최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중정기관앙행명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)
공고번호	공고-제05호	연구개발과제번호		21CTAP-C157479-02

국가과학기술 표준분류	E10406	70%	EB0311	20%	EH0702	10%
연구주제	(대분류) 재난·재해예방 등 안전기술 개발		(중분류) 도로교통 이용자 보호시스템		(소분류) 선제적 사고예방·처리시스템	

연구개발과제명	국문	폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체 개발		
	영문	Waste coffee grounds-derived carbon nanomaterials reinforced conductive cementitious composites		
주관연구기관	기관명	수원대학교 산학협력단	사업자등록번호	124-82-14446
	주소	(우) 18323	법인등록번호	
주관연구책임자	성명	이주하	직위	부교수
	연락처 직장전화	031-220-2159	휴대전화	010-9238-1323
	연락처 전자우편	leejooha@suwon.ac.kr	국가연구자번호	1017 9943
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)		
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(0년 9개월)		
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년 0개월)		

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	370,000	-	-	-	-	-	-	370,000	-	-	-
1년차	210,000	-	-	-	-	-	-	210,000	-	-	-
2년차	160,000	-	-	-	-	-	-	160,000	-	-	-

공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구기관							
위탁연구기관							
연구기관 외 기관							

연구개발담당자 실무담당자	성명	박창현	직위	연구원	
	연락처 직장전화	031-220-2522	휴대전화	010-2754-9817	
	연락처 전자우편	chpark458981@naver.com	국가연구자번호	1266 7758	

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

2022년 3월 8일

연구책임자 : 이 주 하 (직인)

주관연구개발기관의 장 : 수원대학교 산학협력단장 이 채 영 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

< 요 약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업		연구개발과제번호		21CTAP-C157479-02	
내역사업명		국토교통기술혁신연구					
국가과학기술표준분류		EI0406	70%	EB0311	20%	EH0702	10%
연구주제		(대분류) 재난·재해예방 등 안전기술 개발		(중분류) 도로교통 이용자 보호시스템		(소분류) 선제적 사고예방·처리시스템	
연구개발과제명		폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체 개발					
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)					
총 연구개발비		총 370,000천원 (정부지원연구개발비 : 370,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)					
연구개발단계		기초[√] 응용[ ] 개발[ ] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]		기술성숙도		착수시점 기준(2) 종료시점 목표(5)	
연구개발과제 유형		지정공모 [ ] 자유공모 [✔]					
연구개발과제 특성		기반연구					
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	동절기 저온에서 도로의 결빙을 방지할 수 있는 폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체가 적용된 도로 포장 기술 개발					
	전체 내용	❍ 폐 커피분말 추출 탄소나노소재(WCG) 개발 • WCG의 밀도 및 형상차를 이용한 정제 및 분리 기술 개발 • WCG-CC의 온도별 열분해 공정에 따른 탄화 공정 및 흑연화 기술 개발 • 탄화 WCG-CC의 표면 활성화(Activation) 및 형상제어 기술 개발 ❍ 폐 커피분말 기반 탄소나노소재 시멘트 복합체(WCG-CC) 개발 • WCG 기반 전도성 재료의 전처리 기법 수립 • 열환원을 통한 WCG 탄화 입자간 계면결합 및 접촉저항 향상 • WCG-CC의 변수별 배합실험을 통한 기본 배합도출 및 기본성능 검토 ❍ 도로 결빙 방지용 포장체 핵심 성능 평가 결과를 통한 WCG-CC의 설계 최적화 • 열전도 특성을 활용한 공급 전력량에 따른 WCG-CC의 발열 성능 수치 분석 • WCG-CC의 도로 포장체 역학적 성능 및 내구성 평가를 통한 성능 향상방안 도출 • WCG-CC의 전도성 네트워크 및 터널링 모델링 검증 ❍ WCG-CC 적용 도로포장의 동절기 유사환경 하 성능 검증 • 동절기 유사환경 하 WCG-CC 도로포장 Mock-up Test • 다양한 환경조건에서의 WCG-CC 성능평가 • 경제성 및 기능성 고려한 WCG-CC의 효율적 적용 방안 및 개선 방향 도출					
	1년차 목표	❍ 폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체 (WCG-CC) 개발					
	1년차 내용	❍ 폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체 (WCG-CC) 적용 도로 포장체 개념 설계 ❍ 폐 커피분말 (WCG) 기반 탄소 나노소재 개발 ❍ WCG 기반 전도성 나노소재의 시멘트 복합체 적용 기법 수립 ❍ WCG-CC의 기본 배합비 도출 ❍ WCG-CC의 기본 성능 평가					

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">2년차</td><td>목표</td><td>○ 도로 결빙 방지용 WCG-CC 적용 도로 포장 기술 개발</td></tr>
<tr><td>내용</td><td>○ WCG-CC의 융설/융빙 성능 평가
○ WCG-CC의 도로 포장체 기능 확보
○ WCG-CC의 설계 최적화
○ WCG-CC 적용 도로 포장의 동절기 유사 환경하 성능 검증
○ WCG-CC 적용 도로 포장의 경제성 분석</td></tr>
<tr><td colspan="3">연구개발성과</td><td>○ 본 연구의 최종성과물인『동절기 저온에서 도로의 결빙을 방지할 수 있는 폐 커피 분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체가 적용된 도로 포장 기술 개발』은 보고서 형태로 제시되며, 논문 및 특허 등의 성과와 함께 도출</td></tr>
<tr><td colspan="3">연구개발성과
활용방안 및
기대효과</td><td>■ 활용방안

○ 콘크리트 포장 결빙/블랙아이스 예방 대책 기술의 현장 적용
- 한국도로공사 등 관계 부처 협조를 통한 현장 적용
↳ 도로처: 콘크리트 포장도로의 결빙/블랙아이스 대책 수립 시 개발 기술 적용
↳ 건설처: 콘크리트 포장 시공 시 본 과제 성과물 전도성 시멘트복합체 적용
↳ 도로교통연구원: 도로 결빙/블랙아이스 예방 자체연구 시 성과 활용
- 국가 도로 및 교량의 유지관리 담당부서 협조를 통한 현장 적용
↳ 도로 결빙/블랙아이스 집중발생구역에 적용하기 위한 방안 마련
↳ 동절기 사고다발지역에서의 사고예방 대책기술 적용

○ 탄소 나노 신소재 및 전도성 건설 재료 관련 분야 산업에 적용
- 폐 커피분말 산업폐기물의 재활용 산업에 활용
- 폐 커피분말 기반 탄소 나노소재를 활용한 연료전지 산업 분야
- 자가 센싱, 철근방식 등 다양한 전도성 콘크리트 활용 분야에 적용
- 전도성 시멘트 복합체를 활용한 ESS(Energy Storage System)분야에 적용 가능
- 기존의 탄소계열 나노소재보다 경제적이며 사용성이 우수한 소재의 개발을 통해 관련 연구분야의 활성화를 도모하며, 실용화 기술개발에 기여

■ 기대효과

○ 기술적 측면
• 시멘트 복합체의 전도성 부여를 위한 폐 커피분말 나노소재의 개발
- 기존의 탄소계열 나노소재를 대체할 수 있는 소재의 개발로 전도성 시멘트 관련 기술 발전
• 전도성 시멘트 복합체를 적용한 도로 유지관리 기술 발전 도모 및 데이터 축적
- 전도성 시멘트 복합체를 적용한 도로 융빙용 포장기술 개발로 해당 분야의 기술 발전 및 관련 연구분야의 활성화 도모로 산학연 관심 고취
• 선진국 수준의 기술력 확보
- 국내 동절기 도로 환경을 고려한 기술 개발로 국내 기술자립도 향상 및 국가 기술경쟁력의 선진국 수준 제고

○ 경제적·산업적 측면
• 기존의 도로 융설/융빙 기술과 비교하여 비용절감 가능
- 현행 인력/장비를 통한 기술보다 융설/융빙을 간편하고 경제적으로 수행 가능
• 교량 및 도로 등의 콘크리트 포장 유지관리비용 절감
- 본 기술 적용으로 염화칼슘 제설제로 인한 구조물 열화, 주변 식생에 미치는 악영향 감소로 유지관리비용의 절감</td></tr>
</table>

	• 동절기 사고발생률 감소로 차량 파손 등 재산 피해 예방 - 도로 결빙/블랙아이스에 의한 차량 파손 등 국민의 재산 피해 예방 가능 • 교통 장애, 개인별 경제활동 손실 등의 사회적 비용 절감 - 제설작업으로 인한 교통체증 등 경제활동에 장애를 초래하는 요소의 발생을 미연에 방지 **○ 사회적 측면** • 국민의 생명 안전 보호 - 동절기 도로의 결빙/블랙아이스로 인해 발생하는 대형사고 발생률이 증가하고 있으나, 기술의 적용으로 사고를 사전에 예방하며 국민의 생명 안전 보호 및 교통안전 확보 • 도로 주행성 향상으로 교통안전에 대한 불안감 해소 - 동절기 고속도로 주행 시 미끄러짐 사고에 대한 불안감 해소 • 도로 주변 식생의 보호에 의한 환경보호 - 염화칼슘계열 제설제가 주변 식생에 미치는 악영향을 사전에 방지하며 환경보호 가능 • 도로 포장의 사용수명 향상 - 염화칼슘계 제설제의 사용량 감소로 콘크리트의 내구성을 확보하여 도로의 사용수명 향상 • 도로 포장 보수보강 시장 확대 및 관련 산업 활성화 - 개발 기술을 활용한 도로 포장 관련 보수보강 시장 확대 및 관련 산업 활성화 • 해외 도로 건설시장의 전략적 기술수출 및 수주경쟁력 강화 - 높은 적설량의 영향을 받는 해외 도로 건설시장에 전략적 기술수출 및 수주경쟁력 강화
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음

연구개발성과의 등록 · 기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 · 장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	5	2		-	-	-						

연구시설 · 장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호
	-	-	-	-	-	-	-	-	-

국문핵심어 (5개 이내)	도로 융빙	콘크리트 포장	폐 커피분말	전도성 콘크리트	탄소 나노소재
영문핵심어 (5개 이내)	Deicing	Concrete pavement	Waste coffee grounds	Conductive concrete	Carbon nanomaterials

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 ····· 11

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ····· 14

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) ····· 79

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ····· 79

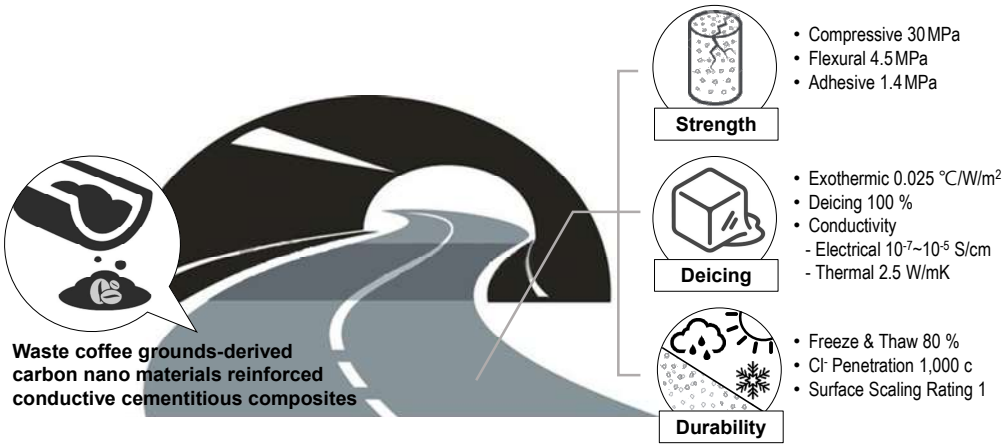
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ····· 80

7. 참고 문헌 ····· 83

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	■ **최종 목표** **동절기 저온에서 도로의 결빙을 방지할 수 있는 폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체가 적용된 도로 포장 기술 개발** ■ **정량적 목표 수준** - **전도(傳導)성** : 전기전도성 10^{-7}~10^{-5} S/cm, 열전도성 2.5 W/mK - **융빙(融氷)성** : 발열성능 0.025℃/W/m^2, 제빙성능 100 %(제설제 比) - **역학적 성능** : 압축강도 30 MPa, 휨강도 4.5 MPa, 접착강도 1.4 MPa - **장기 내구성** : 동결융해 80 %, 표면박리 1등급, 염소이온침투저항성 1000 c  **그림 1.1** 연구개발의 최종목표 및 정량적 목표 수준 * 폐 커피분말 (WCG, Waste Coffee Grounds) ** 폐 커피분말 추출 탄소나노소재 보강 전도성 시멘트 복합체 (WCG-CC, Waste Coffee Grounds-derived carbon nanomaterials reinforced conductive Cementitious Composites)
세부 목표	■ **폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체 (WCG-CC) 개발** ▪ 폐 커피분말(WCG) 바이오매스 기반 탄소 나노 소재 개발 ▪ 폐 커피분말 기반 전도성 나노소재의 시멘트 복합체 적용 기법 개발 ▪ 폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체의 기본 배합비 및 기본 성능 확보 ■ **도로 결빙 방지용 WCG-CC 적용 도로 포장 기술 개발** ▪ 폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체의 설계 최적화 - WCG-CC 융빙 성능 확보 - WCG-CC 도로 포장체 역학적 성능 및 내구성 확보 ▪ WCG-CC 적용 도로 포장의 동절기 유사 환경 하 성능 검증 ▪ WCG-CC 적용 도로 포장의 경제성 분석

2) 연구개발과제의 연차별 목표

(1) 1차 연도

① 개발 목표

- 폐 커피분말 바이오매스 기반 전도성 탄소 나노 소재 개발
- 폐 커피분말 기반 전도성 나노소재의 시멘트 복합체 적용 기법 수립
- WCG-CC의 기본 배합비 도출 및 전기/열 전도성, 기본 물성 평가

② 개발 내용 및 범위

연차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체 (WCG-CC) 적용 도로 포장체 개념 설계	• 국내외 도로 포장 및 융빙 관련 기준/지침 분석 – 포장 관련 국내 건설 기준 및 지침의 수집 및 분석 – 동절기 기후환경 분석 및 도로 결빙 위험구간 분석 • 융설/융빙용 전도성 콘크리트 기술 현황 파악 – 국내외 전도성 콘크리트 적용 사례 및 기술 분석 • WCG-CC 적용 도로 포장체 개념 설계안 수립 – WCG-CC 배합재료 검토 및 선정 – 발열 포장체 요구성능 검토 및 개념 설계안 도출
	폐 커피분말 기반 탄소 나노 소재 개발	• 폐 커피분말의 바이오매스 활용 및 전도성 탄소 변환 사례 및 관련 기술 분석 • 폐 커피분말의 밀도 및 형상차를 이용한 정제 / 분리 기술 개발 • 폐 커피분말의 온도별 열분해 공정에 따른 탄화 공정 및 흑연화 기술 개발 • 탄화 폐 커피분말의 표면 활성화(Activation) 및 형상제어 기술 개발
	WCG 기반 전도성 나노소재의 시멘트 복합체 적용 기법 수립	• 폐 커피분말 기반 전도성 재료의 전처리 기법 수립 – 공유 및 비공유 기능기화 등 대량 표면개질방법과 이에 따른 극성용매 분산성 검토 – Ball milling을 통한 시멘트 입자와의 균질 복합화 특성 분석 • 열환원 통한 탄화 입자간 계면결합 및 접촉저항 향상 • 전도성 네트워크 향상에 따른 전기전도 특성 검토
	WCG-CC의 기본 배합비 도출	• WCG-CC의 변수별 배합실험을 통한 기본 배합비 도출 – Percolation threshold를 고려한 WCG 전도성 재료의 혼입량 및 물결합재비(W/B) 적정범위 도출 – 시멘트 복합체 미세구조 및 결정구조 분석(SEM, XRD 등)
	WCG-CC의 기본 성능 평가	• WCG-CC의 전기전도성 및 열 전달특성 평가 – 목표성능: 전기전도성 10^{-7}~10^{-5} S/cm, 열전도성 2.5 W/mK – WCG-CC의 표면저항 및 체적저항 측정 – Laser Flash Apparatus을 이용한 열확산율, 비열 및 밀도 측정을 이용한 열전도 특성 평가 • WCG-CC의 기본 물성 평가 – 슬럼프, 공기량, 압축강도 등 경화 전후 특성 평가

③ 연구가설 및 도출 근거 (1차년도)

- **폐 커피분말 기반 전도성 나노소재 개발**
  - 탄소계열 재료를 혼입한 복합 재료는 우수한 강도, 높은 전도성을 가지며 또한 열을 효과적으로 전달하여 광범위한 응용 범위를 가지고 있음
  - 전도성 특성이 우수한 전차원 탄소소재 (탄소나노튜브, 그래핀, 나노 탄소 섬유)의 경우 상용화가 이루어져 있으나 그 가격이 여전히 일반적인 전도성 탄소 (카본블랙, 그라파이트) 에 비해 높아서 상용화 및 응용에 어려움이 있음
  - 연간 전 세계에서 7,358,897 metric tons 의 규모로 소비되는 커피 시장에서 발생하는 폐 커피분말은 열분해를 통해 친환경 전기 발전 연료로서의 역할 뿐만 아니라 전도성 탄소 소재로서 각종 구조체의 복합체 역할이 가능함
  - 특히 폐 커피분말은 열분해시 탄화 및 흑연화가 용이하여 전도성 탄소 제조가 가능하며, 활성화 및 표면 기능기화가 용이하여 다공성 구조 및 균일한 용매 분산이 가능하고 이에 따라 이종기지에 복합화가 가능함

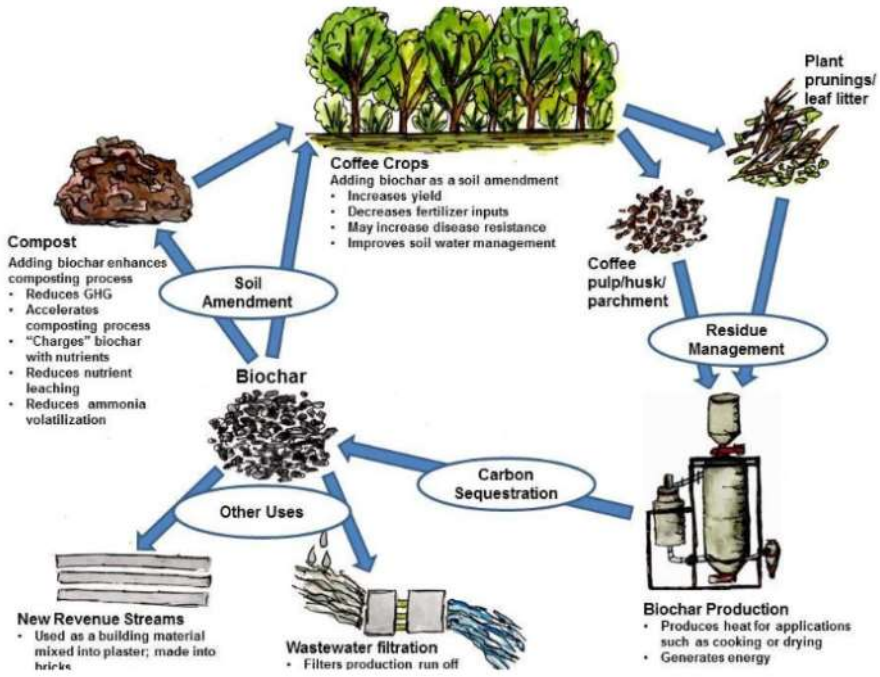


그림 1.2 커피 분말을 이용한 흑연화 탄소의 제조 공정과 응용 분야

- **폐 커피분말 기반 전도성 나노소재의 시멘트 복합체 적용 기법 수립**
  - 탄소계열 나노소재는 반데르발스 결합(van der Waals bond), π 전자 상호작용(π-π stacking interaction) 등과 같은 응집성의 이유로 충분한 전도성 발현에 어려움이 있음
  - 이러한 응집성을 해결하기 위하여 표면개질방법(functionalization, noncovalent functionalization)이 병행되어야 하며 비공유기능기화(noncovalent functionalization)는 계면활성제, 메틸메타크릴레이트(Methyl methacrylate, MMA), 포르피린(porphyrin) 등을 이용하여 안정적으로 탄소나노소재를 분산할 필요가 있음
  - 탄소계열 나노소재의 전기전도성과 관련한 본 연구자의 선행연구에서 상기의 내용과 같은 표면개질에 따른 전도성의 차이를 확인하였으며, 본 연구에서도 이러한 선행연구의 기술을 도입하여 전도성 나노소재의 최적화 방안을 도출할 예정



그림 1.3 바이오매스를 이용한 탄화 공정 및 활성화 공정에 따른 분자구조 변화

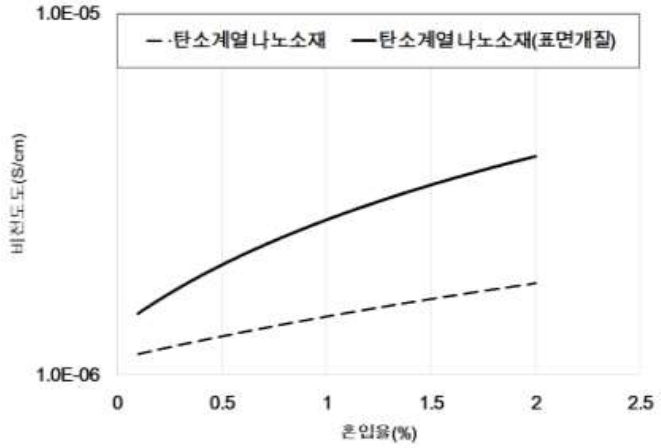


그림 1.4 탄소계열 나노소재의 표면개질에 따른 비전도도 선형화 例

- **WCG-CC의 기본 배합비 도출**
  - 탄소계열재료는 혼입율에 따라 전기전도성이 일정 구간 비례하는 경향을 보이지만 어느 수준의 혼입율에서는 전도성 증가의 한계가 있으며 이러한 구간을 Percolation transition zone으로 취급
  - 또한, 탄소계열 나노소재의 강한 응집력 특성상 일정 수준 이상의 높은 혼입율을 배합시 전기전도성과는 별개로, 시멘트 복합체 자체의 유동성을 포함한 물성 저하 발생함
  - 따라서 Percolation threshold를 고려한 WCG 전도성 재료의 혼입량 및 물결합재비의 최적범위를 도출할 경우, WCG-CC의 성능을 극대화함과 동시에 재료원가 저감 가능
  - 최적의 혼입율을 결정하기 위해서는 탄소 나노 소재 혼입율을 매개변수로 반복적 실험이 필수이며, 그와 동시에 WCG-CC의 미세구조 및 결정구조 분석(SEM, XRD, XRF)을 통한 전도성 네트워크 검토 연구가 수행되어야 함

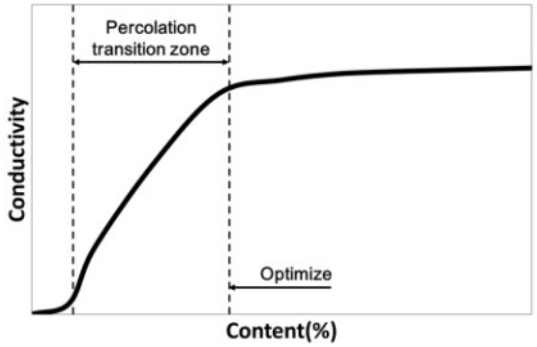


그림 1.5 Percolation transition zone 例

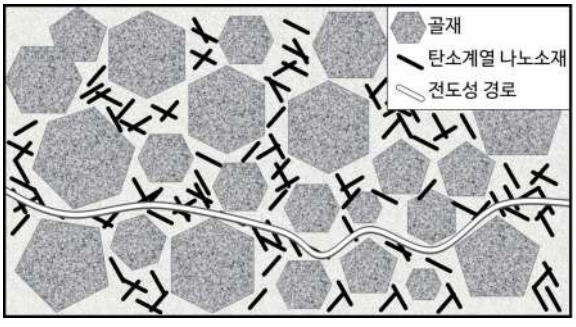


그림 1.6 시멘트 복합체 내부의 전도성 경로

- **WCG-CC의 기본 성능 평가**
  - 전기전도성은 'ASTM Standard C1202-10', 'AASHTO TP 95'에서 제시되어 있는 'Wenner's 4-electrode method'를 통해 시편의 비저항 측정
  - 일반적으로 금속과 같은 도체는 비전도도 10^{2} S/cm 이상, 절연체는 10^{-12} S/cm 이하로 구분하여 소정의 전기전도성을 띈 반도체를 그 사이의 범위로 정의함
  - 탄소계열 나노소재를 활용한 기존 연구결과들을 분석해 볼 때, 비전도도의 범위는 10^{-8}~10^{-1} S/cm의 범위로 매우 다양하게 확인됨
  - 전기저항성능은 동일 재료일지라도, 온/습도 등 다양한 환경변화에 의해서 매우 큰 변동폭을 보이기 때문에 상기와 같은 경향이 발생함
  - 따라서, 본 연구에서는 일반적인 탄소계열 나노소재의 비전도도 수준을 확보하기 위해 목표성능을 10^{-7}~10^{-5} S/cm의 범위로 설정하였음

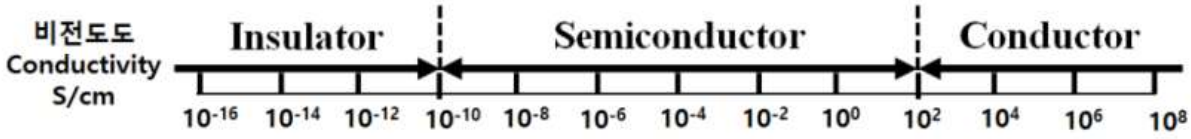


그림 1.7 도체와 반도체, 부도체의 저항범위 (비전도도, S/cm)

  - 열전도도는 'ASTM Standard E1461'의 'Laser Flash Apparatus'를 통해 측정
  - 일반적인 보통콘크리트의 열전도율은 1.6 W/mK 수준으로 알려져 있음. 다만 콘크리트는 다양한 재료에 의해 복합적인 양상을 보이며 사용재료, 온/습도 등에 의해 광범위한 열전도율을 나타내는 경향이 있음
  - 본 연구에서 개발하는 WCG-CC는 보통콘크리트 열전도율의 1.5배 이상 수준인 2.5 W/mK로 설정
  - WCG-CC를 콘크리트 포장용도로 사용하기 위해서는 현행 설계기준에 만족하는 성능을 확보해야 할 것으로 판단, 국토교통부 'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'의 요구성능을 도입함
  - 일반적인 환경하에서 포장용 콘크리트와 극심한 기상변화 및 제설, 염화물에 의한 열화를 극소화하기 위한 목적의 교면포장용 콘크리트의 요구성능은 표 1.1과 같음

표 1.1 포장용 시멘트 콘크리트의 배합기준

요구성능	일반 포장용 콘크리트	교면포장용 콘크리트	시험방법
슬럼프	10 ~ 60 mm	-	KS F 2402
공기량	5.5±1.5%	6.0±1.5%	KS F 2409

(2) 2차 연도

① 개발 목표

- WCG-CC의 융설/융빙 성능 및 도로 포장체 기능 확보
- 도로 결빙 방지용 포장체 핵심 성능 평가 결과를 통한 WCG-CC의 설계 최적화
- WCG-CC 적용 도로 포장의 동절기 유사 환경 하 성능 검증 및 경제성 분석

② 개발 내용 및 범위

연차	주요 연구활동	세부 연구내용
2차년도	WCG-CC의 융설/융빙 성능 평가	• 매개변수별 WCG-CC의 발열 성능 평가 – 목표성능: 발열성능 0.025℃/W/m^2 – WCG의 나노소재 혼입율, 배합, 강도 변수 – Laser Flash Apparatus을 이용한 열확산율, 비열 및 밀도 측정을 이용한 열전도 및 발열 특성 평가 • 열전도 특성을 활용한 공급 전력량에 따른 WCG-CC의 발열 성능 수치 분석
	WCG-CC의 도로 포장체 기능 확보	• WCG-CC의 도로 포장체 역학적 성능 평가 – 목표성능: 압축강도 30㎫, 휨강도 4.5㎫, 접착강도 1.4㎫ • WCG-CC의 도로 포장체 내구 성능 평가 – 목표성능: 동결융해저항성 80%, 표면박리저항성 1등급, 염소이온침투저항성 1000c
	WCG-CC의 설계 최적화	• WCG-CC의 융설/융빙 성능 및 역학적 특성, 내구성 결과 분석을 통한 성능 향상 방안 도출 • WCG-CC 의 전도성 네트워크 및 터널링 모델링 검증 • WCG-CC의 최적 설계안 도출
	WCG-CC 적용 도로 포장의 동절기 유사 환경하 성능 검증	• 동절기 유사환경 하 WCG-CC 도로 포장 Mock-up Test – 국내 동절기 최저 평균기온 고려 유사환경 모사 – 융설/융빙 성능 및 역학적 성능 검증 – 목표성능: 제빙성능 100 % (염화칼슘 제설제比) – Mock-up Test의 장기 모니터링을 통한 안정성 평가 • 다양한 환경조건에서의 WCG-CC 성능평가 – 포장두께와 소비전력량에 의한 발열성능 복합영향평가 – 적설/결빙두께 및 대기온도 등 동절기 환경영향에 따른 성능평가
	WCG-CC 적용 도로 포장의 경제성 분석	• 개발된 WCG-CC 적용 도로의 경제성 분석 – 재료 원가 분석 및 공사비 산출 – 타 도로 결빙 대책 기술과의 비교 분석 • 경제성 및 기능성 고려한 WCG-CC의 효율적 적용 방안 및 개선 방향 도출

③ 연구가설 및 도출 근거 (2차년도)

- WCG-CC의 융설/융빙 성능 평가
  - WCG-CC 복합체의 열전도도는 'ASTM Standard E1461'에서 다루고 있는 시험법인 'Laser Flash Apparatus'를 통해 시편의 열전도율 측정
  - Laser Flash Apparatus 방식은 시편의 형상 및 크기에 구애를 받지 않아 다양한 형상으로 응용되는 WCG-CC 복합체의 열전도율 측정에 적합함
  - Laser Flash 방법으로 열확산도 (α)와 differential scanning calorimetery 로 측정된 비열 (Cp) 그리고 밀도 (ρ)로부터 열전도도 (k)를 측정
  - 포장 콘크리트를 발열시켜 융빙(deicing)하는 기술은 전기에너지를 가하여 줄열(Joule's heat)에 의한 발생한 열에너지를 콘크리트에 전달하는 형태로 이루어져 있음
  - 줄열은 전류 크기의 제곱과 저항크기의 곱에 비례함. 일정한 전압을 걸은 상태에서 저항이 낮게 되면 전류가 커지게 되어 전열체에는 열이 발생하며, 이러한 원리를 이용한 것이 전기전도성 발열 콘크리트임
  - 주로 2가지 형태로 융빙(deicing) 콘크리트 포장기술이 개발되고 있으며, 대표적인 형태는 아래의 그림과 같이 전극을 가하는 파이프를 매설하는 형태와 mesh를 콘크리트 포장면 사이에 넓게 설치하는 형태로 구분할 수 있음

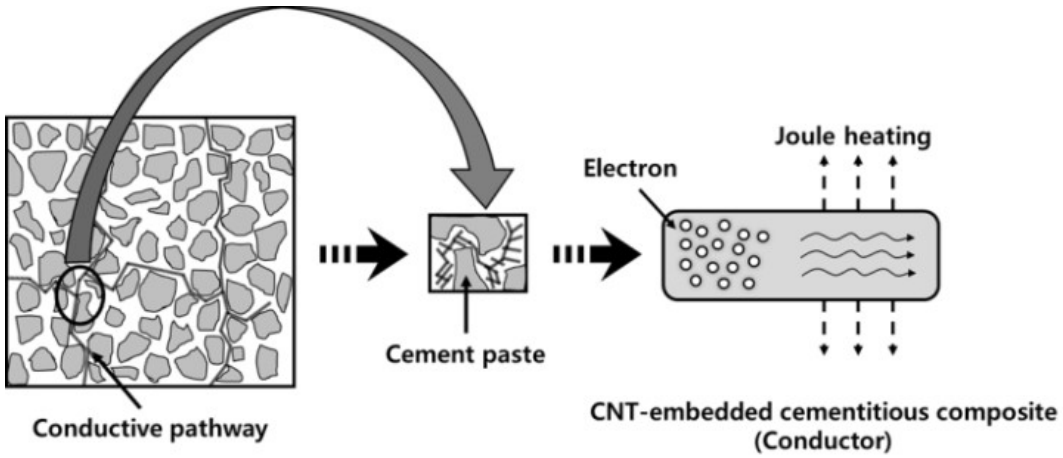


그림 1.8 전기전도성 시멘트 복합체의 발열 메커니즘

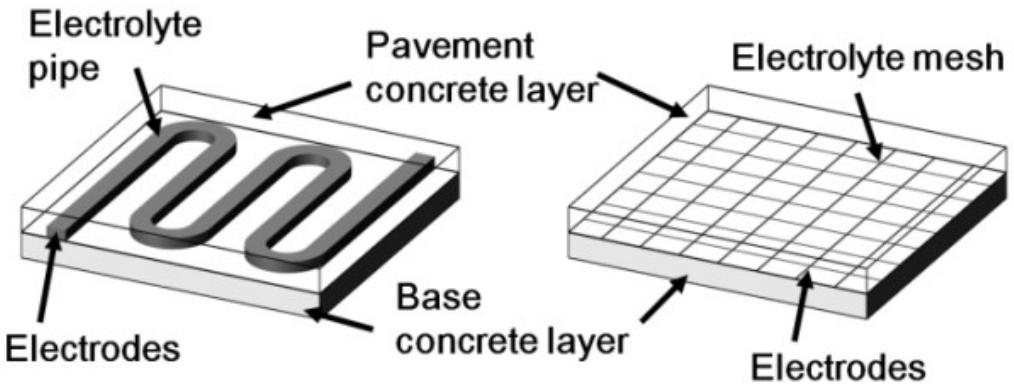


그림 1.9 도로 융설/융빙용 기술의 개념도

- 기존 문헌에서 도로융빙용 전도성 시멘트 복합체에 가한 전력량에 따른 온도 상승량은 아래의 표 1.2와 같음. 기존 데이터를 바탕으로 전력량에 따른 온도상승 성능 목표를 탄소계열 나노소재혼입 시멘트 복합체와 유사한 수준인 0.025℃/W/m^2로 설정하였음

