괴 물성을 통합하여 다양한 세부 조건에 대한 두께 추정연구가 수행되었고, 아래의 <표 3-52>는 세부 항목을 정리한 것임
- 교통량은 최소 5백만 ESAL부터 1억 ESAL까지 아스팔트의 두께는 얇은 층을 적용하였으나 CRCP층의 두께는 국내 적용만을 염두에 두고 30cm로 제한하였으나 확장은 가능함

<표 3-52> 분석을 위한 포장 및 교통 상태 변수

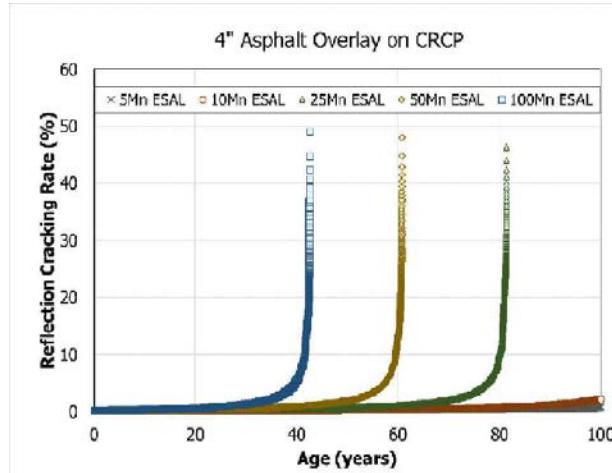
변수	값
교통 하중, 20년 간의 ESAL	5Mn, 10Mn, 25Mn, 50Mn, 100Mn
덧씌우기 두께	1,2,4 in (25, 50, 100mm)
아스팔트 혼합물 종류	Fine-DGM
CRCP 층 두께	300mm
CRCP 층의 탄성계수	28,000 MPa

- TTI는 반사 균열율의 50%를 파손 기준으로 삼을 것을 권고(Zhou et al, 2009)하고 있으므로 다양한 교통량에 따른 파손 진전을 살펴본 <그림 3-93>을 적용할 경우 1" 두께의 덧씌우기는 5백만의 ESAL의 교통량 하에서는 20년의 수명을 채울 수 있고, 경부 고속도로와 같은 중차량 도로의 경우는 20년 이상 수용하기에 불충분함을 알 수 있음
- 다만 2in 덧씌우기는 5~25백만 ESAL을 수용할 수 있는 것으로 나타났으며, 마지막으로 <그림 3-95>의 4in 덧씌우기는 25백만 ESAL 이상의 중차량 도로(heavy traffic highway)에 적당한 것으로 판단되지만 50% 반사균열 비율에 도달 할 때 까지 20년이 넘는 설계수명을 고려하면 매우 보수적인 설계라고 말 할 수 있음



<그림 3-93> 1인치 아스팔트 덧씌우기의 반사균열율에 따른 예상 수명

<그림 3-94> 2인치 아스팔트 덧씌우기의 반사균열율에 따른 예상 수명



<그림 3-95> 3인치 아스팔트 덧씌우기의 반사균열율에 따른 예상 수명

- 따라서 FWD로 측정한 변형률이 용인 가능한 범위 내에 있음을 가정했을 때, CRCP에 적용할 아스팔트 덧씌우기에 대한 설계는 아래의 <표 3-53>에 제시된 내용을 추천함

<표 3-53 > 교통하중에 따른 덧씌우기 설계 두께 제안

교통 하중 (ESALs)	CRCP 아스팔트 덧씌우기 설계 두께
5,000,000 이하	1in (25mm)
10,000,000 이하	1in (25mm)
25,000,000 이하	1in (25mm)
50,000,000 이하	2in (50mm)
100,000,000	3in (75mm)

## 제5절. CRCP위 얇은 아스팔트 덧씌우기 재료 및 시공 품질관리 지침(안)

- 얇은 아스팔트 덧씌우기 재료 및 시공은 현재 국내에서 적용이 미비한 기술 이므로 현장 시공 전 이에 대한 관리 기준이 우선적으로 마련되어야함
- 표면적 대비 부피가 작아 온도가 빨리 감소하는 경향이 있기 때문에 온도 및 다짐 관리가 매우 중요함
- 온도와 다짐 관리가 제대로 되지 않을 경우, 상부는 뜨겁고 하부는 차거운 Tender mix가 되어 밀림 또는 Hump up 현상이 발생할 수 있음.
- 본 연구에서는 얇은 두께의 아스팔트 덧씌우기 시 초 밀입도(F-DGM,Fine Dense Graded Mix) 아스팔트 층을 적용하여 기존 노후화된 포장 혹은 콘크리트 포장에 수분 침투를 막고 기능성 향상과 투수성을 확보할 수 있는 CRCP 위 얇은 아스팔트 덧씌우기의 시공 시 시공 가이드라인을 제시 함
- 성공적인 얇은 아스팔트 덧씌우기 시공을 위한 복합포장용 재료 및 시공품질 관리 가이드라인을 제시하기 위해 아래 <그림 3-96>과 같이 체계적인 흐름에 따라 다양한 보완 및 검증 절차를 진행하였음

TxDot 연구 보고서 및 지침 참조	FHWA/TX-13/0-6615-1
국내외 문헌조사를 통한 보완	혼합물 온도, 얇은 덧씌우기 다짐 시공 중점
1차 시험 시공 전 1차 작성	시험시공 환경을 고려한 1차 작성
시공 기술자 자문 후 보완	장비 및 시공 기술 여건에 따른 1차 수정
1차 시험 시공 적용 후 문제점 분석	기존 포장 결함의 보수, Tack Coat, 포설 및 다짐 시공 (온도 및 방법) 문제점 검토
시험 시공 내용을 반영한 가이드라인(안) 작성	시험 시공 결과를 통한 2차 수정
2차 시험 시공 적용 후 개선점 도출	Undersealing 포설 장비의 개발 필요성
시험 시공 내용을 바탕으로 개선된 가이드라인 제시	시험 시공 결과를 통한 3차 수정

<그림 3-96> 시공 가이드라인 제시를 위한 흐름도

### 1. 생산 공정

- 아스팔트 덧씌우기 혼합물을 생산하기 위한 플랜트에서의 생산 과정은 아래와 같음

### 1. 재료의 저장 및 가열

- 아스팔트 바인더는 제조업체의 권장 온도를 초과하여 가열하지 않으며, 또는 아래 표에 나타난 PG 바인더 가열 및 저장 온도 기준을 따르며, 감독자는 아스팔트 바인더와 아스팔트 혼합물 배출 온도를 반드시 기록
- 혼합물에 대해서 감독자의 승인 없이는 혼합물의 품질에 영향을 미칠 정도의 시간을 보관하지 않으며, 바인더의 적용 온도에 대한 내용은 아래 <표 3-54>와 같음

&lt;표 3-54&gt; PG 바인더 가열 적용 및 저장 온도

바인더 종류	가열 적용		최대 저장 온도, °C
	권장 범위 온도, °C	최대 허용 온도, °C	
PG 바인더	135~175°C	175	175

### 2. 혼합 및 재료의 방출

- 플랜트로부터 방출 전 혼합물의 모든 수분을 제거하기 위해서 혼합 시간과 온도를 제어해야함 (수분 함량이 총 중량의 0.2%를 초과하여서는 안 됨)
- F-DGM 혼합물의 가열, 혼합, 포설 및 다짐 온도는 다음 <표 3-55>와 같으며, 동절기에는 혼합물 이동 시간을 고려하여 생산온도를 180°C까지 올릴 수 있으나 혼합물 품질 저하를 막기 위해 생산 온도가 180°C 이하인지 반드시 확인하여야 함

&lt;표 3-55&gt; FGM 혼합물의 가열, 혼합, 포설 및 다짐 온도

구 분	온도 기준	
	권장 범위 온도, °C	최소 허용 온도, °C
골재 가열	163°C	-
혼합	163°C	-
포설 및 다짐	149°C	140°C

### 2. 운반 공정

- 사용 전, 혼합물이 오염되지 않도록 트럭 내부에 대해 청소를 실시하여야 하며, 필요한 경우 트럭 내부에 감독자의 승인을 받은 Release Agent를 도포하여 아스팔트 혼합물을 실을 수 있음

### 3. 배치 공정

- 감독자는 트럭으로부터 배출된 후, Paver에 들어가기 전의 아스팔트 혼합물의 온도를 반드시 기록해야함

## 4. 시공 공정

### 가. 시공 준비

- 표면상의 먼지 및 기타 불순물은 완전히 제거하여야 하며, 공사에 중대한 영향을 미치는 아스콘 플랜트, 운반 및 시공 장비 등을 미리 점검하여 양호한 상태로 정비해 두어야 함
- 청소기(Compressed air)로 기존 포장 표면을 청소 및 건조시켜 수분, 먼지, 모래, 나뭇잎 및 기타 오염물을 모두 제거해야하며, 포장용 진공 청소 차량을 이용하여 차선 당 2회 이상 실시
- 기존 포장 균열 또는 줄눈 부에 스플링과 같은 결함이 있을 경우에는 이에 대한 보수를 실시하여야함(1/8in 이상의 균열 폭에 대해서는 실란트, 1in 이상의 균열 폭에 대해서는 Fine-grained bituminous mixture 또는 상온 아스팔트를 이용하여 채움을 실시함)
- 이와 더불어 기존 표면이 편평하지 않은 경우에는 시공에 앞서 가열 아스팔트 혼합물로 레벨링 층을 시공하거나 절삭해야함

### 나. 시공 기상 조건

- F-PFC의 경우 포장 표면의 온도는 22°C 이상, F-SMA와 F-DGM의 경우에는 16°C 이상의 포장 표면 온도를 유지해야 하며, 포장 표면의 온도는 적외선 측정기(Handheld infrared thermometer)를 추천하나 다른 장비로도 측정이 가능 함

### 다. Tack Coat

- 시공된 아스팔트 콘크리트 포장 층이나 시멘트 콘크리트 포장 위에 포설하는 아스팔트 혼합물과의 부착을 향상시키기 위하여 택 코팅을 실시함
- 택 코팅을 실시하기 전 포장 표면을 깨끗하게 청소하며, 재료의 포설은  $0.3\sim0.6 L/m^2$ 를 표준으로 아스팔트 디스트리뷰터 또는 스프레이어 살포기를 사용하여 포장 표면 전 부분에 걸쳐 얇고 균일하게 일정한 속도로 포설을 실시
- 양생은 살포 후 수분이 건조할 때까지 충분한 시간을 가져야하며, 시공 감독자의 확인을 받아야함
- 개질 Tack Coat 재료의 경우 포설 후 1시간 30분~2시간의 짧은 양생 시간을 적용할 수 있으며, Underseal 공법의 경우, 5~2.1mm 단 입도 골재를 사용하며  $0.4 L/m^2$  Tack Coat 살포 량을 적용할 시  $0.45 kg/m^2$ 의 골재 량을 적용하고, 고르게 포설해야함
- 본 연구에서 3가지 택코팅 방법을 다른 결과 부착 강도가 가장 안정적으로 나온 방법은 RSC-4 재료를 사용하는 것이지만 교통 개방 시간을 최소화 해야되는 국내 여건을 고려하여 수분이 증발되어 경화될 때까지의 시간이 짧은 TF-Coat 적용을 추천함

- Undersealing의 경우 가장 효과적으로 건설차량에 의한 트랙킹을 방지할 수 있고, 텍사스에서 향상된 부착강도를 얻은 결과가 있지만, 국내에 골재를 고르게 포설할 수 있는 장비가 미비하여 향후 연구 및 개발을 통해 다시 평가할 필요가 있음

