

발 간 등 록 번 호

11-1613000-002316-01

R&D / 17CTAP-C114670-02

유도가열(Induction heater) 장치를 이용하여 자가치유 아스팔트콘크리트 포장 개발 최종보고서

2018.08. .

주관연구기관 / 군산대학교 산학협력단
협동연구기관 / (주)에스엔건설

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

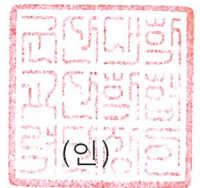
제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

‘유도가열(Induction heater) 장치를 이용하여 자가치유 아스팔트콘크리트 포장 개발’(연구 개발
기간 : 2016.10. 24 ~ 2018. 06. 21) 과제의 최종보고서 9부를 제출합니다.

2018. . .

주관연구기관명 : 군산대학교 산학협력단 (대표자) 김영철



공동기관명 : (주) 에스엔건설 (대표자) 김조순



주관연구기관책임자: 박대욱

참여기관책임자: 김조순

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C11467 0-02	해당 단계 연구 기간	2016.10.24.~ 2018.06.21	단계구분	(해당단계)/ (총단계)
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	유도가열(Induction heater) 장치를 이용하여 자가치유 아스팔트콘크리트 포장 개발			
연구책임자	박대욱	해당단계 참여 연구원 수	총: 12 명 내부: 12 명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:200,000천원 기업:75,000천원 정부 외: 천원 계:275,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 15 명 내부: 15 명 외부: 명	총 연구개발비	정부:380,000천원 기업:142,500천원 정부 외: 천원 계:522,500천원
연구기관명 및 소속 부서명	군산대학교 산학협력단			참여기업명 (주) 에스엔건설	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수	

유도가열 장치를 이용하여 steel wool fiber 혼입 아스팔트 콘크리트 포장 시편을 가열하였으며, 3점시험을 활용, 강도를 측정하여 회복정도를 측정하였다.

○전도성 물질의 종류 및 함량 결정

- 아스팔트 바인더 함량의 6%에 해당하는 Steel Wool Fiber를 첨가하였을 때 가장 좋은 분포 정도, 열전도율을 보여 자가치유효과가 가장 뛰어남.
- Steel Wool Fiber 함량이 6%를 초과하는 혼합물은 첨가제를 혼합하여 공시체를 제작하는 과정에서 서로 뭉치는 경향이 나타났으며 혼합물에 첨가제가 고루 분포하지 않는 경향이 나타남.

○가열 온도 결정

- 가열온도는 70℃일 때보다 90℃일 때 30%가량 높은 자가치유효과를 보임.
- 유도가열 방식은 고온일 경우 더욱 효과적인 자가치유효과를 나타냄. 가열온도로 90℃를 사용할 경우 혼합물의 구조에 영향을 주지 않고 균열을 치유하는데 충분함.

○유도가열을 통한 자가치유 반복에 따른 자가치유 성능 변화

- 자가치유를 거듭할수록 가열에 의한 노화가 발생하여 자가치유 성능이 감소함.
- 5회 이상의 유도가열을 통한 자가치유를 실시할 경우 모든 경우에서 자가치유 성능이 감소하는 것을 보이며, 초기 자가치유에 비해 약 43% 감소한 자가치유 성능을 보임.

○시험시공 결과

- 기존의 시공에 사용하던 장비의 그대로 사용하는데 아무런 제약이 없음.
- 기존의 시공과 비교하여 작업성 및 시공성에 영향을 주지 않음.

본 연구를 통하여 아스팔트 포장의 자가치유 가능성을 평가하였으며, 향후 실용화를 위한 연구자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

요약문

연구의 목적 및 내용	[연구 목적] 아스팔트 콘크리트 재료를 개발하고 유도가열(Induction heater) 장치를 이용한 자가치유(Self healing) 가능한 아스팔트 콘크리트 포장 개발. ※자가치유율 200% 이상 향상, 피로균열 2배 감소, 포장수명 2배 연장 [연구 내용] • 자가치유 아스팔트 혼합물의 메커니즘 분석 및 최적배합설계법 개발. • 자가치유 아스팔트 혼합물의 열전도 특성 및 미세구조 분석. • 자가치유 아스팔트 혼합물의 자가치유 성능 평가. • 시험시공을 통한 자가치유 아스팔트 혼합물의 적용 기반 마련.				
연구개발성과	[정성적 연구성과] • 5회 미만 자가치유시 50~90% 이상 균열 치유 달성 • 실내 유도가열장치 시제품 제작 • 남원국토관리사무소에서 관리하는 도로포장 구간 중 50m구간 시험시공 [정량적 연구성과] • SCI급 논문 3편 • 국내 특허 출원 1건, 등록 1건				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	[활용계획] ▪ 국제공동연구를 통한 현장 적용 가능한 유도가열 장치 개발 ▪ 자가치유 아스팔트 콘크리트 포장의 반사균열 저항성 평가 ▪ 자가치유 아스팔트 콘크리트 포장의 공용성 평가 ▪ LCCA를 통한 자가치유 아스팔트 포장의 경제성 분석 ▪ 자가치유가 가능한 다공성 아스팔트 포장의 개발 ▪ 유도가열 방법과 Steel Wool Fiber 함량에 따른 아스팔트 포장 수명 평가 [기술적 기대효과] ▪ 자가치유 아스팔트 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통해 해외기술 의존도 해소. ▪ 세계 최고수준의 기술 경쟁력 확보로 건설 분야 자가치유 기술 선도를 위한 발판 마련. ▪ 소성변형, 피로균열 및 수분 민감 저항성 향상으로 인한 포트홀 감소. ▪ 전도성 극대화 기술을 활용하여 공항, 고량 및 터널구간의 융설 포장 적용. [경제적·사회적 기대효과] ▪ 아스팔트 콘크리트 포장체의 자가치유 기술로 사회기반 시설물 유지관리 비용 절감 효과(전체 유지관리 비용 30% 감소). ▪ 유지관리 물량감소를 통한 전생애주기 이산화탄소 배출량 30% 감소로 인해 에너지 절감 효과. ▪ 향후 자율주행 자동차의 주행을 위한 업그레이드된 도로포장 제공함으로써 포트홀과 같은 저해요소 사전방지효과 기대.				
핵심어 (5개 이내)	자가치유	열전도성	유도가열	아스팔트포장	피로균열

SUMMARY

Purpose & Contents	[Purpose] Development of asphalt concrete material and development of self – healing asphalt concrete pavement using induction heater. ※ New self-healing asphalt mixture with 200% increase in self-healing rate, 2 times lower in fatigue crack, and 2 times longer in service-life compared to conventional asphalt concrete pavement. [Research content] • Analysis of mechanism of self-healing asphalt mixture and development of optimal formulation method. • Thermal conductivity and microstructure analysis of self-healing asphalt mixture. • Self-healing performance evaluation of self-healing asphalt mixture. • Establishment of application basis of self-healing asphalt mixture through test construction.				
Results	[Qualitative research result] • When the applied self-healing cycles are controlled less than 5 times, the crack healing efficiency shows promising results with 50 ~ 90% enhancement. • Development of indoor induction heating system prototype. • 50m section of the road pavement section managed by Namwon Land Management Office. [Quantitative research result] • 3 SCI journals. • 1 domestic patent application, 1 registration technology.				
Expected Contribution	[Application plan] • Development of induction heating device applicable to the field through international joint research. • Evaluation of Reflective Crack Resistance of Self-Healing Asphalt Concrete Pavement. • Performance evaluation of self-healing asphalt concrete pavement. • Economical analysis of self-healing asphalt pavement through LCCA. • Development of self-healing porous asphalt pavement. • Evaluation of the asphalt pavement service-life under different induction heating temperatures and steel wool fiber contents. [Technical expectation effect] ▪ The dependence on overseas technology is solved through securing technology source for self-healing asphalt concrete. ▪ Establish a foundation for leading the self-healing technology in the construction field by securing the world's best technology competitiveness. ▪ Reduce pothole due to plastic deformation, fatigue cracking and improve moisture resistance. ▪ Application of snow melting method in airport, high-altitude and tunnel sections by maximizing conductivity property. [Economic and social expectation effect] ▪ Self-healing technology of asphalt concrete pavement reduces social infrastructure maintenance cost (30% reduction in total maintenance cost). ▪ Reduce CO2 emissions by 30% through reduction of maintenance volume. ▪ In the future, the upgraded road pavement for the autonomous driving car is anticipated to prevent deteriorations such as potholes.				
Keywords	Self healing	Thermal conductive	Induction heating	Asphalt Pavement	Fatigue crack

< Contents >

1. Outline of R&D task	11
2. Status of domestic and overseas technology development	20
3. Research performance and achievements	26
4. Achievement of goal and contribution to relevant field	70
5. Plan to utilize R&D achievements	72
6. Overseas science and technology information collected during the research process	73
7. Security rating of R&D achievements	75
8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System	75
9. Implementation of safety measures in laboratories based on R&D tasks ...	75
10. Representative research achievements of R&D tasks	77
11. The others	77
12. Reference	77

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	11
2. 국내외 기술 개발 현황	20
3. 연구 수행 내용 및 성과	26
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	70
5. 연구개발성과의 활용 계획	72
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	73
7. 연구개발성과의 보안등급	75
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	75
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	75
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	77
11. 기타 사항	77
12. 참고 문헌	77

〈 그림 목차 〉

그림.1 국내 건설유지관리 시장 현황	11
그림.2 종횡선형균열	11
그림.3 거북등균열	11
그림.4 포트홀	11
그림.5 마이크로캡슐화 기술	13
그림.6 유도가열에 의한 자가 치유 개념	14
그림.7 전도성 물질(Steel wool fiber)	16
그림.8 아스팔트혼합물(SWF포함)	16
그림.9 유도가열장치	16
그림.10 유도가열에 의한 자가 치유 개념	17
그림.11 개발하고자 하는 실험실용 유도가열 장치 개념도	17
그림.12 자가치유 개념도	18
그림.13 피로균열 시험	18
그림.14 현장적용 개념도	18
그림.15 현장적용 유도가열 장치 개념도	19
그림.16 마이크로캡슐 자가 치유 원리	20
그림.17 마이크로캡슐 SEM 사진	20
그림.18 마이크로캡슐 10% 함량의 형광 현미경 사진(a1, b1, c1)	21
그림.19 마이크로캡슐 30% 함량의 형광 현미경 사진(a2, b2, c2)	21
그림.20 마이크로파 가열 방식의 자가 치유 원리	22
그림.21 Steel Wool Fiber 확대사진	22
그림.22 마이크로파 40초 가열된 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편의 열화상 사진	22
그림.23 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편의 CT-scan 3D사진	23
그림.24 마이크로파 가열 아스팔트 콘크리트 혼합물 공극변화	23
그림.25 유도가열 방식과 마이크로파 가열 방식의 질량변화	24
그림.26 유도가열 방식과 마이크로파 가열 방식의 자가 치유 후 시험 샘플	24
그림.27 유도가열 자가 치유 개념	25
그림.28 유도 가열 자가 치유의 최적온도	25
그림.29 가열 아스팔트 혼합물의 배합설계 절차	27
그림.30 배합 설계 입도곡선	28
그림.31 이론 최대 밀도 시험기	30
그림.32 아스팔트 콘크리트 혼합물 제작 및 시편 제작방법	31
그림.33 마샬 다짐기와 마샬 공시체 제작 과정	32
그림.34 마샬 안정도 시험	35
그림.35 Steel Powder (SP)	36
그림.36 Steel wool fiber (SWF)	36
그림.37 Thermal Constants Analyzer	37
그림.38 Steel Wool Fiber 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성	37
그림.39 Steel Powder 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성	38
그림.40 Steel Powder(%) + Steel Wool Fiber(%)첨가된 아스팔트 콘크리트혼합물의 열전도성 ..	38

그림.41 Slag + Steel Wool Fiber(%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성	39
그림.42 Slag + Steel Powder(%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성	39
그림.43 Slag-Steel Powder + Steel Wool Fiber(6%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성	40
그림.44 전기저항측정 시험 (디지털 멀티미터 시험기)	40
그림.45 SWF 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량	41
그림.46 Steel Powder 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량	41
그림.47 Steel Powder(%) + Steel Wool Fiber(6%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량	42
그림.48 Slag + Steel Wool Fiber(%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량	42
그림.49 Slag + Steel Powder(%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량	43
그림.50 Slag-Steel Powder + Steel Wool Fiber(%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량	43
그림.51 주사현미경시험(model s-4700 Hitachi, Japan)	44
그림.52 Steel Powder 주사전자현미경 시험결과	44
그림.53 Steel Wool Fiber 주사전자현미경 시험결과1	45
그림.54 Steel Wool Fiber 주사전자현미경 시험결과2	45
그림.55 Steel Powder + Steel Wool Fiber 혼합 주사전자현미경 시험결과	46
그림.56 CT-Scan (model - SkyScan-1076)	46
그림.57 CT-Scan 시험결과1	47
그림.58 CT-Scan 시험결과2	47
그림.59 표본에서 Steel Wool Fiber의 분포 비율	47
그림.60 표본에서 Steel Powder의 분포 비율	48
그림.61 표본에서 Steel Wool Fiber + Steel Powder의 분포 비율	48
그림.62 표본에서 Slag + Steel Wool Fiber의 분포 비율	49
그림.63 인장강도 시험기, 유도가열 시험기	50
그림.64 열화상 카메라	51
그림.65 표본의 열화상 카메라 이미지	51
그림.66 아스팔트 혼합물의 시간 표면온도	52
그림.67 표본의 열화상 카메라 이미지	52
그림.68 시험 시편 동결 및 융해 과정	53
그림.69 3점 휨 시험(TPB-test)	53
그림.70 90℃에서 아스팔트 콘크리트 혼합물의 치유성능	54
그림.71 70℃ 온도에서 아스팔트 바인더 등급에 따른 자가 치유 효과	55
그림.72 90℃ 온도에서 아스팔트 바인더 등급에 따른 자가 치유 효과	55
그림.73 PG58-22 아스팔트 바인더 응력-변형률 곡선	56
그림.74 PG64-22 아스팔트 바인더 응력-변형률 곡선	56
그림.75 PG76-22 아스팔트 바인더 응력-변형률 곡선	56
그림.76 아스팔트 바인더의 노화 시험 (70℃ 온도에서의 자가 치유 효과)	57
그림.77 아스팔트 바인더의 노화 시험 (90℃ 온도에서의 자가 치유 효과)	57
그림.78 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선	58
그림.79 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선(5시간)	58
그림.80 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선(15시간)	58
그림.81 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선(20시간)	59
그림.82 폐유를 사용한 아스팔트 바인더의 노화 시험 자가 치유 효과	59
그림.83 폐유를 사용한 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선	60
그림.84 Steel Wool Fiber 아스팔트 콘크리트 치유성능	60

그림.85 Slag + Steel Wool Fiber 아스팔트 콘크리트 치유성능	61
그림.86 Steel Wool Fiber 아스팔트 콘크리트 혼합물의 응력-변형률 곡선	61
그림.87 Slag + Steel Wool Fiber 아스팔트 콘크리트 혼합물의 응력-변형률 곡선	61
그림.88 아스팔트 콘크리트 혼합물 치유성능(70℃)	63
그림.89 아스팔트 콘크리트 혼합물 치유성능(90℃)	63
그림.90 재생첨가제와 폐유의 아스팔트 혼합물 치유성능(70℃)	64
그림.91 재생첨가제와 폐유의 아스팔트 혼합물 치유성능(90℃)	64
그림.92 아스팔트 혼합물의 응력-변형률 곡선 (아스팔트 콘크리트 혼합물)	65
그림.93 아스팔트 혼합물의 응력-변형률 곡선 (재생 30% 사용 아스팔트 혼합물)	65
그림.94 아스팔트 혼합물의 응력-변형률 곡선 (폐유사용 재생 아스팔트 첨가물)	65
그림.95 시험시공 구간	67
그림.96 아스팔트 콘크리트 운반	68
그림.97 아스팔트 콘크리트 타설	68
그림.98 아스팔트 콘크리트 다짐	68
그림.99 시험시공 구간 표시	68
그림.100 본 과제 결과를 바탕으로 후속연구를 통한 유도가열 장치 개발	72
그림.101 박테리아를 활용한 콘크리트 자가 치유	73
그림.102 아스팔트 콘크리트 자가 치유 도로	74

〈 표 목차 〉

표.1 본 과제 시험 조건	14
표.2 아스팔트 혼합물의 품질 기준	26
표.3 WC-3 합성입도 기준	28
표.4 골재 입도 분포	29
표.5 추정 아스팔트 함량 결정	29
표.6 열전도성 첨가제 배합표	30
표.7 최대이론밀도 시험결과	31
표.8 공극률 측정 결과 값	33
표.9 골재간극률 계산결과	34
표.10 포화도 계산결과	34
표.11 마찰 안정도 시험 결과	35
표.12 SWF 물성	36
표.13 Slag 입도 및 밀도	36
표.14 아스팔트 바인더 물성표	54
표.15 재생첨가제 물성표	62
표.16 재생골재 배합 입도분포	62
표.17 재생첨가제 함유량	62
표.18 아스팔트 바인더 등급에 따른 자가치유 효과	66
표.19 아스팔트 바인더 상태에 따른 자가치유 효과	66

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 기존 사회기반 시설물뿐만 아니라 신규 시설물에 대한 유지관리의 중요성이 증대함에 따라 유지관리비용절감 방안정책을 강조하고 있음.

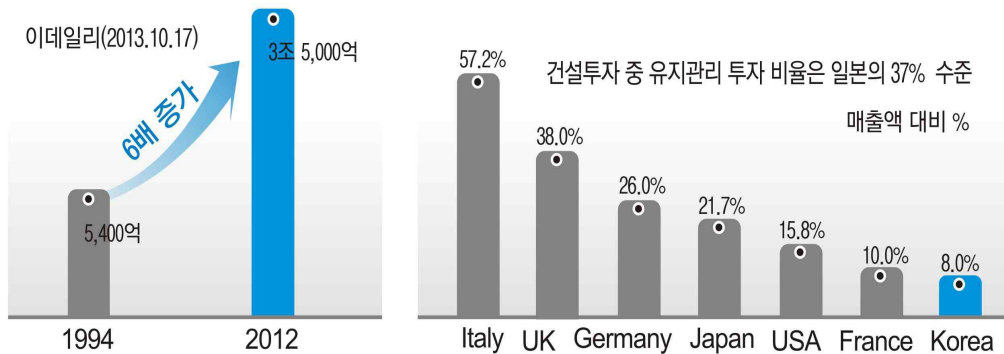


그림.1 국내 건설유지관리 시장 현황

- 현재 국내 아스팔트 콘크리트는 소성변형 저항성이 큰 반면 피로균열 저항성은 취약한 것으로 나타나고 있으며, 이는 중형선형피로균열에서 시작하여 거북등균열로 악화되고 있음. 이는 최근 문제가 되고 있는 포트홀 발생의 주요 원인이 되고 있으며, 차량파손 및 교통사고가 발생하여 운전자의 불편을 초래하고 있어 이를 해결하기 위한 피로균열 저감 원천 요소기술개발이 절실히 필요한 실정임.



그림.2 중형선형균열



그림.3 거북등균열



그림.4 포트홀

- 미국, 유럽, 일본 등의 선진국의 산업분야에서 균열에 따른 시설물의 손상을 저감시키거나 자가치유(Self-healing)할 수 있는 스마트 구조물의 개념이 대두 되면서 실제 건설 현장 적용을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있음.
- 기존의 도로시스템은 20~40년의 공용수명을 갖으나, 자가치유(Self healing) 아스팔트 도로포장 기술은 공용연수 2배 이상, 유지관리를 획기적으로 감소시킬 수 있는 차세대 핵심기술로 주목 받고 있음.
- 따라서 기존 유지관리 시스템과 비교하여 자가치유 아스팔트콘크리트 포장은 교통흐름의 개선은 물론 골재사용량 감소 및 CO₂ 배출량 감소에 기여할 수 있음. 이러한 아스팔트 콘크리트 포장의 자가치유 기술은 나노입자(nanoparticles), 유도가열(Induction heating), 개질제(Rejuvenation) 등 3가지로 구분됨.

2. 연구개발의 필요성

○ 기술적 측면

- 아스팔트 콘크리트의 자가치유(Self Healing)기술은 기존 아스팔트 포장시스템의 유지관리기술을 혁신적으로 변화시킬 수 있는 미래 유망기술로 현재 시장 도입초기로서 도로포장의 유지관리 시장을 주도할 수 있음.
- 선진국에서는 이미 분야별 핵심기술 개발이 이루어지고 있는 바, 국내에서도 아스팔트 포장의 유지관리 시장에서의 기술격차 해소는 물론 선도 기술 확보를 위해서 기초연구 및 원천기술의 개발이 매우 시급함.
- 자가치유 아스팔트포장을 개발을 통하여 조기 피로균열 발생을 방지할 수 있으며, 약 3~4년 동안 피로균열없이 도로포장을 이용할 수 있음.
- 자가치유 아스팔트는 부서지더라도 열을 가하면 다시 견고하게 재생되며, 피로균열이 포트홀로 발전되는 것을 사전에 차단할 수 있음.
- 본 연구 과제를 바탕으로 향후 실물 크기의 장비를 개발하는 원천기술로 사용할 수 있으며, 국토 및 시도에서 피로균열에 효과적인 예방기술로 사용할 수 있음.

○ 경제적 측면

- 자가치유 아스팔트 도로포장 기술을 이용하여 설계공용연수를 2배 이상 향상시키며 유지관리 비용을 획기적으로 감소시킬 수 있음.
- 국내 도로포장 관련 새로운 전도성 아스팔트 콘크리트 재료, 유도가열장치 및 모듈의 사업화를 도모 할 수 있음.
- 또한 국내 도로관련 사업을 선정할 수 있으며 신규 고부가가치 시장을 창출 할 수 있음.

○ 사회적 측면

- 피로균열은 최근 문제가 되고 있는 포트홀 발생의 주요 원인이 되고 있으며, 차량파손 및 교통사고가 발생하여 운전자의 불편을 초래하고 있어 이를 해결하기 위한 피로균열 저감 원천 요소기술개발이 절실히 필요한 실정임.
- 기존 포장의 경우 잦은 유지보수로 교통 혼잡에 의해 운전자의 불편을 초래하고 있으나 자가치유 아스팔트도로포장 기술로 인한 유지보수 시간이 감소함으로 운전자들의 불편을 해소할 수 있음.
- 도로 중심의 안전한 교통체계를 구축을 위하여 도로 경쟁력을 향상시켜야 할 필요가 있음.

○ 정부지원의 필요성

- 아스팔트 포장의 유지관리 시장에서의 선진국과의 기술격차 해소는 물론 선도 기술 확보를 위해서 기초연구 및 원천기술의 개발을 위해 정부지원이 필요함.
- 보수 시간절약 및 피로균열감소로 인한 도로공용수명 증가 등 도로교통에 대한 국민의 신뢰 회복이 필요함.

3. 연구개발 범위

○ 국내 현황

- 아스팔트 포장의 자가치유 기술에 대한 연구는 2014년 국토부에서 자가치유형 아스팔트 개발에 대한 연구를 수행한 사례가 있으나, 폴리머를 활용한 개질제 및 마이크로캡슐화 기술로서 본 연구내용과는 다른 기술로서 중복성 검토결과 유사한 기술은 없음.
- 대부분의 연구개발과제의 경우 아스팔트의 내구성능 향상을 위한 개질제 및 페아스팔트 콘크리트 활용을 위한 재활용 기술이 주를 이루고 있으며 유도가열 기술을 활용한 자가치유 기술은 전무한 실정으로 선진국에서 이를 활용한 원천기술 연구를 진행 중에 있음.
- 또한 아이오노머, 나일론 및 폴리에스터와 같은 분자간결합력이 큰 고분자를 아스팔트에 투입하여 우수한 개질효과와 치유효과 나타난 자가치유형 아스팔트 연구를 진행한 사례도 있다.

년도	연구내용	수행기관
2015	항만 및 해안도로 적용을 위한 염분저항성이 우수한 플랜트믹스형 개질 아스팔트 콘크리트 개발	중소기업청
2015	현장 재생아스팔트 생산설비에 의한 중저운 현장 재생아스콘	국토교통부
2015	개질 아스팔트용 탄성체 에멀전의 입자 크기 조절 및 안정성 기술	국토교통부
2014	자가치유형 아스팔트 개발	국토교통부
2011	균열저항성을 높인 중온아스팔트 포장 개질제 개발	국토교통부
2005	환경친화적인 배수성 아스팔트 포장을 위한 고점도 첨단 개질제 개발	국토교통부

○ 국외 현황

- 유럽연합(EU, 2015)은 Self Healing Road의 실현을 위한 실증연구(2015년 EU-CORDIS SHARP Project)
- 네덜란드 교통국(2010)은 고속도로에 Self Healing Asphalt 포장을 시험 시공하여 우수한 성능 확인
- Qiu et al(2009)은 Nanorubber 개질 바인더를 활용한 아스팔트 보수 연구를 통해 비 개질아스팔트에 비해 우수한 자가치유 성능을 확인하였음.
- Inducting heating기술은 Minsk(1968)에 의해 시도되었으며, Garzia et al.과 Liu et al.(2010)는 전도물질(steel fiber, wool fiber 등)과 유도가열을 통해 자가치유 아스팔트 포장 개발 연구를 시작하였으며, 실용화를 위한 추가연구를 진행 중에 있음.
- 산화된 아스팔트 바인더의 강성 감소를 위해 사용되며, Reclaimte., Paxole 1009, Cyclepave 등 상용화된 개질제가 이용되고 있으며, 최근 Su et al.(2015)은 페조리유를 활용한 개질제 연구를 진행함.

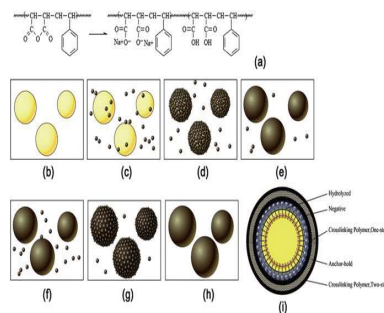


그림.5 마이크로캡슐화 기술

○ 본 연구 진행 방향

- 유도가열이란 전류를 전도도가 있는 물질에 흘려 자기장을 형성해 자기장 내부에 들어온 전도체의 내부에 전류가 흘러 그 저항에 의해 열을 발생시키는 것을 말함. 이러한 유도가열을 이용하여 아스팔트 콘크리트 내부에 위치해있는 전도체에 유도가열을 가해 전도체 주변의 아스팔트 바인더를 녹여 균열을 치유하는 기술을 개발하고자 함.

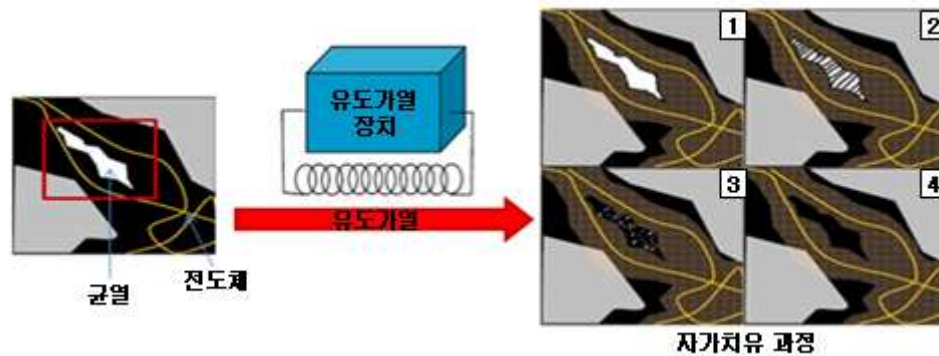


그림.6 유도가열에 의한 자가 치유 개념

- 유도가열에 의한 자가치유 효과에 영향을 미치는 요인인 전도체의 종류와 함량에 따른 열전도율 및 전기저항성을 측정하고 SEM 촬영, CT Scan을 통해 아스팔트 콘크리트 내부의 전도체 분포를 측정함.
- 또 TPB(Three Point Bending) 시험을 기반으로 각 조건에 따른 수분저항성 평가, 아스팔트 바인드 등급별 자가치유 성능 평가 및 아스팔트 노화에 따른 자가치유 성능 평가를 실시함. 이외 철성분이 포함된 Slag를 사용한 혼합물의 자가치유 성능 평가, 신골재, 재생골재 및 다양한 재생첨가제 사용 시의 자가치유 성능 비교, 폐조리유 사용 시의 혼합물 자가치유 성능을 평가함.