표 1.2 전도성 시멘트 복합체의 전력량에 따른 온도상승량

구분	Hongming et al. (2011)	Mohammed et al. (2019)	Rui et al. (2018)	Sassani et al. (2018)
℃/W/m^2	0.0226	0.02913	0.0240	0.02778

- **WCG-CC의 도로 포장체 기능 확보**
  - 'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'에서는 포장용 시멘트 콘크리트에 요구되는 압축강도, 휨강도 및 접착강도를 아래 표 1.3과 같이 제시함
  - 본 연구의 WCG-CC를 일반 포장용 콘크리트와 교면포장용 콘크리트 용도의 범용성을 위해서 양쪽의 요구성능을 모두 만족하는 역학적 성능을 목표로 설정하였음
  - 또한, 교면 포장용 콘크리트의 경우 내구성능 평가항목을 아래 표 1.4와 같이 제시하고 있으며, 본 연구에서도 해당 요구성능을 충족하는 기술을 개발하고자 함

표 1.3 포장용 시멘트 콘크리트의 강도 품질기준

요구성능	일반 포장용 콘크리트	교면포장용 콘크리트	시험방법
설계기준강도	-	바닥판의 강도 이상	KS F 2405
설계기준휨강도	4.5 MPa 이상	-	KS F 2408
설계기준 접착강도	-	1.4 MPa 이상	KS F 2762

표 1.4 교면포장용 콘크리트의 내구성능 품질기준

요구성능	내구성능 등급	시험방법
동결융해저항성	80% (300 cycle)	KS F 2456
표면박리저항성	적정등급 이상 (Rating 1)	ASTM C 272
염소이온침투저항성	1,000C(쿨롱) 이하	KS F 2711

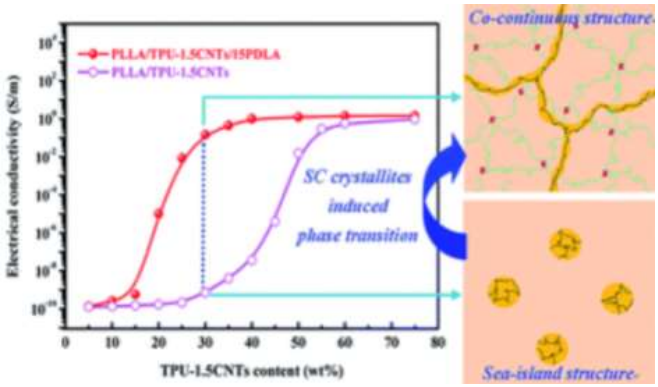


그림 1.10 입자형상과 분산도에 따른 Percolation threshold 변화 例



그림 1.11 콘크리트 포장의 융빙 성능 검토

- **WCG-CC의 설계 최적화 및 전도성 네트워크 및 터널링 모델링 검증**
  - WCG-CC의 융빙성능 및 내구성, 역학적 성능 평가 결과 분석을 통해 요구 성능을 모두 충족한 설계안 중 성능과 경제성 등을 모두 고려하여 최적안 선정
  - 선정된 최적안(例. A, B, C안)을 바탕으로 Mock-up Test용 시험체 제작
  - WCG-CC에 의해 형성된 전도성 네트워크는 각 나노 탄소간의 터널링에 의한 전자이동에 의해 발생함
  - 터널링 모델에 따르면 복합체의 저항은 $R=(8\pi hL/3A^2XdN)e^{Xd}$ 과 같은 관계를 가짐
    여기서 $X=4\pi(2m\Phi)^{1/2}/h$, d=터널링 거리, h=판 상수, L=단일 전도 경로를 형성하는 입자의 수, N=전도 경로의 수, A^2=유효 단면적, Φ=인접한 입자 사이의 전위 장벽 높이
  - 따라서 폐 커피분말 추출 탄소 나노소재의 혼입양 및 분산에 따른 전도성 네트워크 변화에 대한 전기전도 및 발열 특성을 터널링 모델을 통해 검증하고자 함
  - 폐 커피분말 추출 탄소 나노소재의 형상과 기능기 및 활성화에 따른 분산도와 percolation threshold 관계 및 이에 대한 최적화 공정 확립

- **WCG-CC 적용 도로 포장의 동절기 유사 환경하 성능 검증**
  - 동절기 유사환경을 모사하여 WCG-CC 적용 도로 포장의 Mock-up Test 수행하고, 실제 환경하에서 융빙성능을 확인하고자 함
  - 국내에서는 도로 융설/융빙용 전도성 콘크리트에 관한 요구성능 기준이 마련되어있지 않음
  - 이에 일반 염화칼슘과의 융빙성능을 상대비교하도록 되어있는 환경부의 인증기준 'EL610 제설제'에 따라, 본 연구에서는 기존의 염화칼슘에 의한 제설방법 대체 가능성 확인을 위해 목표 융빙성능을 염화칼슘 대비 100 %로 설정함
  - 또한, 포장두께와 전력량이 융빙성능에 미치는 상관관계를 분석하여 최적의 두께 및 소비전력량을 도출하고, 적설/결빙 두께에 따른 성능평가 수행

- **WCG-CC 적용 도로 포장의 경제성 분석**
  - 미국 Nebraska의 Roca Spur Bridge에서 길이 36m, 폭 8.5m의 융빙용 콘크리트 포장이 효과적으로 적용된 사례가 있으며, $0.08/kWh기준 약 $100의 비용으로 융빙효과를 확인
  - 다만, 초기 설치비용이 약 $194,310($635/m^2)이며 전체 비용 중 42%가 포장콘크리트의 재료비용으로 보고되어, 사용된 전도성 콘크리트의 재료원가가 상당히 높음
  - 본 연구에서 개발하고자 하는 전도성 시멘트 복합체는 전기전도성 탄소나노 소재를 폐 커피분말 바이오매스를 통해 획득함으로써 재료의 비용 저감이 가능함
  - 타 도로 결빙 대책 기술과의 재료원가, 공사비 등 종합적인 경제성 비교 분석

구분	연구개발목표	핵심 연구개발 성과 (연구개발 성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	폐커피분말 추출 탄소나노소재 보강 전도성 시멘트 복합체 (WCG-CC) 개발	전도성 시멘트 복합체 보강용 폐커피분말 추출 탄소 나노 소재	N/A (기존 사례없음)	• WCG 추출 탄소나노소재 개발 • 시멘트복합체 內 나노소재 분산기법 수립 • 전기 전도성 10^{-7}~10^{-5} S/cm • 열 전도성 2.5W/mK	-(연구시작시) 탄소계열 나노소재를 전도성 재료로써 고려하여 연구한 사례는 다양하게 보고되고 있지만, 본 연구에서 사용하고자 하는 폐 커피분말을 전도성 재료로 적용한 사례는 극히 일부에서 확인됨. 특히, 전 세계적으로 폐 커피분말을 시멘트 복합체에 적용한 사례는 전무함. -(연구종료시) 폐 커피분말 나노소재를 혼입한 시멘트 복합체의 개발로 역학적 성능뿐만 아니라 전기전도성, 열전도성과 같이 도로 융빙에 적용하기 위한 성능 확보	50
2년차 (2021)	도로결빙 방지용 WCG-CC 적용 도로포장 기술개발	도로결빙 방지용 WCG-CC	N/A (기존 사례없음)	• 발열성능 0.025 ℃/W/m^2 • 압축강도 30MPa • 휨강도 4.5MPa • 접착강도 1.4MPa • 동결융해성능 80% • 표면박리저항성 Rating 1 • 염소이온침투저항성 1,000c	-(연구시작시) 도로 결빙 방지용 전도성 콘크리트는 전 세계적으로 일부 연구자들에 의해 수행된 사례가 보고되고 있으나, 시멘트 복합체의 성능 및 시공비용 등의 문제로 인하여 실험실에서 기본 개념이 정립된 수준으로 판단되며, 특히, 폐 커피분말이 혼입된 전도성 콘크리트에 관한 연구는 수행된 이력이 없음 -(연구종료시) 폐 커피분말 나노소재를 혼입한 시멘트 복합체를 도로 포장에 적용하기 위한 기술을 수립하며, 유사환경 실험을 통해 융빙성능을 확보함. 특히, 폐 커피분말의 재료적 특성상 경제성을 확보할 수 있기 때문에, 도로 결빙 방지용 전도성 콘크리트의 실용화 기술개발에 핵심적인 역할을 할 것으로 판단됨	50

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 연구개발 추진전략・방법

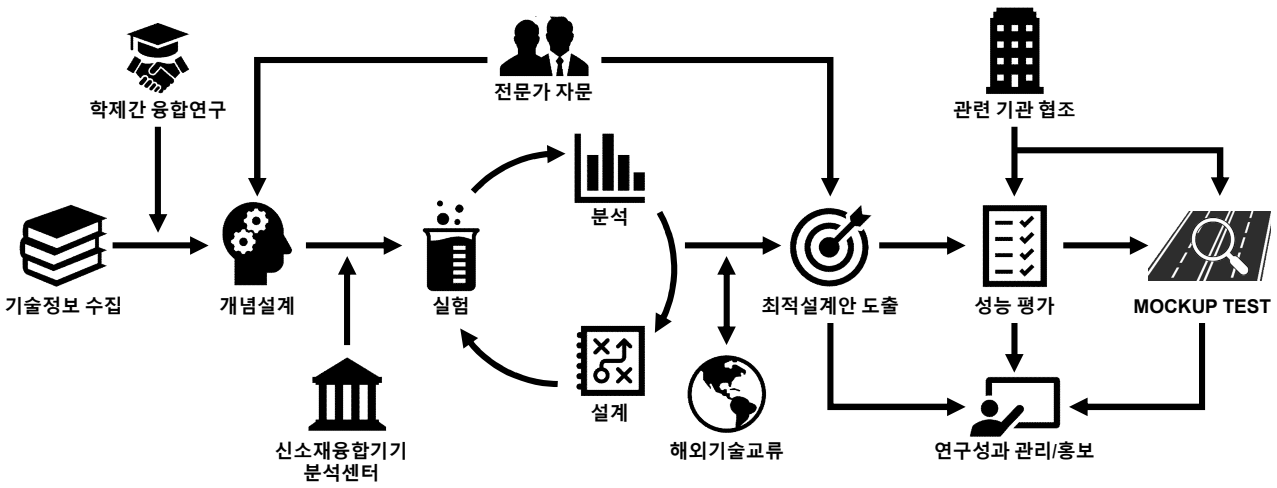


그림 2.1 연구개발 추진전략

○ 기술정보 수집/분석

- 전문 도서관 및 온라인 DB 등을 통해 국내외 관련 연구자료 수집 및 최신 연구 현황 모니터링
- 이를 통해 연구 초기에 연구방향 및 연구이론을 수립하고, 연구 중기에는 연구결과의 검증 및 성능 향상에 적용

○ 교내 신소재융합기기분석센터 활용

- 소재의 구조분석, 표면분석, 물성분석, 유기분석 및 전처리 관련 각종 첨단 장비가 구축된 교내 신소재융합기기분석센터 활용
- 센터내 박사급 전문 인력의 장비 전담 운용으로 신뢰도 높은 양질의 분석 결과 도출 가능

○ 학제간 융합연구

- 토목공학 뿐만 아니라 전기공학, 신소재공학, 화학공학 등 다학제적 접근이 필요한 연구 특성을 고려하여 신소재공학과 나노 소재 분야 교수의 연구원 참여
- 연구책임자의 콘크리트 관련 전문성과 신소재공학과 교수의 나노 소재 분야 전문성의 융합으로 시너지 효과 기대

○ 관련 기관 협조

- 본 연구 특성상 한국도로공사 등 관련 기관과 MOU 체결 등을 통한 긴밀한 협조 체계 구축
- 도로 포장 관련 산업체와 기술협력을 통한 WCG-CC 기술의 실용화 방안 모색

○ 전문가 자문

- 시멘트 복합체의 성능 향상을 위한 탄소계열 나노소재 관련 전문가 자문
- 도로 융빙용 콘크리트 포장기술 관련 전문가 자문을 통한 연구방향 및 내용 검증
- 연구책임자 및 참여교수의 관련 분야 연구수행을 통해 형성한 전문가 네트워크 활용

○ **해외기술교류**

- 전도성 시멘트 복합체 관련 많은 데이터와 연구 경험을 가지고 있는 선진 기관의 기술자문 및 교류 추진
- 국제학술회의 및 선행연구기관 방문 등을 통한 관련 선진기술의 know-how 파악

○ **실험/분석/설계**

- 목표성능에 부합하는 재료 개발까지 다양한 변수별 반복 실험 및 분석
- 기본 설계안별 핵심 성능 평가를 통한 최적 설계안 도출

○ Mock-up Test

- 동절기 유사 환경하 개발 기술 적용 도로의 Mock-up Test를 통한 성능 검증

○ **연구성과 관리 및 홍보**

- 연구 아이디어 및 기술 보호를 위한 선제적 특허 출원/등록
- 연구수행 중 도출 성과의 SCI급 저명학술지 등 국내외 전문학술지에 논문 게재
- 국내외 학술발표회, 언론 미디어 등을 포함한 다양한 대외 매체를 통한 연구성과의 적극적 홍보

2) 연구개발 추진체계

연구개발과제		총 참 여 연 구 원
과제명	폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체 개발	주관연구책임자 이주하 외 총 9명(인원)

기 관 별 참 여 현 황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 학	1	10

주관연구기관명
과제명: 폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체 개발
연구책임자 이주하 외 9명
담당기술개발내용
▪ 폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체(WCG-CC) 적용 도로 포장체 개념 설계 ▪ 폐 커피분말(WCG) 기반 탄소 나노 소재 개발 ▪ WCG 기반 전도성 나노소재의 시멘트 복합체 적용 기법 수립 ▪ WCG-CC의 기본 배합비 도출 ▪ WCG-CC의 기본 성능 평가 ▪ WCG-CC의 융설/융빙 성능 평가 ▪ WCG-CC의 도로 포장체 기능 확보 ▪ WCG-CC의 설계 최적화 ▪ WCG-CC 적용 도로 포장의 동절기 유사 환경하 성능 검증 ▪ WCG-CC 적용 도로 포장의 경제성 분석

3) 추진일정

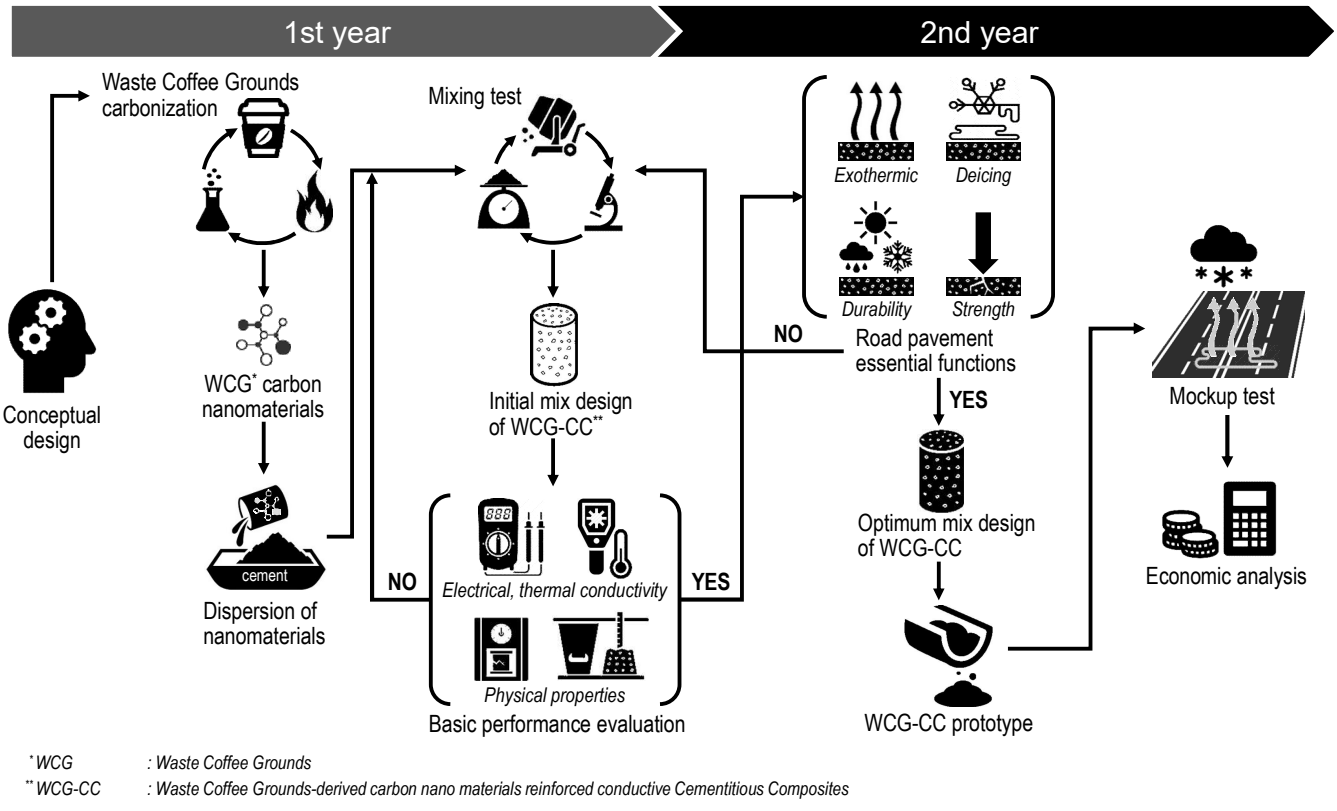


그림 2.2 주요 연구 활동 구성 및 추진도

표 2.1 연구개발 추진일정

일련번호	연구내용	추진 일정											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1차년도													
1	WCG-CC 적용 도로 포장체 개념 설계												
2	폐 커피분말(WCG) 기반 탄소나노소재 개발												
3	WCG 기반 전도성 나노소재의 시멘트 복합체 적용 기법 수립												
4	WCG-CC의 기본 배합비 도출												
5	WCG-CC의 기본 성능 평가												
2차년도													
1	WCG-CC의 융설/융빙 성능 평가												
2	WCG-CC의 도로 포장체 기능 확보												
3	WCG-CC의 설계 최적화												
4	WCG-CC 적용 도로 포장의 동절기 유사 환경하 성능 검증												
5	WCG-CC 적용 도로 포장의 경제성 분석												

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

단위성과물	A-1	WCG 추출 탄소나노소재	
질적성과지표	①	탄소나노소재	
목표치	소재개발	달성치	소재개발 성공

1) 개요

전도성 그라파이트 구조는 sp2 결합으로 이루어진 육각링의 구조를 갖는다. 폐커피분말(Waste Coffee Grounds, WCG)은 리그닌, 셀룰로오스, 헤미-셀룰로오스의 기본적인 목질계 바이오매스의 구조와 여러 가지 성분의 유기물 혼합물로 이루어져 있다. 이를 고온에서 열분해하게 된다면 기본적 구조의 변형과 점진적인 휘발성 물질의 제거로 인해 산소와 질소를 비롯한 기능기들의 함유량이 적어지며 탄화가 일어나게 된다. 이후 점차 그라파이트화 되며 흑연과 유사한 sp2 결합 구조를 가지는 전도성 탄소물질의 제조가 가능할 것이다 (그림 A1-1, 2).

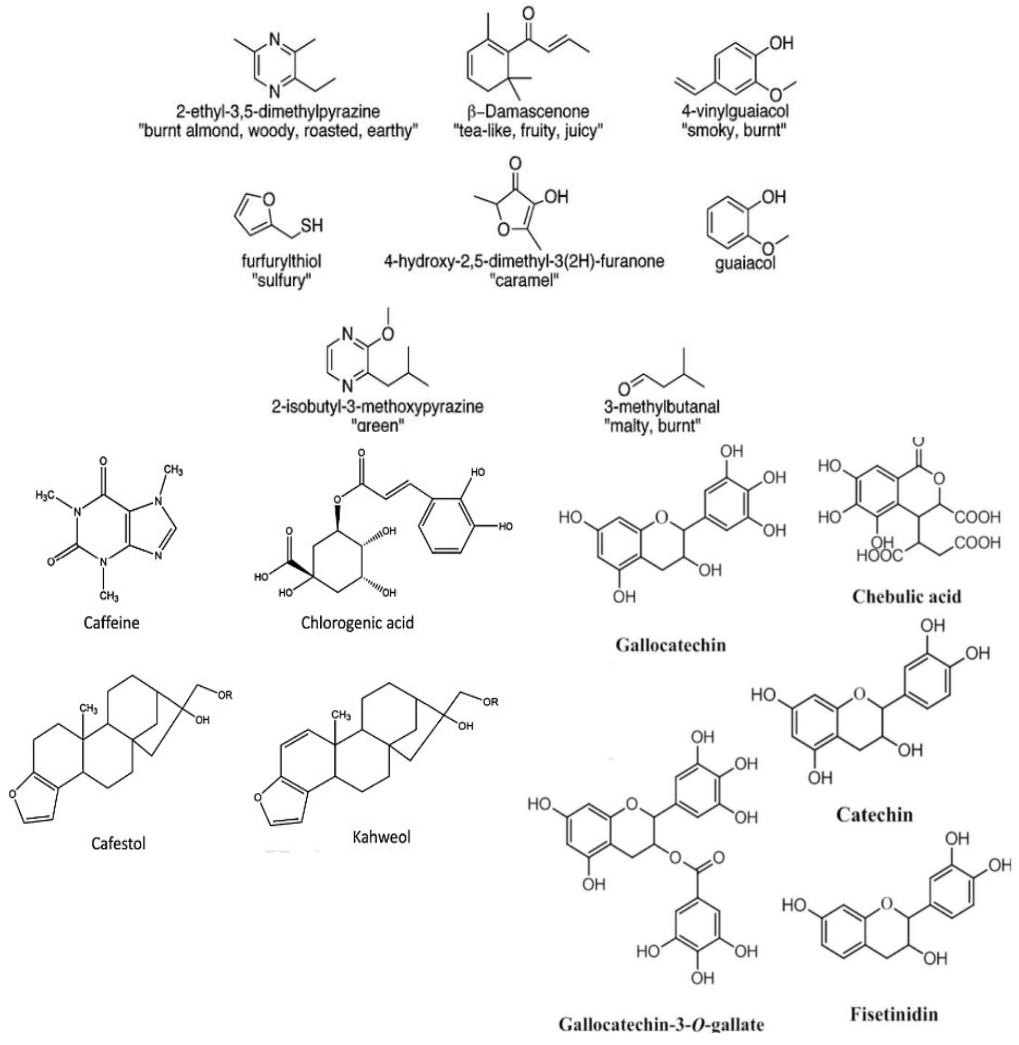


그림 A1-1 Coffee 내부 화합물

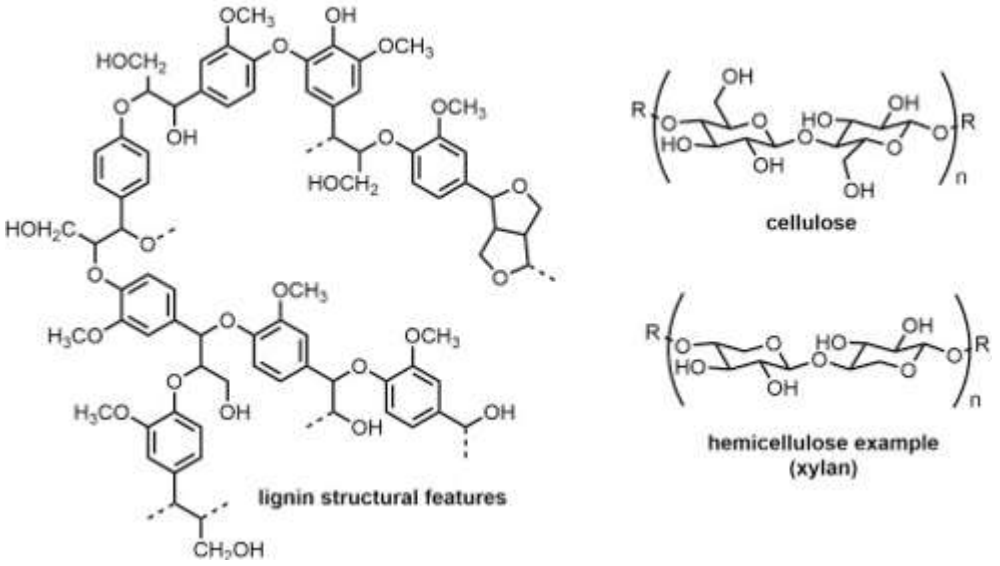


그림 A1-2 목질계 바이오매스의 구조

2) 실험 방법

WCG를 고온 진공 장비 (CVD 장비)를 이용하여 승온 시켰다. 250℃ 부근에서 열분해로 인해 발생하는 물, 일산화탄소, 이산화탄소 등의 휘발성 부산물을 제거하기 위하여 30분간의 체류시간을 가진 뒤 다시 승온을 진행 하였다. 이 후 400, 700℃에서 진행되는 탈 수소, 탈 질소 현상에 의하여 발생하는 잔여 부산물과 휘발성 물질의 제거를 위해 다시 30분간의 체류시간을 가지는 공정을 진행하였다. 이 공정을 통하여 1차 탄화 시키고, 최종 온도까지 2차 탄화를 시킴으로 써 순수한 전도성 그라파이트 탄소 소재로 합성하였다(그림 A1-3).

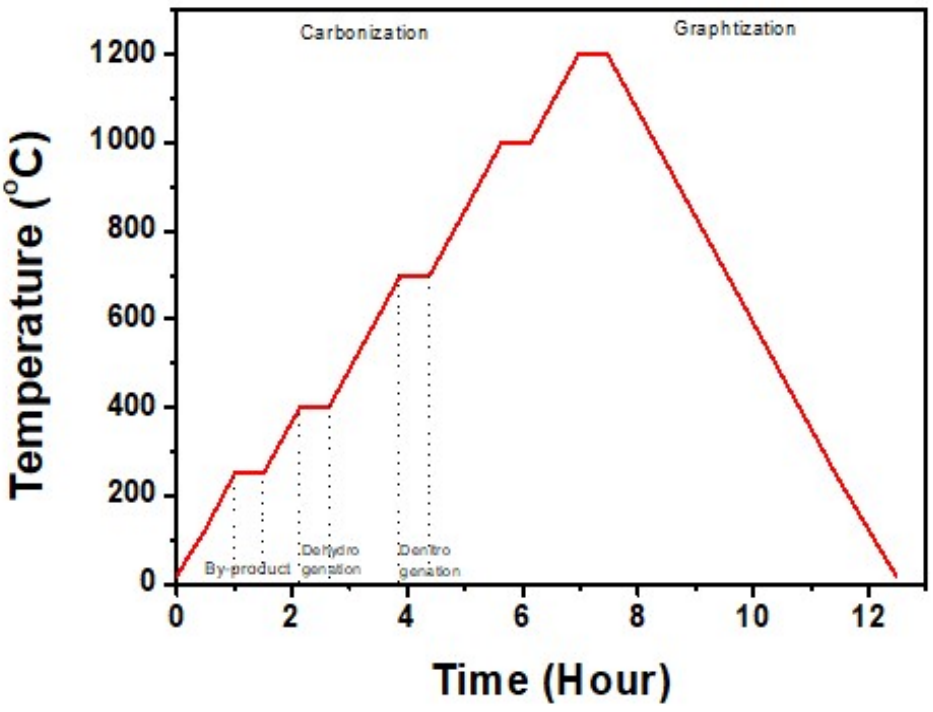


그림 A1-3 CVD를 이용한 실험 공정 설계

3) 실험 결과

폐커피 분말의 2차 탄화온도를 700℃, 1000℃, 1200℃ 총 3가지 조건에서 실험을 진행하였다. SEM 분석결과 700℃ 이상의 온도에서는 탄화 및 그라파이트화가 진행되어 점차 각진 형태의 물질이 많이 등장하는 것이 확인된다. 이를 통해 분말형태가 sp2 결합 구조를 가지는 그라파이트로 변화된 분말로 제조되었음을 확인할 수 있다 (그림 A1-4.).

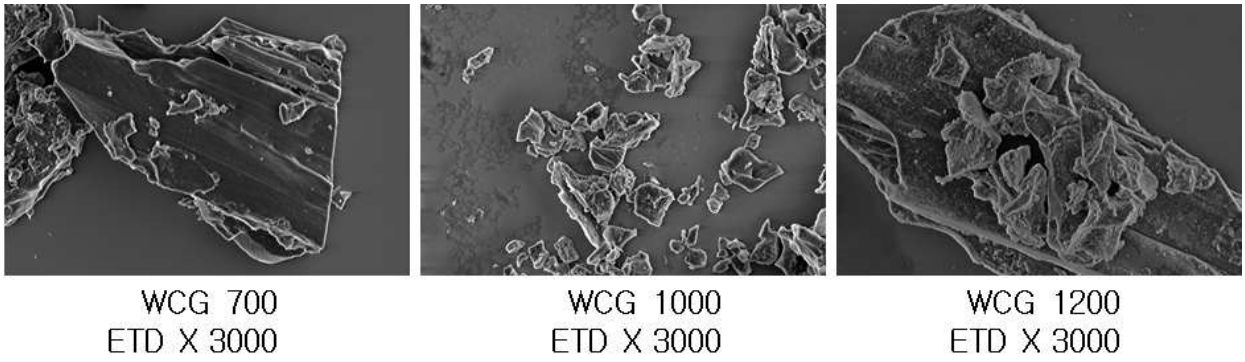
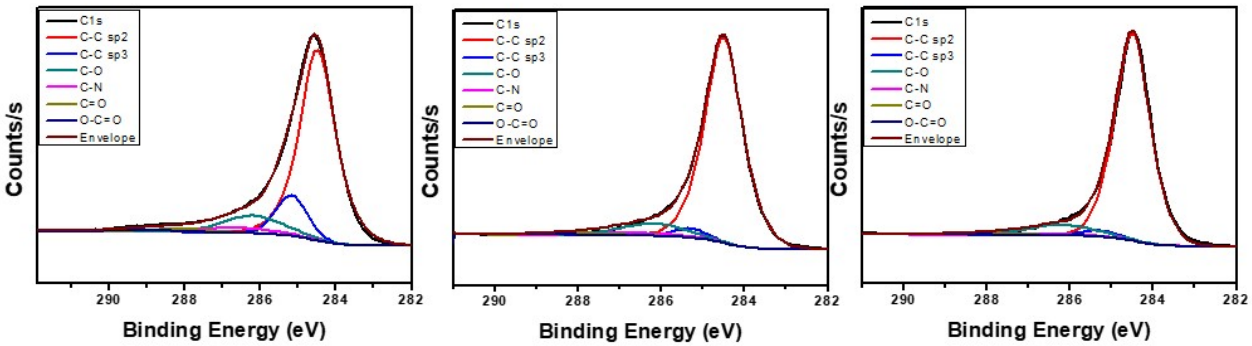


그림 A1-4 WCG온도별 SEM분석 결과

XPS 분석결과 고온 탄화시켰을 경우 C-C bonding의 비율은 증가하고 C-O, C-N bonding은 감소한 것이 확인된다. 상대적으로 높은 온도로 탄화 공정을 진행하는 경우 탄화공정이 일어나며 전체적인 탄소간 결합의 양이 증가하였고 세부적으로 살펴보았을 시 sp2 탄소결합의 양은 증가하였고 sp3 탄소 결합의 양은 감소하였다. 또한 탈 수소, 탈 질소 공정이 진행됨에 따라 C-O, C-N 결합의 비율이 감소하였다. sp2 결합의 증가는 그라파이트화가 이루어졌음을 뜻한다. 따라서, 고온에서 탄화 공정을 수행하는 경우에는 탈 질소 현상에 의하여 상대적으로 순수한 C-C 결합으로 구성된 전도성 탄소소재를 제조할 수 있는 것이 확인되었다 (그림 A1-5).