#### 라. 아스팔트 혼합물의 혼합 및 운반

- 세립도 아스팔트 혼합물의 특성상 고온이 유지되어야 하므로 쿠커로 가열 혼합하여 시공 장소까지 운반하여 사용해야 하지만 국내 여건상 가열 혼합 장치가 없는 트럭을 사용할 경우에는 트럭 덮개를 설치하여 혼합물의 온도 손실을 방지해야 함
- 혼합물의 현장 도착온도는 163°C 이상이어야 하며 균일 혼합물을 얻을 수 있도록 교반을 실시하고, 아스콘 포설량과 운반량이 조화될 수 있도록 운반 쿠커의 수를 적절히 조정해야함 (즉, 혼합물의 자연도착으로 포설이 중단되는 일이 없도록 해야됨)

#### 마. 포설

- 택코트 양생이 끝나기 전에는 혼합물을 포설하여서는 안됨
- 부착 및 아스팔트 층의 결함을 막기 위해 포설 전 표면이 젖어 있지 않도록 해야 하며, 포설시 F-DGM 아스팔트 혼합물의 온도는 149°C를 기준으로 하며, 140°C 이하로 떨어지면 안됨
- 계약 상대자는 포설과 다짐 작업이 이루어지는 동안 적정한 포설온도가 유지되도록 점검해야 하며, 감독자는 시험포장 결과를 근거로 시방 온도의 범위를 지정하여 시방온도보다 20°C 이상 낮은 경우에는 그 혼합물을 폐기해야 함
- 얇은 덧씌우기의 경우 온도 감소 속도가 빠르기 때문에 구간을 나누어 포설 작업을 수행해야함
- 작업 중단되었을 때는 혼합물의 포설 및 다짐에 부적합한 온도로 내려가 완성면의 평탄성이 좋지 않거나 다짐밀도가 적어지므로 포설작업이 연속적으로 이루어질 수 있도록 플랜트의 생산능력에 맞추어 포설속도를 조절하여야 하며, 혼합물의 운반 계획을 면밀히 수립하여야 함
- 세립도 아스팔트 혼합물 포설에 사용하는 피니셔는 포설작업을 시작하기 전에 예열해야함
- 피니셔 뒤에는 삽과 레이크 인부를 고정 배치하여 피니셔의 마무리가 불완전한 곳은 수정하여야 함
- 포설 중에 혼합물의 재료분리가 생길 경우에는 피니셔의 운행을 즉시 중지하고, 원인을 조사하여 포설불량 부분은 즉시 보수해야함
- 포장 온도는 infrared bar를 페이퍼에 부착하거나 또는 Handheld infrared thermometer를 이용하여 반드시 측정하여야 함

## 바. 다짐

- 세립도 재료 다짐의 경우 골재의 부서짐, 평탄하고 균일한 포장 표면을 유지해야하며 재료마다 다짐 시공 방법이 상이함
- 포설과 동시에 다짐을 실시해야 하며 다짐 온도는 149°C 이상이 되어야함
- 머캐덤 롤러로 초기다짐을 실시한 후 횡단면의 양호도를 검사하여 불량한 곳이 발견되면 공사감독자의 지시에 따라 혼합물을 가감하여 수정해야함
- 다짐작업 중 롤러의 다짐선을 갑자기 변경하거나 방향을 바꿔 포설한 혼합물의 이동이 생기도록 하여서는 안 됨
- 롤러의 방향전환은 안정된 노면 위에서 하여야 하며, 포설된 혼합물이 이동되었으면 레이크로 긁어 일으켜 다짐 전의 상태로 만들어 다시 다져야함
- 다짐이 끝났다 하더라도 양생이 완료될 때까지는 롤러 등 중장비를 포장면에 세워 두어서는 안 됨
- 다짐작업 후 24시간 이내에는 교통을 개방시켜서는 안 되며, 공사감독자의 승인을 얻어 불가피하게 교통을 소통시키는 경우에는 표면의 온도가 40 °C 이하일 때 가능함

### 1) F-PFC

- F-PFC 재료 다짐의 경우는 Steel-Wheeled 롤러를 정적 모드로 실시하며 타이어 롤러는 아스팔트가 타이어 표면에 접착되므로 사용하지 않으며, 접착을 방지하기 위해 롤러 표면에 Release Agent 또는 물을 적용할 수 있음
- 혼합물의 온도가 떨어지는 것을 방지하기 위하여 다짐롤러를 가능한 한 포설장비에 가까이 위치시키며 또한 포장 폭 전체를 동시에 다지기를 권장
- F-PFC의 경우 1~3회 다짐을 실시하여 현장 밀도에 도달하게 하며, 포장 가장자리나 롤러 다짐이 제한되는 위치의 다짐을 위해서는 Tamp를 사용하도록 함

### 2) F-SMA

- F-SMA과 F-DGM 재료 다짐의 경우에는 두개의 철제 롤러가 있는 Tandem Steel-Wheel 롤러를 사용하고, <그림 3-97>은 1in (2.5cm) 이하 얇은 아스팔트 다짐에 사용되는 다짐 롤러를 보여주고 있음
- 혼합물의 온도가 떨어지는 것을 방지하기 위하여 다짐롤러를 가능한 한 포설장비에 가까이 위치하는 것을 제시하고 있으며 또한 포장 폭 전체를 동시에 다지는 것을 권장
- 부득이하게 진동 롤러 다짐을 실시해야하는 경우에는 높은 진동수 및 낮은 진폭을 적용하며 타이어 롤러는 사용하지 않는 것을 제시
- 아스팔트의 접착을 방지하기 위하여 롤러 표면에 세제 또는 물을 사용할 수 있음
- F-SMA의 경우 4~5회 다짐을 실시하여 현장 밀도에 도달하게 한다. 포장 가장자리나 롤러 다짐이 제한되는 위치의 다짐을 위해서는 Tamp를 사용하도록 권장함

### 3) F-DGM

- F-DGM 재료 다짐의 경우에는 Tandem Steel-Wheeled 롤러를 정적 모드로 실시하며 타이어 롤러는 아스팔트가 타이어 표면에 접착되므로 사용하지 않음
- 혼합물의 온도가 떨어지는 것을 방지하기 위하여 다짐롤러를 가능한 한 포설장비에 가까이 위치시키며 또한 포장 폭 전체를 동시에 다지기를 권장함
- 아스팔트의 접착을 방지하기 위하여 롤러 표면에 세제 또는 물을 사용할 수 있음
- F-DGM의 경우 4~5회 다짐을 실시하여 현장 밀도에 도달하게 하며, 포장 가장자리나 롤러 다짐이 제한되는 위치의 다짐을 위해서는 Tamp를 사용하도록함

#### 사. 두께 측정

- 포설 및 다짐 후 포장 두께는 코어 시편을 채취하여 측정할 수 있으며 설계 두께에서 -0.6mm까지 허용하고, 평탄성은 신규 포장 IRI 기준인 3m/km 이내로 설정

#### 아. 품질 검사

- 1in 이하의 얇은 아스팔트 층이기 때문에 <그림 3-98>와 같이 Water Flow 시험을 밀도 시험 대신 실시할 수 있고 이를 통해 다짐 결과 및 투수 능력을 평가할 수 있으며(F-PFC : 20초 이내, F-SMA : 30초 이내, F-DGM : 120초 이내), 다짐 후 교통 개방 전의 포장 표면의 온도는 60°C 이하로 떨어져야 함



<그림 3-97> Texas에서 1in 아스팔트 덧씌우기에 사용되는 다짐장비



<그림 3-98> Water Flow Test

(Use of Fine Graded Mixes 0-6615, TTI, 2012)

- 아래 <표 3-56>은 위의 얇은 아스팔트 덧씌우기 재료 및 시공품질관리 가이드라인을 요약한 것임

&lt;표 3-56&gt; CRCP 위 1in 아스팔트 덧씌우기 재료 및 시공 가이드라인 요약

주요 항목	얇은 덧씌우기 재료 및 시공 권장 사항
시공 준비	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 표면상의 먼지 및 기타 불순물은 완전히 제거를 실시함</li> <li>- 결합 존재 또는 표면이 편평하지 않은 경우 아스팔트 혼합물로 레벨링 층을 시공하거나 절삭해야 함</li> </ul>
시공 기상 조건	<ul style="list-style-type: none"> <li>- F-DGM, F-SMA의 경우 16°C 이상, F-PFC의 경우 22°C 이상의 포장 표면 온도를 유지</li> <li>- 열 영상 카메라를 통해 반드시 포장 면 전체의 온도를 측정하여 검토</li> </ul>
Tack Coat	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 아스팔트 디스트리뷰터 또는 스프레이어 살포기를 이용, 전 구간에 대해 얇고 균일하게 살포</li> <li>- 살포 후 수분이 모두 건조할 때까지 충분한 양생시간을 가져야 함</li> <li>- 개질 유화아스팔트의 경우 약 1시간 후 양생이 끝남</li> <li>- Underseal 공법의 경우 200번 채 통과 백분율이 1% 이내인 단 입도 골재를 사용하며 유제 살포 즉시 골재포설을 실시하며 인력 시공 시 골재가 균일하게 포설되도록 해야 함</li> </ul>
혼합물 생산 및 운반	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 혼합물 생산의 권장온도는 163°C이며 동절기에는 혼합물 이동시간을 고려하여 180°C까지 올릴 수 있으나 혼합물 품질 저하를 막기 위해 180°C 이하임을 확인하여야 함</li> </ul>
포설 및 다짐	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 포설 및 다짐 온도는 149°C 이상, 열 영상 카메라를 통해 시공 시 온도 기록</li> <li>- 포장 두께가 얇기 때문에 시공 두께 조절 기능이 있는 페이버를 사용</li> <li>- 다짐의 경우 포설 후 즉시 다짐을 실시하며 페이버와 다짐롤러를 가능한 한 가까이 위치시켜 폭 전체에 대해 동시에 다짐을 실시함</li> <li>- Tandem Steel-Wheeled 롤러를 정직 모드로 실시, 타이어 롤러 및 진동 롤러는 사용하지 않음</li> <li>- 12ton 이상의 롤러를 권장하며 F-DGM, F-SMA의 경우 4~5회의 다짐 횟수, F-PFC의 경우 1~3회의 다짐횟수 이내에 현장밀도에 도달할 수 있도록 시공이 이루어져야 함</li> </ul>
시공 후 품질관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 코어 시편을 채취하여 포장 두께를 확인</li> <li>- 두께가 얇아 현장밀도 측정이 어려우므로 Water Flow Test로 대체하여 현장밀도 평가 실시</li> </ul>

## 제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

### 제1절. 목표 달성도 (성과지표 및 달성)

성과물명	성과기준	목표치	달성치
덧씌우기 및 복합포장용 재료와 배합 선정	Round Robin Test	10% 이내	반복성 검토 시험 12.5% 5개의 동일 시편 중 반복성이 우수한 3개의 시편 선정 후 분석
	F-PFC Drain down	0.2% 이내	0.17%
	F-PFC Cantabro	20% 이내	18.87%
	Overlay Test	기준 대비 20% 향상	42% 향상
	Hamburg Wheel Tracking Test	기준 대비 20% 향상	밀입도 기준 74% 향상 SMA 기준 49% 향상
이질재료간 역학적 모델링 기법 및 충간 구조해석 모형 개발	부착강도 (인장)	0.6MPa 이상	횡방향 타이닝에서의 Undersealing을 제외한 모든 택코트 재료가 0.6MPa을 상회함
	부착강도 (전단)	0.68MPa 이상	3mm 타이닝 깊이에서 1.39MPa
시험시공을 통한 단기 및 장기 DB 구축	FWD	200 $\mu m$ 이하	120 $\mu m$
	F-PFC Water Flow Test	30초 이내	
	Skid Resistance	45 BPN 이상	
	소음	아스팔트 배합에 따른 비교분석	
	IRI	2m/km 이하	
복합포장시스템 설계법	복합포장 설계법 개발	복합포장 설계법 개발 1건	보고서
복합포장용 재료 시방서 및 품질관리법 제안	복합포장 재료, 시공 및 품질관리 가이드라인	복합포장 재료, 시공 및 품질관리 가이드라인 1건	보고서