표.1 본 과제 시험 조건

변경 요인		비고
전도체	Steel Wool Fiber	
	Steel Powder	
골재	Steel Slag	
아스팔트 바인더 종류	PG58-22	아스팔트 PG 등급에 따른 분류
	PG64-22	
	PG76-22	
동결융해 횟수	1회	AASHTO T 283 에 따른 동결융해
	3회	
	5회	
노화 시간	5시간	대류형 건조기를 사용한 단기 노화
	15시간	
	20시간	
유도가열 온도	70℃	유도가열 시 도달 온도에 따른 분류
	90℃	
재생첨가제	4종의 재생첨가제	
	폐조리유	

○ 연구개발의 최종 목표

구분	내용
최종 목표	■ 본 연구의 최종목표는 전도성 아스팔트 콘크리트 재료를 개발하고 유도가열 (Induction heater)장치를 이용한 자가치유(Self healing) 가능한 아스팔트 콘크리트 포장 개발
세부 목표	■ 아스팔트 자가치유 문헌조사 및 메커니즘 현황조사 ■ 전도성 아스팔트 혼합물 배합설계법 개발 ■ 실험실용 파일럿 유도가열 장치 개발 ■ 실험실 모사를 통한 아스팔트 포장 자가치유 가능성 평가 ■ 유도가열 자가치유 공법 현장적용성 제시

가. 1차 연도

① 개발 목표

연차	연구기관	개발 목표
1차년도	주관기관 (군산대학교)	■ 자가치유 아스팔트 포장 재료 개발 ■ 미세구조 분석을 통한 전도성 물질의 아스팔트 혼합물내 분산 분석 ■ 유도가열기 시스템 개발
	참여기업 (주) 에스엔건설	■ 전도성 물질 개발 ■ 아스팔트 혼합물 내 분산을 위한 사전처리

② 연구내용

연차	연구기관	단계별 주요 연구 활동	세부 연구내용
1차년도	주관기관	■아스팔트 자가치유 문헌조사 및 메커니즘 현황조사	- 국내외 문헌 조사 : 선행 연구 분석 : 국내외 자가치유 연구조사 - 피로균열 및 자가치유 메커니즘 조사 : 피로균열 파손의 영향인자 조사 : 자가치유 메커니즘 분석조사 : 자가치유 방법론 조사 : 자가치유 공법조사 : 자가치유 현장 적용사례 조사
		■ 자가치유 아스팔트 포장 배합설계법 개발	- 아스팔트 혼합물 배합설계 : 최대 자가치유 효율화를 위한 골재분포 결정 : 아스팔트 혼합물 배합설계 : 전도물질 크기 및 조합에 따른 열전도 특성계수 평가 : 경제성 및 최대 열전도 특성을 가지는 자가치유 아스팔트 포장 배합설계법 개발 - 자가치유 극대화를 위한 미세구조 분석 : SEM을 이용한 미세구조 분석 및 혼합물 개발
		■ 실험실용 자가치유 모사용 유도가열 장치 개발	- 유도가열장치 개발 : 가열장치 개발 : 온도 측정 장치 개발 : 깊이별 온도예측장치 프로그램 개발
	공동연구 기관	■ 전도성 물질 가공	- 전도물질 개발 및 가공 : 경제적이면서 효율이 큰 전도물질 개발 : 분산을 위한 크기별 가공
		■ 아스팔트 포장 적용을 위한 사전처리	- 아스팔트 혼합물 내 분산을 위한 사전처리 (초음파 처리 및 고온처리)



그림.7 전도성 물질(Steel wool fiber)

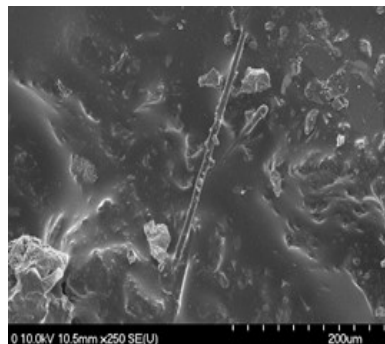


그림.8 아스팔트혼합물(SWF포함)

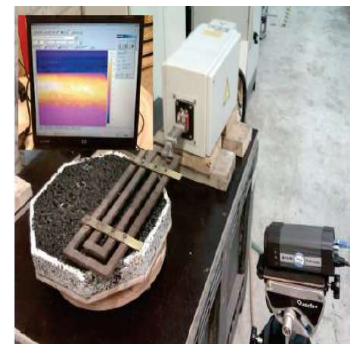


그림.9 유도가열장치

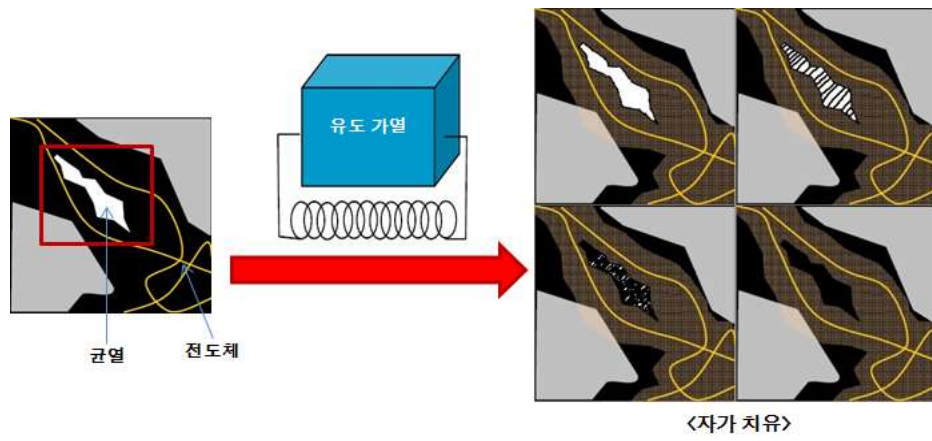


그림.10 유도가열에 의한 자가 치유 개념

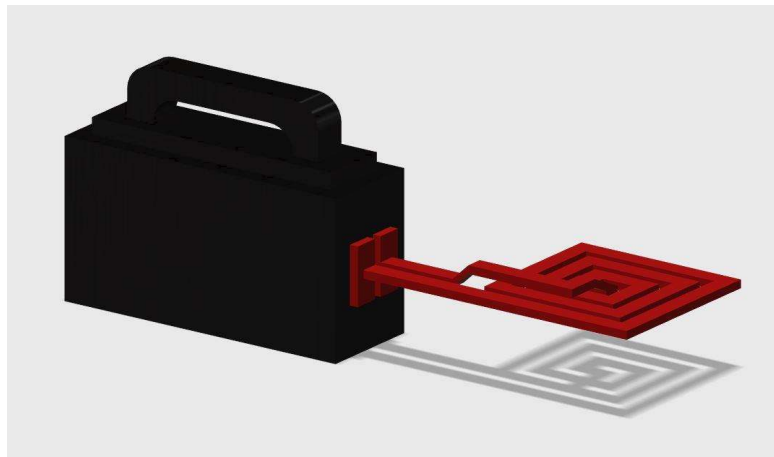


그림.11 개발하고자 하는 실험실용 유도가열 장치 개념도

나. 2차 연도

① 개발 목표

연차	연구기관	개발 목표
2차년도	주관기관 (군산대학교)	■ 자가치유 실험실 모사 및 자가치유 가능성 평가(회복율 80%이상) ■ 자가치유 아스팔트 혼합물 성능 평가
	위탁기관 (주)에스엔건설	■ 실험실용 소규모 자가치유 아스팔트 포장 시공 ■ 자가치유 성능평가

② 연구내용

연차	연구기관	단계별 주요 연구 활동	세부 연구내용
2차년도	주관기관	■ 자가치유 아스팔트 혼합물 공용성 평가	- 전도물질 함유 아스팔트 혼합물 성능평가 : 아스팔트 혼합물 소성변형 저항성 평가 : 아스팔트 혼합물 피로균열 저항성 평가 : 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성과 피로균열 저항성의 상관관계 분석 : 아스팔트 혼합물 수분 민감 저항성 평가
		■ 아스팔트 콘크리트 포장 자가치유 실험실 모사 및 자가치유 성능평가	- 피로균열 모사 및 자가치유 시험 : 다양한 전도물질 아스팔트 혼합물 시료 제작 : 피로균열 시험기를 장치를 이용한 아스팔트 피로균열 모사 : 열전도특성 평가 : 다양한 전도물질에 따른 자가치유 능력 평가 : 아스팔트 혼합물 노후화 및 환경조건에 따른 자가치유 능력 평가 : 일반아스팔트 혼합물과 자가 치유 성능 평가
	참여기업	■ 시험시공 및 자가치유 아스팔트 포장 현장 적용성 검토	- 실험실용 소규모 자가 치유 아스팔트 포장 시공 - 자가치유 성능평가 - 대규모 현장 적용을 위한 장비 개념도 개발

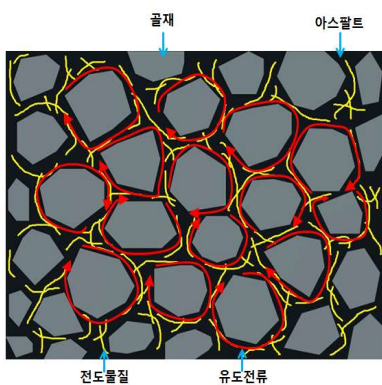


그림.12 자가치유 개념도

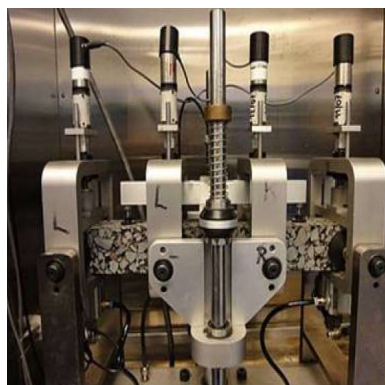


그림.13 피로균열 시험



그림.14 현장적용 개념도

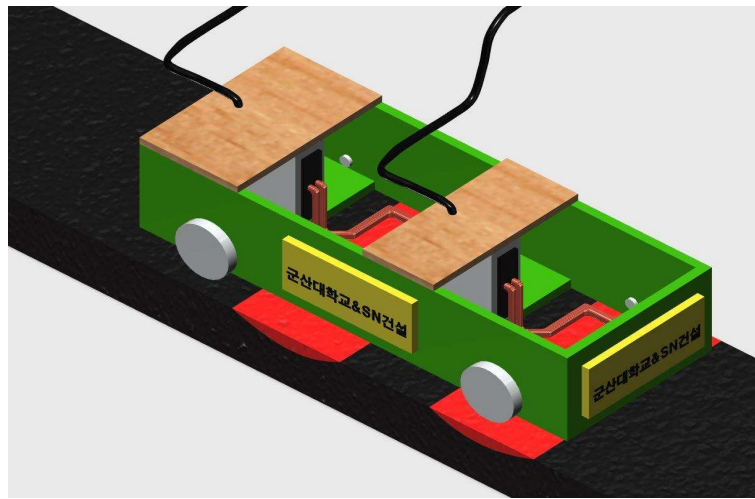


그림.15 현장적용 유도가열 장치 개념도

4. 연구개발 차별화 전략

○ 연구개발과제의 차별화 방안

- 아스팔트 포장의 자가치유 기술에 대한 연구는 2014년 국토부에서 자가치유형 아스팔트 개발에 대한 연구를 수행한 사례가 있으나, 폴리머를 활용한 개질제 및 마이크로캡슐화 기술로서 본 연구내용과는 다른 기술로서 중복성 검토결과 유사한 기술은 없음
- 대부분의 연구개발과제의 경우 아스팔트의 내구성능 향상을 위한 개질제 및 폐아스팔트 콘크리트 활용을 위한 재활용 기술이 주를 이루고 있으며 Inducting heating 기술을 활용한 자가치유 기술은 전무한 실정으로 선진국에서 이를 활용한 원천기술 연구를 진행 중에 있음.

○ 연구개발의 창의성 및 혁신성

- 유도 가열기를 전도성 아스팔트 포장에 적용하여 자가치유를 수행한 연구는 국내에서는 물론이고 해외에서도 극소수 국가가 수행한 연구로 전도성 물질을 아스팔트 포장연구에 수행한 사례는 매우 혁신적이고 창의적임.
- 본 연구의 전도물질을 아스팔트 포장에 개발하여 유도성 가열기로 열을 가함으로서 자가치유가 되는 원리를 이용한 것으로 자가치유의 가능성 평가가 매우 창의적이고 혁신적인 연구라고 판단됨.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 마이크로캡슐 방식의 자가 치유

- 바인더 특성을 복원하기 위하여 마이크로캡슐을 통해 아스팔트 혼합물을 자가 치유 하는 방법임. (Su 2015, Su 2014), Su and Schlangen (Su 2012) and Garcia et al. (Garcia 2010).
- 기본 원리는 <그림.16>과 같이 아스팔트 콘크리트 포장에 미세 균열이 발생하기 시작하면 균열을 통하여 바인더 안의 캡슐이 같이 터지면서 자가 치유 물질을 방출함.
- 마이크로캡슐은 다양한 종류의 치유 물질을 함유할 수 있으며 아스팔트 생산 공정에서 발생하는 열적, 물리적 안정성을 확보함.
- 마이크로캡슐은 메탄올과 멜라민-포름알데히드의 중합체로 만들어짐.

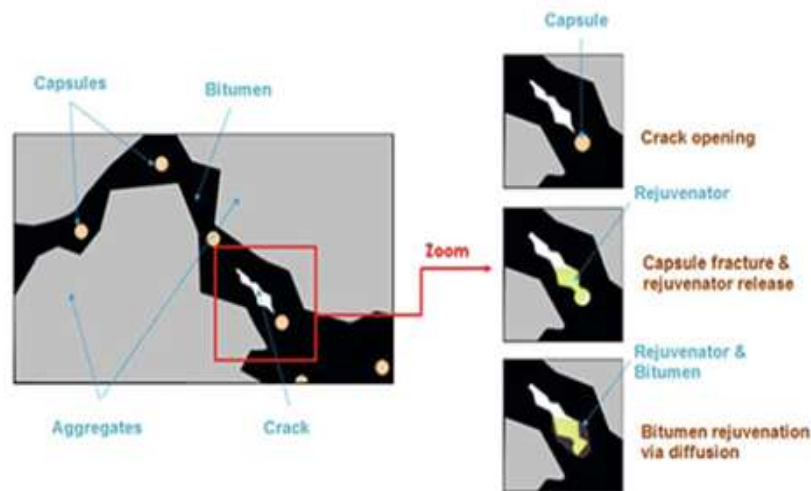


그림.16 마이크로캡슐 자가 치유 원리

- 아스팔트 콘크리트 혼합 및 포장 압축 과정에서 압착 및 파괴를 방지하기 위해 캡슐의 크기는 $50\mu m$ 미만이어야 하며 $10\mu m$ 이하는 마이크로캡슐의 자가 치유 효과가 부족함.
- 마이크로캡슐의 단점으로 자가 치유 물질 방출은 1회로써 사용을 다한 마이크로캡슐은 자가 치유 능력을 상실함.

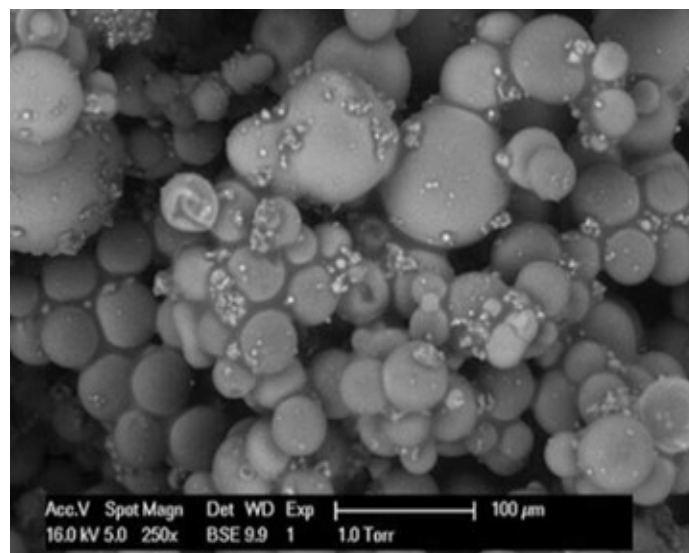


그림.17 마이크로캡슐 SEM 사진

- <그림.18>, <그림.19>는 현광현미경을 사용하여 나타낸 사진이며 마이크로캡슐의 분포를 쉽게 확인할 수 있음.
- c1은 아스팔트 바인더의 10%함량의 마이크로캡슐 함유하고 c2는 30%함량이 첨가된 사진이며 c2 사진이 아스팔트 바인더에 더 많은 분포를 확인 할 수 있음.
- 마이크로캡슐의 최적 함량은 아스팔트 콘크리트 혼합물 내 전체 아스팔트 부피의 30% 이하로 설정해야함. 아스팔트 부피 30%이상의 마이크로캡슐은 아스팔트 바인더의 분리와 미세 균열의 결함을 가져와 아스팔트 콘크리트 포장을 조기 파손할 수 있음(Su 2014).

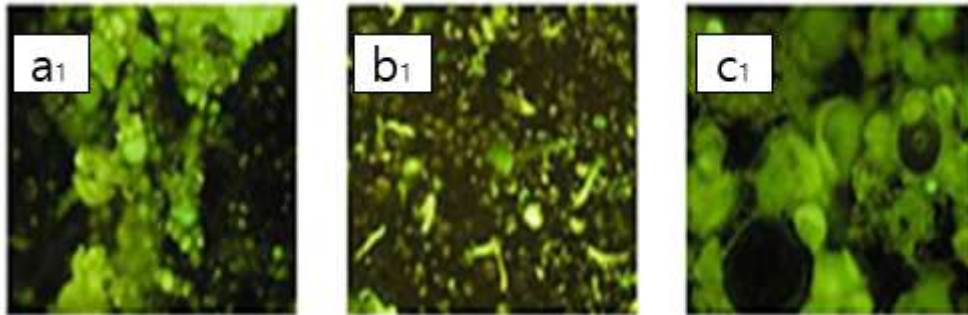


그림.18 마이크로캡슐 10% 함량의 형광 현미경 사진(a1, b1, c1)

a1, b1: 직경 10 μ m, c1: 직경 20 μ m

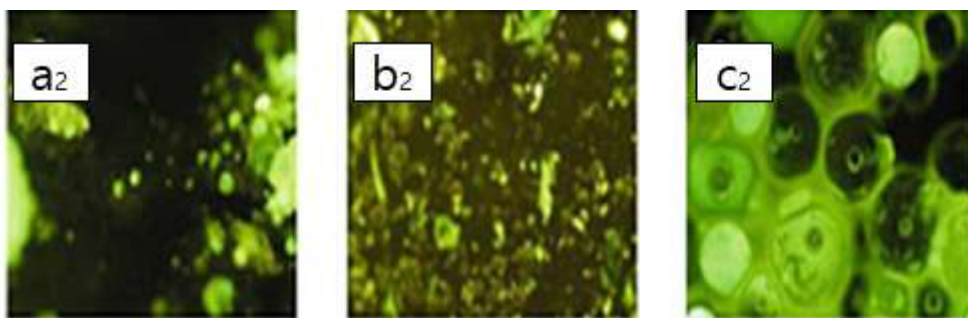


그림.19 마이크로캡슐 30% 함량의 형광 현미경 사진(a2, b2, c2)

a2, b2: 직경 10 μ m, c2: 직경 20 μ m

2. 마이크로파 가열 방식의 자가 치유

- 연구에 따르면 아스팔트 콘크리트 포장은 여름철 고온에 노출 될 때 자가 치유함. 아스팔트 바인더는 일정 온도가 되면 스스로 자가 치유를 하는데 아스팔트 바인더는 점성 물질로 이 같은 현상이 발생함 (Liu, Q. 2012), (A. Garcia 2012).
- 아스팔트 콘크리트 포장에 대한 자가 치유 성능을 촉진시키기 위한 방법 중 하나로 마이크로파를 이용하여 아스팔트 콘크리트 포장을 가열함. J. Norambuena-Contreras et al. (2016), Gallego et al. (J. Gallego 2013), Gonzalez and Schlangen (A. Gonzalez 2018).
- <그림.20>은 마이크로파의 자가 치유 원리를 나타냄. <그림.20>에서 볼 수 있듯이 전자레인지와 같은 전자기 복사 장치를 사용하여 아스팔트 콘크리트 혼합물을 가열하면 아스팔트 바인더가 녹아 아스팔트 포장에 균열을 치유 하는 방식임.

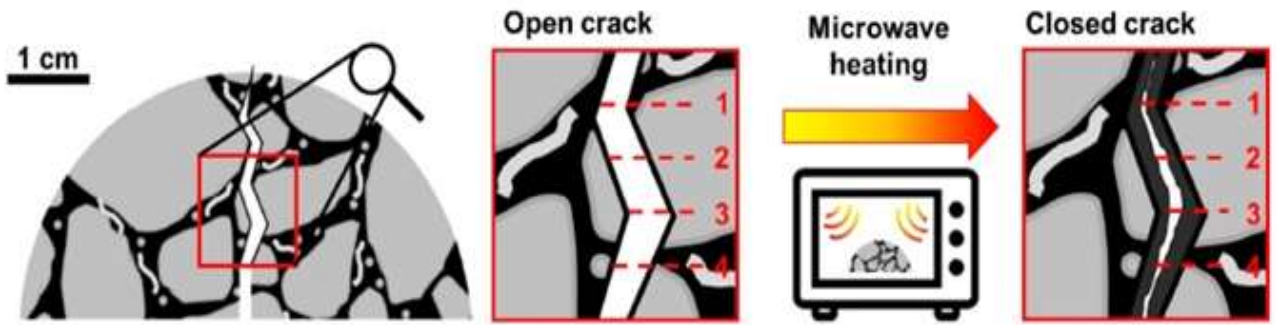


그림.20 마이크로파 가열 방식의 자가 치유 원리

- 마이크로파 가열 방식의 자가 치유를 위해 Steel Wool Fiber는 다른 첨가제 성분에 비해 더 많은 열에너지를 흡수하고 전달할 수 있음(A. Garcia 2013).
- 마이크로파 가열 방식의 자가 치유는 40초에서 아스팔트 콘크리트 혼합물의 자가 치유가 가장 높은 효과를 나타냈으며 가열 시간이 길어지면 아스팔트 바인더의 온도가 인화점까지 상승하여 화재의 위험성을 갖으며 치유량이 낮아짐 (J. Norambuena-Contreras 2016).

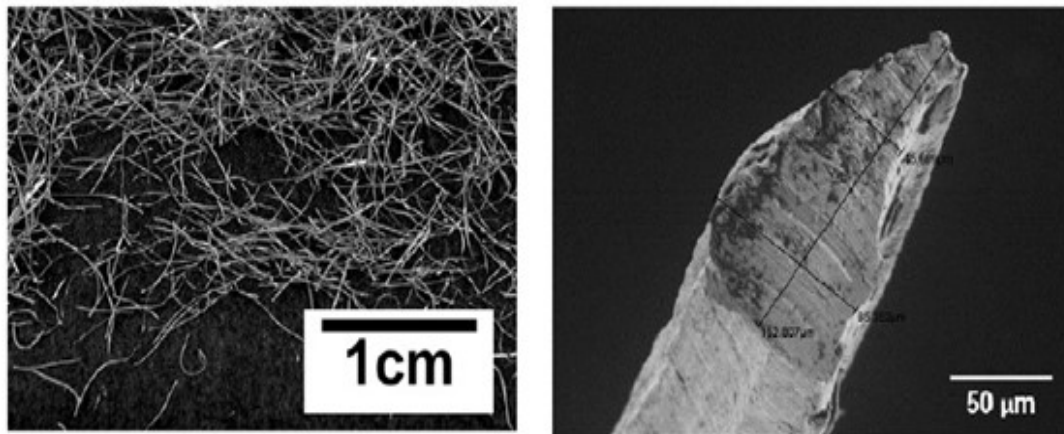


그림.21 Steel Wool Fiber 확대사진

- Fiber의 양이 증가함에 따라 부피 밀도가 감소하며, 아스팔트 콘크리트 혼합물의 공극은 Fiber와 함께 선형증가를 나타냄. 이는 Fiber의 함량이 증가할수록 압착력이 낮아짐.
- 또한 <그림.22>와 같이 아스팔트 콘크리트 혼합물의 공극이 증가할수록 혼합물 시편의 열분포 상태가 고르지 못함.
- <그림.23>에서 나타나듯이 Fiber의 함량이 낮으면 고른 열 분포가 나타나고 Fiber의 뭉침 현상을 피할 수 있음.

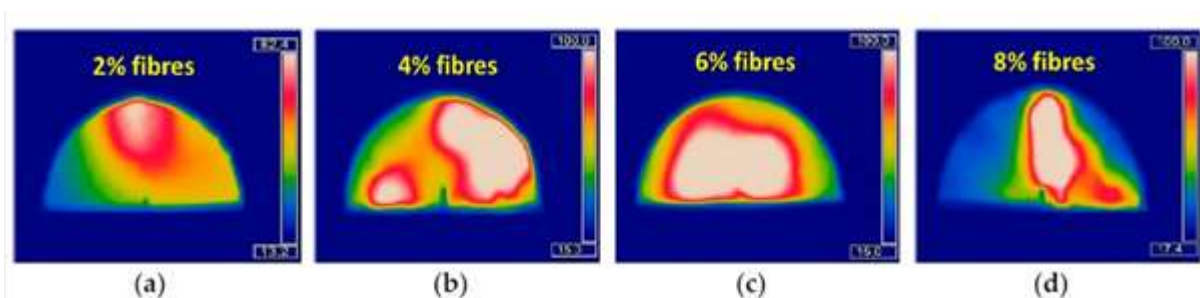


그림.22 마이크로파 40초 가열된 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편의 열화상 사진

a: 2%, b:4%, c:6%, d:8%

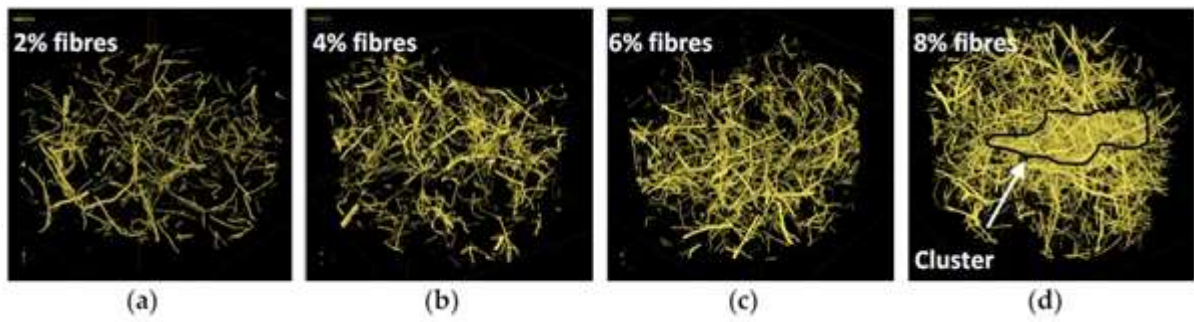


그림.23 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편의 CT-scan 3D사진
a:2%, b:4%, c:6%, d:8%

- 마이크로파 가열은 아스팔트 콘크리트 혼합물 내부의 공극의 구조를 변화시킴.
- 마이크로파 가열을 통하며 아스팔트 콘크리트 혼합물 내부의 자가 치유 물질은 손상을 가져오고 질량의 변화를 가져옴. 따라서 <그림.24>와 같이 공극의 면적이 점점 확대됨.
- 이에, (J. Norambuena-Contreras 2016) 시험에서는 자가 치유 10회 후 전체 시료 질량의 0.76%까지 손실된다는 사실이 관찰됨.
- <그림.25>를 살펴보면 유도 가열 방식의 자가 치유 형태와 마이크로파 방식의 자가 치유 형태의 질량변화를 나타냈으며, 유도 가열 방식의 자가 치유 형태는 질량의 변화가 크게 나타나지 않음.
- 또한, <그림.26>과 같이 마이크로파 가열 방식은 아스팔트 바인더에 손상을 입혀 치유력과 질량의 손실에 영향이 있다고 판단됨.

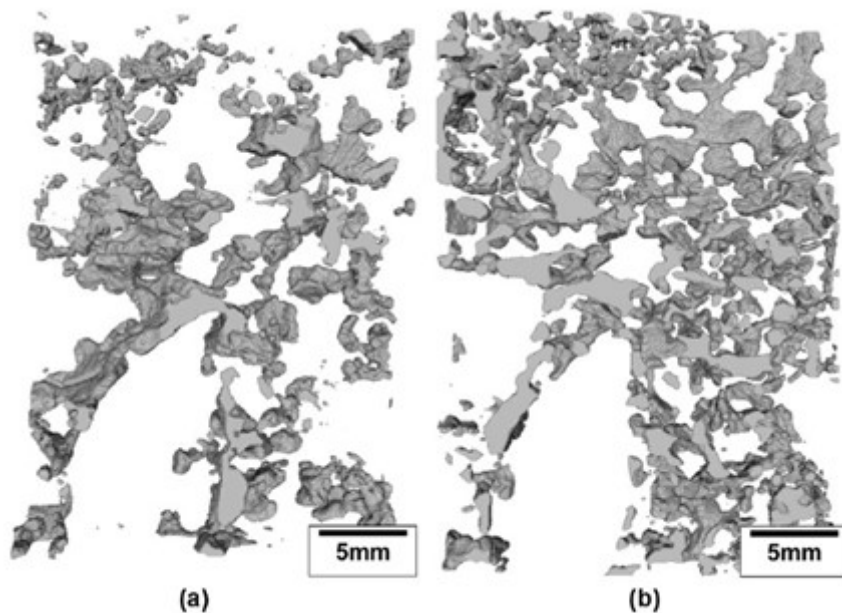


그림.24 마이크로파 가열 아스팔트 콘크리트 혼합물 공극변화
a: 가열 전 b:가열 후

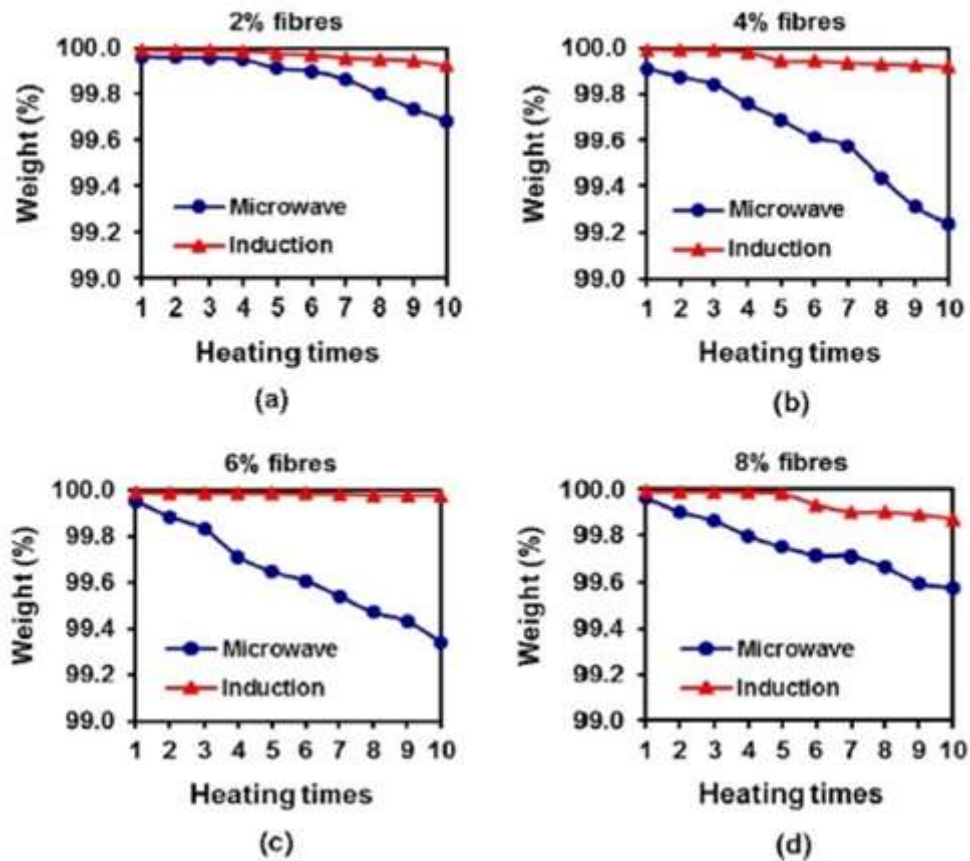


그림.25 유도가열 방식과 마이크로파 가열 방식의 질량변화

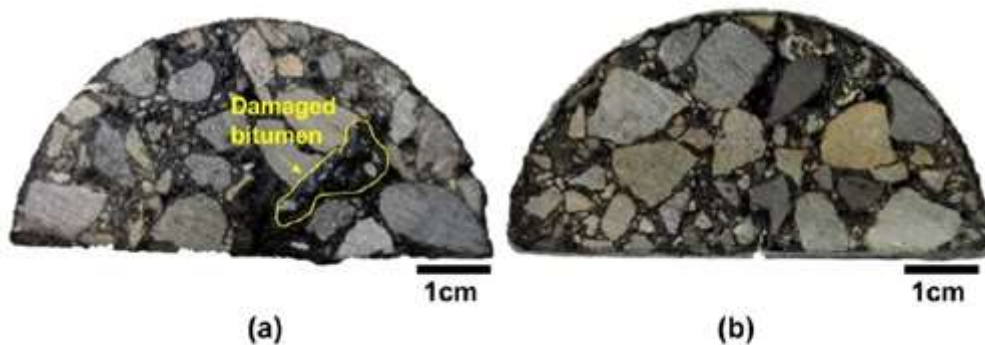


그림.26 유도가열 방식과 마이크로파 가열 방식의 자가 치유 후 시험 샘플
a: 마이크로파 b: 유도가열

- 아스팔트 콘크리트 혼합물의 가열 속도를 높이기 위해 steel wool fibers, steel slag를 사용하여 심층적인 연구를 진행되고 있음(A. Gonzalez 2018). 아스팔트 콘크리트 혼합물에 금속 채움재를 사용하여도 아스팔트 콘크리트 혼합물의 화학적 물리적 특성을 저하시키지 않아 더 많은 연구가 진행되고 있음.