WCG 700

Name	Peak BE	Atomic %
C-C sp2	284.5	68.6
C-C sp3	285.3	11.99
C-O	286.2	10.16
C-N	286.6	6.41
C=O	288.0	1.77
O-C=O	289.1	1.07

WCG 1000

Name	Peak BE	Atomic %
C-C sp2	284.5	83.64
C-C sp3	285.3	3.16
C-O	286.2	8.46
C-N	286.6	2.21
C=O	288.0	1.46
O-C=O	289.1	1.07

WCG 1200

Name	Peak BE	Atomic %
C-C sp2	284.5	86.35
C-C sp3	285.3	2.55
C-O	286.2	8.14
C-N	286.6	1.05
C=O	288.0	1.33
O-C=O	289.1	0.57

그림 A1-5 WCG 온도별 XPS

700, 1000, 1200℃ 열처리한 커피 분말에 대하여 흑연화의 정도를 파악하기 위하여 Raman 분석을 수행하였다. 각각의 최종온도에서 열처리된 커피분말은 1350/cm에서 D peak와 1580/cm에서 G peak가 관찰되었다. WCG의 경우 sp2 C=C 탄소 결합이 주 결합으로 이루어져 있지만, 산소와 질소 기능기가 포함되어 있기 때문에 D 피크는 높은 수치를 나타내며 G 피크의 경우는 얇고 뾰족하게 솟아오르는 모양의 그래프를 보인다. 각각의 WCG는 D, G 피크가 모두 구분되는 것을 확인 할 수 있지만 온도가 올라감에 따라 점차 명확하게 피크가 구분되었다. 이는 sp2 C=C 탄소 결합의 도메인 사이즈가 커지며 결함이 점차적으로 적어짐으로 인하여 피크가 좁고, 날카로운 모양으로 등장하게 된다. 이로써 탄화공정 후 sp2 결정구조를 가지는 전도성 탄소소재가 상당부분 그라파이트화 된 것으로 확인된다(그림 A1-6).

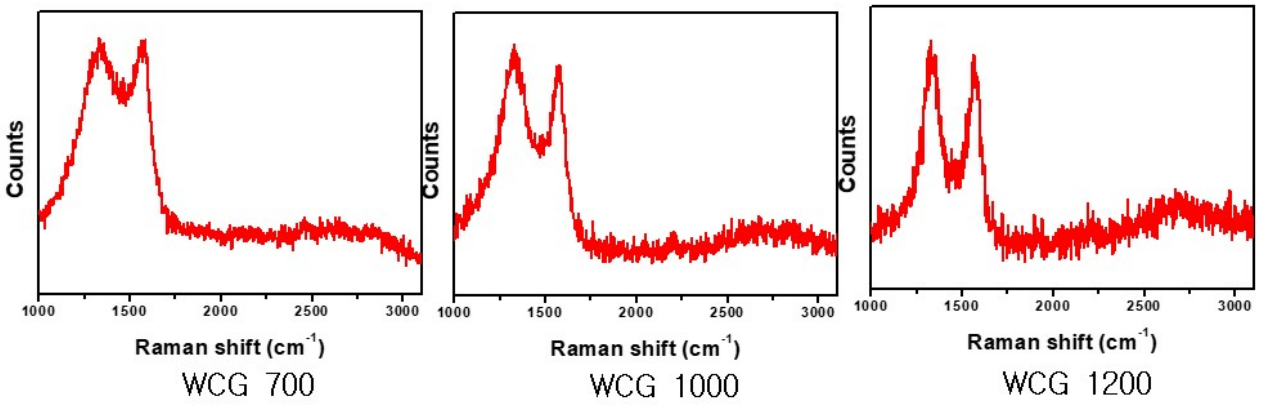


그림 A1-6 WCG 처리 온도별 Raman

실험 결과 700℃이상의 온도에서 열처리를 한 폐커피 분말은 탄화가 진행되고 있음이 확인되며, 그라파이트화가 진행되어 전도성 탄소소재가 형성되는 것을 관찰 할 수 있다. 특히, 1200도 이상으로 탄화를 진행할 경우 폐 커피분말의 상당 부분이 전도성 그라파이트화된 것이 확인된다.

단위성과물	A-2	분산기법	
질적성과지표	①	시멘트복합체 內 나노소재 분산기법	
목표치	분산기법	달성치	분산기법 확보

1) 개요

탄소계열 나노소재는 반데르발스 결합 (Van der Waals bond) 및 π 전자 상호작용에 의한 응집력으로 복합재료의 전도성 필러로 활용하기 어려움을 겪어왔다. 이러한 응집성을 해결하기 위해서 표면개질 방법 즉 기능기화 방식을 진행해 주어야 한다. 본 연구에서는 탄소계열 나노소재의 전도성을 유지하기 위해 비공유 기능기화를 통해 분산 안정성을 확보하고자 하였다.

2) 실험 방법

열처리를 한 폐커피 분말을 멜라민과 1:1 비율로 혼합하였다. 이 혼합물을 극성용매인 DMF (N,N-Dimethylmethanamide) 내에서 혼합을 진행하였다. 또한, 그림 A2-1과 같이, 혼합용액을 볼 밀링 (Ball-milling) 공정을 24시간동안 진행하였다. 혼합액을 진공여과를 통해 필터링 시킨 후 진공오븐에서 24시간 건조하여 비공유 기능기화가 이루어진 WCG-멜라민 복합체를 제작하였다. 비공유 기능기화 방식을 1차년도에 진행 한 24시간이 소요되는 볼 밀링 공정에서 4.5시간이 걸리는 전자기연마 방식을 도입하여 WCG 생산성을 증진시켰다. 볼 밀링 공정은 통 안에 스테인레스 구슬을 넣고 통이 돌아가며 구슬이 떨어지는 위치에너지가 운동에너지로 변화하고 이 힘에 의해 멜라민과 WCG가 고르게 섞이는 원리인 반면에, 전자기연마 방식은 자성을 갖는 메디아핀에 자기장을 걸어 핀이 물리적으로 회전하면서 발생하는 에너지를 이용해 기능기화를 하는 방식이다. 위와 같은 방식을 통하여 비공유 기능기화를 진행하였다(그림 A2-2, 3).

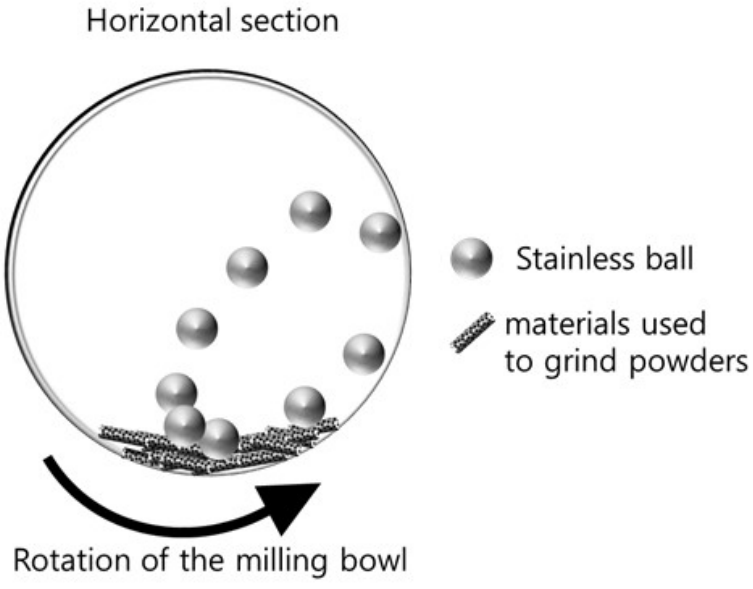


그림 A2-1 Ball milling



그림 A2-2 전자기연마 장비와 메디아핀

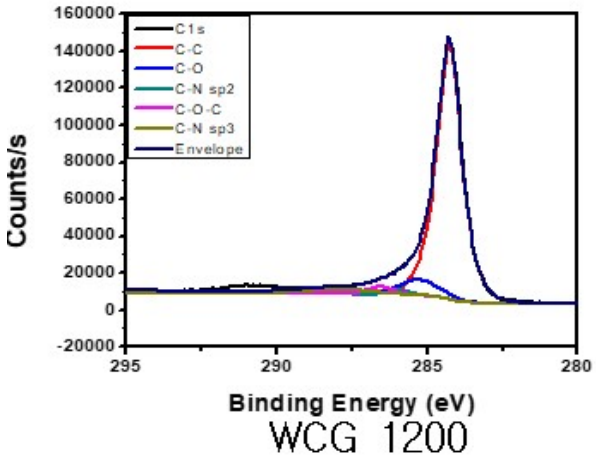


그림 A2-3 증류수에 분산시킨 열처리된 WCG를 이용한 기능기화 전(左), 후(右) 사진

3) 실험 결과

멜라민과 열처리한 폐 커피 분말 간의 기능기화 여부를 파악하기 위해 XPS 장비를 사용하여 분석하였다. XPS 분석결과 멜라민을 이용한 비공유 기능기화가 진행된 열처리한 폐 커피 분말의 경우에 C-C ,C-O, C-N, π -π * 이렇게 4가지 관능기가 등장하게 된다. 수치를 비교하였을 때 C-C %는 42.7% 감소하였고, C-N %는 80.6% 증가하였음을 알 수 있다. 이를 통해 열처리된 폐 커피분말에 멜라민이 성공적으로 비공유 기능기화 된 것을 확인하였다 (그림 A2-4).

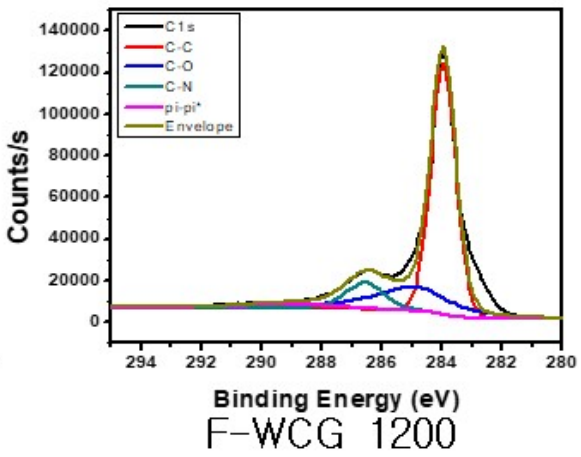
기존 볼 밀링을 이용한 비공유 기능기화에 비하여 전자기연마 방식을 도입하였을 경우 등장하는 기능기의 종류는 같다. 하지만 C=C %는 6.3% 감소하였고, C-N %는 0.8% 증가하였다. 따라서 전자기연마 방식도 볼 밀링 공정을 사용하였을 때와 마찬가지로 비공유 기능기화가 성공적으로 진행 되었다(그림 A2-5).



WCG 1200

Name	Peak BE	Atomic %
C-C	283.88	86.12
C-O	284.88	11.1
C-O-C	286.18	0.25
C-N sp3	287.58	2.52

Name	Peak BE	Atomic %
C 1s	284.17	91.58
N 1s	398.85	1.27
O 1s	531.37	7.15

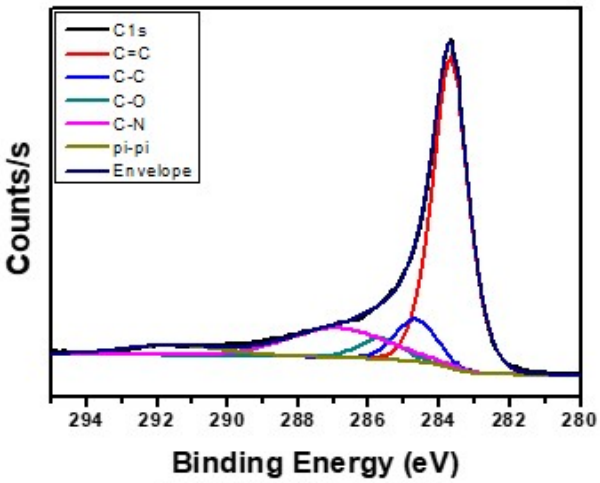


F-WCG 1200

Name	Peak BE	Atomic %
C-C	283.97	64.17
C-O	284.97	22.06
C-N	286.58	10.49
pi-pi*	289.08	3.28

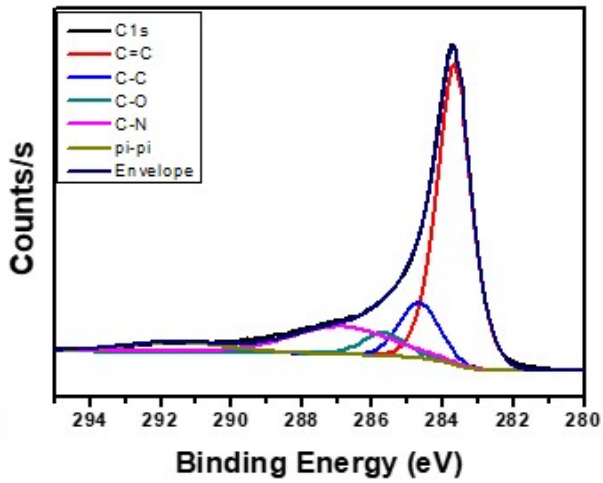
Name	Peak BE	Atomic %
C 1s	284.18	76.44
N 1s	398	17.47
O 1s	531.34	6.1

그림 A2-4 멜라민 기능기화 유무 WCG 1200 XPS 비교



B.F-WCG 1000

Name	Peak BE	Atomic %
C=C	283.69	64.16
C-C	284.69	9.7
C-O	285.69	5.19
C-N	286.89	16.23
pi-pi*	291.58	4.73



E.F-WCG 1000

Name	Peak BE	Atomic %
C=C	283.69	60.08
C-C	284.69	12.42
C-O	285.69	5.69
C-N	286.89	16.36
pi-pi*	291.58	5.44

그림 A2-5 볼 밀링(B)과 전자기연마(E)를 이용한 멜라민 기능기화 WCG 1000 XPS 비교

또한 TGA를 이용하여 멜라민을 이용한 비공유 기능기화에 따라 기능기가 얼마나 되었는지 그 양을 측정하였다. WCG는 800도 까지 분해되지 않는 열적 안정성을 보였고, 멜라민은 340도에서 분해되기 시작하는 것을 확인 할 수 있다. 멜라민을 이용한 비공유 기능기화를 시킨 WCG는 기능기화 된 멜라민이 분해되며 수치가 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있고 이로 인하여 기능기화 된 멜라민의 양은 약 11 wt. %로 측정되었다(그림 A2-6).

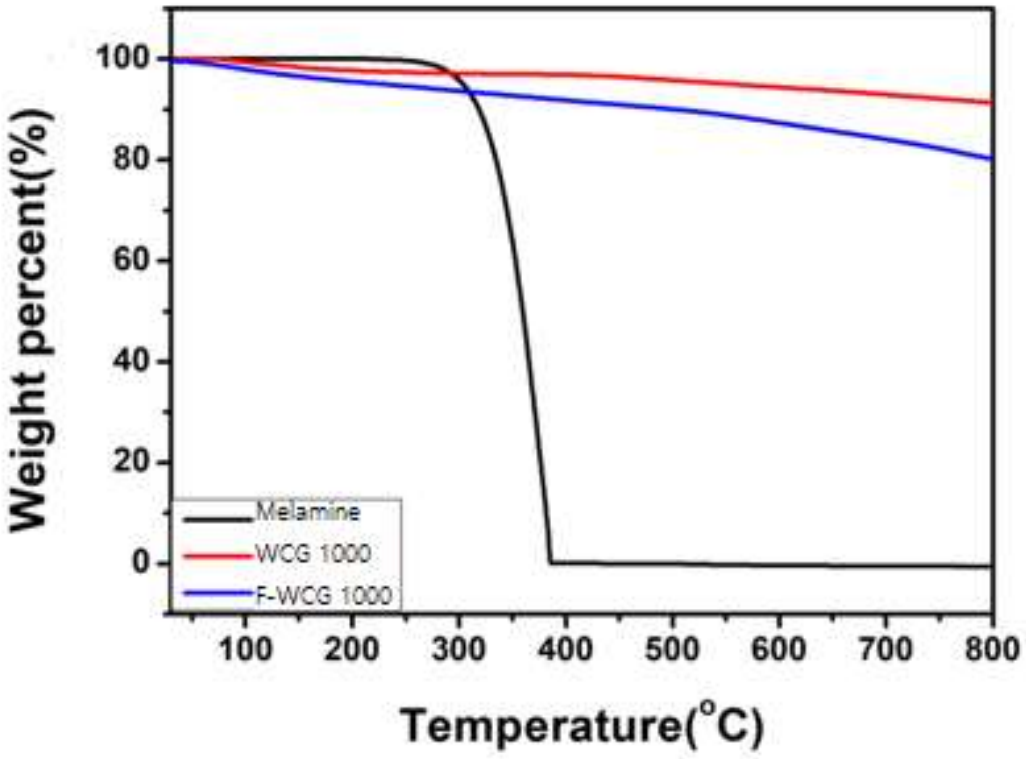


그림 A2-6 멜라민 기능기화 유무에 따른 TGA 비교

멜라민은 탄소와 질소간의 육각 고리를 형성하는 분자로 graphene과 유사한 분자구조를 가지는 열처리한 폐 커피 분말의 표면에 π -π 결합으로 비공유 기능기화가 성공적으로 이루어 진 것을 확인하였다. 결과적으로 멜라민의 아민기 (-NH2)를 이용하여 극성용매 내에서 분산성을 증가시켜 전도성 시멘트 복합재료에 활용하기 용이한 형태의 전도성 탄소 분말을 제조하였다. 또한 기존 24시간이 걸리는 볼 밀링 공정을 4.5시간이 걸리는 전자기연마 공정으로 대체함으로써 5배 이상의 공정시간이 감소하였고 WCG의 생산성 증진에 효과적임을 확인하였다.

단위성과물	A-4	배합비 도출	
질적성과지표	①, ②	Percolation zone 도출, 미세구조 분석	
목표치	도출 및 분석수행	달성치	도출 및 분석수행

1) Percolation zone 도출

WCG의 전기전도성 측정결과는 A4-1과 같이 나타낼 수 있다. 0.1%에서도 전기전도성이 확보되는 것을 확인하였다. 다만, 추가적인 혼입율에 대한 검토가 수행된다면, Percolation zone을 보다 명확하게 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

추가적으로 비공유기능기화 처리된 CNT, GNP의 전기전도성과 본 연구에서 개발한 WCG의 전기전도성을 비교분석 하였다. WCG와 동일한 혼입율로 제작하여 그림 A4-1에서 함께 비교를 수행하였다. WCG는 보편적으로 사용되는 CNT, GNP와 유사한 수준의 전기전도성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 0.1%의 혼입율에서부터 10^{-6}~10^{-5} S/cm 범위의 전기전도성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

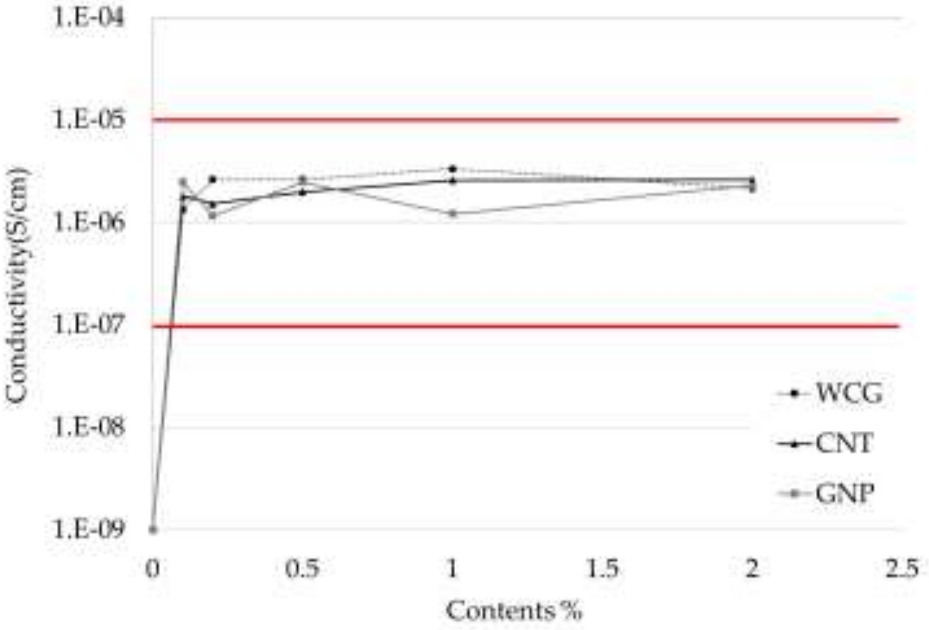


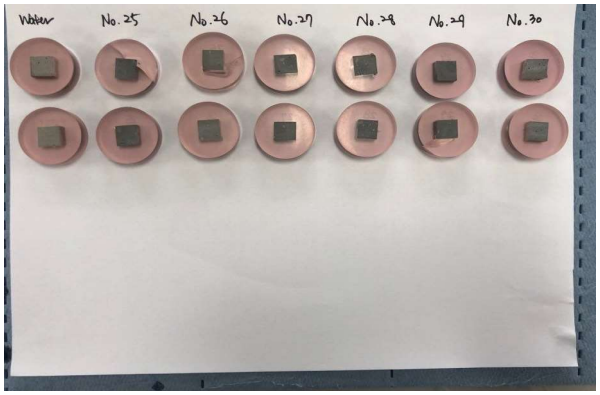
그림 A4-1 탄소계열 나노소재의 전기전도성

2) 미세구조 분석

탄소계열 나노소재는 재료 특유의 반데르발스 힘(Van der Waal's force)에 의한 재료 자체적인 뭉침 현상이 강한 특성을 보이며, 시멘트 복합체 내에서 응집력 해소가 가장 큰 어려움으로 고려되어왔다. 분산이 확보되지 않은 상태의 탄소계열 나노소재가 적용된 시멘트 복합체는 균일한 품질 확보에 어려움을 겪고 있다. CNT 및 GNP는 자체적인 응집력으로 재료의 분산성을 확보할 수 없기 때문에 아민계열 재료를 흡착시킨 비공유기능기화(Noncovalent Functionalization)를 적용하여 분산성을 검토하고자 하였다. 미세구조분석결과 비공유기능기화 처리가 되어있는 것이 확인되었다. CNT의 경우 입자에 멜라민이 흡착되어있는 것이 명확하게 드러났으며, GNP의 경우 시멘트 배합내에서 분산되어있는 것이 확인되었다.



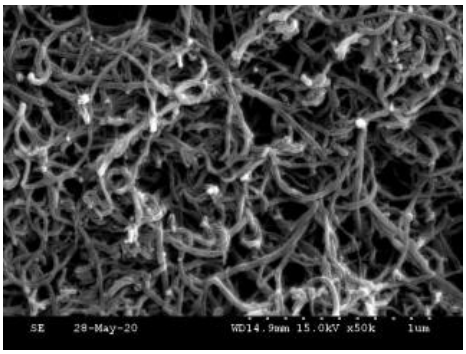
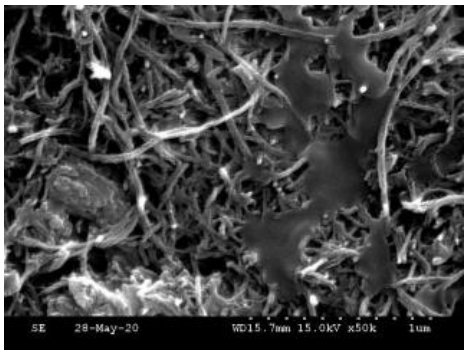
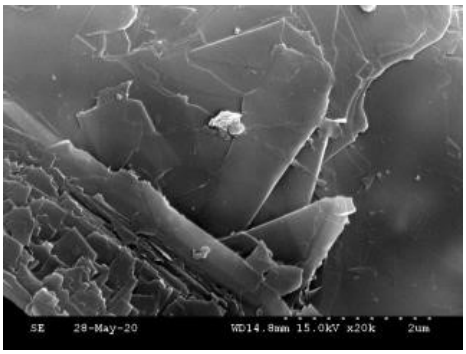
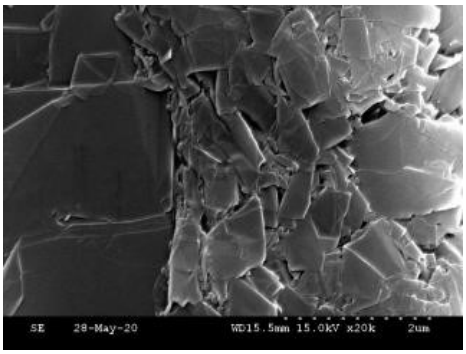
(a) Sectioning and cutting



(b) Mounting and polishing

그림 A4-2 미세구조분석을 위한 시편 준비 공정

표 A4-1 일반 및 비공유기능기화 CNT, GNP의 미세구조 분석

구분	일반	비공유기능기화
CNT		
GNP		

CNT의 미세구조분석결과 일반 CNT에서는 뭉침 현상이 발생하고 있는 것이 확인되었다. 반면 비공유기능기화처리된 경우 아민계 재료가 CNT에 부착되어있는 현상을 확인할 수 있다. 이러한 영향으로 CNT의 응집력을 해소할 수 있을 것으로 판단된다. GNP의 경우 일반 배합에서는 판상구조의 GNP가 여러층으로 겹쳐있는 모습을 볼 수 있다. 다만, 비공유기능기화처리된 GNP의 경우에는 상당수의 GNP가 층을 이루지 않고 분산되어있는 것으로 확인된다. 따라서, 비공유기능기화를 통한 탄소계열 나노소재는 응집력을 해소하고 시멘트복합체내부에서 분산성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

단위성과물	B-5	경제성 평가	
질적성과지표	①	경제성 평가(평가 유무)	
목표치	경제성 평가	달성치	경제성 평가 수행

1) 경제성 분석

차세대 전도성 필러인 탄소나노튜브(CNT)와 그래핀은 높은 전기전도도 및 기계적 물성을 나타낸다. 하지만 높은 가격으로 인하여 상업화에 어려움을 가지고 있다. 차세대 탄소기반 전도성 필러의 생산 방법으로 전기 방전법, 레이더 증착법, 열분해법 등이 등장하였고 Chemical Vapor Deposition(CVD) 공정과 기상합성법이 개발되면서 대량생산의 가능성을 열었다. 공정에 따라 생산되는 CNT의 두께, 길이 등의 특성이 달라지기 때문에 기업들은 각자 원하는 물성을 구현하기에 용이한 공정을 채택하고 발전시켜 왔다. 그중 Catalytic Chemical Vapor Deposition(CCVD)는 대량생산에 적합하여 최근에 다수의 기업들이 이 공정을 채용하고 있다.

현재도 기업들은 계속해서 생산 비용을 낮추는 공정을 연구하고 있지만 산업 초기 $ 5,000/kg 이상이었던 가격이 현재에도 $ 50/kg ~ $ 100/kg 수준을 유지하고 있어서 건축 및 도로 포장용 소재로 상용화하기에는 많은 어려움이 있는 것이 사실이다. 그에 비해 비교적 전기전도도 및 기계적 물성은 떨어지지만 가격 경쟁력으로 인하여 전도성 필러대체제로 카본블랙이 활용되며 카본블랙의 경우 2021년 기준 ~ $ 1,000/ton 수준을 유지하고 있다.

카본블랙은 대체적으로 탄화수소 및 천연가스를 열분해하여 제조하는데 그 원료 대부분을 화석 연료로부터 공급받는다. 따라서 폐 커피분말로부터 열분해하여 생산하는 바이오차는 원료 가격을 최소화할 수 있다. 특히, 카본블랙을 생산하는 열분해 공정과 유사하므로 동일한 공정의 사용이 가능하며, 이 경우에 폐 커피분말 추출 탄소나노소재의 재료 원가는 카본블랙의 5% 수준으로 예상된다. 또한 일정 수준 이하로 (~$ 8,000/ton) 생산 가격이 형성될 경우 기존 화석 연료를 대체할 수 있는 에너지 자원으로써 그 가능성이 무궁무진하다.

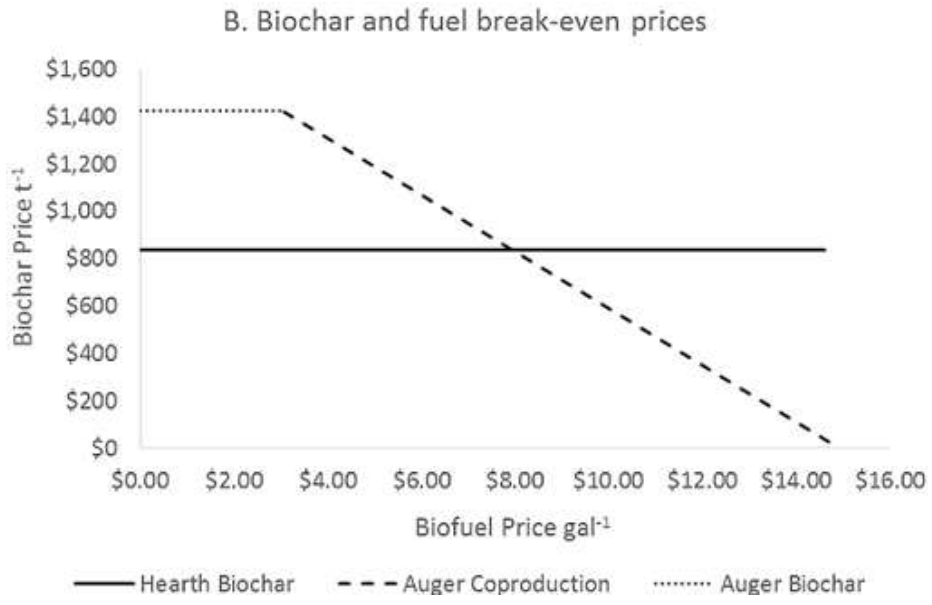


그림 B5-1 Biochar 및 fuel의 최저 판매 가격

표 B5-1은 폐 커피 분말을 기준으로 그 외 바이오차 생산 가능한 원료의 시나리오에 대한 고정 및 가변 바이오차 생산 비용의 요약을 보여주며 이에 따른 평균 바이오차의 생산 비용은 $754.68 - 717.76/Mg 이다. 주로 기계 비용을 포함하는 자본 비용은 바이오차 생산량에 따라 변하지 않는다. 본 경제성 평가에서는 모든 기계가 10%의 이자율로 10년 동안 자금을 조달할 것이라고 가정하고 보험은 구매 가격의 1%로 계산되며 세금은 구매 가격의 8.25%으로 계산되었다. 변동비는 대부분 바이오차 생산량에 따라 직접적으로 변하는 연료비와 인건비이다. 1년 261일 운송 및 운영을 위해 8시간/일 작업을 기준으로 한다. 전처리 기계는 1일 4시간 동안 실행되는 것으로 가정하고 바이오매스 잔류물은 인근 농장에서 무료로 구할 수 있다고 가정하지만, 우리는 예산에 공급원료 운송 비용을 포함한다. 베이스라인 시나리오의 경우 바이오차 생산 속도는 1Mg/일로 가정한다. (Wrobel-Tobiszewska et al. 2015).

표 B5-1 바이오차 생산 기업 예산 기준선
(바이오차 생산과 관련된 모든 생산 비용은 1Mg/일 생산 속도를 가정)

Items		
Fixed Costs	**Per Unit Cost, USD**	**$ Mg^{-1}**
Truck	$62,775	$46.84
Trailer and fabrication	$30,000	$25.21
Chainsaw	$1,929.95	$4.44
Horizontal Grinder	$259,400	$255.87
Utility Tractor	$113,669	$126.04
Mobile Pyrolysis Unit	$250,000	$202.72
Biochar Bagging Equipment	$47,145.13	$35.73
Storage Shed	$49,121	$32.33
Portable Toilet	$1,277.35	$0.84
Portable Septic Tank	$500	$0.33
Fees, Permits, and Other Payments		$24.34
	Total fixed costs	$754.68
Variable Costs		
Fuel		
Truck		$1.47
Horizontal Grinder		$197.22
Utility Tractor		$61.63
Biochar Bagging Equipment		$9.86
Chainsaw		$4.94
Oil and Lubricants		
Chainsaw		$1.82
Horizontal Grinder		$72.58
Utility Tractor		$22.68
Biochar Bagging Equipment		$3.63
Labor		
Pre-processing		$127.84
Operations and Transportation		$144.88
Miscellaneous		
Biochar Bags		$45.79
Waste Disposal		$23.42
	Total variable costs	$717.76
Administration fees		$69.72
Total Fixed and Variable Costs		$1,542.16

2) 확률적 분석

바이오차 기업 예산의 가정은 다양한 상황에서 변경될 수 있으며 연료 가격은 수요 또는 공급의 변화에 따라 변동한다. 허가 비용도 프로젝트의 위치와 기존 정책에 따라 다르며 조사 및 준비 비용은 프로젝트 시작 전에 정확하게 지정할 수 없다. 따라서 인건비는 계절, 작업량, 작업 유형에 따라 변할 수 있는 또 다른 중요한 변수이다. 이러한 불확실성을 설명하기 위해 RISK 소프트웨어 (Palisade, 2019)의 삼각형 분포를 사용하여 인건비를 확률적으로 분석하면 삼각 분포에는 하한, 상한 및 평균의 세 가지 매개변수가 있다. PERT 분포는 의사결정자의 관점을 매개변수 추정치로 바꾸는 단순한 접근 방식으로 간주된다. (Stein and Keblis, 2009) 표 B5-2에 요약된 각 매개변수의 최소값, 최대값 및 가장 가능성 있는 값은 과거 데이터, 전문가 의견, 문헌 및 프로젝트 테스트를 진행 중인 실험용 바이오차 생산 장비의 프로젝트 입력을 기반으로 한다. 그림 B5-2(a) (b) (c)는 불확실한 각 매개변수(허가, 연료, 인건비)에 대해 정의된 삼각형 분포를 보여준다.