## 제2절. 관련 분야 기여도

- 본 연구의 연구개발 성과는 기술적 측면, 경제적 측면, 녹색성장 측면 그리고 사회적 측면에서 다음과 같은 파급효과를 갖음
- 기술적 측면
  - 우선 기존 국내 밀입도 5cm 위 SMA 5cm 아스팔트 덧씌우기 공법을 선진 해외기술을 벤치마킹하여 F-DGM 2.5cm 위 F-PFC 2.5cm의 얇은 아스팔트 덧씌우기 공법 개발을 통해 다양한 신설, 재포장, 보수 재료 및 공법을 개발하여 국산화하였음
  - 국내 최초로 직접 전단 시험을 통한 접착제 평가 도구를 개발하였고 3차원 반사 균열 모사 장치를 개발하여 향후 아스팔트의 초기 균열 관련 세계 최고의 연구를 진행할 수 있는 발판을 마련 함
  - 파손조사에서 유지보수 시공 및 관리까지 통합적으로 관리할 수 있는 유지 관리 기술 및 지침을 개발하여 신속하고 합리적인 유지관리를 통해 장기 공용성을 확보할 수 있는 방안을 마련
- 경제적 측면
  - 현재 노후화된 콘크리트 포장의 유지보수비용의 증가와 기술력의 부족을 언급한 바 있으며, 본 연구에서는 장기적으로 재료 측면에서 \*\* %의 비용을 절감할 수 있는 공법 개발
  - 국내 최초로 얇은 아스팔트 덧씌우기 공법의 적용을 통해 시공비용을 줄이며 더불어 수명도 증가시키는 공법의 개발
- 사회적 측면
  - 값비싼 재료와 두께를 이용하지만 수명은 담보되지 않은 기존의 공법에 비해 비용이 저렴하고 수명이 긴 공법 제공을 통해 우수한 건설 공법에 인식 제고
  - 유지보수기에 도달한 다양한 건설 분야에서 교통 흐름에 방해가 적고 소음이 적으며 미끄럼 효과가 우수한 재료 개발을 통해 안전한 도로 실현에 이바지

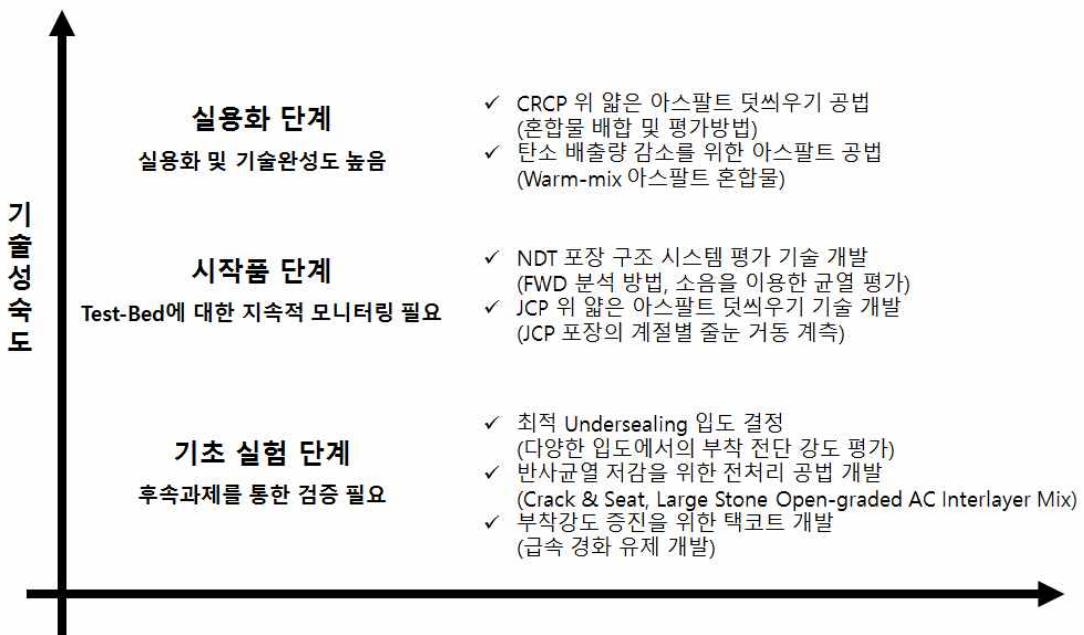
## 제5장. 연구개발성과의 활용계획

### 제1절. 연구의 기술성숙도 평가

- <표 4-1>에 나타난 기술성숙도(TRL)의 상세평가기준을 고려하여 연구성과를 실험단계, 시작품 단계, 실용화 단계로 분류하였으며, 기술성숙도에 따라 각 단계별로 활용방안을 달리 하여 <그림 4-1>과 같이 계획하였음
- 본 연구를 통해 개발된 지침(안) 및 기준(안)의 완성도와 적용기술의 적절성을 판단하여 현장 적용성 평가, 추가 연구 필요 단계로 나누어 작성하였으며, 포장연구 특성상 장기 공용성 검증 등이 필요한 과제는 종료 이후 2~3년의 추가 검증기간이 필요한 것으로 판단되며, 이를 추가 연구과제로 제시함

&lt;표 4-1&gt; 기술성숙도 평가기준

단계구분	평가기준	상세평가기준
실험단계	실험실 규모의 기본성능 검증	실험실에서 실험을 통해 기본 성능이 검증 될 수 있는 단계 개발하려는 제품의 기본 설계 도면을 확보하는 단계
	실험실 규모의 핵심성능 평가	시험샘플을 제작하여 핵심성능에 대한 평가가 완료된 단계 기본성능 검증을 통해 1개의 대안을 선택하는 단계
시작품단계	시작품 제작 및 성능 평가	실험실 시작품 제작 및 성능 평가가 완료된 단계 경제성을 고려하지 않고 기술의 핵심성능으로만 볼 때 실제로 판매가 가능한 단계
	파일롯 규모 시작품 제작 및 성능 평가	파일롯 규모 시작품 제작 및 평가가 완료된 단계 자체 현장테스트를 실시하여 목표 성능을 만족시킨 단계 성능 평가 결과에 대해 공인인증 기관의 성적서 확보한 단계
실용화단계	신뢰성평가 및 수요기업 평가	실제 환경에서 성능 검증이 이루어지는 단계 수요업체에서 직접 파일롯 시작품을 현장평가하는 단계
	시제품 인증 및 표준화	표준화 및 인허가 취득 단계



<그림 4-1> 기술 성숙도에 따른 성과 분류

## 1. 실용화 단계

- 실용화 단계의 성과는 실제 환경에서 성능 검증이 이루어지거나 수요업체가 평가 또는 평가완료한 단계로, 본 연구단에서는 이 단계의 성과들을 활용화하기 위해 공통적 활용방안을 아래와 같이 계획하였으며, 성과물별 활용방안을 정리
  - 특허등록 완료 후 제품화할 수 있는 업체를 선정하여 기술을 이전
  - 기술 제휴 및 납품계약을 통해 도로공사 등 수요처에 판매
  - 국내 사용실적을 기반으로 해외시장 진출 방안 모색

#### 가. CRCP 위 얹은 아스팔트 덧씌우기 공법

- CRCP 위 얇은 아스팔트 덧씌우기는 현장 시험을 통해 그 우수성을 확인
  - 현재 노후화된 고속도로 내 CRCP 포장의 유지보수 기법으로 사용되는 기준의 10cm 덧씌우기 방법보다 10년 생애 주기 비용으로 계산한 결과 1차로 1km 당 약 1억원을 절감할 뿐만 아니라 아스팔트 포장 시공 업체인 태릉건설에 기술을 이전
  - 한국도로공사 충북 본부에서는 실제 공용 중인 고속도로 내 노후화된 CRCP 구간에 대해서 얇은 아스팔트 덧씌우기 공법 적용 예정에 있음

## 나. 탄소 배출량 감소를 위한 아스팔트 공법

- ZYF를 첨가한 Warm-mix 아스팔트는 일반 아스팔트의 침입도, 연화점, 연도 및 노화 저항성과 유사한 성능을 보여주며, 유기 첨가제 Sasobit와 EC는 고온에서 아스팔트의 성능을 개선할 수 있는 반면에 저온 균열 저항성이 떨어지는 단점이 있음
- 표면활성첨가제를 사용한 아스팔트의 노화 저항성은 유기첨가제에 비해 우수
- 혼합물의 공극률을 평가한 결과, Sasobit, RH와 ZYF를 사용한 혼합물은 일반 HMA 혼합물과 비교해 약 25°C 낮은 다짐 온도 조건에서 잘 다져질 것으로 예상되며, 모든 Warm-mix 아스팔트 혼합물은 GB/T 30596-2014에서 제시한 성능을 만족하였으며 고온에서 혼합물의 안정성 확보가 가능
- HMA의 현장 타설 및 다짐 온도를 맞추기 힘든 겨울철에 적용이 가능할 것으로 보이며, 탄소 배출량을 감소시킬 수 있을 것으로 기대

## 2. 시작품 단계

- 실험실 시작품의 성능평가가 완료되거나, 개발기관의 자체 현장적용시험을 통한 성능평가가 완료된 단계로, 본 연구단에서는 이 단계의 성과들을 활용하기 위해 공통적 활용방안을 아래와 같이 계획하여 성과물별로 제시
  - 기술세미나, 학술대회, 설명회 등을 통하여 홍보
  - 시험시공 및 Test-Bed를 통하여 추가적인 시공성 및 장기 공용성 검증 필요

### 가. NDT 포장 구조 시스템 평가 기술 개발

- FWD의 경우 현재 가장 널리 사용되고 있는 포장 구조 지지력 평가 방법이지만, 동적하중을 바탕으로 각 센서의 최대 쳐짐량을 도출해 각 층의 단성 계수를 도출하는 정적인 역산 해석 방법을 동적 역산 해석 방법으로 개선하여 상대적으로 정확하고 우수한 해석 결과를 기대

### 나. JCP 위 맑은 아스팔트 덧씌우기 기술 개발

- 포장 형식 및 계절에 따른 비교에 있어서 JCP에 비해 CRCP의 움직임의 크기가 작으며 CRCP의 경우 여름철에 90%, JCP의 경우 여름철에 38% 작은 움직임을 나타냄
- 덧씌우기 전후 비교에 있어서는 덧씌우기 시 하부 콘크리트 포장 온도 변화의 크기가 상부에 비해 감소하는 Thermal Insulation 효과를 확인하였으며 그 수준은 여름철 46%, 겨울철 69%로 확인

- 50mm 덧씌우기 시 25mm 덧씌우기보다 22% 더 높은 효과를 보여 덧씌우기 두께가 증가할수록 그 효과는 커진다는 것을 알 수 있었음
- 덧씌우기 후 하부 불연속면 거동에 있어서는 CRCP의 경우 움직임의 크기가 86%, JCP의 경우 85~95%까지 덧씌우기 전보다 감소되었으며, 추가적인 JCP 장기 거동 계측 및 HOT 시험을 통해 비교적 변위 폭이 큰 JCP 위에 얇은 아스팔트 적용성에 대해서 평가할 수 있음

### 3. 실험 단계

- 실험실에서 실험을 통해 기본 성능이 검증 되었거나, 샘플을 통해 핵심성능에 대한 평가가 완료된 단계로, 본 연구단에서는 이 단계의 성과들을 활용화하기 위해 공통적 활용방안을 아래와 같이 계획하였으며, 성과물별 활용방안을 정리
  - 관련분야에서 추가 연구를 통한 기술 완성도 향상 필요
  - 시험시공 및 Test-Bed를 통하여 추가적인 시공성 및 장기 공용성 검증 필요