3. 유도가열 방식의 자가 치유

- 유도가열은 아스팔트 콘크리트 포장을 국부적으로 가열하고 물리적 특성을 회복할 수 있는 기술이며 재료의 온도를 높이기 위해 전기 전도성 첨가제와 전자기 물질을 사용하여 아스팔트 혼합물을 개발함.
- <그림.27>은 아스팔트 콘크리트 혼합물의 자가 치유 방법을 보여주는 기본 개념을 나타냄.

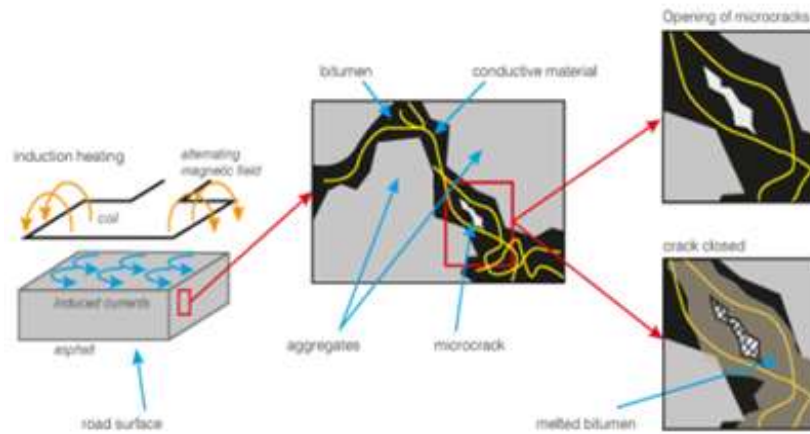


그림.27 유도가열 자가 치유 개념

- Garcia(2011)에 연구에 따르면 아스팔트 콘크리트 혼합물에 전도성 첨가제를 첨가함으로써 고속도로, 공항활주로 등 처음에 생긴 작은 균열이 커다란 균열로 발전 할 수 있는 상황을 유도가열을 통하여 아스팔트 콘크리트 혼합물이 자가 치유함으로써 사전에 예방 할 수 있다고 보고함.
- Quantao Liu(2012) 연구에는 아스팔트 콘크리트 혼합물에 Steel Fibers, Steel Wool Fibers를 첨가하여 전기 전도도와 간접인장강도를 시험하였고, Steel Wool Fibers 함유한 아스팔트 콘크리트 혼합물이 다른 첨가제 혼합물보다 유도가열을 통해 쉽게 가열 될 수 있음을 증명함.
- 유도가열 물질을 첨가한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 최적 가열온도는 <그림.28>과 같이 85℃ 온도에서 가장 좋은 효율을 나타냄.
- 아스팔트 콘크리트 혼합물에 가도한 가열은 아스팔트 바인더의 손상 정도와 치유 효과에 영향을 미침. (Quantao Liu)
- 또한 아스팔트 바인더는 스스로 치유 효과를 갖고 있고 유도 가열이 아스팔트 콘크리트 포장도로의 휴식 기간과 결합되었을 때 최상의 치유 결과가 달성됨.

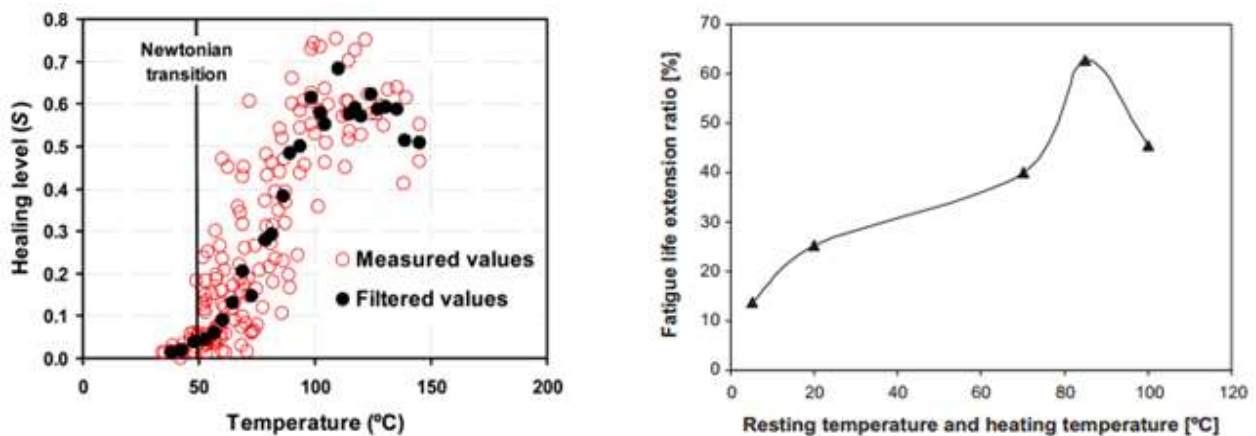


그림.28 유도 가열 자가 치유의 최적온도

- Alessandro Menozzi(2015) 연구를 살펴보면 유도가열을 통해 아스팔트 콘크리트 혼합물의 자가 치유 능력을 촉진시키며 Steel 성분을 첨가하여 아스팔트 콘크리트 혼합물을 유도가열 시험을 수행함. 아스팔트 콘크리트 혼합물의 온도가 30~70℃를 초과하면 고온에서 아스팔트 바인더의 움직임으로 미세균열 복구 등 혼합물의 자가 치유됨.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

제 1 절 자가 치유 아스팔트 콘크리트 포장 배합설계 및 성과

1. 자가 치유 아스팔트 콘크리트 포장 배합설계 개발 목표

- 본 연구의 최종 목표는 전도성 아스팔트 콘크리트 재료를 개발이며 아스팔트 콘크리트 자가 치유 문헌조사 및 메커니즘 현황 조사를 토대로 아스팔트 콘크리트 포장에 자가 치유 효과를 극대화 할 수 있는 배합설계를 개발함.
- 배합설계는 소성변형과 균열 등에 대한 저항성과 내구성이 좋고 소요의 기준을 만족하는 아스팔트 콘크리트 혼합물을 얻어야하고 배합설계로 결정된 아스팔트 함량 및 골재 입도와 다르게 생산하면 포장의 소성변형이나 균열 발생 등이 조기에 발생할 수 있으므로, 배합설계로 확정된 골재 배합 비율과 최적 아스팔트 함량이 적용된 혼합물 제작이 중요함.
- 또한, 자가 치유 아스팔트 콘크리트 배합설계는 국내 아스팔트 혼합물의 품질 기준<표.2>에 만족할 수 있는 혼합물이어야 하며 유지보수 비용 절감을 위한 포장도로를 목표로 아스팔트 콘크리트 혼합물 배합설계를 개발함.
- 이에 따른 다양한 전도물질을 사용하여 전도특성이 극대화 할 수 있는 조건을 개발하여 전도성 물질의 사전처리를 통하여 아스팔트 혼합물 내에서 골재, 아스팔트 전도성 물질이 잘 혼합되도록 하는 방법을 개발 배합설계를 수행함.

표.2 아스팔트 혼합물의 품질 기준

항 목	표층용				기타	
	WC-1 ~4 MC-1		WC-5, 6			
변형강도 (MPa)	4.25 이상 (3.2 이상)				다짐횟수 : 선회 다짐 100 (75), 마찰다짐 양면 75 (50)	
마찰안정도 (N)	7,500 이상 (5,000 이상)		6,000 이상			
흐름값 (1/100 cm)	20~40		15~40			
공극률 (%)	3~6		3~5			
포화도 (%)	65~80		10~85			
골재간극률 (%)	설계공극률 (%) 골재크기 (mm)	골재간극률				
		3.0	4.0	5.0		6.0
	13	13.0 이상	14.0 이상	15.0 이상		16.0 이상
	20	12.0 이상	13.0 이상	14.0 이상		15.0 이상
	25	11.0 이상	12.0 이상	13.0 이상		14.0 이상
	30	10.5 이상	11.5 이상	12.5 이상	13.5 이상	
	40	10.0 이상	11.0 이상	12.0 이상	13.0 이상	
BVF (%)	60 이하					
인장강도비 (TSR)	0.80 이상					
간접인장강도 (N/mm^2)	0.8 이상					
터프니스 ($N \cdot mm$)	8,000 이상					
동정안정도 (회/mm)	750 이상		1,000 이상			
	1,500 이상		2,000 이상			
	2,000 이상		3,000 이상			

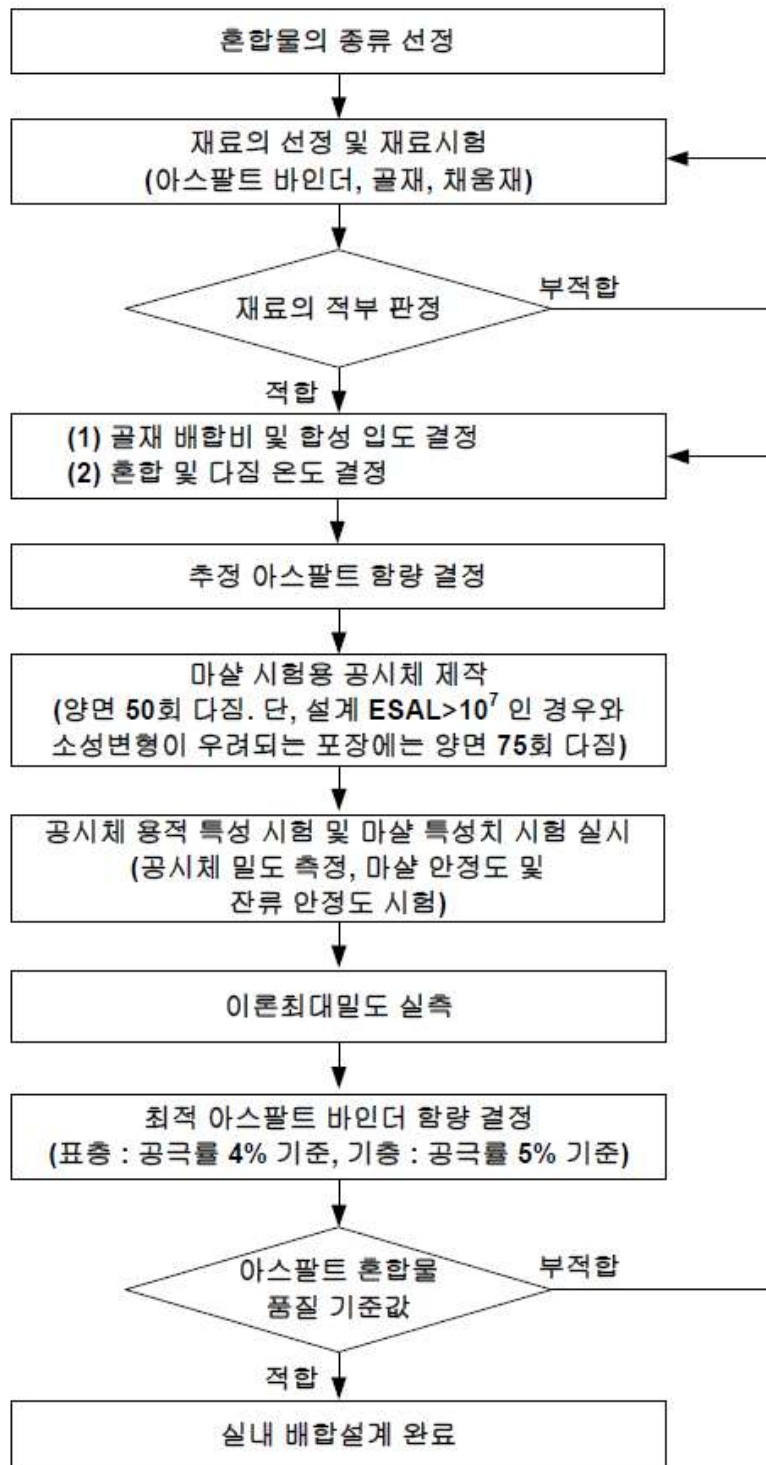


그림.29 가열 아스팔트 혼합물의 배합설계 절차

2. 배합설계 입도곡선

- 배합설계의 목적은 아스팔트 콘크리트 포장이 장기간 제 성능을 유지할 수 있도록 아스팔트 바인더, 골재, 첨가제 등의 배합을 결정하는 것이다. 실험실에서 혼합입도 기준에 따라 굵은 골재, 잔골재, 채움재 등의 혼합 비율을 결정하고 최적 아스팔트 함량을 결정하는 과정이며 배합설계로 결정된 아스팔트 함량과 골재입도는 포장의 소성변형이나, 균열 발생 등 아스팔트 콘크리트 혼합물의 중요한 성능지표를 좌우함.
- 아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침(2017)에 따라 합성입도를 사용하여 <그림.30>와 같이 입도 분포 곡선을 설계하여 혼합물 배합을 실시함.
- 가열 아스팔트 혼합물에 사용되는 골재 배합비의 결정은 두 가지 이상의 골재를 혼합하여 원하는 입도를 입도 기준 범위 안에 산정하며 기층과 중간층 및 표층에 사용하는 각각의 입도 기준은 다르다. 시험에 사용한 입도 기준은 <표.3>과 같이 표층용 WC-3 기준을 선정하여 사용하였으며 <표.4>골재 입도분포를 사용하여 골재 배합설계를 수행함.

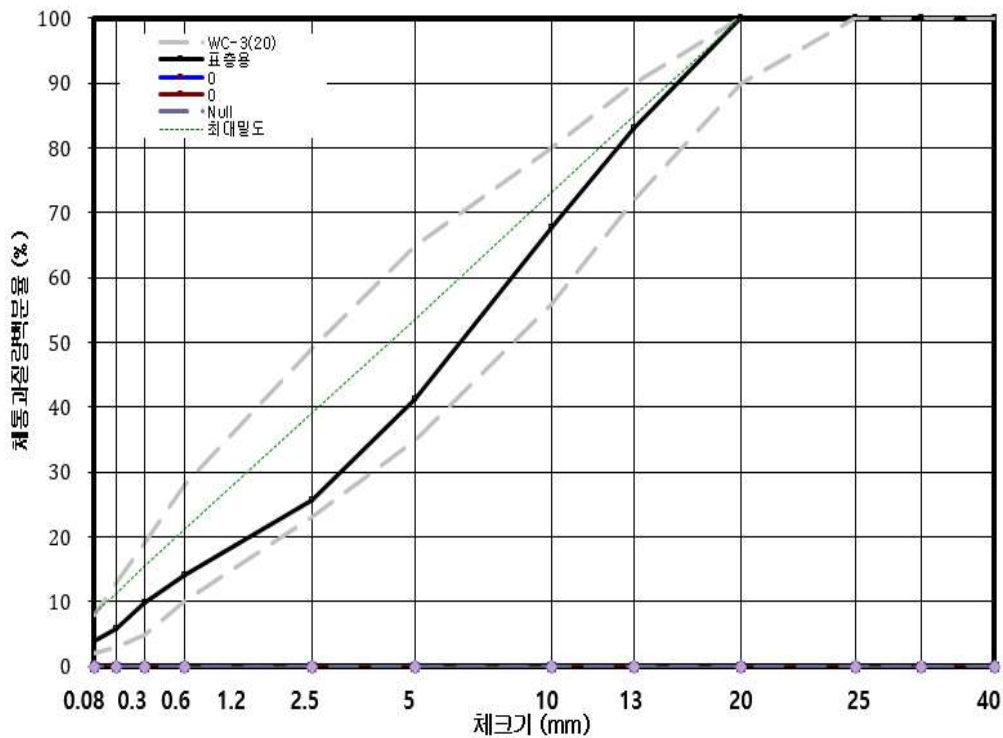


그림.30 배합 설계 입도곡선

표.3 WC-3 합성입도 기준

골재크기 (mm)	26.5	19	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
Max	100	100	90	80	65	49	28	19	13	8
Min	100	90	72	56	35	23	10	5	3	2

표.4 골재 입도 분포

구 분		큰 골재	중간골재	잔골재	필러
총중량 (g)		419	598	711	1105
37.5	mm	100	100	100	100
31.5	mm	100	100	100	100
26.5	mm	100	100	100	100
19	mm	100	100	100	100
13.2	mm	19	99	99	100
9.5	mm		77	86	100
4.75	mm		14	62	100
2.36	mm		4	36	100
0.6	mm		2	15	100
0.3	mm		1	7	100
0.15	mm		1	4	58
0.075	mm			2	47

3. 추정아스팔트 함량 결정

- 골재의 입도 상태를 이용하여 아스팔트 혼합물에 필요한 아스팔트의 대략적인 함량을 결정함.
- 아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침(2017)에 따라 추정하였고 식(1)에 따라 <표.5>를 사용하여 산출함.

$$P_b = 0.035a + 0.045b + Xc + F \quad (1)$$

여기서,

P_b : 전체혼합물중량에 대한 추정아스팔트의 비율(%)

a : 2.5mm(No8)체에 남은 골재의 중량비(%)

b : 2.5mm체를 통과하고 0.075mm체에 남은 골재의 중량비(%)

c : 0.075mm(No200)체를 통과한 골재(채움재)의 중량비(%)

X : c 값이 11~15%일 경우 0.15사용

: c 값이 6~10%일 경우 0.18사용

: c 값이 5%이하일 경우 0.20사용

F : 골재의 흡수율

표.5 추정 아스팔트 함량 결정

a	b	c	X	F	추정아스팔트함량(%)
74.4	70.5	3.9	0.20	0.8	5.2

4. 열전도성 첨가제 함량결정

- 열전도성 첨가제의 최적 배합을 시험하기 위해 2%, 4%, 6% 및 8%의 SWF를 첨가하여 비교 분석.
- Quantao(2012)보고서에 따르면 6% 함량의 SWF 배합을 권고함.
- 시험 수행 결과 2%, 4% 함량의 SWF 사용은 열전도 효율이 좋지 않게 나왔으며 8% 함량 사용은 6% 첨가한 시험 공시체보다 효율이 떨어졌다. 시험과 여러 보고서를 토대로 SWF 6% 사용이 최적 배합임을 확인함.
- <표.6>는 SWF 6%사용 아스팔트 콘크리트 혼합물 배합표이며 채움재를 대신하여 SWF가 사용함.

표.6 열전도성 첨가제 배합표

	굵은 골재(g)	잔골재(g)	채움재(g)	SWF(g)
Control	259	612	71	0
SWF 6%	259	612	44	27

5. 이론 최대밀도 측정시험

- 이론 최대 밀도는 추정 아스팔트 함량에 대한 다짐된 혼합물 속의 공극이 전혀 없는 것으로 가정했을 때 밀도를 구하는 것을 말함.
- <그림.31>의 이론 최대 밀도 시험기를 사용하여 [KS F 2366 : 아스팔트 혼합물의 이론 최대 비중 시험방법]에 따라 진행함.
- 시료 중 골재 입자가 파괴되지 않도록 주의하여 시료의 입자를 분리해야 하고, 잔골재의 입자가 6.4mm보다 크지 않아야 함. 이후 실내 온도에서 시료를 식힌 후 용기에 넣고 무게를 측정하여 용기에 넣고 25℃의 물을 충분히 채움.
- 시료가 부분 진공 게이지압 97kPa가 되도록 간혀 있는 공기를 빼낸 후 5~15분간 골재 사이의 기포가 제거되도록 충분히 흔들어 줌.
- 용기 상부에 모인 기포를 압력을 이용해 빼낸 후, 용기채로의 무게를 측정함.
- 식(2), 식(3)에 따라 이론 최대밀도를 계산 하였고, 3회 측정하여 그 값을 평균하였음.
- <표.7>은 이론 최대밀도 시험결과 값이다.



그림.31 이론 최대 밀도 시험기

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \times \rho_w \quad (2)$$

여기서,

G_{mm} : 25℃에서의 이론최대 밀도(g/cm^3)

A : 공기 중에서 건조 시료의 중량(g)

D : 25℃에서 물을 채운 용기의 중량(g)

E : 25℃에서 물과 시료를 채운 용기의 중량(g)

$$G_{mm} = \frac{P_{MM}}{\frac{P_S}{G_{SE}} + \frac{P_E}{G_B}} \quad (3)$$

여기서,

P_{MM} : 혼합물의 전체중량(g)

P_S : 골재의 중량(g)

P_B : 아스팔트의 중량(g)

G_{SE} : 아스팔트로 코팅된 골재의 유효비중(g/cm^3)

G_B : 아스팔트의 비중

표.7 최대이론밀도 시험결과

공기 중 건조 시료 중량	시료+물+용기	물+용기	이론최대밀도	평균 이론최대밀도
1500g	13328g	12435g	2.464	2.452
1500g	13326g		2.456	
1500g	13321g		2.436	

6. 아스팔트 콘크리트 혼합물 제작

- <그림.32>모식도의 흐름에 따라 공극률 4%, 높이 64mm, 직경 100mm 선회다짐기를 통하여 제작하였고 시험 공시체 제작 후 24시간 건조 후 시험공시체를 3개의 동등한 크기로 절단하여 주사전자현미경 시험(Scanning Electron Microscopy, SEM test)과 전산화단층조영주사법 시험(computed tomography scanning, CT-Scan Test), 3점 휨시험(three-point bending strength of asphalt mixture samples, TPB-test)과 유도가열시험 등 각각의 시험을 수행함.

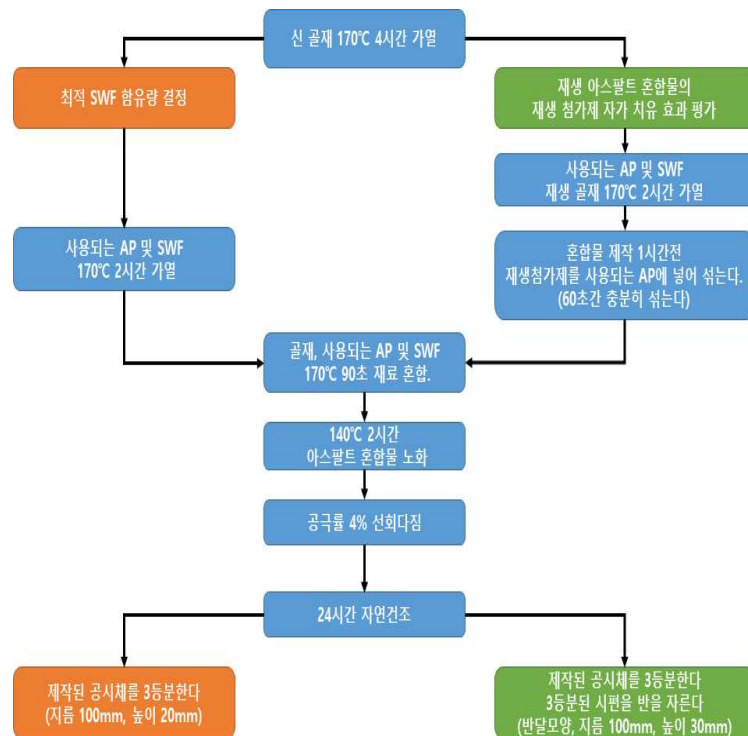


그림.32 아스팔트 콘크리트 혼합물 제작 및 시편 제작방법

7. 마샬 안정도 측정 시험

- 최적아스팔트 함량을 결정하기 위해, 설계된 입도곡선과 추정아스팔트 함량, 이론최대 밀도를 사용하여, 마샬다짐을 통한 공시체를 제작함. 공시체의 제작은 아스팔트 함량에 따른 아스팔트 콘크리트 혼합물의 특성을 파악하기 위해 추정 아스팔트 함량을 기준으로 ± 0.5 , ± 0 의 3가지 배치에 대해 각각 3개씩의 제작을 실행
- [KS F 2337 : 아스팔트 혼합물의 마샬 안정도 및 흐름값 시험방법(2017)]에 따라 실시함.

가. 시료준비

- 골재 입도곡선, 추정아스팔트 함량, 이론최대 밀도를 사용하여, 소요 골재량과, 각각의 첨가제, 아스팔트 함량을 준비함.
- 각각의 배합비에 따른 골재는 개량하여 160℃ 오븐에 4시간, 아스팔트는 2시간을 가열 후 각각의 첨가제를 넣고 혼합함.
- 아스팔트 혼합물은 1200g씩 적절한 팬에 나눈 후 145℃의 다짐 온도에서 1시간동안 단기 노화시킴.

나. 공시체 제작

- 다짐 온도의 오븐에서 예열을 끝낸 마샬 다짐용 몰드와 몰드 반침을 준비 한 후, 다짐용 종이를 넣어 몰드 반침에 혼합물이 직접적으로 접촉하지 않도록 함.
- 몰드 안에 준비된 혼합물을 깔때기를 사용하여 넣고, 스페츨러를 사용하여 몰드 옆면을 따라 혼합물을 교란시킴.
- 혼합물의 표면을 밋밋하게 고른 후, 다짐용 종이를 한 장 더 넣어 해머와 집적적인 접촉이 없도록 준비함.
- 준비된 몰드는 마샬다짐기에 위치시킨 후, 45Cm 높이에서 자유낙하 시켜 양면 각각 50회씩 다짐을 실시, 다짐 후 24시간 양생 후 공시체 추출기를 사용하여 탈형 함.



그림.33 마샬 다짐기와 마샬 공시체 제작 과정

다. 공극률 측정

- 공극률은 다져진 아스팔트 혼합물의 겉보기 체적에 대한 내부에 존재하는 공극의 총 체적의 백분율이며, 이론 최대 밀도에 영향을 받음.
- 공시체의 건조무게 측정 후 버니어캘리퍼스를 사용하여 3지점의 높이를 측정 후 그 값을 평균함.
- 준비된 공시체는 저울과 연결된 철망에 위치하여 10분간 충분히 수침시키며 수조를 고무망치로 쳐 기포가 잘 제거 하며 이때 물의 온도는 20℃를 유지함. 또한 수침시켜 충분히 기포가 빠져나간 공시체의 수중 무게를 측정 한 후, 흡수천을 사용하여 공시체의 겉 표면을 닦아 표면건조포화 상태를 만들어 그 무게를 측정함.
- 측정된 값들은 다음 식(4)에 따라 공극률 값을 산출하며, 그 결과값은 <표.8>과 같다.

$$VTM = 100 \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) = 100 \left(\frac{G_{mm} - \frac{A}{C-B}}{G_{mm}} \right) \quad (4)$$

여기서,

VTM : 공극률(%)

G_{mb} : 겉보기 밀도(g/cm^3)

G_{mm} : 이론 최대 밀도(g/cm^3)

A : 건조 무게(g)

B : 수중 무게(g)

C : 표면건조포화상태 무게(g)

표.8 공극률 측정 결과 값

시료명	공극률	평균 공극률 (%)
4.7-1	6.65	6.48
4.7-2	6.50	
4.7-3	6.29	
5.2-1	5.85	5.91
5.2-2	5.85	
5.2-3	6.04	
5.7-1	4.08	3.96
5.7-2	4.06	
5.7-3	3.74	

라. 골재간극률

- 골재간극률이란 다짐된 아스팔트 혼합물 내의 아스팔트와 공기가 차지하고 있는 공간을 말하며 다음 식(5)에 따라 계산한다. 삼상 구조도에서 공기의 체적과 유효 아스팔트 체적의 합을 전체 체적에 대한 백분율로 나타낸 것이며, 흡수된 아스팔트의 체적은 골재간극률 계산에서 제외함. 골재간극률은 <표.9>에 나타냄.

$$VMA = 100 - \left[\frac{(G_{mb} P_s)}{G_{sb}} \right] \quad (5)$$

여기서,

VMA : 골재의 간극률

G_{mb} : 겉보기 밀도(g/cm^3)

G_{sb} : 합성된 골재의 겉보기 밀도(g/cm^3)

P_s : 혼합물 전체 중량에 대한 골재 비율(%)

표.9 골재간극률 계산결과

시료명	골재간극률 (%)	평균 골재간극률 (%)
4.7-1	17.39	17.24
4.7-2	17.26	
4.7-3	17.08	
5.2-1	16.69	16.74
5.2-2	16.69	
5.2-3	16.85	
5.7-1	15.12	15.01
5.7-2	15.10	
5.7-3	14.81	

마. 포화도

- 포화도란 아스팔트로 채워진 공극을 말하며, 아스팔트의 체적을 골재 간극률의 체적으로 나누어 계산하며 포화도는 식(6)에 따라 계산함. 계산될 포화도 값은 <표.10>에 나타냄.

$$VFA = 100(1 - \frac{V_a}{VMA}) \quad (6)$$

여기서,

VFA : 포화도(%)

V_a : 공기의 체적

표.10 포화도 계산결과

시료명	포화도 (%)	평균 포화도 (%)
4.7-1	62.74	62.41
4.7-2	62.45	
4.7-3	62.05	
5.2-1	64.56	64.67
5.2-2	64.56	
5.2-3	64.90	
5.7-1	73.82	73.63
5.7-2	73.78	
5.7-3	73.28	

바. 마찰안정도 측정

- 아스팔트 혼합물의 안정도를 측정하는 시험으로서 [KS F 2337 : 아스팔트 혼합물의 마찰안정도 및 흐름값 시험방법(2017)]에 따라 실시함.
- 준비된 공시체를 옆으로 놓은 상태에서 하중을 가해 공시체가 파괴되기까지 나타낸 최대하중과 이때 변형량을 구하는 원리이며 최적아스팔트 함량을 선정하는데 매우 중요한 역할을 함.
- 준비된 공시체는 30~40분간 (60 ± 1)℃의 항온수조에 위치시키고, 하중재하 헤드의 온도는 30℃로 맞춰 준비한 후 마찰안정도 시험을 수행함.
- 시험하기 전에 가이드 로드와 테스트 헤드의 내면을 충분히 깨끗이 하고, 가이드 로드와 기름을 칠하여 상부 재하 헤드가 이 위에서 자유롭게 미끄러질 수 있도록 함.
- 수조에서 공시체를 꺼내어 재하 헤드의 하부 궁형 안에 놓고, 공시체 위에 재하 헤드의 상부 궁형을 위치시킴. 흐름값 측정용 센서를 가이드 로드 위의 제 위치에 놓고, 슬리브가 재하 헤드의 상부 궁형에 대하여 단단히 접촉되었을 때 눈금을 0으로 조절함.
- 하중 재하 속도는 분당 50.8mm의 속도로 일정하게 재하하되 최대 하중에 도달되어 마이크로 다이얼 게이지에서 하중이 감소될 때까지 하여 최대 하중을 기록함.
- <그림.34> 디지털 마찰안정도 시험기를 이용하여 시험을 수행 하였고 값은 <표.11>에 나타냄.

