

발 간 등 록 번 호

11-B552989-000584-01

ISBN 979-11-90542-21-0

블랙 아이스 발생을 영하 5도 지연시키기 위한 환경감응 상변화 아스팔트 포장 개발

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부			사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업				
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명		국토교통기술혁신연구				
공고번호	공고-제05호			총괄연구개발 식별번호			-				
				연구개발과제번호			21CTAP-C157548-02				
국가과학기술 표준분류	EI0303		50%	EI0406		30%	EI0503		20%		
연구개발과제명	국문	블랙 아이스 발생을 영하 5도 지연시키기 위한 환경감응 상변화 아스팔트 포장 개발									
	영문	Development of Asphalt Pavement which Black ice is delayed -5 deg. Using Temp. Responded Phase Change Material									
주관연구기관	기관명	군산대학교 산학협력단			사업자등록번호		401-82-06407				
	주소	(54150) 전라북도 군산시 대학로 558(미릉동, 군산대학교내)			법인등록번호		211171-0001870				
주관연구책임자	성명		박 대 욱		직위		교수				
	연락처	직장전화	063-469-4876		휴대전화		010-9586-0302				
		전자우편	dpark@kunsan.ac.kr		국가연구자번호		1012 9415				
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 8.5개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(8.5개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계		연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물				
총계	370,000	12,525	111,475	-	-	-	-	382,525	111,475	494,000	-
1년차	160,000	5,500	48,500	-	-	-	-	165,500	48,500	214,000	-
2년차	210,000	7,025	62,975	-	-	-	-	217,025	62,975	280,000	-
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고			
	역할	기관유형									
공동연구기관	(주)가우	노광현	책임연구원	010-2658-0628		gawoodem@haman.net		공동	중소기업		
연구개발담당자 실무담당자	성명		서정우		직위		연구원				
	연락처	직장전화	-		휴대전화		010-9401-7666				
		전자우편	sjwcpt@kunsan.ac.kr		국가연구자번호		1139 4957				

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022년 02월 04일

주관연구책임자 : 박 대 욱 (직인)

주관연구기관의 장 : 군산대학교 산학협력단 김 형 주 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업			총괄연구개발 식별번호		-			
내역사업명		국토교통기술혁신연구			연구개발과제번호		21CTAP-C157548-02			
국가과학기술 표준분류		EI0303	50%	EI0406	30%	EI0503	20%			
연구개발과제명		블랙 아이스 발생을 영하 5도 지연시키기 위한 환경감응 상변화 아스팔트 포장 개발								
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 8.5개월)								
총 연구개발비		총 494,000천원 (정부지원연구개발비 : 370,000천원, 기관부담연구개발비 : 124,000천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)								
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[☒] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도		착수시점 기준(2단계) 종료시점 목표(6단계)			
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [☒]								
연구개발과제 특성		기반연구								
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		환경에 반응하는 상변화물질을 아스팔트 혼합물에 적용 가능하도록 개발 상변화물질을 이용한 온도균열 저항성이 우수하고 살얼음 생성을 지연하는 아스팔트 포장 개발 (온도균열 저항성 20% 향상, 블랙 아이스 생성 온도 -5도 저하)							
	전체 내용		- 대상지역 기후자료 분석을 통한 최적의 상변화물질 양 및 종류 결정 - 아스팔트 포장용 환경감응 상변화물질 개발 및 캡슐화 - 상변화 아스팔트 포장 성능평가 및 블랙 아이스 생성 지연효과 검증							
	1년차	목표	- 상변화물질 블랙 아이스 지연에 대한 문헌조사 및 메커니즘 조사 - FEM 분석을 통한 상변화물질 종류 및 최적 함량 결정 - 아스팔트와의 혼합 성능평가 - 상변화물질 캡슐화 및 상변화 성능평가							
		내용	- 국내외 문헌 조사 : 선행 연구 분석 : 블랙 아이스 지연 및 제거 기술 - 상변화물질 메커니즘 조사 : 상변화물질 메커니즘 분석조사 : 상변화 물질 성능검증 방법 조사 : 상변화 물질 신뢰성 확보를 위한 성능기준 조사 : 아스팔트 포장 적용 메커니즘 조사 : 국내외 적용사례조사 - 블랙 아이스 생성지역 기상관측소 분석 : 블랙 아이스 생성지역 10년간 데이터 분석 : 최저 온도로 하락하여 아이스 생성 가능성이 매우 큰 1년간 데이터 정리 : 아스팔트 혼합물과 상변화물질 열 특성 계수도출 - FEM 및 열 흐름(Heat transfer model) 방정식을 이용한 모사 ($\frac{\partial T}{\partial t}=Q_s$) : 모사결과로부터 블랙 아이스 생성지연시간 산정 및 최적의 상변화물질 함량 결정 - 아스팔트 성능평가 : 혼합성을 평가하기 위하여 점성측정 : DSR를 이용한 complex modulus 평가 : 저온균열평가를 위하여 Bending Beam Rheometer 시험 - 상변화물질 조합 및 캡슐제작 : 두 종류 파라핀(영하반응 및 영상반응)을 녹이고 서로 혼합 : 캡슐화 및 건조 - 상변화 성능시험 : 블랙 아이스 지연성능과 융설 성능에 중요한 상변화 온도(Phase change temperature)를 시차주사열량측정법(DSC)이용하여 측정 : TPS(Transient Plane Source)를 이용한 상변화물질의 전도를 측정 : Thermal Gravimetric analysis를 이용한 온도 안정성 (Thermal stability)측정 : SEM을 이용한 크기 및 shell/core 비율, 표면적 측정							
			2년차	목표	아스팔트 혼합물 성능시험					

			• 실내 실험실 모사 • Pilot 시험시공																												
		내용	• 아스팔트 혼합물 다짐성능 평가 • IDEAL-CT 균열 시험을 이용한 균열성능 평가 • 동탄성계수 시험을 이용한 물성 정량화 및 향후 포장설계에 활용 • 수분민감성 시험을 수행하여 응설에 따른 성능 저하여부 판단 • 상변화물질 최적함량을 이용하여 공시체 및 Control 공시체 제작 : 정사각형의 공시체 제작(30cmx30cm) : Thermocouple 매설 • 영하의 온도 챔버설치 : 영하온도조건에서 온도변화 모니터링 : 인공 얼음 및 응설 능력 평가 • 블랙 아이스 생성지연 및 응설 능력 평가 • 블랙 아이스 지역에 대한 대상지역 선정 • 대기온도, 풍속 등 기후관측 데이터 측정 시험시공 및 포장온도 모니터링 • 블랙 아이스 생성지연 및 강설시 응설 능력평가																												
연구개발성과			○온도균열 저항성 20% 향상 및 블랙 아이스 생성지연 -5도 아스팔트 포장 - 환경에 적합한 상변화물질 제조 - 블랙 아이스 지연 아스팔트 포장개발 <예상되는 연구개발성과 유형> <table> <tr> <th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서 원문</th><th rowspan="2">연구시설 · 장비</th><th rowspan="2">기술요약 정보</th><th rowspan="2">소프트웨어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr> <tr> <th>생명정보</th><th>생물자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr> <tr> <td>예상성과 (N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td></td><td></td><td>Y</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종		생명정보	생물자원	정보	실물	예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y			Y					
구분	논문	특허	보고서 원문									연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종													
				생명정보	생물자원	정보	실물																								
예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y			Y																									
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			○ 본 연구에서 개발되는 블랙 아이스 저감 및 온도균열 저항성 향상 아스팔트 포장은 향후 겨울철 비번하게 발생하는 미끄럼 사고를 예방할 수 있는 기술로 미래 원천기술의 확보를 통해 아스팔트 콘크리트 산업뿐만 아니라 자동차 사고 방재 분야의 활용성이 매우 클 것으로 기대됨 - 환경에 반응하는 상변화물질을 활용한 아스팔트 포장 적용에 대한 원천기술로 활용 - 상변화물질 산업을 발전시키고 소재산업 다변화 기술로 활용 - 블랙 아이스 저감 포장 성능평가 방법 및 기준 설정의 기초자료로 활용 - 사고 위험이 있는 지역의 기존 포장체 덧씌우기 및 신규 포장체에 활용 ○ 본 원천기술의 확보를 토대로 블랙 아이스 저감 아스팔트 포장이 실용화 기술이 체계적으로 이루어진다면 아래와 같은 분야로의 활용이 기대됨 - 한국도로공사, 국토교통부, 지방자치단체 등 도로시설물 관리기관의 기술전파를 통해 블랙 아이스에 의한 방재기술로 활용 ○ 환경반응 상변화 재료 기술을 활용하여 용도확대 방안 창출 및 이를 통한 사업 활성화 - 상변화물질 포장재료 적용 활성화를 통한 사업화 - 상변화물질 등 포장재료 관련 소재산업 활성화 ○ 환경반응 상변화 재료 다변화 적용 - 여름철 열을 방출하는 재료를 활용한 열섬효과 완화에 활용 - 여름철 고온에 의한 소성변형 저감 기술로 활용 ○ 환경반응 상변화 재료 원천기술 확보를 통해 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고수준의 기술 경쟁력 확보로 블랙 아이스 저감 아스팔트 포장 분야 자기치유 기술 선도를 위한 발판 마련 - 기술 성숙도 및 수준 : 추격 위치 → 선도적 위치 ○ 블랙 아이스 생성 포장온도를 0도에서 -5도로 낮춰 블랙 아이스에 의한 교통사고를 현저히 저감 - 운전자 안전성 제고 - 재해 예방 측면에서 효과가 매우 큼 ○ 아스팔트 포장의 응설 효과가 증대되어 미끄럼 저항성으로 인한 교통사고 예방 ○ 온도균열 저항성 20% 향상으로 인한 겨울철 균열저감 - 전체 유지관리 비용 감소를 통한 국가 예산 절감효과 ○ 소수성 첨가제(Super Hydrophobic additives) 포장에 비교하여 영구적이며 화학적 반응이 없어 친환경적으로 사용할 수 있음 ○ 화학적인 제설제인 염화칼슘에 비교하여 친환경적이고 효율적임																												

	○ 전기 및 온수에 의한 가열 도로포장에 비교하여 경제적이고 아스팔트 포장에 대한 영향이 적음											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	3	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
국문핵심어 (5개 이내)	블랙 아이스		환경감응		상변화물질		아스팔트포장		온도균열			
영문핵심어 (5개 이내)	Black Ice		Environmental Response		Phase Change Material		Asphalt Pavement		Thermal Cracking			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	3
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	61
4. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	77
5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	77

1. 연구개발과제의 개요

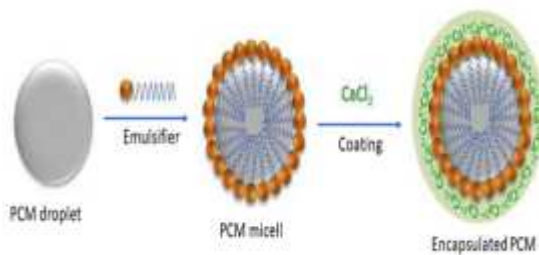
1) 연구개발과제의 최종 목표

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	■ 환경에 반응하는 상변화물질을 아스팔트 혼합물에 적용 가능하도록 개발 ■ 상변화물질을 이용한 온도균열 저항성이 우수하고 살얼음 생성을 지연하는 아스팔트 포장 개발 ■ (온도균열 저항성 20% 향상, 블랙 아이스 생성 온도 -5도 이하)
세부 목표	■ FEM분석을 통한 최적의 상변화물질 및 최적함량 결정 ■ 상변화물질 제조 및 캡슐개발 ■ 실험실규모에서의 블랙 아이스 생성지연 평가 ■ Pilot 연구를 통한 개발 검증

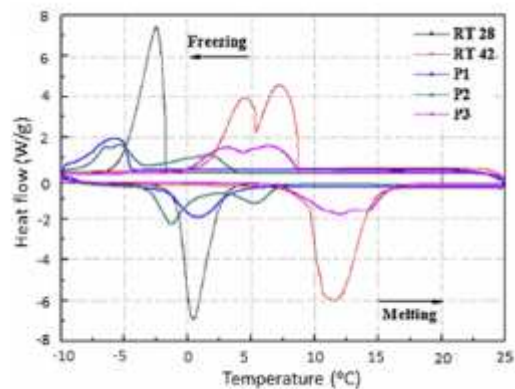
2) 연구개발과제의 년차별 목표

○ 1차 연도

- 주관연구기관(군산대학교 산학협력단):
 - FEM 및 열흐름 방정식을 통한 모사를 수행하여 상변화물질의 종류와 최적함량 결정
 - 아스팔트와 혼합하여 유동학적 특성과 열역학적 특성 평가
- 공동연구기관((주)가우):
 - 블랙 아이스 지연을 위한 환경감응 상변화물질(내구성 5-10년) 개발
 - 상변화물질의 미세구조 분석 및 상변화 온도 평가



[상변화물질 캡슐화]



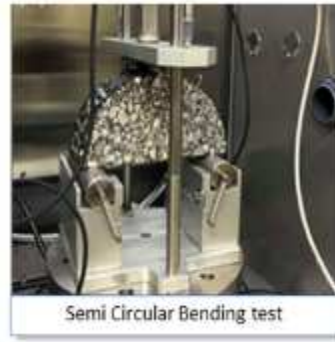
[시차주사열량측정법 시험결과]

○ 2차 연도

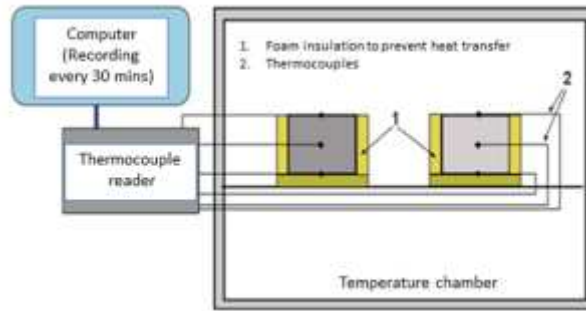
- 주관연구기관(군산대학교 산학협력단):
 - 아스팔트 혼합물 성능비교
 - 실험실 규모에서의 블랙 아이스 생성지연 평가
 - Pilot 연구를 통한 블랙 아이스 생성지연 2-3개월 모니터링
- 공동연구기관((주)가우):
 - 환경감응 상변화물질 수정보완
 - Pilot 연구 공동수행



[동탄성계수 시험]



[피로균열 시험]



[실내시험 개념도]

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	유한요소분석	10년간 온도분석	10년간 온도분석 무	분석 3건	블랙아이스 모사 를 위해 3건이상 의 온도분석 필 요	5
		FEM 및 열흐름 방정식을 이용한 블랙아이스 생성모사	국외 FEM및열흐 름을 이용한 블 랙아이스 모사사 례 미미	모델 정확도 80%이상	모델구축을 통한 오류없이 블랙아 이스 생성 필요	5
		블랙 아이스자연용 상변화물질 및 함량선정	국내외 모사를 통한 상변화물질 종류 및 함량선 정 없음	모델 정확도 80%이상	실제 시험을 통 하면 매우 시간 과 연구비가 많 이 들어 모사를 통해 필요함	10
	아스팔트와의 혼합 성능평가	점성평가	국내 아스팔트 점성평가 존재하 지 않으나 국외 점성평가 자료 있음	동일	상변화물질에 의 한 아스팔트 점 성변화 관찰 필 요	2
		피로균열 및 온도균열 저항성 평가	국내에는 사례없고 국외는 미비	20% 향상	주로 블랙아이스 는 저온에서 생 성되므로 이에 대한 균열 저항 성 평가	3
		온도성능평가	국내에는 사례없고 국외는 교면포장 에 적용	아스팔트 탄성계수 1건	아스팔트가 온도 에 민감하기 때 문에 상변화물질 에 의한 탄성계 수 분석 필요	5
	상변화물질 제조 캡슐화	캡슐화	국내외에는 마이 크로 캡슐화 한 가지 종류 존재	2건	마이크로캡슐화 와 실리카계 흡 착 두종류 필요 성	5

2년차 (2021)		상변화물질 성능 검증	국내외 아스팔트와 같이 고온적용 사례 전무	상변화온도 1~7도	블랙아이스 적용을 위해 1~7도 필요하고 150도에서 종량감량비 10%미만 필요	5
				온도안정성 <10%@150도		
	아스팔트 혼합물 성능 평가	다짐성 평가	국내외 없음	10%	상변화 물질로 인한 다짐성 향상 필요	3
		동탄성계수 측정	국내외 없음	동탄성계수 측정 결과 1건	상변화 물질로 인한 동탄성계수 필요	3
		피로균열 평가	국내에는 전무하고 국외는 미비	20%	블랙아이스 생성 조건상 아스팔트 혼합물 피로균열 저항성 향상 필요	2
		수분민감성 평가	국내에는 전무하고 국외는 미비	80%	블랙아이스 생성 조건상 아스팔트 혼합물 수분민감 저항성 평가	2
	실내실험실 입증	공시체 제작 및 장치 설치	국내에는 전무하고 국외는 온도변화 모니터링을 위한 공시체 제작사례 있음	2건	온도모니터링을 위한 실험실에서 공시체 제작 필요	10
		온도변화 모니터링	국내외 없음	-5도	온도저감이 최대 -5도 필요	10
	Pilot 시험 입증	Pilot 공시체 또는 현장적용 및 온도계매설	국내외 없음	1건	실외에서 공시체 제작 필요	10
		장기간 모니터링	국내외 없음	3개월	상변화 물질 활동영향을 모니터링할 필요성 존재	10

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

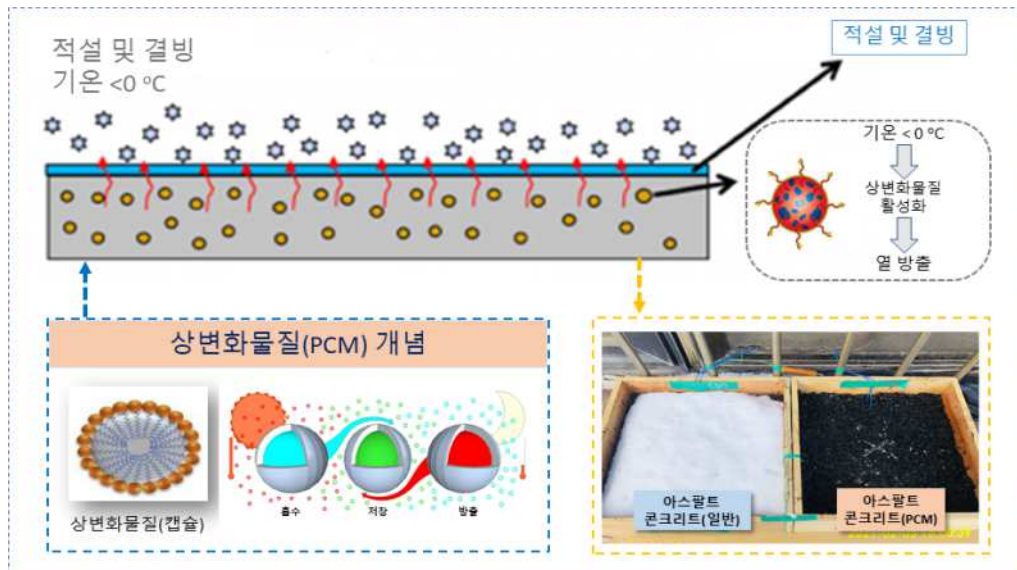
○ 연구 개요

- 최근 고속도로에서 운전자가 인식하지 못하는 살얼음(블랙 아이스)이 발생하여 미끄럼 저항성 감소 문제로 운전자의 운전 안정성을 크게 떨어트려 많은 인명사고가 발생하고 있음
- 상주영천고속도로에서 살얼음에 의한 사고가 발생하여 40대가 넘는 차의 추돌사고가 발생하였으며, 이에 대한 근본적인 예방이 필요함
- 2014~2018년 경찰에 신고 된 겨울철 도로결빙/서리로 인한 교통사고가 모두 6천548건이 발생하였고 이들 사고로 199명이 숨져 사고 100건당 사망자 수인 치사율이 3.0%로 전체 교통사고 평균 치사율인 1.9%의 1.6배에 달함



- 도로 노면의 습기가 기온이 0℃이하로 급격히 떨어질 때 발생하는 노면의 결빙을 블랙 아이스라고 하며 본 연구에서는 블랙 아이스의 발생을 0℃에서 영하 5℃까지 지연시키기 위해 도로 환경에 반

- 응하는 상변화물질(PCM : Phase Change Material)을 사용한 아스팔트 포장의 개발을 목표로 함
- 상변화물질(PCM)은 주변의 온도가 상승하면 열을 흡수하고, 낮아지면 열을 방출하는 축열, 발열의 특성을 나타내는 물질로, 열을 흡수하고, 방출하며 주변 온도에 영향을 주는 물질임



- 상변화물질을 사용한 아스팔트 포장을 개발하기 위해, 관련 문헌 및 연구 조사, 상변화물질 종류 및 최적 함량 결정, 상변화물질 캡슐화 및 성능평가를 실시하며, 개발된 상변화물질과 아스팔트와의 혼합성능평가를 실시할 것임
- 또한, 개발된 재료의 균열성능, 동탄성계수, 수분민감성 등 개발 재료의 성능을 평가하고, 실내 모사 및 Pilot 시험을 통한 데이터 모니터링 및 현장 성능 평가를 실시할 것임

○ 국내외 문헌 및 사례 조사

- 상변화물질을 적용한 도시열섬현상 완화효과 분석

▪ 참조

- B. Guan, B. Ma, F. Qin, Application of asphalt pavement with phase change materials to mitigate urban heat island effect, in: 2011 Int. Symp. Water Resour. Environ. Prot., 2011: pp. 2389-2392.

▪ 목적

- 이 연구의 목적은 PCM을 아스팔트 혼합물에 첨가하여 아스팔트 혼합물의 열물리학적 특성을 개량하고자 하는 것이며, 궁극적으로는 열섬현상을 감소시키고 고온에 대한 아스팔트 포장의 안정도를 향상 시키는 것임

▪ 시험

- PCM 함량은 아스팔트 중량비의 20%
- 시험방법: 온도조절시험

PCM 특성

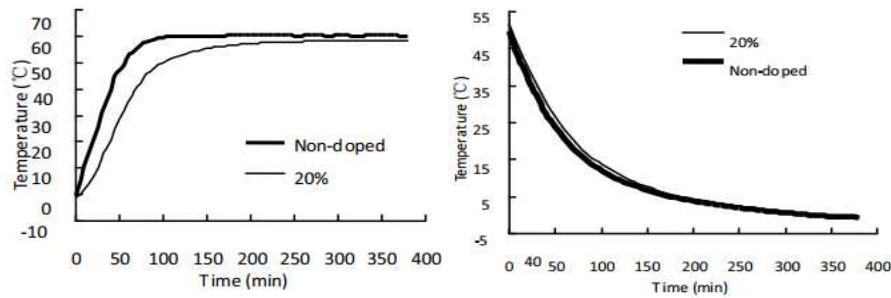
Items	PCM
Components	Phytoextraction, ultrasonic homogenization, barnstead, enzymatic synthesis, crystallization
Color	White
Latent heat	95 kJ/kg
Temperature of phase-changing	17°C

▪ 결과

- 가열 과정 중, PCM을 첨가한 후에 아스팔트 혼합물의 가열 정도는 감소하였으며, 초고온이 되는 것

을 방지하는 효과가 있었음

- 냉각 과정 중, PCM을 첨가한 아스팔트 혼합물의 온도는 일반 아스팔트 혼합물보다 온도가 높았으며, 온도 하강율이 감소하였고, 초저온 발생을 지연시키는 효과가 있었음



가열 및 냉각 과정 중의 온도 특성

- 폴리에틸렌 글리콜의 상변화 효과가 아스팔트 바인더와 혼합물에 미치는 영향 조사

▪ 참조

- Y. Du, P. Liu, J. Wang, H. Wang, S. Hu, J. Tian, Y. Li, Laboratory investigation of phase change effect of polyethylene glycol on asphalt binder and mixture performance, Constr. Build. Mater. 212 (2019) 1–9.

▪ 목적

- 폴리에틸렌 글리콜(PEG : Polyethylene glycol)과 아스팔트의 상변화효과에 대한 상호작용 연구

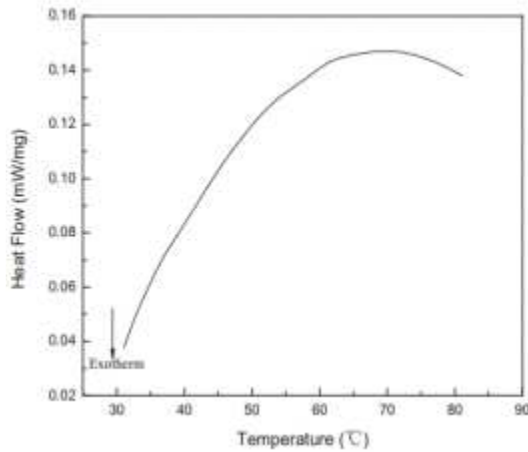
▪ 시험

- 13개의 아스팔트 혼합물을 이용하였으며, 아스팔트 바인더 무게에 대한 4가지(1, 5, 10, 20%)의 PEG 함량에 대한 효과를 연구함
→ 4가지 함량의 폴리에틸렌 글리콜을 160°C의 기본 아스팔트에 첨가한 후 1500rpm에서 3분간 교반함.

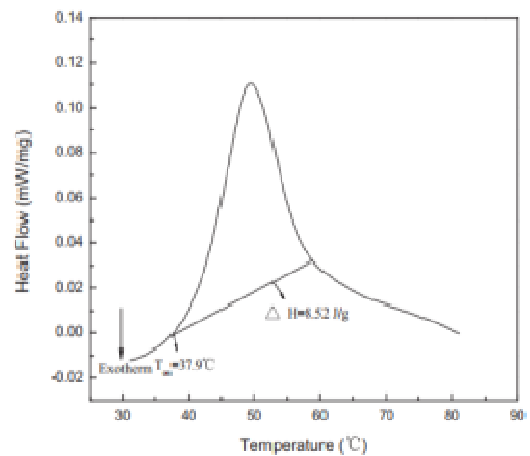
특성	시험	시험장비		결과
상변화거동	시차주사열량분석법(DSC : Differential Scanning Calorimetry)	DSC-200F3, NETZSCH Co., Ltd., German		• 아스팔트가 상변화물질의 상변화과정을 지연시킴
DSR (Dynamic Shear Rheometer)	Temperature and Frequency sweep tests	SmartPave102, Anton Paar Instru., Austria		• 상변화물질이 저주파수구간에서 액체상태일 때 복합탄성계수를 향상시킴
온도성능	Indoor irradiation test	JTG F40-2004 Standard, China E6, Flir co. Ltd., America		• 상변화물질 함량이 20%일 때 도로포장 온도가 1.5°C 감소함

■ 결과

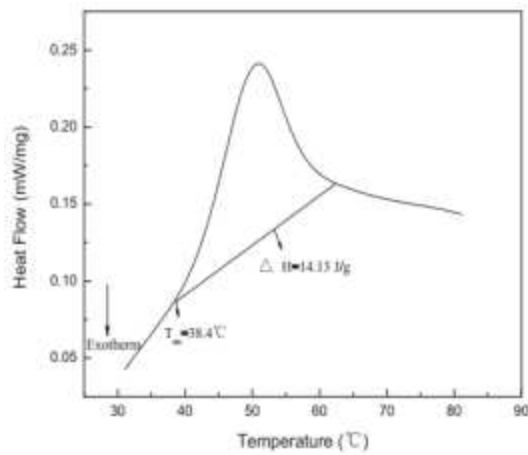
→ DSC 측정 결과, 5%의 PEG가 함유된 아스팔트 혼합물은 상변화 거동의 변화가 없으나 10%와 20% 인 경우 명백한 발열 고점을 나타냄



DSC 측정 결과(PEG 함량 5%)

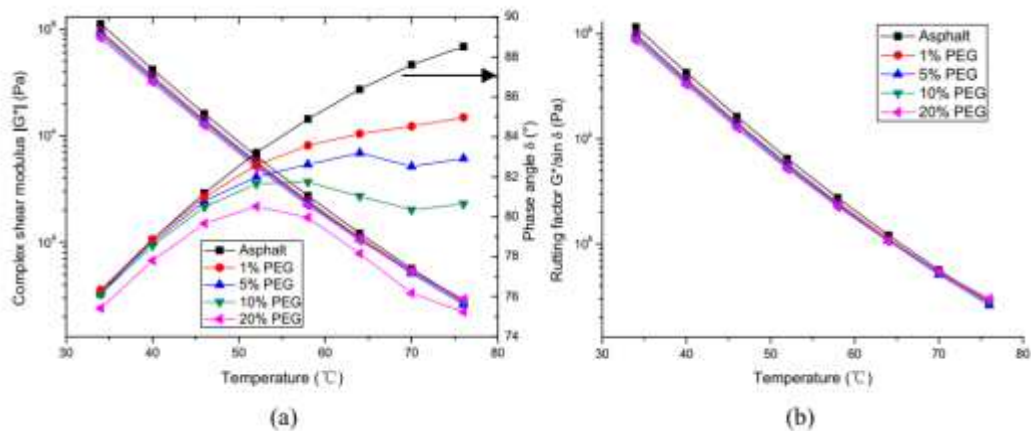


DSC 측정 결과(PEG 함량 10%)



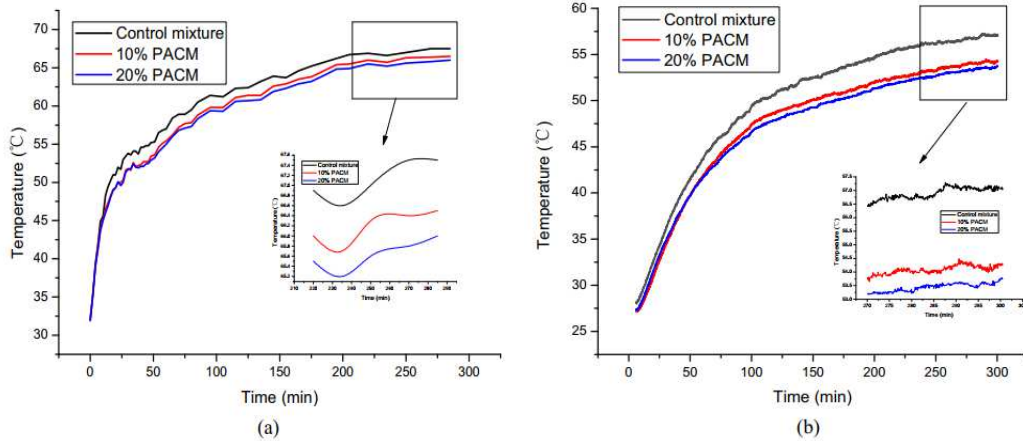
DSC 측정 결과(PEG 함량 20%)

→ DSR 측정 결과, PEG의 상변화온도보다 높은 온도에서 또는 저주파 구간에서 PEG는 복합전단탄성계수와 소성변형저항성에 도움이 되는 것으로 나타남



DSR 측정 결과(a : 복합전단탄성계수와 위상각, b :소성변형저항성)

→ 온도성능 측정 결과, 표면과 4cm 깊이 온도에서 각각 1.5, 3.3°C 감소하는 것으로 나타남



온도성능 측정 결과(a : 표면, b : 4cm 깊이)

- 경량골재에 PCM 포함 아스팔트 도로표면의 온도안정화와 소성변형 저항성

■ 참조

→ M. Ryms, H. Denda, P. Jaskuła, Thermal stabilization and permanent deformation resistance of LWA/PCM-modified asphalt road surfaces, Constr. Build. Mater. 142 (2017) 328–341.

■ 목적

→ 본 연구에서는 태양복사열에 의한 아스팔트포장에 의한 열섬 현상을 감소시키기 위해 아스팔트 혼합물의 골재 안에 온도저감물질인 세레신(Ceresin)을 적용함

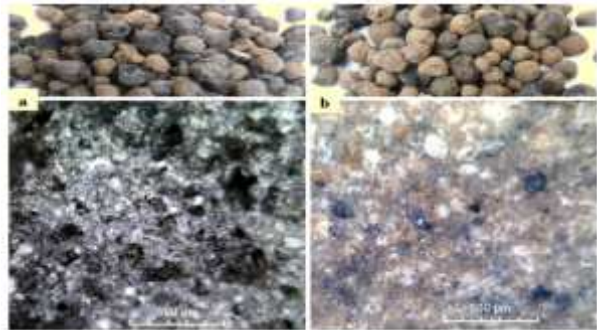
■ 시험

→ 원유희석제의 부산물인 세레신(Ceresin)을 사용함

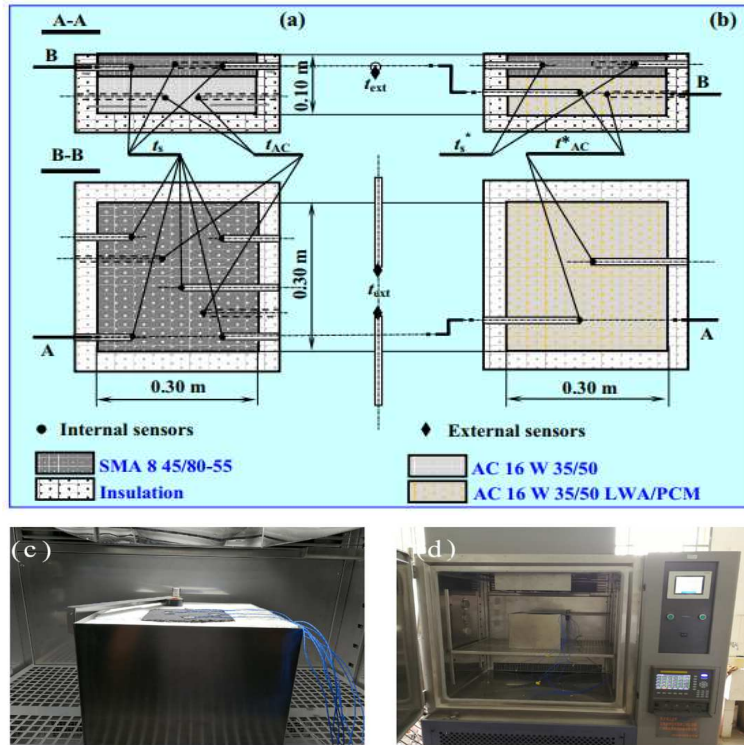
→ 직경 4~8mm의 경량골재(밀도 650~850 kg/m³)가 화력발전소 플라이애쉬로부터 만들어졌으며, 직경에 따라 흡수의 효과가 12~15%에서 변동이 있었음

세레신의 특성

구분	특성
열전도성(W/mK)	0.2
잠열용량(KJ/Kg)	60~269
용점(℃) - Two main	t ₁ = 45.9, t ₂ = 69.7
밀도(kg/m ³)	760
부피 변화	큼
내열성	안정적



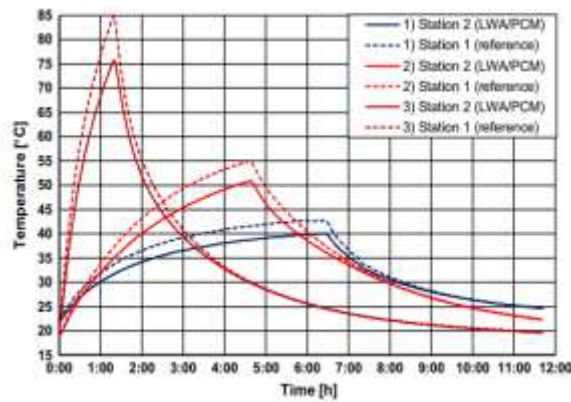
사용 경량골재(a : 세레신 적용 전, b : 세레신 적용 후)



열흡수시험 방법

■ 결과

→ 세레신 왁스의 첨가는 복사열의 강도와 노출시간에 따라 아스팔트 혼합물의 온도를 약 2~3℃ 정도 감소시키는 것으로 나타남



복사열 및 노출 시간에 따른 아스팔트 혼합물 온도 특성

- 아스팔트 포장의 소성변형 방지를 위한 PCM의 최적화 연구

■ 참조

→ M.Z. Chen, J. Hong, S.P. Wu, W. Lu, G.J. Xu, Optimization of Phase Change Materials Used in Asphalt Pavement to Prevent Rutting, in: Adv. Res. Inf. Sci. Autom. Mater. Syst., Trans Tech Publications Ltd, 2011: pp. 1375-1378.