#### 가. 최적 Undersealing 입도 결정

- 본 연구에서는 현장 기존 포장 텍스처에 따른 부착 전단 강도를 평가하였으며, 현장 시험시공 시 Undersealing을 포설하여 텍스처의 폭이 비교적 작은 횡방향 타이닝 보다 폭이 큰 다이아몬드 그라인딩 텍스처에서 더 효과적인 부착 강도를 Pull-off 시험을 통해 도출했음
- 표면 텍스처 깊이 및 폭에 따른 최적의 Undersealing 입도가 다를 것이며, 이를 통해 시공 중 건설 장비 및 중차량에 의한 택코트 묻어나감을 방지할 수 있음
- 평가 방법으로는 우선적으로 실내 실험인 직접전단시험을 통해 텍스처에 따른 최적 입도를 도출해내고, 현장에 적용하여 평가하는 방법이 있음

#### 나. 반사균열 저감을 위한 전처리 공법

- 본 연구 결과에 따르면 아스팔트 덧씌우기를 통해 CRCP의 균열 및 JCP의 줄눈 움직임을 감소시키는 것을 확인하였으나, 본질적으로 발생하는 하부구조 불연속면에서 발생하는 반사균열을 무시할 수는 없음
- TxDoT와 Texas A&M의 연구 결과에 의하면 Crack & Seat, Large Stone Open-graded AC Interlayer mix, 고무 패킹 등 다양한 전처리 공법에 대한 연구를 통해 반사균열을 최소화 시키며 비용 효과적인 공법을 비교하였음

- 그 중 Rubberized 아스팔트 및 Glass grid 층을 두어 반사균열의 하중을 분산시킨 뒤 덧씌우기를 실시했을 때 1년에 20% 가량 반사균열이 발생한 기존의 일반 아스팔트 덧씌우기에 비해 6%로 33% 가량 균열 발생율을 줄이는 것으로 보고됨

#### 다. 부착강도 증진을 위한 택코트 개발

- 아스팔트 포설 시 트랙킹(바퀴 자국 남김 현상) 현상 방지 및 방수기능 향상을 위해 촉매제를 활용하여 기존 택코트 양생시간보다 단축된 급속경화유제 개발을 실현하여 품질 기준 향상을 통해 기존 콘크리트 포장과 신규 아스팔트 포장의 밀림, 반사균열 및 초기 피로 균열을 방지하여 기대수명 향상을 기대

### 제2절. 향후 연구 방향

#### 1. 연구과제 내 추가연구 필요성

- 본 절에서는 본 연구를 진행함에 있어 성공 가능성은 있으나 예산 혹은 기간의 부족으로 인해 추가연구가 필요하다고 자체적으로 판단한 연구항목을 정리

##### 가. 얇은 아스팔트 덧씌우기 시스템 설계 지침

###### 1) HOT(Heart Overlay Tester) 하중 재하 모드 확장

- 기존 콘크리트 포장의 환경 및 교통 하중에 의한 거동에 따라서 아스팔트 덧씌우기의 공용성 및 수명이 결정
- 교통량 및 지역의 온도 특성을 고려하여 HOT 장비를 이용해 실제 현상을 모사할 수 있으며, 현재 적용 가능한 24개의 모드 이외에 추가적인 포장 거동 모드를 설정하여 다양한 측면에서의 평가가 가능

###### 2) 적용 환경 및 교통하중의 다양화

- 환경하중 고려 시 평균 최대 일교차 및 평균 상대습도를 고려하며, 기상 조건을 평균 값이 아닌 시간대별로 반영하여 기존 콘크리트 포장의 컬링(Curling) 및 와핑(Warping)이 덧씌우기 포장의 거동에 미치는 영향을 보다 정확하게 예측할 수 있음
- 온도에 민감한 아스팔트 포장을 다양한 교통하중 내에서 분석하여, 포장에 가해지는 교통하중을 보다 정확하게 추정

### 3) 다짐 및 배수성 확보를 위한 품질관리 기준의 구체화

- Texas에서는 얇은 덧씌우기 아스팔트 혼합물에 대해 F-DGM의 경우 12 톤 이상의 탠덤 스틸 롤러를 이용하여 목표 밀도에 도달하도록 4~5회, 그리고 F-PFC의 경우 1~3회 다짐을 실시하고 있음(Tx0-6742-1, 2015)
- 시험 시공 시, 위와 같은 혼합물의 온도가 저하되는 상태와 텍사스보다 작은 무게의 다짐 롤러를 사용함으로써 다짐이 잘 이루어지지 않아 일반적인 환경에서의 기준보다 많은 횟수의 다짐을 실시
- 경험 의존적인 다짐 시공이 이루어졌기 때문에, 국내 실정에 맞는 보다 합리적인 다짐 기준 마련이 필요

### 4) 정량화된 기준 포장 노면 청소 기준 필요

- 국내 기준 기준에 따르면 ‘시공하는 표면은 시공 전에 불안정한 돌·먼지 기타의 유해물을 제거하고, 부분적인 균열·변형 및 파손지점을 보수하고 청소하여 공사감독자의 검사와 승인을 받아야 한다(아스팔트 콘크리트 포장 표준시방서, KCS 44 50 10).’라고 명시
- 노면 청소 및 파손지점 보수에 관하여 정량적인 기준이 미비한 실정이기 때문에 노면 진공 청소 장비 2회 등의 구체적인 기준을 마련할 필요가 있음

## 나. 아스팔트 부착 강도 평가 기준 개발

- 아스팔트 덧씌우기 또는 복합포장에서 기존 포장과의 부착 성능이 포장의 단·장기적인 공용성 및 수명을 결정짓는 중요한 요소인 것은 본 연구에서 증명되었지만, 국내의 부착강도 성능 평가에 대한 명확한 기준이 미비한 실정

### 1) 텍스처 모사 시편을 이용한 직접 전단 시험 보정

- 현장 코어 시편 혹은 제작된 콘크리트 시편의 경우 시편 채취과정에서 시편이 손상되는 경우가 많으며, 명확한 표면 텍스처를 알 수 없기 때문에 시험의 반복성과 합리적인 데이터를 구축하기 힘듦
- 다양한 텍스처에 따른 부착 전단강도의 패턴을 분석하기 위해서 추가적인 실험을 통해 반복성을 확인해야하며, 현재 횡방향 타이닝에 대한 연구만이 진행되었으나 향후 연구에서는 종방향 타이닝의 부착 전단 거동에 대한 연구가 필요

## 2) 택코트 종류 및 온도에 따른 직접 전단 강도 평가

- 직접 전단 강도 시험은 하중 재하 속도, 그리고 온도에 의해 큰 영향을 받으므로 4계절이 뚜렷한 국내의 온도 변화를 분석하여 계절에 따른 부착강도 특성에 대한 연구가 필요
- 향후 연구 내용인 급속경화유제 개발 재료의 전단 강도를 기준 택코트의 기준과 비교 분석할 수 있음

## 3) Pull-off Test의 부착 인장 특성과 전단 특성 상관관계 연구

- 아스팔트 덧씌우기 포장의 부착 파손 메카니즘을 살펴보면 아래와 같음
  - 첫 번째로 전단파괴는 종·횡방향으로 발생되며 일반적으로 교통 및 온도 하중에 의해서 포장 표면에 전단 응력이 발생하여 파괴에 이르는 것을 말함
  - 둘째로는 인장파괴가 있는데 포장 내부의 수분이 증발하며 수증기가 팽창 또는 타이어 트레드가 표면을 빨아들이면서 인장 응력이 발생하는 것을 의미
  - 마지막으로 인장과 전단이 복합적으로 발생하는 경우가 존재
- 인장과 전단 파괴의 메카니즘을 비교 분석하여 아스팔트 덧씌우기의 부착강도 기준에 합리적으로 기준을 적용할 수 있음

## 제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

### 제1절. 선행 연구 기관의 설계법 개발 연구

- The Texas A&M 대학교의 'Mechanistic-Empirical Asphalt Overlay Thickness Design and Analysis System'에 의하면 아스팔트 덧씌우기 시공은 TxDOT에서 기준의 아스팔트 및 콘크리트 포장 유지보수를 위해 사용하는 가장 보편적인 방법이라고 보고함
- TxDOT 엔지니어의 공학적 판단에 의해 결정되는 덧씌우기의 유형과 필요 두께는 매우 중요하며, 우수한 성능을 발휘하려면 아스팔트 덧씌우기가 러팅과 균열에 좋은 균형을 가져야함
- 덧씌우기의 성능은 기존의 포장 상태, 교통 하중 및 환경 조건과 같은 여러 요소에 영향을 크게 받고, 최근에 덧씌우기에서 두 가지 재료를 사용하는 것은 일반적인 관행으로 되어왔으며, 균열에 강한 배합을 먼저 시공한 뒤에 기능적 요소를 가진 포장 표면 배합을 적용
- 두개 층으로 이루어진 덧씌우기 유형의 특성은 포장의 거동에 매우 큰 영향을 주며, TxDOT 엔지니어가 이러한 설계를 할 수 있도록 포괄적인 역학·경험적 (ME) 아스팔트 덧씌우기 설계 시스템을 개발함
- 개발된 설계 시스템은 제안된 덧씌우기의 반사균열과 러팅 예측 모델을 통합하며, Paris' law 기반의 반사 균열 모델은 본 연구에서 적용하기 위해 평가되고 권장됨
- 이 모델은 SIF(Stress Intensity Factor)과 교통 및 환경 하중으로 부터 발생된 균열 확장으로 인한 파손 특성을 고려해야하며, 실제 SIF 개념을 구현하기 위해 160만개 이상의 유한 요소 계산을 기반으로 총 34개의 SIF 회귀 방정식을 개발함
- 필요한 균열 특성은 Overlay Tester를 통해 쉽게 결정될 수 있고, 제안된 반사균열 모델은 3가지 HMA 덧씌우기 현장 시공 사례 연구 데이터를 분석한 다음 California heavy Vehicle Simulator 시험 결과를 사용하여 검증하였다고 보고됨
- NCAT(National Center for Asphalt Technology) 시험 구간에서 2006년 모델 구축에 필요한 재료 특성은 반복하중 시험에서 얻었으며, 보정된 러팅의 합리성과 정확성은 NCAT 시험 구간의 현장 러팅 데이터에 의해 추가적으로 확인됨
- 교정된 반사균열 및 러팅 모델이 아스팔트 덧씌우기 두께 설계 및 분석 프로그램에 통합되었고, 해석을 돋기 위해 텍사스에서 현재 사용되는 모든 덧

씌우기 유형에 대해 재료 속성의 기본값이 제공됨

- 이 프로그램은 설계자에게 설계 수명에 대한 LTE(Load Transfer Efficiency)의 영향을 프로젝트 수준에서 평가하고 적절한 성능을 달성하기 위해 유지보수 가 필요한 LTE 기준을 마련할 수 있는 도구를 제공
- 요약하면 이 연구는 견고한 공학적 원리를 바탕으로 포괄적인 덧씌우기 두께 설계 및 분석 시스템을 개발하였으며, 연구를 통해 개발된 소프트웨어는 TxDOT에서 제공됨
- 예측은 합리적으로 보이며, 이 시스템은 텍사스 주 전체의 기준으로 반영될 수 있다고 사료됨
- 위의 해외 과학기술 정보를 바탕으로 국내에 적합한 ME 설계법을 개발하였으며, 시험시공 및 장기적인 거동 계측을 통해 예측 모델의 합리성을 향상 시킬 수 있었음

## 제2절. 다양한 균열 예측 모델 분석

### 1. 경험적 모델-2절 편집 글자체 통일 할것

- 아스팔트 덧씌우기 포장에서의 반사균열의 예측을 위해 수많은 경험적 모델이 개발되었으며, 일반적으로 경험적 모델은 기존 포장상태, 환경, 그리고 교통하중과 같은 몇몇 변수들이 반사균열의 양과 관련이 있음
- 이 모델은 PCC(JPCP 또는 CRCP)포장 위 아스팔트로 덧씌우기 보수를 위한 93 AASHTO 설계 가이드에서 기존 PCC 슬래브의 균열 존재여부에 따라 다르게 적용되며, 경험적 모델은 반사균열을 위한 모델이 아니지만, 덧씌우기 설계에 종종 사용되는 모델으로 기존 포장 상태에 따른 설계 방법은 아래와 같이 설명됨