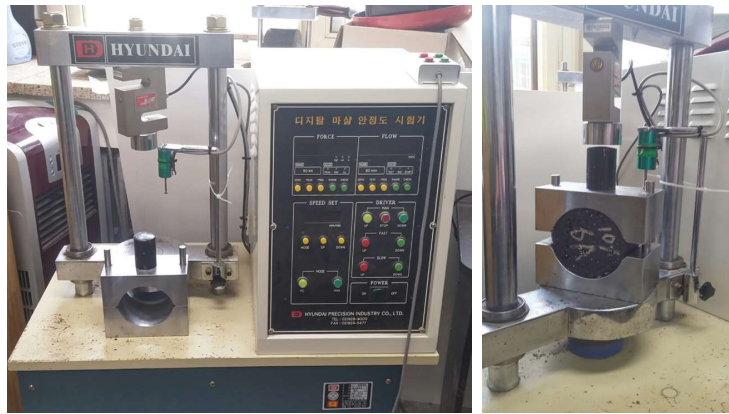


그림.34 마찰 안정도 시험

표.11 마찰 안정도 시험 결과

안정도 (N)	평균 안정도 (N)	흐름값	평균 흐름값
9595	10,366.7	40.0	41.0
11045		40.0	
10460		43.0	
9695	9,636.7	43.0	39.0
10345		38.0	
8870		36.0	
10375	10,771.7	38.0	41.3
10585		46.0	
11355		40.0	

1. 전도물질 효과 확인 및 아스팔트 콘크리트 시편 구조 분석

- ## 2. 열전도성 첨가제

- 

그림.35 Steel Powder (SP)

그림.36 Steel wool fiber (SWF)

표.12 SWF 물성

구분	Steel Wool Fiber
평균 직경	70~130 μ m
밀도	7.18(g/cm ³)
길이	4~4.5mm
열전도율	80(W/mK)

표.13 Slag 입도 및 밀도

[illegible]

3. 열전도도 측정

- 아스팔트 콘크리트 혼합물의 유도가열 측진을 위해 첨가된 전도성 첨가재료 Steel Wool Fiber, Steel Powder 및 Slag Powder의 열전도도 측정 시험을 수행함.
- Thermal Constants Analyzer<그림.37> 장비를 사용하여 열전도도를 측정함.
- 각각 첨가제를 첨가하여 혼합물 시편의 열전도도 측정 및 각각의 첨가제를 혼합하여 공시체를 제작 열전도도를 측정함.

가. Thermal Constants Analyzer 측정방법

- 시험 준비로 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편 2개를 사용함. 1개의 시편을 시험기에 올려놓고 Thermal Constants Analyzer 연결선을 부착함. 부착된 연결선 위에 1개의 시편을 올려놓고 측정함.
- 이때 주의사항은 2개의 시편에 연결선에 부착하게 되는데 아스팔트 콘크리트 시편의 표면이 고르고 공극이 없는 고른 표면에 부착해야만 2개의 아스팔트 콘크리트 시편의 열전도도 측정값이 고르게 나타남.



그림.37 Thermal Constants Analyzer

나. Thermal Constants Analyzer 시험결과

(1) Steel Wool Fiber(SWF)

- Steel Wool Fiber가 첨가된 아스팔트 혼합물의 시험결과는 6% 첨가 하였을 때 열전도도가 가장 높았다. 6%를 초과하는 혼합물은 첨가제를 혼합하여 공시체를 제작하는 과정에서 서로 뭉치는 경향이 나타났으며 혼합물에 첨가제가 고루 분포하지 않는 경향이 나타남.
- 따라서, Steel Wool Fiber(SWF)의 일정량 이상의 혼합은 재료비 상승과 더불어 열전도도 저하를 불러일으켜 본연의 역할을 수행하지 못함.

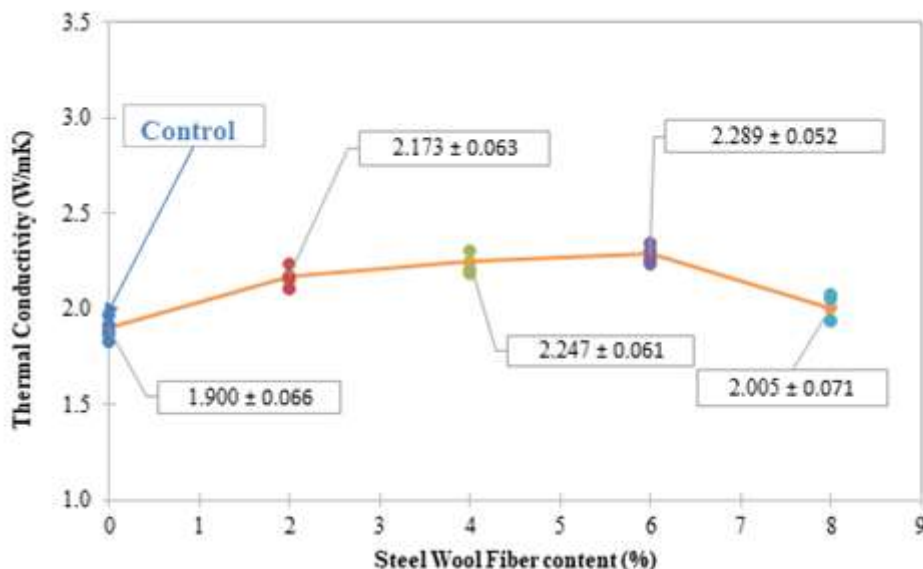


그림.38 Steel Wool Fiber 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성

(2) Steel Powder

- Steel Powder 첨가한 아스팔트 콘크리트 혼합물은 20% 첨가하였을 때 열전도도가 가장 높았다. <그림.39>처럼 첨가량이 증가할수록 열전도 효율이 증가하는 것으로 나타남.
- Steel Powder는 Steel Wool Fiber와 다르게 분자 형태로 아스팔트 콘크리트 혼합물 제작에 뭉쳐있거나 첨가제의 손상의 문제는 나타나지 않음.

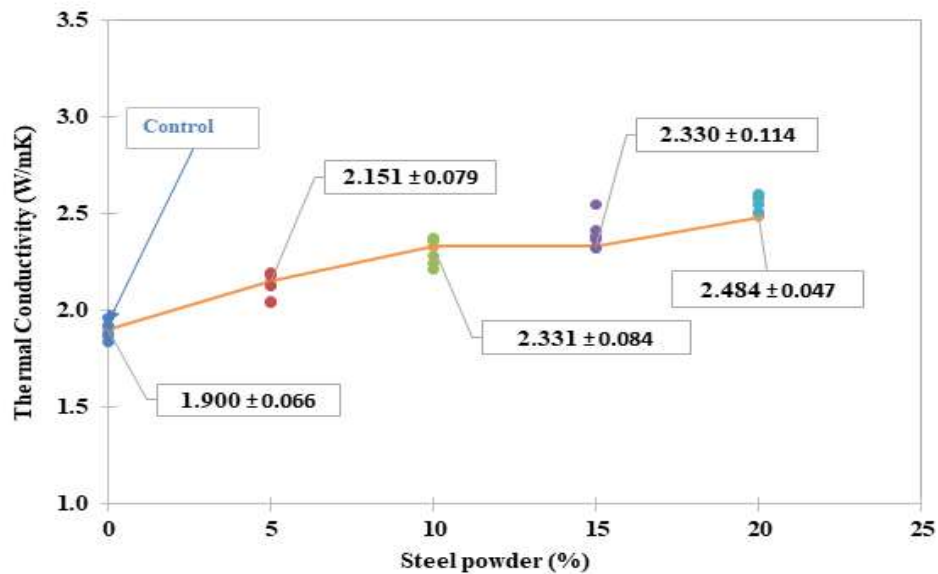


그림.39 Steel Powder 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성

(3) Steel Powder(%) + Steel Wool Fiber(6%)

- Steel Wool Fiber를 6%로 고정하고 Steel Powder를 각각 다른 함량을 사용하여 아스팔트 콘크리트 혼합물 공시체를 제작함.
- <그림.40>를 살펴보면 Steel Powder 20%일 때 가장 열전도율이 높게 나타남. Steel Powder의 함량이 증가할수록 열전도 효율이 높음.
- Steel Wool Fiber 6%함량은 안정적인 연전도도를 나타냈으며, Steel Powder를 혼합하여 사용한 결과 각각 단일첨가물 사용보다는 보다 높은 열전도도를 나타냄.

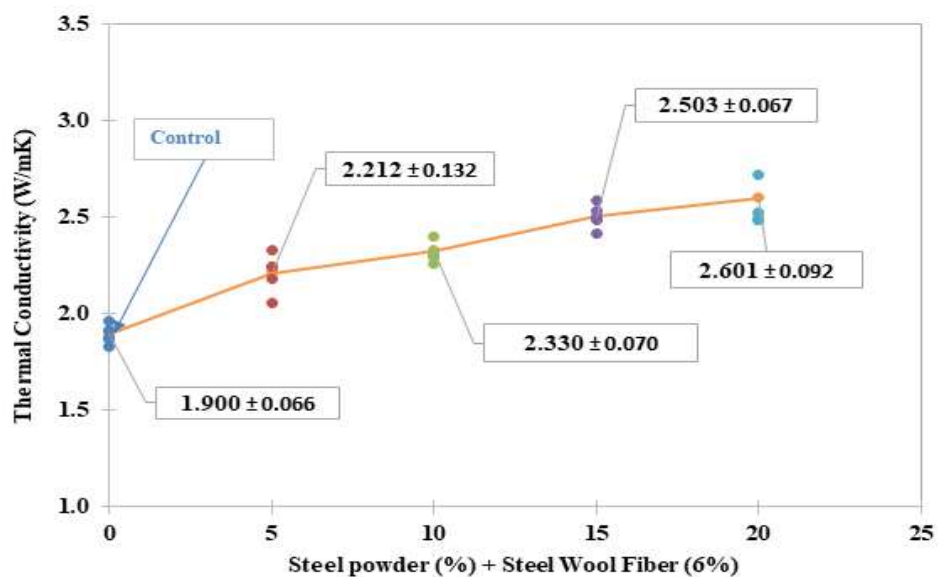


그림.40 Steel Powder(%) + Steel Wool Fiber(%)첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성

(4) Slag + Steel Wool Fiber(%)

- Slag와 Steel Wool Fiber 혼합된 아스팔트 혼합물의 시험결과는 <그림.41>과 같이 일정량 상승하다가 다시 하락하는 것으로 나타남. Steel Wool Fiber 단일첨가제 사용과 마찬가지로 Steel Wool Fiber 8%이상 혼합되면 열전도 효율이 떨어지는 것으로 나타남.
- 또한 Slag역시 Powder형태로 존재하며 첨가제 혼합 과정은 문제가 발생하지 않음.

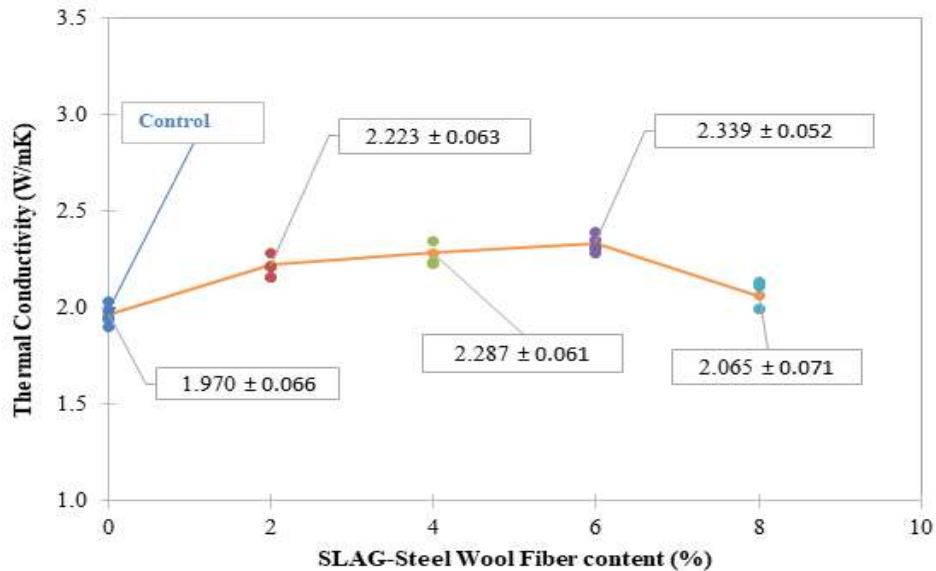


그림.41 Slag + Steel Wool Fiber(%) 첨가된
아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성

(5) Slag + Steel Powder(%)

- Slag와 Steel Powder 가 혼합된 아스팔트 혼합물의 시험결과는 <그림.42>와 같이 첨가제 함량이 증가할수록 열전도도 또한 상승하는 것으로 나타남.

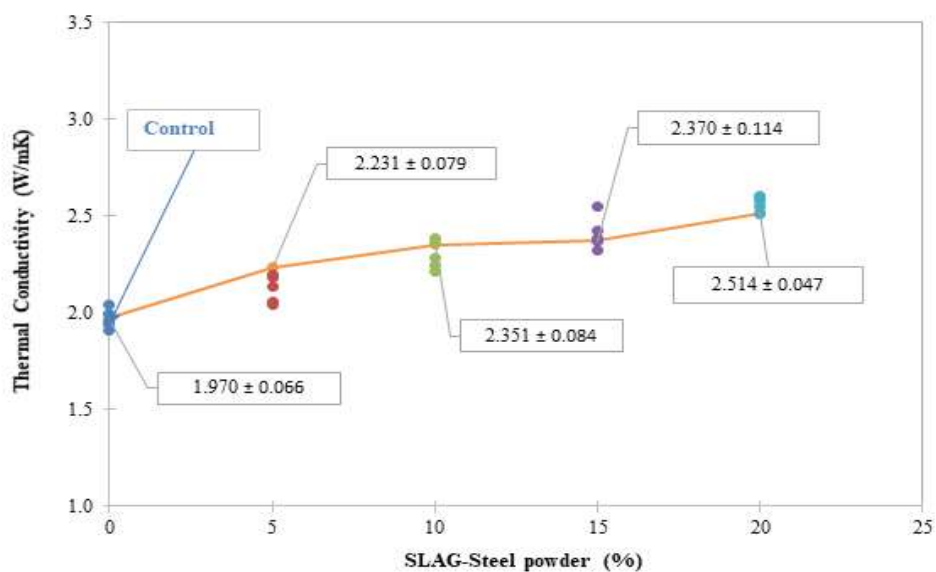


그림.42 Slag + Steel Powder(%) 첨가된
아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성

(6) Slag-Steel Powder + Steel Wool Fiber(6%)

- <그림.43>은 Slag-Steel Powder + Steel Wool Fiber(6%)가 혼합된 아스팔트 혼합물의 시험결과이다. Steel Wool Fiber를 6%.로 고정한 후 Slag-Steel Powder 함량을 조정하여 아스팔트 콘크리트 혼합물 공시체를 제작함
- 시험결과 Slag-Steel Powder 함량이 20%일 때 가장 높은 열전도도를 나타냈으며 Slag-Steel Powder함량이 증가할수록 높은 열전도도를 나타냄.

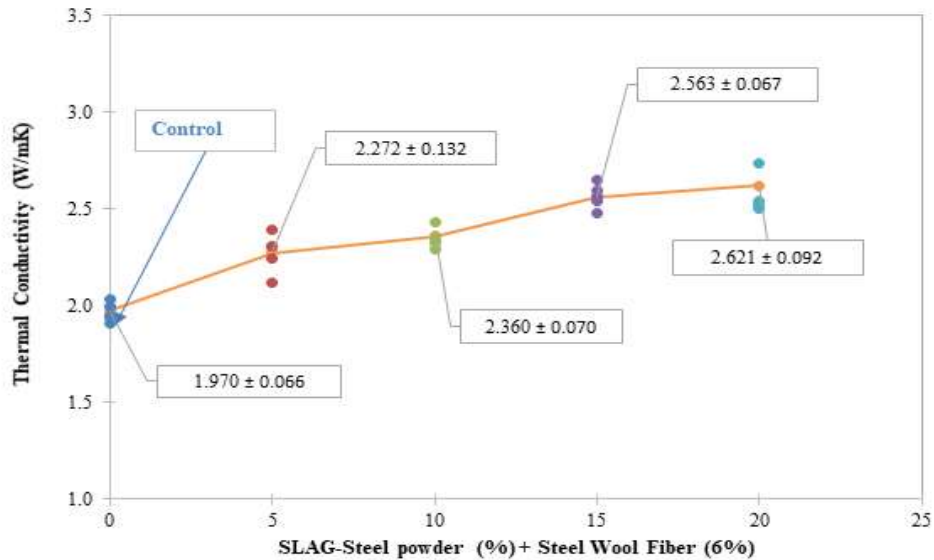


그림.43 Slag-Steel Powder + Steel Wool Fiber(6%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전도성

4. 전기저항 측정시험

- 유도가열 방식은 교류전류가 유도 코일을 지나갈 때 전도성 첨가물질에 저항으로 열이 발생하는 원리이며, 아스팔트 콘크리트 혼합물은 비전도성 물질이기 때문에 각각 첨가제의 열전도 효율이 중요함.
- 전기저항시험은 디지털 멀티미터 시험기<그림.44>를 사용하여 전기저항 측정 시험을 수행함.
- 전기저항 식은 식(7)과 같다.

$$\rho = RS/L \quad (7)$$

여기서

R : 전기 저항

L : 200mm : 두 개의 원형전극 사이의 거리

S : 850mm² : 아스팔트 혼합물 시편의 면적



그림.44 전기저항측정 시험 (디지털 멀티미터 시험기)

가. 전기저항 시험방법

- 전기 저항시험에서는 1개의 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편이 사용됨. Thermal Constants Analyzer 비슷한 방법으로 1개의 시험시편에 알루미늄 막을 시편 위, 아래에 붙인 후 전기 저항기계에 연결하여 비열량을 측정함.
- 이때 주의사항은 시편 알루미늄 막이 얇아 찢어지지 않게 조심하고 아스팔트 콘크리트 시편의 표면이 고르고 공극이 없는 고른 표면에 부착해야만 측정값 폭이 크지 않고 보다 편차가 적은 측정이 가능함.

나. 전기저항 측정시험 결과

(1) Steel Wool Fiber

- 전기저항은 4%일 때 가장 높았고 6%일 때 가장 낮게 나타남. <그림.45>그래프를 살펴보면 열전도와 다르게 일정한 경향이 나타나지 않음.

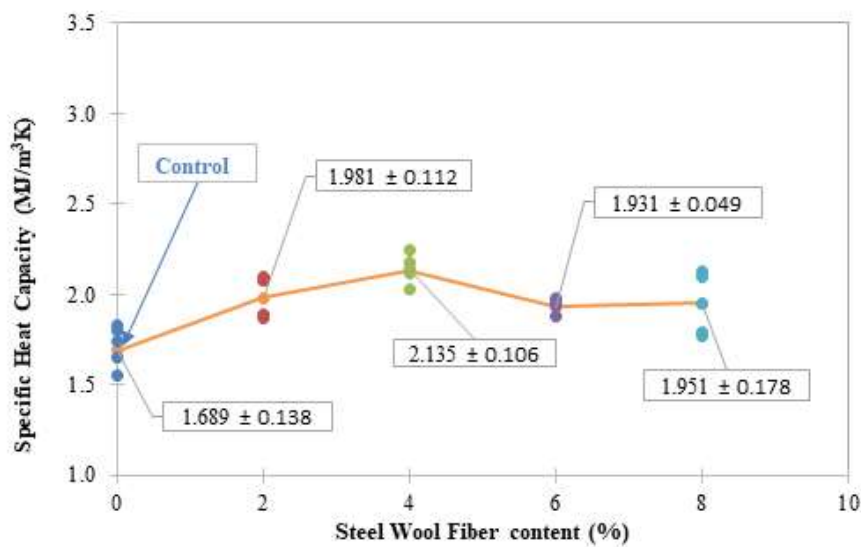


그림.45 SWF 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량

(2) Steel Powder

- Steel Powder가 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편에서는 5% 첨가했을 때 상승하다가 10, 15 및 20%까지 큰 차이를 나타 내지 못하고 오히려 20% 함량일 때 전기저항을 나타내는 비열량이 소폭으로 떨어짐.

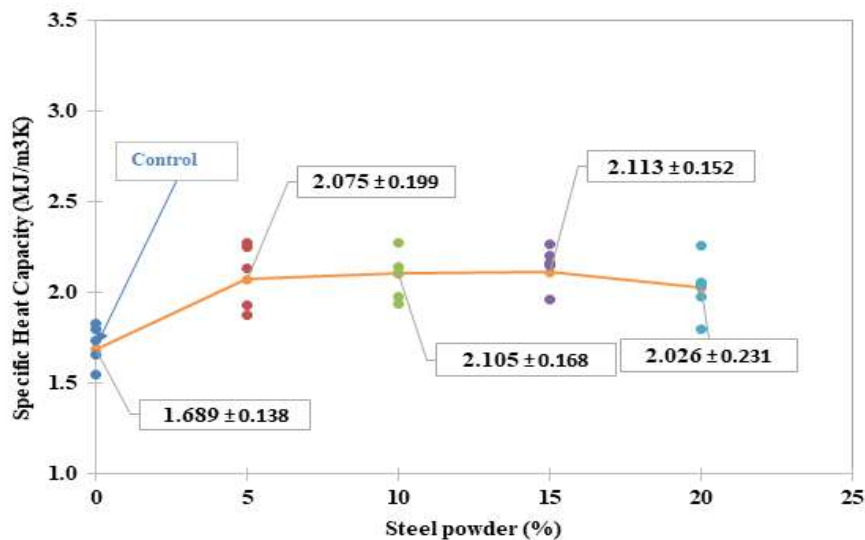


그림.46 Steel Powder 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량

(3) Steel Powder(%) + Steel Wool Fiber(6%)

- <그림.47>를 살펴보면 Steel Powder(%) + Steel Wool Fiber(6%)가 첨가된 아스팔트 콘크리트 시편은 매우 불안정한 경향을 나타냄. Steel Wool Fiber 함량을 6%로 고정하고 Steel Powder의 함량을 5%씩 증가시켜 시편을 제조한 후 전기저항을 측정하기 위해 비열량을 측정 하였으나 Steel Powder 함량이 5%일 때는 상승 10%일 때는 하강 다시 15%일 때는 상승 20%일 때는 하강으로 불안정한 모습을 나타냄.

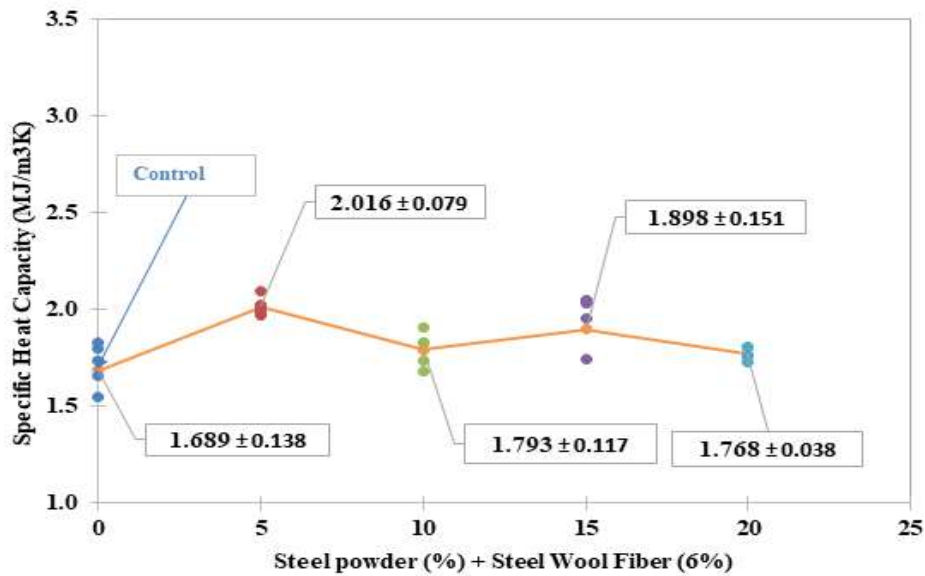


그림.47 Steel Powder(%) + Steel Wool Fiber(6%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량

(4) Slag + Steel Wool Fiber(%)

- Slag 함량을 고정하고 Steel Wool Fiber의 함량을 각각 다르게 하여 시험을 진행함. Steel Wool Fiber 함량이 4%일 때 비열량이 가장 높았고 6%일 때 가장 낮음. <그림.48>을 살펴보면 Steel Wool Fiber 6% 비열량이 감소하고 다시 8%에 비열량이 증가함하여 일정한 경향을 보이지 않음.

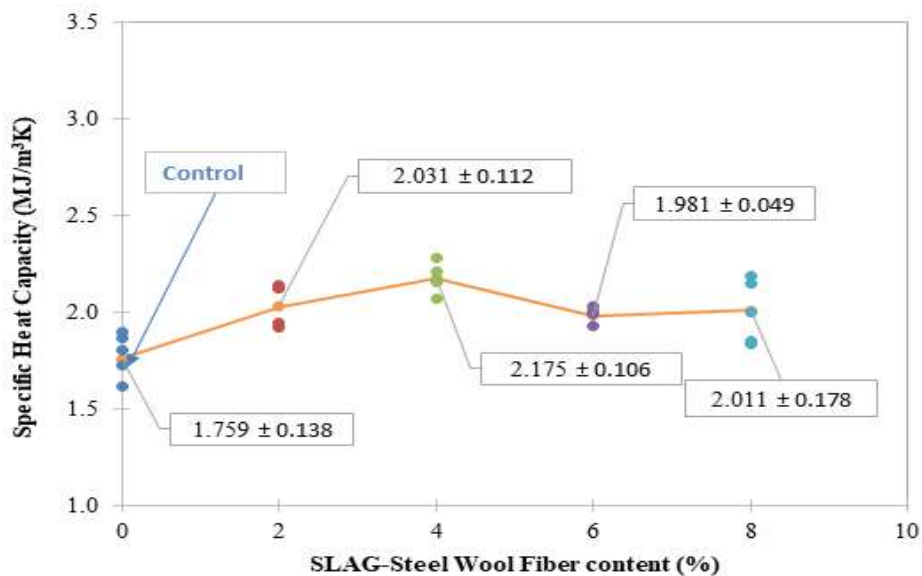


그림.48 Slag + Steel Wool Fiber(%) 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량

(5) Slag + Steel Powder(%)

- Steel Powder를 6%로 고정하고 Slag 함량을 조정하여 아스팔트 콘크리트 혼합물 공시체를 제작하여 시험을 수행함. Slag 함량이 증가할수록 뚜렷한 변화가 없이 일정하지 않은 경향을 나타냄.

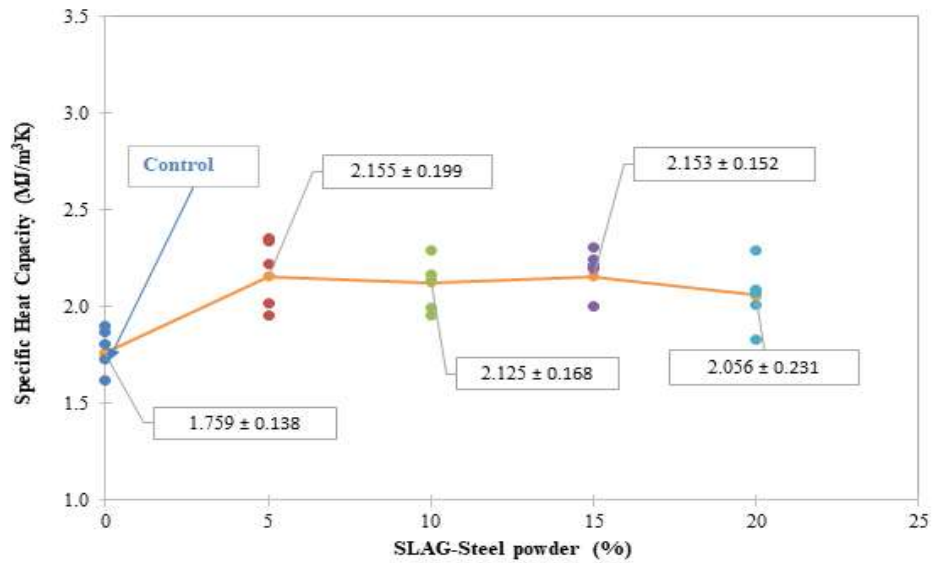


그림.49 Slag + Steel Powder(%) 첨가된
아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량

(6) Slag-Steel Powder + Steel Wool Fiber(6%)

- Steel Wool Fiber를 6%로 고정하고 Slag-Steel Powder 함량을 조정하여 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편을 제작하여 시험을 수행함. Slag-Steel Powder 5%일 때 가장 높은 비열량을 나타냈고 20%일 때 가장 적은 비열량을 나타냄. 전기 저항이 일정하지 않은 경향을 나타냄.

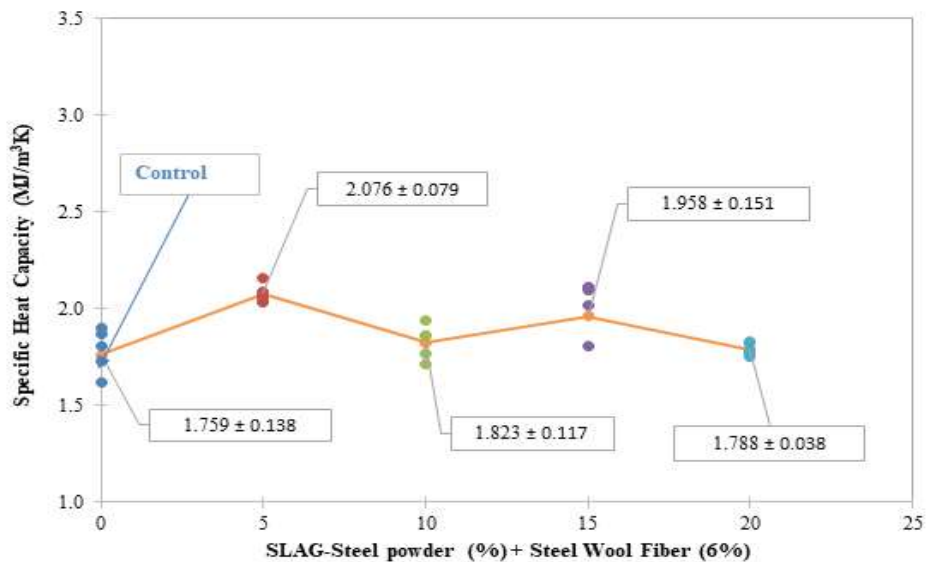


그림.50 Slag-Steel Powder + Steel Wool Fiber(%) 첨가된
아스팔트 콘크리트 혼합물의 비열량

5. 주사전자현미경 시험(Scanning Electron Microscopy, SEM test)

- 주사전자 현미경 시험은 제작한 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편에 각각의 전도성 첨가제가 아스팔트 바인더에 어떠한 형태로 존재하며 그 분포 형태를 토대로 열전도 효율을 분석하기 위해 시험을 진행함.