■ 목적

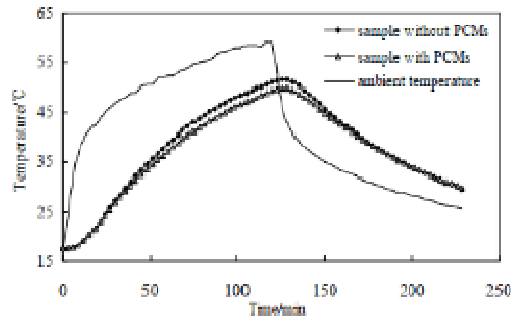
→ 소성변형 감소를 위한 아스팔트 혼합물에 PCM을 첨가하는 연구를 수행

■ 시험

→ 상변화온도 구간이 40~50℃이고 잠열이 150J/g인 파라핀 그라파이트 형태의 상변화물질 이용
→ 실험장비는 태양광 모사기(produced by a 300W metal halide lamp)와 온도측정 센서 장착 데이터 취득 시스템으로 이루어졌으며, 데이터는 매 30초마다 읽고 컴퓨터에 저장하는 장치를 활용

▪ 결과

→ PCM이 혼합된 아스팔트 혼합물 시료가 일반 아스팔트 혼합물보다 약 2℃정도 낮았음



PCM 유무에 따른 아스팔트 혼합물의 시간에 따른 온도 변화

→ PCM이 있는 아스팔트 포장은 열을 흡수하여 고온이 되는 것을 피할 수 있었으며, 소성변형 저항성을 향상 시켰음

- 가열아스팔트 혼합물에 PCM 활용을 위한 적용성 평가

▪ 참조

→ B.J. Manning, P.R. Bender, S.A. Cote, R.A. Lewis, A.R. Sakulich, R.B. Mallick, Assessing the feasibility of incorporating phase change material in hot mix asphalt, Sustain. Cities Soc. 19 (2015) 11–16.

▪ 목적

→ 본 논문은 다공성의 경량골재에 PCM을 흡착하여 사용하는 적용성 평가를 수행함

▪ 시험

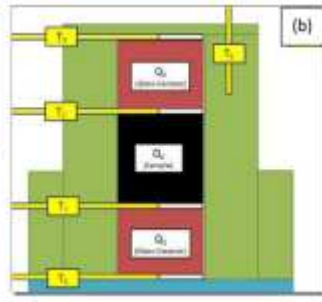
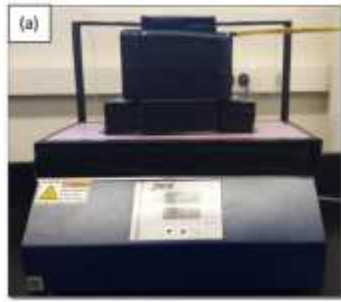
→ 상변화 온도가 6℃인 파라핀 혼합물, 일명 PCM-6를 활용하여 침투수가 어는 것을 지연시키는 연구를 진행

→ 아스팔트 혼합물의 무게에 대한 1.25% PCM을 이용하여 시료를 제작

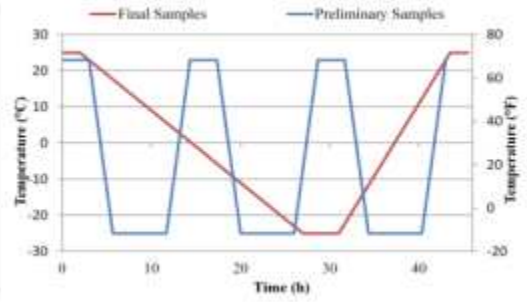
배합 재료량

Mix component	Mass (g)
Normal-weight aggregate	720
Coarse aggregate	141
Crushed stone	360
Natural sand	219
Lightweight aggregate	81
No. 4	81
PCM-6	11
Binder	45

→ 유도종방향비교열량계(guarded longitudinal comparative calorimeter : GLCC)에 시료를 넣었으며, 6개의 온도측정센서를 다양한 장소에 배치하였음



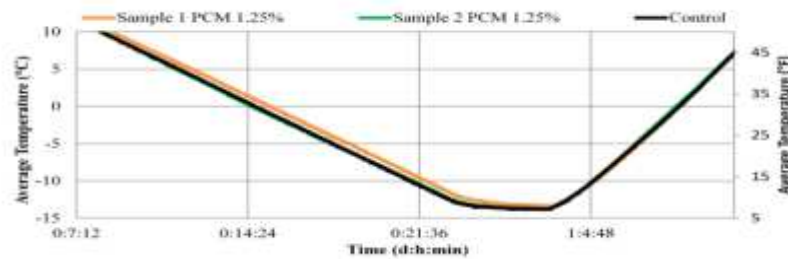
유도종방향비교열량계(GLCC) 개요



가열 및 냉각 형태

■ 결과

→ 1.25% PCM을 사용한 시료가 일반 시료에 비해 냉각을 약 35분 지연시키는 것으로 나타남



온도 시험 결과

- 마이크로캡슐화된 상변화 물질을 활용한 추운 지역에 사용 가능한 아스팔트 혼합물 개발

■ 참조

→ M. Bueno, M.R. Kakar, Z. Refaa, J. Worlitschek, A. Stamatou, M.N. Partl, Modification of asphalt mixtures for cold regions using microencapsulated phase change materials, Sci. Rep. 9 (2019) 20342.

■ 목적

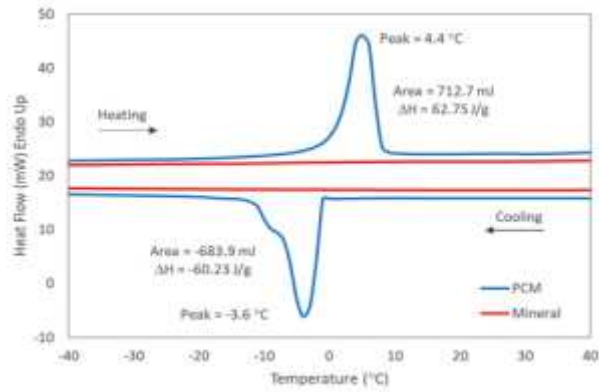
→ 저온에서 아스팔트 포장의 온도성능을 상변화물질로서의 마이크로캡슐화된 테트라데칸을 사용하여 그 영향을 평가하고자 함

■ 시험

- 마이크로캡슐화된 상변화물질은 코어재료와 폴리머 껍질로 되어 있으며, 코어는 녹는점이 6°C인 n-C14, tetradecane으로 구성되어 있고 폴리머 껍질은 멜라민포름알데히드로 되어 있음
- PCM의 양은 추가중량함량으로 되어 있음 (PCM/binder ratio = 0.5)
- 아스팔트 혼합물은 건식과 습식으로 되어 있어 있으며, 건식은 PCM을 아스팔트와 골재와 같이 투입하여 혼합하는 것이고 습식에서는 PCM을 아스팔트에 넣고 그 아스팔트를 골재와 혼합함
- 시차주사열량계를 활용한 상변화거동과 자외선 온도계를 활용한 온도거동을 측정함

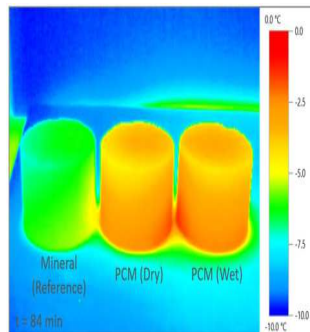
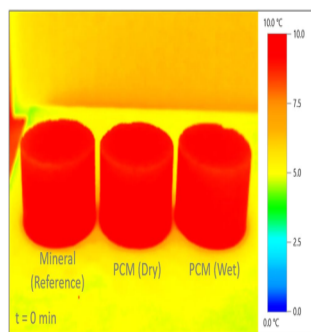
■ 결과

→ 시차주사열량계 시험 결과, 냉각과정에서 최고점을 가지는 온도 영하 3.6°C 에서 엔탈피 60.2J/g을 가지며, 가열과정에서는 최고점을 가지는 온도 영상 4.4°C에서 엔탈피 62.7J/g을 가지고 있음

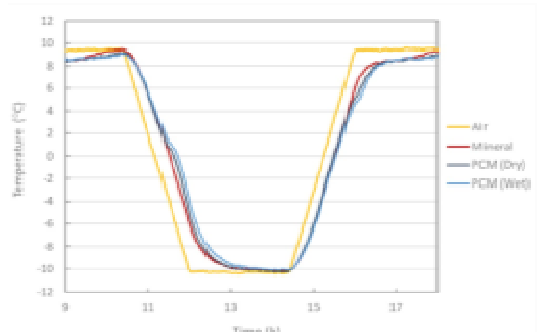


온도에 따른 열 특성

→ 온도거동 측정 결과, 84분의 냉각 후에 주변 대기온도가 낮아짐에도 불구하고 테트라데칸의 상변화하는 동안 열에너지를 방출하여 시편의 온도를 유지하는 것으로 나타났으며, PCM을 첨가한 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물보다 약 2°C 정도 높은 것으로 나타남



아스팔트 혼합물의 열 적외선 촬영 결과



아스팔트 혼합물의 열사이클

- 아스팔트 혼합물의 마이크로캡슐화된 상변화 물질의 온도조절효과

▪ 참조

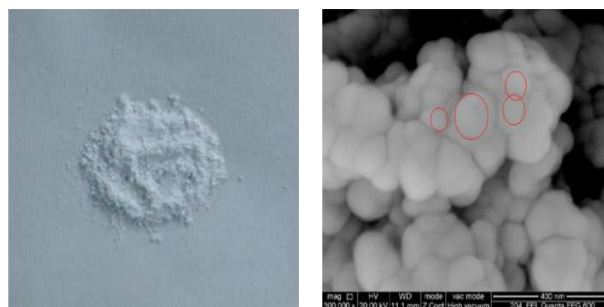
→ B. Ma, S. Chen, Y. Ren, X. Zhou, The thermoregulation effect of microencapsulated phase-change materials in an asphalt mixture, Constr. Build. Mater. 231 (2020) 117186.

▪ 목적

→ 마이크로 캡슐 상변화 물질의 아스팔트 혼합물 온도조절 능력 영향 분석

▪ 시험

→ 사용된 상변화물질은 연화점 122°C, 밀도 0.767g/cm³의 특성을 가지는 n-tetradecane 이고, Ethyl cellulose(EC)를 캡슐로 사용하였음



분말상태의 마이크로 PCM 및 SEM 촬영 결과

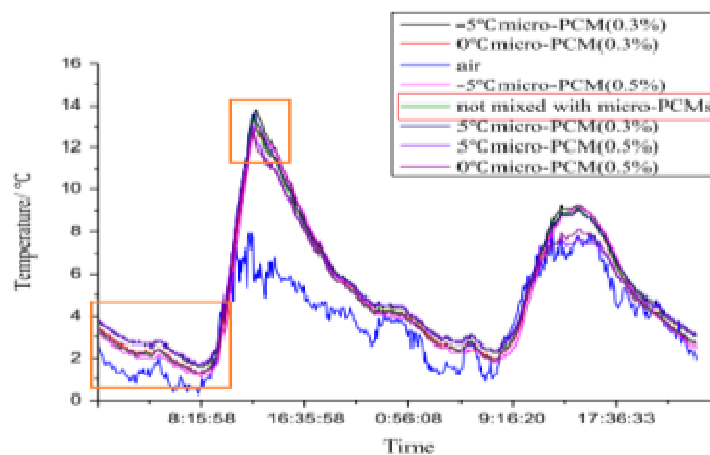
→ 온도조절효과를 시험하며 두 시료는 중량비 0.3%와 0.5%로 -5, 0, 5°C micro-PCM으로 혼합함



온도 센서가 내장된 공시체

■ 결과

→ 5°C micro-PCM 아스팔트 혼합물과 일반아스팔트 혼합물의 차이가 가장 크게 나타났음. 0.5% 중량 비 micro-PCM 아스팔트 혼합물이 다른 시편에 비교하여 더 좋은 결과를 나타내었음. 이러한 결과로부터 마이크로캡슐 상변화물질은 온도조절효과가 있는 것으로 판단되었음



시간에 따른 공시체 내부 온도

- 마이크로캡슐 상변화 물질을 활용한 추운 지역의 아스팔트 혼합물 개량

■ 참조

→ M. Bueno, M.R. Kakar, Z. Refaa, J. Worlitschek, A. Stamatiou, M.N. Partl, Modification of asphalt mixtures for cold regions using microencapsulated phase change materials, Sci. Rep. 9 (2019) 20342.

■ 목적

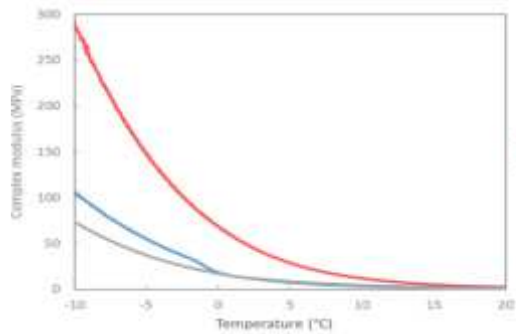
→ 마이크로캡슐한 상변화물질 테트라데칸 첨가 아스팔트의 유동학적 특성을 향상시키기 위한 영향 평가

■ 시험

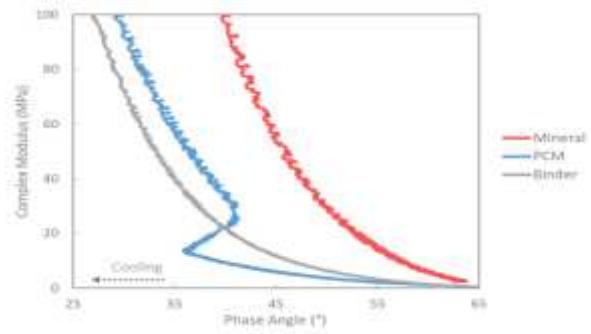
→ 상변화물질의 양은 첨가한 중량비로 나타내었음(PCM/binder ratio = 0.5)
→ Dynamic Shear Rheometer (DSR) 시험을 활용하여 PCM 첨가 아스팔트의 유동학적 거동을 평가하였음

■ 결과

→ PCM 첨가 아스팔트의 복합탄성계수(G^*)는 온도가 감소함에 따라 증가하는 것으로 나타났음. 상변화물질의 결정화 효과가 $-1 \sim -3^\circ\text{C}$ 사이의 온도에서 G^* 로부터 일어나는 것을 알 수 있음
→ 열에너지 방출에 따른 온도의 증가로 인하여 상변화 온도에서 PCM 첨가 아스팔트의 위상각이 증가하는 것으로 나타남



Low-temperature sweep of binder,
mastics with mineral and PCM



Black ice of binder,
mastics with mineral and PCM

○ 기존 및 개발 블랙아이스 저감 방법의 경제성 분석

■ 기존의 블랙아이스 저감 방법

- 기존의 블랙아이스 저감 방법으로 크게 제설제와 열선 방식을 들 수 있음
- 제설제는 제설 방법과 물질의 종류에 따라 나뉘지며, 제설 방법에 의해 우선 크게 마찰제와 융빙제로 나뉨
- 마찰제는 차량과 도로의 마찰력을 높이는 것을 말하며 모래와 쇄석 등이 있음. 융빙제는 어느점을 0°C 이하로 낮춰 얼음을 녹이는 방법으로 염화물계와 비염화물계로 나뉨
- 염화물계 제설제는 염화칼슘, 염화나트륨 등이 해당되며 가격 대비 성능이 우수하여 전 세계적으로 가장 많이 사용되지만 도로 포트홀 및 주변 구조물 부식을 발생시키고 환경에 부정적인 영향을 미치는 단점이 있음
- 국내에서는 염화칼슘과 염화나트륨이 가장 많이 사용되며, 염화칼슘의 경우 염화나트륨에 비해 단가가 높은 편이고 초기 제설 효과가 뛰어나지만 보관기간이 짧고 습기에 약해 별도의 보관 방법을 필요로 하는 단점이 있음
- 열선 방식은 포장면 아래 일정한 깊이에 발열선을 매설하여 눈이 오거나 결빙 발생 시 적설 또는 결빙을 방지하는 것으로 보통 구리 재질의 열선을 사용하며, 최근 탄소섬유를 사용한 방법과 관련된 연구가 진행 중에 있음
- 이 외에 열선 방식은 포장 재료의 물성 중 열전도율에 의해서도 성능의 차이가 발생하며, 도로 하중에 의해 발생하는 단선으로 인해 그 수명이 비교적 짧음
- 강설량 등의 외부 요인에 의해 전기 사용량이 증가할 수 있으며, 유지보수로 인한 추가적인 비용이 발생할 수 있음

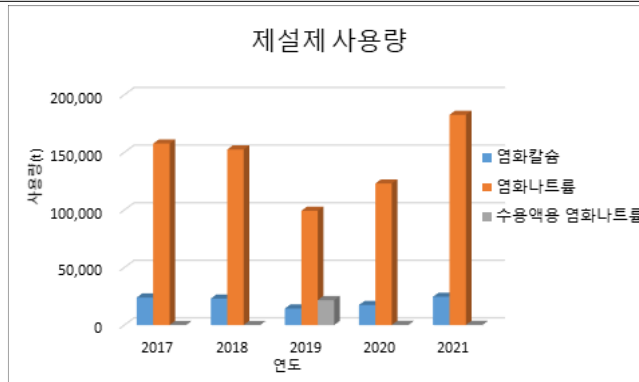
■ 염화칼슘 사용 및 보유량

- 한국도로공사 고속도로 공공데이터 포털의 ETC 수집체계로부터 획득한 자료를 토대로 2017~2021년 간 사용된 염화칼슘, 염화나트륨 및 수용액용 염화나트륨 사용량을 조사함
- 자료는 한국도로공사 8개 본부, 55개 지사 자료를 토대로 작성함

연도별 제설제 사용량

구분	제설제 사용량(ton)		
	염화칼슘	염화나트륨	수용액용 염화나트륨
2017년도	23,939	157,652	85
2018년도	23,010	152,481	96
2019년도	14,403	99,227	21,638
2020년도	17,410	122,950	156
2021년도	24,596	182,581	199

※ 한국도로공사 고속도로 공공데이터 포털



연도별 제설제 사용량

- 공공데이터포털의 Open API 자료 중 행정안전부 시도별 염화칼슘 보유정보를 통해 전국 1411개 공공 기관 및 부서의 염화칼슘 보유량을 조사함
- 해당 자료는 행정안전부 재난관리실 자연재난대응과에 의해 관리되며 2021년 3월 31일에 수정됨
- 해당 자료 집계 결과 전국 시도별 염화칼슘 보유 총량은 약 123,249,859톤임
- 2022년 2월 기준 나라장터 물품 개찰결과를 통해 제설제의 가격은 톤당 염화칼슘이 약 285,655원, 염화나트륨이 약 123,360원임

rep_org_nm	fil_org_nm	resrc_korean_nm	hold_qy_subsum
경기도 시흥시	경기도 시흥시 배곧1동	염화칼슘	60
인천시시설공단	인천시시설공단 도시관리본부 영종도시기반사업단	염화칼슘	54000
인천시시설공단	인천시시설공단 도시관리본부 상가주차사업단	염화칼슘	100
인천시시설공단	인천시시설공단 도시관리본부 청라도시기반사업단	염화칼슘	118000
국립공원공단	국립공원공단 경주국립공원사무소	염화칼슘	5
경상남도 창원시	경상남도 창원시 마산합포구 가포동	염화칼슘	1250
경상남도 창원시	경상남도 창원시 성산구 사파동	염화칼슘	1250
경상남도 창원시	경상남도 창원시 성산구 가음정동	염화칼슘	3200
경상남도 창원시	경상남도 창원시 성산구 성주동	염화칼슘	7500
경상남도 창원시	경상남도 창원시 마산합포구 진전면	염화칼슘	875
경상남도 창원시	경상남도 창원시 마산합포구 현동	염화칼슘	2400
경상남도 창원시	경상남도 창원시 성산구 중앙동	염화칼슘	2000
경상남도 창원시	경상남도 창원시 성산구 상남동	염화칼슘	1000
인천광역시 미추홀구	인천광역시 미추홀구 송의1.3동	염화칼슘	750
인천광역시 미추홀구	인천광역시 미추홀구 송의2동	염화칼슘	1000
인천광역시 미추홀구	인천광역시 미추홀구 송의4동	염화칼슘	1000
경상남도 함양군	경상남도 함양군 함양읍	염화칼슘	750
경상남도 남해군	경상남도 남해군 상주면	염화칼슘	1875
경상남도 남해군	경상남도 남해군 삼동면	염화칼슘	7500
경상남도 남해군	경상남도 남해군 미조면	염화칼슘	1750
경상남도 남해군	경상남도 남해군 남면	염화칼슘	750
충청남도 천안시 서북구	충청남도 천안시 서북구 불당2동	염화칼슘	1250
경상남도 창원시	경상남도 창원시 의창구 동읍	염화칼슘	1000
경상남도 창원시	경상남도 창원시 의창구 대산면	염화칼슘	4000
경상남도 창원시	경상남도 창원시 의창구 의창동	염화칼슘	2000
경상남도 창원시	경상남도 창원시 의창구 팔룡동	염화칼슘	4000
경상남도 창원시	경상남도 창원시 의창구 명곡동	염화칼슘	7500
경상남도 창원시	경상남도 창원시 의창구 불림동	염화칼슘	2250
충청남도 천안시 서북구	충청남도 천안시 서북구 쌍용2동	염화칼슘	250
충청남도 천안시 서북구	충청남도 천안시 서북구 백석동	염화칼슘	750

시도별 염화칼슘 보유정보

■ 열선 시공 비용

- 2022년 '산청군 오부면 대현리 도로열선 설치 공사' 사업을 통해 산청군 오부면 대현리에 300m 구간에 도로열선을 설치를 위한 전자 입찰 공고를 함
- 해당 사업의 설계 금액은 부가가치세 포함 197,780,000원 이고, 입찰 금액은 175,829,137원임
- 열선 시공비는 미터 당 약 659,000원임

전자입찰 공고(긴급)

□ 산청군 공고 제2022 - 64호

1. 입찰에 부치는 사항

(단위: 원)

사 업 명	위 치	사 업 량	설 계 금 액		공사기간 (착공일 부터)
			기 초 금 액		
			추 정 가 격		
			부 가 가 치 세		
			도 급 자 관 금 자 재 관 급 자 관 금 자 재 비		
산청군 오부면 대현리 도로열선 설치 공사	산청군 오부면 대현리	도로열선 설치 L=300m	197,780,000		30일
			197,780,000		
			179,800,000		
			17,980,000		

2. 전자입찰 개시일시: 2022. 03. 18.(금) 10:00

3. 전자입찰 마감일시: 2022. 03. 22.(화) 10:00

투찰마감시간이 임박하여 투찰할 경우 여러 업체의 집중투찰로 인하여 정상적인 투찰이 불가능한 경우가 발생할 수 있으므로, 투찰마감 24시간 전에는 투찰하시기 바라며 반드시 해당 면허 업종을 확인 후 투찰하시기 바랍니다.

4. 개찰일시 및 장소: 2022. 03. 22.(화) 11:00 입찰집행관 PC

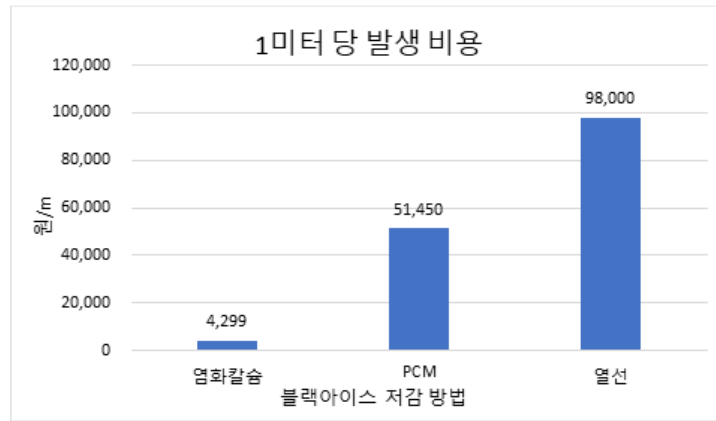
‘산청군 오부면 대현리 도로열선 설치 공사’ 사업

■ PCM 적용 방법

- 본 연구에서 개발한 PCM의 가공 및 생산 비용은 1kg 당 CaCO₃가 14,000원, SiO₂가 4,000원으로 계산됨
- 해당 금액은 원재료가격과 생산 시 발생하는 부가적인 비용을 포함한 금액임
- 아스팔트 혼합물 1m³의 아스팔트 중량을 2,450kg으로 하고, PCM 함량을 1.5%로 하였을 때, 아스팔트 혼합물 1m³ 당 소요되는 PCM의 양은 약 36.75kg으로 이를 토대로 비용을 계산하였을 때, CaCO₃는 약 514,500원, SiO₂는 약 147,000원임

■ 결론

- 블랙아이스 저감을 위한 각각 공법의 경제성에 대한 분석을 위해선 동일 개소를 대상으로 장기공용성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단됨
- 제설제의 경우, 환경오염에 대한 우려와 차량 및 주변 구조물에 대한 영향을 보완하기 위해 친환경 제설제가 개발되고 있지만 기존 재료에 비해 값이 비싸 복합적인 검토가 필요할 것으로 판단됨
- 열선의 경우, 재료 자체가 고가이며 유지보수 시 발생하는 비용이 매우 큼. 이를 보완하기 위한 재료적인 측면에서의 연구가 지속적으로 이뤄지고 있음
- PCM의 경우 국내에서 진행된 연구가 많지 않았고, PCM 재료 자체의 사용이 보편화되어있지 않아 생산 및 적용에 추가적인 비용이 발생하는 것으로 판단됨. 지속적인 연구 및 국내 생산 설비 구축에 의한 경제성 확보가 가능할 것으로 판단됨
- 도로폭 7m, 길이 1m, 두께 0.05m의 도로에 염화칼슘, PCM 및 열선을 사용하여 블랙아이스 저감을 수행한다고 할 때, 미터 당 소요 금액은 각각 4,299원, 51,450원, 98,000원으로 나타남
- 이때의 제설제는 m2당 43g의 염화칼슘을 살포하였고, 연간 10회씩 5년간 살포한 것으로 계산함
- PCM의 경우, 재료 특성 상 별도 시공이 소요되지 않아 생산 비용만을 고려하였음
- 열선의 경우 설계 단가만 고려하였으며, 유지보수 및 수행 시 발생하는 전기료는 고려하지 않음



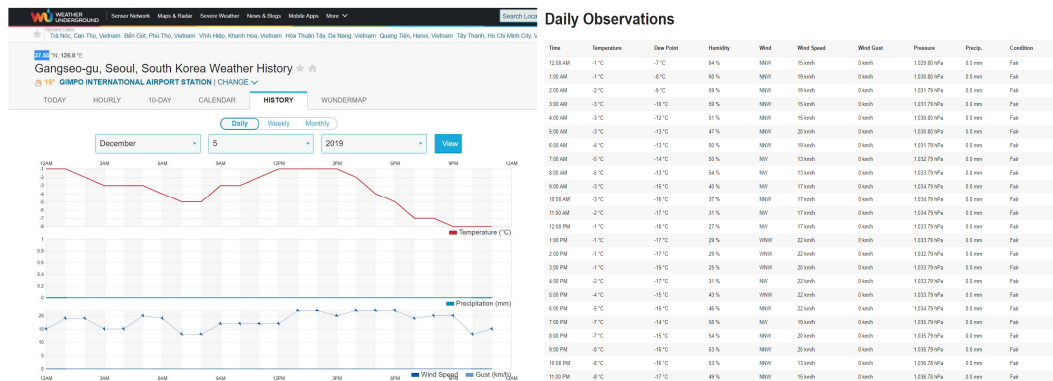
블랙아이스 저감 방법 별 1미터 당 발생 비용

○ (A-1) 유한요소 분석

- A-1-① 10년간 온도분석

■ 기후 데이터 수집

- Wunderground 웹사이트를 사용하여 기후 데이터를 분석에 이용함
- 기후 데이터는 파이썬(Python) 및 VBA(Visual Basic for Application)를 사용하여 정리 및 분석함
- 데이터는 1999년부터 2019년까지 20년간의 기후 데이터를 이용 하였으며, 그 중 2010년부터 2019년까지 10년간의 데이터를 선택하여 분석함
- 블랙 아이스는 기온이 0℃ 이하로 내려갈 때 발생하며, FEM 모델의 정확도를 높이기 위해 하루 동안 24시간 데이터를 분석에 사용함
- 시간별 데이터에는 시간, 기온, 풍속 및 일사량이 포함됨



Wunderground 웹사이트

	A	B	C	D
1	time	T _a	U	H _s
2	0	-1	4.17	0.00
3	1	-1	5.28	0.00
4	2	-2	5.28	0.00
5	3	-3	4.17	0.00
6	4	-3	4.17	0.00
7	5	-3	5.56	0.00
8	6	-4	5.28	0.00
9	7	-5	3.61	138.99
10	8	-5	3.61	237.86
11	9	-3	4.72	327.53
12	10	-3	4.72	398.26
13	11	-2	4.72	443.37
14	12	-1	4.72	458.86
15	13	-1	6.11	443.37
16	14	-1	6.11	398.26
17	15	-1	5.56	327.53
18	16	-2	6.11	237.86
19	17	-4	6.11	138.99
20	18	-5	6.11	0.00
21	19	-7	5.28	0.00
22	20	-7	5.56	0.00
23	21	-8	5.56	0.00
24	22	-8	3.61	0.00
25	23	-8	4.17	0.00

수집된 20년간 데이터 및 분석에 사용된 시간당 데이터

■ 모델 구축

→ 1차원의 열흐름 방정식을 아스팔트 포장에 적용하여 깊이에 따른 포장층 온도와 표층온도를 예측할 수 있는 로직 개발. 1차원 열흐름(Heat flow) 방정식은 식(1)과 같이 표현함

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

여기서,

c_p : specific heat capacity($Jkg^{-1}K^{-1}$)

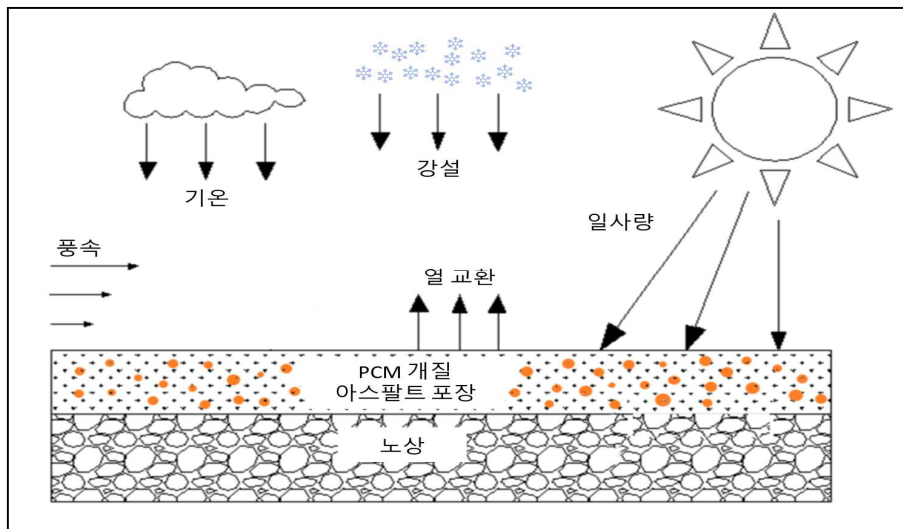
k : thermal conductivity($Wm^{-1}K^{-1}$)

T : Temperature($^{\circ}C$)

∂t : time step(s)

∂z : depth increment(m)

ρ : density(kgm^{-3})



포장 온도 개요

→ 포장층 표층에서 경계면 조건의 열이동(heat flux) (Q)은 태양 복사열, 장파장복사열, 열대류, 온도 복사열등의 상호작용에 의해 일어나며, 식(2)와 같음

$$Q = q_r + q_l - q_c - q_e \quad (2)$$

여기서,

Q : total boundary heat flux(Wm^{-2})
 q_r : absorbed heat flux(Wm^{-2})
 q_l : longwave length radiation input(Wm^{-2})
 q_c : heat convection(Wm^{-2})
 q_e : emit radiation to the surrounding environment(Wm^{-2})

→ 아스팔트포장에 상변화물질(PCM)을 첨가하여 유효부피열용량(Effective Volumetric Heat Capacity : ρc_{peff})을 식(3)과 같이 계산할 수 있음

$$\rho c_{peff} = \phi \rho_{PCM} (\xi c_{pl} + (1 - \xi) c_{ps}) + (1 - \phi) \rho_{AC} c_{pAC} \quad (3)$$

여기서,

ρ : density (kgm^{-3})
 c_{peff} : effective heat capacity ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
 ϕ : PCM volume (%)
 ξ : PCM volume fraction (%)
 ρ_{AC} : density of asphalt concrete (kgm^{-3})

→ 상변화 물질의 열전도와 아스팔트 포장의 열전도는 부피 분할에 의해 식(4)와 같이 나타낼 수 있음

$$\frac{k_{eff}}{k_{AC}} = 1 + \frac{3\phi}{\left(\frac{k_{PCM} + 2k_{AC}}{k_{PCM} - k_{AC}} \right) - \phi} \quad (4)$$

여기서,

k_{eff} : effective thermal conductivity ($Wm^{-1}K^{-1}$)
 k_{AC} : thermal conductivity of asphalt concrete ($Wm^{-1}K^{-1}$)
 ϕ : PCM volume (%)
 k_{PCM} : thermal conductivity of PCM ($Wm^{-1}K^{-1}$)

→ 맥스웰모델(Maxwell model)은 상변화물질 부피가 25% 미만일 경우에 효과적인 것으로 나타남. 상변화 물질의 전도율은 상변화 물질의 액체부분과 고체부분이 차지하는 부피에 비교해 영향을 받음 (식(5))

$$k_{PCM} = \xi k_l + (1 - \xi) k_s \quad (5)$$

여기서,

k_{PCM} : thermal conductivity of PCM ($Wm^{-1}K^{-1}$)
 ξ : PCM volume fraction (%)
 k_l : thermal conductivity at liquid state ($Wm^{-1}K^{-1}$)
 k_s : thermal conductivity at solid state ($Wm^{-1}K^{-1}$)