#### 가. 균열 PCC 포장

- 아스팔트 덧씌우기 두께는 SN 접근법에 의해 결정됨

$$D_1 = \frac{SN_{OL}}{a_1}$$

여기서,

$D_1$  : 아스팔트 덧씌우기에 요구되는 두께

$SN_{OL}$  : 아스팔트 덧씌우기의 SN(structural number)

$a_1$  : 덧씌우기 재료의 총 계수

- 아스팔트 콘크리트 덧씌우기의 SN과 균열이 생긴 기존 포장의 유효 SN은 아래와 같이 정의됨

$$SN_{OL} = SN_T - SN_{EFF}$$

여기서,

$SN_T$  : 노상 위 신설 연성 포장일 경우의 SN

$SN_{EFF}$  : 균열이 생긴 기존 포장의 유효 SN

$$SN_{EFF} = a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

여기서,

$a_2, a_3$  : 각각 균열이 생긴 슬래브와 기층의 층 계수

$D_2, D_3$  : 각각 균열이 생긴 슬래브와 기층의 두께

$m_2, m_3$  : 각각 균열이 생긴 슬래브와 기층의 투수(배수) 계수

#### 나. 비균열 PCC 포장

- 일반적인 PCC 포장은 미래교통량의 수요를 예측하여 두께를 결정하며, 기존 PCC 포장의 두께를 알 때, 아스팔트 덧씌우기 포장 두께를 결정함에 있어서 감소계수를 사용한 줄어든 PCC의 두께를 적용하며, 아스팔트 덧씌우기 두께  $D_{OL}$ , 감소 계수  $A$ , 기존 슬래브의 효율적인 두께  $D_{EFF}$ 는 아래와 같이 정의됨

$$D_{OL} = A(D_F - D_{EFF})$$

여기서,

$A$  : 감소 계수

$D_F$  : 미래 교통 수요에 따른 PCC 슬래브 두께

$D_{EFF}$  : 기존 슬래브의 효율적인 두께

$$A = 2.2233 + 0.0099(D_F - D_{EFF})^2 - 0.1534(D_F - D_{EFF})$$

$$D_{EFF} = F_{jc} \times F_{dur} \times F_{fat} \times D$$

여기서,

$F_{jc}$  : 조인트와 균열 적용 계수

$F_{dur}$  : 내구성 적용 계수

$F_{fat}$  : 피로 적용 계수

$D$  : 기준의 슬래브 두께

- 경험적 반사균열 모델은 NCHRP 1-37A에서 정의한 PCC포장 위 아스팔트 덧씌우기에서 경험적 접근 기반의 경험적 적용원리 포장 설계 가이드 (MEPDG : Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide)의 방법론적 설계이며, 이는 sigmoidal 곡선을 활용한 시간의 함수로 덧씌우기를 통해 균열의 성장 비율을 예측함

$$RC = \frac{100}{1 + e^{a(c) + bt(d)}}$$

여기서,

$RC$  : 반사균열의 비율

$t$  : 시간(년수)

$a, b$  : 보정과정을 통한 회귀적합변수

$c, d$  : 사용자가 정의한 균열 진행 변수

- 회귀적합변수 a와 b는 아래와 같이 정의됨

$$a = 3.5 + 0.75(H_{EFF})$$

$$b = -0.688684 - 3.37302(H_{EFF})^2$$

여기서.

$H_{EFF}$  : 효율적인 아스팔트 덧씌우기 두께

- 콘크리트 포장 위 아스팔트 덧씌우기층의 하부는 반복되는 교통하중에 의해 피로 손상을 받는다. 이 때, 누적 피로 손상은 각각의 임계위치에서 손상지표 ( $DI_m$ )의 합에 의해 정의되며, 허용 축하중 적용 횟수  $N_{f-HMA}$ 는 아래와 같이 정의됨

$$DI_m = \sum (\Delta DI)_{j,m,l,p,t} = \sum \left( \frac{n}{N_{f-HMA}} \right)_{j,m,l,p,t}$$

여기서,

$DI_m$	: 한 달 손상지표
$\Delta DI$	: 손상지표의 증가
$N$	: 실제 특정 기간동안의 축하중 적용 횟수
$N_{f-HMA}$	: 허용 축하중 적용 횟수
$m$	: 개월 수
$j$	: 축하중 작용 주기
$p$	: 축하중의 종류(단축, 2축, 3축, 4축, 또는 특수한 배열)
$l$	: MEPDG에 포함된 트럭 분류체계에서의 트럭의 종류
$t$	: 달별로 5번의 주기 혹은 시분위로 세분화된 온도의 중앙값

$$N_{f-HMA} = k_{f_1}(C)(C_H)\beta_{f_1}(\epsilon_t)^{k_{f_2}\beta_{f_2}}(E_{HMA})^{k_{f_3}\beta_{f_3}}$$

여기서,

$\epsilon_t$	: 임계 위치에서의 인장 변형률 (in/in)
$E_{HMA}$	: HMA 압축면에서의 동적 탄성 계수
$k_{f_1}, k_{f_2}, k_{f_3}$	: 전 부위 보정 계수
$\beta_{f_1}, \beta_{f_2}, \beta_{f_3}$	: 국부적 또는 혼합물의 특정 부위 보정 계수
$C_H$	: 두께 보정(균열의 종류에 따른)
$C$	: 재료 특성 보정 계수

- m개월에서의 하부층 피로 손상 면적 결과  $CA_m$ 는 아래와 같이 정의됨

$$CA_m = \frac{100}{1 + e^{6 - (6DI_m)}}$$

- 반사균열모델은 회귀 방정식으로 이루어져 있으며, 고려한 주요 변수들은 PCC 포장의 조인트와 균열, 아스팔트 덧씌우기 두께에 따른 조인트와 균열에서의 하중 전달이고, 교통하중, 교통량, 환경적 요인, 덧씌우기 재료의 특성, 기존 포장층과 노상 등의 영향이 반사균열에 충분한 영향을 줄 수 있지 만, 고려대상에서 제외됨

## 2. 확장된 다층 선형 탄성 모델

- 다층 선형 탄성 이론은 아스팔트 포장 분석과 설계에서 널리 사용되며, 기계적-경험적 포장 설계 가이드(MEPDG : Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide)의 포장반응 모델은 다층선형탄성이론을 바탕에 두고 있다. 다층 선형 탄성 이론은 아래의 가정을 따름
  1. 기하학적 축 대칭
  2. 선형 탄성 재료는 동질성, 등방성을 가짐
  3. 수평한 평면에서 모든 층은 무한하게 확장됨
- 위 가정들은 균열이 생긴 포장 위 HMA 덧씌우기를 다중 선형 탄성 이론으로 분석할 때 만족스럽지 않기 때문에 다중 선형 탄성 이론은 반사 균열 분석에 적합하지 않지만, 몇 번의 시험에서 단순한 방식으로 균열 성장을 분석하는 모델을 구성했고, 아스팔트 포장 설계를 위한 ERDT(Esso Road Design Technology)의 일부를 개발한 Esso-Moebius 컴퓨터 프로그램(Eckman, 1990)이 확장된 다중 선형 탄성 모델중 하나임
- 계산 방법은 현장에서 적용 가능한 응력과 변형률을 다중 선형 탄성 이론을 기반으로 하며, 변수로는 층 배열, 재료 특성, 교통량의 흐름 종류, 그리고 온도를 고려함
- 포장 시공의 단기 혹은 장기 거동이 나타내는 것은 거동 지표로부터 제공 받을 수 있으며, 프로그램은 사용자 친화적이고, 몇몇 상황들을 동시에 처리할 수 있어야함
- 프로그램은 포장 시공 시 응력과 변형률 계산, 피로 지수의 계산, 2개의 설계 변수를 동시에 계산, 역청 층에서의 러팅 예측, 그리고 미래 포장 거동의 예측을 제공할 수 있어야함

## 3. 평형 방정식 기반 모델

- 아스팔트 덧씌우기 설계과정은 FHWA(Federal Highway Administration)에서 개발이 되었고, 후에 McCullough와 그의 협회에 의해 Arkansas State Highway and Transportation Department에서 개발되었음(Treybig et al, 1977; McCullough et al, 1982; Seeds et al, 1985)
- 설계과정은 아스팔트 덧씌우기에서의 응력과 변형률을 추정하기 위한 평형 방정식의 단순한 접근을 기반으로 할 뿐만 아니라, 컴퓨터 프로그램과 현실적인 덧씌우기 설계 형식으로 시행

- 분석 과정에서, 슬래브의 수직 변위는 하중의 전달을 묘사하고, 18-kip 축 하중 발생으로 인한 덧씌우기에서의 전단 변형을 예측하는 반면에, 슬래브의 수평 변위는 계절이 변하는 동안의 덧씌우기 내에서 발생하는 최대 일일 인장 변형을 예측할 수 있음
- 두 변형 기준에서 피로 형식의 접근은 덧씌우기가 얼마나 지속될지 예측하는데 적용되며, 확률분포는 덧씌우기 설계 시 설계수명을 넘어선 반사균열의 수준을 최소화하는 것에서 비롯된 수평 인장(환경적) 변형률 기준을 적용
- 모델 개발은 아래와 같은 가정을 바탕으로 함

1. 선형 탄성과 모든 가정들은 문제에 적용할 수 있도록 연관되어 있음
2. 정적 평행의 지배방정식은 포장에 적용가능함

ex.  $\sum F_x = 0$ ,  $\sum F_y = 0$ ,  $\sum F_z = 0$  (힘의 평형조건에 의해 x,y,z의 힘의 합은 각각 0)

3. 기존 콘크리트 슬래브에서의 온도 분포는 일정함
4. 콘크리트의 거동은 슬래브길이에 따라 연속적임
5. 층의 거동은 층의 두께에 따라 일정함
6. 재료의 특성은 독립된 차원을 가짐

- 설계과정은 Arkansas State Highway and Transportation Department(Seeds et al, 1985)에서 확장, 보정되었으며, 직접 열 응력과 슬래브 하부의 온도 강하와 관련된 거동, 자연적인 온도 주기 변화, 그리고 피로 혹은 반복하중으로 인한 손상의 축적으로부터 발생한 아스팔트 덧씌우기 반사균열을 예측
- 직접 열 응력으로부터 발생한 반사균열이 인장 변형을 유도함을 인지하였고, 슬래브 하부의 온도 강하와 관련된 거동, 자연적인 온도 주기 변화, 그리고 아스팔트 덧씌우기 반사균열이 피로 혹은 반복하중으로 인한 손상의 축적을 계산할 수 있음

#### 4. 일반적인 피로 방정식과 유한요소 해석이 결합된 모델

- 유한요소법은 아스팔트 덧씌우기의 반사 균열 분석에 널리 사용되고 있으며, Monismith와 Coetzee(1980)는 반사균열에 대해서 분석, 실내실험, 그리고 설계 고려사항까지 종합적인 정리를 하고, 그들의 결론 중 하나는 비록 균열 메커니즘의 적용이 덧씌우기 포장의 반사균열 해결책을 제공하는 개념적으로 매력적이고, 의심할 여지가 없는 잠재력을 가지고 있으나, 이 솔루션은 아직까지 설계 시 당장 사용 가능하거나 적합한 형식이 없다는 것임