- <그림.51> 주사현미경시험 장비를 활용해 시험을 진행하였으며 아스팔트 콘크리트 시편을 작게 조각낸 뒤 현미경으로 관찰 및 사진정보를 수집함.

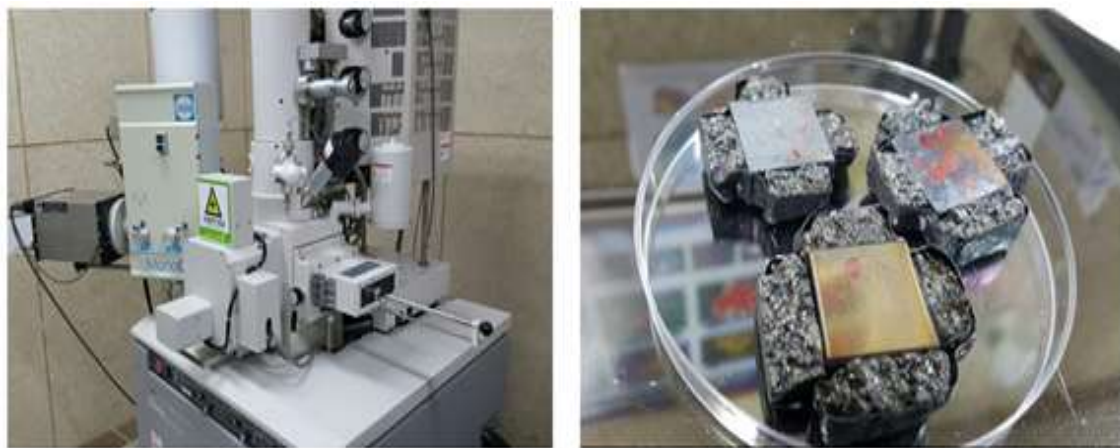


그림.51 주사현미경시험(model s-4700 Hitachi, Japan)

가. Steel Powder 주사전자현미경 시험 결과

- <그림.52>을 살펴보면 Steel Powder가 아스팔트 바인더에 어떠한 형태로 존재 하는지 나타남.
고른 분포 속에 아스팔트 바인더 안쪽과 겉 표면에 흩어져 붙어있음.

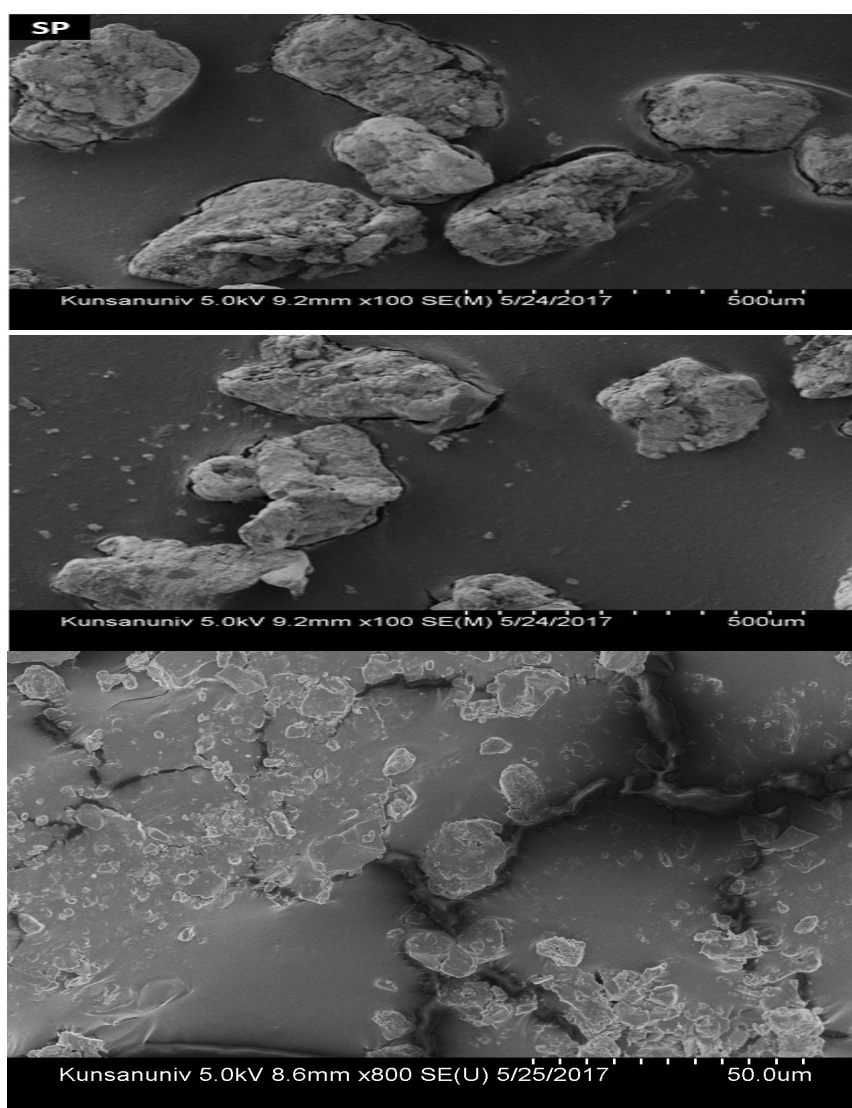


그림.52 Steel Powder 주사전자현미경 시험결과

나. Steel Wool Fiber 주사전자현미경 시험 결과

- <그림.53>는 Steel Wool Fiber의 주사전자현미경 그림이며 Steel Wool Fiber의 상태를 관찰할 수 있음,
- <그림.54>은 Steel Wool Fiber 고배율 확대 그림이다. <그림.53>에서는 확인되지 않았으나 <그림.54>에서 살펴보면 Steel Wool Fiber가 아스팔트 콘크리트 혼합물을 만들기 전 처음 상태와는 다르게 조금씩 손상된 모습을 확인함.
- 이는, 아스팔트 콘크리트 혼합물을 만드는 과정에서 재료가 손상을 가져오는 것으로 판단됨.
- 또한 Steel Wool Fiber가 고루 퍼져 분포 하지 못하고 서로 뭉쳐서 뭉쳐 있는 것을 확인 할 수 있다. 이것으로 6%초과 8% 이상 첨가된 Steel Wool Fiber 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편이 열전도도나 전기저항 효율이 떨어지는지 확인함.
- <그림.55>은 Steel Powder + Steel Wool Fiber 혼합 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편으로써 각각의 첨가제가 아스팔트 바인더에 어떠한 형태로 서로 공존하는지 나타남.

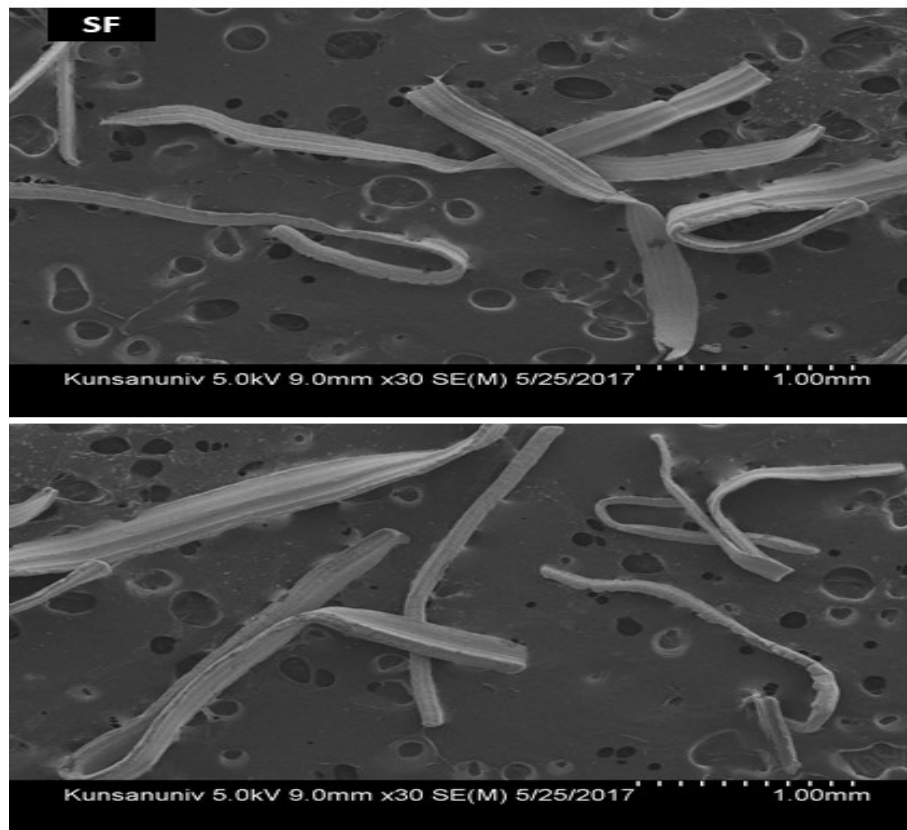


그림.53 Steel Wool Fiber 주사전자현미경 시험결과1

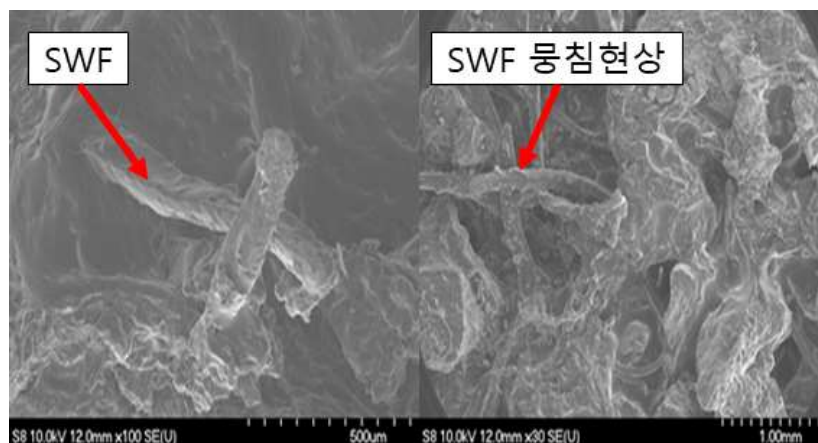


그림.54 Steel Wool Fiber 주사전자현미경 시험결과2

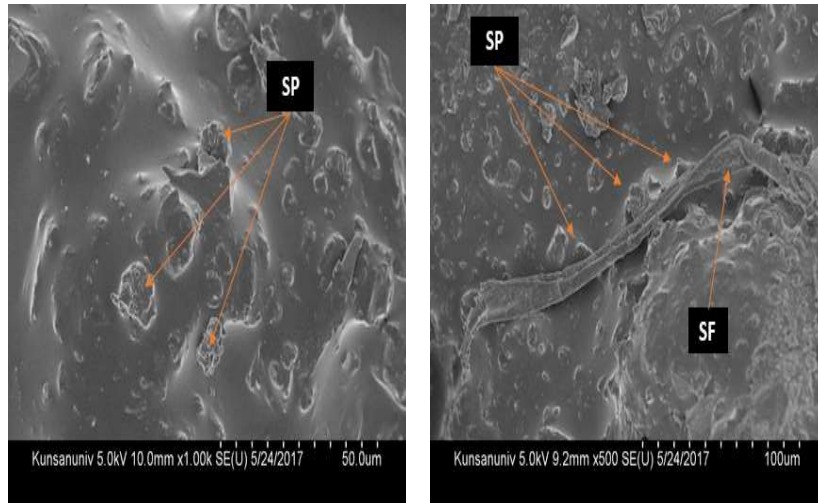


그림.55 Steel Powder + Steel Wool Fiber 혼합 주사전자현미경 시험결과

6. 전화단층조영주사법(computed tomography scanning, CT-Scan Test)

- CT-Scan Test 시험은 전도성 첨가제를 첨가한 아스팔트 혼합물의 공시체 시편의 첨가제 분포를 확인하기 위한 시험임. CT-Scan<그림.56>을 통해 혼합물 내의 단면 영상을 얻어 MATLAB(ver. 2013)을 이용하여 이미지 분석을 수행함.

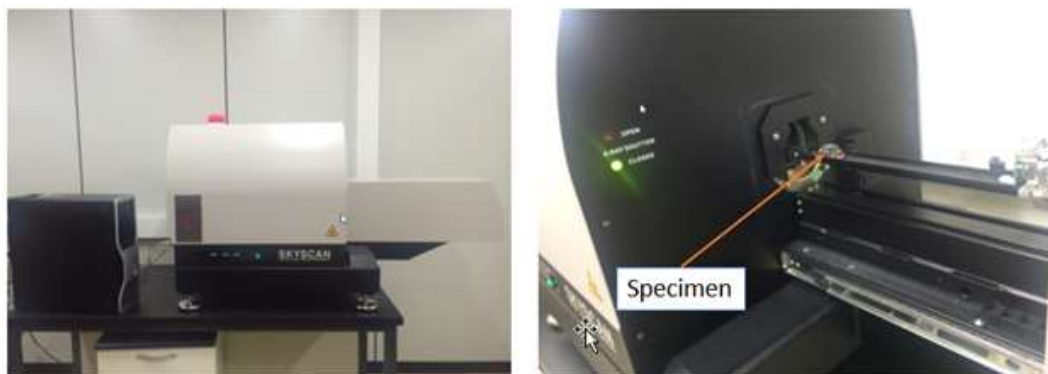


그림.56 CT-Scan (model - SkyScan-1076)

가. CT-Scan Test 시험결과

- <그림.57>은 CT-Scan 시험결과 그림이며 왼쪽 그림이 원본 사진 오른쪽 그림은 MATLAB을 프로그램을 사용하여 이미지 처리한 그림이며 흰색 부분이 첨가제 부분을 나타내고 검은색 부분은 골재 및 아스팔트 바인더 부분을 나타냄.
- <그림.58>은 Steel Wool Fiber 4% 첨가한 그림이며 <그림.57>은 Steel Wool Fiber 8% 나타낸 그림임. <그림.57>은 보다 많은 흰색을 나타내며 이는 더 많은 양의 첨가제를 함유 할 수 있음을 알 수 있음. <그림.57>을 살펴보면 흰색 부분이 많이 뭉쳐 모여 있는 것을 확인할 수 있으며 이는 Steel Wool Fiber 과다 사용으로 혼합이 잘 되지 않고 고루 퍼져 있지 못한 것을 확인함.

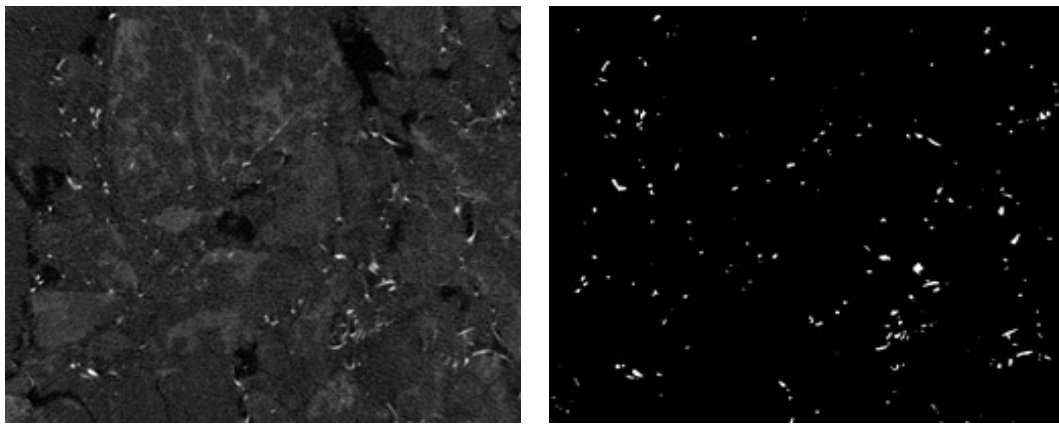


그림.57 CT-Scan 시험결과1

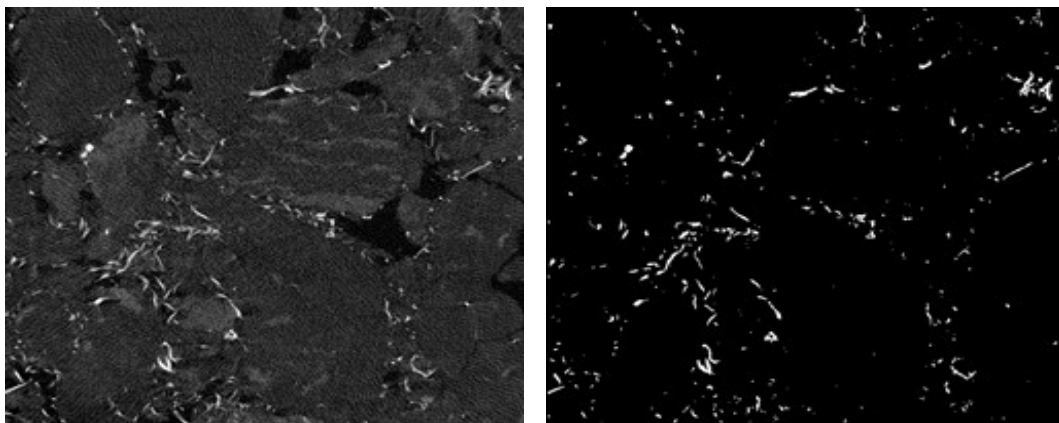


그림.58 CT-Scan 시험결과2

- <그림.59>는 표본 전체의 Steel Wool Fiber의 분포를 나타냄. 2%, 4% 및 6%의 함량을 가진 표본들은 낮은 변동 범위를 나타내고 있음. 그러나 Steel Wool Fiber 8%의 경우 큰 변동 범위를 나타냄. 다량의 Steel Wool Fiber 함량은 고른 분포를 보이지 않고 서로 엉켜있어 그 효율성이 떨어지는 것으로 나타남.

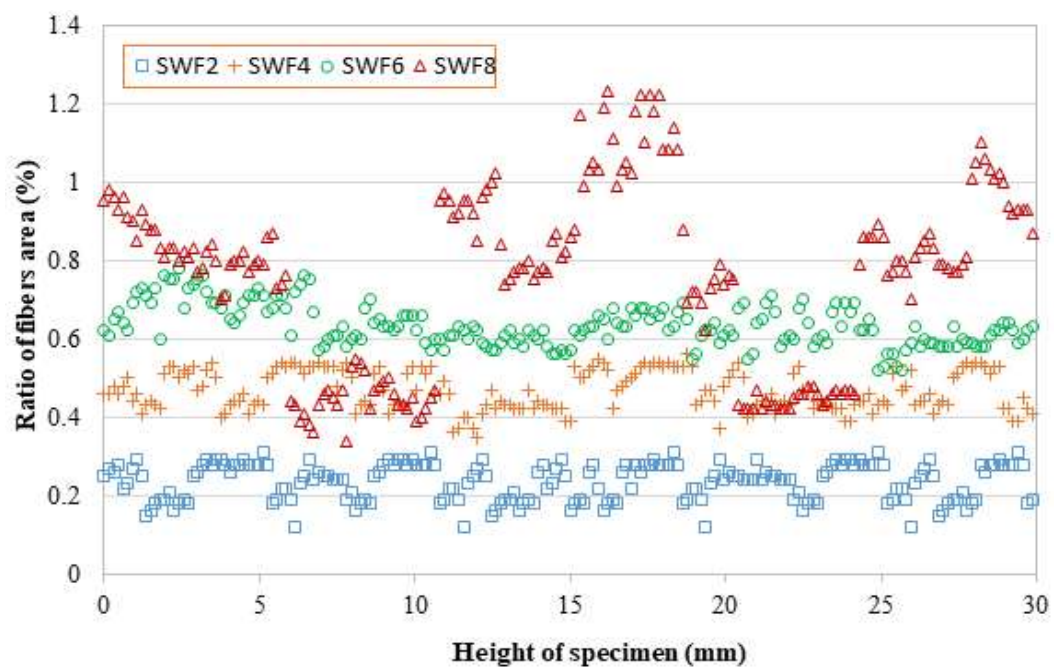


그림.59 표본에서 Steel Wool Fiber의 분포 비율

- <그림.60>은 표본 전체의 Steel Powder의 분포를 나타냄. 5%, 10% 및 15%,20% 즉 Steel Powder 전체적으로 낮은 변동 범위를 나타냈음, 각각의 함량별로 일정한 범위를 나타냄.
- 또한 Steel Wool Fiber 보다 더 넓은 분포를 나타내고 있음.

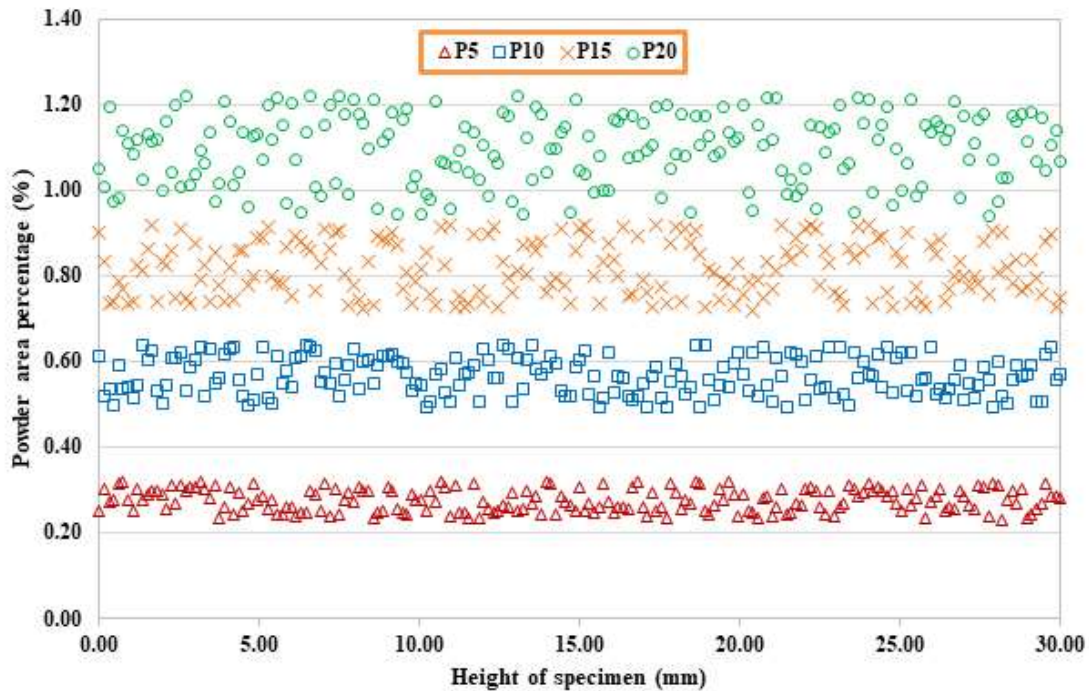


그림.60 표본에서 Steel Powder의 분포 비율

- <그림.61>은 Steel Wool Fiber + Steel Powder의 분포 비율을 나타냄. Steel Wool Fiber의 함량을 6%로 고정하고 Steel Powder 함량을 각각 5%, 10% 및 15%, 20%로 제작 시험을 수행함.
- 각각의 모든 시험표본에서 함량별로 일정한 범위를 나타내고 있음. Steel Powder가 첨가되어 넓은 분포를 나타내고 있음.

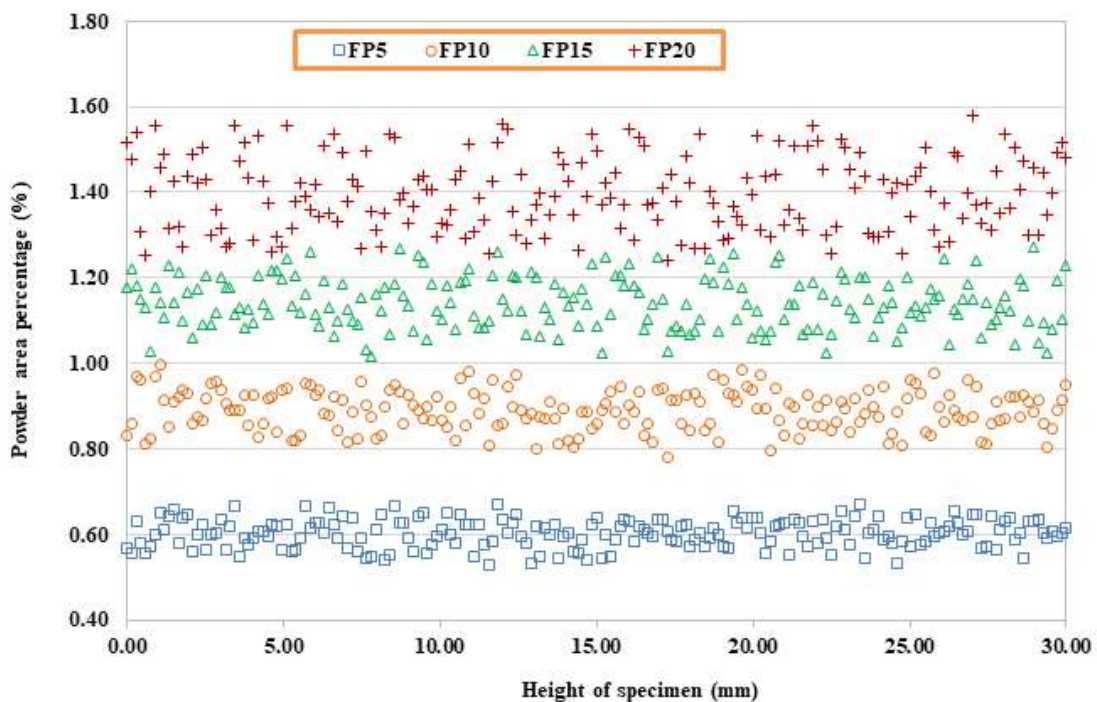


그림.61 표본에서 Steel Wool Fiber + Steel Powder의 분포 비율

- <그림.62>는 Slag + Steel Wool Fiber의 분포 비율을 나타냄. Fiber의 함량이 8% 이상 초과하는 고른 분포를 나타내지 못함. Fiber의 함량을 6% 이하로 하였을 때 고른 분포 및 적절한 열전도도와 전기저항 효과를 보임.

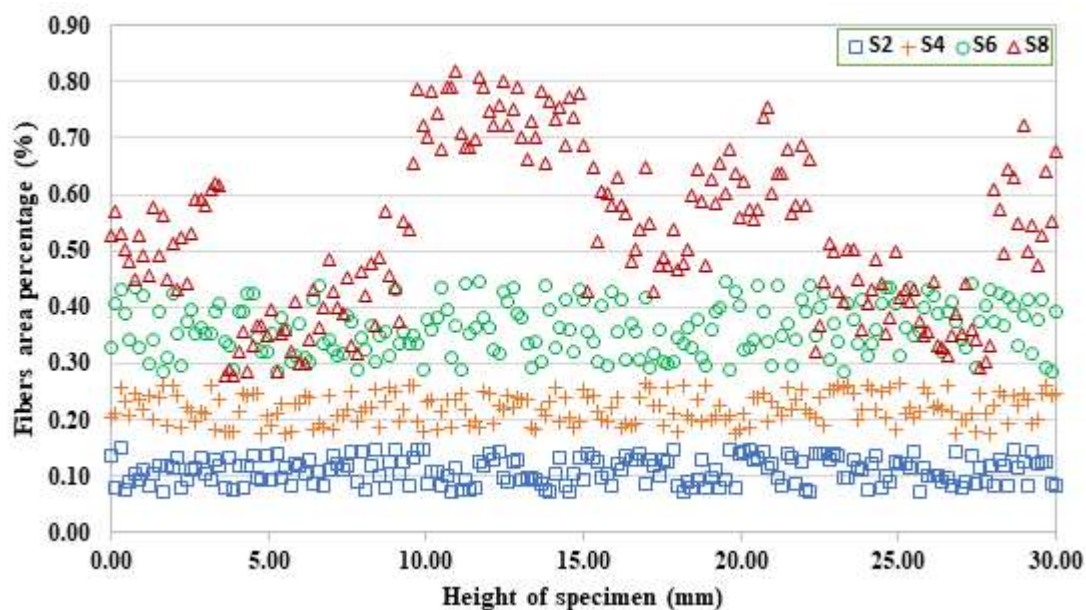


그림.62 표본에서 Slag + Steel Wool Fiber의 분포 비율

제 3 절 아스팔트 콘크리트 유도가열 자기치유 및 성과

1. 유도가열 시험을 통한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 자가 치유

- 유도가열 장치를 통한 아스팔트 콘크리트 혼합물 포장에 자가 치유 효과를 극대화 할 수 있는 조건을 찾기 위한 시험을 수행함.
- 유도가열을 촉진하기 위해 첨가된 전도성 첨가재료는 Slag, Steel Wool Fiber 및 Steel Powder를 단일 사용 및 각각의 첨가제를 혼합하여 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편을 제작 후 시험에 사용함.
- 또한, 아스팔트 바인더 PG-58-22, PG64-22 및 PG76-22를 사용하여 아스팔트 바인더의 점도의 차이로 발생하는 아스팔트 콘크리트 혼합물의 치유 성능에 미치는 영향을 분석함.
- 유도가열 시험을 진행하기 위하여 인장강도시험기를 사용하여 3점 휨 시험(Three-point Bending Strength of Asphalt Mixture Samples, TPB-test)을 수행하였으며, 유도가열 시험기를 사용하여 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편의 자가 치유 효과를 측정함.
- 수분저항 시험방법(AASHTO T 283)을 통하여 수분손상에 의한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 자가 치유 효과를 확인함.
- 아스팔트 노화 시험을 통하여 산화된 아스팔트 바인더의 상태에 따른 치유 형태를 확인함.



그림.63 인장강도 시험기, 유도가열 시험기

2. 유도가열 자가 치유 시험방법.

가. TPB-test 시험방법

- 아스팔트 콘크리트 혼합물 시험 시편을 커팅 후 반달 모양으로 만들어 3점 휨 시험을 수행함. 3점 휨 시험은 반원형 3점 강도 시험으로 평평한 면 양쪽 끝에 롤러를 배치하고 반원형 상단부에 강도시험<그림.69>를 진행함. 시험기의 제하 속도는 0.5mm/min으로 수행함.
- 3점 휨 시험을 수행한 후 반원형 상단부의 균열을 관찰함. 강도시험을 수행한 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편을 상온에서 보관 후 유도가열을 통해 시험 시편을 자가 치유함 치유된 시험 시편을 -20℃ 냉동보관 2시간 후 다시 3점 휨 시험을 수행함. 강도시험을 수행한 시험 시편을 유도가열을 통해 치유와 냉동보관을 8회 반복 시험 후 관찰함.
- 아스팔트 콘크리트 혼합물의 치유량은 다음 식(8)과 같다.

$$S_h = \frac{F_a}{F_o} \quad (8)$$

여기서,

F_a : 자가 치유 후 시험 시편의 강도

F_o : 초기 시험 시편의 강도

- 열화상 카메라를 활용하여 유도가열을 거친 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편의 이미지를 촬영을 수행함.
- <그림.65>를 살펴보면 아무것도 첨가되지 않은 Control 표본 시험 시편은 온도의 변화가 없는 것을 볼 수 있음. 하지만 첨가제가 포함된 아스팔트 콘크리트 혼합물 표본에서는 시간이 증가함에 따라 온도가 증가하는 것을 나타냄.
- <그림.66>을 살펴보면 Steel Wool Fiber의 첨가 함량이 4%일 때 가열시간 1분을 초과 했을 때 25℃온도를 나타내며 2분 초과에 43℃의 온도 상승을 보여준다. Steel Wool Fiber의 첨가 함량이 6%일 때는 8%함량과 비슷한 온도 상승을 나타냄.