→ 상변화물질의 부피는 온도, $\xi(T)$, 의 선형함수로 움직이며, 여기서 T_s 와 T_l 는 주사열량측정에 의한

곡선으로부터 구함. 부피분할의 표현은 식(6)과 같음

$$\xi(T) = \begin{cases} 0, & T < T_s, \text{ Solid phase} \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s < T < T_l, \text{ Mshyphase} \\ 1, & T > T_l, \text{ Liquid phase} \end{cases} \quad (6)$$

여기서,

T : Temperature (°C)
 T_s : Temperature when PCM changes to solid (°C)
 T_l : Temperature when PCM changes to liquid (°C)

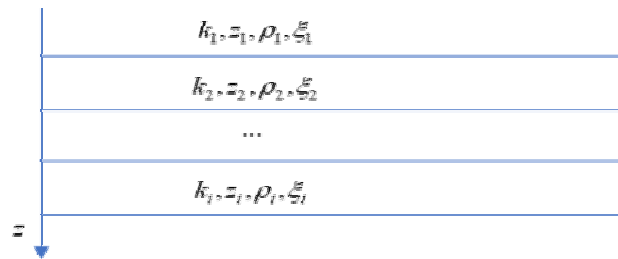
→ 상변화물질 아스팔트 포장의 일시적인 열전도는 식(7)과 같이 쓸 수 있음

$$\rho c_{peff} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \phi \rho_{PCM} L \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (7)$$

여기서,

ρ : density (kgm^{-3})
 c_{peff} : effective heat capacity ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
 ϕ : PCM volume (%)
 ξ : PCM volume fraction (%)
 ρ_{AC} : density of asphalt concrete (kgm^{-3})
 L : latent heat fusion of PCM (Jg^{-1})
 $d\xi$: PCM volume fraction
 dt : time step (s)

→ 아스팔트포장의 열전도 특성인 열전도, 두께, 밀도, 아스팔트층의 상변화 물질 액화부분(k_i, z_i, ρ_i, ξ_i ($i = 1, 2, 3 \dots, n$))을 아래 그림에 나타내었음. MATLAB R2020b를 활용하여 수치해석 방정식을 해결하였음



아스팔트 포장의 개략도

→ 본 연구에서는 아스팔트 포장의 일시적인 온도 반응을 분석하기 위하여 수치증가축차모델(numerical incremental recursive model)을 사용하였음. 상변화물질 아스팔트 포장층의 프리어 방정식 수치해석형태는 식(8)과 같음

$$\rho c_{peff} \left(\frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta t} \right) \Delta z = k_i \left(\frac{T_{i-1}^p - T_i^p}{\Delta z} \right) - k_i \left(\frac{T_i^p - T_{i+1}^p}{\Delta z} \right) - \phi \rho_{PCM} L \left(\frac{\xi_i^{p+1} - \xi_i^p}{\Delta t} \right) \Delta z \quad (8)$$

여기서,

ρ : density (kgm^{-3})
 c_{peff} : effective heat capacity ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
 ϕ : PCM volume (%)
 ξ : PCM volume fraction (%)
 ρ_{AC} : density of asphalt concrete (kgm^{-3})
 L : latent heat fusion of PCM (Jg^{-1})
 k_i : thermal conductivity at layer i^{th}
 Δt : time step (s)
 Δz : depth increasement (mm)
 T_i^{p+1} : temperature of layer i^{th} at time p+1
 T_i^p : temperature of layer i^{th} at time p
 T_{i-1}^p : temperature of layer $i-1^{th}$ at time p
 T_{i+1}^p : temperature of layer $i+1^{th}$ at time p
 ξ_i^{p+1} : PCM volume fraction of layer $i+1^{th}$ at time p
 ξ_i^p : PCM volume fraction of layer i^{th} at time p

→ 각 단계(t^{p+1})에서 필요한 상변화물질의 부피(ξ_i^{p+1})는 전 단계(t^p)의 온도에 근거하여 계산하며, 식 (9)를 풀어서 계산함. 이러한 반복은 $\|T^{m+1} - T^m\| < 10^{-5}$ 일 때까지 반복함

$$\rho c_{peff} \left(\frac{T_i^{m+1} - T_i^p}{\Delta t} \right) \Delta z = k_i \left(\frac{T_{i-1}^p - T_i^p}{\Delta z} \right) - k_i \left(\frac{T_i^p - T_{i+1}^p}{\Delta z} \right) - \phi \rho_{PCM} L \left(\frac{\xi_i^{m+1} - \xi_i^p}{\Delta t} \right) \Delta z \quad (9)$$

$m = 1, 2, 3 \dots$

여기서,

ρ : density (kgm^{-3})
 c_{peff} : effective heat capacity ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
 ϕ : PCM volume (%)
 ξ : PCM volume fraction (%)
 ρ_{AC} : density of asphalt concrete (kgm^{-3})
 L : latent heat fusion of PCM (Jg^{-1})
 k_i : thermal conductivity at layer i^{th}
 Δt : time step (s)
 Δz : depth increasement (mm)
 T_i^{m+1} : temperature of layer i^{th} at time m+1
 T_i^m : temperature of layer i^{th} at time m
 T_{i-1}^p : temperature of layer $i-1^{th}$ at time p
 T_{i+1}^p : temperature of layer $i+1^{th}$ at time p
 ξ_i^{m+1} : PCM volume fraction of layer $i+1^{th}$ at intermediate time m+1
 ξ_i^p : PCM volume fraction of layer i^{th} at time p

→ 식(2)의 경계면조건의 열흐름(heat flux)를 고려하여 주변환경과 아스팔트 포장 표층은 식(10)같이 사용할 수 있음

$$\rho c_{peff} \left(\frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta t} \right) \Delta z = k_i \left(\frac{T_{i-1}^p - T_i^p}{\Delta z} \right) - k_i \left(\frac{T_i^p - T_{i+1}^p}{\Delta z} \right) - \phi \rho_{PCM} L \left(\frac{\xi_i^{p+1} - \xi_i^p}{\Delta t} \right) \Delta z + Q \quad (10)$$

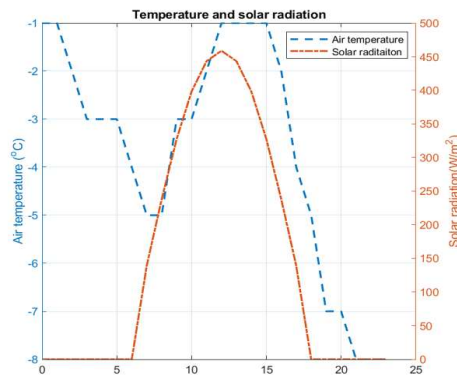
여기서,

ρ : density (kgm^{-3})
 c_{peff} : effective heat capacity ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
 ϕ : PCM volume (%)
 ξ : PCM volume fraction (%)
 ρ_{AC} : density of asphalt concrete (kgm^{-3})
 L : latent heat fusion of PCM (Jg^{-1})
 k_i : thermal conductivity at layer i^{th}
 Δt : time step (s)
 Δz : depth increasement (mm)
 T_i^{p+1} : temperature of layer i^{th} at time p+1
 T_i^p : temperature of layer i^{th} at time p
 T_{i-1}^p : temperature of layer $i-1^{th}$ at time p
 T_{i+1}^p : temperature of layer $i+1^{th}$ at time p
 ξ_i^{p+1} : PCM volume fraction of layer $i+1^{th}$ at time p
 ξ_i^p : PCM volume fraction of layer i^{th} at time p
 Q : total heat flux at upper boundary

- A-1-② FEM 및 열흐름 방정식을 이용한 얼음생성 모사

▪ 최적 PCM을 예측하기 위한 예제

→ 2010년 12월 5일 김포공항 지역의 기후 데이터(매 시간당 대기온도, 바람속도, 태양복사열)를 분석하여 최적 PCM을 결정하고자 함



2010년 12월 5일 김포공항지역의 기후데이터

→ 아스팔트 포장에 대한 상변화 물질 사용량(Case 1–Case 3), 상변화 온도(Case 4 – Case 6), 용융 잠열(Case 7 – Case 9)에 구분을 주어 해당 모사 조건에서의 최적의 PCM을 찾았으며, 모사 조건은 다음과 같음

수치해석 모사조건

구분		PCM 함량(ϕ)	용해점 (T_l)	빙점 (T_s)	잠열 용량(L)
상변화 물질 함량	case 0	0%	–	–	–
	case 1	0.5%	3	–8	50
	case 2	1.0%	3	–8	50
상변화 온도	case 3	1.5%	3	–8	50
	case 4	1.5%	8	3	50
	case 5	1.5%	5	–10	50
잠열 용량	case 6	1.5%	–3	–8	50
	case 7	1.5%	3	–8	100
	case 8	1.5%	3	–8	150
	case 9	1.5%	3	–8	200

→ 일반 아스팔트 콘크리트와 PCM에 의해 개질된 아스팔트 콘크리트의 시간에 따른 온도 변화를 모사함. 이를 통해 최소온도 값과 그래프 상에서 온도차이에 의한 면적, 최소온도 도달 지연 시간에 대해서 검토됨.

→ 최소온도 값은 포장표면 최소온도에서 대기 온도를 감한 값임

$$\Delta T_{\min} = \min(T_{sur}^i) - T_{air}^i$$

→ 온도차이에 의한 면적은 대기온도에 의한 곡선과 표층온도곡선 사이의 면적으로 정의함

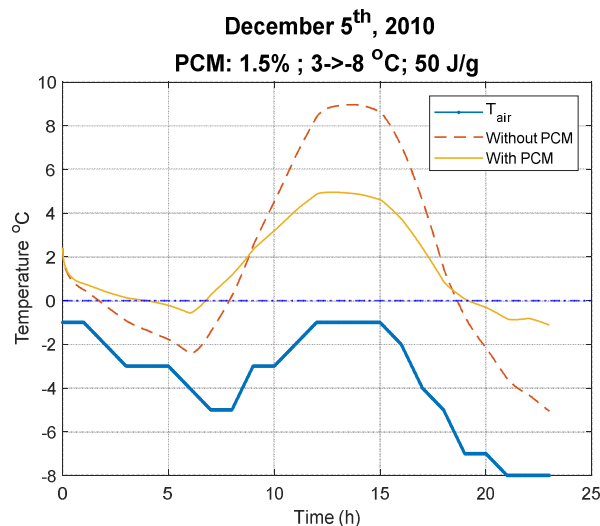
$$A_{\in c} = \sum (T_{sur}^i - T_{air}^i) \times \Delta t$$

→ 최소온도 도달 지연 시간(D_{mt})은 최소대기온도와 최소표층온도와의 지연시간임

→ 시험 결과는 아래 표와 같이 나타내었음

수치해석 결과

구분		$\Delta T_{\min} (^{\circ}\text{C})$	$A_{\in c} (^{\circ}\text{C} \cdot \text{h})$	$D_{mt} (\text{h})$
Control	case 0	0.14	36.19	1.12
상변화 물질 함량	case 1	1.78	67.76	1.65
	case 2	1.85	69.43	1.67
	case 3	2.86	72.33	2.56
상변화 온도	case 4	2.34	65.67	1.24
	case 5	2.22	63.34	1.98
	case 6	2.34	58.64	1.34
잠열 용량	case 7	2.92	73.45	2.65
	case 8	2.98	77.23	2.78
	case 9	2.97	79.34	2.89



Case 3의 온도반응

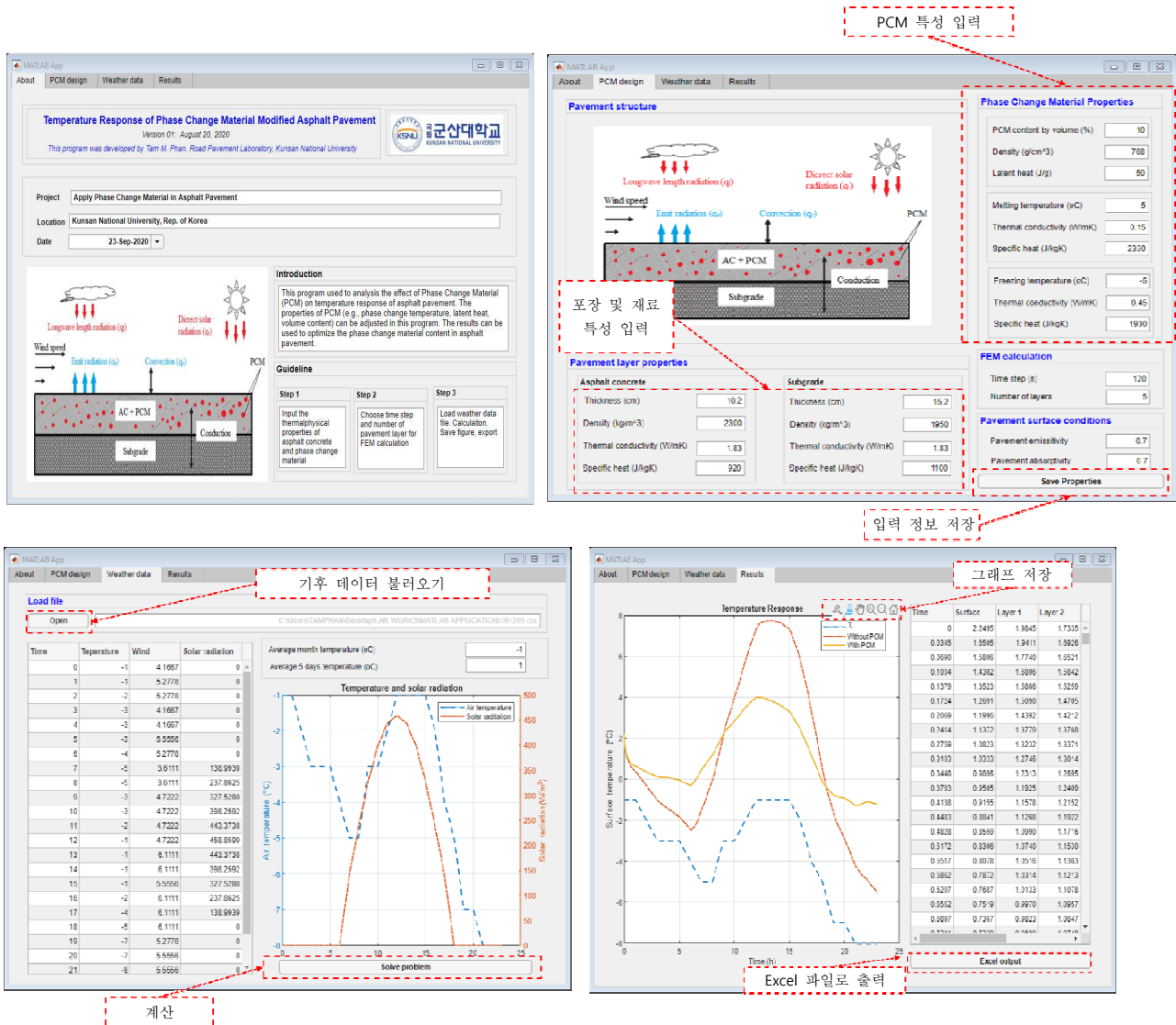
→ Case 3이 아스팔트포장에 대한 PCM효과를 나타내기 위하여 선정되었는데 동일한 PCM조건에도 불구하고 최소온도 값($\Delta T_{\min}$)이 2.86°C 이었으며, 온도차이에 의한 면적은 72.33°C.h, 블랙 아이스 생성지연은 약 2시간 30분임

- A-1-③ 블랙 아이스 지연용 상변화물질 및 함량 선정

▪ PCM optimum design tool

→ 개발된 로직에 근거하여 Matlab을 활용한 PCM 최적설계 프로그램을 을 활용하여 개발하였음

- 개발된 프로그램의 기능은 다음과 같음
- 이 프로그램은 블랙 아이스 생성지역의 PCM 아스팔트 포장 온도 반응을 계산하는데 사용이 가능함
- 아스팔트 포장 배합설계 시 최적의 PCM 종류와 양을 결정하는데 사용이 가능함(PCM content, latent heat, melting and freezing temperature)
- 아스팔트 포장 온도조절을 하기 위한 PCM양 조절을 가능하게 함
- 모든 결과는 엑셀에 저장이 가능함



PCM 최적설계 프로그램

○ (A-2) 아스팔트와의 혼합 성능 평가

- A-2-① 점성 평가

- 회전 점도계(Rotational Viscometer)를 이용한 아스팔트의 점도 시험 방법
 - 회전 점도계는 전동기에 의해 원통형의 스피ndl을 135℃의 아스팔트 시료 속에서 회전시켜 스피ndl이 일정한 회전 속도(20r/min)를 유지하는 데 필요한 점성토크(torque)를 측정하는 것임
- 시료 준비
 - 시제품으로 개발된 재료 중 다공성 물질을 사용한 상변화 물질을 준비된 아스팔트의 중량 대비 5% 비율로 혼합하여 시료를 잘 혼합하여 100ml 비커에 약 30g을 옮김
 - 비커를 측정 온도 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 에서 30분 동안 가열함. 동시에 시료 용기와 스피ndl도 가열함.
- 점도 시험
 - 시험은 [KS F 2392 : 회전 점도계를 이용한 아스팔트의 점도 시험 방법]에 따라 실시함

- 준비된 시료 용기를 온도 용기에 설치하고 회전 점도계에 스펀들을 연결하여 정해진 위치까지 서서히 내리며 회전 점도계가 수평으로 되고 또한 스펀들이 시료 용기의 중심에 있도록 함
- 이 상태에서 30분간 방치하고, 시료 온도가 시험 온도에 도달하고 있는 것을 확인한 후, 스펀들을 회전하여 지시값이 안정된 후 지시값의 눈금을 1분 간격으로 3회 읽음
- 각각 다른 시료를 사용하여 3회 측정함

▪ 점도 시험 결과

- 시험 결과, 점도가 500cP(0.5Pa·s)로 일반적인 아스팔트 점도 기준인 3000cP(3Pa·s) 미만으로 상변화물질의 사용이 아스팔트 점도에 영향에 안좋은 영향을 미치지 않아 작업성에 영향을 주지 않는 것으로 판단됨

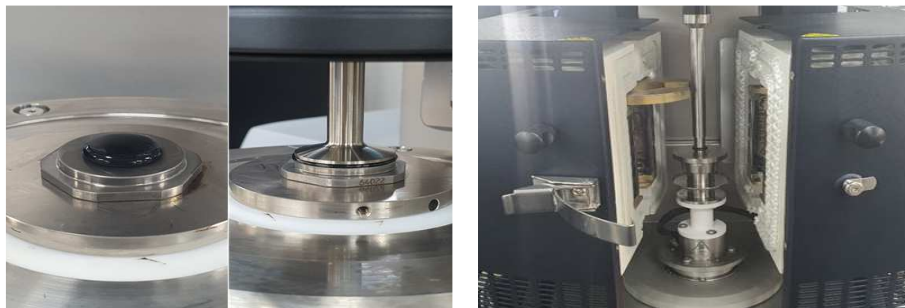
- A-2-② 피로균열 및 온도균열 저항성 평가

▪ 복합전단탄성계수 시험

- 아스팔트 바인더의 복합전단탄성계수(Complex shear modulus : G^*) 및 위상각(Phase angle : ϕ) 등 매개변수와 같은 유변학적 특성을 측정하기 위해 동적 전단 시험을 수행함

▪ 시험 조건

- 2종류의 PCM 종류(CaCO_3 , SiO_2), 함량(전체 혼합물(바인더, PCM) 중량 대비 2.5, 7.5%)에 대하여 시험을 실시함
- 8종류의 온도 조건(0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70℃)에서 시험을 실시함
- 각 온도에 대한 주파수 범위는 0.1~20Hz임
- 저온(0~30℃)에서 직경 25mm 플레이트, 바인더 두께 1mm, 0.05%의 일정한 변형률 진폭
- 고온(40~70℃)에서 직경 8mm 플레이트, 바인더 두께 2mm, 0.1%의 일정한 변형률 진폭



아스팔트 바인더의 복합전단탄성계수 시험

▪ 계산

- 기준 온도(T_r)에서의 복합전단탄성계수 및 위상각의 마스터 곡선(Master curve)을 생성함
- 복합전단탄성계수와 위상각의 마스터 곡선은 각각 식 (11), 식(12)로 표현됨
- 특정 온도에서의 복합전단탄성계수 및 위상각을 기준 온도에 대한 마스터 곡선으로 전환하기 위하여 시간-온도 이동 계수(a_T)가 사용됨
- 시간-온도 이동 계수(a_T)는 식(13)의 Williams-Landel-Ferry(WLF) 관계식을 기초하여 계산됨

$$\log|G_f^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \times \log(f \times a_T)}} \quad (11)$$

$$\phi_f = -\frac{\frac{\pi}{2} \times \alpha \times \gamma \times e^{\beta + \gamma \times \log(f \times a_T)}}{\left[1 + \lambda \times e^{\beta + \gamma \times \log(f \times a_T)}\right]^{\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)}} \quad (12)$$

$$\log \alpha_T = -\frac{C_1 \times (T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (13)$$

여기서,

- G_f : 각 주파수에 대한 복합전단탄성계수
 ϕ_f : 각 주파수에 대한 위상각
 f : 하중 주파수(Hz)
 $\delta, \alpha, \beta, \gamma, \lambda$: 피팅 매개변수
 α_T : 시간-온도 이동 계수
 T : 시험 온도 (°C)
 T_r : 기준 온도 (°C)
 C_1, C_2 : 피팅 매개변수

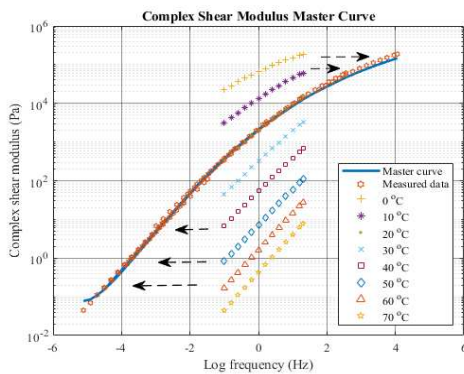
- 본 연구에서는 복합전단탄성계수 및 위상각의 마스터 곡선을 생성하기 위해 기준 온도를 20°C로 함
 → MaTLAB의 optimization toolbox 기능을 사용하여 오차의 최소 합으로 여러 모델의 매개변수 ($\delta, \alpha, \beta, \gamma, \lambda, C_1, C_2$)를 결정함
 → 오차의 합(Sum of Error : SE)은 식 (14)를 참조함

$$SE = Error_G + Error_\phi$$

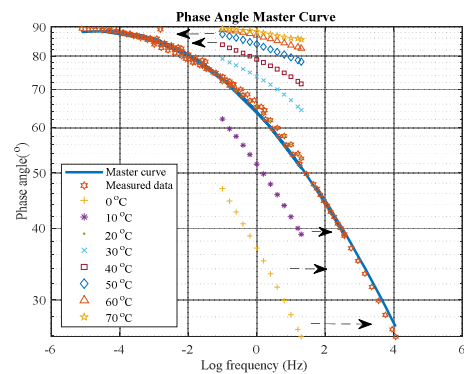
$$SE = \sum_{i=1}^N \left[\left(G_{m,i}^* - G_{p,i}^* \right)^2 + \left(\phi_{m,i} - \phi_{p,i} \right)^2 \right] \quad (14)$$

여기서,

- SE : 오차의 합
 N : 측정 데이터의 수
 $G_{m,i}^*$: 1번째 지점에서 측정된 복합전단탄성계수
 $\phi_{m,i}^*$: 1번째 지점에서 측정된 위상각
 $G_{p,i}^*$: 1번째 지점에서 예측된 복합전단탄성계수
 $\phi_{p,i}^*$: 1번째 지점에서 예측된 위상각



복합전단탄성계수의 마스터 곡선



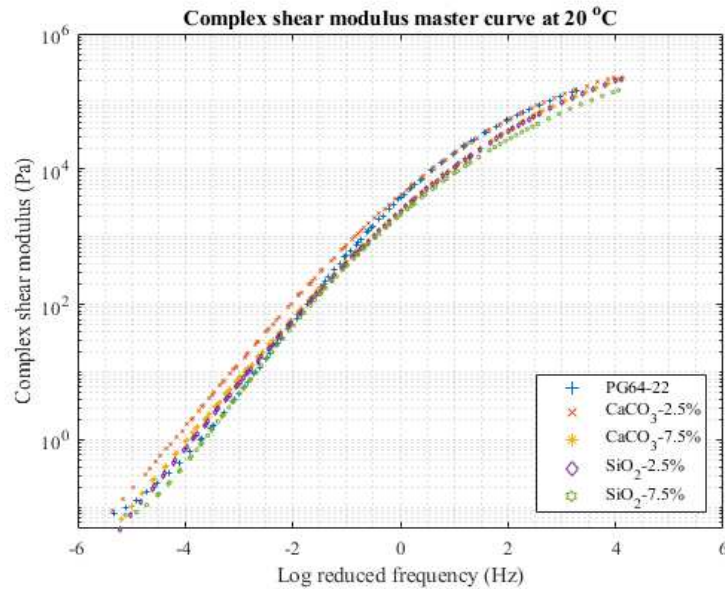
위상각의 마스터 곡선

■ 결과

- 각각의 예측된 매개변수는 아래 표와 같음

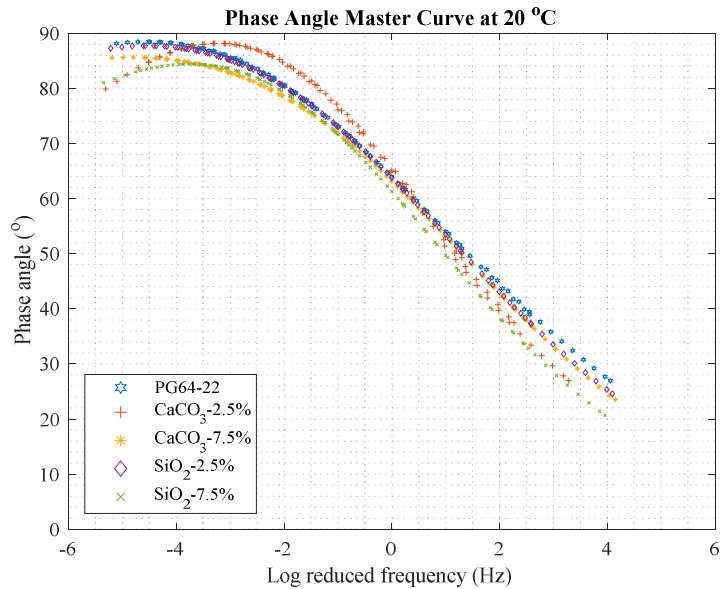
Mix types	δ	α	λ	β	γ	C_1	C_2	SE
PG 64-22	11.59	7.40	0.18	-0.99	-0.42	36.67	191.26	1.12
CaCO ₃ - μ PCM-2.5%	14.15	20.19	4.61	-1.75	-0.39	17.44	146.55	1.26
CaCO ₃ - μ PCM-7.5%	13.79	19.13	3.86	-1.41	-0.43	13.58	115.06	1.15
SiO ₂ - μ PCM-2.5%	7.53	13.89	1.36	-1.75	-0.39	17.14	123.15	1.13
SiO ₂ - μ PCM-7.5%	6.00	12.51	0.71	-1.11	-0.29	15.46	134.04	1.21

→ 기준 온도 20℃에서 복합전단탄성계수의 마스터 곡선은 아래 그림과 같음



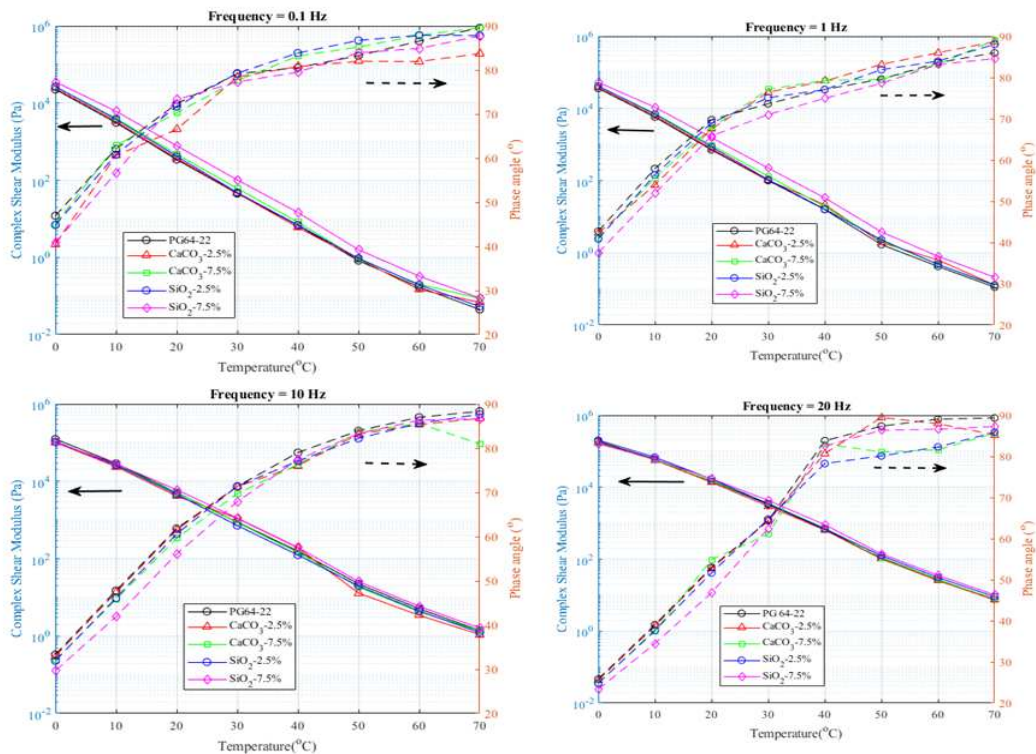
기준온도(20℃)에서의 복합전단탄성계수 마스터 곡선

- 전반적으로 PCM을 포함한 아스팔트는 대조군에 비해 저온 또는 고주파에서 더 낮은 복합전단탄성계수값을 나타냄
- SiO₂가 7.5% 첨가된 경우 고주파수(저온)에서 가장 낮은 복합전단탄성계수 값을 나타냄
- 이를 통해 PCM이 첨가된 경우 방출되는 잠열이 아스팔트의 온도를 증가시켜 아스팔트의 복합전단탄성계수를 감소시키는 것으로 판단되며, 이는 아스팔트의 균열 저항성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단됨
- 온도가 상승하면 CaCO₃가 7.5% 첨가된 아스팔트가 가장 높은 복합전단탄성계수를 보여 러팅 저항성이 향상될 것으로 판단됨
- 위상각의 마스터 곡선은 아래 그림과 같이 나타남



기준온도(20℃)에서의 위상각 마스터 곡선

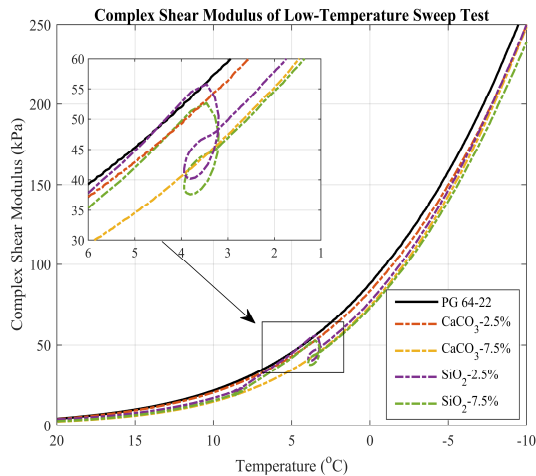
- 위상각은 점도와 탄성의 비율을 나타내는 지표로 PCM이 첨가된 혼합물은 고주파 또는 저온에서 대조군 혼합물보다 낮은 위상각을 나타냄
- 낮은 위상각은 점성이 비교적 작아 저온균열의 발생을 억제할 것으로 판단됨
- 아래의 그림은 다양한 하중 주파수에서의 복합전단탄성계수와 위상각을 나타냄



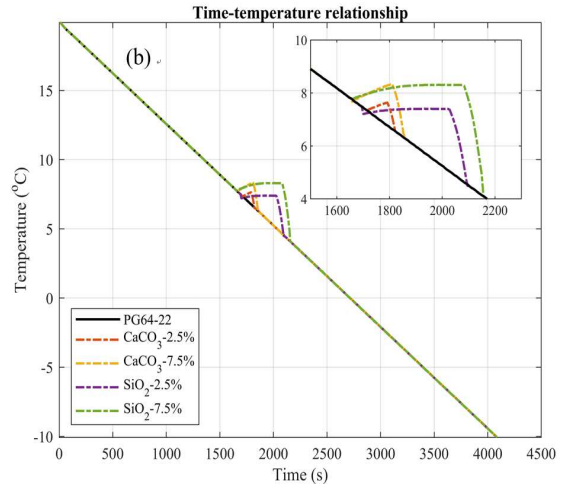
다양한 하중 주파수에서의 복합전단탄성계수 및 위상각

- 전반적으로 온도가 상승하면 위상각이 증가하는 반면 복합전단탄성계수는 감소함
- 저온(0~10℃)에서 아스팔트는 점탄성 거동을 나타내고 PCM이 첨가된 아스팔트는 일반 PG 64-22 아스팔트 보다 복합전단탄성계수가 더 낮음
- 특히 SiO₂-7.5% 혼합물이 저온영역대에서 가장 낮은 복합전단탄성계수 값을 나타내며 이는 앞서 설명한 것과 같이 잠열에 의한 효과로 판단됨
- 고온(60~70℃)과 낮은 주파수에서 PCM이 첨가된 혼합물이 대조군 아스팔트 보다 복합전단탄성계

수 값을 나타냄. 이는 PCM의 상전이가 저온(0~6℃)에서 일어났기 때문에 판단됨

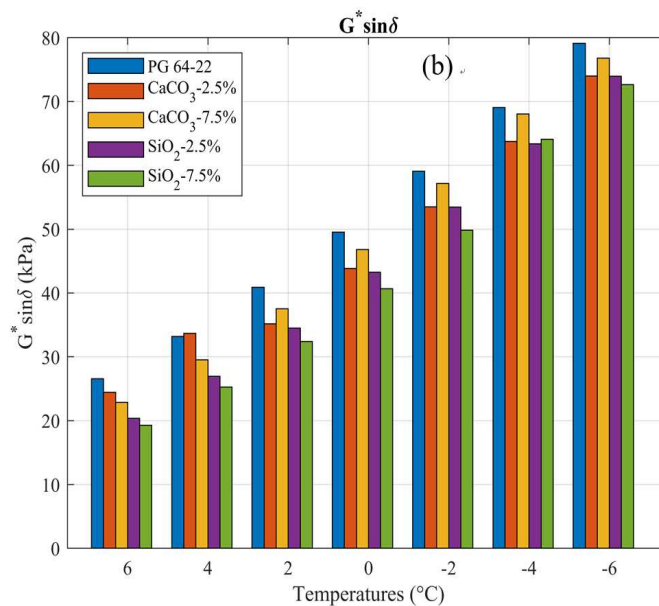


시험 온도 감소에 대한 복합전단탄성계수 변화



시험 온도 감소 시 시료 온도 변화

- 위의 그래프는 냉각 과정 시 발생하는 복합전단탄성계수의 변화 및 시료의 온도 변화를 측정한 것으로 온도를 20℃에서 -10℃로 감소시키며 시험함
- 두 종류의 PCM 모두 일반적인 아스팔트 바인더보다 낮은 복합전단탄성계수를 보였으며, SiO₂는 불연속적인 곡선을 나타냄
- 시험 온도가 4℃에 도달하였을 때 복합전단탄성계수 값이 55kPa에서 40kPa로 급변하며 잠열을 방출하여 시료의 온도를 약 1.5℃ 증가시킴
- 아래 그래프는 $G^* \sin \delta$ 값을 통하여 저온 균열에 대한 저항성을 평가하였으며, 일반적으로 $G^* \sin \delta$ 값이 낮을수록 저온 균열에 대한 저항성이 강한 것으로 판단됨
- 6, 4, 2, 0, -2, -4, -6에 대한 $G^* \sin \delta$ 값을 계산하여 평가하였으며, SiO₂ PCM을 7.5% 사용한 경우 저온 균열 저항성이 가장 좋은 것으로 판단됨