바이오차 생산 속도는 최종 비용에 큰 영향을 미치는 것으로 간주된다. 표 B5-2 에서 보는 바와 같이 원료의 종류, 열분해 장치의 특성 등 생산 조건에 따라 생산량이 크게 달라진다. Kim et al. (2015) 제재소 잔류물에서 바이오차을 생산하는 데 사용된 BSI 열분해 시스템의 생산성이 시간당 0.156톤임을 보여준다. 1일 평균 7.6시간의 작업일 때 평균 바이오차 생산량은 1.19Mg/일 이었다. 또 다른 바이오차 경제 분석에서는 CharMaker MPP20 이동식 열분해 공장이 가동 4시간 후에 1Mg의 바이오차을 생산할 수 있다고 추정했다 (Wrobel-Tobiszewska et al., 2015). Keskeet al. (2018)은 이동식 열분해 장치에서 바이오차 작동 시 약 2Mg/일을 생산할 수 있다고 가정했다. Thenganeet al. (2020)은 바이오차을 생산하기 위해 산림 잔류물의 이동식 삼림 반탄화를 사용했으며 바이오차 생산량은 공기-바이오매스 비율과 체류 시간에 따라 달라질 수 있다고 제안했다.

본 분석에서 선택된 이동식 열분해 장치는 16입방 야드 용량의 배치 장치로 보고된다. 그러나 공급 원료의 가용성과 유형 및 생산 시간(겨울 또는 여름)에 따라 생산된 바이오차의 양은 0.5Mg/일 만큼 낮을 수 있기 때문에 파일럿 바이오차 생산을 위한 최상의 실험 시나리오는 최대 3.5Mg/일 수 있다. 따라서 다른 모든 생산량을 설명하기 위해 삼각형 분포 대신 이 매개변수에 대한 PERT 분포를 고려한다. PERT 분포는 최대값과 최소값보다 평균값에 더 많은 가중치를 부여한다 (Petter and Tyner, 2014). 1일 바이오차 생산율에 대한 정의된 PERT 분포는 그림 B5-2(d)와 같다. PERT 분포에 대한 최대, 모드 및 최소를 정의하는 값은 표 B5-3에 나와 있습니다. 가장 많이 인용된 값은 약 1 Mg/일 이므로 PERT 분포에 대해 설정된 모드는 1 Mg/일과 같다. 최대값과 최소값은 실험적 열분해 단위인 0.5 및 3.5 Mg/일에 따라 정의된다.

총 바이오차 비용의 결과 확률 분포는 그림 B5-3에 나와 있다 이것은 문헌에서 찾은 바이오차 생산 가격에서 시뮬레이션 되었으며 표 B5-4에 요약되어 있다. 시뮬레이션 결과는 휴대용 열분해 바이오차 장치를 사용하는 생산 비용이 $448.78 사이임을 보여준다. $1,846.96/Mg의 바이오차. 비용 분포는 대칭이 아니며 하한 쪽으로 치우쳐 있으며 이는 상한 범위가 높지만 가장 빈번한 비용은 바이오차 $1,000/Mg 미만이며 바이오차 비용이 $571 ~ $1,455/Mg 일 확률이 90%임을 보여준다. 누적 확률과 예측된 바이오차 생산 비용의 낮은, 평균 및 높은 값은 그림 B5-4에 나와 있습니다. 바이오차 비용이 $570 미만일 확률은 5% 미만이다. 그러나 시뮬레이션 결과의 50%는 $863/Mg 미만의 최종 비용을 나타낸다.

표 B5-2 삼각분포 형성을 위해 불확실한 각 매개변수에 대한 최소값, 최대값 및 최대 확률값

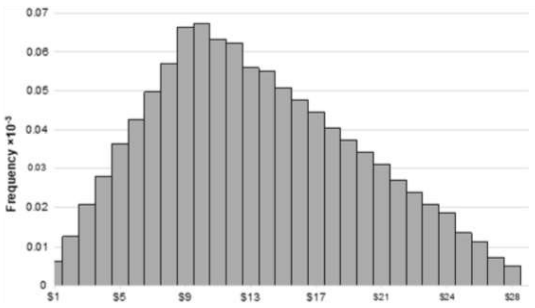
Triangular distribution parameters	$ Mg^{-1} produced biochar	Source
Permits	Min = $1.39, Mean = $13.67, Max = $29.59	(Chowchilla 2020; Governor's Office of Business and Economic Development 2020; Keske et al. 2018)
Fuel	Min = $13.31, Mean = $83.33, Max = $148.29	(U.S. Energy Information Administration, 2021; U.S. Department of Energy, 2020; Brinker et al., 2002; Miyata, 1980)
Labor	Min = $31.37, Mean = $103.34, Max = $197.6	(CalCareers, 2020; Keske et al. 2018)

표 B5-3 PERT 분포를 정의하기 위한 생산 속도의 최소, 최대 및 모드 값

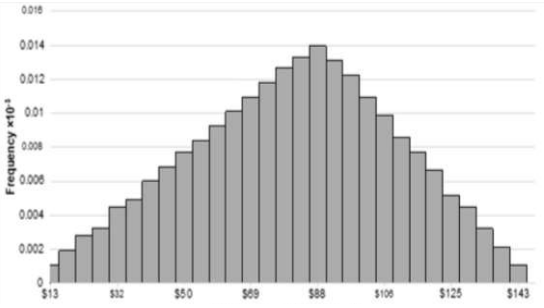
Mean biochar rate (Mg day^{-1})*	Description	Source
1.19	BSI pyrolysis system	Kim et al. (2015)
1	CharMaker MPP20 mobile pyrolysis	Wrobel-Tobiszewska et al. (2015)
2	CharMaker MPP20 mobile pyrolysis plant (slow pyrolysis)	Keske et al. (2018)
1.56	Biochar Solutions mobile pyrolysis plant (slow pyrolysis)	Keske et al. (2018)
0.6	Biochar from woodchips using an integrated portable system	Eggink et al. (2018)
0.5–3.5	Pilot portable biochar unit	Experimental

표 B5-4 문헌에 보고된 Biochar 가격

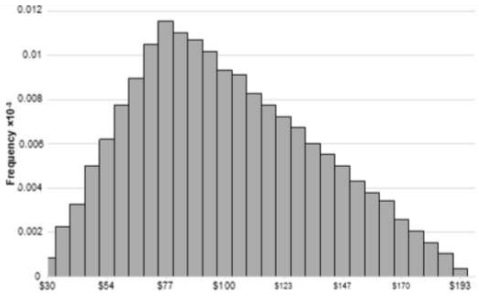
Biochar Price Mg^{-1}	Description	Source
$1,044	Minimum selling price of biochar	Sahoo et al. (2019)
$220–$280	Break-even prices	Shabangu et al. (2014)
$1,600	Most commonly cited sale prices	Groot et al. (2018)
$1,742–$2,077	Mobile pyrolysis break-even price	Granatstein et al. (2009)
$899–$2,778 (mean $1,834)	Reported industry wholesale price	Campbell et al. (2018)



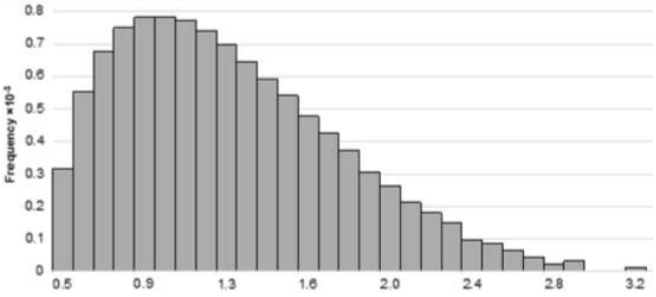
(a) Permits Costs Mg^{-1} Biochar



(b) Fuel Costs Mg^{-1} Biochar



(c) Labor Costs Mg^{-1} Biochar



(d) Biochar production rate Mg day^{-1}

그림 B5-2 불확실한 입력에 대한 확률 분포

((b), (c)는 각각의 불확실한 매개변수(허가, 연료 및 인건비)에 대해 정의된 삼각형 분포.
미터톤 바이오차당 허가증, 연료 및 노동의 평균 비용은 $13.67, $83.33 및 $103.34. (d)는 PERT 분포 사용)

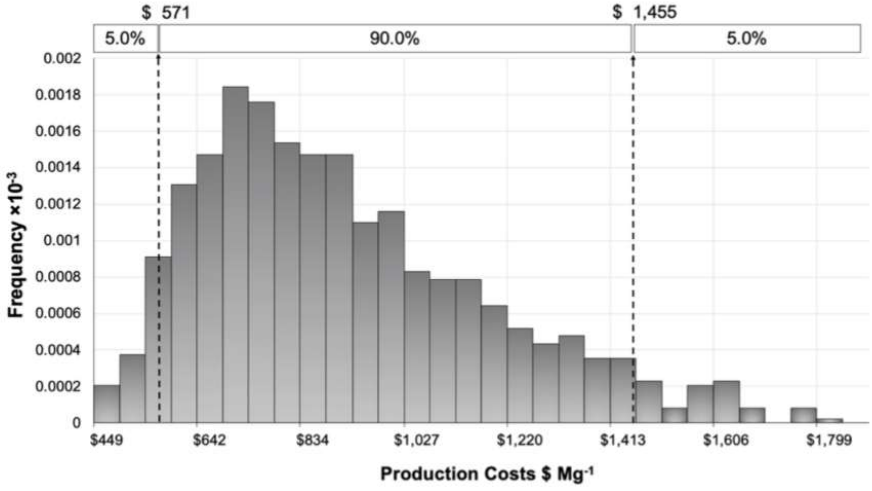


그림 B5-3 생산량, 허가, 연료, 인건비에 대한 미터톤당 총 바이오차 비용 확률 밀도 히스토그램

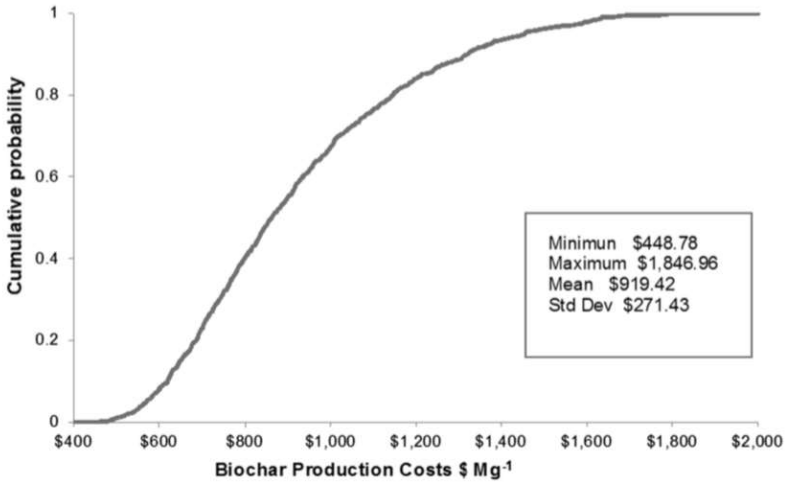


그림 B5-4 생산량, 허가, 연료, 인건비에 대한 미터톤당 총 바이오차 비용 누적 밀도 함수

3) 민감도 분석

불확실한 투입물(연료, 허가, 인건비, 생산율)에 대한 최종 생산 비용의 민감도를 측정하기 위해 민감도 분석을 수행한다. 그림 B5-5의 민감도 분석 결과는 각각의 불확실한 입력이 범위에 따라 변할 때 바이오차/Mg의 평균 비용 변화를 보여준다. 예를 들어, 바이오차 생산 속도가 변하고 다른 모든 값을 일정하게 유지하는 경우 평균 바이오차 비용 /Mg은 $577.88 및 $1,477.56 이내이다. 유사하게, 다른 매개변수의 경우 평균 바이오차 비용 /Mg의 하한 및 상한 범위가 그림 B5-5에 나와 있다.

막대는 위쪽에서 아래쪽으로 길이가 감소하는 순서로 표시되어 위쪽의 입력이 바이오차의 평균 생산 비용에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 바이오차 생산 속도는 최종 비용에 가장 큰 영향을 미친다. 생산량을 늘리면 바이오차의 최종 비용을 크게 낮출 수 있지나 고용량 휴대용 장치의 기술 장벽이 해결되고 바이오차에 대한 상당한 수요가 있지 않는 한 실현 가능한 옵션이 아닐 수 있다. 비용에 영향을 미칠 수 있는 기타 매개변수는 인건비 및 연료비이다. 본 분석에서 우리는 공급 원료가 무료로 수집될 것이라고 가정했으며 운송 및 전처리 비용을 충당하기 위해 수수료를 부과하였다.

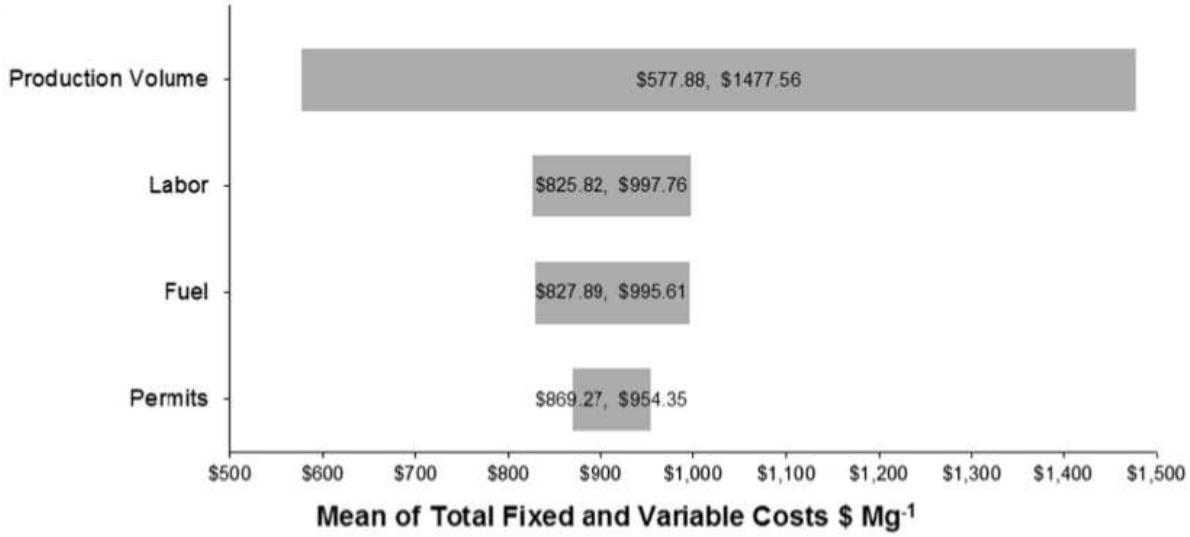


그림 B5-5 허가증, 연료, 인건비 및 생산량이 바이오차의 평균 비용에 미치는 영향

(각 막대의 숫자는 평균 바이오차 비용/Mg의 하한 및 상한 범위를 나타냄)

4) 손익분기점 분석

4가지 생산 산출량(0.5, 1, 2, 3.5Mg/일)에서 수행된 손익분기점 분석 결과는 130.5, 261, 522 및 913.5Mg/년으로 산출된다. Wrobel Tobiszewska et al. (2015) 에 기초한 중간 생산율을 가정한 1년 동안의 베이스라인 시나리오에 대한 손익분기점 분석에 따르면 1 Mg/일 (261 Mg/일)의 가격이 $1,426.2/Mg 이상일 수 없음을 보여주며 이를 넘을 경우 경제적 손실이 발생한다. 향후 생산량이 증가하면 손익분기점 가격이 낮아지며 바이오차 생산에 약간의 투자를 하면 생산 효율성과 시장 가격의 향상이 예상된다.

(2) 정량적 연구개발성과

단위성과물	A-3	전도성	
질적성과지표	①	전기 전도성	
목표치	10^{-7}~10^{-5} S/cm	달성치	10^{-6}~10^{-5} S/cm

1) 개요

전도성 탄소 소재를 부도체인 콘크리트에 혼입하여 전기전도성을 높여 전기 흐름에서 발생하는 발열을 이용하는 방식으로 전도성 시멘트를 제작하고자 한다. 탄소계열 소재를 혼입한 복합재료는 강도, 전도성 등 다양한 범위에서 우수한 물성을 보인다. 온도와 습도 등 다양한 환경변화에 전기전도도와 열전도도 모두 큰 변동 폭을 보이기 때문에 변수를 조절하여 목표수치를 달성하고자 하였다.

2) 실험 방법

4개의 탐침을 가진 4point probe를 통하여 양 끝 2개는 전류, 가운데 2개는 전압을 측정하는 탐침으로 각각 탐침간의 거리는 일정한 간격으로 떨어져 있으며 4개의 탐침을 이용하여 저항값을 구하고, 면 저항의 단위로 계산하기 위해 규격에 맞는 보정계수를 적용하여 전기전도도를 측정하였다. WCG의 혼입율에 따른 전기전도도의 변화를 관찰하였다.

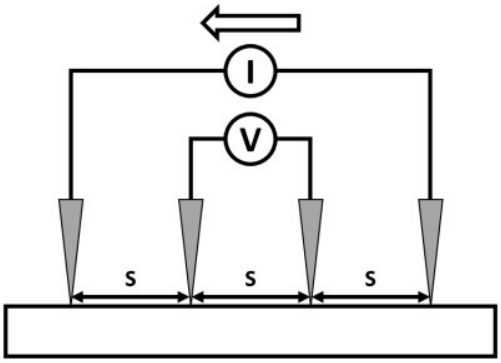


그림 A3-1 4 Point Probe 의 개념도



그림 A3-2 4 Point Probe 장비

3) 실험 결과

균질 분산이 이루어진 열처리한 폐 커피 분말의 경우 0.1 vol.% 이후부터 10-6 S/cm 이상의 전기전도도를 가지는 콘크리트 복합체가 형성된 것을 확인하였다. 이는 균질 분산에 의하여 콘크리트 복합체 전반에 걸쳐 열처리된 폐 커피 분말이 전도성 탄소로서 네트워크를 형성한 것을 의미한다.

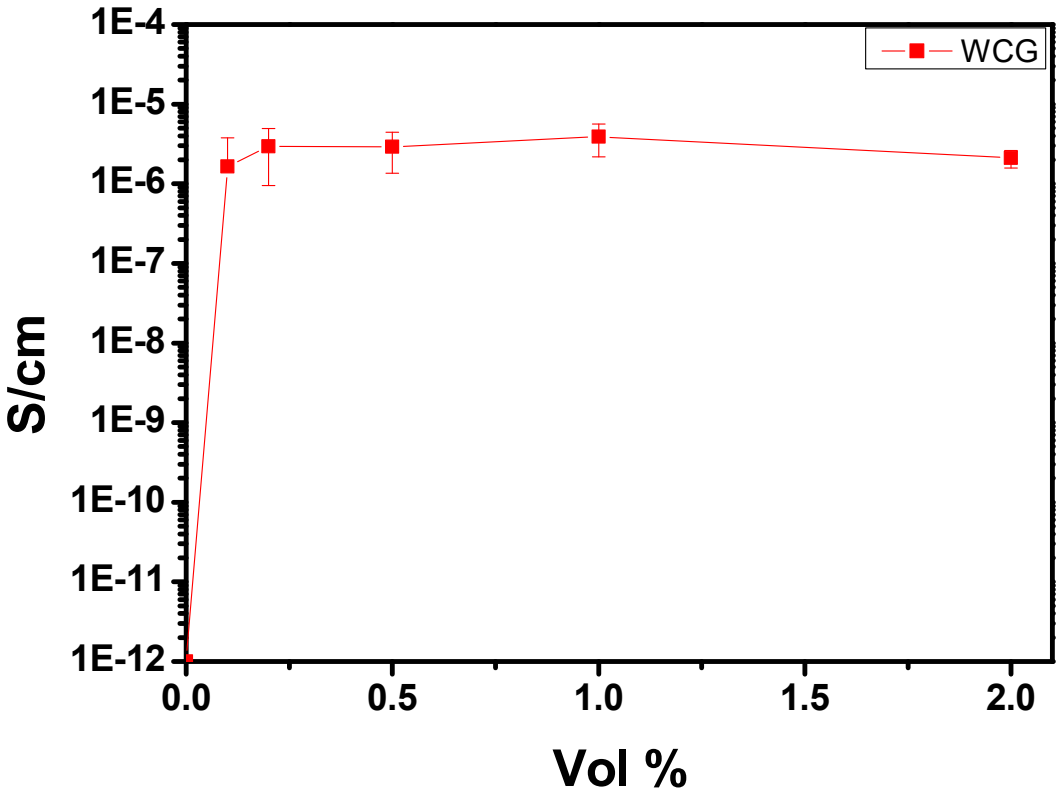


그림 A3-2 WCG 혼입율에 따른 전기전도성

폐 커피 분말은 CNT, GNP와 같은 전도성 탄소와 마찬가지로 콘크리트 복합체의 전도성 필러로서 활용이 가능한 것을 확인하였다. 또한, 기능기에 의하여 수분산이 성공적으로 이루어질 경우 미량(0.1 vol.%)의 혼입만으로도 전도성 콘크리트 복합체의 제조가 가능한 것을 확인하였다. 특히, 10^{-6}~10^{-5} S/cm 범위의 전기전도성을 갖는 것을 확인하여 연구성과 목표치를 충족시키는 결과를 얻을 수 있었다.

단위성과물	A-3	전도성	
질적성과지표	②	열 전도성	
목표치	2.5W/mK	달성치	82.2W/mK

1) 개요

부도체인 콘크리트는 콘크리트 입자사이에서 포논 산란이 발생하고 전도성 탄소 필러의 경우 상당수의 전자가 전도띠에 있기 때문에 이러한 가전자에 의하여 대부분의 열전 특성이 영향을 받게 된다. 따라서 전도성 네트워크가 형성된 콘크리트의 경우 탄소 필러에 의하여 열전특성과 전기전도도가 비례하여 증가할 것으로 예상된다.

2) 해석 방법

4 point probe 통해 측정한 전기전도도(σ)를 식 (A3-1)의 Wiedemann-Franz 법칙에 적용하면 자유전자로 구성된 WCG-CC의 열전도도(κ)를 산출할 수 있다. 또한 기존 콘크리트의 열전도도 2.25 W/mK 및 폐 커피분말의 열전도도 4000 W/mK를 고려하여 식 (A3-2)의 rule of mixture theory를 이용하여 열전도도(κ) 특성을 계산할 수 있다. 열전달 네트워크가 형성되는 0.1 vol.% 이상에서 포논 산란이 최소화 된다고 가정하고 두 가지 모델을 적용하여 전체 복합재료의 열전도도를 산출하였다.

$$\frac{k}{\sigma} = LT \qquad \text{(A3-1)}$$

여기에서, L : Lorenz number ($2.44 \times 10^{-8}\, W\Omega K^{-2}$)

T : Temperature

$$k_c = V_m k_m + v_f K_f \qquad \text{(A3-2)}$$

여기에서, k_c : 전체 열전도도

V_m: 기지의 부피분율

k_m : 기지의 열전도도

V_f: 전도성 필러의 부피분율

K_f: 전도성 필러의 열전도도

3) 해석 결과

4 point probe 방법에 의하여 측정된 WCG-CC는 0.1 % 이상 폐 커피분말 탄소나노소재가 혼입될 경우 10^{-6} S/cm 이상의 전기전도도를 가지게 된다. Wiedemann-Franz 법칙과 Rule of mixture를 적용하여 WCG-CC의 열전도도를 산출하였으며, 그 결과 2.0 % 폐 커피분말이 혼입된 WCG-CC의 경우 최대 82.2 W/mK의 열전특성을 보인다. 열전달 네트워크가 형성된 직후인 0.1% 폐 커피분말이 혼입된 WCG-CC의 경우 최소 6.2 W/mK의 열전도도를 가진다. 이를 통해 폐 커피분말 탄소나노소재가 형성한 전도성 네트워크는 WCG-CC의 융빙 성능에 필요한 열전특성을 제공할 것으로 판단된다. 실제로 이는 발열특성 평가 및 융빙성능 평가를 통해 확인되었다 (단위성과물 B-1 및 B-4 참조).

단위성과물	A-5	기본성능 평가	
질적성과지표	①	압축강도	
목표치	30MPa	달성치	53.5 MPa

1) 개요

WCG-CC를 콘크리트 포장 용도로 사용하기 위해서는 현행 설계기준에 만족하는 성능을 확보해야 할 것으로 판단하여 국토교통부 'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'의 요구성능을 도입하였다. 'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'에서는 포장용 시멘트 콘크리트에 요구되는 압축강도를 바닥판 강도 이상으로 규정하고 있다. 본 연구에서는 일반적인 바닥판 압축강도 수준으로 30 MPa을 목표 강도로 설정하였다.

2) 실험 방법

압축강도측정은 KS L 5105 '시멘트 모르타르 압축강도 시험'을 기준으로 수행하였다. 50mm의 큐빅형 공시체로 제작된 시험체에 대하여 재령 28 압축강도를 측정하였다. 물시멘트비 W/C는 35%로 고정한 후 탄소나노소재 혼입율에 따른 압축강도의 영향을 평가하였다. 본 연구에서 개발한 폐 커피분말 추출 탄소나노소재 WCG와 함께 다른 종류의 탄소기반 나노소재의 영향을 함께 살펴보았다. 여러가지 탄소기반 나노소재들이 시멘트 복합체의 강도, 열전도성 및 전기전도성 등의 특성을 향상시키기 위해 사용되어지고 있는데, 그 중에서도 탄소나노튜브(CNTs)는 가장 일반적으로 사용되는 재료라고 할 수 있다. 탄소나노튜브는 그래핀 층의 수에 따라 single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) 또는 multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)로 분류할 수 있다. 특히, MWCNT는 높은 탄성계수와 인장강도, 그리고 우수한 열전도율과 전기전도성으로 인해 시멘트 복합체에 가장 일반적으로 사용되어지고 있다. MWCNTs가 콘크리트, 모르타르 또는 페이스트의 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 지금까지 많이 발표되었다. 또한 그래핀 시트의 몇 층으로 구성된 Graphene nanoplatelets (GNPs)은 다른 탄소 기반 나노 물질에 비해 상대적으로 큰 비표면적과 큰 surface to volume ratio를 갖는 2차원 구조로 인해 최근 시멘트 기반 복합재의 나노 보강재로 큰 관심을 받고 있다. 따라서 본 연구에서는 비교 시편들의 혼입 탄소나노소재로써 MWCNT와 GNP를 선정하여 실험하였다. 그림 A5-1에는 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 모습이 나타나 있다.

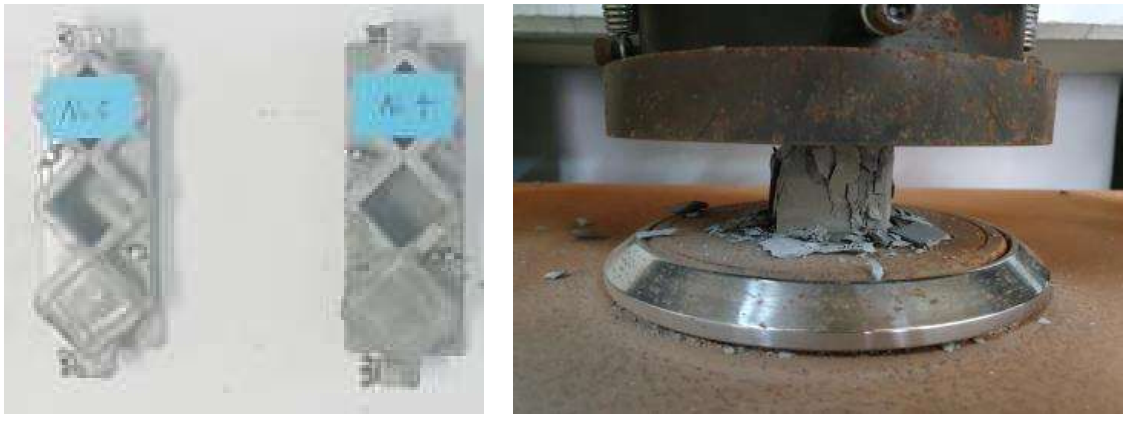


그림 A5-1 시멘트 모르타르 압축강도 시험

3) 실험 결과

탄소나노소재의 혼입에 따른 압축강도를 표 A5-1에 정리하였다. 그림 A5-2는 탄소나노소재 종류별로 혼입율에 따른 압축강도의 변화 추이를 나타내고 있다. 탄소계열 나노소재의 혼입에 따른 압축강도의 분석결과, 혼입율 증가에 따라 강도의 차이가 명확하게 드러나지는 않았다. GNP의 경우 0.5%의 혼입율 이상에서 강도 상승 효과를 기대할 수 있으나, 2%의 혼입에서는 다시 감소하는 결과를 얻었다. CNT 및 WCG의 경우 혼입율에 따른 강도변화가 크게 발생하지는 않았다.

평균압축강도는 CNT 48.8 MPa, GNP 47.9 MPa, WCG 53.5 MPa로 확인되어 WCG를 혼입하는 경우 가장 높은 압축강도를 얻을 수 있었다. 따라서, 압축강도 측면에서 WCG는 기존의 일반적인 탄소계열 나노소재인 CNT, GNP 보다 높은 역학적 성능을 확보하고 있어, 건설재료로 활용하기에 매우 적합한 것으로 평가할 수 있다.

표 A5-1 압축강도 시험 결과

(단위: MPa)

혼입율(%)	CNT	GNP	WCG
0.1	46.4	41.0	55.3
0.2	55.8	42.7	47.7
0.5	46.1	44.4	54.1
1.0	48.3	58.2	56.3
2.0	47.2	53.0	53.8

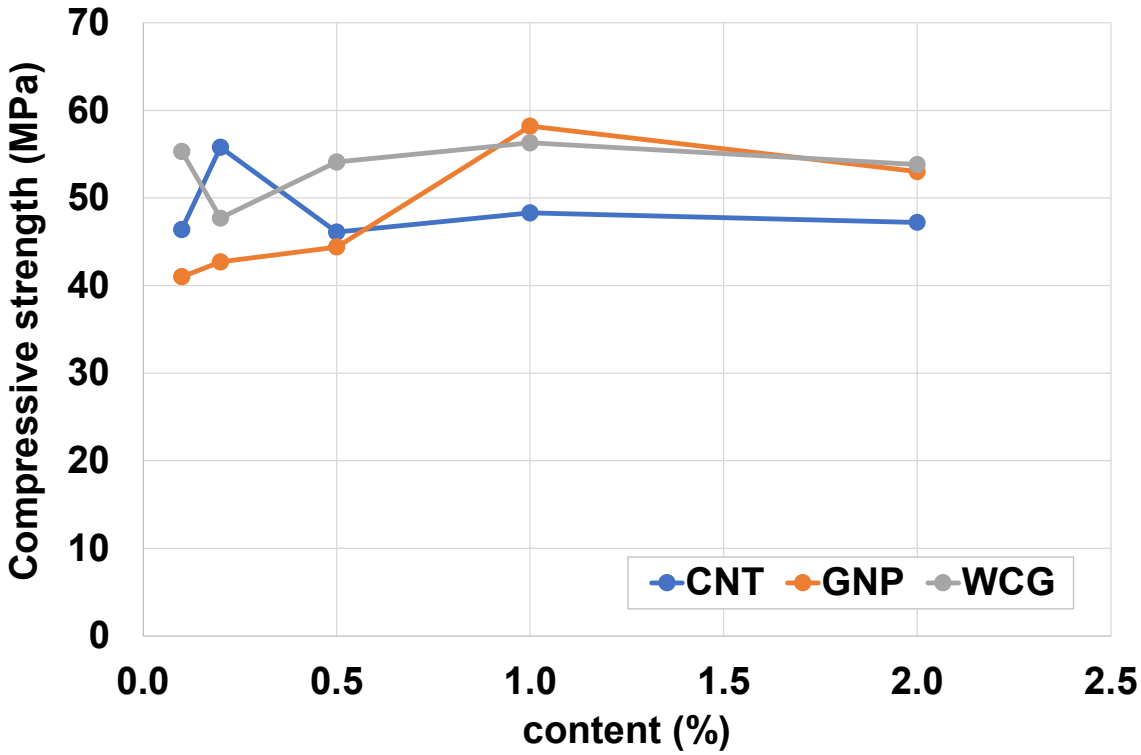


그림 A5-2 탄소나노소재 종류별 혼입율에 따른 압축강도 비교

단위성과물	A-5	기본성능 평가	
질적성과지표	②, ③	슬럼프, 공기량	
목표치	슬럼프 10~60mm 공기량 5.5±1.5 %	달성치	슬럼프 23mm 공기량 4.5%

1) 개요

도로포장용 시멘트 복합체를 개발하기 위해서 작업성, 유동성을 확인하기 위한 성능검증은 필수적이다. 뿐만 아니라 시멘트 복합체의 공기량은 내구성, 수밀성, 동결융해 저항성 그리고 단위중량 등 기본물성에 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 WCG-CC의 품질관리 및 적정한 배합설계를 위해서는 공기량의 제어가 필요하다. 'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'에서 포장용 시멘트 콘크리트에 요구되는 슬럼프는 10 ~ 60mm 이며, 공기량은 5.5±1.5 % 이다. 교면 포장용 콘크리트용으로 공기량은 6.0±1.5 % 으로 별도의 요구기준이 있다. 따라서, 본 연구에서 개발한 WCG-CC의 목표 슬럼프와 공기량은 각각 10 ~ 60mm와 5.5±1.5 %으로 설정하였으며, 공기량의 경우 교면 포장용 콘크리트용의 요구 공기량 수준인 6.0±1.5 % 에도 만족하는지 검토하였다.