- 이러한 응력/변형률의 크기는 아스팔트 덧씌우기 수명의 예측을 위한 피로 분석 기준으로 사용될 수 있었기 때문에 Chen et al.(1982) 역시 에리조나의 교통하중 하의 3층 콘크리트 덧씌우기 포장 시스템을 분석하기 위해 2차원 선형 평면 변형 FE 프로그램을 사용
- 분석 결과는 전단 거동이 휨 거동보다 교통하중이 조인트를 지날 때의 덧씌우기의 반사 균열이 더 유도되는 것을 나타내었고, Franken과 Vanelstraete(1993)는 반사균열을 방지를 위한 접촉면 시스템의 효과를 분석하는 2차원 FE 방법론을 사용해 1997년 2차원 FE 분석결과와 3차원 FE 분석결과를 비교
- 비교 결과는 2차원 평면에서 모든 포장 단면에 하중이 작용하게 분석하였기 때문에, 2차원 FE 평면 변형률이 3차원 FE 변형률보다 더 큰 변형률을 가졌으며, Kim과 Buttlar(2002)는 또한 3차원 비선형 FE 분석을 통해서 아스팔트 덧씌우기에서 주요 반응의 세부적인 분석을 했고, 3차원 비선형 FE 분석에 철저한 기초를 둔 것을 보여줌
- Sousa et al(2005)는 경험적 모델을 기반으로 반사균열을 고려한 덧씌우기 설계 방법을 발표했고, 초기 반사 균열의 위험을 최소화하기 위해 기존의 균열이 발생한 연성포장에 오버레이를 설계하는 방법론이 제안되었음
- 앞서 제안된 덧씌우기 설계방법은 아래의 7가지 순서로 구성됨
  1. 포장 단면 레이어의 모듈 두께를 결정 (FWD 역산이나 다른 형태의 추정법을 사용하여 수행)
  2. 대표 기온 결정 (최대 및 최소기온은 오버레이의 위치를 얻을 수 있는 원하는 신뢰도로 결정)
  3. 설계 균열의 비율 결정
  4. 조정 요소 결정 (노화조정, 온도조정, 현장조정 등)
  5. 오버레이 재료의 탄성계수 선택 (탄성계수 및 연성피로 수면은 연성피로시험을 통해 얻음)
  6. 설계값 결정 (3차원 유한요소 프로그램을 사용하여 균열 위의 구역에서 응력/변형률의 상태를 분석하고 그 변형률 값을 사용하여 편차 변형률을 정의함)
  7. 설계 ESALs 결정 (반사균열이 시작되기 전에 유지된 ESAL의 수는 연성피로 방정식을 이용하여 계산)
- 기존 피로 방정식과 유한요소 해석을 이용한 예측 접근법의 한계는 균열이 전파 및 확장 되는 것을 직관적으로 설명하지 못하는 것임

## 5. 균열 작용원리가 포함된 Paris의 법칙 기반 모델

- Monismith et al.(1980)는 균열 개념의 적용이 포장 덧씌우기를 통한 반사 균열을 해결책을 제공하기 위한 개념적으로 매력적이고, 의심할 여지가 없는 잠재력을 가지고 있음을 명시
- Jayawickrama와 Lytton(1987)은 아스팔트 덧씌우기 반사균열의 예측을 성공적으로 적용하였으며, 같은 균열 개념이 Owusu-Antwi et al(1998)에 의해 사용됨
- 연속체 개념과 달리 균열 개념 접근은 균열의 확장에 초점을 두었으며, 반사 균열의 발생은 하중의 3가지 방식의 조합에 의해서 발생하는 균열 확장 과정임
- Owusu-Antwi et al.(1998)은 PCC포장 위 아스팔트 덧씌우기에서의 반사균열 예측을 위한 역학적 기반의 모델을 개발했고, 그들이 개발했던 모델의 과정은 AC/PCC 복합 포장에서 균열 전파의 분석을 위한 기계적 균열 원리가 포함
- 3차원 유한요소 모델을 사용하여 온도와 교통하중을 J적분계산에 사용할 수 있는 수학적 방법을 얻었으며, Paris 균열 성장법이 허용된 온도와 교통하중의 적용들로부터 포장의 파괴를 계산하는데 사용되었고, 33개의 장기 포장 공용성 구간에 대해서 교통 및 온도 하중에 의한 전체 손상과 파손을 정량화하기 위해 하중 적용 수가 결정
- Miner의 누적 손상 가정을 사용하여 관찰된 파손에 상응하는 누적손상이 일치하는 부분을 산정하며, 최적화 기술은 PCC 포장 위 아스팔트 덧씌우기 반사균열의 비율을 예측하는 기계적 경험 모델을 얻는데 사용
- 이 모델의 감도분석은 상당히 타당한 반사균열 예측 모델을 얻는데 사용되며, 그 결과들은 거동 예측, 포장 관리, 그리고 비용분담에 적용되었으며, Owusu-Antwi et al(1998)은 중간정도 그리고 심각한 깊이의 균열을 예측하는데 사용되는 변수는 등가단축하중, 덧씌우기의 두께, 동결 지수, 그리고 아스팔트 덧씌우기를 하기 전의 PCC 상태가 있다고 보고

## 6. 균열 띠 모델

- 균열 띠 모델은 Rashid(1968)에 의해 소개된 “분산 균열 개념”을 기반으로 개발되었고, 이 접근법은 단일의 분산균열이 유한요소위에 연속적으로 분산된 무한히 작은 균열의 무한히 많은 평행의 균열로 대체됨
- 균열 예측 모델은 재료의 최고 강도에 도달한 후 균열에 수직방향으로 재료 탄성계수를 감소시킴으로써 모델링이 가능하하며, Joseph et al.(1987)은 저온에서의 반사균열 분석을 위한 균열 띠 모델 적용의 합리성과 필요성을 거론하였고, 그 방법은 아래 순서와 같음

### 1. 아스팔트 콘크리트는 비균질성 재료임

- 일반적인 근사 과정은 비균질성 재료는 만약 재료에서 골재, 콩극, 그리고 다른 요소들의 크기가 비교하기에 충분히 크다면, 등가 연속성 균질 재료로 대체됨
- 등가 균질 연속체의 응력과 변형률은 대체된 대표 체적 내에서 마이크로 응력과 마이크로 변형률의 평균으로 정의
- 이 정의는 임의의 비균질 재료의 이론을 기반으로 함(Bazant and Oh, 1983)
- 이것은 의미 없는 몇몇 골재의 사이즈보다 작은 곳에서 세부적인 응력 또는 변형률의 분포를 내포함
- 결과적으로, 골재와 바인더 사이의 서로 다른 탄성계수는 초소형구조물의 기하학에서는 고려되지 않음
- 균열 띠로 대표되는 체적 특징의 횡단면에서 응력 결과나 누적 변형률만이 고려됨

### 2. 직선으로 대체된 균열은 실제 균열과 거의 근사함

- 실제의 콘크리트 균열 경로는 부드럽지 않고, 매우 변화가 많음
- 균열의 곡선부 주위에는 단단한 골재가 위치한 경우가 많고, 전체적인 균열 축이 골재의 사이즈와 거의 동일한 거리에서 랜덤하게 벗어남
- 눈으로 볼 수 있는 미세 균열의 유치 분포는 균열 성장의 경로와 관계가 있음
- 또한 균열 띠에 의한 특성 개념이 일반적인 날카로운 균열 근사치보다 합리적임

### 3. Bazant 와 Oh(1983)는 균열선과 균열 띠 모델이 응력이 파괴점에서 미세균열의 결과로 변형률이 완만하게 작아지는 것 없이 갑자기 0까지 떨어질 경우에 동일한 결과를 도출

- 갑작스런 응력이 떨어지는 가정은 골재의 크기와 비교했을 때 충분히 크지 않은 횡단면 차원에서는 적절하지 않음
- 그러므로, 미세균열의 진전으로 인한 점진적인 변형 연화 현상을 고려해야하고, 이 것은 균열 띠 모델의 개념으로 쉽게 해결될 수 있음

### 4. 유한 요소법은 특히 균열 전파 분석에 쉽게 사용될 수 있음

- 유한 요소 방법은 단순히 띠 균열 전방향으로 재료의 강성을 감소시키는 것으로 적용가능
- 또한 이 개념은 비균질한 재료의 실제 수많은 균열 분포를 반영함

- 이 개념에 따르면, Joseph et al.은 기존 균열의 효과적인 폭을 정의할 수 있고, 2차원 평면 변형률 유한 요소 모델은 낮은 온도에서의 반사균열을 억제시키는 효과적인 다양한 처리법을 분석하도록 개발됨

## 7. 균열과 구역의 결합 모델

- Uzan and Levenberg(2001)은 접착 균열 모델(CCM : Cohesive Crack Model)의 간략한 개념을 제공하고 아스팔트 콘크리트 균열의 현상을 다뤘음
- 완전한 비선형 균열진행구역(FPZ : Fracture Process Zone)이 아스팔트 콘크리트의 균열 선단 주변에 있다는 가설을 통해 아스팔트 혼합물의 몇몇 상황에서 균열과정지역은 상당한 길이로 확장되는 것을 설명
- 균열 선단의 앞 비교적 큰 영구변형 항복 지역을 설명하기 위해, Dugdale(1960)과 Barenblatt(1962)는 고전적인 선형 탄성 균열 개념의 보정을 제안했으며, 그들의 모델은 균열 선단에서의 응력 폐쇄 적용에 의해 거의 정확한 탄소성 재료 거동을 보임
- Hillerborg et al.(1976)은 콘크리트 파괴에서 맞닥뜨린 큰 균열과정지역과의 관계를 설명하기 위해 유사한 모델을 제안하였고, 이러한 모델들은 일반적으로 접착 균열 모델이 고려되어 균열 선단 가까운 지역에서 접착 폐쇄 응력을 사용하였으며, 접착 균열 모델의 기초적인 3가지 가정은 아래와 같음
  1. 균열 지역 밖 재료의 특성은 비균열 상태의 지배를 받음
  2. 균열의 길이는 2가지 구역으로 나누어질 수 있음 : 접착부, 비접착부
  3. 접착부의 경우 균열 열림이 견인을 저항하고, 접촉면 사이에서 여전히 응력 전달이 이루어짐
- 접착부의 균열은 최대 주응력이 재료의 인장강도에 도달할 때 시작됨(균열 성장은 최대 응력 방향에 수직한 방향) (Uzan and Levenberg, 2001)
- 이는 균열 초기 기준에서 언급되는 반면에 접착부의 응력 전달능력은 아래 방향으로 진행이 시작된 균열 접착부로부터 두 접착 균열 접촉면이 균열이 완전히 벌어져 응력 전달이 0이 될 때까지 아래방향으로 진행
- 균열 성장 분석을 하는 동안에, 계산된 변위가 균열이 최대로 벌어진 사이즈에 도달할 때마다 비접착 균열은 증가됨
- 균열의 접촉면 사이에서의 응력 전달은 Post-Peak 힘수(Softening 힘수)에 의해 묘사되며, 이 힘수에서 재료의 완만한 곡선은 접착 균열 모델의 주된 요소로 고려됨

## 8. CCM (Cohesive Crack/Zone Model)

- Uzan과 Levenberg(2011)은 아스팔트 콘크리트 균열 현상에 대해 논하며 균열과 구역의 결합 모델(Cohesive Crack/Zone Model, 이하 CCM)에 관한 간결한 개념을 개발