아스팔트의 저온 균열 저항성 평가

- A-2-③ 온도 성능 평가

- PCM이 아스팔트 혼합물의 온도에 미치는 영향

→ 상변화물질(PCM)이 아스팔트 포장에 미치는 영향을 분석하였고, 적외선카메라를 이용하여 표면의 온도를 측정하였음

■ 시료 준비

- 3종류의 PCM 함량(전체 혼합물 중량 대비 0.5, 1.0, 1.5%)
- 60초 동안 PCM을 골재와 혼합한 후 60초 동안 아스팔트와 혼합함
- 직경 100mm, 높이 62.5mm, 공극률 7%의 공시체 제작



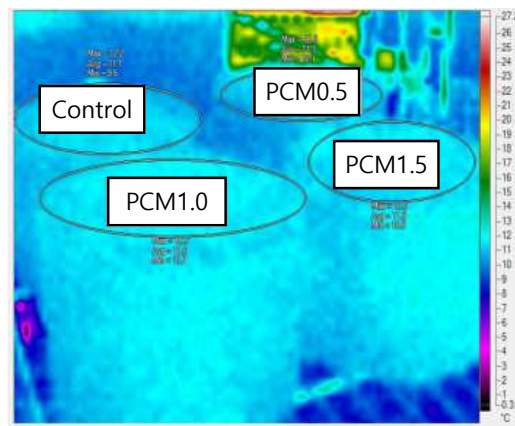
시료 준비

■ 온도 시험

- 모든 시료는 6시간 동안 10℃에서 보관됨
- 적외선 카메라를 시료 30cm 위에 설치하고 1분마다 온도를 측정함
- 냉각과정에서 온도는 10시간동안 10℃에서 -10℃로 냉각하고, 2시간동안 -10℃로 유지함



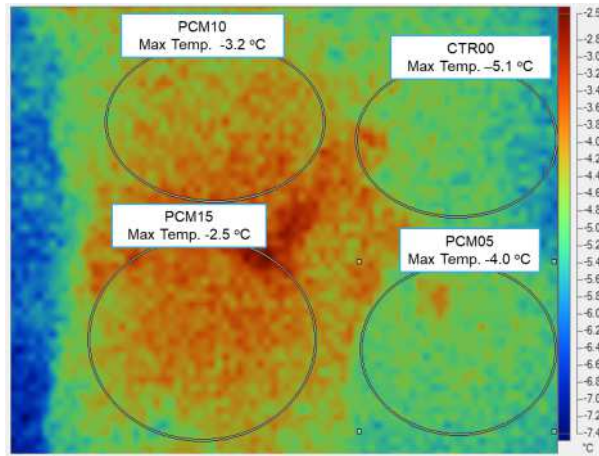
적외선 카메라 위치



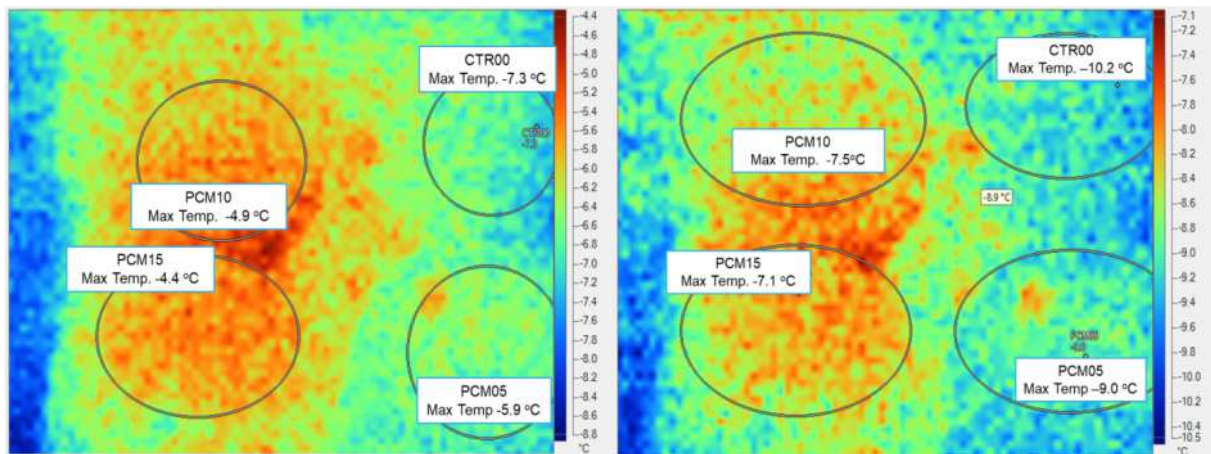
10℃에서 6시간 보관 후 공시체 상태

■ 온도 시험 결과

- -5℃에서 0.5% PCM이 혼합되어 있는 아스팔트 혼합물 시료는 1℃ 높아 일반 아스팔트 혼합물과 유사한 경향을 보였음. 반면에 1% PCM과 1.5% PCM이 혼합되어 있는 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물과 비교하여 2~3℃ 높았음
- -7.5℃에서 1% PCM과 1.5% PCM 시료(PCM10, PCM15)는 일반아스팔트 혼합물보다 약 3~3.5℃ 정도 높았으며 이는 PCM이 열을 방출한 것으로 볼 수 있음
- -10℃에서 1.5% PCM(PCM15) 시료는 일반 아스팔트 혼합물보다 2.5℃ 높았음



시료 온도(-5℃)



시료 온도(-7.5℃)

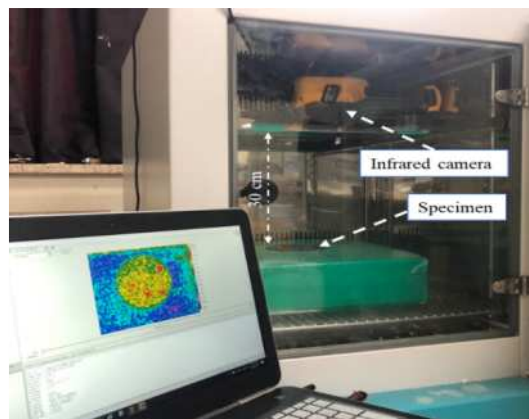
시료 온도(-10℃)

■ 시험을 통한 모델 검증

- 모델의 검증을 위하여 1차원 열흐름 시험을 모사하여 모델을 검증하였음
- 1차원 열흐름을 모사하기 위하여 시료의 밑면과 옆면을 단열처리 하였음
- 적외선 카메라를 30cm 높이에 설치하였으며, 2분마다 온도 기록
- 온도냉각챔버를 10℃에서 -10℃로 냉각하고 10℃로 다시 가열.

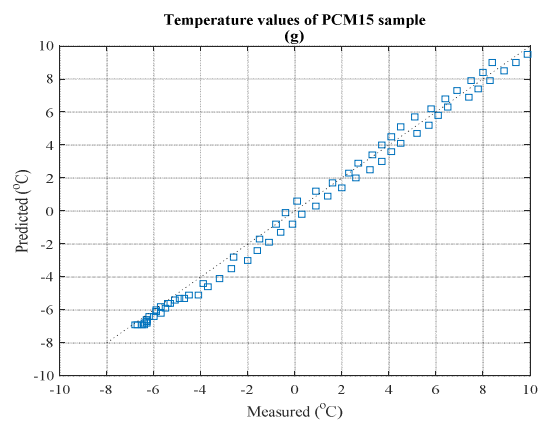
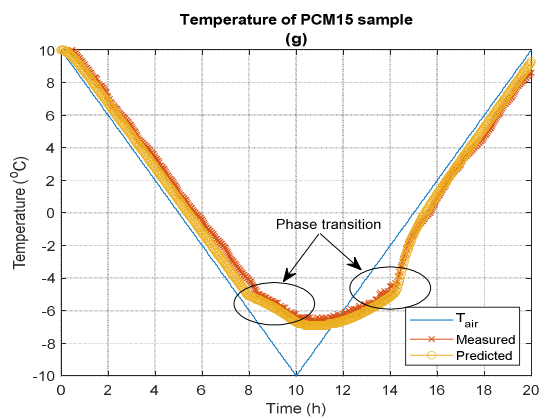
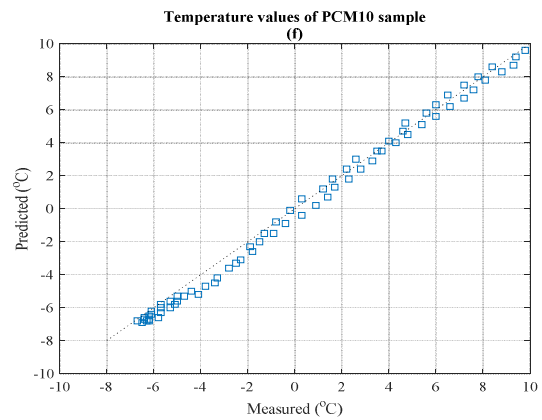
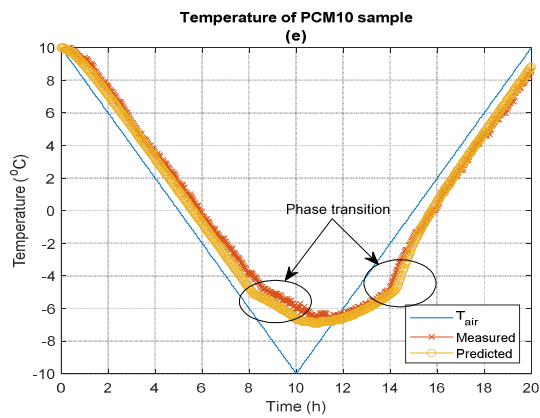
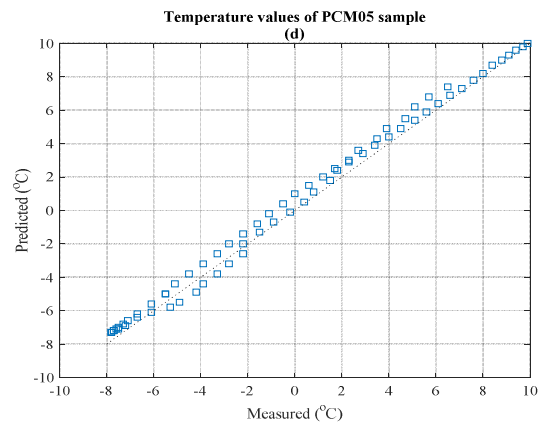
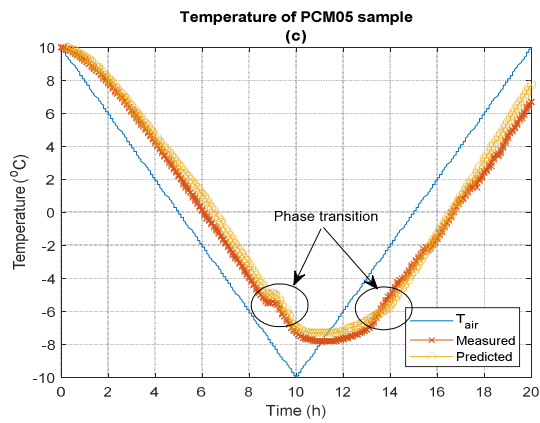
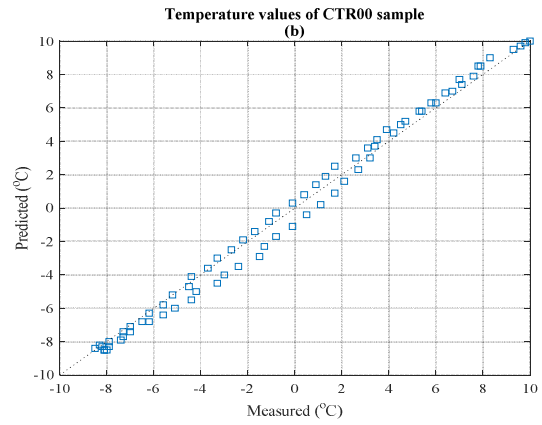
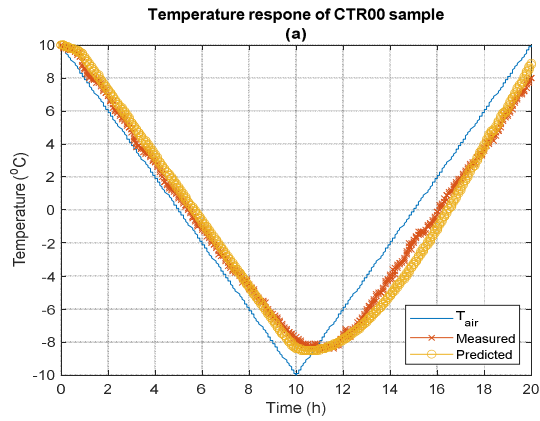


적외선 카메라



온도냉각챔버를 사용한 열 전달 시뮬레이션

- 온도측정과 예측결과는 아래 그림에 보듯이 일치도가 매우 높았음
- 1.0~1.5 % PCM을 포함한 아스팔트 포장온도를 약 3℃정도 높게 하였으며, 이는 블랙 아이스 생성을 지연시키는 결과로 이루어졌음



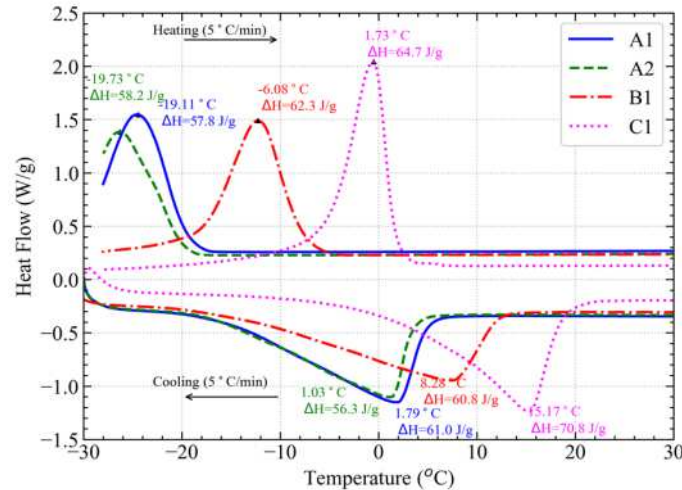
아스팔트 콘크리트 시료의 예측 및 측정된 온도

○ (B-1) 아스팔트 혼합물 성능 평가

▪ 아스팔트 혼합물 개요

→ 아스팔트 혼합물 성능 평가를 위하여 개발된 4종류의 상변화물질(PCM)을 첨가한 아스팔트 혼합물을 제작함

- PCM은 n-Tetradecane과 실리카의 비율의 차이에 의해 만들어짐
- 합성된 PCM은 1~7 μm 범위의 직경을 가진 구체이고 열안정성(잔류중량)은 160℃에서 95% 이상을 보임
- A1, A2 PCM의 상변화 온도는 각각 1.03, 1.79℃이며, B1과 C1은 각각 8.28℃ 및 15.17℃에서 상변화가 일어남
- PCM 4종류의 엔탈피 범위는 56~72J/g임



PCM의 상변화 온도

- B-1-① 다짐성 평가

- 시험방법
 - 아스팔트 혼합물은 선회다짐기를 사용하여 다짐함
 - 다짐과정에서 다짐에너지지수(Compaction Energy Index : CEI) 및 작업성에너지지수(Workability Energy Index : WEI)를 계산하기 위해 시료의 높이와 회전수를 기록함
 - 혼합물의 작업성은 혼합물을 92%의 Gmm으로 다짐하는데 필요한 에너지를 정의하는데 사용됨
 - 느슨한 상태에서 92%의 Gmm까지 다짐하기 어려운 혼합물은 더 많은 다짐횟수가 필요하므로 WEI가 낮게 나타나고 WEI가 클수록 작업성이 좋음

$$WEI = \frac{\pi d^2 / 4 \times P \times (h_0 - h_{92\%})}{N_0 - N_{92\%}} (N.m)$$

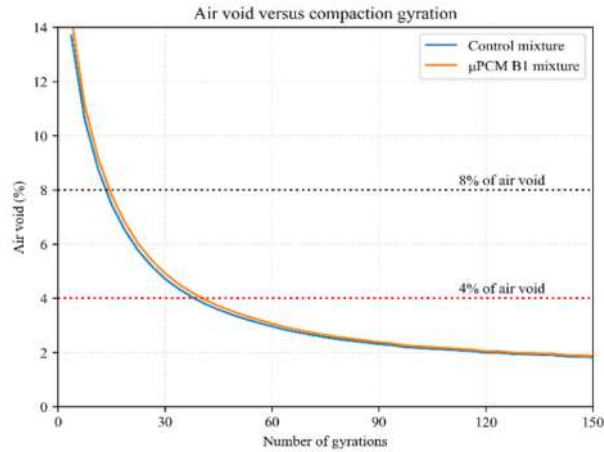
여기서,

- d : 시료 직경(m)
- P : 다짐 압력(Pa)
- h : 다짐 동안의 시료 높이
- N : 회전수

- CEI는 시료의 밀도가 92%에서 96%까지 다짐되는데 필요한 에너지를 평가하고 공용중 압축성을 평가함
- CEI가 낮을수록 공용중 소성변형 저항성이 큼

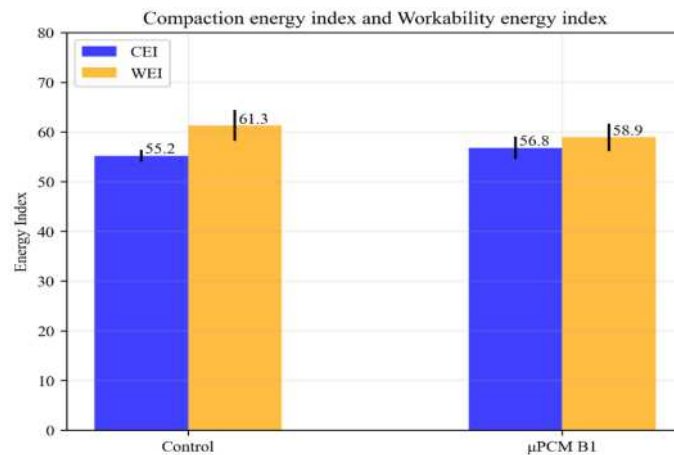
$$CEI = \frac{\pi d^2 / 4 \times P \times (h_{92\%} - h_{96\%})}{N_{92\%} - N_{96\%}} (N.m)$$

- 시험결과
 - 아래 그림과 같이 공극률과 회전수 측면에서 일반 아스팔트 혼합물과 PCM이 첨가된 아스팔트 혼합물 사이에 큰 차이가 없는 것으로 나타남



다짐 시 회전수 및 공극률

- 작업성을 고려하였을 때 일반 아스팔트 혼합물의 에너지 지수가 PCM 혼합물보다 높게 나타나나 큰 차이는 없음
- CEI는 일반 아스팔트 혼합물이 55.2, PCM 혼합물이 56.8로 일반아스팔트가 소성변형 저항성이 클 것으로 보이나 큰 차이는 없음

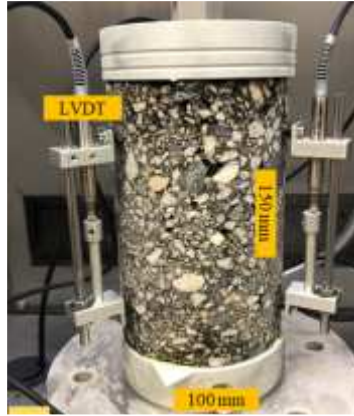


아스팔트 혼합물의 CEI 및 WEI

- B-1-② 동탄성계수 측정

■ 시험방법

- 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 측정을 실시하기 위해 공시체를 제작하고 시험을 실시함
- 시료는 선회다짐기를 사용하여 높이 150mm의 원통형 시료를 공극률 $7 \pm 1\%$ 로 조절하여 다짐하였으며, 직경 100mm 높이 150mm에 맞게 성형하여 각 배합당 3개의 원통형 시료를 준비함
- 시험 설명서 AASHTO TP T342-11을 통해 4°C , 21°C , 37°C 등 최소 3가지 시험온도 조건을 선택함
- 각 시험온도 조건에서 최고에서 최저까지 6개의 하중 주파수(25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0.5Hz, 0.1Hz)를 적용함

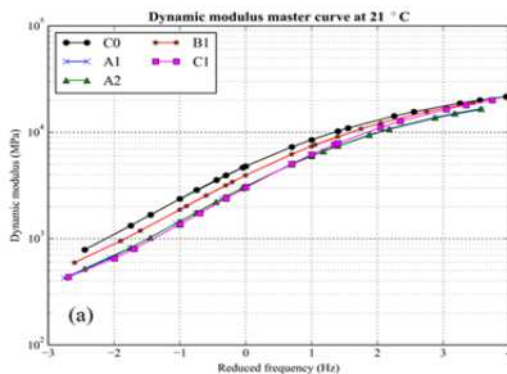


동적 탄성 계수 시험

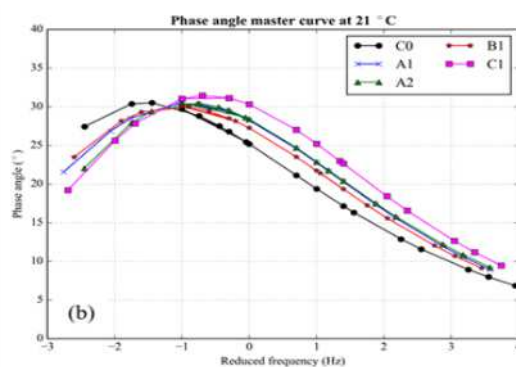
→ 동탄성계수 및 위상각의 마스터 곡선은 앞선 아스팔트 바인더의 계산식과 동일하게 식 (11), (12), (13)에 따라 나타내며, 시간-온도 중첩의 원리에 의해 산출됨

■ 시험결과

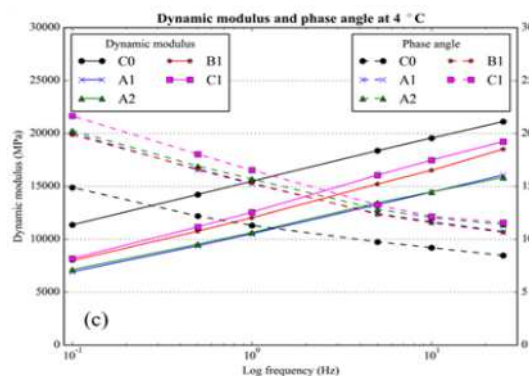
- 기준 온도 21℃에서 아스팔트 혼합물의 동탄성계수와 위상각의 마스터 곡선을 나타냈으며, 저주파 고온 조건에서 일반 아스팔트 혼합물의 위상각은 PCM 혼합물보다 높게 측정되었음
- 또한, 주파수가 높아지고 온도가 낮아지면 PCM 혼합물의 위상각이 높게 측정됨
- PCM 혼합물이 저온 조건에서 동탄성계수와 위상각에 미치는 영향을 명확히 파악하기 위해 다양한 주파수 조건에서 4℃의 온도 조건의 동탄성계수를 나타냄
- 4℃ 온도 조건에서 PCM 혼합물 중 특히 A1, A2 혼합물의 동탄성계수가 작게 측정되었으며, 이는 1 ~ 2℃의 열에너지를 방출하는 PCM의 상전이 과정이 영향을 미치는 것으로 판단됨
- 일반 아스팔트 혼합물은 모든 PCM 혼합물보다 가장 낮은 위상각을 나타냄. 이는 PCM 함량이 아스팔트 혼합물의 강성을 감소시키며, 저온(4℃)에서 위상각을 증가시키는 것을 알 수 있음



동탄성계수 마스터 곡선(21℃)



위상각 마스터 곡선(21℃)



동탄성계수 및 위상각 시험 결과(4℃)

▪ 피로균열 저항 지수 시험(IDEAL-CT, CT Index)

▪ 시험방법

- 아스팔트 혼합물의 균열 저항성을 구하기 위해 DTS-30(Dynamic Testing System 30k) 장비를 사용하여 IDEAL 피로균열 저항 시험(IDEAL-CT)을 수행하였고 시험결과를 이용하여 CTindex를 계산함
- 최적의 PCM 함량을 구하여 혼합물의 중량 대비 1.5%, 2.5%의 최적배합비를 통해 선회다짐기를 사용하여 직경 150mm, 높이 62.5mm의 원통형 시료를 공극률 $7\pm1\%$ 로 다짐하였으며, 각 배합당 3개 이상의 시료를 준비함
- 낮은 온도에서 PCM 함량이 아스팔트 혼합물의 균열 저항성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 시험 온도는 4°C 를 선택함
- 시험과정에서 하중-변위를 모니터링 및 기록하였으며, Fujie 등의 연구를 바탕으로 아래 식을 사용하여 균열 저항 지수(CTindex)를 산출함

$$CT_{Index} = \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \left(\frac{l_{75}}{D} \right) \quad (15)$$

여기서,

$$m_{75} = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right|$$

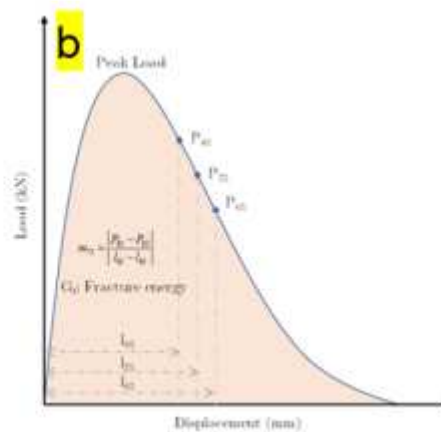
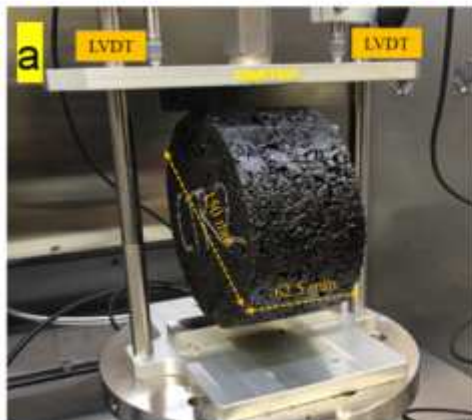
G_f : 파괴에너지 (J/mm^2)
 P_x : 최대 하중 이후 하중이 최대 하중의 $x\%$ 일 때의 하중 (N)
 l_x : 최대 하중 이후 하중이 최대 하중의 $x\%$ 일 때의 변위 (mm)

- 간접인장강도(ITS)를 고려하여 아래 식을 사용하여 간접인장강도(ITS)를 산출함

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (16)$$

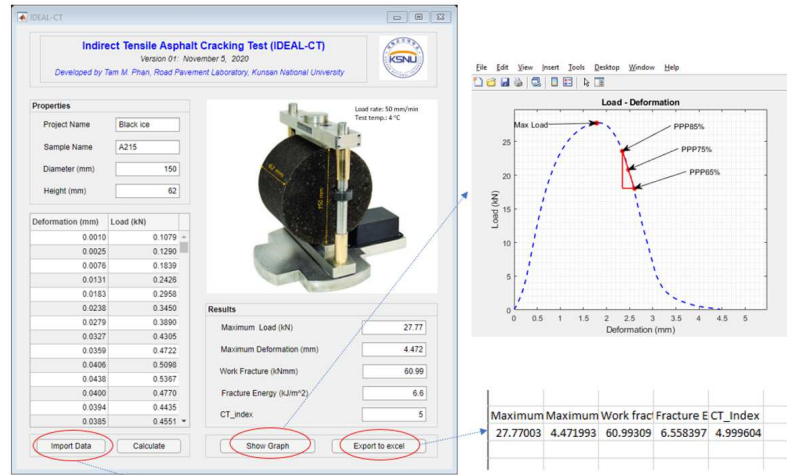
여기서,

ITS : 간접인장강도 (N/mm^2)
 P : 최대하중 (N)
 t : 시료 두께 (mm)



(a) IDEAL-CT 시험 (b) 하중-변위 곡선

- 다음 그림과 같이 균열 저항 지수(CTindex)를 산출하기 위해 IDEAL-CT 계산 프로그램을 개발함

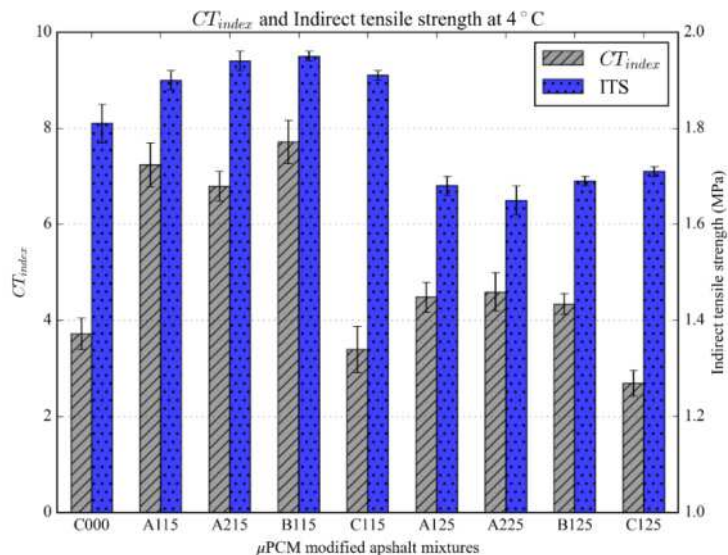


Import data via excel file (*.xlsx, *.csv)

IDEAL-CT 계산 프로그램

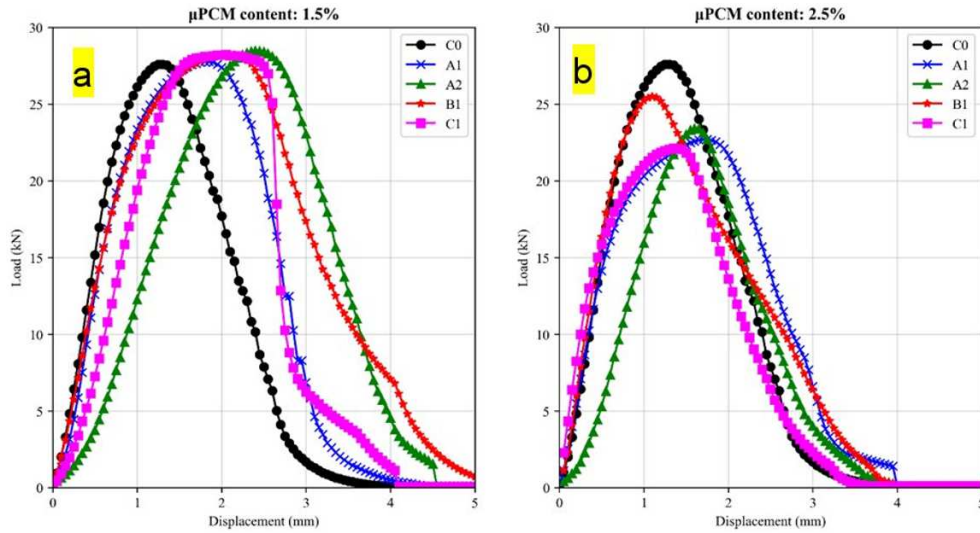
■ 시험결과

- PCM을 포함한 아스팔트 혼합물의 균열 저항 지수(CTindex)와 간접인장강도(ITS)는 다음 그림과 같음
- PCM 함량 1.5%를 첨가한 A115, A215, B115, C115 혼합물이 다른 혼합물보다 균열 저항 지수가 높음
- 4가지 PCM 중 B1 혼합물이 7.88로 가장 높은 수치를 나타내며, A1과 A2 혼합물이 각각 7.54, 7.21로 높게 측정됨
- 시험온도 4°C에서 PCM 함량 1.5% 혼합물의 간접 인장 강도(ITS)가 크게 측정되며, B115 혼합물이 1.91MPa로 가장 높은 간접 인장 강도를 나타냄



CTindex 및 ITS 시험 결과(4°C)

- 다음 그림은 PCM 함량 1.5%를 포함한 아스팔트 혼합물의 하중-변위 곡선을 나타내며 일반 아스팔트 혼합물보다 PCM 혼합물이 연성을 나타내는 것을 볼 수 있음.
- 또한, PCM 함량 2.5%를 포함한 혼합물의 하중-변위 곡선은 일반 아스팔트 혼합물과 비슷한 경향을 나타냄



하중-변위 곡선 (a) PCM 함량 1.5% (b) PCM 함량 2.5%

■ 아스팔트 혼합물의 피로 균열 저항성

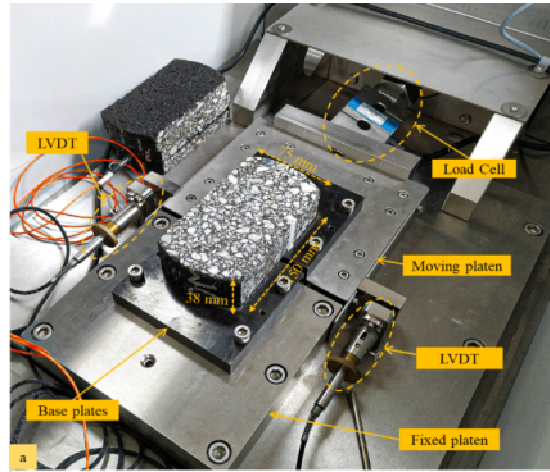
■ 시험방법

- 아스팔트 혼합물의 피로 균열 저항성은 아스팔트 혼합물의 피로 및 반사균열 시험이 가능한 OT(Overlay Tester) 장비를 사용하여 평가됨
- 아스팔트 혼합물의 피로 균열 저항성을 평가하기 위해 저온에서의 단순하중 재하시험을 실시함
- 시료는 선회다짐기를 사용하여 직경 150mm의 원통형으로 공극률 $7 \pm 1\%$ 로 다짐하였으며, 시험에 적합한 공시체 크기인 길이 150mm, 폭 75mm, 높이 38mm로 성형함
- 시험은 $4 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 분당 3.375mm의 속도로 변위를 제어하여 시험하였으며, 최대 변위는 3.375mm임
- 시료의 최대 하중 대비 99% 감소하였을 때 하중 재하를 종료함
- 시험을 통해 하중-변위 곡선 및 CFE(Critical fracture energy index : 임계 파괴 에너지 지수) 값을 계산하였으며, 하중-변위 곡선은 시료의 인장 강도를 계산하는데 사용함
- CFE는 하중-변위 곡선의 아래 면적에 해당하며, 인장 강도는 아래 식과 같이 최대 하중을 단면적으로 나눈 값임

$$\sigma_t = \frac{P_{\max}}{t \times w} \quad (17)$$

여기서,

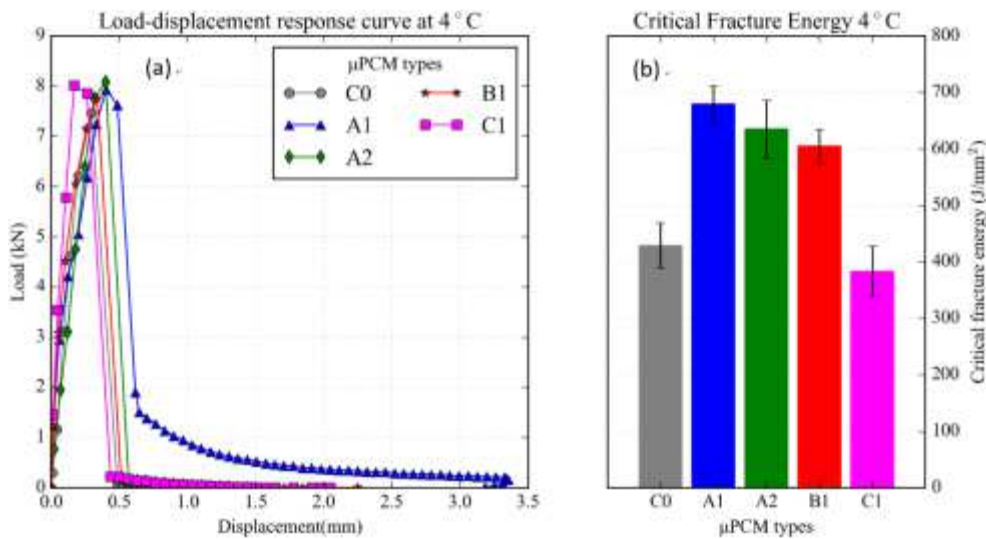
- σ_t : 인장 강도 (N/mm^2)
- $P_{\max}$: 최대하중 (N)
- t : 시료 두께 (mm)
- w : 시료 너비 (mm)