그림.64 열화상 카메라

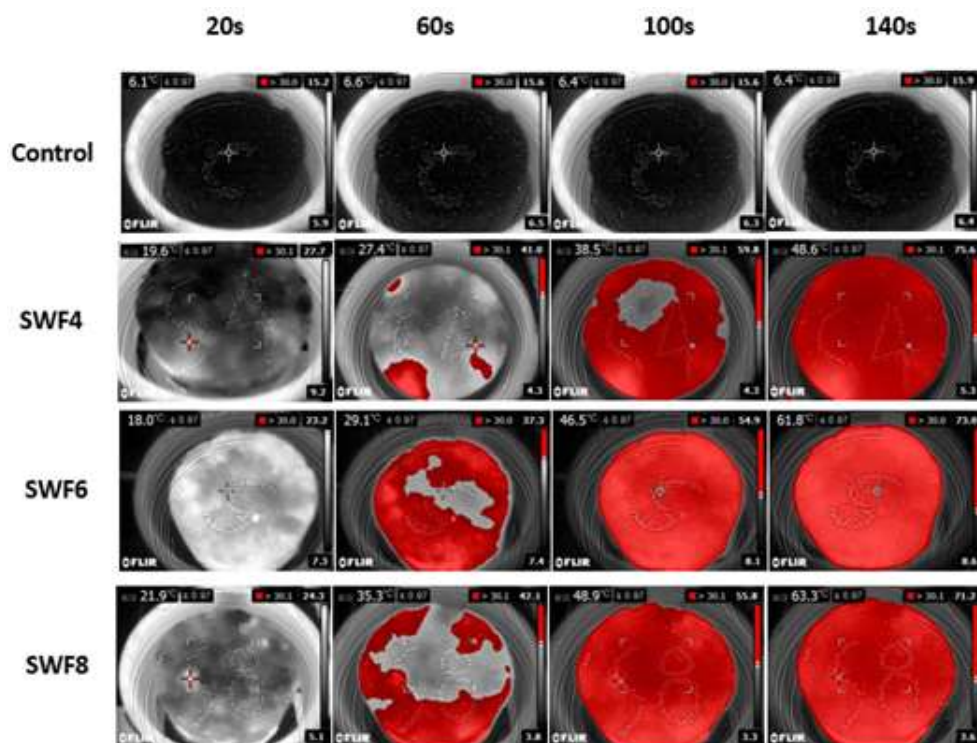


그림.65 표본의 열화상 카메라 이미지

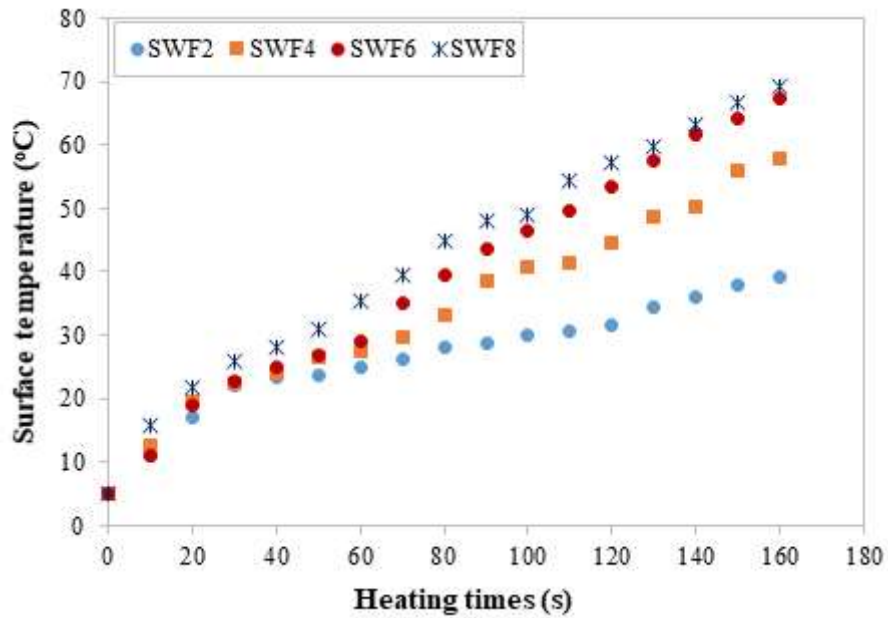


그림.66 아스팔트 혼합물의 시간 표면온도

- <그림.67>은 표본의 열화상 카메라 이미지이며 Steel Wool Fiber가 들어간 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편과 Slag + Steel Wool Fiber 조합된 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편의 온도 상승을 나타낸 그림이며 Steel Wool Fiber 함량이 증가 할수록 온도가 더 많이 상승 하는 것을 알 수 있음. 또한 Slag + Steel Wool Fiber 시편에서도 Steel Wool Fiber의 함량이 높을수록 온도가 더 많이 향상하는 경향을 나타냄.
- Steel Wool Fiber 단일 첨가한 시편보다 Slag가 첨가된 Slag + Steel Wool Fiber의 조합에서 더 높은 온도 상승을 나타냄.

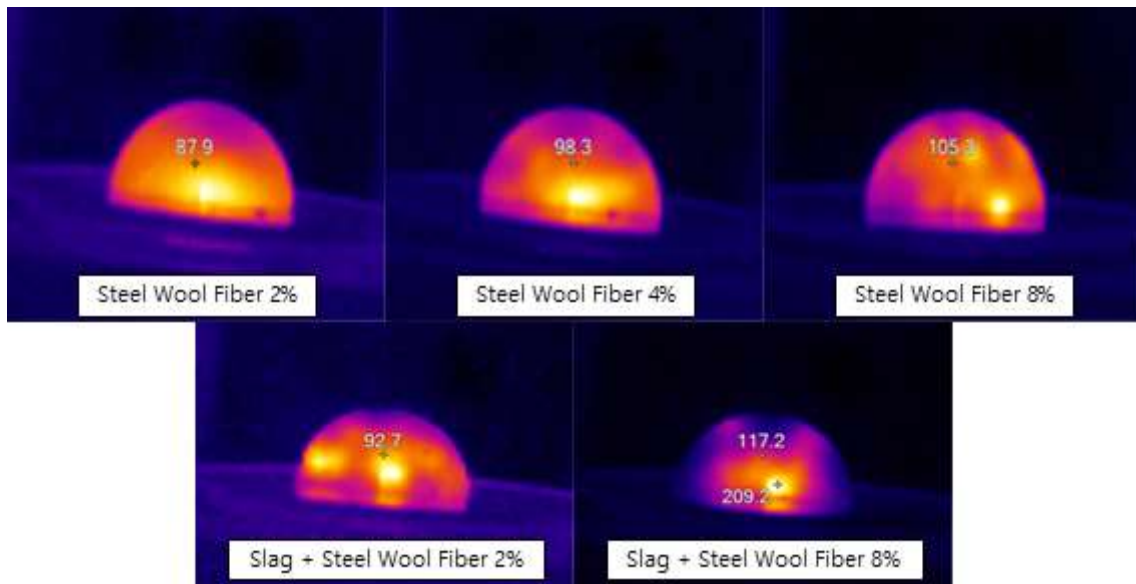


그림.67 표본의 열화상 카메라 이미지

나. 수분저항 시험방법(AASHTO T 283)

- 아스팔트 콘크리트 혼합물 시험 시편을 AASHTO T 283 시험 절차에 따라 동결융해를 반복시험을 수행함.
- 진공 포화된 각 시편을 플라스틱 랩으로 단단히 봉하고 $10 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 물을 넣은 비닐봉지에 넣어 봉인함. 봉인된 비닐봉지는 $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도에서 24시간 냉동보관을 한 다음 $60 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수조에서 24시간 동안 보관하고 다시 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 수조에서 2시간이상 보관한다. 보관된 시료를 꺼내 상온에서 10분 동안 꺼내 놓고 3점 휨 시험을 수행함.
- 이 시험을 위해 4가지 종류의 시편을 준비하였다. 첫 번째 시편은 보통 시편이며 두 번째 시편은 1번의 동결융해, 세 번째 시편은 3번의 동결융해, 4번째 시편은 5번의 동결융해를 거친 시료를 가지고 시험을 수행함.



그림.68 시험 시편 동결 및 융해 과정

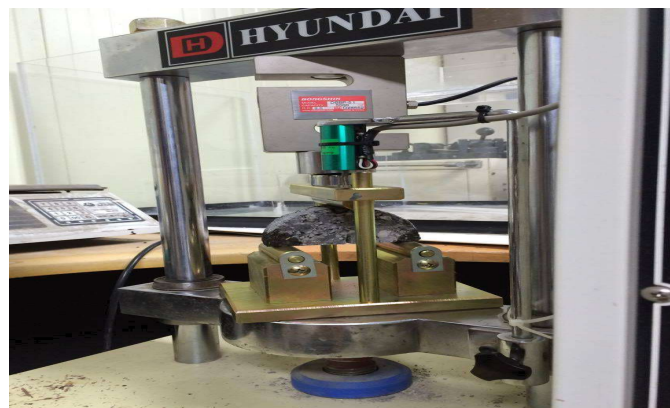


그림.69 3점 휨 시험(TPB-test)

- 수분 손상에 의한 아스팔트 콘크리트 혼합물시편 저항시험 자가 치유 효과는 <그림.70>에서 나타냄. 일반적으로 자가 치유 효과는 가열횟수가 증가 하면서 감소하며 또한 동결융해가 반복될수록 자가 치유 효과는 감소함.
- C는 Control시편이며 수분손상을 가하지 않았고 1FT시편은 동결융해를 1회 거친 시편이고, 3FT시편은 동결융해를 3회, 5FT시편은 동결융해를 5회 거친 시편임.
- 1회 동결융해에서는 모든 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편들이 비슷한 자가 치유 효과를 나타냈음. 그러나 2회 동결융해부터 C시편을 제외한 1FT, 4FT, 5FT시편은 치유 수준이 25%가량 현저하게 저하되었음. 4번째 횟수부터 C시편 또한 현저하게 치유 성능이 감소함. 다섯 번째 횟수부터 C, FT1 및 FT3의 치유 수준은 각각 57%, 54% 및 50%로 나타났고 F5 혼합물의 치유 수준은 28%로 적게 나타남.

- 이에, 아스팔트 콘크리트 혼합물에 대한 동결융해 영향으로 혼합물은 유동성을 잃고 점도가 높아져 균열에 대한 자가 치유 효과가 적게 나타남.

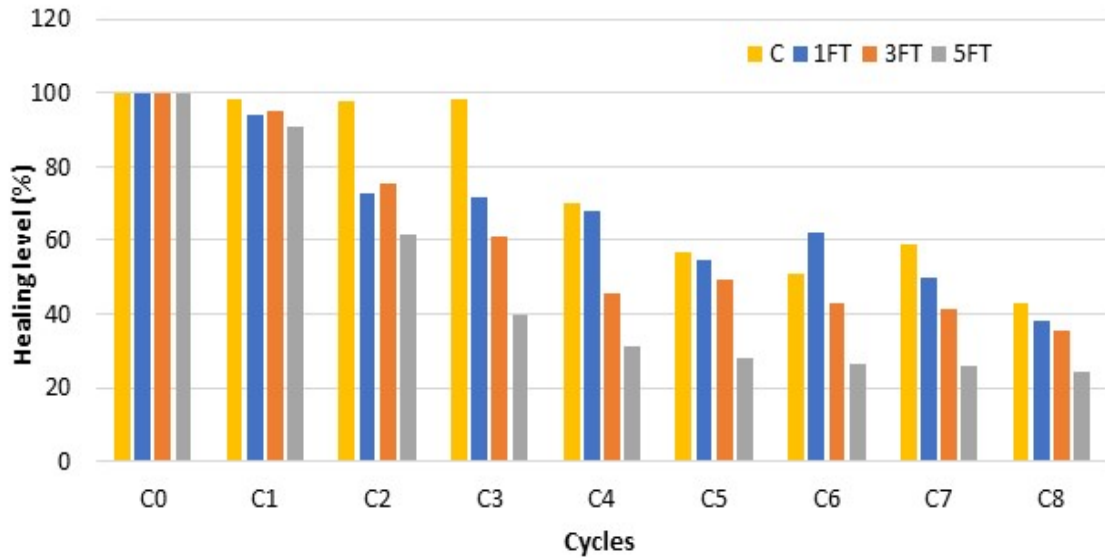


그림.70 90℃에서 아스팔트 콘크리트 혼합물의 치유성능

3. 등급별 아스팔트 바인더 시험

- 유도 가열 방식을 사용하여 각각의 아스팔트 바인더가 아스팔트 콘크리트 혼합물에 미치는 자가 치유 영향을 시험 평가함. <표.14>는 시험에 사용된 아스팔트 바인더의 물성 지표이며 PG58-22, PG64-22 및 PG76-22 3가지 아스팔트 바인더를 사용하여 시험을 수행함. 또한 본 시험을 통해 신 아스팔트 바인더의 성능과 재생 아스팔트 콘크리트 혼합물의 사용함에 자가 치유 효과를 확인함.

표.14 아스팔트 바인더 물성표

구분	Viscosity at 60℃(Poises)	Specific gravity at 15.6℃
PG58-22	1120	1.028
PG64-22	2030	1.030
PG76-22	3280	1.033

- <그림.71>에서 각각의 아스팔트 바인더는 3번째 횟수를 반복 할 때까지 서서히 자가 치유 효과가 감소하다가 4번째 횟수부터는 급격하게 자가 치유 효과가 급격하게 감소함.
- <그림.72>에서 횟수가 반복되면서 서서히 자가 치유 효과가 감소하다가 5번째 횟수부터는 급격하게 자가 치유 효과가 감소함.
- 전체적인 자가 치유효과는 PG58-22 아스팔트 바인더가 가장 우수하게 나왔으며 PG-76-22 아스팔트 바인더는 가장 적은 자가 치유효과를 나타냄. 시험 결과 낮은 점도의 아스팔트 바인더가 자가 치유 효과가 우수함.

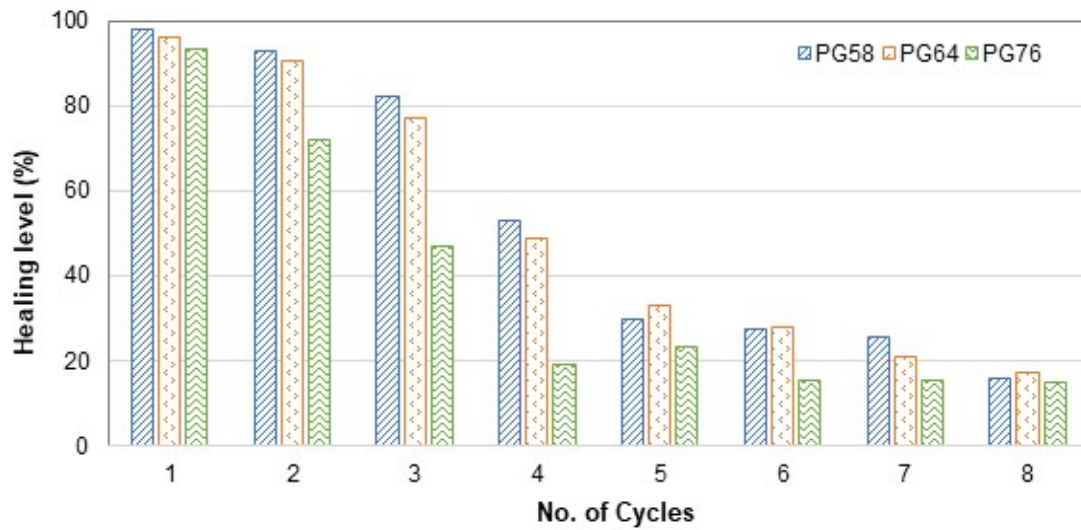


그림.71 70°C 온도에서 아스팔트 바인더 등급에 따른 자가 치유 효과

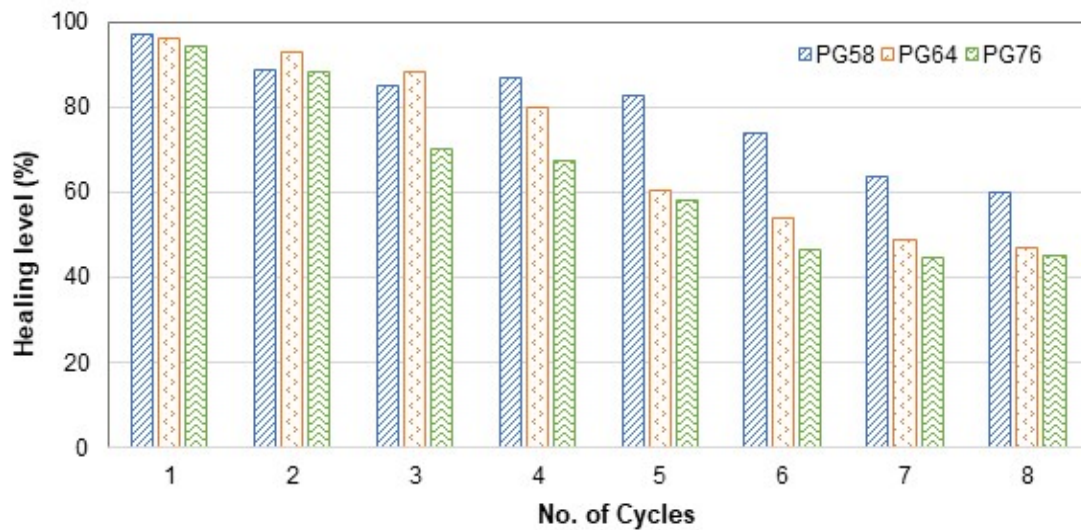


그림.72 90°C 온도에서 아스팔트 바인더 등급에 따른 자가 치유 효과

- <그림.73>, <그림.74>, 및 <그림.75>는 각각의 아스팔트 바인더를 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물 시편의 응력-변형률 곡선이며 그래프에서 나타낸 C0은 초기 상태 시편이며 C1은 자가 치유 1회, C4는 4회, C8은 8회 반복한 시편을 나타냄.
- PG76-22 바인더를 사용한 아스팔트 콘크리트 시편은 강도가 급격하게 상승하고 급격하게 하강하는 그래프를 나타내고 있으며 PG58-22 바인더를 사용한 아스팔트 콘크리트 시편은 강도가 서서히 증가하며 서서히 감소하는 연성거동이 나타남.
- 즉, PG76-22 바인더를 사용한 아스팔트 콘크리트 시편은 다른 바인더를 사용한 시편보다 더 쉽게 파괴가 나타남.

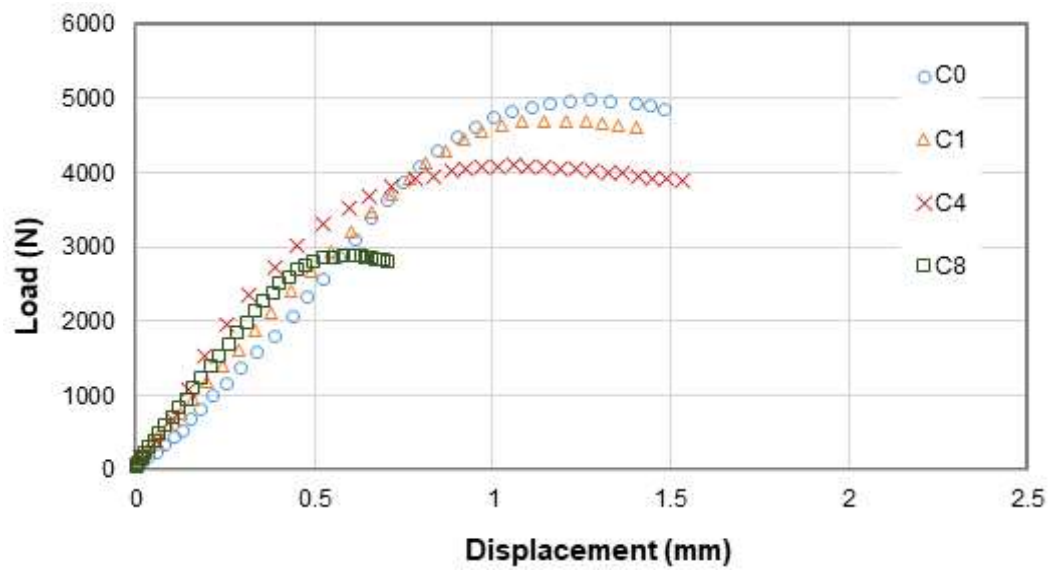


그림.73 PG58-22 아스팔트 바인더 응력-변형률 곡선

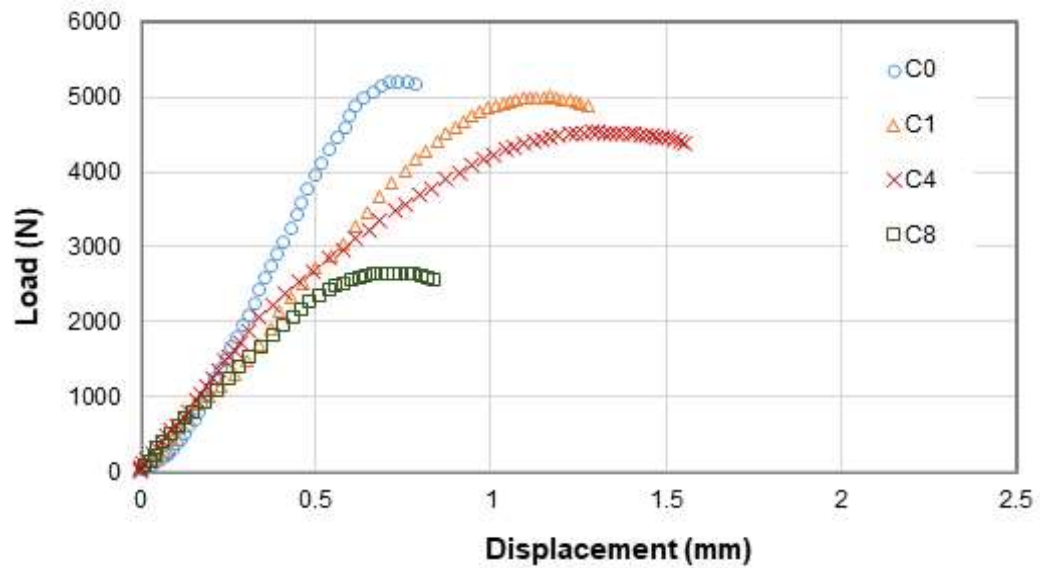


그림.74 PG64-22 아스팔트 바인더 응력-변형률 곡선

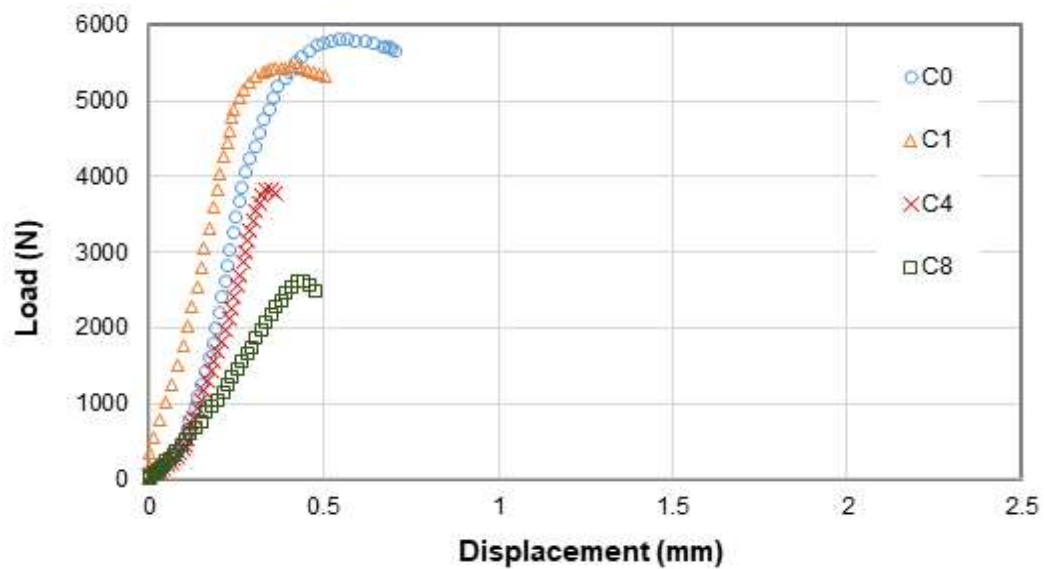


그림.75 PG76-22 아스팔트 바인더 응력-변형률 곡선

4. 아스팔트 바인더의 노화 시험

- <그림.76>, <그림.77>는 아스팔트 바인더의 노화 시험 중 자가치유 효과를 나타낸 그래프이며, C는 보통 시편, A5는 5시간, A15는 15시간, A20 20시간 단기 노화를 거친 아스팔트 바인더의 시편을 나타냄.
- 노화시험에서도 온도가 높은 90℃에서 자가 치유효과가 좋게 나타남.
- Control시편과 A5 시편은 70℃에서 시험과 90℃에서 그 치유 효과가 크게 차이가 나타남.

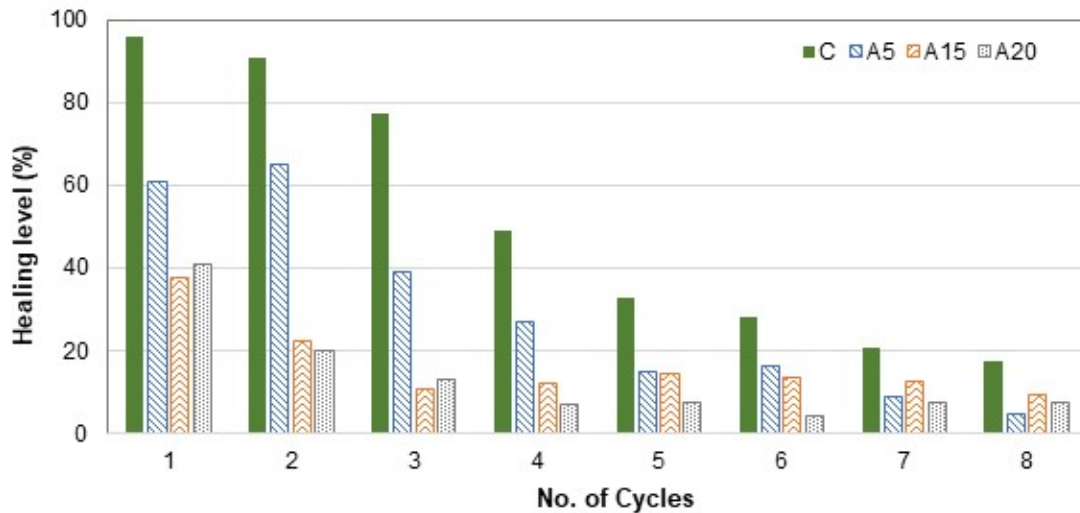


그림.76 아스팔트 바인더의 노화 시험 (70℃ 온도에서의 자가 치유 효과)

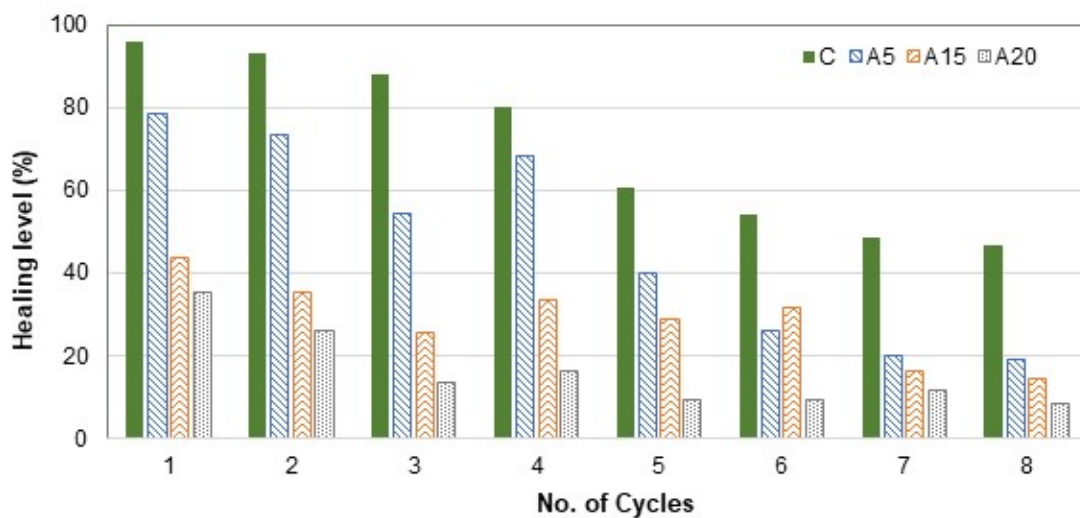


그림.77 아스팔트 바인더의 노화 시험 (90℃ 온도에서의 자가 치유 효과)

- <그림.78>, <그림.79>, <그림.80> 및 <그림.81>은 노화된 각각의 시험 시편 응력-변형률 곡선을 나타냄. <그림.78>, <그림.79>은 그래프를 살펴보면 노화되지 않은 시편은 강도가 천천히 증가하고 천천히 감소하는 연성거동을 나타냄.
- <그림.80>, <그림.81>은 첫 번째 횡수를 제외하고는 강도가 상승하다 바로 하강하는 것을 관찰할 수 있음. 이 결과는 아스팔트 바인더가 고압, 고온 및 장시간 노화로 인하여 산화된다는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 현상은 바인더의 점도를 증가시킬 수 있음. 따라서 오래된 바인더 시편은 부서지기 쉽고 균열 될 가능성이 더 큰 것으로 판단됨.