2) 실험 방법

슬럼프 실험은 KS F 2402의 시험방법을 기준으로 수행하였다. WCG혼입 시멘트 복합체의 전기전도성이 0.1% 혼입율부터 발생한 것을 기준으로 하여, 0.1%의 혼입율에서 슬럼프 실험을 진행하였다. 공기량 시험은 슬럼프 실험과 동일한 배합으로 수행하였다. 그림 A5-3에 슬럼프 및 공기량 시험 모습이 나타나 있다.



(a) 슬럼프 시험 (b) 공기량 시험

그림 A5-3 WCG 시멘트 모르타르의 슬럼프 및 공기량 시험

3) 실험 결과

실험결과 23mm의 슬럼프가 발생한 것이 측정되었다. 목표 슬럼프인 10 ~ 60mm 범위 내에 충족하였다. 따라서 본 연구결과는 적합한 수준의 워커빌리티가 보장되는 것을 확인하였다. 공기량 실험 결과 4.5%로 확인되었다. 공기량 역시 목표 범위인 5.5±1.5 %를 만족하였으며, 교면 포장용 콘크리트용의 요구 공기량 수준인 6.0±1.5 % 에도 만족하였다.

단위성과물	B-1	융설/융빙 성능	
질적성과지표	①	발열성능(콘크리트 표면온도측정)	
목표치	0.0250 ㎡℃/W	달성치	0.0264 ㎡℃/W

1) 개요

본 연구에서 개발한 WCG 시멘트 복합체의 융설/융빙 기술은 전기에너지를 가하여 줄열(Joule's heat)에 의해 발생한 열에너지를 콘크리트에 전달하는 형태로 이루어져 있다. 줄열은 전류 크기의 제곱과 저항크기의 곱에 비례하므로, 일정한 전압을 걸은 상태에서 저항이 낮게 되면 전류가 커지게 되어 전열체에는 열이 발생하게 되는 것이다. 본 연구에서는 기존 문헌에서 도로융빙용 전도성 시멘트 복합체에 가한 전력량에 따른 온도 상승량 수준을 바탕으로 발열성능 목표를 탄소계열 나노소재혼입 시멘트 복합체와 유사한 수준인 0.025 ℃/W/㎡로 설정하였다.

2) 실험 방법

발열성능 실험에서 사용된 배합비는 표 B1-1에 나타나 있다. 폐 커피분말 탄소나노소재 WCG의 혼입율에 따른 발열성능을 평가하였다. 이에 더하여 MWCNT를 혼입한 시편과 발열성능을 비교하였다. 배합은 다음과 같은 과정으로 이루어졌으며, 50 mm cubic 공시체가 제작되었다. 공시체 제작 과정이 그림 B1-1에 나타나 있다.

① 배합수+고성능감수제+탄소나노소재를 비커에 모두 담은 후 60분 sonication 적용
② 시멘트+표준사 건배합 믹서기 10분(100rpm) (sonication과 같이 종료되도록 준비)
③ sonication 용액을 건배합에 천천히(10초) 부은 후 모르타르 믹싱 8분 (300rpm)
④ 50 mm 큐빅 공시체 제작 및 항온항습기 RH 50±5%, 23±2℃ 양생

표 B1-1 발열성능 실험 배합비

시편명	물(g)	시멘트(g)	표준사(g)	고성능감수제 (wt.%)	WCG or CNT (wt.%)
WCG006	328	782	1182	0.010	0.06
WCG012				0.020	0.12
WCG025				0.050	0.25
WCG050				0.125	0.50
WCG100				0.200	1.00
WCG200				0.400	2.00
CNT050	328	782	1182	0.125	0.50
CNT100				0.200	1.00
CNT200				0.400	2.00


(a) sonication


(b) 모르타르 믹싱

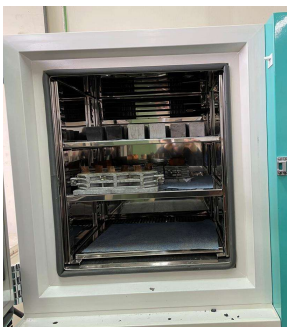

(c) 항온항습기 양생

그림 B1-1 발열성능 시험 공시체 제작

그림 B1-2에 발열성능 평가 시험체가 나타나 있다. 구리판을 시편의 양쪽에 대칭적으로 40mm 간격을 두고 매립하였다. 그림 B1-3에 발열성능 평가 시험 Set-up이 나타나 있다. 양쪽의 구리판에 파워서플라이의 양극과 음극을 연결하고, 200V 전압을 공급하였다. 시간 변화에 따른 공시체의 표면 온도 변화를 레이져 온도계로 측정하였다. 초기 온도 측정 후 5분까지는 1분 간격으로 측정하였으며, 5분 경과 후에는 온도가 수렴할 때까지 5분 간격으로 측정하였다. 이와 동시에 열화상 카메라로 표면의 온도 분포를 촬영하였다.

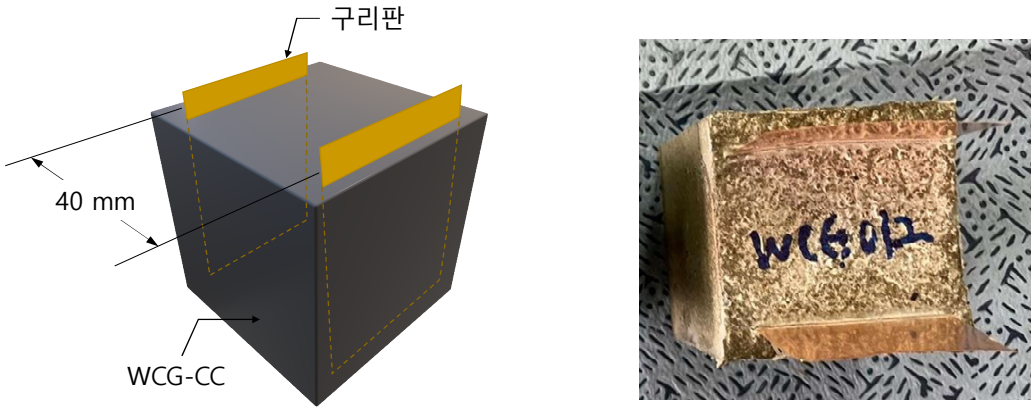


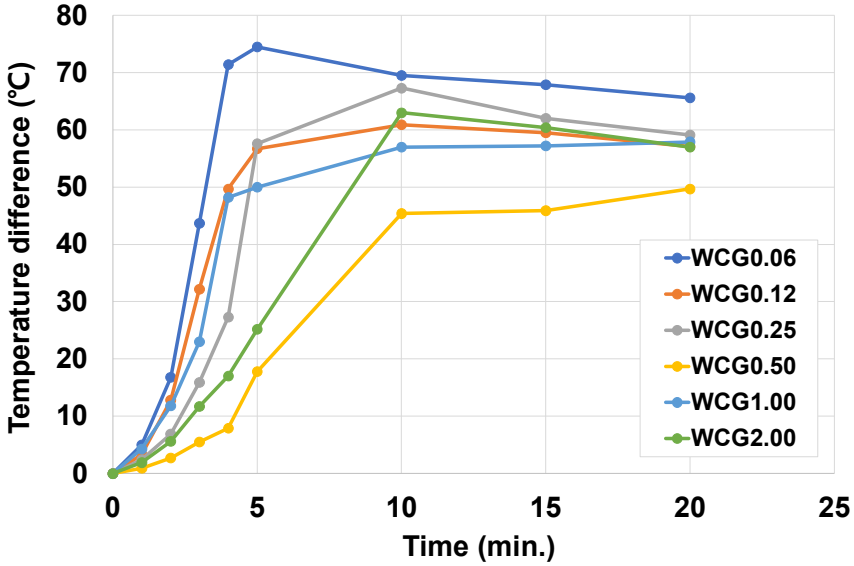
그림 B1-2 발열성능 평가 시편



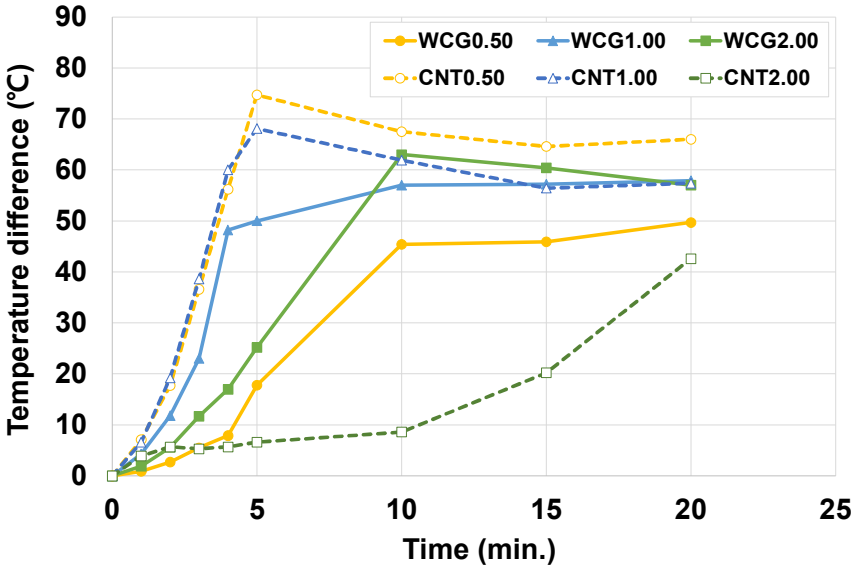
그림 B1-3 발열성능 평가 실험

3) 실험 결과

그림 B1-4(a)에 각 WCG 배합별로 시간에 따른 온도 변화량을 나타내었다. 대부분 전력 공급 이후 약 5분 경과시 상당한 온도 상승이 발생하였다. 특히, WCG 0.06%, 0.12%, 0.25%, 1.00% 배합의 경우 최고 온도에 가깝게 발열하였다. 하지만 WCG 0.50%와 2.00% 배합은 약 10분 경과시까지 온도 상승이 지속되어 다른 배합에 비해 초기 온도 상승 기울기는 상대적으로 작은 편이었다. 모든 배합이 10분 이후에는 온도가 수렴하거나 큰 변화를 보이지 않았다. 그림 B1-5에는 WCG 혼입율에 따른 최고 온도 변화 추이를 나타냈다. WCG 혼입율 증가에 따른 최고 발열 온도가 비례적으로 증가할 것이라는 예상과는 달리 혼입율 0.50% 까지는 오히려 최고 발생 온도가 감소하는 경향을 보였다. 하지만 그 이상의 혼입율에서는 혼입율 증가에 따른 최고 온도



(a) WCG 혼입율에 따른 발열 성능



(b) WCG 및 CNT의 발열 성능 비교

그림 B1-4 배합별 온도 변화량

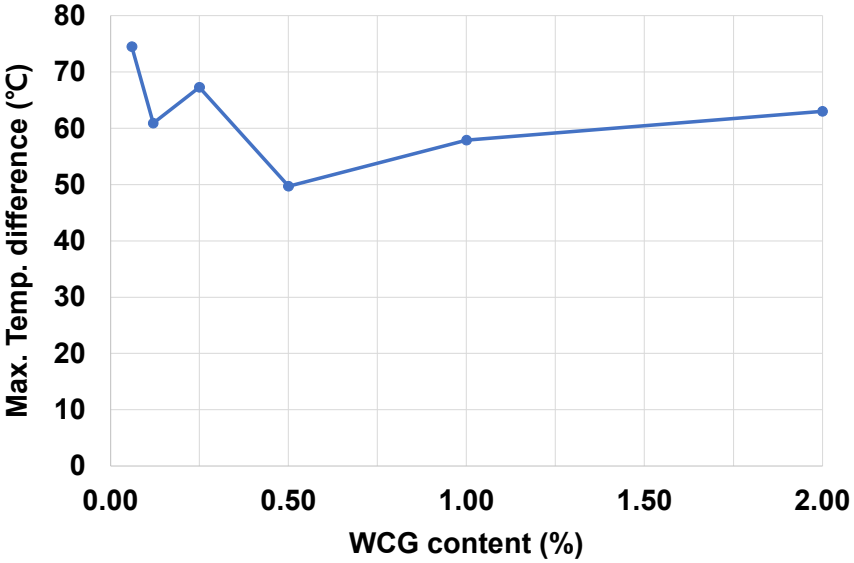


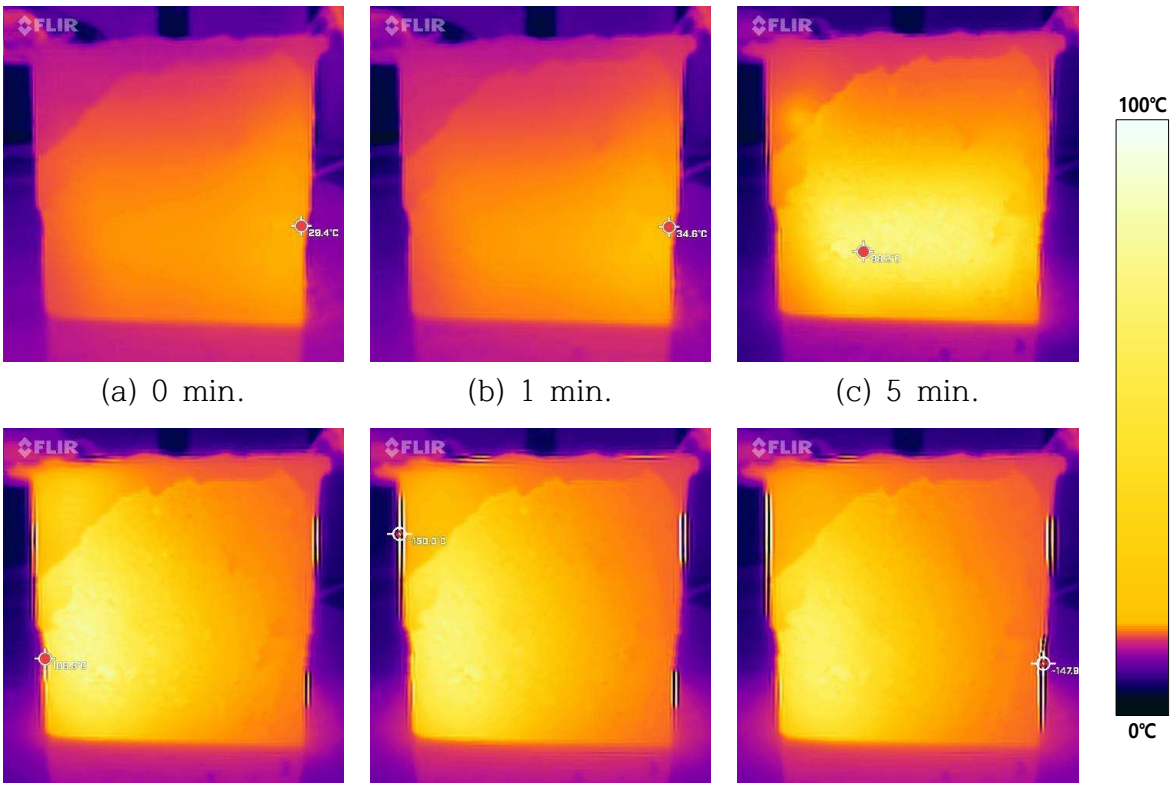
그림 B1-5 WCG 혼입율에 따른 최고 온도 변화량

증가가 관찰되었다. 혼입율 0.25% 배합보다도 2.00% 배합의 최고온도가 약 4℃ 낮게 발생하였다. 이러한 현상들은 WCG 탄소나노소재의 분산성과 관련 있는 것으로 판단된다. 시멘트 매트릭스 내에서 고른 분산을 통해 전도성 네트워크 형성이 양호할 경우, 소량의 혼입만으로도 전기전도도 확보가 가능한 것은 앞서 실험에서 확인된 바 있다. 뿐만 아니라 혼입율의 증가가 전기전도도를 비례적으로 증가시키지 못하였음 역시 관찰된 바 있다. 발열 성능에서도 동일한 현상이 관찰되는 것으로 보인다. WCG 탄소나노소재의 혼입율 증가를 전기전도도 및 발열성능의 향상과 직결시키기 위해서는 분산성 확보에 대한 좀 더 획기적인 방안이 필요해 보인다.

그림 B1-4(b)에는 WCG와 MWCNT의 동일한 혼입율에 대한 발열 성능 결과를 비교하여 나타내었다. 혼입율 0.5%와 1.0%의 경우 발열 속도와 최고 발열 온도 모두 CNT가 WCG에 비해 더 크게 나타났다. 특히 1.0% 보다 0.5%의 혼입율에서 그 차이가 더 크게 나타났다. 하지만 혼입율 2.0%의 경우, WCG가 MWCNT에 비해 발열속도와 최고 발열 온도 모두 상당한 차이로 더 크게 나타나는 반대 현상이 관찰되었다. 이는 1.0% 미만의 소량의 탄소나노소재 혼입시 WCG의 발열성능이 아직 CNT에 비해 다소 떨어지는 것으로 판단되며, 그 이상의 높은 혼입율에서는 WCG의 분산성이 CNT에 비해 우수하여 전기전도 네트워크 형성이 상대적으로 더 잘 형성된 것으로 보인다.

그림 B1-6과 B1-7에는 WCG 0.25% 혼입 시편의 열화상 이미지가 나타나 있다. 그림 B1-7의 입체적 열화상 이미지를 통해 시편 전체적으로 열확산이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 B1-8에는 측정된 전류량과 발열온도 결과를 통해, 발열성능을 정량화하여 비교하였다. 혼입율에 따른 특정한 경향을 찾기는 어려웠으며, 0.0186 ~ 0.0264 ㎡℃/W의 범위를 나타냈다. 결론적으로, WCG 2.00% 혼입 시편의 발열 성능은 0.0264 ㎡℃/W 으로 나타나 목표 성능인 0.025 ㎡℃/W를 달성하였다.



(a) 0 min. (b) 1 min. (c) 5 min.

(d) 10 min. (e) 15 min. (f) 20 min.

그림 B1-6 WCG 0.25% 시편의 열화상 이미지

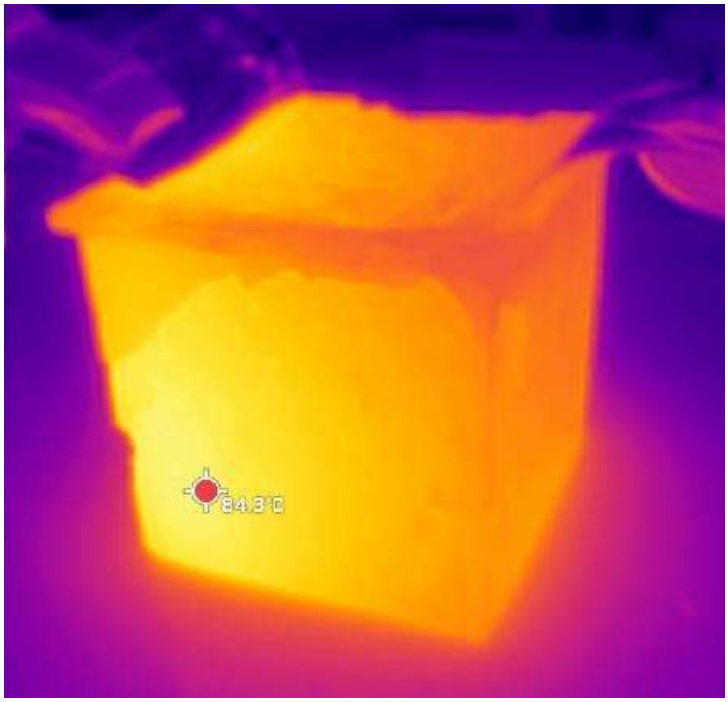


그림 B1-7 WCG 0.25% 시편의 입체 열화상 이미지

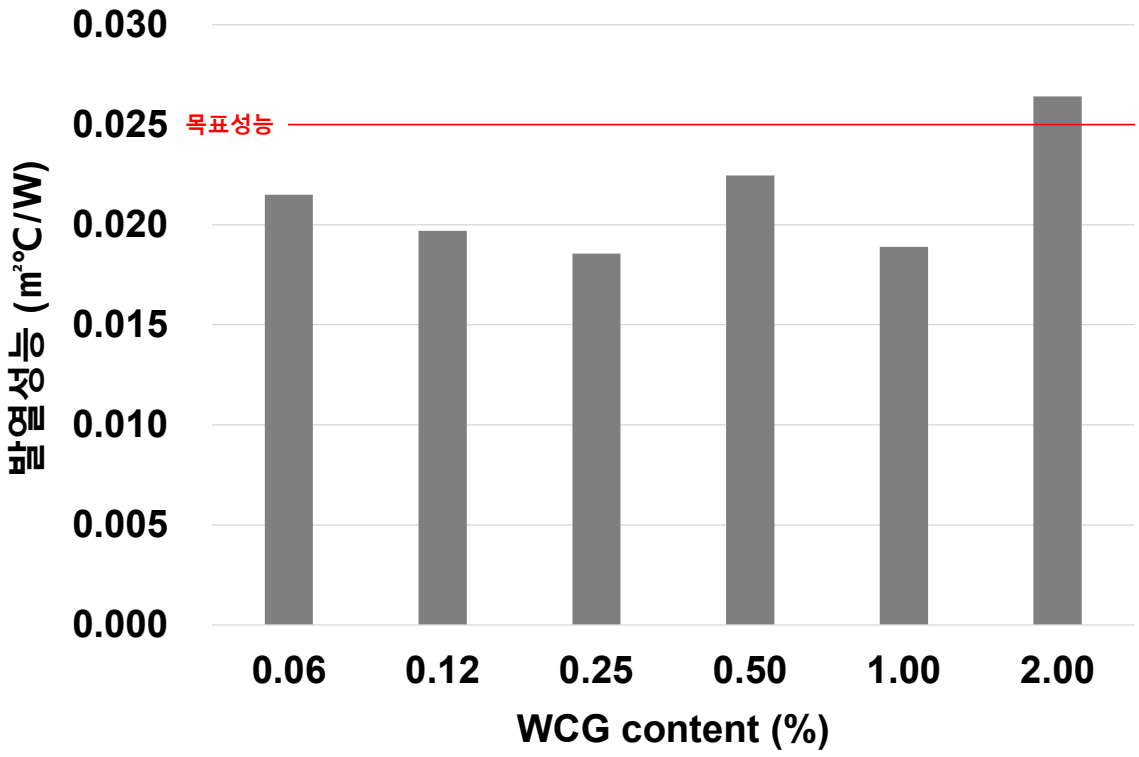


그림 B1-8 WCG 혼입율에 따른 발열성능

단위성과물	B-2	도로 포장체 역학적 성능	
질적성과지표	①	압축강도	
목표치	30 MPa	달성치	모르타르 39.9 MPa 콘크리트 28.4 MPa

1) 개요

'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'에서는 포장용 시멘트 콘크리트에 요구되는 압축강도를 바닥판 강도 이상으로 규정하고 있다. 본 연구에서는 일반적인 바닥판 압축강도 수준으로 30 MPa을 목표 강도로 설정하였다.

2) 배합

압축강도 실험을 위한 시편 제작에 사용된 배합표가 표 B2-1에 나타나 있다. 비교 시험체로써 WCG 탄소나노소재가 포함되지 않은 일반 OPC 모르타르 (OPC mortar) 배합이 수행되었으며, WCG 탄소나노소재를 시멘트 중량 대비 2.0 wt% 혼입한 모르타르 (WCG mortar)와 동일하게 WCG 탄소나노소재 2.0 wt%의 콘크리트 (WCG concrete) 배합이 이뤄졌다.

표 B2-1 도로 포장체 역학적 성능 및 내구성능 시험 시편 배합표

구 분	단위중량 (kg/m³)				WCG (wt.%)	감수제 (wt.%)
	물	OPC	표준사	굵은골재		
OPC mortar	305	782	1202	0	0	0
WCG mortar	305	782	1183	0	2.0 (15.64 g)	0.5 (3.91 g)
WCG concrete	305	782	485	725	2.0 (15.64 g)	0

3) 사용재료

시멘트는 1종 OPC가 사용되었으며, 굵은골재는 최대치수 9mm의 쇄석이 사용되었다. 잔골재는 KS L ISO 679의 표준사가 사용되었다. 표준사는 천연의 둥근 입자이고, 이산화규소 함량 98% 이상이다. 표준사의 입도분포는 표 B2-2에 나타나 있다. 혼화제는 폴리카르본산계 고성능 감수제가 사용되었다. 폐 커피분말 탄소나노소재는 그림 B2-1에 보는 바와 같이 본 연구에서 개발한 소재가 사용되었다.

표 B2-2 ISO 기준 모래의 입도 분포

체 눈의 크기 mm	체에 누적된 잔분 %
2	0
1.6	7±5
1	33±5
0.5	67±5
0.16	87±5
0.08	99±1



그림 B2-1 폐 커피분말 탄소나노소재

4) 실험방법

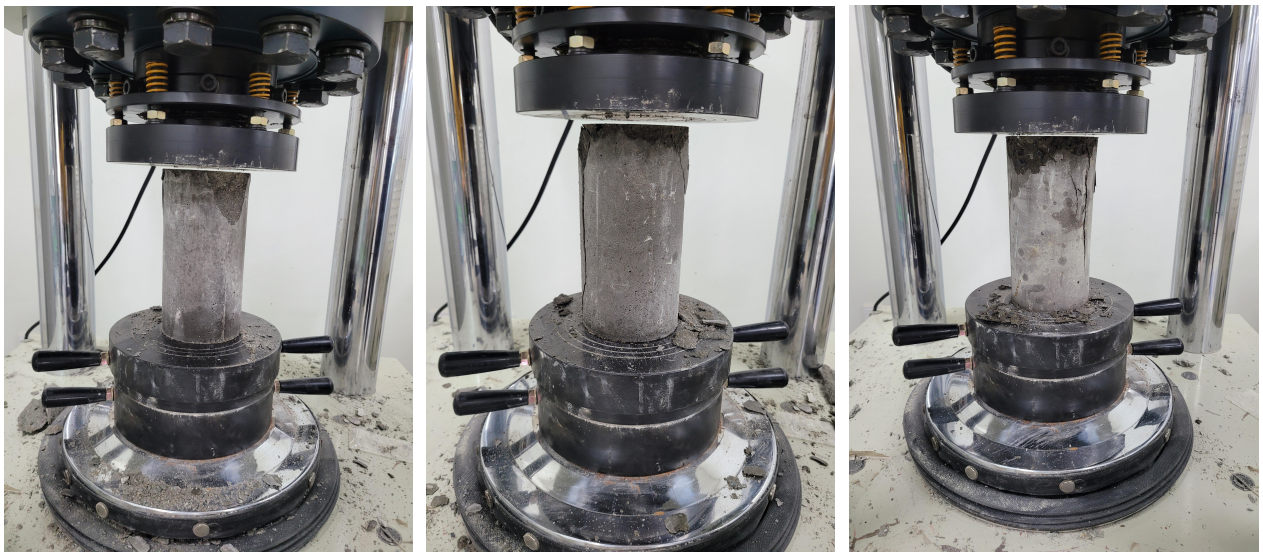
공시체 ø100×200mm를 각 실험변수별로 3개씩 제작한 후 28일간 수중양생 하였다. 재령 28일에 KS F 2405 '콘크리트의 압축 강도 시험 방법'에 따라 수행하였다. 공시체에 충격을 주지 않도록 똑같은 속도로 하중을 가하였으며, 하중을 가하는 속도는 압축 응력도의 증가율이 매초 (0.6±0.4) MPa이 되도록 하였다. 그림 B2-2에 압축강도 실험 전경이 나타나 있다. 압축강도의 계산은 다음 식 (B2-1)으로부터 산출하였다.

$$f_c = \frac{P}{\pi(\frac{d}{2})^2} \qquad \text{(B2-1)}$$

여기에서, f_c: 압축강도 (MPa)

P: 최대 하중 (N)

d: 공시체의 지름 (mm)



(a) OPC mortar (b) WCG mortar (c) WCG concrete

그림 B2-2 압축강도 실험 전경

5) 실험결과

압축강도 실험 후 파괴 시편의 모습은 그림 B2-3에 나타나 있다.



(a) OPC mortar



(b) WCG mortar



(c) WCG concrete

그림 B2-3 압축강도 실험 파괴 후 시편

표 B2-3과 그림 B2-4에 변수별 압축강도 실험 결과가 나타나 있다. WCG 탄소나노소재 2%를 혼입한 모르타르 배합에서 목표 압축강도인 30 MPa를 초과하여 달성하였다. 하지만 굵은골재를 사용한 WCG concrete 배합은 평균 28.4 MPa로 목표 강도 대비 95%의 압축강도를 보였다. 이는 WCG 탄소나노소재 2% 혼입시 시멘트 복합체 유동성 저하 현상을 일으키는데, WCG concrete 배합에서는 굵은골재로 인해 유동성 저하 현상이 다른 배합에 비해 상대적으로 더 심했다. 이로 인해 배합재료의 분산 및 다짐 등의 불량으로 이러한 차이가 발생한 것으로 판단된다. 하지만 이 정도의 강도 저하는 배합 수정 등을 통한 시멘트 복합체의 물성 개선으로 충분히 보완 가능한 수준으로 볼 수 있다.

OPC mortar과 WCG mortar을 비교해 보면, WCG mortar가 근소한 차이로 평균 압축강도가 더 크게 나타났다. WCG 탄소나노소재의 혼입을 통한 추가적인 강도 향상은 관찰되지 않았지만 그로 인해 강도 저하 현상 역시 관찰되지 않았다. 따라서 WCG 시멘트 복합체를 구조체로서 활용함에 있어서 WCG 탄소나노소재의 혼입이 걸림돌이 되지는 않는 것으로 확인되었다.

표 B2-3 압축강도 실험 결과

구 분	시편별 압축강도 (MPa)			평균	표준편차
	시험체 1	시험체 2	시험체 3		
OPC mortar	38.9	38.8	40.3	39.3	0.685
WCG mortar	39.7	39.2	40.8	39.9	0.668
WCG concrete	29.8	28.4	27.0	28.4	1.143

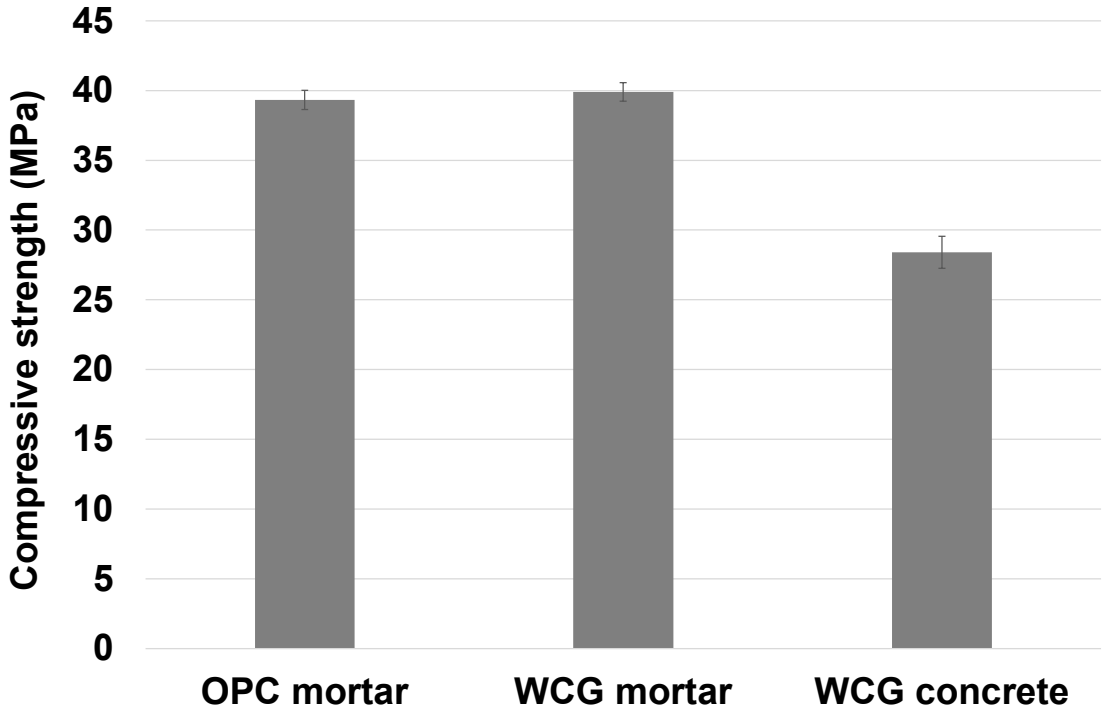


그림 B2-4 변수별 압축강도 비교

단위성과물	B-2	도로 포장체 역학적 성능	
질적성과지표	②	휨강도	
목표치	4.5 MPa	달성치	모르타르 5.8 MPa

1) 개요

'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'에서는 포장용 시멘트 콘크리트에 요구되는 휨강도를 일반 포장용 콘크리트의 경우 4.5 MPa 이상으로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 WCG 탄소나노소재 혼입 시멘트 복합체의 휨강도 수준으로 4.5 MPa을 목표 강도로 설정하였다.