피로 및 반사균열 시험 장비

■ 시험결과

- 일반적으로 파괴에너지(CFE)값이 클수록 초기 균열 발생까지 필요한 에너지가 커짐
- 아래 그림과 같이 A1 혼합물이 가장 연성을 보임
- CFE값의 경우 C0 혼합물이 423J/mm^2 이고 A1 혼합물이 689J/mm^2 로 매우 높은 CFE값을 보임
- C1 혼합물이 389J/mm^2 으로 가장 낮은 CFE값을 나타내었으며, 이는 IDEAL-CT 시험에서 얻은 결과와 일치함



단순 하중 재하 시험 결과

- B-1-④ 수분민감성 평가

■ 시험방법

- 아스팔트 혼합물의 수분민감성 평가를 위해 동결-융해(Freezing-Thawing) 저항성 시험을 실시함
- 시료의 크기는 직경 100mm, 높이 62mm, 공극 $7\pm 1\%$ 로 선회다짐기를 이용하여 다짐함
- 동결-융해 과정은 -18°C 에서 24시간 동결 후 24°C 에서 24시간 융해함
- 또한, 간접인장강도 시험 전에 60°C 의 수조에서 2시간 동안 수침 후 수행함
- 간접 인장 강도 시험은 25°C 에서 50.8mm/min 의 재하속도 조건에서 수행되며, 시험과정에서 하중-변위를 측정함



동결-융해 및 간접인장강도 시험과정

→ 시료의 간접 인장 강도(ITS)는 다음 식으로 산출함

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi D t} \quad (18)$$

여기서,

ITS : 간접인장강도 (N/mm^2)

P : 최대 하중 (N)

D : 지름 (mm)

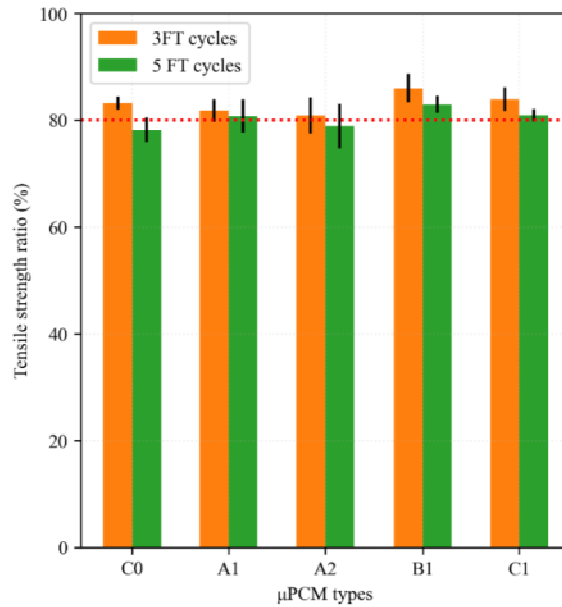
t : 시료 두께 (mm)

→ 시료의 인장강도비(TSR)는 다음 식으로 산출됨

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \quad (19)$$

■ 시험결과

- 동결-융해 주기가 증가할수록 간접 인장 강도(ITS) 및 인장강도비(TSR)가 감소하는 것으로 나타났음
- 4종류의 PCM 혼합물과 일반 아스팔트 혼합물 중에서 B1 혼합물이 3회 및 5회 동결-융해 이후 각각 88%, 83%로 가장 높은 인장강도비(TSR)를 나타냄
- 한편, 5회 동결-융해 주기 후 일반 아스팔트 혼합물의 인장강도비(TSR)는 80% 미만으로 가장 낮은 수치를 나타냄

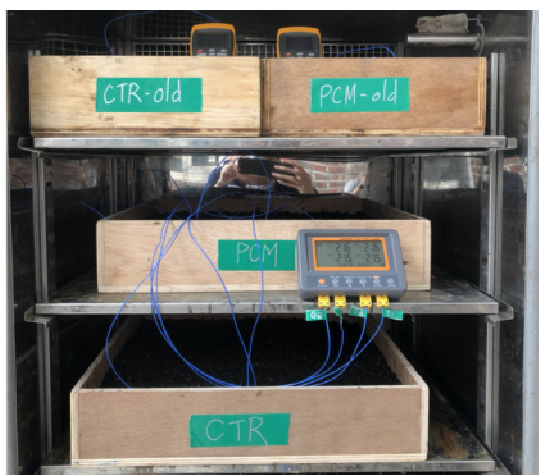


동결-융해 후 인장강도비(TSR)

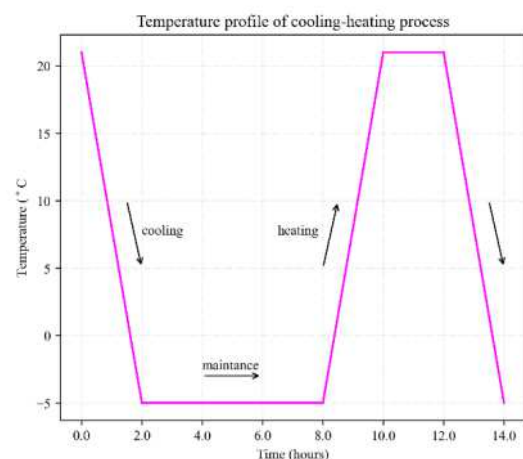
○ (B-2) 실내실험실 입증

▪ 시험방법

- 실제 실외 조건을 조성하여 장기간 노출된 PCM 혼합물의 잠열(latent heat) 효과의 활성도를 비교 분석하기 위해 수행함
- PCM의 장기 효과를 평가하기 위하여 2021년도 1월 30일부터 7월 1일까지 약 6개월간 실외 시험을 수행한 두 개의 아스팔트 혼합물을 일반 아스팔트 혼합물은 CTR-old, PCM 혼합물을 PCM-old로 표기하고 두 개의 새로운 아스팔트 혼합물(CTR-new, PCM-new)을 준비함
- 크기는 50×50×5cm, 공극률은 7±1%인 박스형 슬래브를 제작하고 Thermocouple을 표면에서 10cm 깊이에 매립함
- 48시간 동안 시료의 온도 반응을 모니터링 및 기록하여 Thermocouple의 기능을 확인함
- 다음 그림과 같이 모사 실외 조건은 냉각 인큐베이터에서 단계별로 냉각-가열의 주기를 통해 모니터링 및 기록하였음
- 냉각-가열 단계
 - 1단계 : 21℃에서 -5℃로 2시간 동안 일정하게 감소 후 6시간 동안 유지
 - 2단계 : 21℃까지 2시간 동안 일정하게 가열
 - 3단계 : 13℃/hr의 온도 변화 속도로 -5℃까지 감소

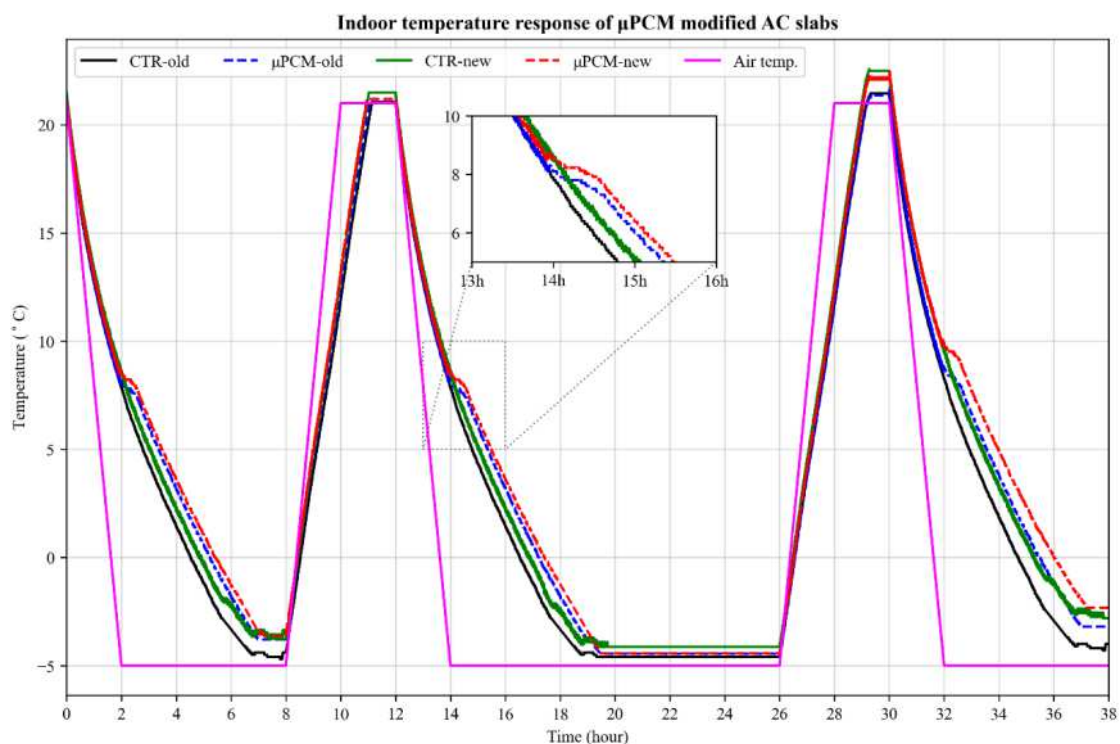


실내 시험 조성



냉각-가열 프로파일

- 온도 반응 곡선에서 아스팔트 혼합물 PCM-old와 PCM-new 모두 유사한 잠열(latent heat) 방출 효과를 나타냄
- 대기 온도가 초기 시험온도에서 약 8℃ 감소하는 구간에서 상변화물질을 포함한 아스팔트 혼합물은 약 7.8℃로 상변화 물질이 특정 온도 변화 구간에서 상변화 과정을 통해 잠열(latent heat)을 방출하여 온도 조절에 영향을 주는 것을 알 수 있음
- 또한, 시험온도 -5℃에서 6시간 동안 온도를 유지하는 과정에서 상변화 물질(PCM)이 안정적인 잠열(latent heat) 방출로 인한 온도 조절에 의해 초기 블랙 아이스 생성을 지연시킬 것으로 판단됨
- 동결 지연 구간에서 상변화 물질(PCM)을 포함한 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물보다 약 2-3℃ 높게 측정됨
- PCM-new 혼합물이 PCM-old 혼합물보다 약간 높은 온도와 2시간 정도의 동결지연시간을 나타냄
- 결과적으로 PCM-old 혼합물의 동결지연시간은 1시간 10분으로 실외환경에서 약 6개월간 노출된 후에도 상변화 물질(PCM)이 잠열(latent heat) 방출 효과를 유지하는 것으로 판단됨

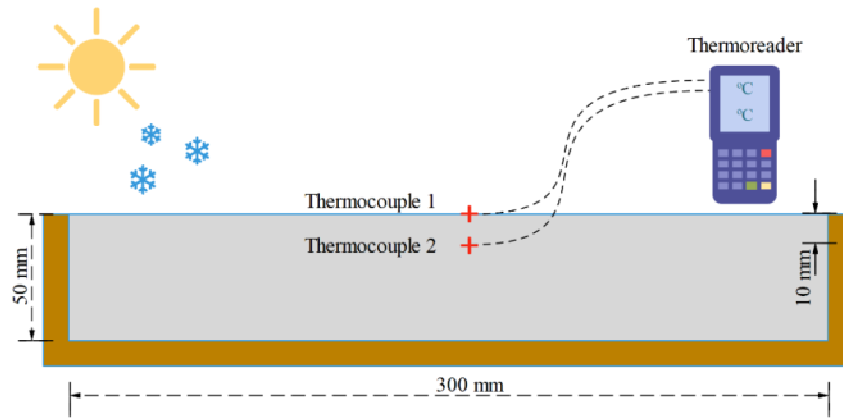


현장 모사 실내시험 결과

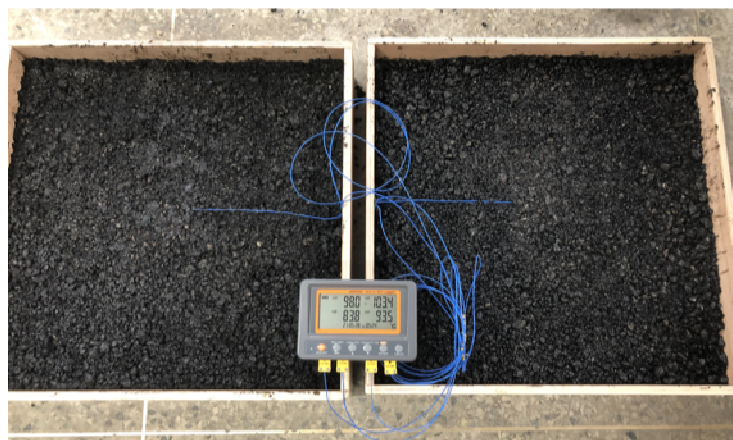
○ (B-3) Pilot 시험 입증

■ 시험방법

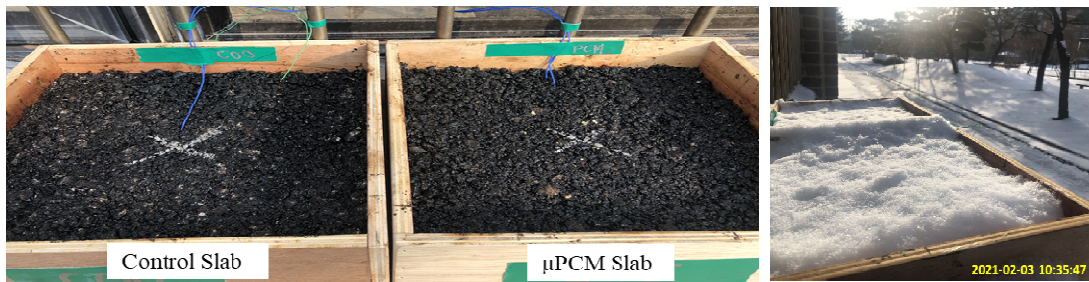
- 시험 시료는 일반 아스팔트 혼합물과 PCM 혼합물을 30×30×5cm 크기로 준비함
- 시료의 공극률은 7±1%로 두 개의 아스팔트 혼합물을 특정 두께로 다짐하기 위해 소형 진동 다짐기를 사용해 다짐 후 실내에서 25±1℃를 유지하여 48시간 동안 양생하여 시험을 수행함
- 온도 변화를 측정하기 위해 두 개의 Thermocouple을 각각의 시료의 표면과 10mm 깊이에 내장하였음
- 두 가지 시료의 온도를 10분 간격으로 기록하기 위해 4-채널 온도계를 사용하였으며, 온도계의 사양은 -200~1370℃의 온도 범위와 온도 오차는 ±0.1℃임



시료의 열전대 매립도



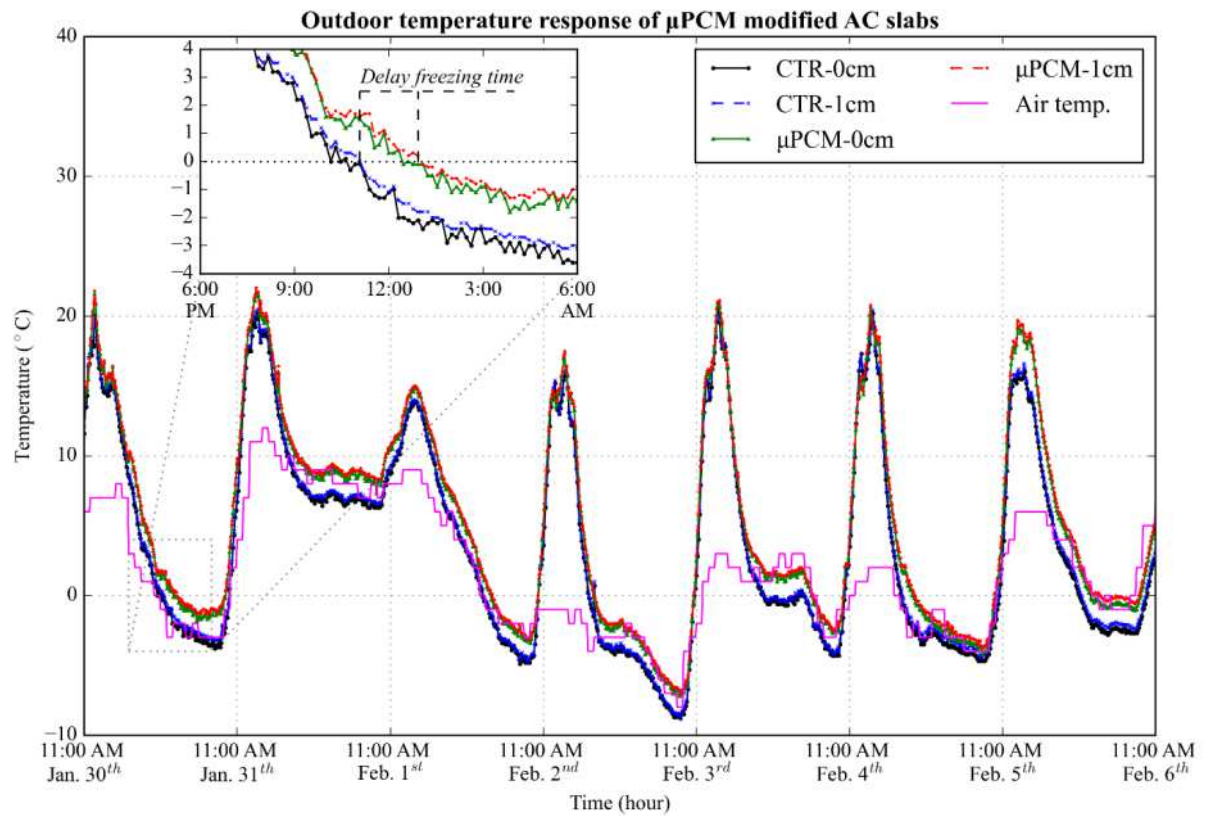
시험 아스팔트 대형 시료



대형 시료 실외 시험

■ 시험결과

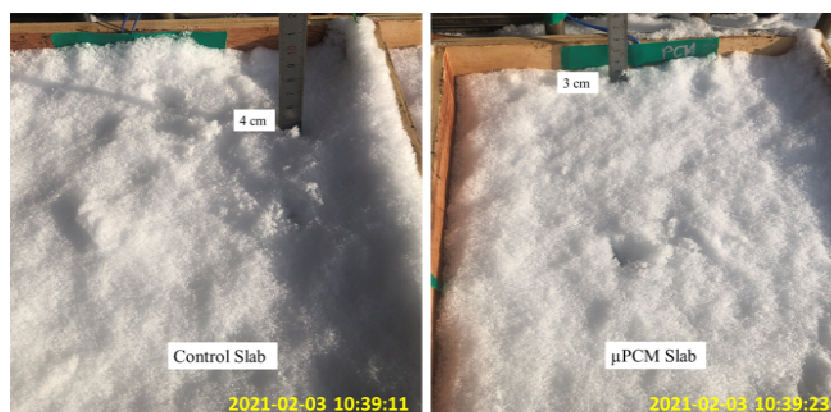
- 시험결과, 오전 11시부터 오후 5시까지 아스팔트 콘크리트 슬래브의 평균 온도는 아스팔트의 표면이 태양 복사열을 흡수하여 실외 대기 온도보다 높게 측정됨
- 그러나, 기온이 5℃ 이하로 떨어지는 야간부터는 PCM을 포함한 아스팔트 콘크리트 슬래브의 잠열을 방출하여 포장 온도를 2℃ 높게 유지하는 것을 관찰할 수 있었음
- PCM을 포함한 아스팔트 혼합물은 24시간 중 2시간의 동결지연 지속시간을 가지는 것으로 측정되었음
- 아스팔트 콘크리트 슬래브 시료의 강설량은 일반 아스팔트 혼합물의 경우 약 4cm PCM 혼합물의 경우 3cm로 약 1cm 적게 쌓였으며 이는 대기 온도가 낮아질 때 PCM이 열을 방출하여 초기 강설을 녹인 것으로 판단됨
- PCM을 사용하기 위한 적정 대기 온도는 -5~0℃로 판단됨. 해당 온도에서 아스팔트 포장의 온도는 약 3~8℃로 대기 온도가 해당 온도 범위에서 잠열을 방출하여 아스팔트 포장 온도가 빙점 이상을



실외 시험 결과



실외 시험 적설 초기



실외 시험 강설 후

○ (C-1) 상변화물질 제조 캡슐화

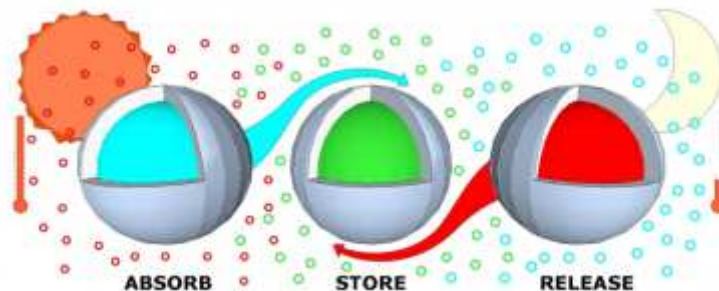
- C-1-① 상변화물질 제조

▪ 상변화 물질 개요

- 상변화물질(phase change material : PCM)은 특정한 온도에서 온도의 변화 없이 고체에서 액체, 액체에서 기체로, 또는 그 반대 방향으로 상 (狀, 형태)가 변하면서 많은 열을 흡수 또는 방출할 수 있는 잠열재, 축열재 또는 열조절 기능을 하는 물질을 의미하는 것으로 자체적으로 주위의 열을 저장하였다가 필요할 때 방출하는 온도 조절 기능물질임
- 상변화시 잠열은 에너지 저장에 중요한 역할을 하는데 현열에 비해 잠열은 상변화 온도에서 수십배에서 수백배의 에너지 저장 능력과 방출 능력을 가지기 때문에 기존 현열을 이용하는 에너지 절약 소재들 보다 탁월한 기능을 함
- 액체와 기체가 공존하는 상태일 때 잠열이 큰 물질을 상변화물질로 사용하면 자유에너지(G)가 큰 기체일 때, 조절이 어렵기 때문에 일반적으로 고체와 액체가 공존하는 상태에서 축열성이 있는 상변화물질이 주로 사용됨

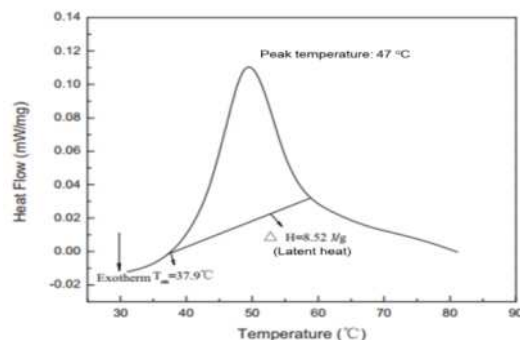
▪ 상변화 물질 메커니즘

- 상변화물질은 온도 변화에 따라 상변화 시 에너지를 방출하거나 흡수하여 가여로가 냉각을 하는 물질임.
- 온도가 높을 때 상변화물질이 열에너지를 흡수하여 고체에서 액체로 변화하며 주변온도를 낮추게 됨.
- 온도가 낮을 때 상변화물질은 열을 방출하여 액체에서 고체로 변화하며, 주변온도를 높이게 됨.



상변화물질의 메커니즘

- 상변화물질의 특성은 시차주사열량계를 이용하여 상변화온도와 잠열용량을 측정하는데 사용함. 시차 주사열량계 곡선의 아래부분은 용해잠열(latent heat fusion)로 높은 잠열은 열에너지를 더 크게 방출하고 흡수할 수 있음. 곡선의 최고높은 지점의 온도는 최대열에너지를 흡수하고 방출하는 온도를 나타냄.



상변화물질의 시차주사열량계 측정 결과

▪ 상변화 물질 종류

→ Paraffin계

- Paraffin계 PCM은 C13- C28 탄화수소로 이루어져 있어 길이가 길어지면 용융온도와 상전이 엔탈피가 증가하며, 온도범위가 넓어 다양한 용도에 맞게 응용이 가능하며 화학안정성, 비독성, 반복 사용 안정성 등의 장점이 있음

→ Non-paraffin계

- Fatty acids, Glycols, Poly alcohols, Esters, Ethers 등 동물성 지방이나 대두유, 야자유, 팜오일 등의 식물성오일을 원료로 얻어지는 지방산 유도체물질들로 C12- C22 탄화수소로 이루어져 있어 길이가 길어지면 용융온도와 상전이엔탈피가 증가하며, 온도범위가 넓어 다양한 용도에 맞게 응용이 가능하며 화학안정성, 비독성, 반복 사용 안정성 등의 장점이 있음

→ 무기계 PCM (Inorganic PCM)

- 무기계 PCM은 수화염(Salt hydrate)으로 분자내에 무기염(inorganic salts)과 하나 이상의 물을 가지고 있는 구조로 물을 흡수하거나 방출하는 과정에서 축열, 방열이 일어나며 유기계 PCM에 비해 높은 잠열, 좋은 열전도도의 장점을 가지고 있으나 핵생성과정에서 과냉각유발, 비균일용융, 상분리 등 불리한 특성을 동시에 가지고 있음

→ 공융(Eutectics)계

- 두 가지 이상의 서로 다른 상변화물질이 합쳐지는 경우 구성 성분들이 분리되거나 각각 따로 상변화가 일어나지 않고 합쳐지기 전 구성성분의 상변화 온도보다 낮은 온도에서 마치 단일 물질처럼 일어나는 것으로. 주로 유기계끼리의 혼합물이 사용되나 무기계-유기계간 혼합물도 최근 연구가 진행되고 있음

▪ 원료선정 기준

→ 상변환 잠열 엔탈피가 높은 물질

- PCM을 캡슐화하면, 축열기능이 없는 shell material이 캡슐의 일정량 무게비율을 갖게 되어 캡슐화 이후 엔탈피 손실이 불가피함

→ 탄화수소의 모양이 직선형이고 길며 작용기의 비율은 작은 물질

- 분자가 고리형이 되면 쌓임성(Stacking)이 좋아지고 부피는 감소하나 깃스 자유에너지가 작아짐. 즉 액체에서 고체로 상변화하면서 깃스 자유에너지의 감소폭이 작아져 잠열이 작아짐.

→ 캡슐화 반응이 가능한 상변화물질

- 캡슐화 반응을 진행할 때, PCM이 캡슐내에 함입될 수 있을 정도의 PCM-캡슐간 호환성을 가져야 함
- PCM이 캡슐의 central core로 자리할 수 있어야 하며 PCM 자체의 상변환 엔탈피 수치가 크고 목표하는 온도 범위에 들어간다 할지라도 캡슐화가 어렵거나 방법이 지나치게 복잡하여 경제성이 떨어지면 제외함

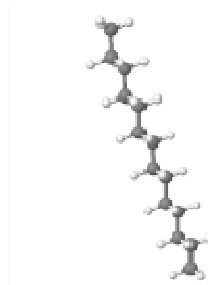
→ ‘캡슐화 후 PCM’은 ‘캡슐화 전 PCM’에 비해 상변화 온도와 달라질 수 있음

- 캡슐의 Shell의 두께, 열전도도 등에 따라 캡슐속 PCM 상변화 온도는 낮아지는 경향
- PCM 캡슐화 반응에 사용되는 첨가제들에 의해 캡슐화 전과는 다른 상변화온도를 나타낼 수 있음

→ 아스팔트 포장시의 온도(150℃)를 견딜 수 있는 내열성 있는 물질

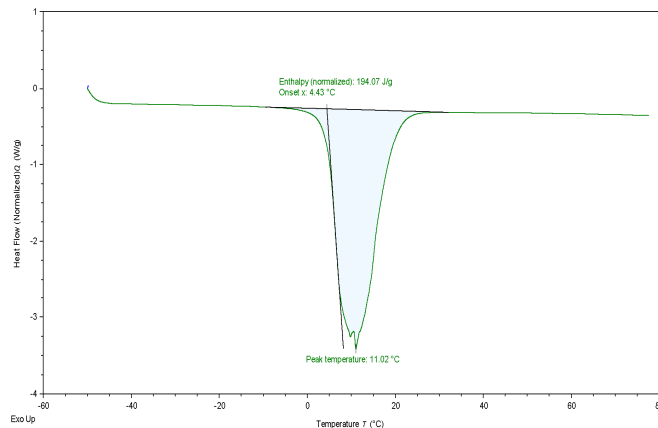
■ 원료선정

→ Tetradecane



테트라데케인의 3차원적
입체 구조물 모형도

- 테트라데케인 분자는 30개의 수소원자와 14개의 탄소원자로 구성되어 총 44개의 원자로 형성됨
- 테트라데케인 분자에는 총 43개의 화학결합이 있으며, 이는 13개의 비수소결합과 11개의 단일결합으로 구성됨
- 문헌상 보고된 녹는점은 6°C이며 자연발화온도는 220°C
- 엔탈피 194.07/g



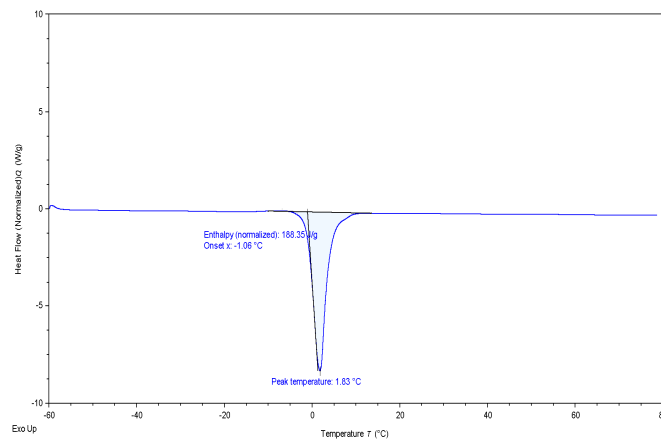
DSC 측정 결과(Tetradecane)

- 위 그래프는 테트라데케인의 시차주사열량측정법(Differential Scanning Calorimetry ; DSC)결과에 따른 승온 곡선 그래프를 나타냄.
- 위 승온그래프에서 적분값 변화량이 최고에 이르는 점, 즉 'Peak temperature'에 해당하는 온도가 녹는점을 의미하는데 약 11°C를 나타냈고, 문헌상의 수치와는 약 5만큼 차이를 보였음
- 분석시료의 양, 분석 시 승온 속도, 분석 장비의 condition등에 따른 차이를 보이는지는 추후 검증과 확인이 필요함.