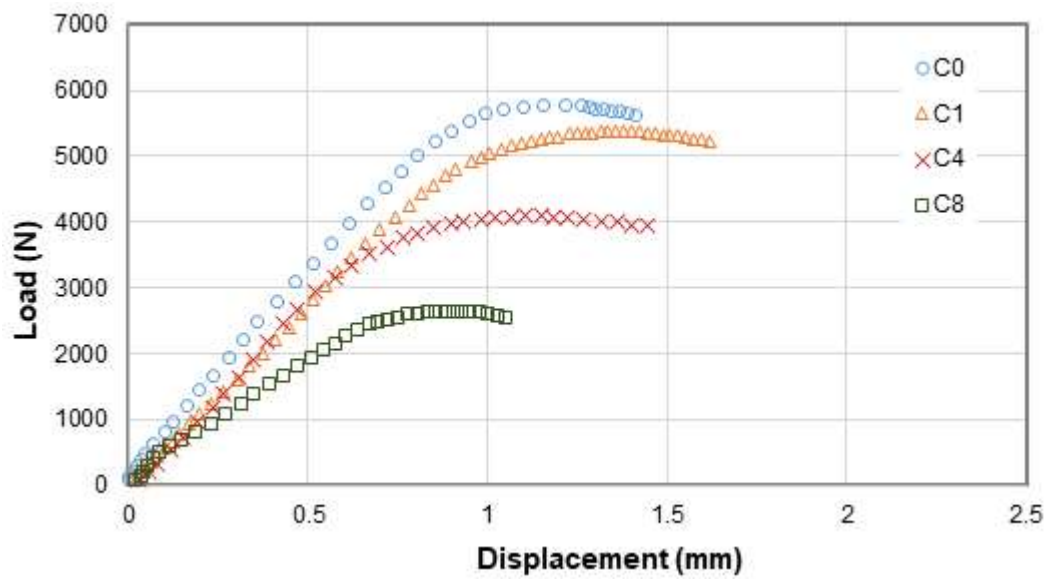


그림.78 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선

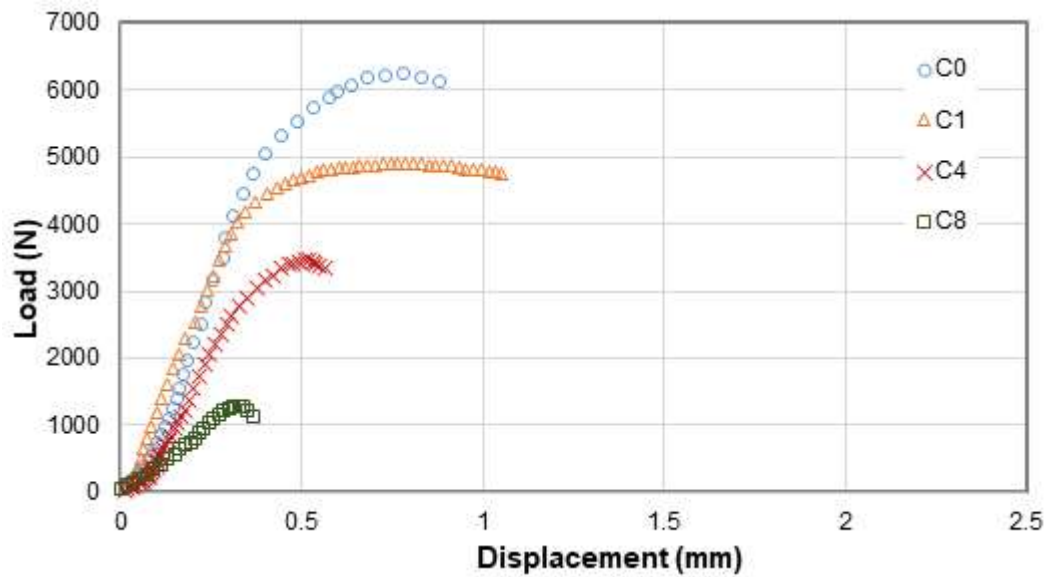


그림.79 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선(5시간)

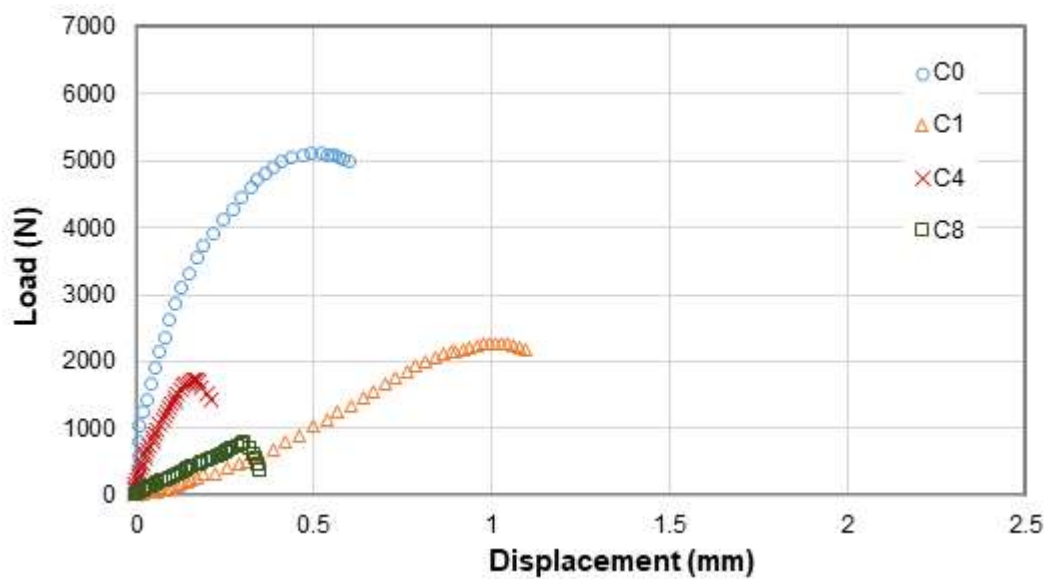


그림.80 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선(15시간)

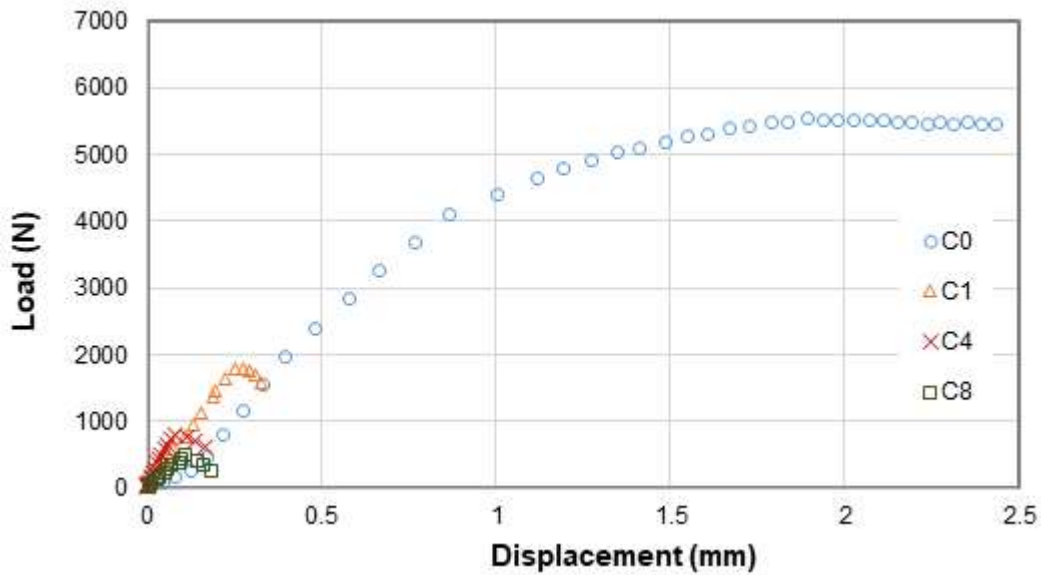


그림.81 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선(20시간)

- 추가적인 시험으로 페조리유를 사용한 아스팔트 혼합물의 자가 치유 상태를 확인함.
- <그림.82>를 살펴보면 페유가 첨가된 아스팔트 콘크리트 혼합물은 4번째 횟수부터 Control 시편과 동등한 자가 치유 효과를 나타냄.
- 이 결과는 아스팔트 콘크리트 혼합물의 자가 치유 능력이 아스팔트 결합체의 점도에 크게 영향을 미치며 고압, 고온 및 장시간 노화로 인하여 산화된다는 것을 차단하여 자가 치유 효과를 상승시킬 수 있다는 것을 나타냄.

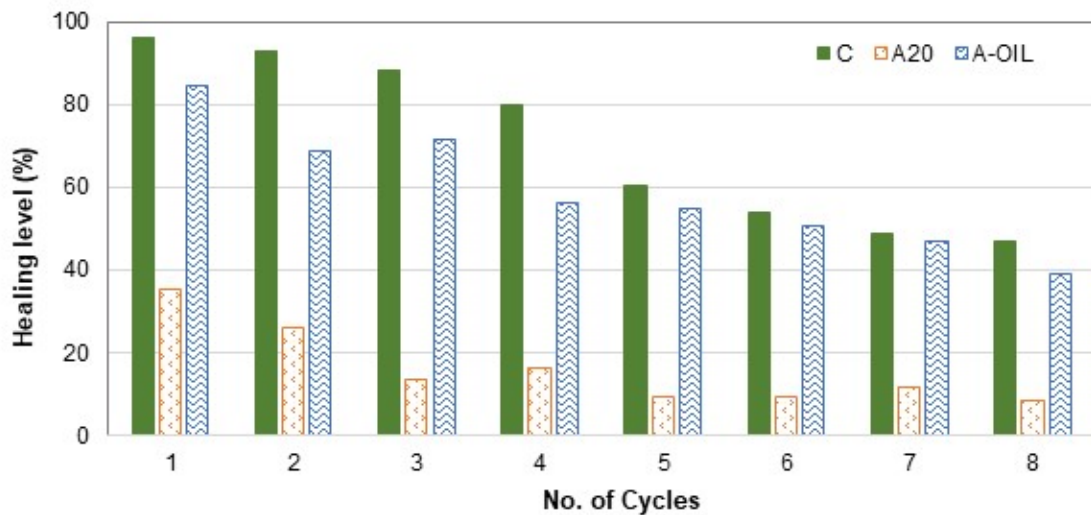


그림.82 페유를 사용한 아스팔트 바인더의 노화 시험 자가 치유 효과

- 응력-변형률 곡선을 살펴보면 전체적인 그래프가 완만한 연성거동을 나타냄.
- 시험 결과 페유가 아스팔트 콘크리트 혼합물의 점도 상승을 막아주는 역할을 수행한 것을 알 수 있음.

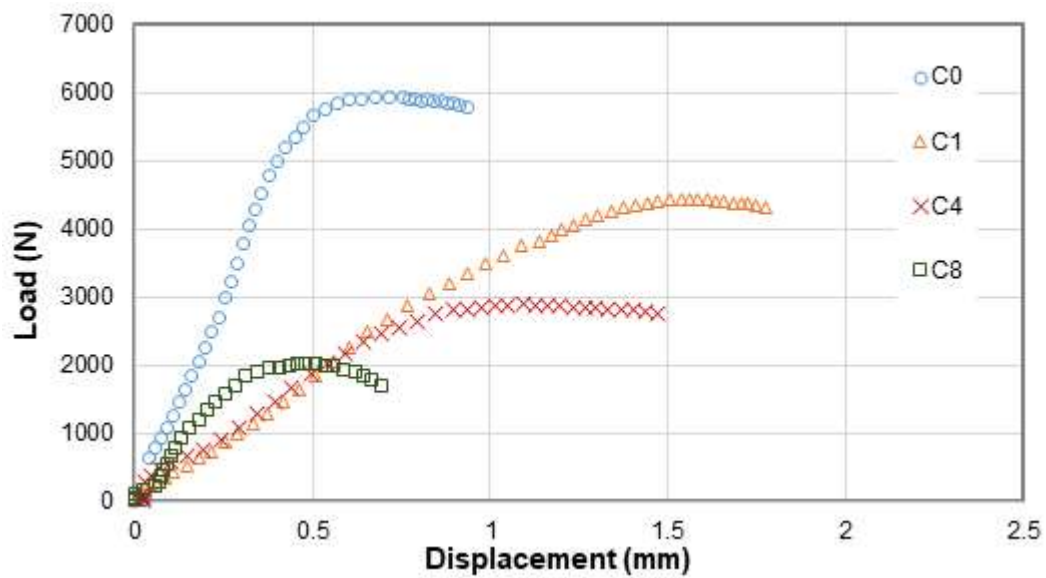


그림.83 폐유를 사용한 아스팔트 바인더의 노화된 혼합물의 응력-변형률 곡선

5. Slag를 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 자가 치유 효과

- Slag와 Steel Wool Fiber를 사용하여 아스팔트 혼합물의 자가 치유 효과를 확인함.
- <그림.84>는 Steel Wool Fiber만을 사용하여 제작한 아스팔트 콘크리트 시편으로 Steel Wool Fiber의 함량증가는 높은 자가 치유 상태를 나타냄. 횟수가 거듭할수록 조금씩 그 치유 효과가 작아짐.
- <그림.85>는 Slag와 Steel Wool Fiber를 혼합하여 제작한 아스팔트 콘크리트 시편으로 Steel Wool Fiber만 첨가한 아스팔트 콘크리트 시편보다 치유 효과가 적음.
- 또한, Steel Wool Fiber 함량이 증가 하더라도 높은 자가 치유 효과를 나타내지 못함.
- Slag를 포함한 Steel Wool Fiber의 자가 치유효과는 좋지 않은 것으로 판단됨.

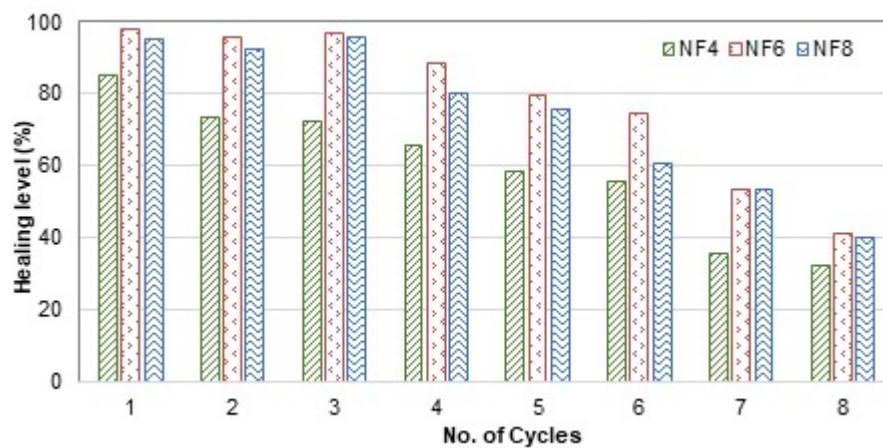


그림.84 Steel Wool Fiber 아스팔트 콘크리트 치유성능

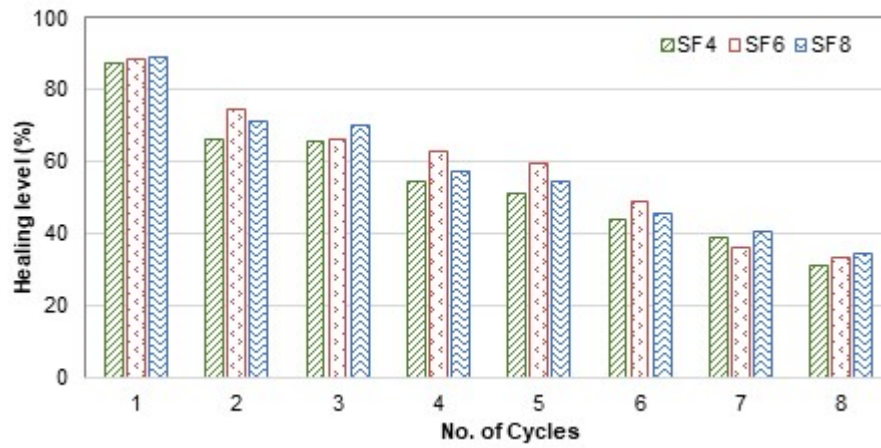


그림.85 Slag + Steel Wool Fiber 아스팔트 콘크리트 치유성능

- <그림.86>는 Steel Wool Fiber를 사용한 아스팔트 혼합물의 응력-변형률 곡선이며 연성 거동을 나타내며 0회에서 4회 까지 하중의 변화가 적게 나타나며 마지막 8회째에서 적은 하중의 변화가 나타남.
- <그림.87>는 Slag와 Steel Wool Fiber를 혼합하여 제작한 아스팔트 콘크리트 시편이며 하중의 변화가 크고 마지막 부서지는 지점에서 급격하게 시편이 파손됨.

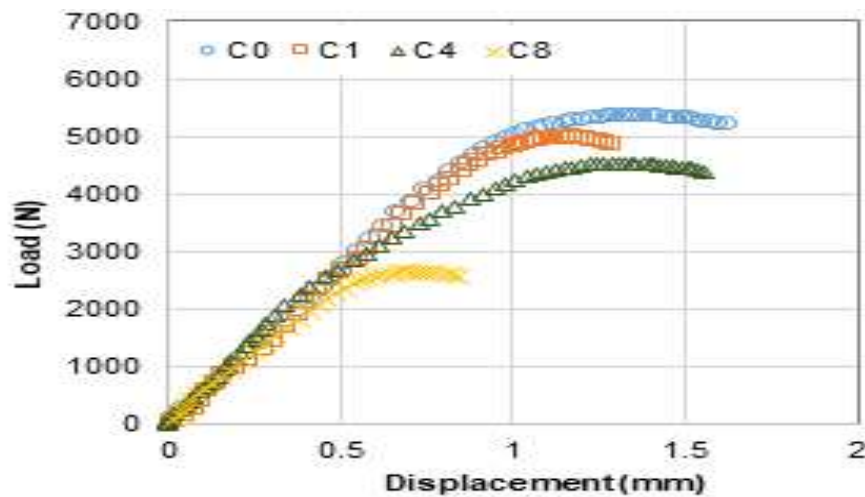


그림.86 Steel Wool Fiber 아스팔트 콘크리트 혼합물의 응력-변형률 곡선

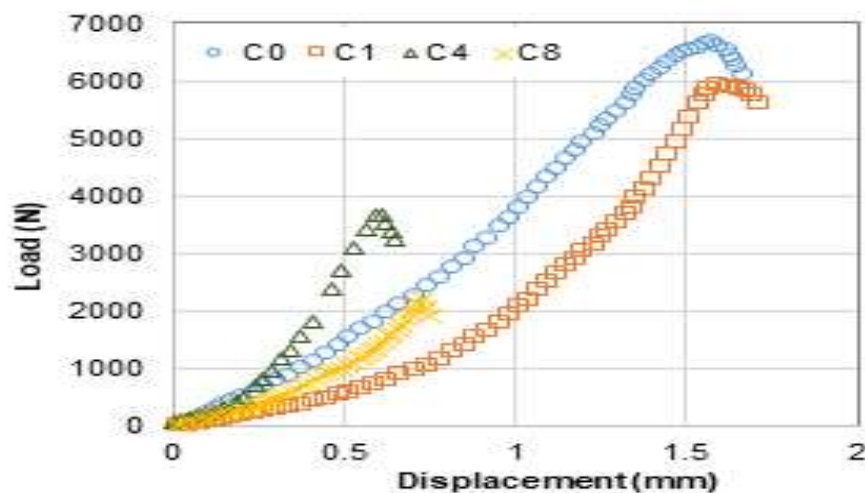


그림.87 Slag + Steel Wool Fiber 아스팔트 콘크리트 혼합물의 응력-변형률 곡선

6. 신 골재 및 재생골재 아스팔트 콘크리트 혼합물의 자가 치유 효과

- 재생골재를 사용함으로써 재생첨가제를 함께 사용하여 첨가제가 미치는 자가 치유 효과 또한 확인함.
- 사용된 재생첨가제는 총 4가지 재생첨가제이며 추가적으로 폐유를 사용하여 재생 아스팔트 혼합물의 자가 치유효과를 재생첨가제를 사용한 재생아스팔트 혼합물과 비교 분석함.
- <표.15>은 각각의 재생첨가제의 물성표이며 <표.16>는 배합설계를 위한 재생골재의 입도분포로 사용함.
- <표.17>은 각각의 재생첨가제 첨가량을 표시한 표이다 재생골재의 절대 점도는 30,000poise 이며 절대 점도에 맞춰 첨가량을 결정함. 이와 같은 지표로 아스팔트 혼합물의 배합설계를 수행함.

표.15 재생첨가제 물성표

Type	점 성 60℃(cSt)	비 중
R1	70-90	0.96
R2	113	0.966
R3	80	0.965
R4	60	0.96
OIL	50-60	0.95

표.16 재생골재 배합 입도분포

Sieve size (mm)	19	12.5	9.5	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
Percent Passing (%)	100	99	85	52	35	13	3	1	0

표.17 재생첨가제 함유량

Mixture	전체 아스팔트 함량 (%)	새 아스팔트 함량 (%)	재생첨가제 함량(%)	재생골재 함량(%)
C	5.1	5.1	0	0
R1-30	5.1	3.88	2.5	30
R1-40	5.0	3.38	2.5	40
R2-30	5.1	3.88	5.5	30
R3-30	5.1	3.88	5.2	30
R4-30	5.1	3.88	4.6	30
R-OIL	5.1	3.88	5	30
R30	5.1	3.88	0	30
R40	5.0	3.38	0	40

- <그림.88>, <그림.89>은 아스팔트 혼합물에 재생골재 30%, 40%를 사용하고 재생첨가제를 사용하였으며, 6%의 Steel Wool Fiber를 추가하여 만든 공시체 시편의 치유 효과를 나타낸 그래프임. <그림.88>, <그림.89>의 비교를 통해 고온에서의 유도가열 자가 치유효과가 더 효과적임을 알 수 있음.
- 90℃온도에서는 아스팔트 혼합물의 구조에 영향을 주지 않았으며 미세균열 치유에 충분한 온도로 판단됨.
- 신 골재 아스팔트 혼합물은 높은 자가 치유 효과를 보이고 재생 아스팔트 혼합물은 낮은 자가 치유 효과를 나타냄.
- 재생골재를 사용한 아스팔트 혼합물에서는 노화 및 산화로 높은 점도로 이어지기 때문에 높은 함량의 재생골재 사용은 치유 효과를 저하됨.
- 하지만 재생첨가제를 사용한 아스팔트 혼합물은 역학적 성질을 회복하고 낮은 점도를 유지하여 일반 재생골재를 사용한 혼합물에 비해 자가 치유 효과가 좋은 것으로 나타남.

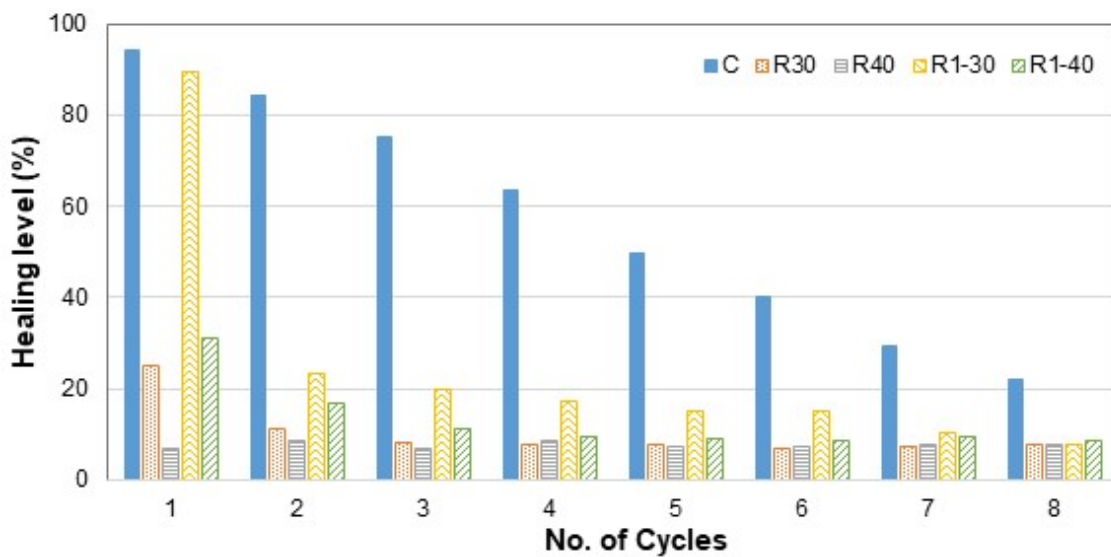


그림.88 아스팔트 콘크리트 혼합물 치유성능(70℃)

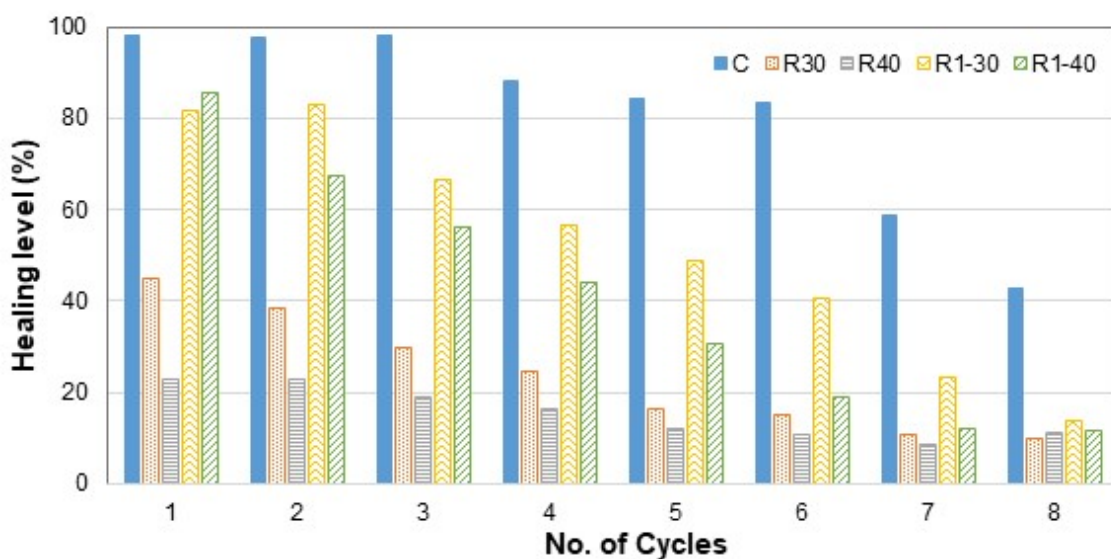


그림.89 아스팔트 콘크리트 혼합물 치유성능(90℃)

- 재생첨가제와 폐유를 사용한 아스팔트 혼합물의 효과는 <그림.90>, <그림.91>에 나타냄.
- 재생첨가제를 사용한 혼합물과 그렇지 않은 혼합물에서 자가 치유 효과는 확연하게 다르게

나타남. <그림.90>에서 R4첨가제와 폐유는 낮은 온도에서도 높은 치유 효과를 나타남. <그림.91>를 보면 전체적으로 자가 치유 효과는 상승함.

- 자가 치유를 1회, 2회에서 8회까지 반복할수록 재생첨가제 R4, 폐유는 조금씩 자가 치유 효과가 작아지는 반면 나머지 시험 시편들은 2회가 지나면서 치유 효과가 거의 나타나지 않음.

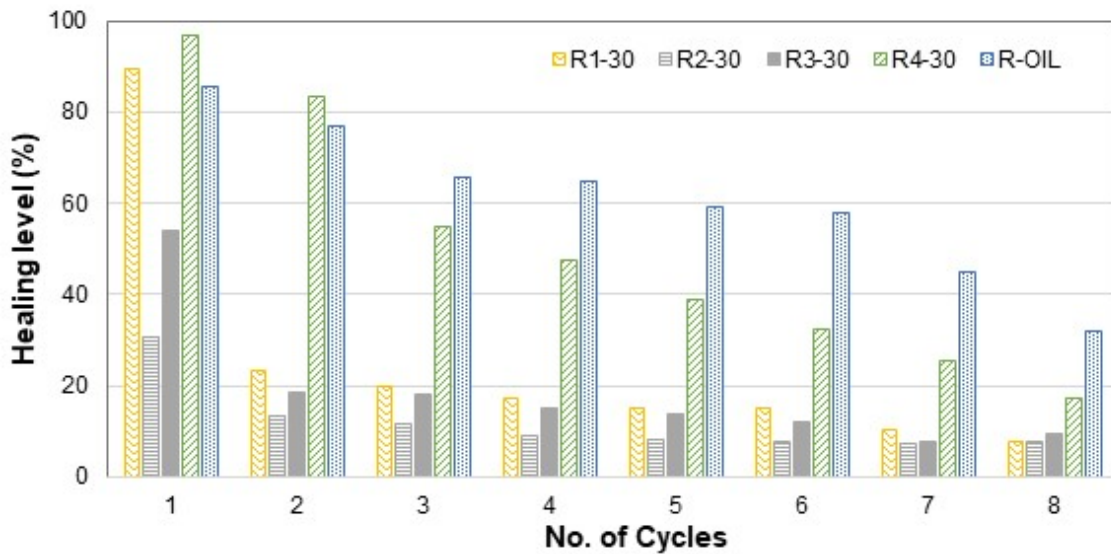


그림.90 재생첨가제와 폐유의 아스팔트 혼합물 치유성능(70℃)

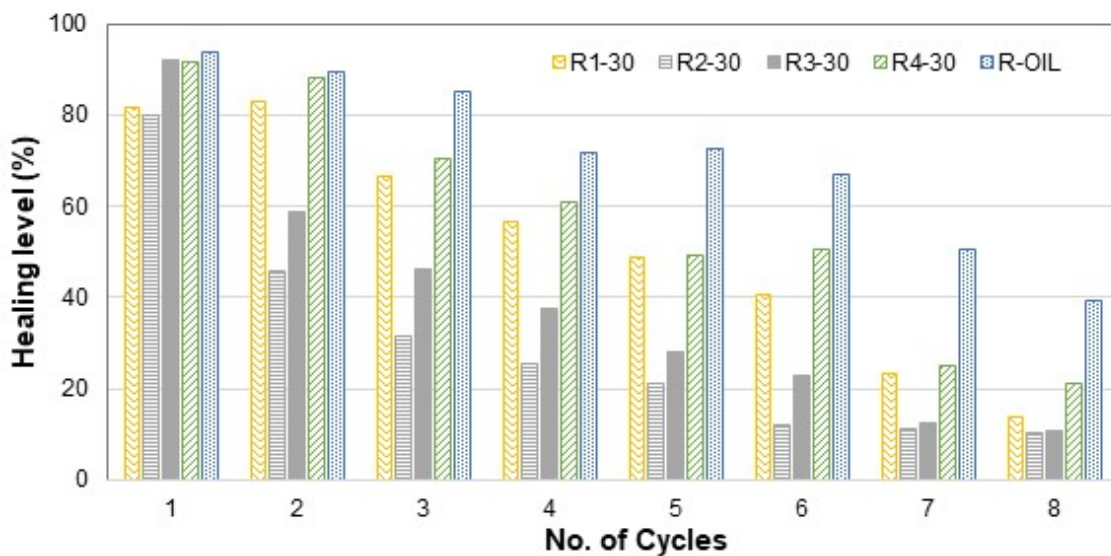


그림.91 재생첨가제와 폐유의 아스팔트 혼합물 치유성능(90℃)

- <그림.92>, <그림.93> 및 <그림.94>는 응력-변형률 곡선을 나타낸 그래프이다. <그림.92>을 살펴보면 마지막 8번 자가 치유 했을 경우를 제외한 나머지 자가 치유 횟수에서는 연성거동을 나타냄.
- <그림.93>를 살펴보면 재생골재를 사용한 아스팔트 혼합물로 신 골재를 사용했을 경우 보다 치유 효과는 현저히 떨어지게 나타남.
- <그림.94>는 폐유를 사용한 아스팔트 혼합물로 재생골재 아스팔트 혼합물보다 높은 자가 치유 효과를 나타냄.