2) 실험방법

표 B2-4 WCG mortar 휨강도 시편 배합표

단위중량 (kg/㎥)				WCG (wt.%)	감수제 (wt.%)
물	OPC	표준사	굵은골재		
305	782	1183	0	2.0 (15.64 g)	0.5 (3.91 g)

위 WCG mortar 배합에 대해 150×150×550 mm의 휨부재 2개를 제작 후 28일간 수중 양생하였다. 재령 28일에 KS F 2408 '콘크리트의 휨 강도 시험방법'에 따라 수행하였다. 2개의 지지 롤러와 2개의 재하 롤러로 이루어진 4점 재하 장치를 이용하여 실험하였다. 지간은 공시체 높이의 3배인 450 mm이다. 공시체에 충격을 가하지 않도록 일정한 속도로 하중을 가하였으며, 하중 속도는 가장자리 응력도의 증가율이 매초 (0.06±0.04) MPa이 되도록 조정 후, 최대하중이 될 때까지 그 증가율을 유지하였다. 그림 B2-5에 휨강도 시편 및 실험 전경이 나타나 있다. 휨강도의 계산은 다음 식 (B2-2)으로부터 산출하였다.

$$f_b = pl/bh^2 \quad \text{(B2-2)}$$

여기에서, f_b: 휨 강도 (MPa)

P: 최대 하중 (N)

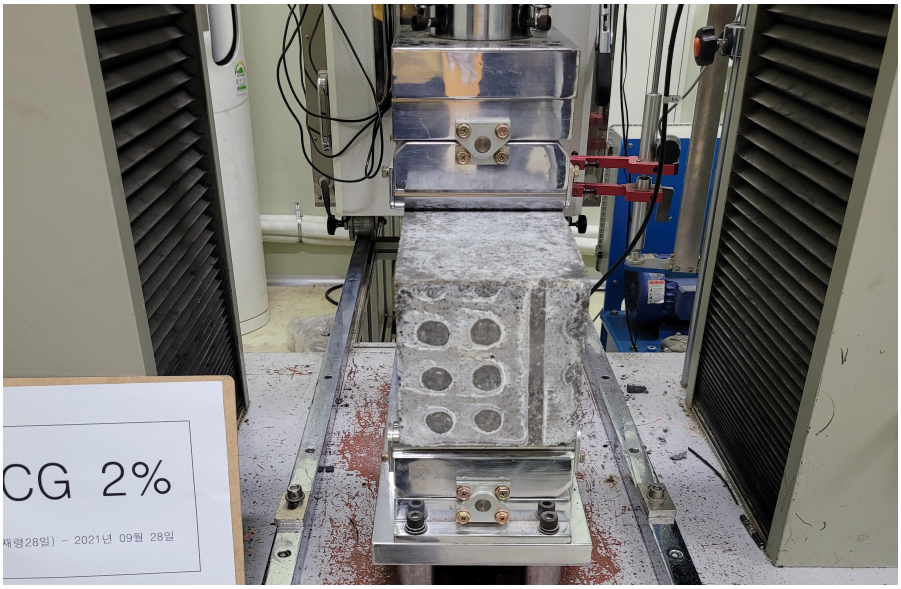
l: 지간 (mm)

b: 파괴 단면의 너비(mm)

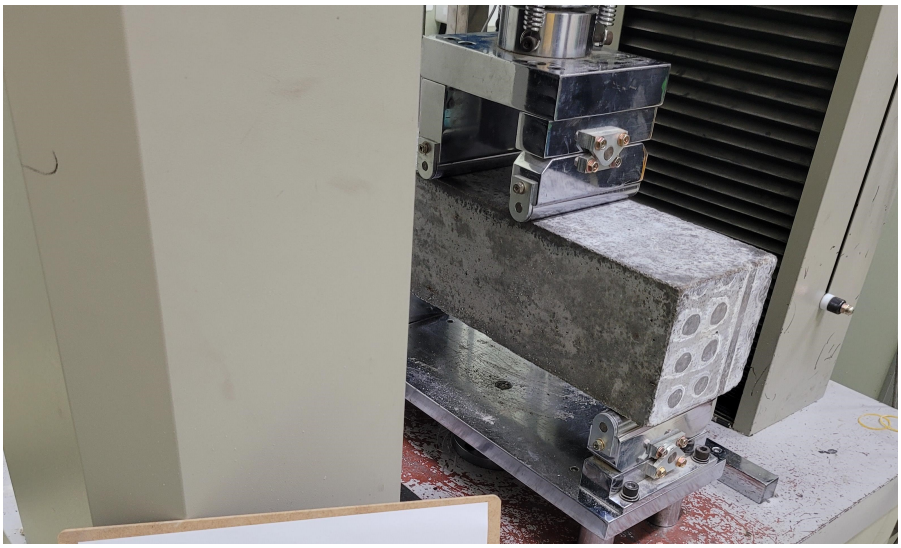
h: 파괴 단면의 높이(mm)



(a) 휨강도 시편



(b) 시편 재하



(c) 4점 재하 장치

그림 B2-5 휨 강도 실험 전경

3) 실험결과

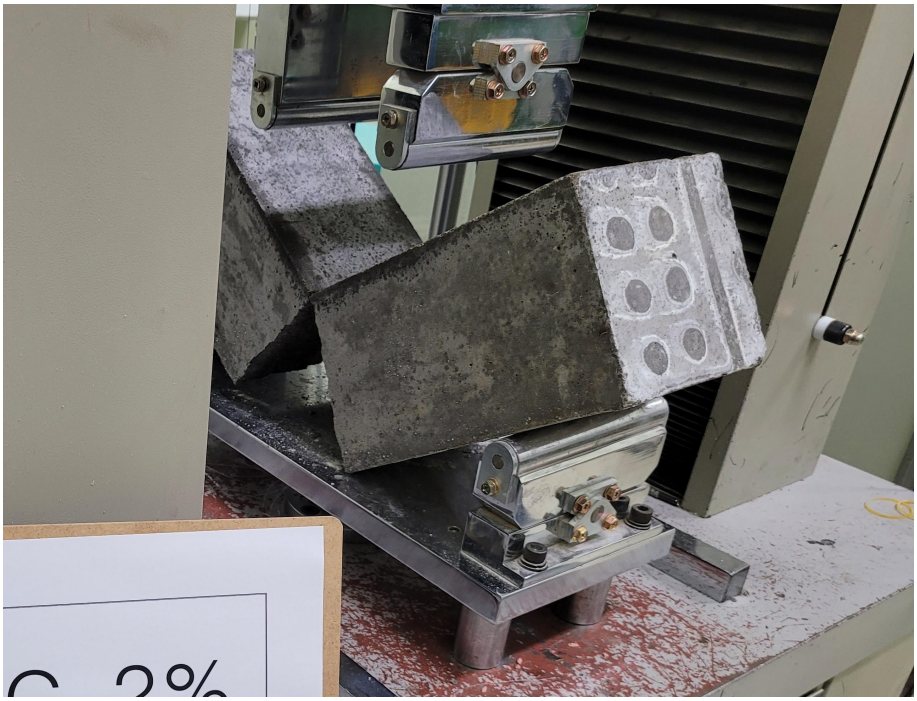


그림 B2-6 휨 강도 실험 후 시편 파괴

휨 강도 실험 후 파괴 시편의 모습은 그림 B2-6에 나타나 있다. 두 시편 모두 휨 강도는 동일하게 5.8 MPa가 나왔다. WCG 탄소나노소재 2%를 혼입한 모르타르 배합에서 목표 휨 강도인 4.5 MPa를 초과하여 달성하였다. 콘크리트구조 설계기준 KDS 14 20에서 제시하는 콘크리트의 휨 강도 제안식은 다음과 같다.

$$f_r = 0.63\lambda\sqrt{f_{ck}} \qquad \text{(B2-3)}$$

여기에서, f_r: 휨 인장강도 (MPa)

f_{ck}: 설계기준압축강도 (MPa)

λ: 경량콘크리트 계수

위 식에 기반하여 앞선 WCG mortar의 압축강도 실험결과인 39.9 MPa를 대입하여 구해보면 계산식에 의한 휨 강도는 4.0 MPa 이 산출된다. 즉, WCG mortar의 휨 강도가 보통 콘크리트보다 약 45% 더 크게 나타난 것이다. 이는 WCG 탄소나노소재가 시멘트 복합체 내부에서 미세균열 발생시 브릿징(bridging) 효과를 유발한 것으로 보인다. 이러한 현상은 CNT 나 GNP와 같은 통상 많이 사용하는 탄소나노소재를 혼입한 시멘트 복합체의 역학적 특성 연구들에서 많이 보고된 바 있다. 본 연구를 통해 개발된 WCG 탄소나노소재 역시 시멘트 복합체의 연성적인 거동 향상에 긍정적인 효과를 나타낼 수 있는 것으로 보인다. 하지만 혼입율과 휨강도 향상과의 정량적인 관계에 대한 규명은 추가적인 연구가 필요하다.

단위성과물	B-2	도로 포장체 역학적 성능	
질적성과지표	③	접착강도	
목표치	1.40 MPa	달성치	모르타르 3.48 MPa 콘크리트 3.24 MPa

1) 개요

'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'에서는 포장용 시멘트 콘크리트에 요구되는 접착강도를 교면 포장용 콘크리트의 경우 1.4 MPa 이상으로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 WCG 탄소나노소재 혼입 시멘트 복합체의 접착강도 수준으로 1.4 MPa을 목표 강도로 설정하였다.

2) 시험체 제작

접착강도 실험을 위한 시편 제작에 사용된 배합표는 표 B2-1과 동일하다. OPC mortar, WCG mortar, WCG concrete 배합을 통해 시편 제작 후 비교 평가하였다. KS F 2762 '콘크리트 보수·보호재의 접착강도 시험방법'에 따라 수행하였다. 설계강도 50±5 MPa의 콘크리트를 혼합하여 높이 50mm×가로 300mm×세로 300mm의 시험용 밑판을 제작하였다. 흐르는 물에서 와이어 브러시를 사용해 시험용 밑판에 묻은 레이턴스와 이형제(박리제) 등을 제거하였으며, 온도 (20±2)℃와 상대 습도 (65±20)%에서 48시간 동안 놓아두었다. 이렇게 제작한 시험용 밑판을 몰드 (높이 100mm×가로 300mm×세로 300mm)에 넣고 본 연구의 실험 변수에 따라 OPC mortar, WCG mortar, WCG concrete를 배합하여 몰드에 다져 넣은 후 진동 테이블에 올려놓고 다졌다. 그 후 불투수 필름으로 덮고 24시간 경과 후 탈형하여 27일 동안 온도 (20±2)℃ 수중에서 양생하였다. 그림 B2-7과 B2-8에 시험체 단면과 제작한 시편의 모습이 나타나 있다.

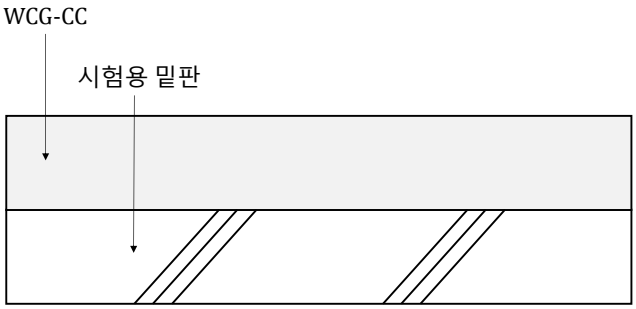
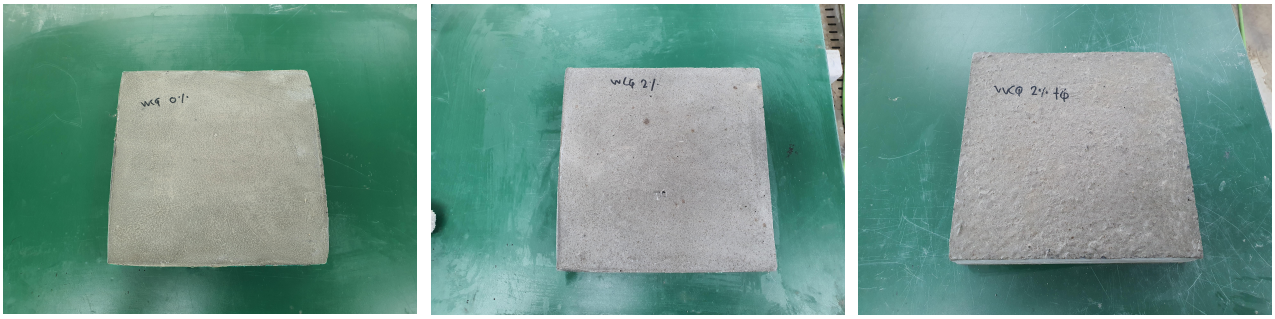


그림 B2-7 접착강도 시험체 단면



(a) OPC mortar (b) WCG mortar (c) WCG concrete

그림 B2-8 접착강도 시험체

3) 실험 방법

그림 B2-9에 접착강도 시험기와 시험 모습이 나타나 있다. 제작한 시험체의 윗면을 연마지를 사용하여 연마하여 시험체에 묻은 이물질을 제거하였다. 이 시험체를 표준 상태에서 7일 동안 정치한 후 돌리를 사용하여 접착강도 시험을 수행하였다.

코어 천공 시 코어 드릴과 시험체가 움직이거나 느슨해지지 않도록 하고, 코어 비트의 몸체부 축이 시험체 표면에 직각이 되도록 하여 서서히 힘을 가하면서 코어 지름 50 mm로 천공하였다. 총 천공 깊이는 시험체 두께+(15±5) mm인 65±5 mm로 하였다. 천공한 코어면에 무용제형 2액형 에폭시 수지 접착제를 칠한 후 돌리를 가만히 올려놓고 가볍게 문지르듯이 접착시킨 후, 다시 그 위에 질량 1kg의 추를 얹어 주위에 비어져 나온 접착제를 제거하였다.

접착강도 시험기를 코어에 부착된 돌리 위에 동심을 이루도록 하고 코어링 표면에 (90±1)°를 이루도록 놓았다. 시험기 위치가 실험 중에 변하지 않도록 고정시킨 후 코어면에 대하여 연직 방향으로 인장력을 가하여 파괴 시까지 하중을 가하였다.

접착강도 시험후 파괴 시 하중과 파괴 위치를 기록한 후, 파괴면을 버니어 캘리퍼스를 사용하여 코어 양쪽 끝단에서 서로 수직하게 취한 측정값의 평균 지름을 기록하였다. 접착강도는 식 (B2-4)를 이용하여 산출하였다. 배합 변수별 3개의 접착강도 시험을 수행하였으며, 코어링 위치가 그림 B2-10에 나타나 있다.

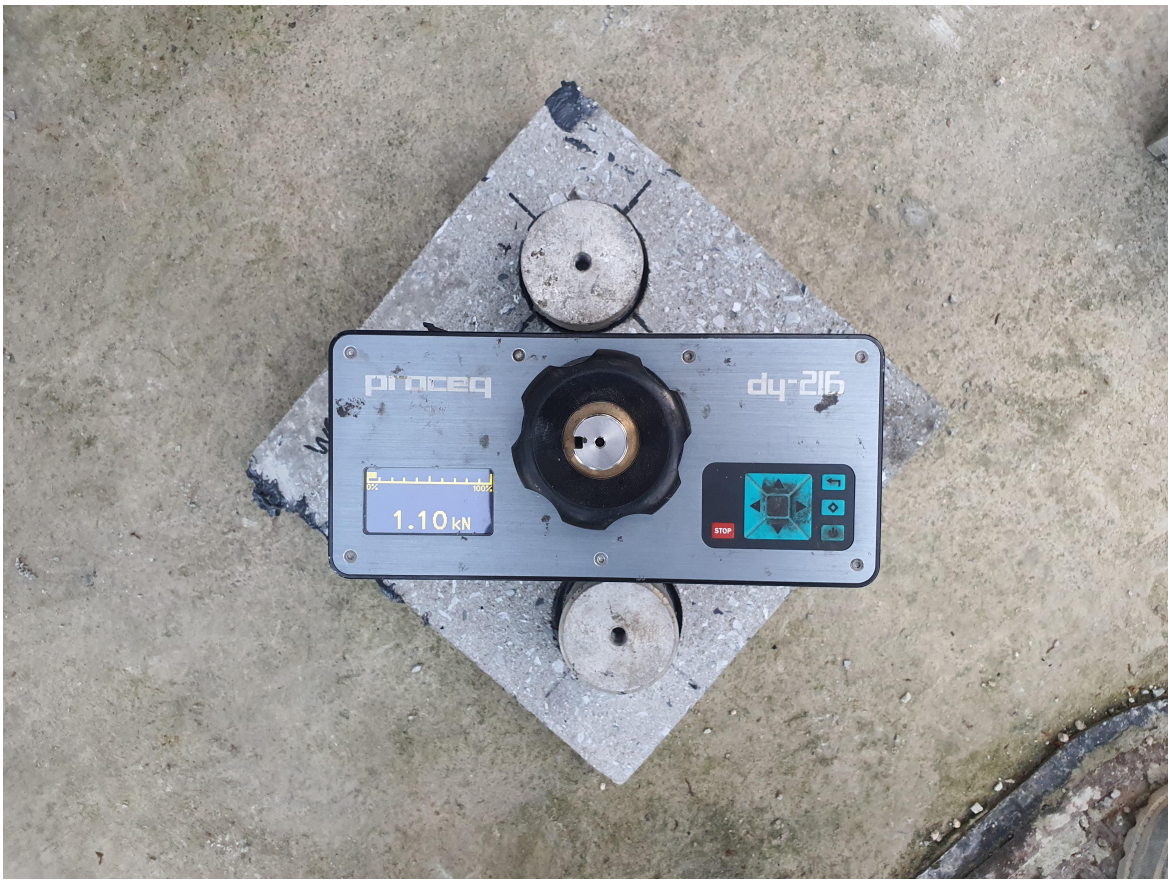


그림 B2-9 접착강도 시험

$$f_h = \frac{4F_h}{\pi D^2} \quad \text{(B2-4)}$$

여기에서, f_h: 접착강도(MPa)

F_h: 파괴 하중(N)

D: 코어의 평균 지름(mm)

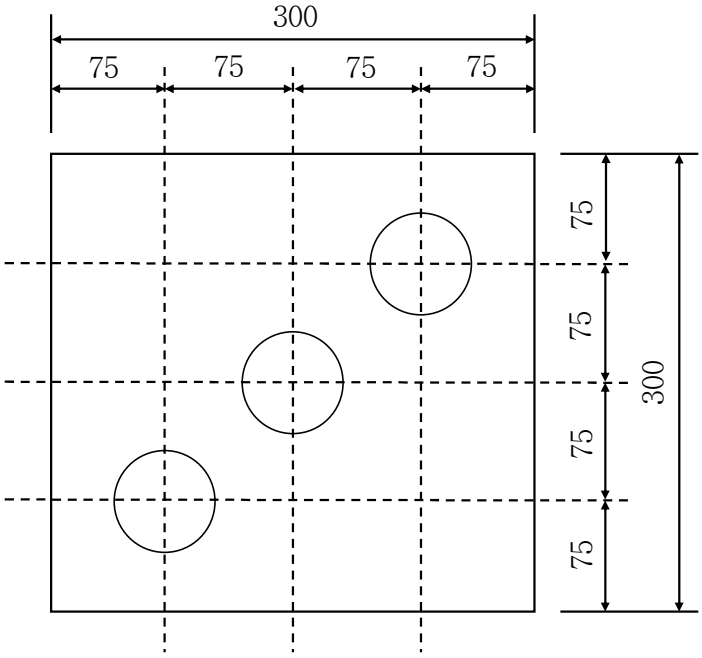
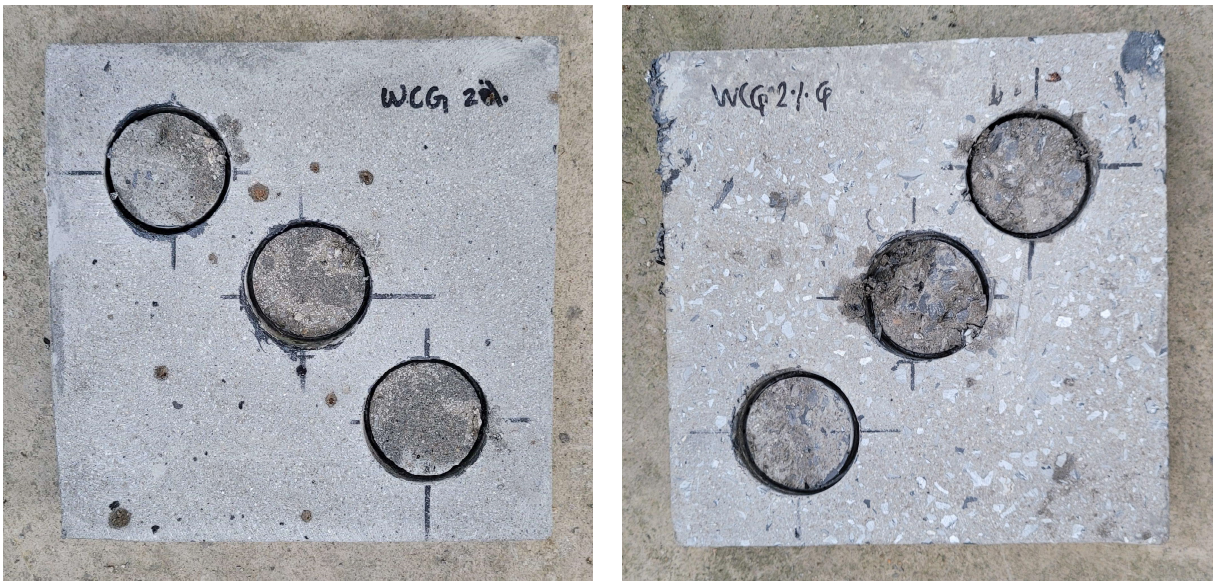


그림 B2-10 코어링 위치

4) 실험 결과

그림 B2-11에 접착강도 시험 후 파괴 단면이 나타나 있다.



(a) WCG mortar (b) WCG concrete

그림 B2-11 접착강도 시험 후 파괴 단면

표 B2-5와 그림 B2-12에 변수별 접착강도 실험 결과가 나타나 있다. WCG 탄소나노소재 2%를 혼입한 모르타르와 콘크리트 배합 모두에서 목표 접착강도인 1.4 MPa를 초과하여 기준 대비 250%에 달하는 접착강도 수준을 확보하였다.

OPC mortar과 WCG mortar을 비교해 보면, WCG mortar가 근소한 차이로 평균 접착강도가 더 크게 나타났다. 하지만 그 강도의 차이는 유의미한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 즉, 압축강도와 마찬가지로 WCG 탄소나노소재의 혼입을 통한 추가적인 접착강도 향상은 관찰되지 않았지만 그로 인해 강도 저하 현상 역시 관찰되지 않았다. 따라서 WCG 시멘트 복합체를 구조체로서 활용함에 있어서, 특히 도로 포장체로의 활용에 있어서 WCG 탄소나노소재의 혼입이 가능한 것으로 확인되었다.

표 B2-5 접착강도 실험 결과

구 분	시편별 접착강도 (MPa)			평균	표준편차
	시험체 1	시험체 2	시험체 3		
OPC mortar	3.46	3.00	3.36	3.27	0.198
WCG mortar	3.67	3.52	3.26	3.48	0.169
WCG concrete	3.26	3.41	3.06	3.24	0.143

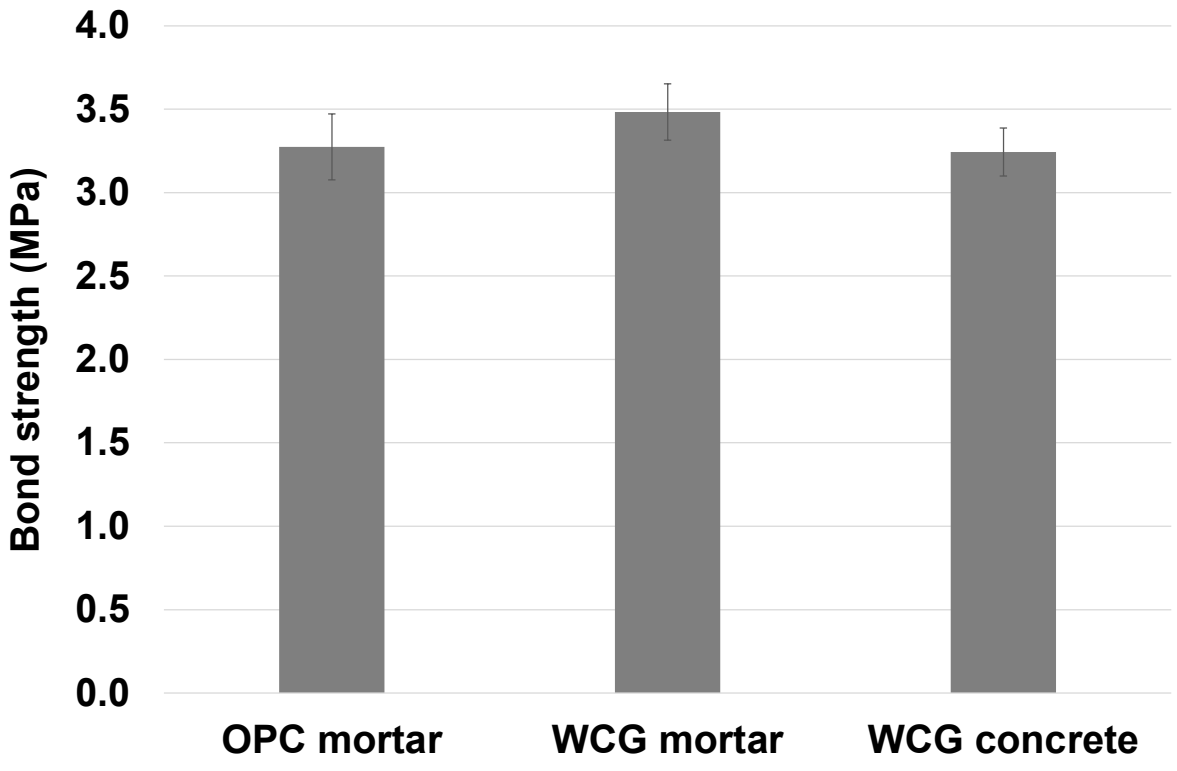


그림 B2-12 변수별 접착강도 비교

단위성과물	B-3	도로 포장체 내구 성능	
질적성과지표	①	동결융해 성능	
목표치	상대동탄성계수 80% 이상	달성치	모르타르 77.8% 콘크리트 88.1%

1) 개요

'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'에서는 교면 포장용 콘크리트의 경우 내구성능 평가항목 중 동결융해저항성에 대해 300 사이클 기준 상대동탄성계수 80% 이상 유지할 것을 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 WCG 탄소나노소재 혼입 시멘트 복합체의 동결융해저항성 수준으로 300 사이클 기준 상대 동탄성계수 80%를 목표로 설정하였다.

2) 실험 방법

동결융해저항성 평가 실험을 위한 시편 제작에 사용된 배합표는 표 B2-1과 동일하다. OPC mortar, WCG mortar, WCG concrete 배합을 통해 각 변수별 각주형 공시체(100mm × 100mm × 400mm) 2개씩 제작 후 비교 평가하였다. KS F 2456 '급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법'에 따라 수행하였다. KS F 2456에서 제시하고 있는 시험방법은 수중 급속 동결 융해 시험방법(방법 A)과 기중 급속 동결 후 수중 융해 시험방법(방법 B)이 있는데, 본 연구에서는 수중 급속 동결 융해 시험방법(방법 A)에 따라 수행하였다. 그림 B3-1에 동결융해 시험장치와 동 탄성 계수 측정 모습이 나타나 있다.

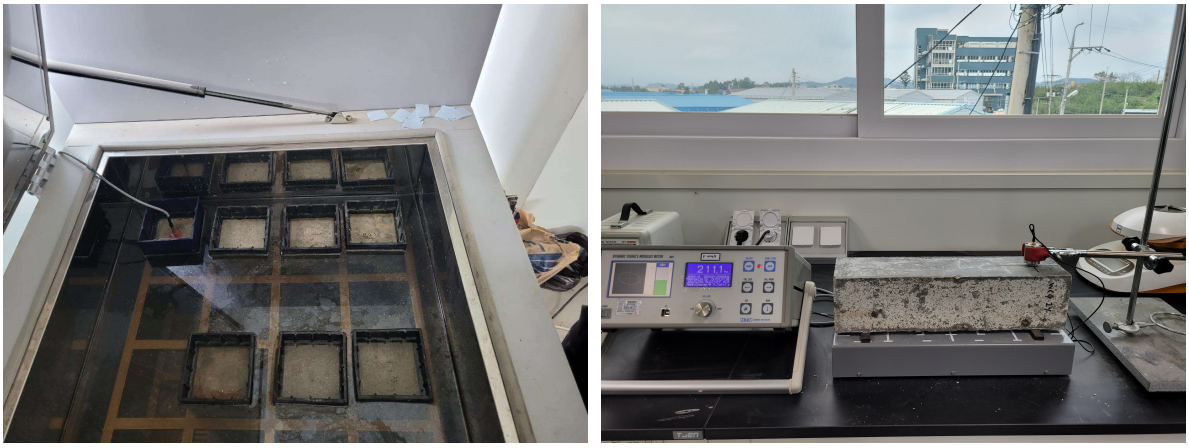
동결 융해 1사이클은 공시체 중심부의 온도를 기준으로 4℃에서 -18℃로 떨어지고, 다음에 -18℃에서 4℃로 상승되는 것으로 하였다. 1 사이클의 소요시간은 4시간으로 하였으며, 300 사이클에서 시험 종료하였다. 상대 동탄성계수는 다음의 식 (B3-1)으로 계산하였다.

$$P_C = \left(\frac{n_c^2}{n_0^2}\right) \times 100 \qquad \text{(B3-1)}$$

여기에서, P_c: 동결 융해 c사이클 후의 상대 동 탄성 계수(%)

n_0: 동결 융해 0 사이클에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)

n_c: 동결 융해 c사이클 후의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)



(a) 동결 융해 장치 (b) 동 탄성 계수 측정

그림 B3-1 동결융해 시험

3) 실험 결과

표 B3-1에 각 배합 변수별로 모든 시험체에 대한 사이클별 상대 동탄성계수 결과가 나타나 있다. 그림 B3-2, B3-3, B3-4에 OPC mortar, WCG mortar, WCG concrete의 동결융해 사이클에 따른 상대 동탄성계수의 변화를 나타냈다. 각 배합별 시편 2개의 거동이 큰 편차없이 유사하게 나타났다. 그림 B3-5에는 모든 배합에 대한 상대 동탄성계수 평균값을 비교하였다. OPC mortar와 WCG concrete를 비교해 볼 때, 두 배합은 동결융해 120 사이클까지는 유사한 거동을 보였으나, 150 사이클 이후에 OPC mortar가 좀 더 큰 동탄성계수 저하 현상이 나타났다. WCG mortar의 경우, 처음 30 사이클까지 동탄성계수의 저하가 다른 배합에 비해 상대적으로 크게 발생하였다. 이후 120 사이클까지는 OPC mortar 및 WCG concrete와 거의 유사한 감소율을 보였으나, 150 사이클부터는 다시 감소폭이 더 크게 나타났다. 그림 B3-6에서 보듯이, 최종적으로 WCG 탄소나노소재 2%를 혼입한 콘크리트 시편인 WCG concrete는 300 사이클에서 상대 동탄성계수가 평균 88.1%로 목표 성능을 초과 달성하였다. 하지만 WCG 탄소나노소재 2%를 혼입한 모르타르 시편인 WCG mortar은 목표 상대 동탄성계수인 80%에 근소한 차이로 미치지 못했다. 이 정도 수준의 동결융해 저항성능의 저하는 배합비 수정 등을 통해 충분히 보완 가능할 것으로 판단된다.