→ 1-Decanol+Lauric acid mixture

- Decanol과 Lauric acid는 각 분자의 포화탄화수소를 포함한 총 탄소의 개수가 각각 10개와 12개로써 분자구조가 유사하며, 각각의 물질이 가진 친수성 작용기인 알코올기와 카르복실기 또한 호환성이 매우 높아 장기간 보관시 안정성을 확보할 수 있음
- 1-Decanol과 lauric acid의 혼합비 조절을 통해 상변화 온도를 조정
- 1-Decanol의 녹는점은 7°C이며 자연발화온도는 255°C이고 Lauric acid의 녹는점은 44°C
- 1-Decanol + lauric acid mixture의 엔탈피 188J/g

- 1-Decanol(MP 7℃), Lauric acid(MP 44℃)의 두 물질을 혼합했을 때, 각각의 녹는 점은 사라지고 더 낮은 온도에서 혼합물질의 녹는 점(공융점 약 2℃)을 나타냈음
- 1-Decanol과 lauric acid의 혼합물은 상변화물질(PCM)의 종류 중 공융계에 해당함



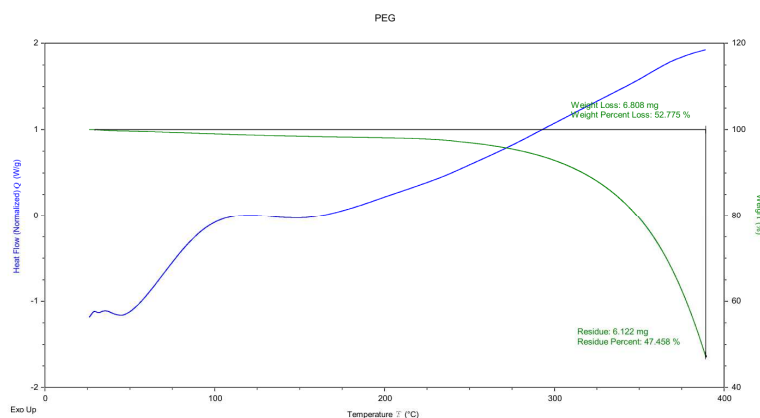
DSC 측정 결과(1-Decanol+Lauric acid 혼합물)

→ Polyethylene glycol

- Polyethylene glycol의 녹는점은 -50~65℃
- 상변화온도의 범위가 넓고 고축열성 물질군이므로 다양하게 응용이 가능할 것으로 예상됨
- 캡슐화가 어려워 함침법으로 향후 실험 예정임

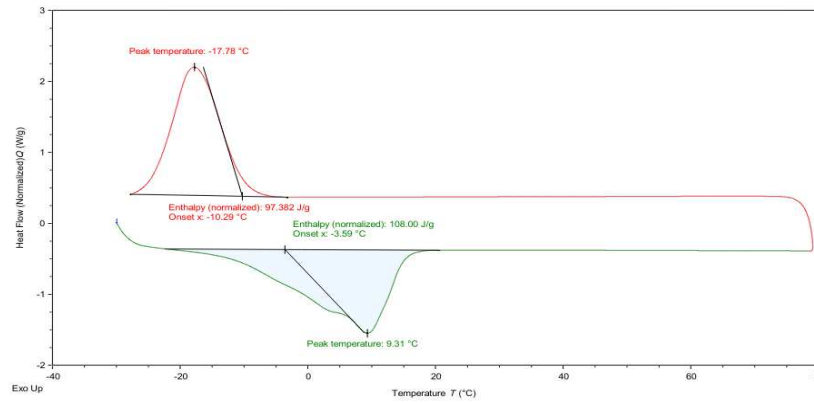
■ 2차년도 개선 사항

→ 1차년도에는 현재까지 알려진 상변화물질(Phase Change Material : PCM)중 본 연구에 가장 적합한 것을 선택하기 위한 검토와 실험을 진행하였고 최종적으로는 경제적으로 조달이 가능하고 상변화 온도 영역이 본 연구에 적합한 물질로 폴리에틸렌글리콜(Polyethylene Glycol : PEG)을 상변화물질의 재료로 결정함



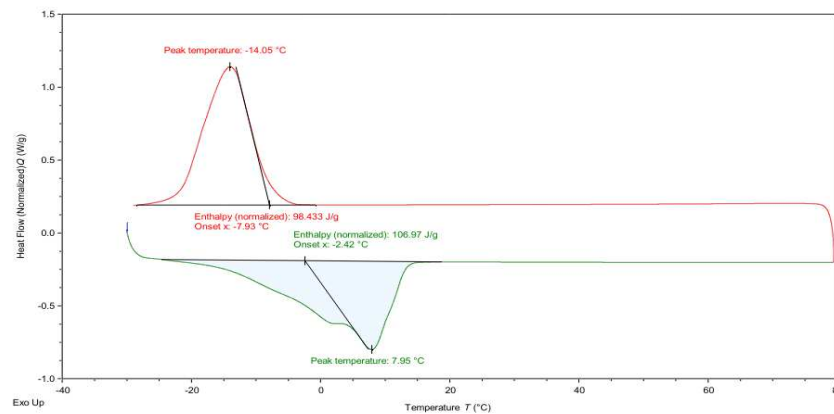
열중량분석 결과 : PEGs

- 위의 그래프는 본 연구에 사용되는 상변화물질인 PEGs가 아스팔트 혼합 온도에서 견딜 수 있는지 확인하기 위해 열중량분석(Thermo Gravimetric Analysis ; TGA)측정을 한 결과임
- PEGs를 0℃부터 10℃씩 상승 시켜 최대 400℃까지 노출한 결과 200℃까지는 5%내로 무게감소가 일어나는 것을 확인함으로써 PEGs는 아스팔트 혼합 온도에서 충분히 견딜 수 있는 재료라는 것을 확인함



DSC 측정결과 : PEGs / 분당 10°C

→ 위의 그래프는 분당 10°C의 속도로 온도를 높이고 낮추면서 얻은 데이터로 온도가 상승하는 구간에서 Peak온도는 9.31°C를 기록했고 온도가 하강하는 구간에서 Peak온도는 -17.78°C를 기록함



DSC 측정결과 : PEGs / 분당 5°C

→ 위의 그래프는 분당 5°C의 속도로 온도를 높이고 낮추면서 얻은 데이터로 온도가 상승하는 구간에서 Peak온도는 7.95°C를 기록했고 온도가 하강하는 구간에서 Peak온도는 -14.05°C를 기록함

→ 상변화물질로 선택한 PEGs의 잠열(Enthalpy)값을 시차주사열량측정법(Differential Scanning Calorimetry : DSC)을 이용하여 조건을 다르게 한 뒤 측정을 해본 결과 잠열 값은 두 측정 값 모두 약100J/g임을 확인함

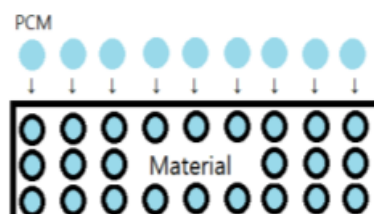
→ 동시에 조건의 변화 즉, 온도의 상승, 하강 속도에 변화를 주면 온도가 상승하는 구간과 하강하는 구간에서의 Peak온도가 달라짐을 확인함

→ 때문에 상변화물질을 시차주사열량측정법을 이용하여 그 결과값을 해석 할 때는 실제 대기온도의 변화 속도를 충분히 반영하여 실험을 진행하고 해석하는데 주의를 기울임

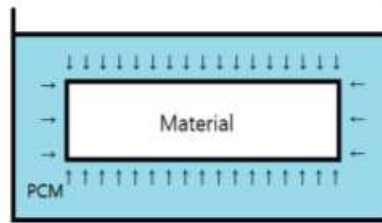
- C-1-② 캡슐화

▪ 상변화물질 가공방법의 종류

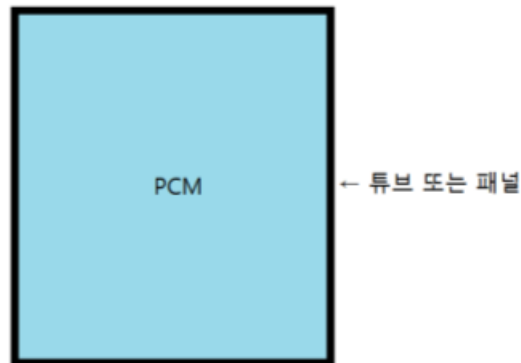
→ Direct incorporation : 액체상 또는 분말상의 PCM을 직접 투입하거나, 혼합하는 방식



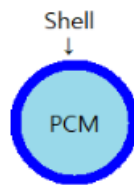
→ Immersion : 다공성 물질에 PCM을 함침시키는 방식



→ Macro-encapsulation PCM : 튜브, 패널 등의 용기에 PCM을 넣는 방식



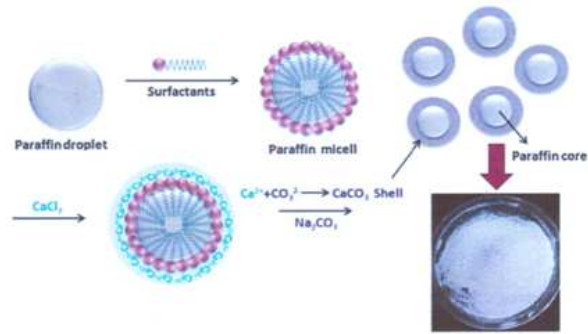
→ Micro-encapsulation PCM : PCM을 Core로 하여 Shell로 감싸는 캡슐화 방식



▪ 가공방법

→ Microencapsulated PCM

- PCM 가공기술 중에서 획기한 직경 $1,000\mu\text{m}$ 이상으로 제조하는 가공기술에 대해서는 고려하지 않았으며, 범용적으로 사용되는 Microencapsulated PCM가공법을 택하였음
- 아스팔트 혼합물의 물성에 간섭하지 않는 선에서 혼합이 될 수 있고 잠열이 고르게 퍼질 수 있도록 하기 위해 균일하고 고른 입자크기로 가공하는 것을 목표로 함
- MPCM구조는 중심에 상변화물질(PCM, Phase Change Material)이 자리하게 되고, 그 주변을 껍질(shell)이 에워싸는 구조를 가짐. Shell은 화학적 합성을 통해 생성되는 것이므로 화학 결합의 구조적 입체 장애(Steric effect)를 감안하면, 다른 형태일 때보다 구형(spear shape)일 때 형태적 안정성이 더 높음
- MPCM의 구조 = Core material + Shell material
- Core material = PCM + PCM과 shell을 연결시키는 화학물질 (ex. 계면활성제)
- Shell material = 껍질(Core material을 에워싸는 역할)

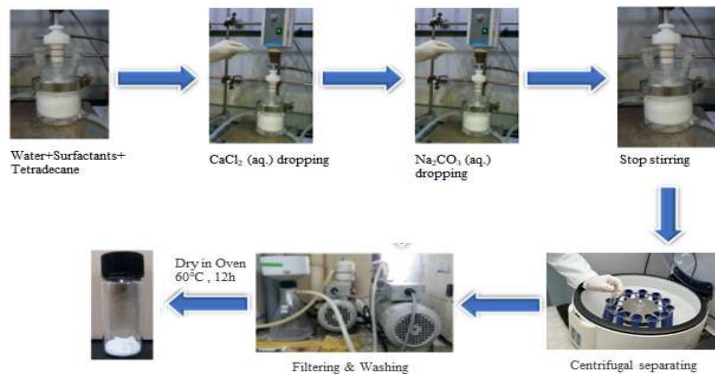


PCM 캡슐화 모형 예시

▪ 가공방법 선정

→ Tetradeceane : CaCO_3 encapsulated PCM

- Tetradeceane을 계면활성제로 물에 유화 시킨 후 염화칼슘 수용액과, 탄산나트륨 수용액을이용하여 CaCO_3 를 Shell Mateial로 한 캡슐화
- CaCO_3 를 Shell material로 사용한 Microencapsulated PCM 제조과정



CaCO_3 encapsulated PCM 공정

→ Tetradeceane : SiO_2 encapsulated PCM

- Tetradeceane을 계면활성제로 물에 유화시킨 후 실리카를 Shell Mateial로 한 캡슐화



SiO_2 encapsulated PCM 공정

→ 1-Decanol+Lauric acid 혼합물 : Melamine-urea-formaldehyde Resin encapsulated PCM

- Melamine-urea-formaldehyde가 PCM과 분자간 혼합된 상태에서 resin의 합성이 일어나며, 이 고분자가 shell을 이루게 되는데, hydrophobic한 성질이 매우 강한 탄화수소로 구성된 PCM은 hydrophilic한 Melamine-urea-formaldehyde를 배척하여 분자간 혼합은 이뤄질 수 없음
- 따라서 극성(alcohol) 작용기를 가진 1-Decanol과 해리 이후(이온화)에 극성이 매우 커질 수 있는 lauric acid를 사용함

MUF-resin을 Shell material로 사용한 Microencapsulated PCM 제조과정

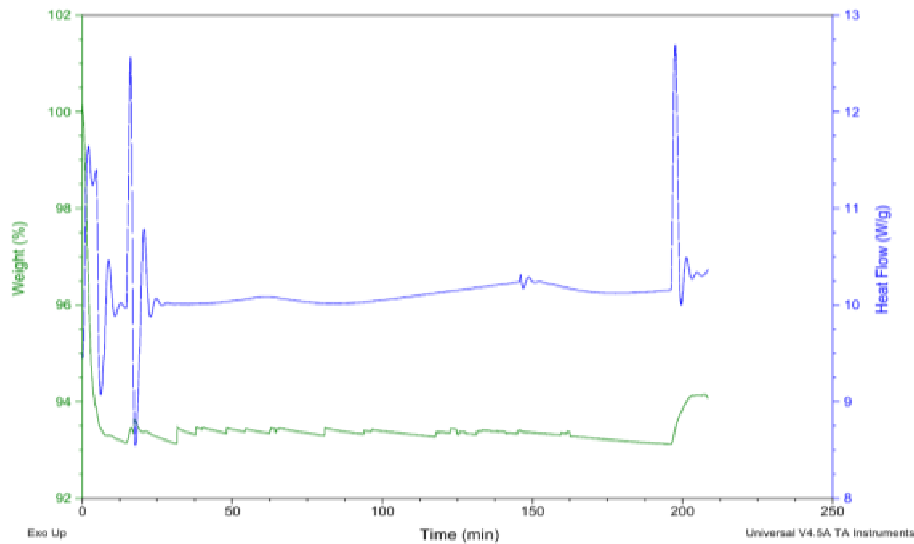
- ① Urea, melamine, formaldehyde, 정제수 투입(Reactor 1)
- ② 70° C stir.(Reactor 1)
- ③ Acidic condition으로 pH 조절(Reactor 1)
- ④ 1-Decanol과 lauric acid혼합물에 SDBS, 1,3-benzenediol, NH₄Cl 투입(Reactor 2)
- ⑤ 'Reactor 1' 을 'Reactor 2' 에 dropping.
- ⑥ 70° C로 승온 후, 3h. stir.
- ⑦ 여과(filtration), washing by D.I.water
- ⑧ At 70° C, drying over 6h.

■ 2차년도 개선사항

- 1차년도에는 Micro-encapsulation 방법을 이용하여 PCM을 Core로하여 Shell로 PCM을 감싸는 연구를 진행함
- PCM 소재에 따라 Shell 가공기술이 다르게 적용되었으나 공통적으로 수율이 낮고 유화 중합을 거치고 탈수공정에 거쳐 최종제품에 이르기까지 많은 폐수가 발생하는 문제점이 나타남
- Micro-encapsulation 방법은 현재까지는 환경 친화적이지 않고 이른 시일내에 경제적인 제조단가에 도달하기는 쉽지 않다고 판단됨
- 2차년도에서는 Porous material을 이용하여 PEGs를 material내에 고르게 dispersion 시키는 방법을 사용함
- Porous material은 내부와 표면에 작은 구멍이 많이 있는 물질을 말하는데, PEGs를 PCM으로 하고 특정 소재로 Shell을 만드는 방법이 아닌 Inorganic porous material을 Shell로 하여 material 내의 빈 공간에 PCM을 균일하게 dispersion하여 상변화가 지속적으로 일어날 수 있도록 함
- 이를 위해 아스팔트 포장 온도를 견딜 수 있고 PCM과의 혼용성이 우수하며 동시에 경제적인 제조가 가능한 실리카를 Porous material로서 최종 선택함

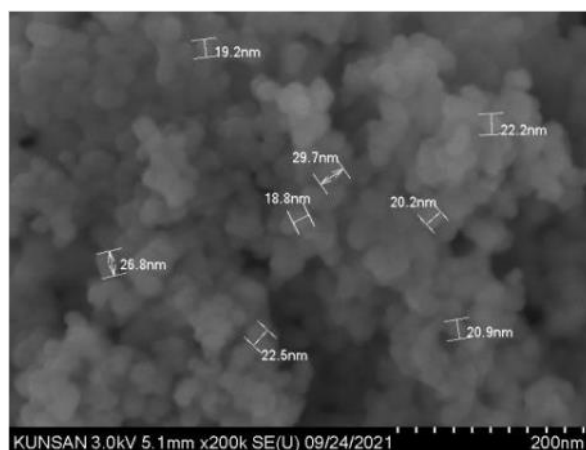


Porous material : Silica



열중량분석 결과 : Silica

- 위의 그래프는 PCM의 Shell 역할을 하는 실리카가 아스팔트 혼합 온도에서 견딜 수 있는지 확인하기 위해 열중량분석 (Thermo Gravimetric Analysis ; TGA) 측정을 한 결과임
- 실리카를 120℃에서 20분 노출하고 이후 150℃에서 3시간 가량 노출한 결과 10여분 동안 무게감소가 약 7% 정도 감소 되는 것을 확인할 수 있었고 이후 150℃에서 3시간동안 노출 시에는 무게 감소가 거의 일어나지 않음을 통해 아스팔트 포장 온도에서도 견딜 수 있는 재료로 판단됨
- PEGs를 Inorganic porous material에 어느 정도 dispersion해야 할지, 최적의 양을 결정하기 위한 다양한 배합비를 가지고 실험을 진행함
- PCM의 양이 적어지면 도로 표면에 블랙 아이스가 생성될 때 이를 지연하기 위해 PCM이 방출할 수 있는 잠열에너지가 적어지게 됨
- 잠열량을 높이기 위해서는 Prous material 내부에 가능한 많은 PCM이 있어야 하지만 내부에 너무 많이 PCM이 있을 경우 Shell로서의 Porous material이 붕괴가 일어나고 이것은 PCM의 누출로 이어질 수 있음

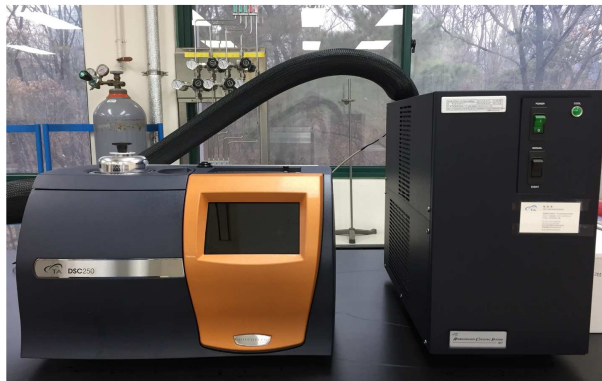


SEM 촬영결과

- 실리카 단독으로는 입자가 작아 주사전자현미경(Scanning Eletron Microscope : SEM)촬영이 어려우나 실리카에 PCM이 적절하게 dispersion 된 이후에는 20nm의 입자 사이즈 전후로 고르게 생성된 것이 확인됨

- C-1-③ 상변화물질 성능 검증

▪ 시차주사열량측정법 측정

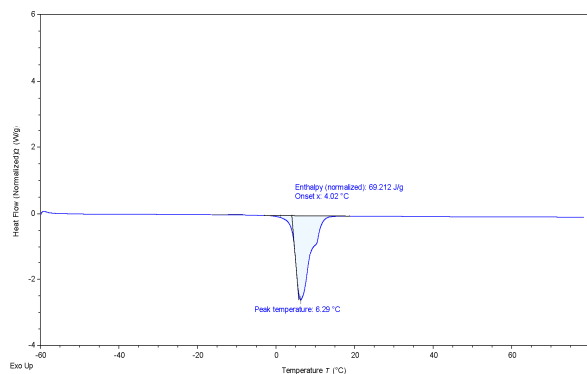


시차주사열량계 TA Instruments DSC250

→ 시차주사열량법은 시료물질과 기준물질을 동시에 가열/냉각 시킴으로써 시료의 열 출입을 측정하는 방법임. 기준물질은 가열로의 온도 조절에 따라 함께 조절되나 시료물질은 주어진 온도에 의해 흡열/발열의 반응이 이루어지므로 기준물질과 온도 차이가 생기면서 온도차이에 의한 열량 값을 얻을 수 있음. 상변화물질(PCM) 소재 및 가공 후의 상변화물질의 잠열량 및 녹는점 등을 측정하는데 활용함

▪ 시차주사열량측정법(Differential Scanning Calorimetry ; DSC) 측정 결과

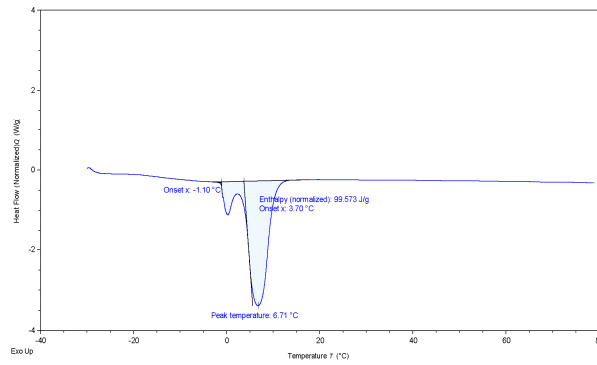
→ Tetradeceane : CaCO_3 encapsulated PCM



DSC 측정 결과(CaCO_3 encapsulated PCM)

- 위 그래프는 'CaCO₃ encapsulated tetradeceane', 즉 테트라데케인을 core material로, CaCO₃ 를 shell material로 각각 사용해서 얻은 PCM캡슐에 대한 DSC분석차트임
- 'Peak temperature'에 해당하는 수치(녹는점)는 약 6.3℃였고, PCM캡슐에 대한 목표치인 1~7℃의 범위안에 해당하는 결과를 나타냄
- 가공처리하기 전 테트라데케인의 'Peak temperature'(녹는점)인 약 11℃보다 약 5℃ 정도 낮은 온도에서 녹는점을 가지면서 잠열에너지를 응축할 수 있음
- CaCO₃ encapsulated tetradeceane은 약 69J/g의 잠열엔탈피를 나타냈음. 캡슐화 전 Tetradeceane의 잠열엔탈피(약 194J/g)에 비해 약 36%에 해당하는 용융열을 축적할 수 있음을 확인

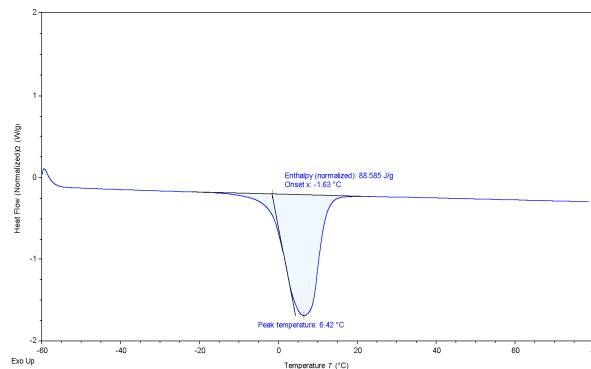
→ Tetradeceane : SiO₂ encapsulated PCM



DSC 측정 결과 : SiO_2 encapsulated PCM

- 위 그래프는 'SiO₂ encapsulated tetradecane', 즉 테트라데케인을 core material로, SiO₂ 를 shell material로 각각 사용해서 얻은 PCM캡슐에 대한 DSC분석차트임
- 'Peak temperature'에 해당하는 수치(녹는점)는 약 6.7°C였고, PCM캡슐에 대한 목표치인 1~7°C의 범위안에 해당하는 결과를 나타냄
- 가공처리하기 전 테트라데케인의 'Peak temperature'(녹는점)인 약 11°C보다 약 4°C 정도 낮은 온도에서 녹는점을 가지면서 잠열에너지를 응축할 수 있음
- 약 100J/g의 잠열엔탈피를 나타내었고, 캡슐화 전 Tetradecane의 잠열엔탈피(약 194J/g)에 비해 PCM Shell에서 PCM이 차지하는 비중이 높고 Shell은 상대적으로 더 얇게 생성된 것으로 추정됨

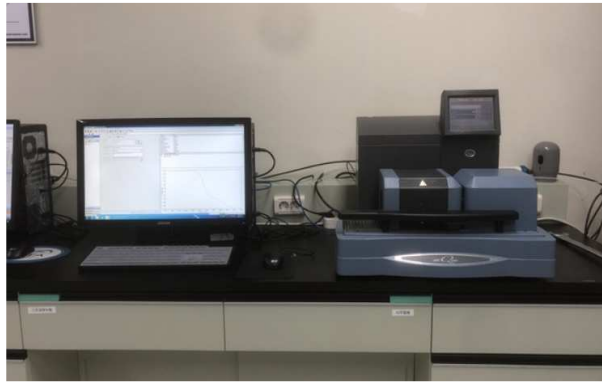
→ 1-Decanol+Lauric acid 혼합물 : Melamine-urea-formaldehyde Resin encapsulated PCM



DSC 측정 결과 : Melamine-urea-formaldehyde Resin encapsulated PCM

- 위 그래프는 'MUF-resin encapsulated 1-Decanol and lauric acid', 즉 1-Decanol과 lauric acid mixture를 core material로, MUF-resin을 shell material로 각각 사용해서 얻은 PCM캡슐에 대한 DSC분석 그래프임
- 'Peak temperature'는 약 6.4°C였고, PCM캡슐에 대한 목표범위안에 드는 결과를 나타냄
- 가공처리하기 전 '1-Decanol & lauric acid' mixture 의 'Peak temperature'(녹는점)인 약 2°C보다 약 4~5°C 높은 온도에서 녹는점을 나타냄
- 'MUF-resin encapsulated 1-Decanol & lauric acid'는 약 89J/g의 잠열엔탈피를 나타냈음. 캡슐화 전 'PCM mixture'의 잠열엔탈피(약 188J/g)에 비해 약 47%에 해당하는 용융열을 축적할 수 있음을 확인

■ 열중량분석 (Thermo Gravimetric Analysis ; TGA)

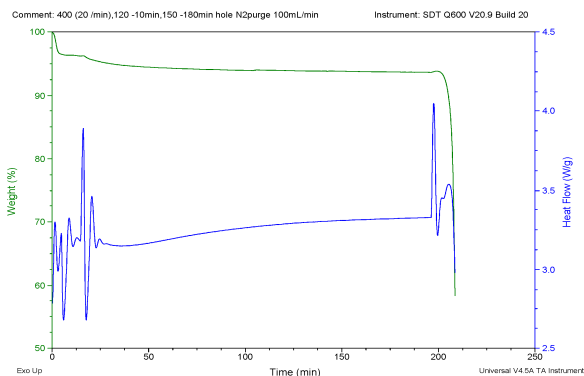


열중량분석기 TA Instruments SDT Q600

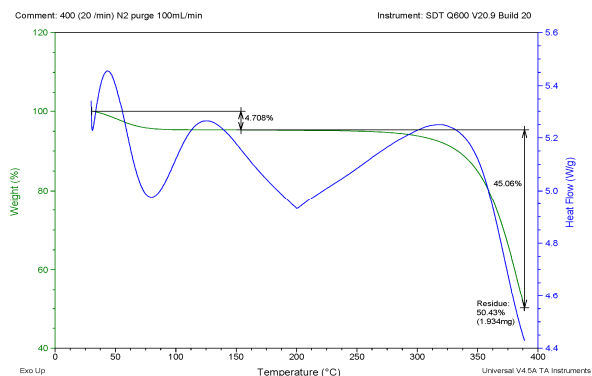
→ 가열에 의한 물질의 중량 변화를 추적하여 분석하는 방법으로 일반적으로 물질은 가열에 의해 열분해 반응을 일으켜 중량이 감소되는데 가열에 의한 물질의 중량 변화의 상태를 추적함으로써 시료의 중량을 연속적으로 측정하여 열분해 곡선을 만듦. 이 열분해 곡선에 기초하여 중량 변화가 일어나는 온도에서 시료물질의 열적 특성을 알고, 또 이때의 중량 변화량이 원시료의 중량에 대하여 차지하는 비율을 추정함. 본 연구에서는 PCM이 높은 온도의 아스팔트 혼합물과 함께 사용되는 점을 감안하여 시공과정에서 분해되지 않고 안정한지를 TGA측정을 통해 가늠하도록 함.

■ 열중량분석 (Thermo Gravimetric Analysis ; TGA) 측정 결과

→ Tetradecane : CaCO_3 encapsulated PCM



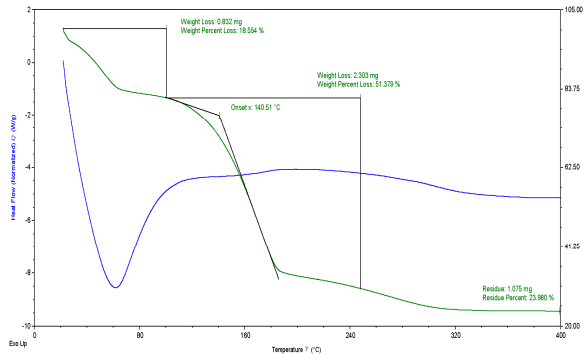
TGA 측정결과 #1 : CaCO_3 encapsulated PCM



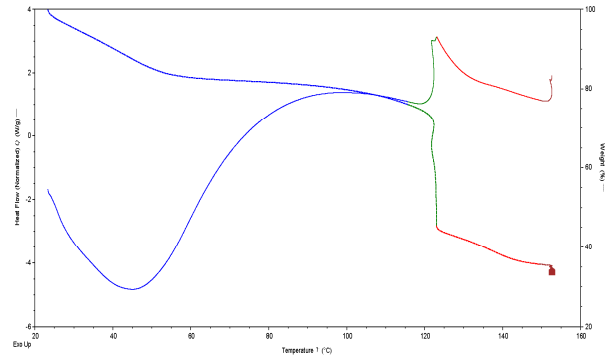
TGA 측정결과 #2 : CaCO_3 encapsulated PCM

- CaCO_3 로 shell을 이룬 PCM캡슐은 150°C에서 3시간 유지하는 분석조건에서 5%이내의 무게손실을 보였음. 이는 본 연구과제의 고온 안정성에 대한 목표치인 150°C에서 10%이내의 무게감소를 충족시키는 결과임
- 0°C에서 400°C까지 20°C단위로 승온을 한 결과 약 250°C까지는 5%내외의 무게감소가 있음을 알 수 있어 Tetradecane을 코팅한 구형의 CaCO_3 capsule은 도로 포장 시 필요한 고온의 환경에서 열적 내구성이 있음을 확인 할 수 있음

→ Tetradecane : SiO_2 encapsulated PCM



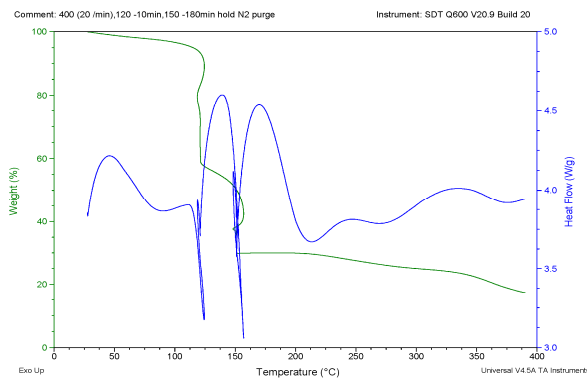
TGA 측정결과 #1 : SiO₂ encapsulated PCM



TGA 측정결과 #2 : SiO₂ encapsulated PCM

- SiO₂로 shell을 이룬 PCM캡슐은 온도를 높이는 과정에서 무게감소가 일어나기 시작했으며 특히 80~130℃ 구간에서 무게감소가 빠르게 진행되었고 130℃ 이후에는 급격히 무게감소가 일어나는 것을 확인할 수 있었음.
- SiO₂는 열적 내구력이 강한 무기원료로써 서서히 합성된 실리카는 O-Si-O 결합에서 더 견고한 형태를 가짐으로써 내구력이 강해질 것으로 판단되지만 실험결과만을 놓고 보았을 때 연구 목적을 충족시키기 위해서는 150℃에서의 내구성이 요구되므로 SiO₂ 캡슐화를 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요함.

→ 1-Decanol+Lauric acid 혼합물 : Melamine-urea-formaldehyde Resin encapsulated PCM



TGA 측정결과 : Melamine-urea-formaldehyde Resin encapsulated PCM

- MUF-resin으로 shell을 이룬 PCM캡슐은 150℃에서 3시간 유지하는 분석조건에서 약 70%의 무게 감소를 보여주고 있음
- MUF-resin으로 '1-Decanol & lauric acid mixture'을 코팅한 구형의 resin capsule은 100℃넘는 조건에서는 사용이 어려울 수 있음을 확인
- 하절기의 상변화물질에 의한 아스팔트 포장의 주행성 및 내구성 저하는 캡슐화에 의해 제한될 것으로 판단됨
- TGA 시험 결과 중 160℃ 미만에서 중량 감소율이 10% 미만으로 측정되는 시료의 경우, 하절기 최대 포장 온도를 80℃로 하였을 때, 내재된 상변화물질의 영향은 미미할 것으로 판단됨

▪ 주사전자현미경 (Scanning Eletron Microscope ; SEM)

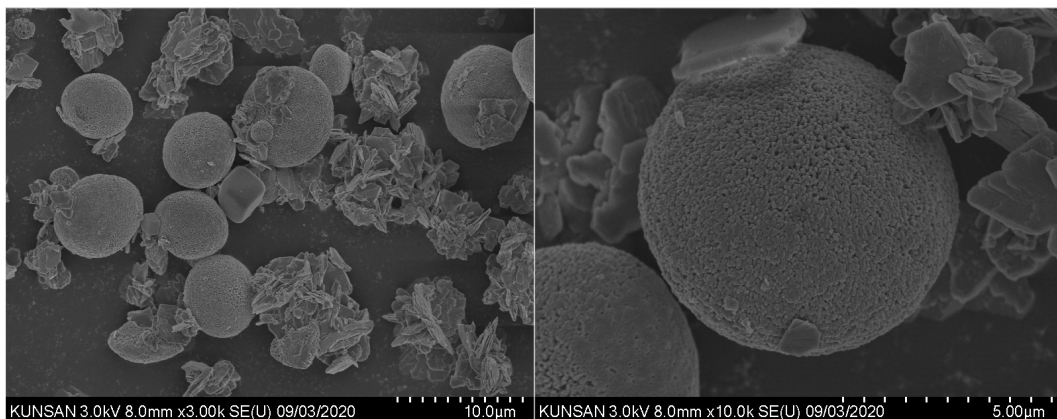


전자현미경 HITACHI SU3800

→ 주사전자현미경은 고체상태에서 작은 크기의 미세조직과 형상을 관찰할 때 쓰이는 현미경으로 심도가 깊고 3차원적인 관찰이 용이해서 복잡한 표면구조나 결정외형 등의 입체적인 형상을 높은 배율로 관찰할 수 있는 분석장비로 본 연구에서는 SEM측정을 통해 캡슐화된 PCM의 모양과 크기를 관찰하여 미세구조 분석을 진행함.

▪ 주사전자현미경 (Scanning Eletron Microscope ; SEM) 측정 결과

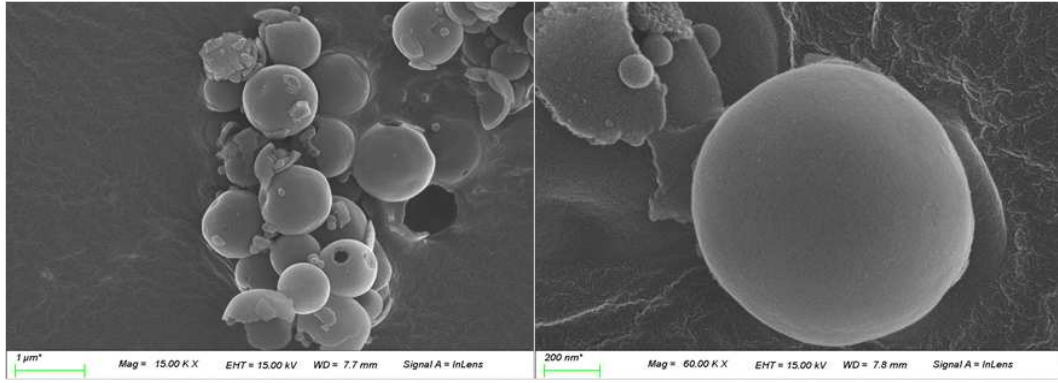
→ Tetradeceane : CaCO_3 encapsulated PCM



주사전자현미경으로 촬영한 CaCO_3 encapsulated PCM

- 형성된 캡슐에서 hole(홈)이나 crack(균)이 발견되지 않음
- 위 사진에서는 캡슐이외에 pellet 형태의 시료에서 발견할 수 있는 $1\sim 3\mu\text{m}$ 내외의 결정성 물질이 PCM 캡슐화 반응에 참여하지 못한 ‘미반응 CaCO_3 ’가 결정을 이루면서 형성된 것이 캡슐이외의 물질들인 것으로 추정함. Capsulation은 강교반 조건 하에 이루어지므로 빠른 교반 속도에 의한 영향으로 ‘캡슐을 이루지 못한 탄산칼슘의 결정들’은 size가 작아질 것임
- 구(sphere)형태의 CaCO_3 캡슐의 형태를 관찰할 수 있음
- 캡슐의 표면은 비교적 매끄럽게 보이며, 캡슐의 파편으로 보이는 형태는 관찰할 수 없음.