- 연구에 의하면 아스팔트 콘크리트 균열 선단 주변에 매우 비선형적인 균열 진행 영역(FPZ, Fracture Process Zone, 이하 FPZ)이 존재하고, 특정한 상황의 아스팔트 콘크리트 혼합물의 경우 FPZ는 수 센티미터에 달하는 상당한 길이로 발전했으며, 균열 선단에 앞서 상대적으로 큰 영구변형 항복 영역을 설명하기 위해 Dugdale(1960)과 Barenblatt(1962)는 전형적인 선형 탄성 파괴 역학에 대한 보정을 제안
- 이는 응력 폐쇄를 모델 균열 텁에 적용하여 탄소성 재료 거동의 근사치를 계산하며, Hillerborg를 비롯한 연구진(1976)은 콘크리트 파손에 발생한 상대적으로 큰 FPZ를 설명하기 위해 이와 유사한 모델을 제안했고, 이 모델들은 균열 텁 주변의 응집된 응력 폐쇄를 활용하기 때문에 일반적으로 CCM으로 여겨짐
- 표준 CCM의 일반적인 가설은 다음과 같음
  - 진행 영역 외부 재료의 물성은 손상되지 않은 상태로 통제
  - 균열 길이는 마찰의 존재에 따라 나누어질 수 있으며, 마찰이 존재하는 균열에서는 마찰 저항 균열 발생이 존재하고 균열 면간의 응력 전달이 이루어지며, 균열의 최대주응력이 재료의 인장 강도에 도달하는 시점부터 형성되기 시작되어 균열의 진전 방향은 최대 응력 방향과 수직이며, 이를 균열 확장 기준이라고 정의(Uzan and Levenberg, 2001)
  - 마찰이 존재하는 균열에서의 응력 전달력은 접촉 균열 면이 움직이기 시작 할 때부터 응력 전달력이 0에 이르기까지 감소하는 특성을 가지고 있는데, 응력 전달력은 두 접촉된 균열 표면 사이의 변위가 항복상태에 도달하였을 때 0이 되며, 이는 CCM의 균열 확장 기준으로 여겨짐. 균열 확장 분석 동안 무 마찰 균열의 크기는 산출된 변위가 항복상태에 도달할 때마다 증가하고, 균열 면 간 전달된 응력은 post-peak 함수(연화 함수)로 설명되며, 재료의 연화 함수는 CCM의 주된 구성 요소로 여김

## 9. CDM (Non-Local Continuum Damage Mechanics-based Model)

- Wu et al(2006)은 반사 균열 모델링에 대한 가장 최근의 연구를 수행했으며, CDM 모델은 거시적 규모의 재료 및 구조의 변형 발생 시 수반되는 비균질적인 미시적 공정을 설명
- 일반적으로 국부적 CDM의 종국 상태는 균열 확장 문제를 야기할 만한 거시적 균열 발생과 일치하며 파괴 역학의 기본 맥락에서 고려되어야 하며, 국부적 CDM을 균열 확장 설명에 사용할 경우 모의 메쉬 종속성이 작용

- 이 문제는 비 국부적 CDM을 도입하여 방지할 수 있으며, 비 국부적 연속체란 일정 지점의 응력이 해당 지점의 변형 이력의 영향을 받을 뿐 아니라 주변부의 영향까지 받는 연속체를 일컫음
- 비 국부적 CDM은 국부적 CDM을 개선한 모델이고, 비 국부 성을 재료의 구성 관계에 통합하기 위한 다양한 방법이 제시되었음
- 반사 균열 모델에 대한 비 국부적 CDM 개발 후 모델의 매개 변수를 보정하기 위한 SHRP(Strategic Highway Research Program) 빔 피로 시험이 실시되었음
- 일련의 시험은 Young 탄성 계수 마스터 커브와 강성 감소 곡선 등 물성을 결정하기 위해 진행되었고, 실내 실험을 통해 보정된 반사 균열 모델은 최종적으로 HVS(Heavy Vehicle Simulator) 시험을 이용한 반사 균열 모의 시행을 통해 입증
- 이 시험은 균열과 줄눈이 발생한 콘크리트 포장에 실시한 아스팔트 콘크리트 덧씌우기를 대상으로 이루어지며, 현장에서 관측된 가장 지배적인 균열 양상과 덧씌우기의 반사 균열 수명을 높은 정확성으로 예측
- 결론적으로 FE(Finite Element) 프로그램에 포함된 THE IMPLICIT GRADIENT 비 국부적 CDM은 아스팔트 콘크리트 덧씌우기의 반사 균열 모의 시행에 대한 신뢰도 높은 역학 모델을 제공

## **제7장. 연구개발성과의 보안등급**

보안등급 : 일반

## **제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황**

해당 사항 없음

## 제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

### 1. 연구실 안전관리 개요

- 교내 연구실 안전사고를 예방하고 연구실의 안전성을 확보하고자 연구실안전관리규정에 의거 연구실 정기점검 및 정밀안전진단실시, 연구활동종사자의 교육 및 검진을 통한 안전성 확보, 사고 발생시 초동대응을 통한 인적, 물적 피해를 최소화 하고자함.

### 2. 연구실 안전관리 조직 및 담당업무

구 분	담당 업무
총장 및 부총장	<ul style="list-style-type: none"><li>• 연구실 안전관리 총괄</li></ul>
연구환경안전관리자 (시설관리처 안전관리팀)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 연구(실험)실 안전관리 총괄 관리</li><li>• 연구활동종사자 안전교육 운영 관리</li><li>• 상시 연구활동종사자 건강검진 진행</li><li>• 연구(실험)실 안전점검 진행 (정기점검, 정밀안전진단)</li><li>• 관련법, 안전수칙 교육 및 홍보</li><li>• 법 이행사항 보고 외부 점검 수행</li></ul>
대학 연구환경담당자 /학과담당자	<ul style="list-style-type: none"><li>• 계열 연구(실험)실 안전관리 관리</li><li>• 연구활동종사자 안전교육 홍보 및 이수현황 관리</li><li>• 상시 연구활동종사자 건강검진 홍보 및 현황 관리</li><li>• 연구(실험)실 안전점검 관리(정기점검, 정밀안전진단)</li><li>• 관련법, 안전수칙 교육 및 지도</li><li>• 각종 폐기물 처리 지침 준수 및 교육</li></ul>
연구실안전관리자 (정,부)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 연구(실험)실 실별 안전관리 총괄 관리</li><li>• 연구활동종사자 안전교육 홍보 및 이수현황 관리</li><li>• 상시 연구활동종사자 건강검진 홍보 및 현황 관리</li><li>• 연구(실험)실 안전점검 대비 일지 작성</li><li>• 관련법, 안전수칙 교육 및 지도</li><li>• 각종 폐기물 처리 지침 준수 및 교육</li><li>• 위험물 및 유해인자별 MSDS 비치 및 교육</li><li>• 각종 폐기물 처리 지침 준수 및 교육</li></ul>
(상시)연구활동종사자	<ul style="list-style-type: none"><li>• 연구실 안전교육 및 건강검진 참여</li><li>• 연구(실험)실 안전점검 실시</li><li>• 각종 폐기물 처리 지침 준수 폐기</li><li>• 위험물 및 유해인자별 MSDS 확인 후 실험</li></ul>

### 3. 연구실 안전관리

#### 가. 위험도에 따른 연구실 등급 관리

- A등급 : 자연성가스, 인화성 시약, 유해화학물질, 다량의 폐액배출, 독극물, 생물 및 동물, 방사성 동위원소, 위험성이 높은 기계장비가 설치된 실험실
- B등급 : 일반시약, 소규모 인화성 시약, 불연성가스, 소량의 폐수발생실험실
- C등급 : 이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실

#### 나. 연구실 정기점검 및 정밀안전진단

- 일상 점검 : 연구실안전관리자 책임 하에 일일 및 월별 점검 실시하여 특이사항 안전관리팀으로 보고
- 정기 점검 : 연구실 등급에 따라 안전관리팀 주관 하에 교내 전체 연구실에 대한 안전점검을 실시하여 문제점 개선 조치(1회/년)
- 정밀안전진단 : 외부 전문기관에 의뢰하여 교내 위험등급 A, B등급 연구실에 대하여 정밀안전진단을 실시하고 문제점 도출 및 개선 조치(1회/년)



#### 다. 연구실 안전교육

- 관련 근거 : 연구실안전환경 조성에 관한 법률 제18조 및 연구실안전 관리규정 18조(안전교육)에 의거 교내 연구활동종사자에 대하여 교육 실시
- 교육 대상 : 과학기술분야 학과(부)생 및 대학원생, 위험등급 A, B등급 연구실에 상시 근무하는 대학원 수료생 및 연구원

- 교육 방법 : 재학생(학부생, 대학원생)은 일괄 등록되며, 위험등급 A, B등급 상시연구활동종사자의 경우 학과에서 취합 후 안전 관리팀으로 대상 인원 제출
- 교육 이수시간 : 학기당 6시간, 년간 12시간 이수해야 하며, 이수증 연구실 앞 게시

구분	교육 대상	시간	교육 내용
정기	(상시) 연구활동종사자	6시간이상 /학기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연구실 안전환경 조성 법령에 관한 사항</li> <li>• 연구실내 유해·위험요인에 관한 사항</li> <li>• 안전한 연구개발 활동에 관한 사항</li> <li>• 물질보건 안전자료에 관한 사항</li> <li>• 그 밖에 연구실 안전관리에 관한 사항</li> </ul>
특별	중대사고 및 필요시 (상시) 연구활동종사자	2시간이상	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연구실내 유해·위험 요인에 관한 사항</li> <li>• 안전한 연구개발 활동에 관한 사항</li> <li>• 물질안전보건자료에 관한 사항</li> <li>• 그 밖에 연구실 안전관리에 관한 사항</li> </ul>

## 라. 연구실 건강검진

- 관련 근거 : 연구실안전환경 조성에 관한 법률 시행규칙 제10조, 연구실안전관리규정 21조(건강검진)
- 검진 대상 : 위험등급 A, B등급 연구실에 상주하는 상시연구활동종사자
- 검진 방법 : 위험등급 A, B등급 연구실 유해인자에 따른 상시 연구활동종사자 특수검진 실시(매년)

## 마. 연구실 안전 보험

- 관련 근거 : 연구실안전환경 조성에 관한 법률 제14조, 연구실안전관리규정 20조(보험가입)
- 보험 대상 : 과학기술분야 학과(부)생 및 대학원생, 위험등급 A, B등급 연구실에 상시 근무하는 대학원 수료생 및 연구원
- 보험 보상 한도
  - 상해사망 : 1인당 1억 원
  - 상해, 후유장애 : 1인당 1억 원 한도로 장애등급별 정액 보상
  - 부상 : 1인당 1천만원 한도로 상해등급별 정액 및 실손 보상
- 보험 청구 절차 : 연구실안전관리자가 연구활동종사자에 대한 사고경위서 및 보험청구서를 작성하여 안전관리팀으로 제출하며, 안전관리팀에서는 사고 경위 및 피해 상황을 검토하여 보험금 청구 및 안전조치 이행

## 제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

### 제1절. 학술지 게재 (2)

순번	요소 기술 구분	논문명	학술지명	주저자명	Vol.(No)	시작 폐이지	끝 폐이지	게 재 일 자
1	2-나	1차로 전면차단 후 도로포장 보수방법의 효과분석	한국도로학회	Yoon-Ho Cho	제18권 제3호	11	19	2016. 05.20
2	1-나	AC / PCC 복합포장 경계면 재료의 부착 성능 평가	한국도로학회	Yoon-Ho Cho	제 18권 제5호	1	9	2016. 09.06

### 제2절. 학술지 게재(SCI) (4)

순번	요소 기술 구분	논문명	학술지명	주저자명	Vol. (No)	시 작 폐 이 지	끝 폐 이 지	게 재 일 자
1	1-다	Evaluation of Structural Responses of Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP) using Falling Weight Deflectometer	Canadian Journal of Civil Engineering	Moon C. Won	VOL43	28	39	2015. 11.06
2	2-나	Application of ultrasonic shear-wave tomography to identify horizontal crack or delamination in concrete pavement and bridge	Construction and Building Materials	Moon C. Won	Vol.121	81	91	2016. 05.22
3	1-나	Interface behavior of partial depth repair for airport concrete pavement subjected to differential volume change	Construction and Building Materials	Yoon-Ho Cho	Vol.143	515	521	2017. 03.17
4	2-가	JCP Behavior with Traffic and Temperature Loadings: Analysis of a Test Road in Korea	ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities	Yoon-Ho Cho	-	-	-	2017. 04.10
5	1-나	Experimental and Numerical Evaluations on the Shape Factor of Silicone Sealant for Concrete Pavements under Vertical Loading	ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities	Yoon-Ho Cho	게재 예정			