여기서 주목할 점은, OPC mortar과 WCG concrete를 비교해 볼 때 WCG concrete가 좀 더 큰 상대 동탄성계수 값을 나타냈다는 것이다. 즉, WCG 탄소나노소재의 혼입 유무에 따른 비교 결과, WCG 탄소나노소재가 동결융해 성능을 저해하는 요인으로 작용하지 않는다는 점이다.

표 B3-1 동결융해 시험 상대 동탄성계수 결과

(단위: %)

사이클	OPC mortar			WCG mortar			WCG concrete		
	시편 1	시편 2	평균	시편 1	시편 2	평균	시편 1	시편 2	평균
0	100	100	100.0	100	100	100.0	100	100	100.0
30	98.2	99.5	98.9	94.4	95.6	95.0	98.4	98.1	98.3
60	97.4	98.4	97.9	92.3	93.6	93.0	97.9	97.4	97.7
90	95.9	96.8	96.4	91.3	92.2	91.8	96.2	96.3	96.3
120	94	95.2	94.6	89.3	89.6	89.5	95.4	94.1	94.8
150	92.1	92.4	92.3	87.8	88.7	88.3	94.1	93.9	94.0
180	91	91.8	91.4	84.9	85.8	85.4	93	92.3	92.7
210	89.2	89.6	89.4	82.8	83.7	83.3	91.3	91.7	91.5
240	87.9	88.5	88.2	80.8	81.7	81.3	90.5	90.2	90.4
270	86.4	87	86.7	78.7	79.7	79.2	89.4	89	89.2
300	85.7	85.6	85.7	77.5	78.1	77.8	88.2	87.9	88.1

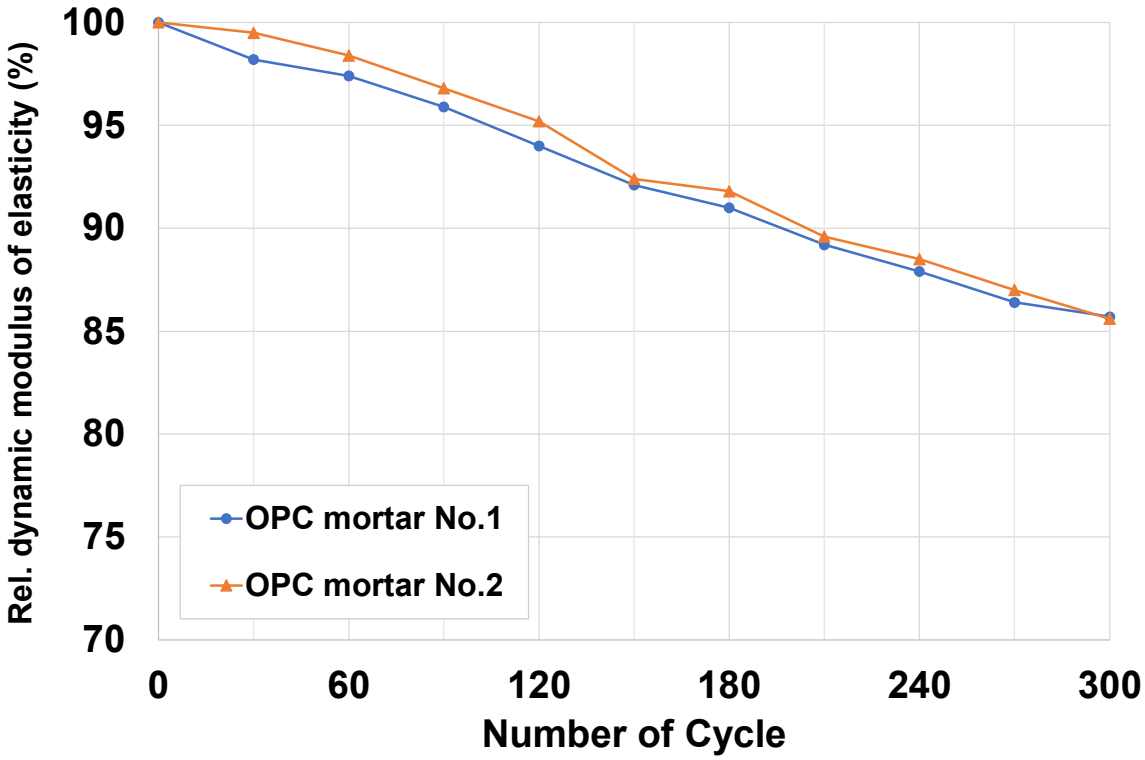


그림 B3-2 OPC mortar의 동결융해 사이클별 상대 동탄성계수

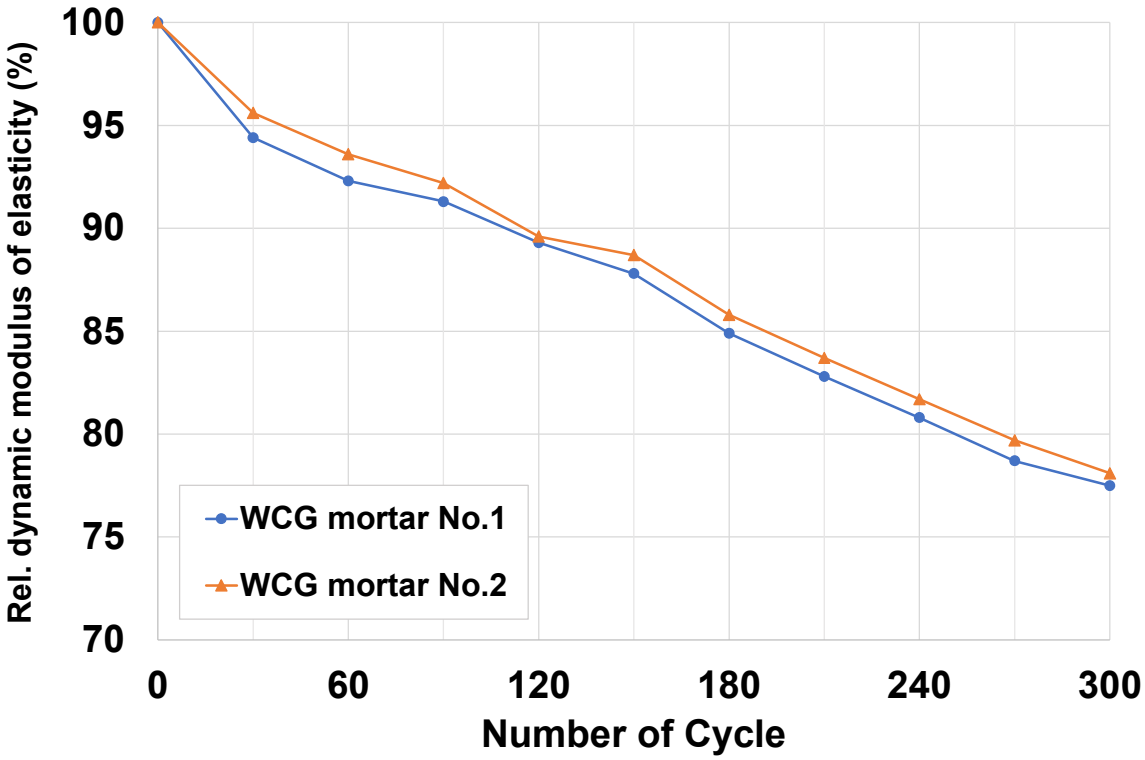


그림 B3-3 WCG mortar의 동결융해 사이클별 상대 동탄성계수

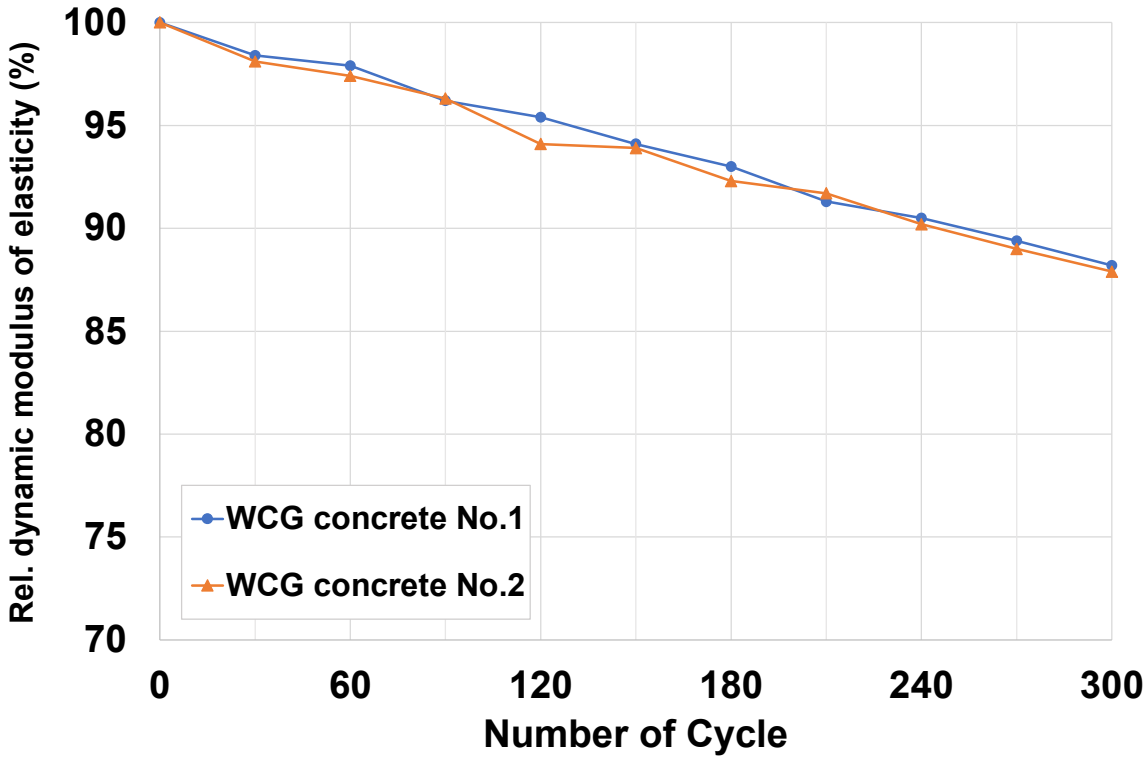


그림 B3-4 WCG concrete의 동결융해 사이클별 상대 동탄성계수

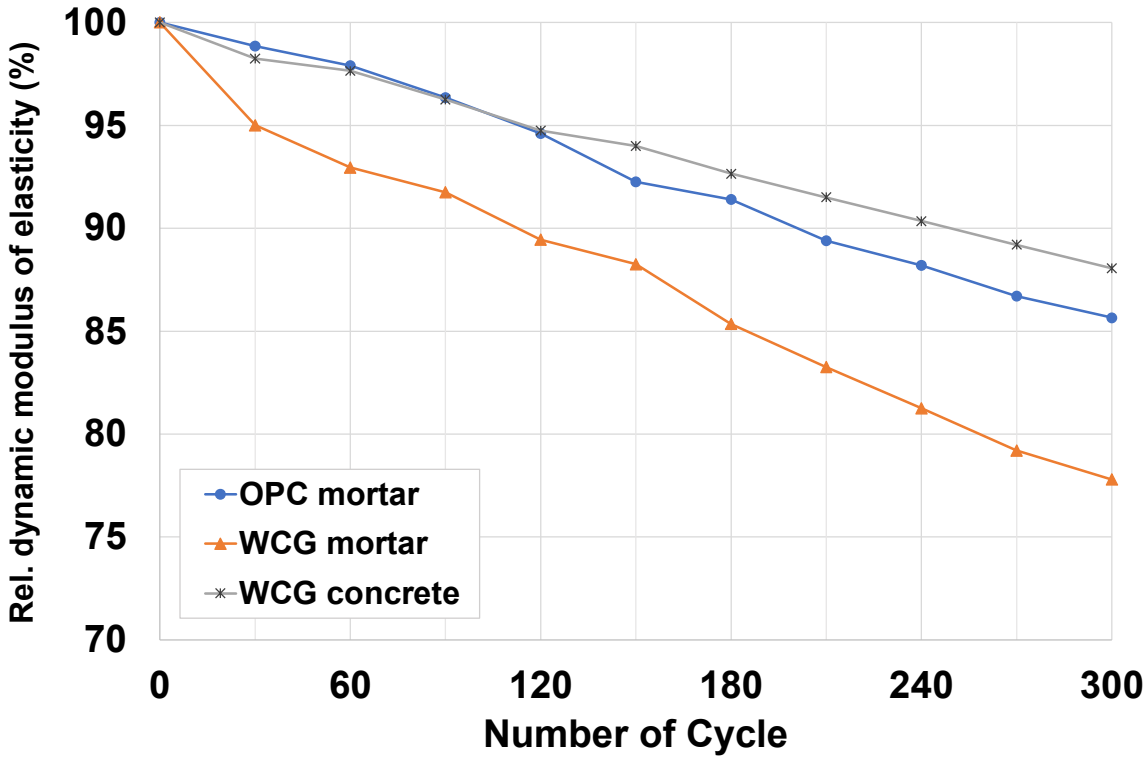


그림 B3-5 동결융해 사이클별 상대 동탄성계수 비교

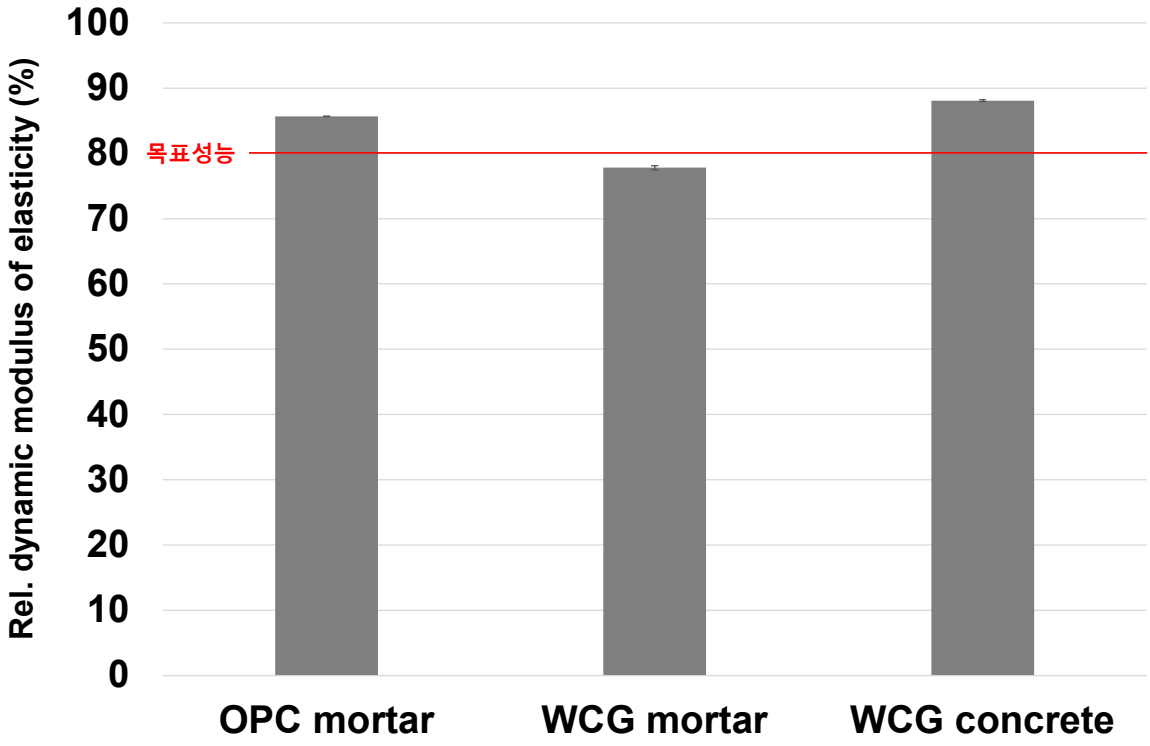


그림 B3-6 동결융해 시험 300 사이클 평균 상대 동탄성계수 비교

단위성과물	B-3	도로 포장체 내구 성능	
질적성과지표	②	표면박리저항성	
목표치	Rating 1 (ASTM C 672)	달성치	모르타르 2등급 콘크리트 1등급

1) 개요

'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'에서는 교면 포장용 콘크리트의 경우 내구성능 평가항목 중 표면박리저항성에 대해 SS 13 72 44 시험법 기준으로 적합(acceptable) 등급 이상, ASTM C 672 시험법 기준으로 Rating 1등급 이상을 요구하고 있다.

제설염과 동결융해에 따른 콘크리트 표면의 박리 저항성을 평가하기 위해 국외에서는 북미의 ASTM C 672, 독일에서 제안된 RILEM TC 117-FDC/CDF, 캐나다의 MTO LS-412와 BNQNQ 2621-900, 그리고 스웨덴의 SS 13 72 44(Boräs test method) 등과 같이 많은 평가기준이 제시되고 있다. 이에 반해 국내의 기준인 KS 규격은 2002년 이후 폐지되어 현재 제설염 및 동결융해에 대한 박리저항성 평가방법 및 기준은 전무한 상태이다. 또한 국내외 콘크리트 표면 스케일링에 대한 평가방법은 콘크리트 블리딩 및 마감 정도와 평가 시 콘크리트 시험체의 습윤 및 건조 상태에 따라 다양한 측정 오류가 발생되고 있는 것으로 보고되고 있다.

이러한 요인들로 인해 국내에서는 국외 기준을 이용하고 있다. 그 중에서도 콘크리트의 스케일링 저항성 시험은 제설제에 의한 표면열화를 평가하는 방법으로서 그 동안에는 주로 ASTM C 672이 사용되어져 왔다. 하지만 ASTM C 672은 육안판정에 의한 정성적 평가가 이루어져 시험자의 주관적 판단이 개입될 수밖에 없다. 이에 따라 최근에는 한국도로공사에서 시행한 콘크리트계 교면포장의 내구성 기준을 토대로 스웨덴 시험규격인 SS 13 72 44 시험법이 국내에서 주로 사용되고 있다. SS 13 72 44는 표면박리저항성에 대한 평가등급을 정량적 실험결과에 근거하여 객관적으로 제시하고 있다. 한국도로공사에서는 콘크리트계 교면포장에서 스케일링 저항성 한계기준으로 SS 13 72 44 시험법에서 규정하고 있는 "적합(acceptable)"단계를 설정하고 있다. 따라서 본 연구의 대상 구조물이 도로 포장체인만큼 애초 계획했던 시험방법인 ASTM C 672에서 스웨덴의 SS 13 72 44 방법으로 변경하여 수행하였다. 목표치는 연구계획 당시 도전적으로 설정하였던 ASTM C 672의 정성적 평가 기준 Rating 1을 유지하되, SS 13 72 44 시험법에 따른 평가등급 결과를 ASTM C 672의 등급으로 환산하였다.

2) 실험 방법

표면박리저항성 평가 실험을 위한 시편 제작에 사용된 배합표는 표 B2-1과 동일하다. OPC mortar, WCG mortar, WCG concrete 배합을 통해 각 변수별로 150mm × 150mm × 150mm 정육면체 공시체를 제작 후 비교 평가하였다. 스웨덴의 SS 13 72 44 '급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법'에 따라 수행하였다. Boräs 시험법을 모태로 하여 개발된 시험법으로서 RILEM 시험법과 같이 포장면에서 제설제 및 온도 강하가 한 면에서 이루어지는 것을 모사하여 그림 B3-7과 같이 콘크리트 주위에 20mm의 보온재를 사용하여 제설제 접촉면을 제외하고 온도강하를 방지하며, 수용액의 증발을 막기 위하여 덮개를 설치하였다. 덮개 비닐과 용액 표면사이의 간격은 최소한 15mm 이상 되도록 시험기간 내내 수평을

유지시켜주었다. 제설제는 3% 염화나트륨 수용액으로 사용하고, 용액은 평균 3mm 깊이가 되어야 하며 변의 길이가 150mm인 시편에 대해서 67ml의 용액량과 같다. 동결융해 챔버에서 반복되는 동결-융해의 각 사이클에 노출된 시험체에서 수용액의 온도는 시험법에 규정된 요구조건을 만족하여야 한다. 온도조건은 -17℃에서 12시간, 0℃ 이상에서 7~9시간 유지하게 되어 있으며, 각 온도단계에서 온도상한, 하한 및 시간을 정하고 있다. 그림 B3-8에는 각 배합변수별 표면박리저항성 실험 시편이 나타나 있다.

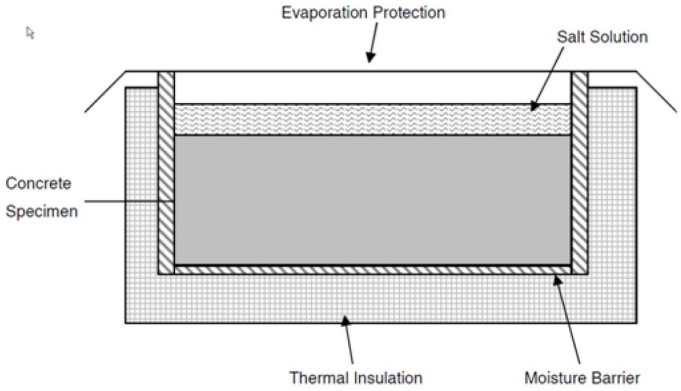


그림 B3-7 표면박리저항성 시험법(SS 13 72 44)

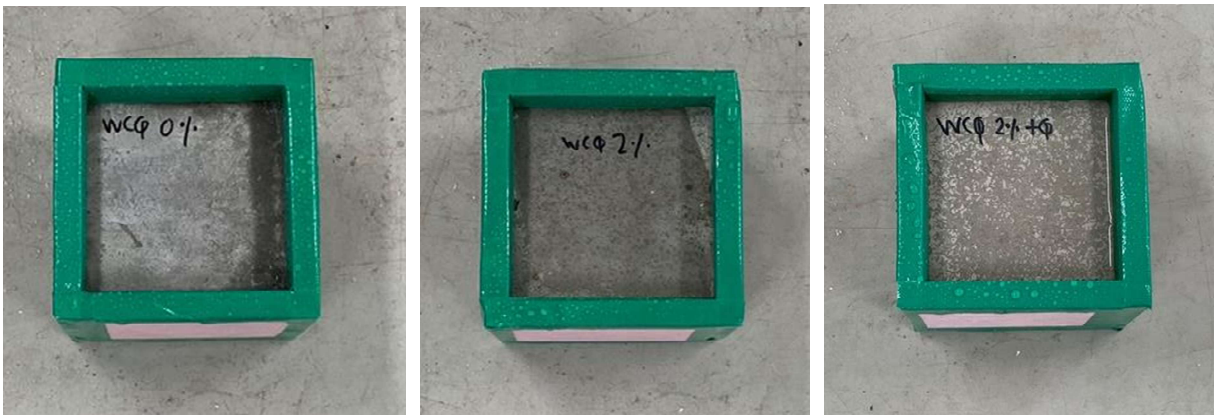


그림 B3-8 표면박리저항성 실험 시편

3) 실험 결과

표 B3-2에 각 배합별로 실험 사이클에 따른 표면박리 손실량 결과를 나타내었다. 표 B3-3은 SS 13 72 44에서 제시하고 있는 스케일링 저항성 평가등급별 요구성능이다. OPC mortar와 WCG concrete의 경우, 56사이클 후에 평균 박리량(m_{56})이 0.50kg/㎡ 보다 작고, 동시에 m_{56}/m_{28}이 2보다 작아서 우수(good) 등급을 나타냈다. 반면에 WCG mortar는 56사이클 후에 평균 박리량(m_{56})이 0.50kg/㎡ 보다 작지만 m_{56}/m_{28}이 2보다 커서 우수(good) 등급은 아니지만 적합(acceptable) 등급을 나타냈다.

표 B3-4에서 보는 바와 같이, Vassilev(2012)의 연구 결과에 따르면 표면박리 질량 손실율에 따라 ASTM C 672와 SS 13 72 44의 등급에 대해 상호 비교가 가능하다. WCG concrete는 SS 13 72 44의 우수(good) 등급으로써 ASTM C 672으로 보면 Rating 1등급에 해당하여 목표치를 달성한 것으로 판단된다. 다만, WCG mortar는 SS 13 72 44의 적합(acceptable)

등급으로써 ASTM C 672의 Rating 2~3등급에 해당한다. 이 정도의 표면박리저항성은 본 연구에서 제시한 도전적 목표에는 다소 미흡하지만, 건설공사 표준시방서와 한국도로공사에서 요구하는 수준은 만족하고 있다. 배합비 조정을 통해 충분히 성능 향상을 유도할 수 있을것으로 판단된다.

표 B3-2 표면박리저항성 실험결과 데이터

(단위: kg/㎡)

사이클	OPC mortar	WCG mortar	WCG concrete
0	0	0	0
7	0.09	0.04	0.08
14	0.17	0.08	0.13
28	0.22	0.15	0.25
42	0.32	0.28	0.35
56	0.38	0.44	0.38
70	0.42	0.55	0.43
84	0.49	0.59	0.44
100	0.51	0.62	0.46

표 B3-3 스케일링 저항성 평가등급별 요구성능 (SS 13 72 44)

등급	요 구 성 능
매우 우수 (very good)	56사이클 후의 박리량(m_{56})이 모든 시편에서 0.10 kg/㎡보다 작음
우수 (good)	56사이클 후의 박리량(m_{56})이 모든 시편에서 0.20 kg/㎡ 보다 작거나, 56사이클 후에 평균 박리량(m_{56})이 0.50 kg/㎡ 보다 작고, 동시에 m_{56}/m_{28}이 2보다 작거나, 112 사이클 후 평균 박리량이 0.50 kg/㎡ 보다 작음
적합 (acceptable)	56사이클 후에 평균 박리량(m_{56})이 1.00 kg/㎡ 보다 작고, 동시에 m_{56}/m_{28}이 2보다 작거나, 112 사이클 후에 평균 박리량이 1.00 kg/㎡ 보다 작음
부적합 (unacceptable)	적정한 동결저항성에 대해 요구수준을 만족하지 못함

표 B3-4 스케일링 저항성 평가등급 비교 (Vassilev, 2012)

ASTM C 672		질량손실량 (kg/m²)	SS 13 72 44
Rating	Condition of surface		
0	No scaling	0~0.05	very good
1	Very slight scaling 3 mm depth max (no coarse aggregate visible)	0.051~0.21	good
2	Slight to moderate scaling	0.211~0.50	acceptable
3	Moderate scaling (some coarse aggregate visible)	0.51~1.3	
4	Moderate to severe scaling	1.3~2.1	unacceptable
5	Severe scaling (coarse aggregate visible over entire surface)	≥2.1	

그림 B3-9에는 100 사이클 후 시편의 표면 상태를 나타내고 있다. 표면 상태에서 보듯이, ASTM C 672의 육안 관찰에 따른 상태등급 평가시 오히려 더 높은 등급 판정이 가능한 수준으로 관찰된다. 5단계로 구성된 ASTM C 672에 비해 4단계로 구성된 SS 13 72 44에서 더욱 엄격한 스케일링 저항성을 요구하고 있는 것으로 판단된다.

그림 B3-10에는 사이클에 따른 표면박리 스케일량의 변화 추이를 변수별로 비교하였다. WCG concrete는 42 사이클 이후에 표면박리저항성이 다른 시편에 비해 상당히 높은 것으로 나타났다. 반면에 WCG mortar는 28 사이클 이후에 표면박리 스케일량이 급격히 증가하여 70 사이클이 되어서야 완만해지는 곡선을 나타냈다.

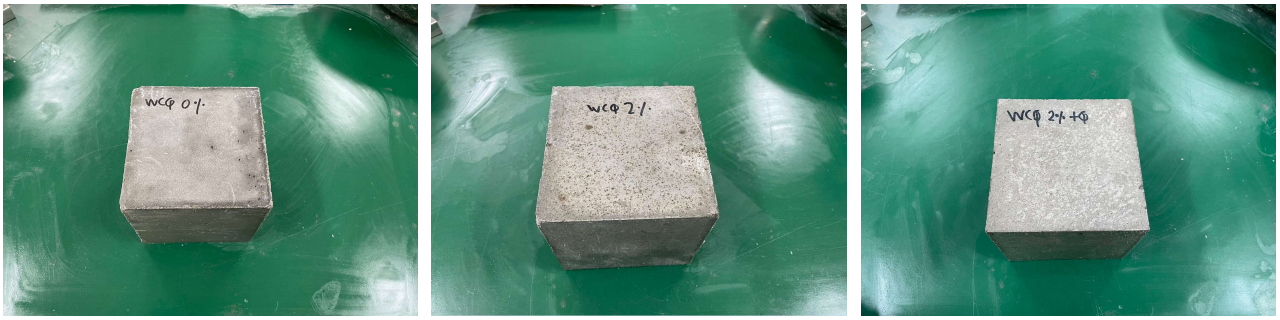


그림 B3-9 표면박리저항성 100 사이클 후 표면 상태

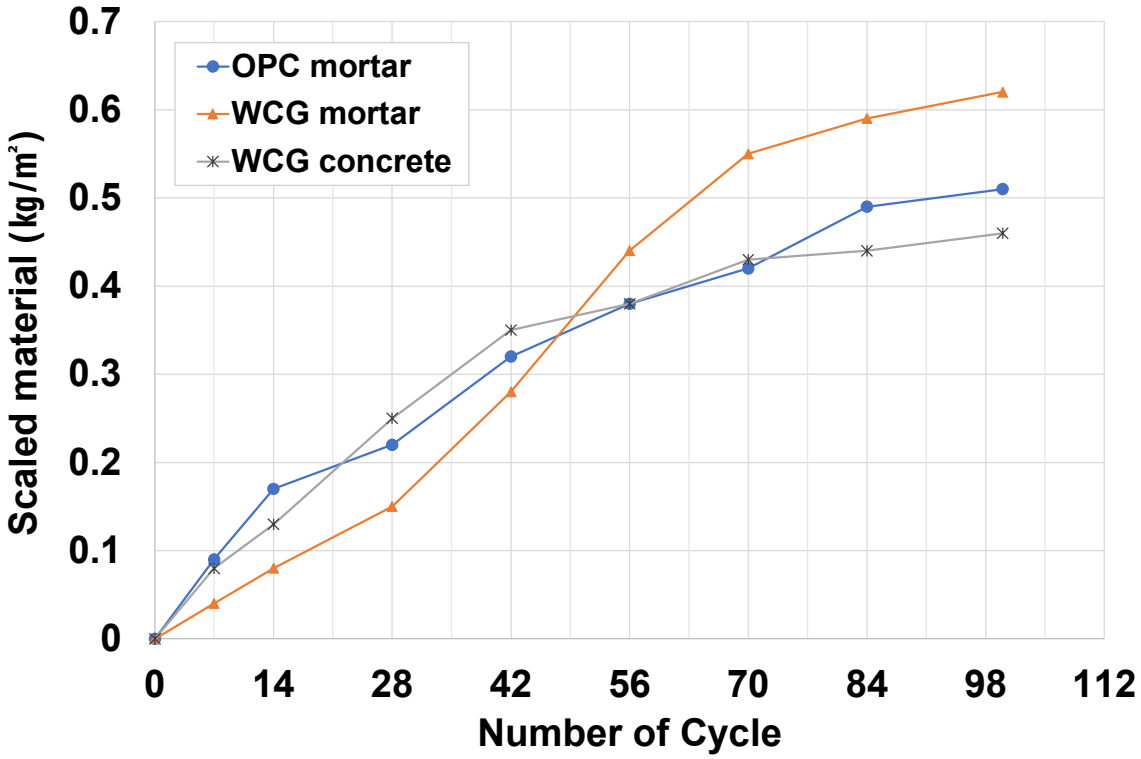


그림 B3-10 변수별 표면박리저항성 비교

단위성과물	B-3	도로 포장체 내구 성능	
질적성과지표	③	염소이온 침투저항성	
목표치	1,000 C 이하	달성치	모르타르 876.9C 콘크리트 742.8C

1) 개요

'KSC 44 50 15: 2016 시멘트콘크리트 포장공사'에서는 교면 포장용 콘크리트의 경우 내구성능 평가항목 중 염소이온침투저항성에 대해 1,000C(쿨롱) 이하를 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 WCG 탄소나노소재 혼입 시멘트 복합체의 염소이온침투저항성에 수준으로 1,000C(쿨롱) 이하를 목표로 설정하였다.

2) 실험 방법

콘크리트의 염소이온 침투저항성 시험은 ASTM C 1202에 규격화 되어 있으며, 국내 대응 규격으로 KS F 2711 "전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투저항성 시험방법"이 있다. 이 시험방법은 직경 10cm의 원주형 콘크리트 시편을 길이가 5cm가 되도록 절단한 다음 진공 데시케이터에 의한 전처리를 실시하고 그림 B3-11과 같이 확산셀을 구성하여 셀 양단에 직류전압 60V을 가하고 30분 단위로 셀을 흐르는 통과 전류를 6시간까지 측정한다. 그림 B3-12에 염소이온 침투저항성 시험 전경이 나타나 있다.