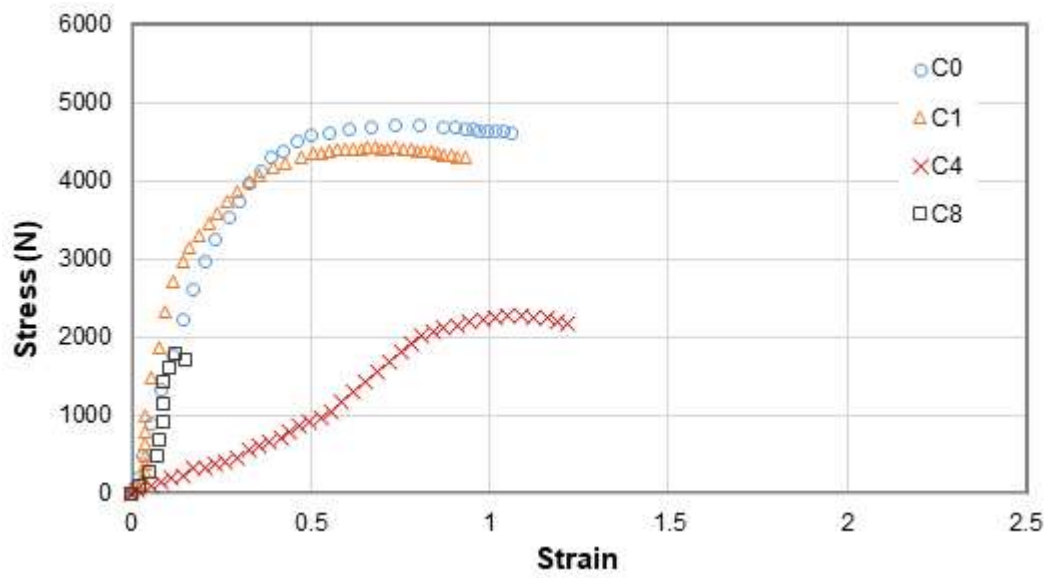


그림.92 아스팔트 혼합물의 응력-변형률 곡선 (아스팔트 콘크리트 혼합물)

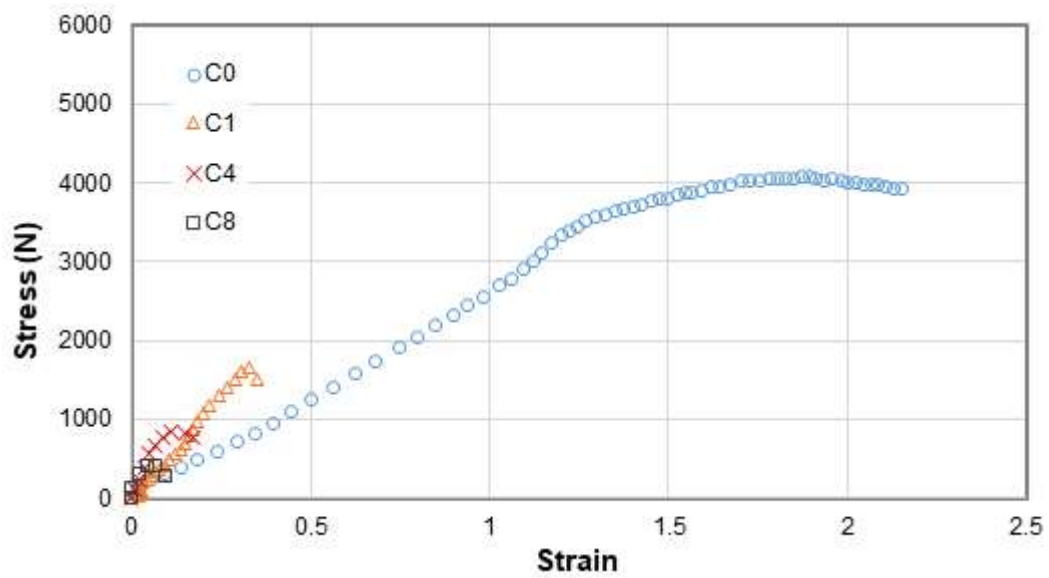


그림.93 아스팔트 혼합물의 응력-변형률 곡선 (재생 30% 사용 아스팔트 혼합물)

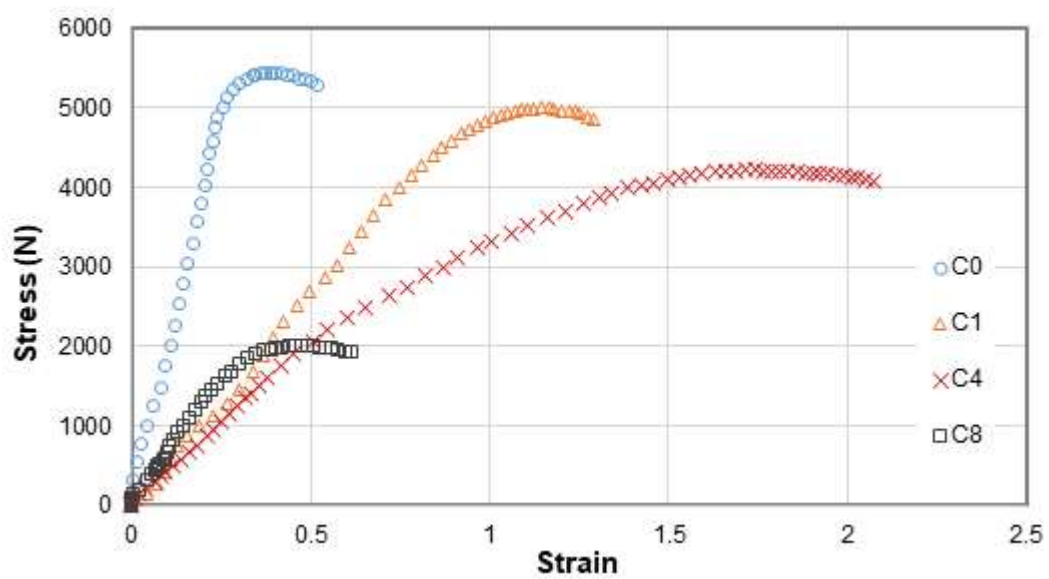


그림.94 아스팔트 혼합물의 응력-변형률 곡선 (폐유사용 재생 아스팔트 첨가물)

7. 시험 결론

- 열전도성 측정 결과 Slag, SP(20%), SWF(6%) 인 시험편이 $2.621 \pm 0.092 \text{ W/mK}$ 로 가장 높은 열전도성을 보임. 단일 재료가 추가된 시험편 중에선 SP(20%)인 시험편이 가장 높은 열전도성을 보였으며, SWF의 함량이 6%를 초과한 시험편의 경우 성능이 감소하는 것을 확인함.
- 전기저항성 측정 결과 일정한 경향을 보이지 않는 것으로 확인함.
- 주사전자현미경 시험 결과 SWF가 콘크리트 혼합물을 만드는 과정에서 재료의 손상이 약간 일어나는 것을 확인 함. 또 6%를 초과하여 첨가될 경우 고루 퍼져 분포하지 못하고 서로 뒹켜 뭉쳐있는 것을 확인함. 때문에 6%를 초과한 시험편의 열전도성과 전기저항성이 낮은 것으로 보임.
- CT-Scan 시험을 통해 SWF 함량이 6%를 초과할 경우 그 분포가 큰 변동을 보이는 것을 확인함. SP의 경우 함량과 무관하게 고른 분포를 보이는 것으로 보아 해당 재료의 형태에 따른 차이로 보임.
- 수분저항성 시험 결과 5회 이상 균열 치유 시 동결융해 횟수 5회인 시험편의 치유수준이 28%로 나타남. 4회 이상 균열 치유 시 동결융해 횟수 0, 1, 3회의 각각의 치유수준이 57, 54, 50% 인 것을 확인함. 아스팔트 혼합물의 동결융해 영향으로 혼합물은 노화가 발생하며 유동성을 잃고 점도가 높아짐으로 인하여 균열에 대한 자가 치유 효과가 적게 나타나는 것으로 보임.
- 아스팔트 바인더 등급에 따른 자가치유 효과는 PG58-22 등급의 아스팔트 바인더가 가장 좋은 것으로 나타남. 때문에 수분저항성 시험 결과와 마찬가지로 낮은 점도의 아스팔트 바인더의 자가치유 효과가 우수한 것으로 보임. 점도가 높을수록 파괴시 변형이 작게 발생하며 이를 통해 PG76-22는 4회 치유 후 파괴시 발생하는 변형이 56.64% 정도 감소하는 것으로 4회 이상 균열 치유시 점도가 크게 증가하여 깨지기 쉬운 상태가 되는 것을 확인함.

표.18 아스팔트 바인더 등급에 따른 자가치유 효과

자가치유 효과 순위	아스팔트 바인더 등급	파괴점에서의 변형율(%)		파괴치유율(%)
		균열 치유 횟수		
		0회	4회	
1	PG58-22	3.21	2.82	87.85
2	PG64-22	1.59	1.23	77.36
3	PG76-22	1.43	0.8	56.64

- 아스팔트 바인더 노화에 따른 자가치유 효과는 가열 온도에 따른 결과 차이가 약 10~20% 정도 나타났고, 노화가 되지 않은 시험편이 강도가 천천히 증가하고 천천히 감소하는 연성거동을 보임에 반해, 노화가 된 시험편은 갑작스럽게 파괴되는 취성거동을 보임. 추가적으로 폐조리유를 첨가한 아스팔트 혼합물 시험편의 경우 균열 치유 4회 이후부터 Control 시험편과 동등한 자가치유 효과를 나타냄.

표.19 아스팔트 바인더 상태에 따른 자가치유 효과

자가치유 효과 순위	시험조건	파괴점에서의 변형율(%)		파괴치유율(%)
		균열 치유 횟수		
		0회	4회	
1	폐식용유 첨가	2.41	2.31	95.85
2	5시간 노화	1.72	1.26	73.26
3	15시간 노화	1.32	0.53	40.15
4	20시간 노화	1.15	0.45	39.13

- 재생골재의 함량이 높을수록 노화 및 산화에 의한 높은 점도로 치유 효과가 저하되지만, 재생첨가제를 사용할 경우 역학적 성질을 회복하고 낮은 점도를 유지함으로써 치유 효과가 좋은 것으로 나타남. 하지만 대부분의 경우 2회의 자가치유 시 급격한 성능 저하를 보이며 폐유 및 재생첨가제 한가지의 경우에만 준수한 치유 성능을 보임.

제 4 절 자가치유 아스팔트콘크리트 포장 시험시공

1. 시험시공 개요

- 실험실 내에서의 시험 결과를 토대로 SWF 4%에 대한 현장시험시공을 실시함. 스틸 파이버의 현장에 대한 적용성을 평가하고, 실질적으로 현장에서 배합 및 시공 시에 발생할 수 있는 문제점들에 대해 평가하는 것을 목적으로 함.

2. 시험시공 위치

- 시험시공은 국토관리소의 허가를 받아 남원국토관리사무소에서 관리하는 도로포장 구간 중 전라북도 장수군 천천면 춘송리 진장로(방곡재 정상~조신마을) 50m 구간에 대해 실시함.



그림.95 시험시공 구간

3. 시험시공 배합

- 실험실 내에서 실시한 시험 결과를 토대로 결정된 배합에 따라 아스팔트 콘크리트 26t에 대한 SWF의 함량을 계산함.

$$w_{SWF} = w_{ac} \times \frac{c_{ap}}{100} \times \frac{c_{SWF}}{100} \times \frac{G_{SWF}}{G_{ap}} \quad (9)$$

여기서,

- w_{SWF} : Steel Wool Fiber 중량(kg)
- w_{ac} : 아스팔트 콘크리트 중량(kg)
- c_{ap} : 아스팔트 함량(%)
- c_{SWF} : Steel Wool Fiber 함량(%)
- G_{SWF} : Steel Wool Fiber 비중
- G_{ap} : 아스팔트 비중

- 시험시공을 위한 재료 중 골재는 일반적으로 사용되는 최대골재치수 20mm 밀입도 표층용 아스팔트 혼합물 배합설계 입도를 사용하였고 Steel Wool Fiber는 기존의 실내 시험에서 사용한 것과 동일한 제품을 사용함.

4. 시험시공 실시

- 시험 시공은 기존의 표층 포장을 시행하는 구간 중 임의의 50m 구간에 대해 실시하였으며, 플랜트에서 배합이 완료된 아스팔트 콘크리트 혼합물을 트럭으로 36km 떨어진 현장으로 운반하여 시험 시공을 실시함. 다짐시 온도는 150℃로 유지됨.



그림.96 아스팔트 콘크리트 운반



그림.97 아스팔트 콘크리트 타설



그림.98 아스팔트 콘크리트 다짐



그림.99 시험시공 구간 표시

제 5 절 연구개발성과

1. 연구개발성과 목표 및 달성 현황

성과지표	성과 목표*	최소성과 목표*	성과 목표 달성 현황**	비고
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	2 건	1 건	3 건	
일반학술지게재(1점)	2 건	2 건		
특허출원(1점)	1 건	1 건	1 건	
특허등록(2점)			1 건	
디자인 등록(1점)				
소프트웨어(1점)	1 건			
하드웨어(1점)				
기타(1점)				
소계(점수)	8 점	5 점	9 점	

○ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	Application of conductive materials on asphalt pavement	Advances in Material Science and Engineering	Hai Viet Vo, 박대욱	2017	영국	Hindawi	SCI	2017.07.05
2	Effect of rejuvenators on the crack healing performance of recycled asphalt pavement by induction heating	Construction and Building Materials	Ba Huu Dinh, 박대욱		영국	Elsevier	SCI	2018.03.10
3	Healing performance of granite and steel slag asphalt mixtures modified with steel wool fibers	KSCE Journal of Civil Engineering	Ba Huu Dinh, 박대욱	6	대한민국	대한토목학회	SCI	2018.06.01

○ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2017년 한국도로학회 가을학술대회	박대욱	2017.10.26	여수 엠블호텔	대한민국
2	2018 International Conference on Road Engineers	Ba Huu Dinh	2018.05.31	제주도 부영호텔	대한민국

○ 지식재산권

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율	활용여부
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*		
1	자가치유형 아스팔트 콘크리트 조성물 및 이를 이용한 아스팔트 콘크리트 구조물의 균열 자가치유 촉진방법	대한민국	군산대학교 산학협력단	2017.07.12	10-2017-0088274	1615008930	군산대학교 산학협력단	2017.12.28	10-1815122	1615008930	100	미활용

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ 기술개발 성숙도

- 현재의 국내의 연구개발 단계는 도입단계로서 기술적 개념정립 상태이나 본 연구를 통하여 연구가 성공적으로 수행되면 실험실 성능평가를 통해 치유 가능성을 평가하는 단계이다.

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	■	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	■	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

2. 관련 분야 기여도

○ 기술적

- 자가치유 아스팔트 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통해 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고 수준의 기술 경쟁력 확보로 아스팔트 콘크리트 분야 자가치유 기술 선도를 위한 발판 마련
 - 기술 성숙도 및 수준 : 추격 위치 → 선도적 위치
- 아스팔트 콘크리트 포장체의 안정성 확보 및 사용수명 200% 증대
- 아스팔트 포장의 전도성 향상을 통한 자가치유 기술 습득 및 조기파손 방지로 인한 3-4년 피로균열 프리 도로포장 효과
 - 전도성 물질의 아스팔트 포장 적용을 통한 공용수명 향상효과
 - 소성변형 저항성 효과
 - 피로균열 및 수분 민감 저항성 향상으로 인한 포트홀 감소효과
- 특수개소포장의 피로균열 2배 감소효과
 - 피로균열 다발성 지역의 피로균열 감소효과
- 전도성 극대화 기술을 활용하여 융설 포장 개발 기대효과
 - 공항용 시멘트 콘크리트 포장의 융설 포장 적용
 - 교량 및 터널구간에서의 아스팔트 포장 융설 포장 적용

○ 경제적·사회적

- 아스팔트 콘크리트 포장체의 자가치유 기술로 사회기반 시설물 유지관리 비용절감 효과 기대
 - 전체 유지관리 비용 30% 감소를 통한 국가예산 절감효과
- 자가치유 아스팔트 콘크리트 포장체 적용기술을 통한 환경 및 에너지 절감효과 기대
 - 유지관리 물량감소를 통한 전생애주기 이산화탄소 배출량 30% 감소 기대
- 본 과제를 통해 건설 산업의 신 성장 동력원으로 활용되어 건설 산업의 국제적 위상 강화, 관련 기술의 자립화 및 기술 수출을 통해 국가이미지 제고에 기여

- 아스팔트 콘크리트 산업 및 유지관리 기술의 산업구조 개편
- 자가치유 관련 전문 인력 양성
- 전도물질의 대규모 도로건설에 사용으로 관련 산업 활성화
- 스틸섬유 및 탄소섬유 등 관련사업 활성화 기대효과
- 가공 및 사전처리 업체 활성화 기대효과
- 자율주행 자동차 주행에 적합한 도로포장 제공 및 기술복합 시너지 효과
- 자율주행에 적합한 피로균열 프리 도로포장 제공 및 운전자 편의성 제공
- 자율주행기술 및 자가치유 아스팔트 포장 기술을 결합한 자율주행 유도가열 자동차를 개발한
피로균열 유지보수방법 개발

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 본 연구성과를 반영한 향후 연구방향

- 실내시험을 통해 입증된 우수한 성능을 보인 배합에 대한 현장 시험 시공 및 평가.
- 실내 자가치유 장치를 분석하여 자가치유 포장 실용화를 위한 현장 유도가열 장치 개발.
- 개발 기술의 경제성, 장기적 영향성 분석 및 기존 도로시설물과의 영향성 분석 연구.
- 자가치유 실험실 조건을 활용하여 자가치유 아스팔트 포장 실용화 연구
- 포장체 유지관리를 위한 자동화 장비 제작을 위한 원천기술로 활용.
- 아스팔트 콘크리트의 자가 치유 복합소재 활용 기술에 Know-how 활용.



그림.100 본 과제 결과를 바탕으로 후속연구를 통한 유도가열 장치 개발

2. 연구개발성과의 활용방안

- 아스팔트의 공용수명 증가 및 유지관리 체계의 패러다임을 변화시킬 수 있는 미래 원천기술의 확보를 통해 아스팔트 콘크리트 산업뿐만 아니라 포장체의 품질평가 및 개량기술 분야의 활용성이 매우 클 것으로 기대됨.
- 자가 치유가 가능한 아스팔트 콘크리트 제조를 위한 원천기술로 활용.
- 자가 치유 아스팔트 콘크리트의 성능평가 방법 및 기준 설정의 기초자료로 활용.
- 자가 치유 아스팔트 콘크리트의 표준시험방법 개발 및 평가지표 개발에 활용.

3. 관련 사업 활용방안

- 국토교통부, 지방자치단체 등 도로시설물 관리기관의 기술전파를 통해 설계 반영 및 이를 통한 사업 활성화
- 건설사 및 중소기업(포장관련 시공사, 자가치유 소재기업 및 활용기업 등)에 기술지도 및 이전을 통한 개발기술 활용성 극대화.
- 자가치유 아스팔트 콘크리트 기술을 활용하여 용도확대 방안 창출 및 이를 통한 사업 활성화
- 미래 자율주행자동차에 적합한 한 단계 업그레이드된 도로제공
- 자가치유 아스팔트 포장을 이용한 자율주행자동차 유지보수 프리 도로제공
- 자가치유 아스팔트 포장의 최소한의 유지보수 개입으로 인한 자율주행자동차 효율적인 운행

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 박테리아를 이용한 콘크리트 자가 치유

- 주변에서 흔히 볼 수 있는 건물, 도로, 교량 등의 건축물들은 콘크리트로 이루어져 있으며, 오랜 기간 눈이나 비 등의 외부적 요인에 의해 균열이 발생함.
- 건축물에 발생된 균열은 기간의 경과에 따라 길이와 폭이 확대되어 건축물의 내구성을 저하시키게 되며, 유지 보수에 많은 경제적 비용이 발생함.
- 네덜란드 델프트기술대학 연구진은 자가 치유 콘크리트를 연구 개발하였고 강알칼리에서 생존할 수 있는 박테리아를 배양하고 박테리아와 콘크리트 등을 넣은 캡슐을 콘크리트 타설시 혼입하여 경화 중에 발생하는 균열을 박테리아 활동으로 자가 치유함.
- 현재 국내에서도 박테리아를 활용한 자가 치유 친환경 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음.
- <그림.101>을 살펴보면 콘크리트 외관에 하얗게 표시된 부분이 있는데 균열된 부분을 따라 박테리아가 스스로 자가 치유하며 콘크리트 균열을 회복하는 사진임.



그림.101 박테리아를 활용한 콘크리트 자가 치유

2. 자가 치유 포장도로

- 자가 치유 아스팔트 콘크리트 포장도로는 스스로 회복하기 때문에 도로 유지 보수 기간이 연장되어 교통 체증 및 유지보수 비용이 절감됨.
- 네덜란드 주요 도로에 자가 치유 아스팔트 콘크리트 포장도로를 설치하면 연간 6,500만 유로를 절감하며 전체를 포장 할 경우 1억 유로 이상을 절감함(NL Agency 2011).
- 자가 치유 아스팔트 콘크리트 포장도로 초기 설치비용이 2배 이상으로 상승하여도 아스팔트 콘크리트 포장도로의 수명이 50%이상 상승하기 때문에 연간 약 9,000만 유로를 절약함.
- 아스팔트 콘크리트 포장 설계에서 자가 치유 기술로 인해 발생하는 재정적 이익은 분명함 그러나 아스팔트 콘크리트 포장 도로 설계의 자가 치유 기술은 포장도로의 전체 수명주기 증가로 인하여 경제적 비용절감 뿐만 아니라 비용절감과 함께 환경적 영향을 미침.
- 아스팔트 콘크리트 포장도로의 수명이 10% 증가 하면 각각 에너지 소비를 3%, CO_2 배출 3%를 감소시킴.
- <그림.102>는 네덜란드 A58에 설치된 자가 치유 포장도로이며 네덜란드의 자가 치유 기술은

연구 과정을 넘어 본격적으로 구현하기 시작함.



그림.102 아스팔트 콘크리트 자가 치유 도로

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		√
결정 사유	본 연구는 과제가 완료된 후 실용화를 위하여 원천기술로서 활용될 수 있어야 한다고 판단됨	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

- 해당사항 없음.

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 연구실 안전 확보 계획

- 연구주체의 장은 안전에 관한 업무를 총괄 관리하며, 연구실의 안전유지 및 관리를 철저히 함으로써 연구실의 안전 환경을 확보 한다.
- 연구주체의 장은 다음과 같은 업무를 관리할 책임이 있다.
 - 안전관리규정 작성, 게시 및 준수 / 연구실 안전관리위원회의 구성, 운영
 - 안전점검 / 정밀안전진단의 실시(실시결과의 보고 및 게시 포함)
 - 연구실 안전관리 비용 부담 / 안전관리비 계상 / 사용내역서 작성
 - 사고보고 / 사고조사 협조
 - 연구실의 사용제한 조치 및 보고
 - 연구활동종사자에 대한 교육·훈련 및 건강검진
 - 연구·실험실 년 1회이상 안전관리 점검
- 연구실 안전관리책임자는 다음과 같이 연구시설의 안전에 관한 업무를 관리할 책임이 있다.
 - 연구실의 일상점검 등 전반적인 안전 업무 관리 및 안전관리담당 안전 환경 및 안전관리 현황에 관한 통계의 유지·관리
 - 공동연구실의 경우 사용자간의 협의를 거쳐 연구실 책임자 1인을 지정하고, 연구실책임자 이외의 자들도 당해 연구실을 공동 사용함에 있어 연구실 안전 환경 확보에 대한 공동 책임을 져야 한다.
 - 유해물질 취급 및 보관할 경우 해당물질 MSDS자료 비치 및 관련 안전교육 실시
 - 해당연구실 연구활동종사자 대상 안전교육 실시
 - 사고 발생 시 사고보고 체계는 즉시 보고 될 수 있는 체계 구축
 - 개인보호구 비치 및 관리
 - 연구실별 사고 예방 및 대응 매뉴얼 작성
 - 유해물질, 연구 설비 및 장비의 유지·관리
 - 연구실험은 2인 이상 수행토록 지도
 - 사고 발생 시 피해 최소화 대책 시행
 - 사고대응 활동 및 사고조사에 적극 협조
 - 필요 시 병원 및 소방서 신고
 - 사고 발생 시 해당 부상자 가족에게 연락
 - 사고 재발 방지대책 시행
- 안전관리담당자는 연구실의 안전을 위하여 다음과 같은 업무를 이행한다.
 - 연구실내 미생물, 위험물, 유해물 취급 및 관리대장 작성
 - 개인 보호 장구 목록 및 관리대장 작성
 - 물질안전보건자료(이하 “MSDS”라 한다)의 작성·비치 및 보관(단, 화학물질 제조업자 또는 수입업자로부터 MSDS를 입수한 경우 MSDS를 작성한 것으로 본다)
 - 연구실 안전관리에 따른 시설 개·보수 요구
 - 연구실 일상점검표 작성 및 보관

-
- 연구실 안전관리규정 비치 등 기타 연구실내 안전관리에 관한 사항
5. 연구실 안전환경관리자는 연구실의 안전을 위하여 다음과 같은 업무를 이행한다.
- 법정 정기점검 및 정밀안전진단 실시
 - 안전보건표지 및 안전수칙 제작
 - 기관 전체 연구활동종사자 대상 안전교육 수립 및 시행
 - 유해물질 연구 설비 및 장비의 안전관리 여부 확인 감독
 - 사고 시 현장 출입 통제
 - 사고대응에 대한 기술 조언
 - 미래창조과학부장관에게 사고보고
 - 부상자 발생 시 보험 청구
6. 연구실안전관리위원장은 연구실의 안전을 위하여 다음과 같은 업무를 이행한다.
- 연구실사고 발생을 대비한 보고체계 및 대응체계 등 수립
 - 연구활동종사자 대상 정기적 건강검진 조치
 - 연구실 안전 설비 등 유지 보수
 - 방송을 통한 기관 내 재실 자에게 사고 전파
 - 사고 원인 조사 및 현장 보존
 - 전기, 가스 등 설비 차단 및 복구
 - 화학물질 누출 시 제거 및 중화 작업
 - 사고 현장 수습 및 복구(연구실 책임자와 협의)

○ 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책

연구실 안전 확보 계획에 따라 과제를 수행하며 특히, 연구실의 특성상 고온 등에 노출되는 경우가 많기 때문에 이에 대한 안전교육을 실시하고 모든 실험에 있어서 연구책임자 감독 하에 수행할 수 있도록 하였다. 상시적으로 연구책임자 및 연구보조원에 대하여 1년 2회씩 화학약품 취급 및 고온 등에 대한 화상 안전교육을 실시하였으며 연구실의 장비배치에 의한 원활한 동선확보 문제나 실험장비의 누수 등에 의한 화재 및 연구원을 화상으로부터 보호하기 위하여 매년 2회의 안전점검을 실시하였고 1회 정밀안전진단실시를 수행하였다. 실험에 대한 위험성으로부터 연구원의 안전을 확보하기 위하여 과제기간동안에 발생할 수 있는 위험 등에 대하여 교육을 실시하였고 실험에서 발생할 수 있는 부산물에 대한 인체의 영향 등을 파악하여 안전교육을 실시하였다. 과제기간동안 위험요소에 노출되었을 경우 건강검진을 실시하였으며, 이를 위해 상해보험 등을 참여하는 모든 연구원에 대하여 가입하였다. 추가적으로 실험실 전기시설 안전을 위한 전원선 정리 및 분전반, 오염물질 배출 및 환기를 위한 환풍기 2기 등을 설치하였다.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Application of conductive materials on asphalt pavement	군산대학교 산학협력단	주저자	Advances in Material Science and Engineering	1.372	2017.07.05		SCI
2	논문	Effect of rejuvenators on the crack healing performance of recycled asphalt pavement by induction heating	군산대학교 산학협력단	주저자	Construction and Building Materials	3.485	2018.03.10		SCI
3	논문	Healing performance of granite and steel slag asphalt mixtures modified with steel wool fibers	군산대학교 산학협력단	주저자	KSCE Journal of Civil Engineering	0.940	2018.06.01		SCI
4	특허	자가치유형 아스팔트 콘크리트 조성물 및 이를 이용한 아스팔트 콘크리트 구조물의 균열 자가치유 촉진 방법	군산대학교 산학협력단		대한민국		2017.12.28		

제11장. 기타 사항

- 해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

1. 국토교통부, "아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침, 2017"
2. 국토교통부, "아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침 부속서 및 부록, 2017"
3. 국토교통부, "건설폐자재 재활용 도로 포장 지침, 2005"
4. García A, Schlangen E, Ven M, Liu Q. Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. Constr. Build. Mater 23 (2009) 3175-3181.
5. García, A. Self-healing of open cracks in asphalt mastic. FUEL 93 (2011) 264-72.
6. Vo, H.V., Park, D.W., Seo, W.J., Yoo, B.S. Evaluation of Asphalt Mixture Modified with Graphite and Carbon Fibers for Winter Adaptation: Thermal Conductivity Improvement. Journal of Materials in Civil Engineering 29 (2017) 4016176-4016183.
7. García A., Schlangen E., Ven M. Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers. Materials and Structures 44 (2011) 499-508.
8. Apostolidis, P., Liu, X., Scarpas, T., Bochove, G. van., van de Ven, M.F.C. Advanced Experimental Evaluation of Asphalt Mortar for Induction Healing Purposes. Constr. Build. Mater 126 (2016) 9-25.
9. Recycling Hot Mix Asphalt Pavements. National Asphalt Pavement Association (NAPA). Information Series 123 Printed 4/96.
10. Tran, N.H., and Taylor, A. Effect of rejuvenator on performance properties of HMA

mixtures with high RAP and RAS contents, National Center for Asphalt Technology, Alabama 12-05 (2012).

11. Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R. Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed asphalt pavement mixtures, Proceedings of the XXVIII International Baltic Road Conference 2370 (2013).
12. Nahar, S. Turning back time: rheological and microstructural assessment of rejuvenated bitumen. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2444 (2014) 52-62.
13. Meizhu C., Feipeng X., Bradley P., Bingbing L., Shaopeng W. High-temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. Construction and Building Materials 59 (2014) 10 - 16.
14. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, Federal Highway Administration, Report Number FHWA-SA-95-003 (1995).
15. ISO standard, Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source method, ISO Standard 22007-2, Switzerland 2008.
16. Norambuena-Contreras J., Garcia A. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. Materials and Design 106 (2016) 404 - 414.
17. AASHTO T 283. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials (2014).

주 의

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