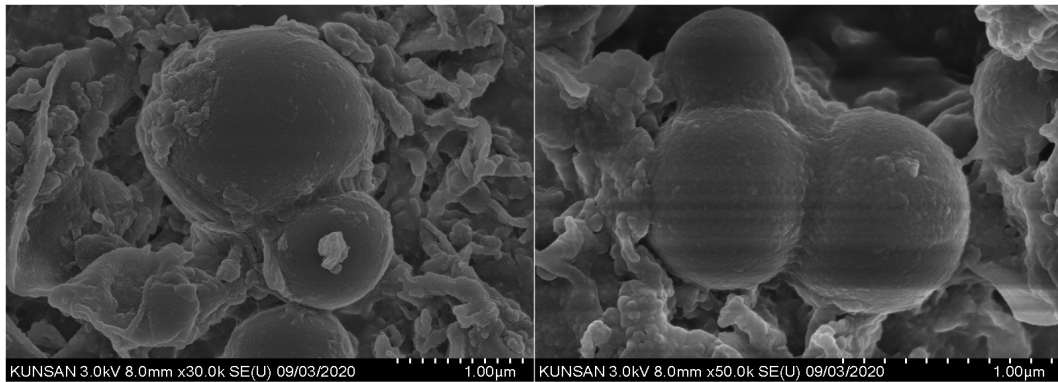
→ Tetradeceane : SiO_2 encapsulated PCM



주사전자현미경으로 촬영한 SiO₂ encapsulated PCM

- 형성된 캡슐들에서 다양한 크기의 hole(흠)과 부서진 캡슐 조각들이 관찰됨
- 손상되지 않은 상태로 형성된 캡슐들은 CaCO₃ 캡슐 사진과 마찬가지로 구형에 근접한 형태를 보임
- 1 μm 내외의 직경을 가진 실리카 캡슐들에는 비교적 손상도가 적은 캡슐들이 관찰됨

→ Decanol+Lauric acid 혼합물 : Melamine-urea-formaldehyde Resin encapsulated PCM

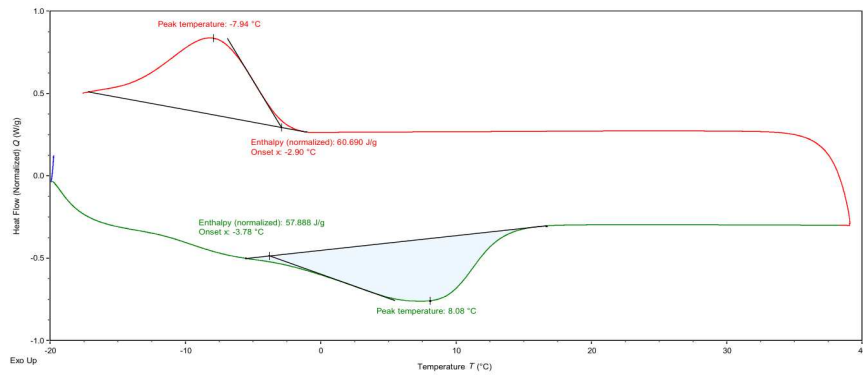


주사전자현미경으로 촬영한 MUF-resin encapsulated PCM

- 형성된 캡슐에서 hole(흠)이나 crack(금)이 발견되지 않음
- 위 사진들에서는 캡슐이외에 불규칙한 형태의 물질들을 관찰할 수 있음
- 불규칙한 형태의 물질들은 캡슐화 반응에 참여하지 못하고 경화된 열경화성 수지인 MUF-resin으로 추정됨

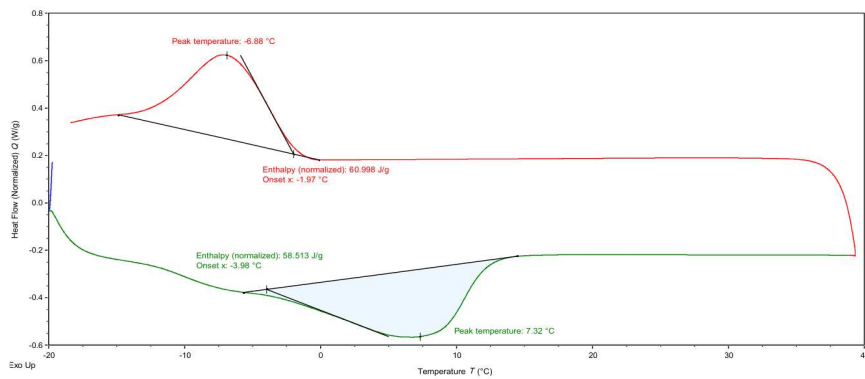
■ 2차년도 개선사항

- 블랙 아이스 생성 지연 효과를 얻기 위해서는 상변화가 가장 활발하게 일어나는 Peak 온도를 정확하게 확인할 필요 있음
- 너무 낮거나 높은 온도에서 상변화가 일어나면 연구의 목적인 블랙 아이스 생성지연에 도움이 되지 않음
- 블랙 아이스가 생성되는 온도 구간에서 상변화가 일어나야하므로 온도가 올라가고 내려가는 속도를 세분화하여 실험을 진행하였다.



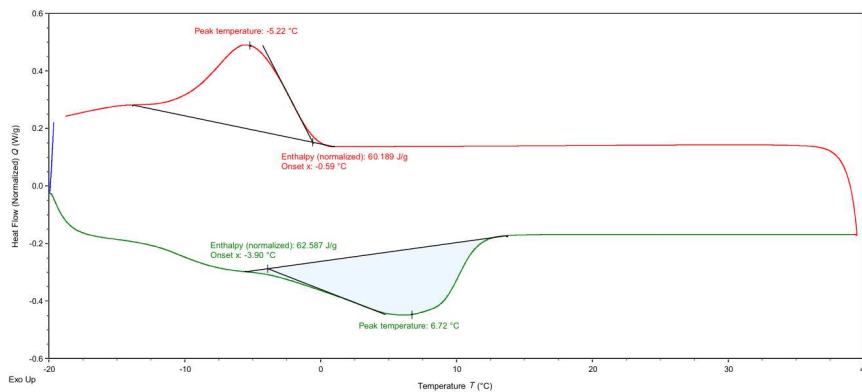
DSC 측정결과 : Silica Shelled PEGs / 분당 9°C

→ 분당 9°C의 속도로 온도를 높이고 낮추면서 얻은 데이터로 온도가 상승하는 구간에서 Peak온도는 8.08°C를 기록했고 온도가 하강하는 구간에서 Peak온도는 -7.94°C를 기록함



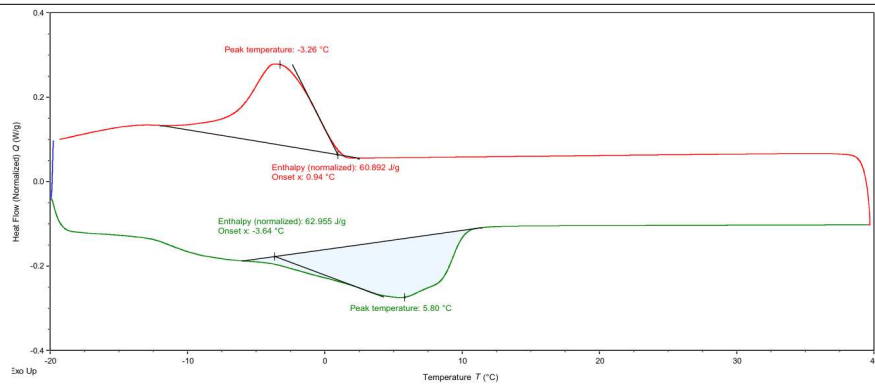
DSC 측정결과 : Silica Shelled PEGs / 분당 7°C

→ 분당 7°C의 속도로 온도를 높이고 낮추면서 얻은 데이터로 온도가 상승하는 구간에서 Peak온도는 7.32°C를 기록했고 온도가 하강하는 구간에서 Peak온도는 -6.88°C를 기록함



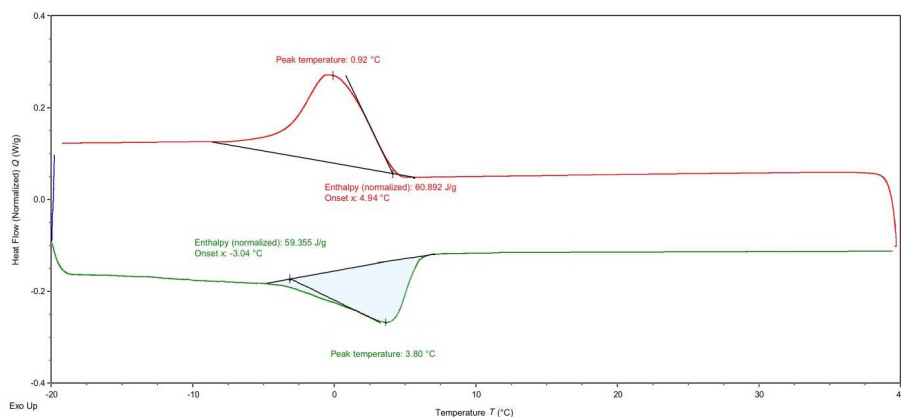
DSC 측정결과 : Silica Shelled PEGs / 분당 5°C

→ 분당 5°C의 속도로 온도를 높이고 낮추면서 얻은 데이터로 온도가 상승하는 구간에서 Peak온도는 6.72°C를 기록했고 온도가 하강하는 구간에서 Peak온도는 -5.22°C를 기록함



DSC 측정결과 : Silica Shelled PEGs / 분당 3°C

- 분당 3°C의 속도로 온도를 높이고 낮추면서 얻은 데이터로 온도가 상승하는 구간에서 Peak온도는 5.80°C를 기록했고 온도가 하강하는 구간에서 Peak온도는 -3.26°C를 기록함
- 위의 4가지 측정결과로 보아 온도가 올라가는 속도나 내려가는 속도를 늦출수록 상승구간에서와 하강구간에서의 상변화 Peak 온도차이가 줄어드는 것으로 판단됨
- 이것을 실제로 블랙 아이스가 발생하는 상황에 비추어 보면 현실에서는 실험실과는 다르게 분당 10도, 7도, 5도 등의 속도로 온도가 올라가거나 하락하는 일이 없다는 점을 고려하여 실험실에서 최대한 실제상황과 가장 비슷할 수 있도록 올라가는 속도와 내려가는 속도를 분당 1도로 가정하여 최종적으로 DSC 측정을 실시함



DSC 측정결과 : Silica Shelled PEGs / 분당 1°C

- 분당 1°C의 속도로 온도를 높이고 낮추면서 얻은 데이터로 온도가 상승하는 구간에서 Peak온도는 3.80°C를 기록했고 온도가 하강하는 구간에서 Peak온도는 0.62°C를 기록함
- 실제로 대기온도는 분당 1도 이상의 속도로 올라가거나 떨어지지 않는 것으로 실제로 적용하게 될 경우 연구에서 목표로 하는 온도범위에서 상변화가 일어날 것으로 예상됨

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ (A-1) 유한요소 분석

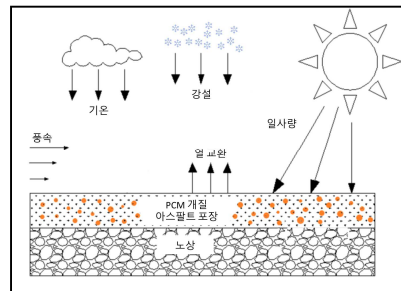
- A-1-① 10년간 온도분석

- Wunderground 웹사이트를 사용하여 기후 데이터를 수집함
- 데이터는 1999년부터 2019년까지 20년간의 기후 데이터를 이용 하였으며, 그 중 2010년부터 2019년까지 10년간의 데이터를 선택하여 분석함
- 시간별 데이터에는 시간, 기온, 풍속 및 일사량이 포함됨

	A	B	C	D
1	time	T_a	U	H_s
2	0	-1	4.17	0.00
3	1	-1	5.28	0.00
4	2	-2	5.28	0.00
5	3	-3	4.17	0.00
6	4	-3	4.17	0.00
7	5	-3	5.56	0.00
8	6	-4	5.28	0.00
9	7	-5	3.61	138.99
10	8	-5	3.61	237.86
11	9	-3	4.72	327.53
12	10	-3	4.72	398.26
13	11	-2	4.72	443.37
14	12	-1	4.72	458.86
15	13	-1	6.11	443.37
16	14	-1	6.11	398.26
17	15	-1	5.56	327.53
18	16	-2	6.11	237.86
19	17	-4	6.11	138.99
20	18	-5	6.11	0.00
21	19	-7	5.28	0.00
22	20	-7	5.56	0.00
23	21	-8	5.56	0.00
24	22	-8	3.61	0.00
25	23	-8	4.17	0.00

수집된 20년간 데이터 및 분석에 사용된 시간당 데이터

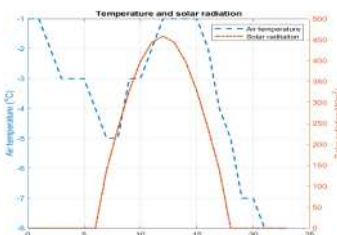
- 1차원의 열흐름 방정식을 아스팔트 포장에 적용하여 깊이에 따른 포장층 온도와 표층온도를 예측할 수 있는 로직 개발



포장 온도 개요

- A-1-② FEM 및 열흐름 방정식을 이용한 얼음생성 모사

- 2010년 12월 5일 김포공항지역의 기후데이터(매시간당 대기온도, 바람속도, 태양복사열)를 분석하여 최적 PCM을 결정하고자 함

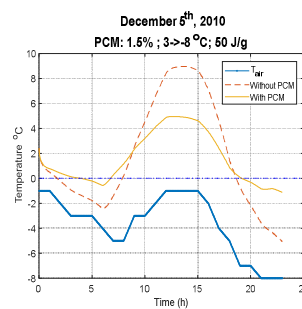


2010년 12월 5일
김포공항지역의 기후데이터

→ PCM 사용량, 상변화 온도, 융해열 3가지 변수를 활용하여 최소온도증가 값, 증가된 온도영역 값, 최소온도의 지연 값을 결정하였으며 각각은 아래 표와 같음

수치해석 결과

구분		$\Delta T_{\min} (^{\circ}\text{C})$	$A_{\in c} (^{\circ}\text{C} \cdot \text{h})$	$D_{mt} (\text{h})$
Control	case 0	0.14	36.19	1.12
상변화 물질 함량	case 1	1.78	67.76	1.65
	case 2	1.85	69.43	1.67
	case 3	2.86	72.33	2.56
상변화 온도	case 4	2.34	65.67	1.24
	case 5	2.22	63.34	1.98
	case 6	2.34	58.64	1.34
잠열 용량	case 7	2.92	73.45	2.65
	case 8	2.98	77.23	2.78
	case 9	2.97	79.34	2.89



Temperature response of
Case 3

→ Case 3이 동일한 PCM조건 중 최소온도증가($\Delta T_{\min}$)가 2.86 $^{\circ}\text{C}$ 이었으며, 증가온도 면적은 72.3 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$, 블랙 아이스 생성지연은 약 2시간 30분을 나타냄

- A-1-③ 블랙 아이스 지연용 상변화물질 및 함량 선정

→ 개발된 로직에 근거하여 일명 PCM 최적설계 프로그램을 Matlab을 활용하여 개발함



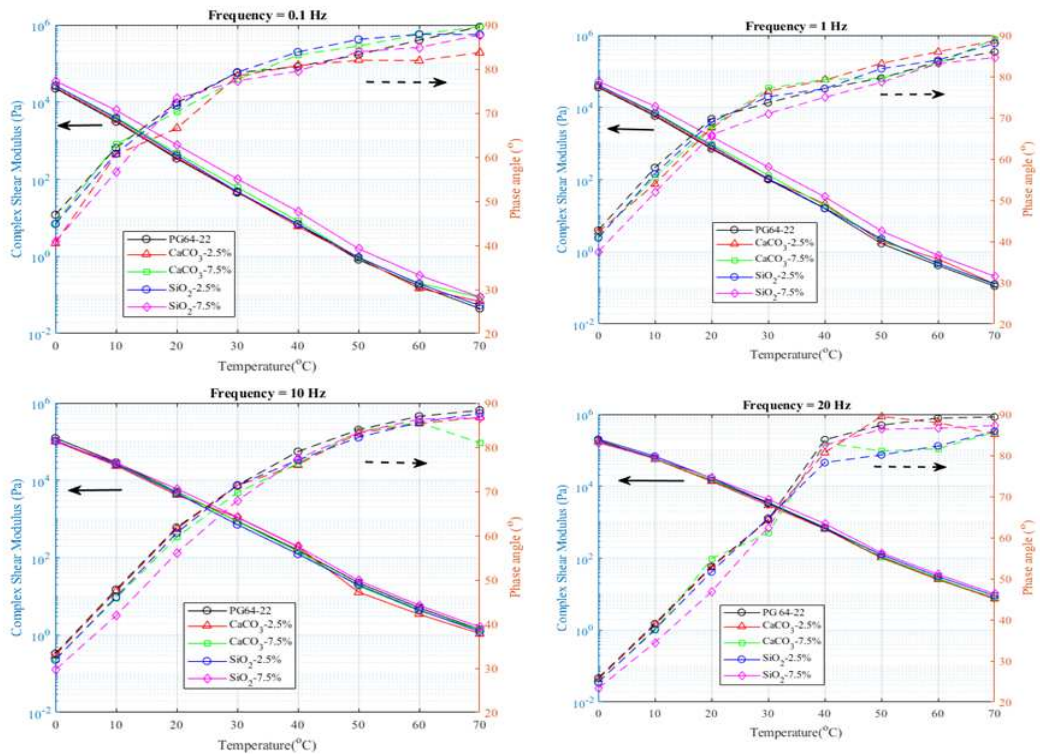
PCM optimum design tool

○ (A-2) 아스팔트와의 혼합 성능 평가

- A-2-① 점성 평가

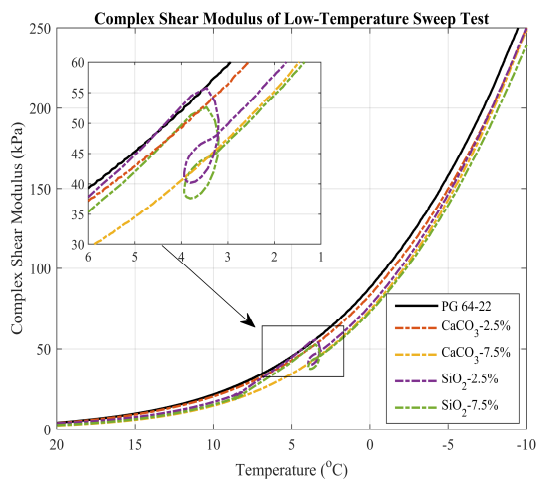
→ 점도가 500cP(0.5Pa·s)로 일반적인 아스팔트 점도 기준인 3000cP(3Pa·s) 미만으로 상변화물질의 사용이 아스팔트 점도에 영향을 안좋은 영향을 미치지 않아 작업성에 영향을 주지 않는 것으로 판

- A-2-② 피로균열 및 온도균열 저항성 평가

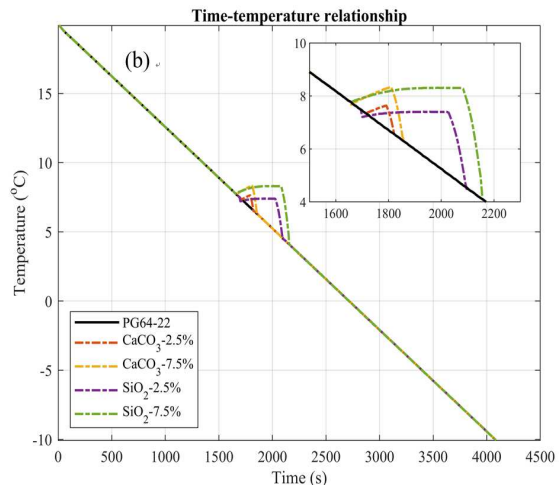


다양한 하중 주파수에서의 복합전단탄성계수 및 위상각

- 전반적으로 온도가 상승하면 위상각이 증가하는 반면 복합전단탄성계수는 감소함
- 저온(0~10°C)에서 아스팔트 혼합물은 점탄성 거동을 나타내고 PCM이 첨가된 혼합물은 일반 가열 혼합물인 PG 64-22 보다 복합전단탄성계수가 더 낮음
- 특히 SiO₂-7.5% 혼합물이 저온영역대에서 가장 낮은 복합전단탄성계수 값을 나타냄.
- PCM이 첨가된 경우 방출되는 잠열이 주변 혼합물을 따뜻하게 하여 혼합물의 강성을 감소시켜 아스팔트 혼합물의 열균열 저항성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단됨



시험 온도 감소에 대한 복합전단탄성계수 변화

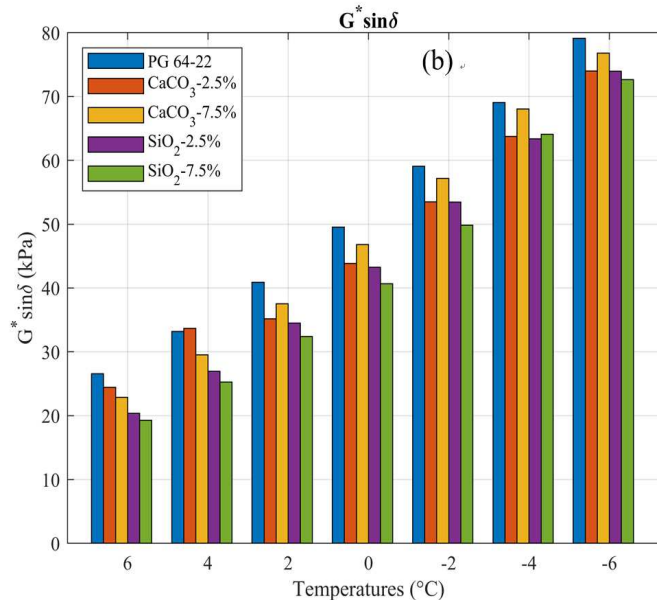


시험 온도 감소 시 시료 온도 변화

- 두 종류의 PCM 모두 일반적인 아스팔트 바인더보다 낮은 복합전단탄성계수를 보였으며, SiO₂는 불연속적인 곡선을 나타냄

→ 시험 온도가 4℃에 도달하였을 때 복합전단탄성계수 값이 55kPa에서 40kPa로 급변하며 잠열을 방출하여 시료의 온도를 약 1.5℃ 증가시킴

→ SiO₂ PCM을 7.5% 사용한 경우 $G^* \sin \delta$ 값이 가장 낮아 저온 균열 저항성이 제일 좋은 것으로 판단 됨



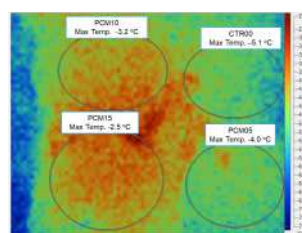
아스팔트의 저온 균열 저항성 평가

- A-2-③ 온도 성능 평가

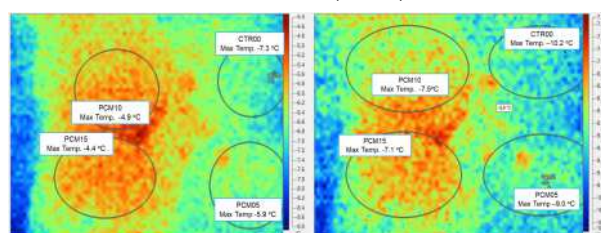
→ -5℃에서 0.5% PCM이 혼합되어 있는 아스팔트 혼합물 시료는 1℃ 높아 일반 아스팔트 혼합물과 유사한 경향을 보였음. 반면에 1% PCM과 1.5% PCM이 혼합되어 있는 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물과 비교하여 2~3℃ 높았음

→ -7.5℃에서 1% PCM과 1.5% PCM 시료(PCM10, PCM15)는 일반아스팔트 혼합물보다 약 3~3.5℃ 정도 높았으며 이는 PCM이 열을 방출한 것으로 볼 수 있음

→ -10℃에서 1.5% PCM(PCM15) 시료는 일반 아스팔트 혼합물보다 2.5℃ 높았음



시료 온도(-5℃)



시료 온도(-7.5℃)

시료 온도(-10℃)

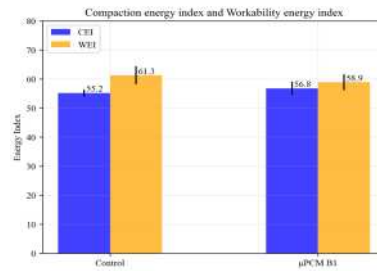
○ (B-1) 아스팔트 혼합물 성능 평가

- B-1-① 다짐성 평가

→ 아래 그림과 같이 공극률과 회전수 측면에서 일반 아스팔트 혼합물과 PCM이 첨가된 아스팔트 혼합

물 사이에 큰 차이가 없는 것으로 나타남. WEI(Workability Energy Index)는 시공중 작업성을 CEI(Compatability Energy Index)는 공용중 압축성을 나타냄

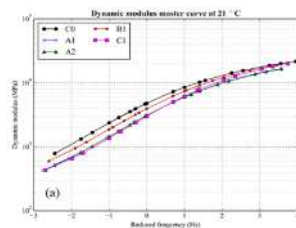
- WEI는 일반 아스팔트 혼합물이 PCM 혼합물보다 높게 나타나나 매우 유사함
- CEI는 일반 아스팔트 혼합물이 55.2, PCM 혼합물이 56.8로 유사한 성능을 보임



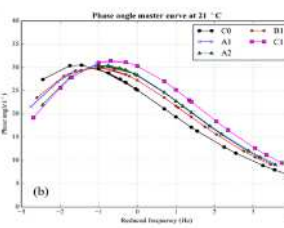
아스팔트 혼합물의 CEI 및 WEI

- B-1-② 동탄성계수 측정

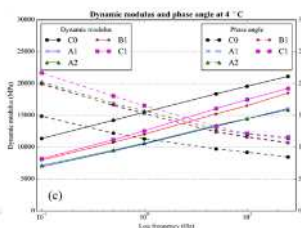
- 시험 빈도가 증가함에 따라 동탄성계수가 증가하는 것으로 나타났으며, 일반 아스팔트 혼합물의 동탄성계수보다 높게 측정됨
- 또한, 4℃ 온도 조건에서 PCM 혼합물 중 특히 A1, A2 혼합물의 동탄성계수가 작게 측정되었으며, 이는 1 ~ 2℃의 열에너지 방출하는 PCM의 상전이 과정이 영향을 미치는 것으로 판단됨
- 일반 아스팔트 혼합물은 모든 PCM 혼합물보다 가장 낮은 위상각을 나타냄. 이는 PCM 함량이 아스팔트 혼합물의 강성을 감소시키며, 저온(4℃)에서 위상각을 증가시키는 것을 알 수 있음



동탄성계수 마스터 곡선(21℃)



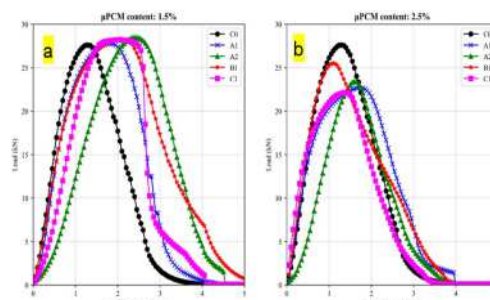
위상각 마스터 곡선(21℃)



동탄성계수 및 위상각 시험 결과(4℃)

- B-1-③ 피로균열 평가

- PCM 함량 1.5%를 포함한 아스팔트 혼합물의 하중-변위 곡선을 나타내며 일반 아스팔트 혼합물보다 PCM 혼합물이 연성을 나타내는 것을 볼 수 있음.
- PCM 함량 2.5%를 포함한 혼합물의 하중-변위 곡선은 일반 아스팔트 혼합물과 비슷한 경향을 나타냄



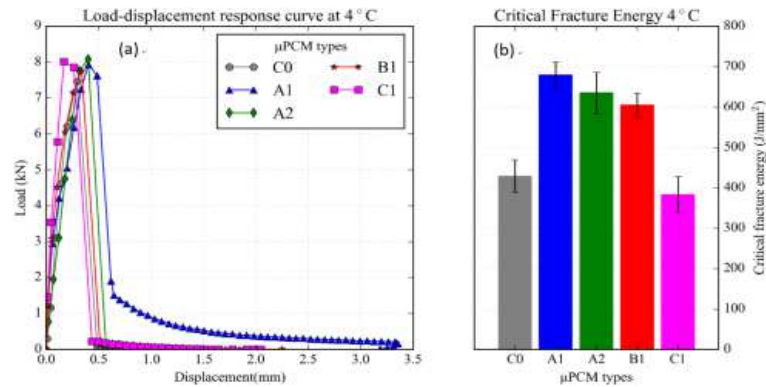
하중-변위 곡선 (a) PCM 함량 1.5% (b) PCM 함량 2.5%

- 일반적으로 CFE(Critical fracture energy index : 임계 파괴 에너지 지수) 값이 클수록 초기 균열 발

생까지 필요한 에너지가 커짐

→ 아래 그림과 같이 A1 혼합물이 가장 연성 거동을 보임

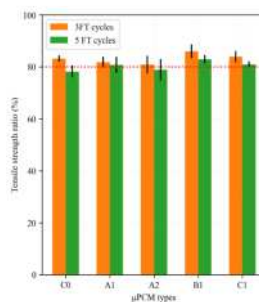
→ CFE값의 경우 C0 혼합물이 423J/mm² 이고 A1 혼합물이 689J/mm²로 매우 높은 CFE값을 보임



단순 하중 재하 시험 결과

- B-1-④ 수분민감성 평가

→ 4종류의 PCM 혼합물과 일반 아스팔트 혼합물 중에서 B1 혼합물이 3회 및 5회 동결-융해 이후 각각 88%, 83%로 가장 높은 인장강도비(TSR)를 나타냄

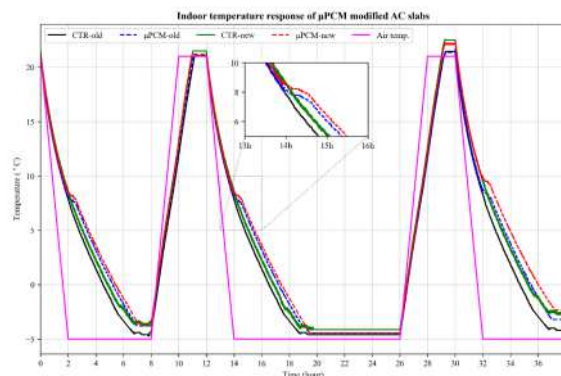


동결융해 후 인장강도비(TSR)

○ (B-2) 실내실험실 입증

→ PCM-new 혼합물이 PCM-old 혼합물보다 약간 높은 온도와 1시간 30분의 동결지연시간을 나타냄

→ PCM-old 혼합물의 동결지연시간은 2시간으로 실외환경에서 약 6개월간 노출된 후에도 상변화물질(PCM)이 잠열(latent heat) 방출 효과를 유지하는 것으로 판단됨

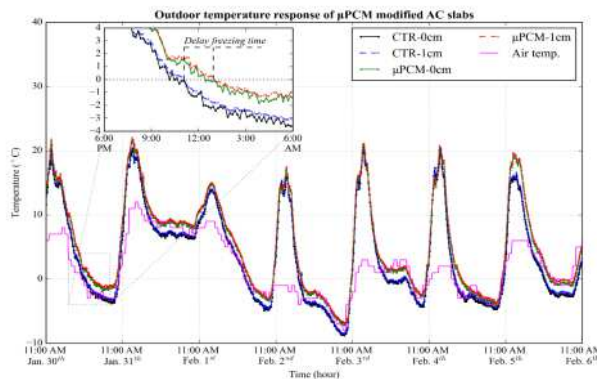


현장 모사 실내시험 결과

○ (B-3) Pilot 시험 입증

→ PCM을 포함한 아스팔트 혼합물은 24시간 중 2시간의 동결지연 지속시간을 가지는 것으로 측정되었음

- 아스팔트 콘크리트 슬래브 시료의 강설량은 일반 아스팔트 혼합물의 경우 약 4cm PCM 혼합물의 경우 3cm로 약 1cm 적게 쌓였으며 이는 대기 온도가 낮아질 때 PCM이 열을 방출하여 초기 강설을 녹인 것으로 판단됨
- PCM을 사용하기 위한 적정 온도는 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 로 판단됨. 해당 온도에서 아스팔트 포장의 온도는 약 $3\sim 8^{\circ}\text{C}$ 로 대기 온도가 해당 온도 범위에서 잠열을 방출하여 아스팔트 포장 온도가 빙점 이상을 유지함



실의 시험 결과

○ (C-1) 상변화물질 제조 캡슐화

- C-1-① 상변화물질 제조

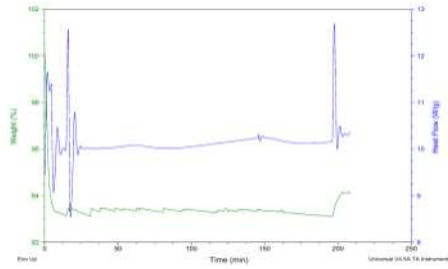
- 최종적으로는 경제적으로 조달이 가능하고 상변화 온도 영역이 본 연구에 적합한 물질로 폴리에틸렌글리콜(Polyethylene Glycol : PEG)을 상변화물질의 재료로 결정함
- 상변화물질로 선택한 PEGs의 잠열(Enthalpy)값을 시차주사열량측정법(Differential Scanning Calorimetry : DSC)을 이용하여 조건을 다르게 한 뒤 측정을 해본 결과 잠열 값은 두 측정 값 모두 약 100J/g 임을 확인함

- C-1-② 캡슐화

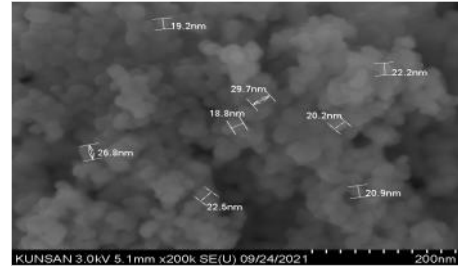
- Porous material을 이용하여 PEGs를 material내에 고르게 dispersion 시키는 방법을 사용함
- PEGs를 PCM으로 하고 특정 소재로 Shell을 만드는 방법이 아닌 Inorganic porous material을 Shell로 하여 material 내의 빈 공간에 PCM을 균일하게 dispersion하여 상변화가 지속적으로 일어날 수 있도록 함
- 이를 위해 아스팔트 포장 온도를 견딜 수 있고 PCM과의 혼용성이 우수하며 동시에 경제적인 제조가 가능한 실리카를 Porous material로서 최종 선택함



Porous material :
Silica



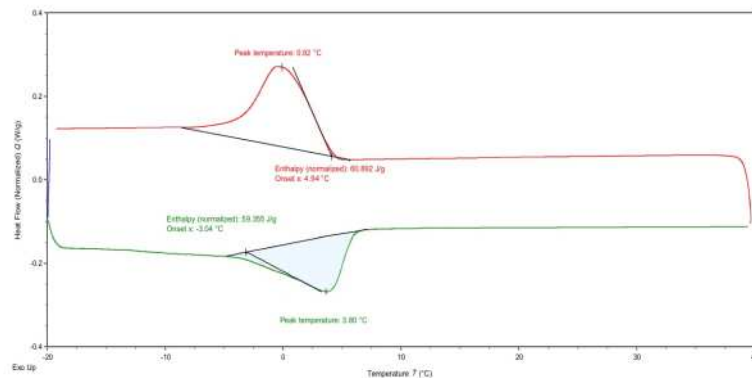
열중량분석 결과 : Silica



SEM 촬영결과

- 실리카를 120℃에서 20분 노출하고 이후 150℃에서 3시간 가량 노출한 결과 10여분 동안 무게감소가 약7% 정도 감소 되는 것을 확인할 수 있었고 이후 150℃에서 3시간동안 노출 시에는 무게 감소가 거의 일어나지 않음을 통해 아스팔트 포장 온도에서도 견딜 수 있는 재료로 판단됨
- 실리카 단독으로는 입자가 작아 주사전자현미경(Scanning Eletron Microscope : SEM)촬영이 어려우나 실리카에 PCM이 적절하게 dispersion 된 이후에는 20nm의 입자 사이즈 전후로 고르게 생성된 것이 확인됨

- C-1-③ 상변화물질 성능 검증



DSC 측정결과 : Silica Shelled PEGs / 분당 1℃

- 블랙 아이스 생성 지연 효과를 얻기 위해서는 상변화가 가장 활발하게 일어나는 Peak 온도를 정확하게 확인할 필요 있음
- 분당 1℃의 속도로 온도를 높이고 낮추면서 얻은 데이터로 온도가 상승하는 구간에서 Peak온도는 3.80℃를 기록했고 온도가 하강하는 구간에서 Peak온도는 0.62℃를 기록함
- 실제로 대기온도는 분당 1도 이상의 속도로 올라가거나 떨어지지 않으므로 실제로 적용하게 될 경우 연구에서 목표로 하는 온도범위에서 상변화가 일어날 것으로 예상됨

(2) 정량적 연구개발성과

- A.환경에 적합한 상변화물질 선정 및 최적양 결정(특허 출원 1건, 논문 1건, S/W 1건, 학술대회 발표 1건, 기술이전 1건)
- 10-2020-0145099, ‘블랙 아이스 생성 지연을 위한 아스팔트 콘크리트 첨가제 및 이의 제조방법’

2020. 11. 3. 특허보
관인생략

출원번호통지서

출원일자 2020.11.03

특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(PN200334)

출원번호 10-2020-0145099 (접수번호 1-1-2020-1170942-88)
(DAS접근코드C0AA)

출원인명칭 군산대학교산학협력단(2-2004-004440-9)

대리인성명 특허법인 피씨알(9-2014-100081-1)

발명자성명 박대국

발명의명칭 블랙아이스 생성 지연을 위한 아스팔트 콘크리트 첨가제 및 이의 제조방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.