### 제3절. 학술지 게재(학술발표) (13)

순번	요소 기술 구분	논문명	학술지명	주저자명	게 재 일 자
1	1-다	Joint Opening Behavior of JCP under the tunnel condition	한국도로학회	Yoon-Ho Cho	2015. 03.13
2	1-다	Mechanism of Transverse Crack Development in CRCP at Early Ages	BESETO 2015	Yoon-Ho Cho	2015. 07.22 ~ 2015. 07.24
3	1-가	Evaluation of Mix Designs to improve durability of concrete pavements	BESETO 2015	Moon C. Won	2015. 07.22 ~ 2015. 07.24
4	2-나	콘크리트 포장 형식에 따른 zero stress temperature 영향	한국도로학회	Moon C. Won	2015. 10.08
5	2-나	Comparative Analysis of Concrete Slab Behaviors	BESETO 2016	Yoon-Ho Cho	2016. 07.19 ~ 2016. 07.21
6	1-다	Effect of Concrete Materials & Other Variables on CRCP Performance	BESETO 2016	Moon C. Won	2016. 07.19 ~ 2016. 07.21
7	1-다	Performance of Bonded CRCP Overlay in Texas	11th international conference on concrete pavements	Moon C. Won	2016. 08.28 ~ 2016. 09.01
8	2-나	줄눈/균열부 반사균열 모사 및 덧씌우기 시 아스팔트 재료의 균열 저항성 평가 장비 개발	한국도로학회	Yoon-Ho Cho	2016. 08.29
9	1-나	최적의 택코트 재료 및 적용 평가	한국도로학회	Yoon-Ho Cho	2016. 08.29
10	1-다	Investigation of Crack Movement Behaviors in Continuously Reinforced	한국도로학회	Yoon-Ho Cho	2016. 08.29
11	1-다	FIELD INVESTIGATION OF DISCONTINUITY MOVEMENTS IN PAVEMENT STRUCTURES	ITC 2016	Yoon-Ho Cho	2016. 12.06 ~ 2016. 12.08
12	2-나	Evaluation of Reflective Cracking Resistance of Asphalt Mixtures through HEART Overlay Tester	한국도로학회	Yoon-Ho Cho	2017. 03.14
13	1-나	AC/PCC 덧씌우기 시 표면 텍스처 및 택코트 적용에 따른 부착면 전단강도 특성 평가	한국도로학회	Yoon-Ho Cho	2017. 03.14

## 제4절. 시제품 제작 (1)

요소 기술 구분	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야
1 1-	Heart Overlay Tester	2016	STK	중앙대학교	아스팔트 반사균열 평가

## 제5절. 현장시험 (2)

순번	요소 기술 구분	현장시험명	시험일	시험장소	주요내용
1 2-나	CRCP 위 F-DGM 덧씌우기 시험시공	2015.12.10	중부내륙고속도로 여주 한국도로공사 시험도로 구간	기존 CRCP 표면 텍스처 및 택코트 시공 방법에 따른 F-DGM 거동 평가	
2 2-나	CRCP 위 F-SMA 및 F-PFC 덧씌우기 시험시공	2016.07.12 ~ 2016.07.14	중부내륙고속도로 여주 한국도로공사 시험도로 구간	기존 F-DGM 표면 위 기능성 배합 재료인 F-SMA 와 F-PFC 시공 후 공용성 및 거동 평가	

## 제6절. 기술실시계약 (1)

순번	요소 기술 구분	계약명	실시 기업명	계약 체결일	기술사용 시작일	기술사용 종료일	정수금액 (천원)	계약 유형
1 1-가	개질 아스팔트를 이용한 CRCP의 덧씌우기 재료 및 포장 노하우(Know-how)	태릉건설	2015. 11.10	2015. 11.10	2020. 11.09	2015. 11.25	20,000,000	기술 이전

## 제7절. 특허 출원 (2)

순번	요소기술 구분	특허명칭	출원번호	출원일	출원인 (등록권리자)
1 1-가	포장 거동 모사 장치	10-2016-0042905	2016.04.07	중앙대학교 산학협력단	
2 2-나	아스팔트 덧씌우기 시공방법	10-2016-0045711	2016.04.14	중앙대학교 산학협력단	

## 제8절. 인력 양성 (3)

순번	요소 기술 구분	연구 내용	연구자	졸업일	과정
1	2-나	현장 시험시공 계획 및 Warm Mix Asphalt 연구	임무광	2015.02.20	박사 졸업
2	1-다	복합포장 경계면 부착 특성 연구	신소영	2016.02.19	석사 졸업
3	1-가	아스팔트 포장 거동 모사 장치 정상화 및 평가	김동규	2017.02.17	석사 졸업

## 제9절. 연구 주요 성과

### 1. 아스팔트 덧씌우기 재료 3가지 개발

- 기존 국내 콘크리트 포장의 노후화로 인해 대규모 유지보수 기법으로 아스팔트 덧씌우기가 고려되고 있음
- 미국 텍사스 교통 연구소에서 개발된 반사균열 및 러팅 저항성을 고려한 최적의 덧씌우기 및 복합포장 배합설계를 국내 실정에 맞게 적용하여 F-DGM, F-SMA, 그리고 F-PFC 세 가지 새로운 배합을 개발하여 현장 시험시공에 적용하였음

### 2. 국내 최초 2in (5cm) 아스팔트 덧씌우기 공법 개발

- 개발된 배합 혼합물을 이용해 기존 콘크리트 구조물의 거동으로부터 발생할 수 있는 반사균열을 저항하고, 강우 시 콘크리트 포장 내부에 수분이 침투하는 것을 방지하기 위한 F-DGM 1in (2.5cm)와 충분한 공극을 제공하며, 배합 골재사이의 인터록킹 효과를 극대화하여 기능적인 요소(소음, 미끄럼저항성 등)를 만족하는 F-PFC 그리고 F-SMA를 현장에 적용하여 공용기간 1년 이상 동안 초기 포장 결함이 발견되지 않을 정도로 우수한 공법을 개발하였음
- 단·장기 공용성 평가에서도 평가 기준을 상회하는 우수한 거동을 보였으며, 기존 콘크리트 포장의 줄눈 및 균열 움직임을 억제하여 구조적 상태 평가 향상을 야기했음

### 3. 국내 최초 부착 경계면 성능 향상을 위한 Undersealing 도입 및 직접전단강도 평가 실시

- 콘크리트 위 이질재료인 아스팔트 덧씌우기 공법에서 경계면 부착 성능은 공용성 및 포장 수명에 결정적인 영향을 미치며, 기존 포장의 텍스처와 택코트의 트랙킹 정도가 부착성능을 좌우하였음

- 국내·외로 단기 경화 택코트 개발을 위한 노력이 이루어졌으며, 본 연구에서도 1시간 30분 양생시간을 가진 TF-Coat를 적용하여 평가하였음
- 하지만, 개질 유화 아스팔트의 경우 가격이 비싸고, 교통 개방시간에 민감한 고속도로에서 1시간 30분 가량을 여전히 양생 시켜야 한다는 단점이 있음
- 따라서, 본 연구단은 Chip-sealing을 바탕으로 적용된 Undersealing 공법을 시험시공에 적용하였으며, 중차량의 트랙킹을 방지하는데 매우 효과적인 것을 알 수 있었음
- 뿐만 아니라, 기존 표면의 텍스처에 따라서 Undersealing의 부착 강도가 크게 영향을 받는 것을 알았으며, 텍스처 및 부착 거동 평가를 위해 미국에서 개발된 Direct Shear Tester를 사용해 평가해 MTD에 따른 부착 전단 강도 특성을 정의하였음

#### 4. 3축 방향 하중이 고려 가능한 Overlay Tester 개발

- 기존의 미국 연구진은 포장의 피로 및 환경 하중을 모사하기 위해 OT를 개발하였음
- 이는 x축 방향 하중만을 고려하였으며, 평가의 변동계수가 매우 커 합리적인 결과 값을 기대하기가 어려웠으나, 본 연구진은 세계 최초의 3축 하중 및 변위 제어가 가능하며, 각 축의 조합 모드가 가능한 Heart Overlay Tester를 개발하여 환경 및 교통에 의한 피로 하중 등을 폭넓게 평가할 수 있음
- 기존의 하중 감소 정도로 재료의 파괴를 정의하던 방법이 아닌 이미지 프로세싱을 도입하여 합리적인 표본을 추출해 결과 분석을 실시 할 수 있게 되었음

#### 5. 아스팔트 덧씌우기 카탈로그 단면 선정

- OT 및 덧씌우기 시험으로부터 도출된 파괴 물성을 이용하여 다양한 하중 조건에서의 모의시험 및 연구를 진행하였음
- 기존 텍사스에서 개발된 아스팔트 덧씌우기 설계법을 바탕으로 국내 실정 및 환경 조건 등을 고려하여 적용하였으며, 교통량에 따른 최적의 카탈로그 단면을 선정하였음
- 그 결과 2in 덧씌우기는 5~25만 ESAL을 수용할 수 있는 것으로 나타났으며, 4in 덧씌우기는 25만 ESAL 이상의 중 차량 하중에 적당한 것으로 판단되지만 이 설계 두께는 50% 반사균열 비율에 도달 할 때 까지 필요한 20년 이 넘는 설계 수명을 고려하면 보수적인 두께임

## 제11장. 기타 사항

해당 사항 없음

## 제12장. 참고 문헌

1. Fujie Zhou, Sheng Hu, Xiaodi Hu, and Tom Scullion "Mechanistic–Empirical Asphalt Overlay Thickness Design and Analysis System", FHWA/TX-09/0-5123-3, 2009
2. Fujie Zhou and Tom Scullion "Overlay Tester : A Rapid Performance Related Crack Resistance Test", FHWA/TX-05/0-4467-2, 2005
3. Irene Gonzalez-Torre "Evaluation of Reflective Cracking in Pavements Using a New Procedure that Combine Loads with Different Frequencies", 2014
4. Tom Scullion, Fujie Zhou, Lubinda Walubita, and Stephen Sebesta "Design and Performance Evaluation of Very Thin Overlays in Texas", 2009
5. Doh Young Soo, Kim Kwang Woo "Estimation of Fatigue Life of Reinforced Asphalt Pavement Overlay Against Reflection Cracking due to Flexural Fracture", 2000
6. Baek Cheol Min "Development of Mechanistic Empirical Overlay Pavement Design Program", 2012
7. Louay N.Mohammad "Optimization of Tack Coat for HMA Placement", 2012
8. Muslich "Assessemment of Bond Between Asphalt Layers "2010
9. Sapienza "Interlayer Shear Failure Evolution with Different Test Equipment", 2012
10. Mostafa "A simplified Overlay Design Model against Reflective Cracking Utilizing Service Life Prediction", 2003
11. Piotr Jaskula "Influence of Compaction Effectiveness on Interlayer Bonding of Asphalt Layers", 2014
12. Biidyut "Laboratory Study to Investigate the Performance of Tack Coat between Bituminous Layers, 2013
13. Wang, H "Road Profiler Performance Evaluation and Accuracy Criteria Analysis; Virginia Polytechnic Institute and State University" Blacksburg, VA, USA, 2006; p. 73.
14. Sayers, M.W.; Karamihas, S.M. The Little Book of Profiling—Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles; University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 1998; p. 102.
15. Mactutis, J.A; Alavi, S.H; Ott, W.C. Investigation of relationship between roughness and pavement surface distress based on WesTrack project. Transp. Res. Rec. 2000, 1699, 107–113.



### 주 의

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