※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(검정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.

※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다온도 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허실용신안등록/출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의결서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도를(특허실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.

※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr/특허마당/CT/마드리드>

※ 우선권 인정기간 : 특허실용신안은 12개월, 상표디자인은 6개월 이내

※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미국개상상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 (전자적공통하가서(PCT/SA/99)를 제출하거나 우리나라에 우선의 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 일부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.

※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 중업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 숨겨지지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.

8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

<https://www.patent.go.kr/submit/submitpage/app/Nofact.do>

1/3

- PHAN MINH TAM 외, ‘Simulation on heat transfer of phase change material modified asphalt concrete for delaying black ice formation’, 한국도로학회 논문집



which were approximately 0.2-0.5°C. The high accuracy of the model may come from the indoor conditions, where temperature and wind speed highly controlled the effect of solar radiation and long wave length radiation were mitigated.

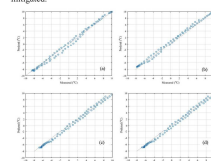


Fig. 11 Comparison between Predicted and Measured Temperature of (a) CTR00, (b) PCMO5, (c) PCMI0, (d) PCMS

5. Conclusions

In this study, a numerical heat transfer model was established to evaluate the effect of phase change material in asphalt concrete under low temperature. The optimum PCM design tool was developed to select the optimal PCM content in asphalt concrete by considering real weather conditions. The findings of this study can be summarized as follows:

- It is able to predict the temperature of PCM-modified asphalt pavement by numerical method. The effect of PCM on asphalt concrete can be taken as effective volumetric heat capacity, while the volume fraction of PCM can be calculated using an iterative method.
- The numerical analysis results showed that incorporating PCM in asphalt mixtures can slow down the cooling temperature of the pavement, resulting in a delay in the formation of black ice.
- The accuracy of the numerical model was confirmed by the high agreement between the measured and predicted values.
- This research provides a numerical tool for simulating and predicting the temperature of PCM modified under real weather conditions.

Acknowledgement

This research was supported by a grant from Infrastructure and Transportation Technology Promotion Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean Government (Code 20CTAP-C157548-01).

REFERENCES

- Anjum, B. R., U. C. Sahoo, and P. Rath. (2020). Phase Change Materials for Pavement Applications: A Review. *Construction and Building Materials*, Vol.247, 2020, p. 118553.
- Banno, M., M. R. Kalar, Z. Refai, J. Wortischek, A. Samatou, and M. N. Partl. (2019). Modification of Asphalt Mixtures for Cold Regions Using Microencapsulated Phase Change Materials. *Scientific Reports*, Vol.9, No.1, 2019, p.20342. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56808-8>
- Chen, J., M. Zhang, H. Wang, and L. Li. (2015). Evaluation of Thermal Conductivity of Asphalt Concrete with Heterogeneous Microstructure. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 84, pp. 368-374. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.070>
- Chen, M., S. Wu, H. Wang, and J. Zhang. (2011). Study of Ice and Snow Melting Process on Conductive Asphalt Solar Collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.95, No.17, pp.1741-1750. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.013>
- Chen, M., Z., J. Hong, S. P. Wu, W. Lu, and G. J. Xu. (2011). Optimization of Phase Change Materials Used in Asphalt Pavement to Prevent Rattling. Report No.219, pp.1375-1378.
- Duail, Y., D. R. Rousse, N. Ben Salah, S. Lasse, and L. Zalewski. (2011). A Review on Phase-Change Materials: Mathematical Modeling and Simulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, No.1, pp.112-130. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.011>
- Gavin, G. J., P. P. E. K. K. E., and G. J. S. (2007). Impact of Pavement Thermophysical Properties on Surface Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.19, No.6, pp.685-690. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0894-1561\(2007\)19:6\(685\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0894-1561(2007)19:6(685))
- Kalar, M., R., Z. Refai, J. Wortischek, A. Samatou, M. N. Partl, and M. Banno. (2019). Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Bitumen to Mitigate the Thermal Distress in Asphalt Pavements. BT - RILEM 252-CMB Symposium.
- Karol Pietrak, T. S. W. A. (2015). Review of Models for Effective Thermal Conductivity of Composite Materials. *Journal of Power Technology*, Vol.95, No.1.
- Kheradmand, M., J. Castro-Gomes, M. Azenha, P. D. Silva, J. L. B. de Aguiar, and S. E. Zoonos. (2015). Assessing the Feasibility of Impregnating Phase Change Materials in Lightweight Aggregate for Development of Thermal Energy Storage Systems. *Construction and Building Materials*, Vol.89, pp.48-59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.031>
- Koukous, T., A. Jamil, Y. Zennaro, and J. P. Dumas (2006). DSC Study and Computer Modelling of the Melting Process in Ice

1. Introduction

1.1. Literature review

During the winter season in Korea, snow and ice, especially

the black ice, can reduce the friction at the tire-surface interface. Black ice commonly occurs on the road surface at a temperature below 0°C (Zhang et al., 2016). Black ice is

- 제 C-2020-051715호, ‘블랙 아이스 저감을 위한 상변화 물질 최적설계 프로그램(Phase Change Material Optimum Design Program for Delaying Black Ice Formation)’



- PHAN MINH TAM 외, 'UTILIZATION OF PHASE CHANGE MATERIAL IN ASPHALT PAVEMENT TO MITIGATE BLACK ICE PROBLEM', 2020 한국도로학회 온라인 학술대회

KUNSHAN UNIVERSITY, SEODU, SOUTH KOREA


군산대학교
KUNSHAN NATIONAL UNIVERSITY

UTILIZATION OF PHASE CHANGE MATERIAL IN ASPHALT PAVEMENT TO MITIGATE BLACK ICE PROBLEM

Tae-Hyun Lee

Seoul National University
taehyunlee@plaza.snu.ac.kr

Ta-Hsin Liu

Kuoan University
liu@kuoan.edu.tw

Hui-Su Kim

Kyunghee University
hskim@khu.ac.kr

Dae-Wook Park

Kyunghee University
dwpark@khu.ac.kr


 KUNSHAN UNIVERSITY
한국대학교

Abstract

Black ice is a thin sheet of ice on the surface road. Once it happens, the black ice remarkably reduces friction at the surface, resulting in dangerous driving. This study aims to incorporate Phase Change Material (PCM) in asphalt concrete to regulate temperature to avoid black ice phenomenon. By using real test data in winter, temperature, wind speed, solar radiation, a numerical model of PCM modified asphalt concrete (AC) was developed to design the optimal PCM. The accuracy of numerical analysis was determined by comparing measured values and predicted values. The results showed that the incorporating 2% in the asphalt mixture is indeed able to slow down the cooling temperature resulting in reduce black ice. The mixture containing 1% by weight of PCM achieved a maximum of 2 °C higher compared to an unmodified asphalt mixture.

Numerical model

One-dimension heat transfer of asphalt concrete

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

where
 ρ = specific density of asphalt mixture
 k = thermal conductivity
 T = asphalt concrete temperature

The effect of PCM in asphalt concrete

$$\rho_p = \rho_{PCM} (1 - \phi) + \rho_{AC} \phi \quad (2)$$

$$\frac{k_p}{k_{AC}} = 1 + \frac{\phi}{k_{AC} - k_{PCM}} \quad (3)$$

where
 ϕ = PCM volume of PCM
 k_{AC} = asphalt concrete effective thermal
 k_{PCM} = PCM effective thermal conductivity

One-dimension heat transfer of PCM modified asphalt concrete

$$\rho_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

where
 ρ_p = asphalt concrete density of PCM
 k_p = asphalt concrete thermal conductivity of PCM

Materials and sample preparation

- Two contents of PCM 0.5% and 1% by weight total
- Binder content: 5.4%
- Binder type: PS16A-22

- Mix PCM and aggregates for 30 second
- Pour binder into mixture and continue for 90 second

- Sample size: cylinder 100 x 42.5 mm
- Air voids: 7 ± 1%
- Road 24 h before temperature testing

Temperature test set up

- The bottom and the sides of the samples were covered with insulated material.
- The infrared camera was set 30 cm above the PCM samples.
- Surface temperature was recorded for every 20 minutes.
- The cooling chamber's temperature was cooled from 10 °C to -10 °C and raised back to 10 °C at 20 h.

Results

Conclusions

- The results showed that the incorporating PCM in the asphalt mixture is indeed able to slow down the cooling temperature, resulting in reduce black ice problem.
- The mixture containing 1% by weight of PCM achieved a maximum of 2 °C higher compared to an unmodified asphalt mixture.
- The numerical results show a high consistency between predicted and measured results.

Acknowledgment

The study was supported under support of Project for 2020 Academic Research by Ministry of Education and Technology (2020) and the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAISA). The authors would like to thank the reviewers of manuscript, reviewers, and funding for their guidance and valuable suggestions.

- 블랙 아이스 생성 지연을 위한 아스팔트 콘크리트 첨가제 및 이의 제조방법

특허권 양도 계약서

"군산대학교 산학협력단"(이하 "양도인"이라 한다)과 "주식회사 가우" (이하 "양수인"이라 한다)는 특허권의 양도에 관하여 다음과 같이 계약(이하 "본 계약"이라 함)을 체결한다.

제1조(계약의 목적)

본 계약은 "양도인"이 "양수인"에게 특허권을 양도하는데 필요한 제반사항의 정함을 그 목적으로 한다.

제2조(양도할 특허의 표시)

계약의 목적이 되는 1건의 특허는 다음과 같다.

	특허 등록 번호	특허명
1	10-2020-0145099	블랙아이스 생성 지연을 위한 아스팔트 콘크리트 첨가제 및 이의 제조방법
		특목공학과 박대욱 교수

제3조(특허권의 이전 등록)
"양도인"은 "양수인"이 대금을 완납한 후 특허청에 이전 등록을 추진하도록 한다.

제4조(특허 양도대금)
"양수인"은 "양도인"에게 다음과 같이 양도 대금을 지급한다.
- 일시금 : ₩10,000,000 (금 일천만원정) (부가세 별도)
- 계약 체결 후 10일 이내 "양도인"이 지정한 계좌로 현금으로 지불.

제5조(향후 협력방안)
본 계약 이후에도 "양도인"은 "양수인"의 특허 활용 사업 참여등 상호와 협력시에는 별도의 협약으로 추진토록 한다.

제6조(분쟁해결)
본 계약의 어느 일방도 본 계약을 이행함에 있어 천재지변 또는 불가항력 요인 발생하거나 기타 일방의 고의 과실 또는 태만에 의하지 아니한 하자

로 인하여 발생한 어떠한 성격의 손실 또는 손해에 대해서도 그 일방은 상대방에게 책임을 지지 아니한다.

제7조(계약의 해지)
(1) "양도인"은 "양수인"이 "본 계약 내용을 위반한 경우"라고 인정될 때에는 "양수인"에게 이를 통지하고 본 계약을 해지 할 수 있다.
(2) "양수인"은 다음 각 호의 사유가 발생하였다고 인정될 때에는 "양도인"에게 이를 통지하고 본 계약을 해지 할 수 있다.
① "양도인"이 본 계약에 정한 기술을 성실히 이전하지 않은 경우
② "양도인"이 본 계약의 내용을 위반한 경우
(3) 본 계약의 해지사유가 발생할 경우 "양도인"과 "양수인"은 상대방에게 3개월 전에 서면으로 통보하고 계약을 해지할 수 있다.

제8조(해석)
본 계약에 명시되지 아니한 사항 및 본 계약의 해석상 이의가 있을 때에는 양방의 합의에 의하여 결정하되 합의되지 않은 사항은 "양도인"의 관할 주소지 관할법원의 결정에 따른다.

제9조(계약의 효력)
본 계약은 계약서에 "양도인"과 "양수인"이 서명 또는 날인한 날로부터 효력이 발생한다.

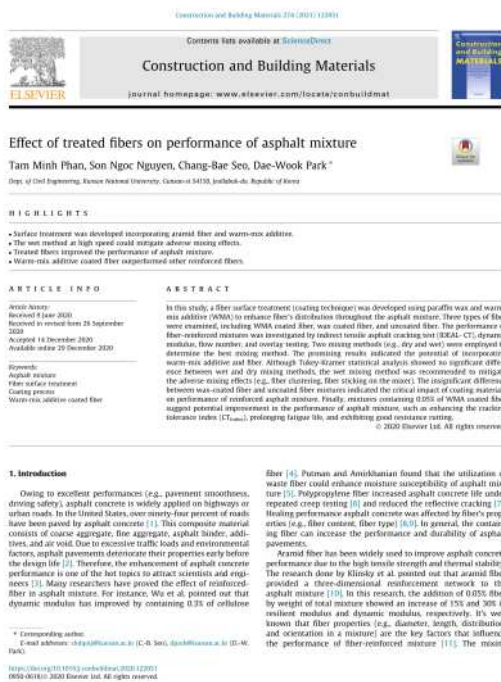
본 계약의 체결을 증명하기 위하여 본 계약서 2통을 작성하여 당사자가 서명 또는 날인한 후 각각 1통씩 보유하기로 한다.

2021년 12월 2일

(양도인) 군산대학교 산학협력단 401-82-06407 전라북도 군산시 대북로 558(비룡동)	(양수인) 주식회사 가우 143-81-29550 경기도 화성시 장안로 삼수문길 25-28
단장 : 김 중 (인)	대표이사 : 김 합 수 (인)

○ B.블랙 아이스 지연 아스팔트 포장 개발(논문 2건, 학술대회 발표 1건, 수상 실적 1건)

- PHAN MINH TAM 외, 'Effect of treated fibers on performance of asphalt mixture', Construction and Building Materials



Tam Minh Phan, Son Ngoc Nguyen, Chang-Bae Seo et al. *Constructive and Building Materials* 274 (2021) 128951

30% greater than that of the control mixture (Table 8). The fiber distributions in asphalt mixture can improve the connection between aggregates, which leads to higher fracture energy to obtain the peak load. Also, containing fiber has shown improvement in crack resistance. The crack rate index (C_r) is defined as the crack propagation of asphalt mixture. The higher C_r, the faster crack propagation is. The WMA mixture acquired the lowest C_r value (e.g., 0.252), indicating the best cracking resistance. Meanwhile, the CTR mixture (C_r = 0.309) presented a faster crack propagation.

4. Conclusions

The laboratory test results in this study showed that the containing treated fiber improves the asphalt mixture's performance. The following key findings and conclusions can be drawn:

- The surface treatment may help coated fibers reduce connection to each other, which improves the homogeneous distribution of fiber throughout the asphalt mixture.
- The WMA coated fiber in this study had a core-shell ratio of 40:54 compared to the designed 50:50 ratio and a diameter of 1.16 mm. The incorporation of WMA and fiber helps the WMA fiber outperform other fibers in terms of mechanical properties.
- The wet mixing process at high mixing speed was used to mitigate fiber loss and adverse effects (e.g., fiber clustering, sticking issue on the mixer).
- The insignificant difference between the WAX mixture and the UNC mixture indicated a notable impact of coating material on improving asphalt performance.
- The addition of fibers in the asphalt mixture improved both C_{TR} and indirect tensile strength. Fiber-reinforced samples generated better ductile behavior than that of without fiber.
- Although the reinforced-fiber effect could be negligible at low temperatures or high frequencies, fiber addition produced some stiffening effect at high temperatures (e.g., 37 °C).
- The use of fiber in asphalt mixtures contributes to stronger asphalt pavement resistance to rutting. HMA having proper fiber content gained lower accumulated permanent settlement and higher flow number, indicating a better mix of stability against shear deformation compared to the control mixture.

In general, asphalt mixture containing treated fiber, especially warm-mix additive coated fiber (WMA coated fiber), showed promising results to enhance its mechanical properties. It should be noted that more analysis of the microstructure of WMA coated fiber, different core-shell ratios, and fiber's distribution in asphalt mixture should be carried out in further research.

Credit authorship contribution statement

Tam Minh Phan: Methodology, Validation, Data curation, Writing - review & editing, Writing - original draft. Son Ngoc Nguyen: Validation, Data curation, Writing - review & editing, Writing - original draft. Chang-Bae Seo: Validation. Dae-Wook Park: Methodology, Validation, Data curation, Writing - review & editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This research was supported by a grant from Infrastructure and Transportation Technology Promotion Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean Government (Code 20CTAP-C15748-01).

References

- [1] FHWA (FHWA), Highway Statistics 2015, Fed. Highway Admin. (2017).
- [2] X. Xing, J. Liu, J. Peng, H.S.J. Zhang, Y. Tian, Effect of fiber length and surface treatment on the performance of fiber-modified binder, *Constr. Build. Mater.* 248 (2020) 119792. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119792>.
- [3] S.M. Altaba, M. Shalabi, S.M. Hozay, Fiber-reinforced asphalt concrete - A review, *Constr. Build. Mater.* 241 (2020) 871-877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118991>.
- [4] S.W. Cho, W. N. Li, Y. Lee, Effect of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Eng.* 22 (4) (2007) 733-736. <https://doi.org/10.1016/j.jwut.2007.04.005>.
- [5] R.J. Ferman, S.N. Amirkhanian, Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures, *Resour. Conserv. Recycl.* 42 (1) (2004) 245-274. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.04.005>.
- [6] S. Tapan, E. Ayar, A. Tuncan, M. Tuncan, Repeated creep behavior of polypropylene fiber-reinforced bituminous mixtures, *J. Transp. Eng.* 135 (4) (2009) 499-506. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1085-1119\(2009\)135:4\(499\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1085-1119(2009)135:4(499)).
- [7] S. Tapan, The effect of polypropylene fibers on asphalt performance, *Build. Environ.* 41 (1) (2006) 1065-1071. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.011>.
- [8] B.H. Dink, D.W. Park, T.M. Phan, Healing Performance of Granite and Steel Slag Asphalt Mixtures Modified with steel Wool Fibers, *KSA J. Civ. Eng.* 22 (10) (2018) 2064-2072. <https://doi.org/10.1016/j.ksces.2018.05.004>.
- [9] T.M. Phan, D.W. Park, T.M. Phan, Crack healing performance of hot mix asphalt containing steel slag by microwave heating, *Constr. Build. Mater.* 180 (2018) 590-591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.004>.
- [10] L.M.G. Kinsley, K.E. Kinsley, V.C. Faria, V.S. Barreto, Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt, *Constr. Build. Mater.* 176 (2018) 747-752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.221>.
- [11] O.S. Alsaka, W.K. Khamis, K.E. Kinsley, J.H. Nematbadi, Utilization of natural fibers as modifier in bituminous emulsions: A review, *Constr. Build. Mater.* 54 (2014) 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.077>.
- [12] S.Z. Altaba, S.M. Hozay, S.M. Shalabi, An investigation on the use of textile materials to mechanical reinforcement of asphalt concrete (AC) structures and analysis of results by an artificial neural network (ANN), *4th Natl. Congr. Civ. Eng.* (2008).
- [13] T.K. Board of Sciences Engineering, Medicine, Fiber Additives in Asphalt Mixtures, The National Academies Press, Washington, DC, 2013. <https://doi.org/10.17226/22499>.
- [14] P.B. Shetty, P. Wang, H. Li, J. Sun, T.M. Phan, Development of an AC208, *Cracking and the asphalt mix design and QC/QA, Road Mater. Pavem. Design* 18 (Suppl.) (2017) 465-472.
- [15] E.A. McCrone, R.M. Anderson, T.W. Kennedy, M. Salomatin, Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, *Transp. Res. Board* (1995) 160.
- [16] Huanan Chen, Qianqian Xu, Shuang Chen, Dongming Zhang, Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures, *Transp. Res. Board* 2005-3603, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.09.010>.
- [17] K.L. Kinsley, J.H. Nematbadi, Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science, Second Edition, 2003.
- [18] ASTM D1342-11, Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt Concrete Mixtures, (2010).
- [19] H. Wang, S. Zhao, C. Lin, The Effect of Asphalt Mixture on the Dynamic Modulus of Asphalt Mixture, *Appl. Sci.* 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/app9123247>.
- [20] Qianqian Xu, Shuang Chen, Wang Li, Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures, *Int. J. Fatigue* 31 (10) (2009) 1594-1602. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.03.008>.
- [21] H.K. Kinsley, H.K. Kinsley, S.Z. Altaba, J. H. Nematbadi, Development of dynamic modulus master curves for hot mix asphalt with alternative testing temperatures, *Int. J. Pavement Eng.* 13 (3) (2012) 188-199. <https://doi.org/10.1080/10807017.2011.617246>.
- [22] ASTM D1709-17, Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT), (2017).
- [23] MarbWorx, MarbWorx KEMTEC, (2020).
- [24] E.A. Alsaka, A. Karamali, E.S. Nematbadi, Sensitivity of the Fiber Number to Mix Factors of Hot Mix Asphalt, *Infrastructure* 4 (2019). <https://doi.org/10.1386/infrastructure.4.2019.4>.
- [25] Altair Billi Tam, Dae-Wook Park, Yi Ho Minh Le, Jo Seon Kim, Evaluation on fatigue cracking resistance of fiber reinforced asphalt concrete with

- [illegible]

- 72 -

- APPLICATION OF PHASE CHANGE MATERIAL IN ASPHALT MIXTURE TO DELAY BLACK ICE', 2021년도 제 22회 한국도로학회 학술대회, 우수논문상 수상



○ C.상변화 물질 제조

- SiO₂ encapsulated PCM

「시제품 제작」 성과 확인서			
□ 과제정보			
사업명	국립교통과학기술연구원사업	과제번호	2021AP-C157540-01
과제명	분산배터리 시스템용 열차량 제어장치 개발	연구기관	한국교통연구원
연구기관	한국교통연구원	연구책임자	노영환
□ 현장시험·검증 결과			
구분	기타	시제품명	SiO ₂ encapsulated PCM
제작일시	2021.10.29	제작업체	한국교통연구원
목적	- 차량용배터리시스템용 열차량 제어장치 개발을 위한 시제품 제작		
내용	- 차량용배터리시스템용 열차량 제어장치 개발을 위한 시제품 제작		
활용계획	- 차량용배터리시스템용 열차량 제어장치 개발을 위한 시제품 제작		
비고	본고사, 공인된 결과물임을 증명합니다.		
위 연구과제를 통해 달성된 성과와 증명이 실거처에 실리도록 하겠습니다.			
2021. 10. 29. 일			
연구기관	책임자	국립교통연구원장 권한 위임장	
한국교통연구원	노영환		
국립교통연구원장 권한 위임장			

- CaCO₃ encapsulated PCM

「시제품 제작」 성과 확인서			
□ 과제정보			
사업명	국립교통과학기술연구원사업	과제번호	2021AP-C157540-01
과제명	분산배터리 시스템용 열차량 제어장치 개발	연구기관	한국교통연구원
연구기관	한국교통연구원	연구책임자	노영환
□ 현장시험·검증 결과			
구분	기타	시제품명	CaCO ₃ encapsulated PCM
제작일시	2021.10.29	제작업체	한국교통연구원
목적	- 차량용배터리시스템용 열차량 제어장치 개발을 위한 시제품 제작		
내용	- 차량용배터리시스템용 열차량 제어장치 개발을 위한 시제품 제작		
활용계획	- 차량용배터리시스템용 열차량 제어장치 개발을 위한 시제품 제작		
비고	본고사, 공인된 결과물임을 증명합니다.		
위 연구과제를 통해 달성된 성과와 증명이 실거처에 실리도록 하겠습니다.			
2021. 10. 29. 일			
연구기관	책임자	국립교통연구원장 권한 위임장	
한국교통연구원	노영환		
국립교통연구원장 권한 위임장			

- Melamine-urea-formaldehyde Resin encapsulated PCM

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Simulation on heat transfer of phase change material modified asphalt concrete for delaying black ice formation	한국도로학회 논문집	PHAN MINH TAM	22	대한민국	한국도로학회	비SCIE	2020.10.28	2287-3678	100%
2	Effect of treated fibers on performance of asphalt mixture	Construction & Building materials	PHAN MINH TAM	274	국외	ELSEVIER	SCIE	2021.03.08	0950-0618	100%
3	Improvement on rheological property of asphalt binder using synthesized micro-encapsulation on phase change material	Construction & Building materials	PHAN MINH TAM	287	국외	ELSEVIER	SCIE	2021.06.01	0950-0618	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2020 한국도로학회 온라인 학술대회	상변화물질이 첨가된 아스팔트 혼합물의 온도	PHAN MINH TAM	2020.09.25	온라인	대한민국
2	2021년도 제 22회 한국도로학회 학술대회	Application of Phase Change Material in Asphalt Mixture to Delay Black Ice	PHAN MINH TAM	2021.10.27	경주화백컨벤션 센터	대한민국

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	블랙 아이스 생성 지연을 위한 아스팔트 콘크리트 첨가제 및 이의 제조방법	대한민국	군산대학교 교산학협력단	2020.11.03	10-2020-0145099				100	기술이전

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	블랙 아이스 저감을 위한 상변화 물질 최적설계 프로그램	2020.12.01	군산대학교교산학 협력단	2020.12.22	제 C-2020-05171 5호	군산대학교교산학 협력단	100

[경제적 성과]

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)
1	특허권 양도	블랙 아이스 생성 지연을 위한 아스팔트 콘크리트 첨가제 및 이의 제조방법	(주)가우	2021.12.02	2021	11,000

[사회적 성과]

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
1	대 학 인력 배출	2021	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
			1	1			2					2	

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	수상	우수논문상	한국도로학회 2021년도 가을학술대회에서 논문을 발표하여 우수논문으로 선정됨	PHAN MINH TAM, 서창배, 김할수, NGUYEN TIEN PHAT, 박대욱	2021.10.29	한국도로학회

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 환경에 적합한 상변화물질 선정 및 최적량 결정 - 유한요소 분석 - 아스팔트와의 혼합 성능 평가	○ 상변화물질 블랙 아이스 지연에 대한 문헌조사 및 메커니즘 조사 - 해외 블랙 아이스 생성지연 및 열섬현상완화를 포함한 메커니즘을 조사하였음 ○ FEM 분석을 통한 상변화 물질 종류 및 최적 함량 결정 - 열흐름지배방정식을 FEM 수치해석에 적용하여 상변화 물질의 종류와 양을 결정하는 프로그램 개발 ○ 아스팔트와의 혼합 성능 평가 - 점성, 피로균열 및 온도균열 저항성을 평가하였으며, 상변화물질이 혼합물의 온도 변화에 미치는 영향을 평가함	100
○ 상변화물질 제조 - 상변화물질 제조 캡슐화	○ 상변화물질 캡슐화 및 상변화 성능 평가 - 수치해석을 통한 상변화 물질 종류에 기반하여 상변화 물질을 제조하였으며, 다양한 캡슐재료를 활용하여 캡슐화 함. 시차주사열량기와 TGA를 이용하여 성능평가를 수행함	100
○ 블랙 아이스 지연 아스팔트 포장 개발 - 아스팔트 혼합물 성능 평가 - 실내실험실 입증 - Pilot 시험 입증	○ 아스팔트 혼합물 성능 비교 - 아스팔트 혼합물의 간접 인장 강도, 동탄성계수 측정, 피로균열 저항성, 수분민감성 평가를 실시함 ○ 실험실 규모에서의 블랙 아이스 생성지연 평가 - 열전대를 매립한 공시체를 제작하여 저온 항온 장치를 사용한 온도 시험을 실시함 ○ Pilot 연구를 통한 블랙 아이스 생성지연 모니터링 - 일반적인 경우와 상변화물질이 적용된 아스팔트 혼합물의 대형 공시체를 제작하여 동절기간 외부환경에 노출하여 강설 시 등의 데이터를 확보함 ○ 환경감응 상변화물질 수정보완 - 경제성 및 성능 확보를 위한 지속적인 상변화물질 개선을 실시함	100

4. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도

- 상변화 물질의 아스팔트 포장 건설재료
 - 아스팔트 포장의 블랙아이스 생성 지연 공법으로 사용 가능
 - 아스팔트 포장의 열섬현상 완화에 사용 가능
 - 친환경 건설재료로 활용에 기여
 - 페인트에 혼합하여 주택 상층부 열섬완화에 사용
 - 블록포장에 사용하여 단지 및 아파트 지역의 열섬완화에 사용
 - 아스팔트 포장 성능개선
 - 저온에서의 피로균열 및 저온균열 저항성 향상
 - 고온에서의 소성변형 저항성 향상
-

5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

1) 연구개발성과의 활용 가능성

- 본 연구에서 개발되는 블랙 아이스 저감 및 온도균열 저항성 향상 아스팔트 포장은 향후 겨울철 빈번하게 발생하는 미끄럼 사고를 예방할 수 있는 기술로 미래 원천기술의 확보를 통해 아스팔트 콘크리트 산업뿐만 아니라 자동차 사고 방재 분야의 활용성이 매우 클 것으로 기대됨
 - 환경에 반응하는 상변화물질을 활용한 아스팔트 포장 적용에 대한 원천기술로 활용
 - 상변화물질 산업을 발전시키고 소재산업 다변화 기술로 활용
 - 블랙 아이스 저감 포장 성능평가 방법 및 기준 설정의 기초자료로 활용
 - 사고 위험이 있는 지역의 기존 포장체 덧씌우기 및 신규 포장체에 활용
 - 본 원천기술의 확보를 토대로 블랙 아이스 저감 아스팔트 포장이 실용화 기술이 체계적으로 이루어진다면 아래와 같은 분야로의 활용이 기대됨
 - 한국도로공사, 국토교통부, 지방자치단체 등 도로시설물 관리기관의 기술전파를 통해 블랙 아이스에 의한 방재기술로 활용
 - 환경반응 상변화 재료 기술을 활용하여 용도확대 방안 창출 및 이를 통한 사업 활성화
 - 상변화물질 포장재료 적용 활성화를 통한 사업화
 - 상변화물질 등 포장재료 관련 소재산업 활성화
 - 환경반응 상변화 재료 다변화 적용
 - 여름철 열을 방출하는 재료를 활용한 열섬효과 완화에 활용
 - 여름철 고온에 의한 소성변형 저감 기술로 활용
-

2) 연구개발성과의 사업화 계획

(1) 상용화 단계

- 행정안전부에서 파악되고 있는 상습결빙 구간을 대상으로 교통사고 발생현황에 대한 분석을 실시하여 도로 결빙으로 인한 교통사고가 가장 빈번한 곳을 선정. 시범사업 진행을 통해 효과를 실증적으로 검증하고 점차 다른 상습결빙 구간을 대상으로 적용할 필요가 있음
 - 1단계 : 실험실 실험을 통한 기술의 효과 검증
 - 2단계 : 소규모 기술 검증
 - 3단계 : 상습결빙지역 및 도심지역 적용 -> 대규모 기술 검증
 - 4단계 : 3단계를 바탕으로 경제성 분석 및 데이터 확보
 - 5단계 : 4단계 데이터를 통한 적극적인 언론 홍보 및 영업 활동
-

(2) 사업화 모형 수립 배경

- 겨울철 급격한 일교차 변화에 따른 도로 결빙은 도로 환경, 지역 및 입지 여건 등에 따라 대형사고로 이어질 위험성이 커 사고 위험이 높은 지역에서는 더욱 적극적인 제설 활동이 요구됨. 그러나 손쉬운 처방으로 이용되는 제설제는 도로시설물 및 환경에 부정적인 영향을 미치며 새벽시간에 발생하는 결빙은 눈에 잘 보이지 않아 제거하는데 많은 어려움이 있음
- 여름철이면 대도시의 기온이 매년 최고치를 갱신하는 등 열섬현상으로 인한 부작용이 날로 심각해지고 있음. 도심의 열섬현상의 주된 원인 중 하나로 지목되는 아스팔트의 경우 표면 온도를 낮추기 위해 특수 도료를 덧바르려는 시도가 있었으나 빛 반사로 인한 눈부심 문제, 시간이 지나면서 닳아 없어지는 문제, 지나치게 높은 시공비용 등으로 뚜렷한 해결책이 되지 못하고 있어 대체 기술에 대한 요구가 그 어느 때 보다 절실함

(3) 사업화 목표 및 핵심 경쟁 요인

구 분	내 용
사업화 목표	○ 추가적인 장비나 제설제 없이 도로 결빙이 최소화 될 수 있도록 함 ○ 대기 중의 열을 도로가 일부 흡수하여 열섬현상을 완화하는데 도움을 줄 수 있도록 함
핵심 경쟁 요인	○ 반복 사용에 안정적이고 다양한 온도 범위에 감응 가능한 상변환물질 개발 능력 ○ 아스팔트 혼합물 최적화 능력 - 기술 이전(군산대) - 적절한 상변화물질의 선택, 혼합물 배합비, 배합방법 등

(4) 목표 시장 구조

- 현재 국내에서는 아스팔트 혼합물에 상변화물질을 적용하고 있지 않으므로 국내 시장은 아직 형성되어 있지 않음
- 현장 검증, 시공 실적 축적을 통해 제품에 대한 신뢰도 확보가 필요함
- 기존 아스팔트 혼합물에 비해 높은 가격으로 수요 기관을 대상으로 재료 측면 이외에도 여러부분에 대한 경제성 인지 필요

(5) 수익 확보 전략

- 주요 고객군
 - 정부
 - 지자체 유관 부서
 - 아스콘 생산 업체

구 분	내 용
도입기	시장에 제품을 출시하고 인지도를 높이기 위한 단계 적극적으로 언론에 노출이 될 수 있도록 하는 대언론 홍보 전략
성장기	적극적인 수율 향상, 수요 예측을 통한 적시 적정량 생산 등을 통해 가격경쟁력을 확보하고 이익률을 극대화
성숙기	확대된 매출과 이익을 바탕으로 적극적인 고정비 절감과 동시에 해외 거래처 발굴

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.