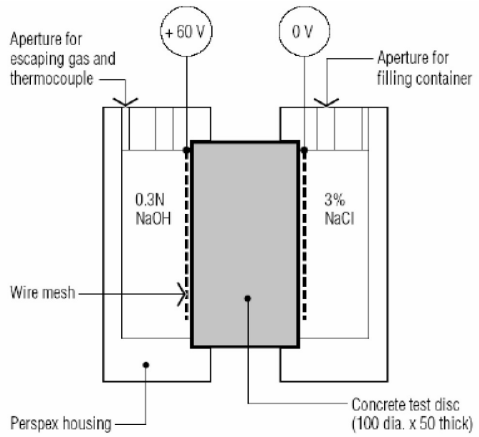


그림 B3-11 염소이온 침투저항성 시험장치 개요

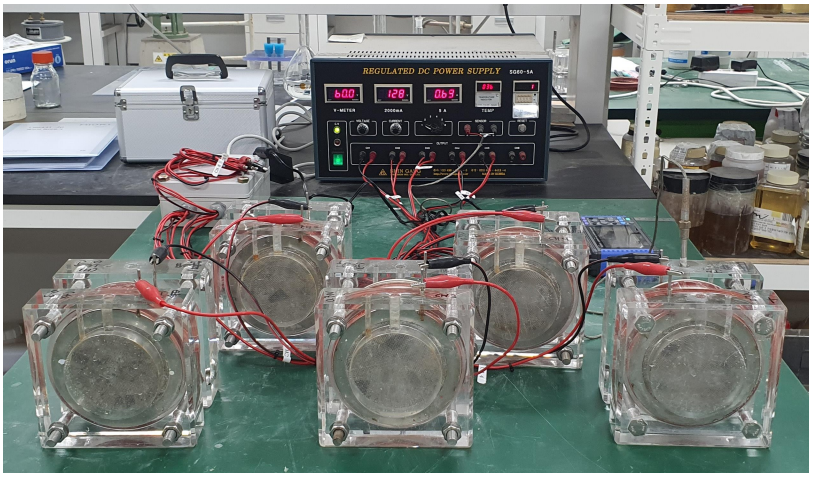


그림 B3-12 염소이온 침투저항성 시험 전경

3) 실험 결과

구성된 셀회로에 기지의 저항(R)을 연결하면 옴의 법칙에 의하여 통과전류를 측정할 수 있다. 측정된 통과전류로부터 통과전하량(Coulombs)을 식 (B3-2)와 같이 계산한다. 이 식은 회로를 통과하는 전류를 시간에 대하여 적분한 값으로 표 B3-5에 의거하여 콘크리트의 염소이온 투과성을 5단계로 평가한다. 표 B3-6에 염소이온 침투저항성 시험 전류(A) 및 전하량(Q) 결과가 시편별로 나타나 있다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \cdots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad \text{(B3-2)}$$

여기에서, Q: 통과 전하량(C)

I_0: 전압을 가한 직후의 전류 (A)

I_t: 전압을 가한 후 t분 경과 후의 전류 (A)

표 B3-5 전하량(Q)에 따른 염소이온 침투성

통과 전하량(C)	염소이온 침투성
>4000	높음
2000 ~ 4000	보통
1000 ~ 2000	낮음
100 ~ 1000	매우낮음
<100	무시할만함

표 B3-6 염소이온 침투저항성 시험 전류(A) 및 전하량(Q) 결과 데이터

(단위: A)

시간 (분)	OPC mortar				WCG mortar				WCG concrete			
	시편 1	시편 2	시편 3	평균	시편 1	시편 2	시편 3	평균	시편 1	시편 2	시편 3	평균
0	0.032	0.032	0.032	0.0320	0.037	0.035	0.037	0.0363	0.031	0.03	0.031	0.0307
30	0.032	0.032	0.032	0.0320	0.037	0.035	0.037	0.0363	0.031	0.031	0.032	0.0313
60	0.032	0.033	0.033	0.0327	0.038	0.036	0.038	0.0373	0.032	0.032	0.032	0.0320
90	0.033	0.033	0.033	0.0330	0.039	0.037	0.038	0.0380	0.032	0.033	0.033	0.0327
120	0.034	0.034	0.033	0.0337	0.04	0.038	0.039	0.0390	0.033	0.034	0.033	0.0333
150	0.034	0.034	0.034	0.0340	0.041	0.039	0.04	0.0400	0.033	0.034	0.034	0.0337
180	0.034	0.034	0.035	0.0343	0.042	0.04	0.041	0.0410	0.034	0.035	0.035	0.0347
210	0.035	0.034	0.035	0.0347	0.042	0.041	0.041	0.0413	0.034	0.036	0.035	0.0350
240	0.035	0.035	0.036	0.0353	0.043	0.041	0.042	0.0420	0.035	0.036	0.036	0.0357
270	0.036	0.036	0.036	0.0360	0.044	0.042	0.043	0.0430	0.035	0.037	0.036	0.0360
300	0.036	0.036	0.037	0.0363	0.045	0.043	0.044	0.0440	0.035	0.038	0.037	0.0367
330	0.037	0.036	0.038	0.0370	0.045	0.043	0.045	0.0443	0.036	0.038	0.038	0.0373
360	0.037	0.036	0.039	0.0373	0.046	0.044	0.046	0.0453	0.036	0.039	0.039	0.0380
전하량 (Coulomb)	742.5	739.8	751.5	744.6	895.5	854.1	881.1	876.9	726.3	753.3	748.8	742.8

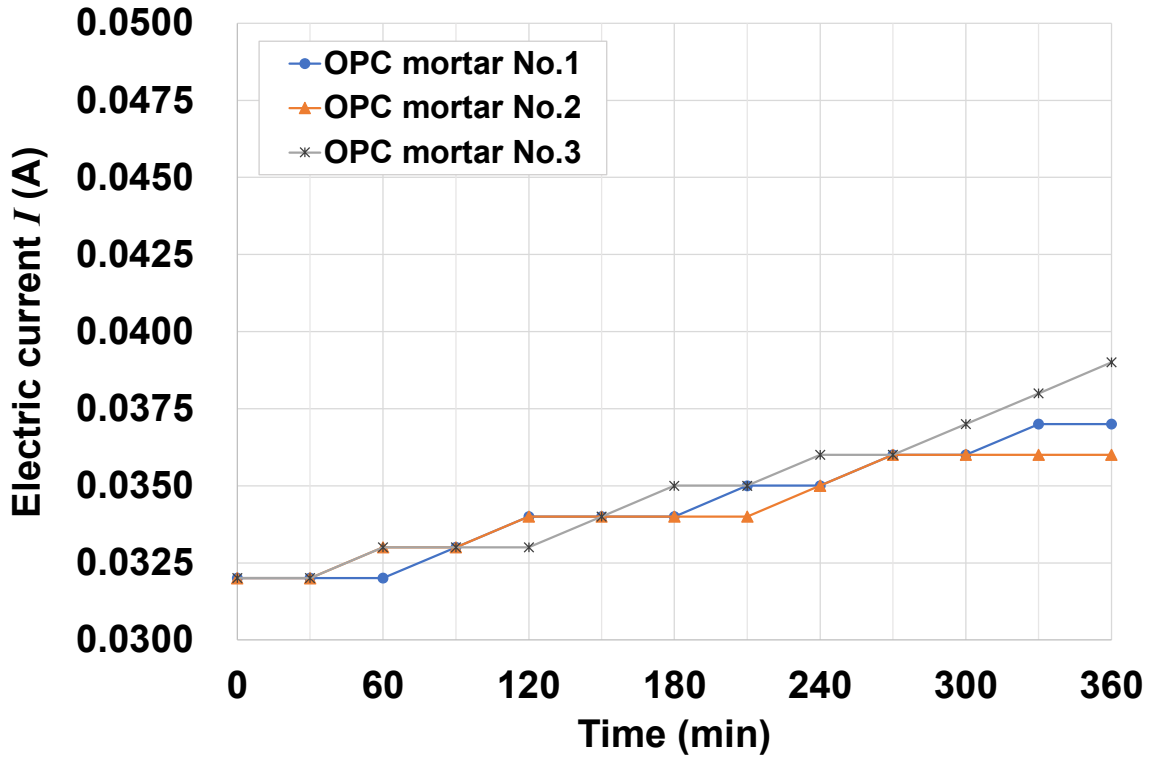


그림 B3-13 OPC mortar의 시간에 따른 전류(A) 변화

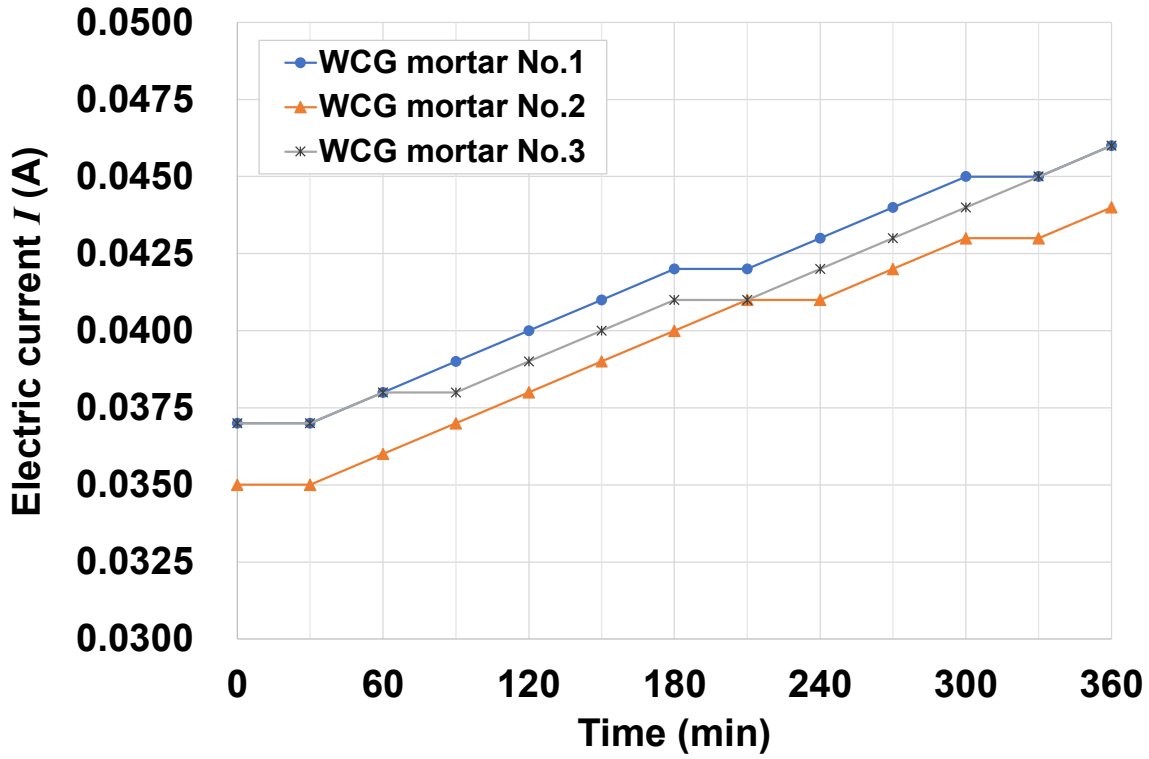


그림 B3-14 WCG mortar의 시간에 따른 전류(A) 변화

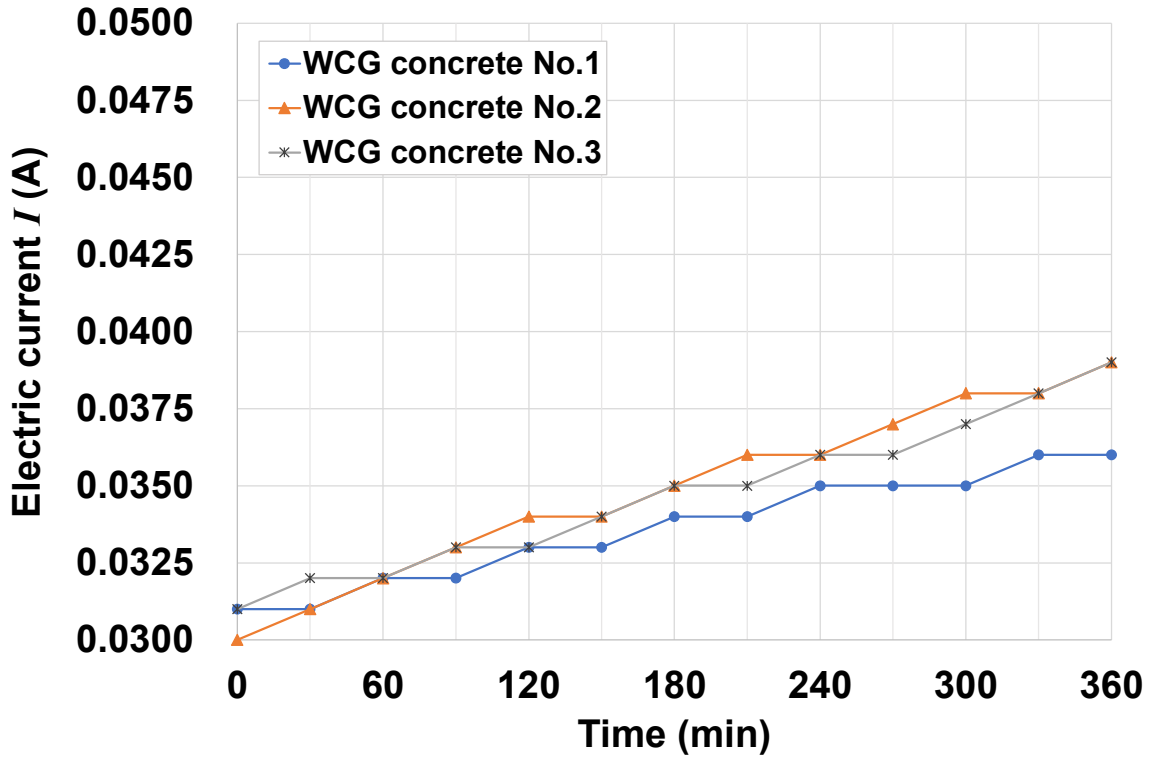


그림 B3-15 WCG concrete의 시간에 따른 전류(A) 변화

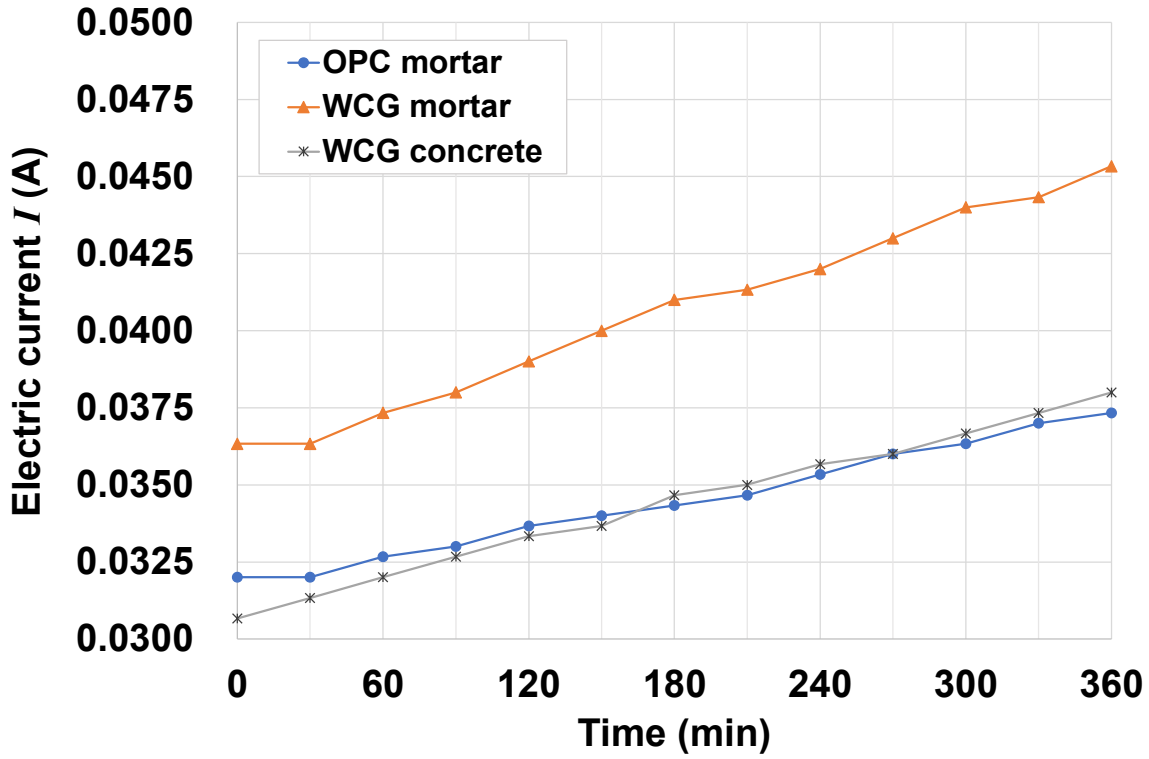


그림 B3-16 배합 변수별 시간에 따른 평균 전류(A) 변화량 비교

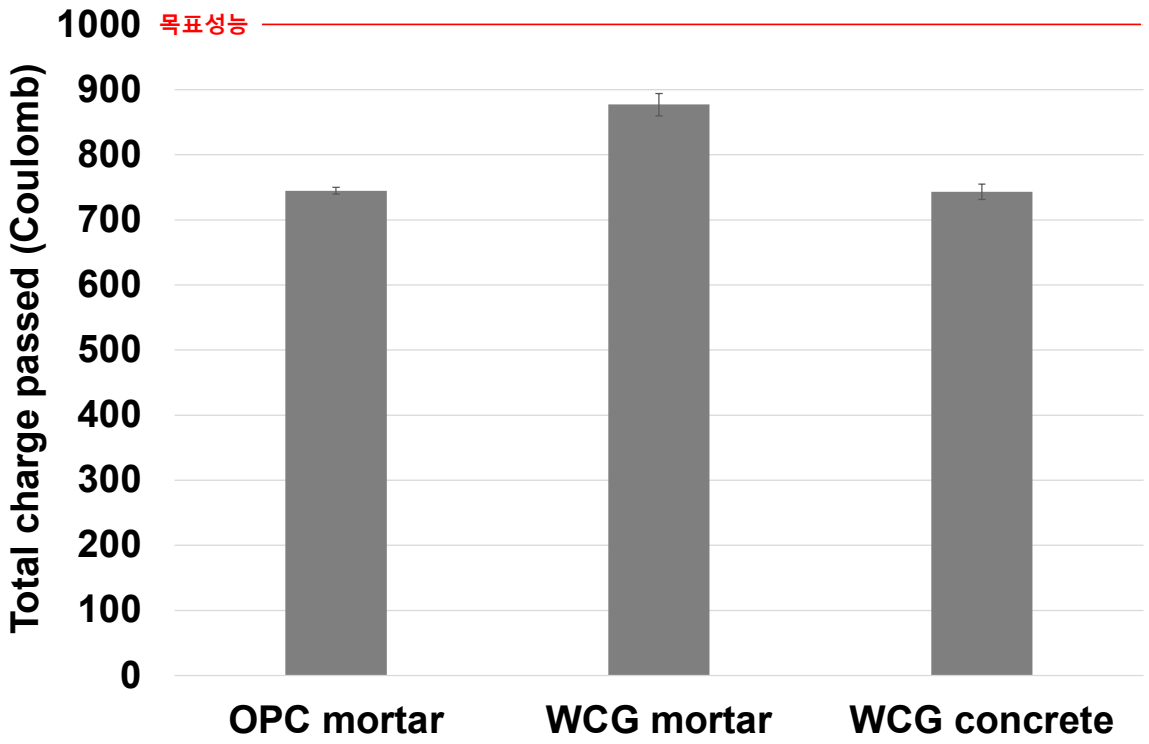


그림 B3-17 배합 변수별 총 통과 전하량(C) 비교

그림 B3-13, B3-14, B3-15에 OPC mortar, WCG mortar, WCG concrete의 시간에 따른 전류(A) 변화를 나타냈다. 각 배합별 시편 3개의 거동이 큰 편차없이 유사하게 나타났다. 그림 B3-16에는 모든 배합에 대한 평균 전류(A) 변화량을 비교하였다. OPC mortar와 WCG concrete를 비교해 볼 때, 두 배합은 거의 유사한 전류 변화량을 보였다. WCG mortar의 경우, 처음부터 다른 배합의 시편보다 더 큰 전류량이 발생하였다. 그 차이는 시간이 지날수록 다소 더 커지는 것으로 나타났다. 그림 B3-17에서 보듯이, 최종적으로 WCG 탄소나노소재 2%를 혼입한 모르타르 시편인 WCG mortar와 콘크리트 시편인 WCG concrete 모두 목표 성능인 통과 전하량 1,000C 이하를 기록하였다. WCG mortar와 WCG concrete의 통과 전하량은 각각 876.9C, 742.8C 이였다.

전반적으로 WCG 탄소나노소재가 혼입된 콘크리트의 경우 도로 포장체로써 요구되는 내구성능, 즉 동결융해 성능, 표면박리저항성, 염소이온 침투저항성 모두 우수한 결과를 보였다. WCG 탄소나노소재가 혼입된 모르타르의 경우, 콘크리트에 비해 내구성능 다소 낮았지만 전반적으로 콘크리트 교면 포장체에 요구되는 내구성능 수준은 만족하는 것으로 나타났다.

단위성과물	B-4	유사환경하 성능 검증	
질적성과지표	①,②	Mock-up Test, 융빙성능	
목표치	제설제 대비 100%	달성치	모르타르 1,470%

1) 개요

동절기 유사환경을 모사하여 WCG-CC 적용 Mock-up Test를 수행하고, 실제 환경하에서 융빙성능을 확인하고자 하였다. 국내에서는 도로 융설/융빙용 전도성 콘크리트에 관한 요구성능 기준이 마련되어있지 않다. 따라서 본 연구에서는 염화칼슘과의 융빙성능을 상대 비교하도록 되어있는 환경표지 인증기준 EL610 '제설제'와 EM502-3 '제설제의 성능 평가-융빙 성능 시험 방법'에 따라 성능을 평가하였다. 기존의 염화칼슘에 의한 제설방법 대체 가능성 확인을 위해 목표 융빙성능을 염화칼슘 대비 100%로 설정하였다.

2) 실험 방법

그림 B4-1에 시멘트 콘크리트 교면 포장의 시스템 구성이 나타나 있다. 일체식 (노출) 교면포장 공법은 30~50mm 두께의 마모층을 추가피복 개념으로 하여 바닥판 시멘트 콘크리트와 동시에 타설함으로써, 마모층을 포함한 상부철근의 피복두께를 최소 90mm 이상 확보하도록 설계한다. 덧씌우기식 교면포장공법은 미리 시공되어 경화된 바닥판의 상면에 별도의 시멘트 콘크리트 교면포장층을 타설하는 것으로 바닥판의 사용수명과 시공성 등을 고려하여 교면포장층의 두께를 조절할 수 있으며 일반적으로 50mm의 두께로 설계하며, 시공 후에 포장두께가 최소 30mm를 확보한다. 즉, 일체식 (노출) 교면포장공법과 덧씌우기식 교면포장공법 모두 콘크리트 포장층의 두께는 30mm 이상으로 한다. 따라서 본 연구에서도 M/U 부재의 두께를 30mm로 설정하였으며, 190mm×190mm의 정사각형 단면을 갖는다. 그림 B4-2에 M/U 부재 상세가 나타나 있다.

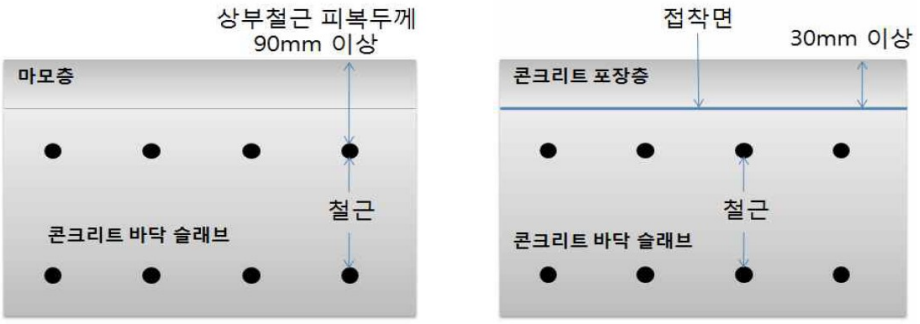


그림 B4-1 교면포장 시스템의 구성

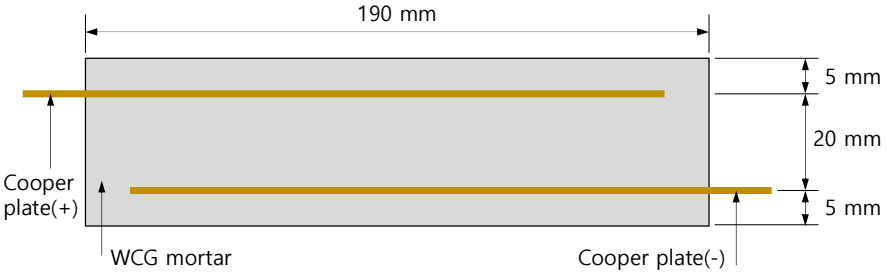


그림 B4-2 Mock-Up 부재 상세

표 B4-1 M/U 부재 배합비

구 분	단위중량 (kg/m³)			WCG (wt.%)	감수제 (wt.%)
	물	OPC	표준사		
WCG mortar	328	782	1182	0.25	0.05

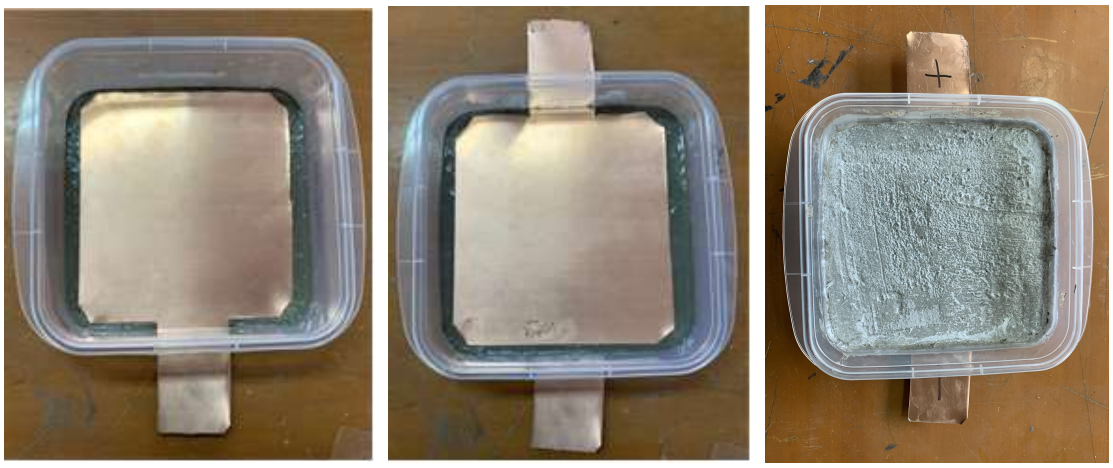
앞선 전기전도성 실험과 발열성능평가 등을 통해 WCG 탄소나노소재 0.25% 수준으로도 융빙성능이 확보될 수 있는 것으로 판단하였으며, 이에 따라 M/U 부재 제작에 사용된 배합비는 표 B4-1과 같다. 배합은 다음과 같은 과정으로 이루어졌다.

① 배합수+고성능감수제+탄소나노소재를 비커에 모두 담은 후 60분 sonication 적용

② 시멘트+표준사 건배합 믹싱 10분(100rpm) (sonication과 같이 종료되도록 준비)

③ sonication 용액을 건배합에 천천히(10초) 부은 후 모르타르 믹싱 8분 (300rpm)

그림 B4-3에 시편 제작 과정이 나타나 있다. 190mm×190mm의 정사각형 플라스틱 용기에 5mm 두께로 WCG mortar을 타설한 후 준비한 구리판을 설치하고, 다시 20mm 두께로 추가 타설 후 구리판을 설치한다. 최종적으로 5mm 두께로 WCG mortar을 타설한 후 면 마감하였다.



(a) 음극 구리판 (b) 양극 구리판 (c) 타설 완료 시편

그림 B4-3 WCG mortar M/U 시편 제작

EM502-3 '제설제의 성능 평가-융빙 성능 시험 방법'에 따라, M/U 시편의 단면적과 동일한 크기의 190mm×190mm 얼음을 5mm 두께로 준비하였다. 얼음을 M/U 시편에 올려둔 후 M/U 시편에 매설된 전극(구리판)을 통해 50V의 전압을 공급하였다. 시험개시 후 15분이 경과하면 즉시 융빙 용액을 주사기를 이용하여 수집하였다. 융빙 용액이 더 이상 흡입되지 않을 때까지 수집하되, 1.5분을 초과하지 않도록 하였다. 수집한 융빙 용액의 부피를 최대한 정밀하게 측정하고 이를 융빙량으로 한다. 이후 융빙 용액을 복귀시키고 30분, 60분이 경과하면 이와 같은 동작을 반복하여 융빙량을 측정하였다. 이 때 외기온도 -2~0℃하에서 실외 실험으로 진행되었다.

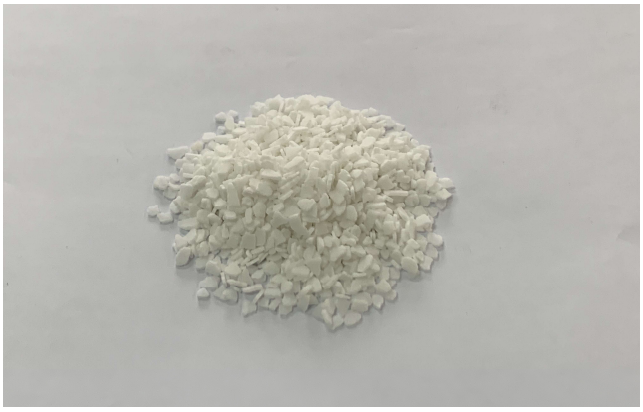


그림 B4-4 염화칼슘

비교군으로는 염화칼슘을 준비하여 융빙량을 비교하였다. EM502-3 '제설제의 성능 평가-융빙 성능 시험 방법'에 따라, 그림 B4-4에서 보는 바와 같이 순도 90% 이상, 입경 2~3 mm의 염화칼슘을 사용하였다. WCG mortar M/U 시편 제작시 사용한 것과 동일한 190mm×190mm의 정사각형 플라스틱 용기에 동일한 물의 양으로 5mm 두께의 얼음을 얼려 준비하였다. 염화칼슘 사용량은 면적 100 ㎠당 1g±0.05g의 비율로써 본 실험에서는 3.61g을 얼음 면에 고르게 살포하였다. 융빙 용액의 측정방법은 M/U 시편과 동일하게 15분, 30분, 60분에 측정하였다. WCG mortar M/U 시편의 융빙 성능은 다음의 식 (B4-1)으로 계산하였다. 그림 B4-5에는 M/U 시험 Set-up이 나타나 있다.

$$P = \frac{V_{WCG}}{V_{as}} \times 100\% \qquad \text{(B4-1)}$$

여기에서, P : 융빙 성능 (%)

V_{WCG} : WCG mortar M/U 시편의 융빙량 (ml)

V_{as} : 기준 물질에 따른 융빙량 (ml)

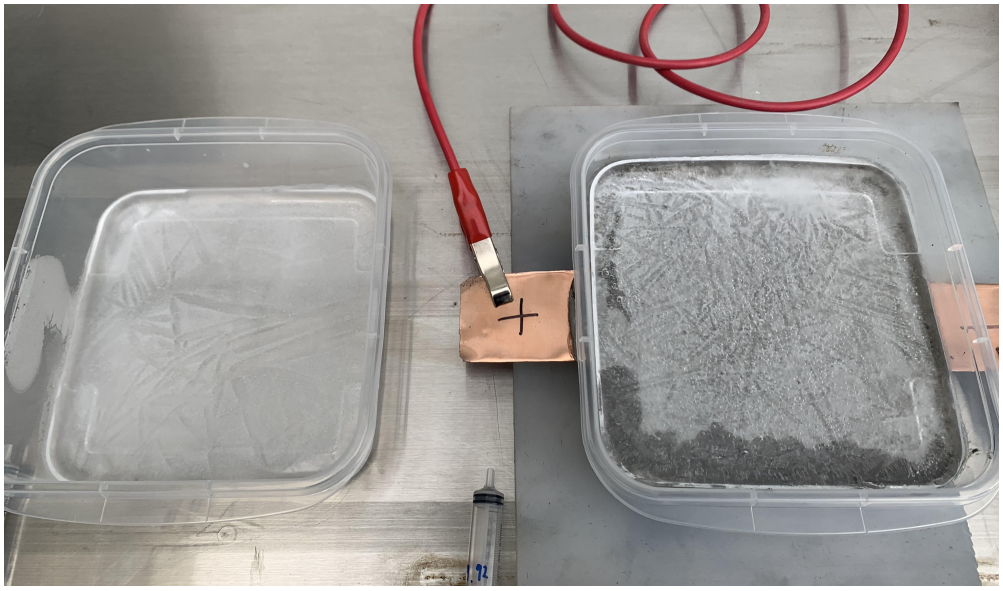
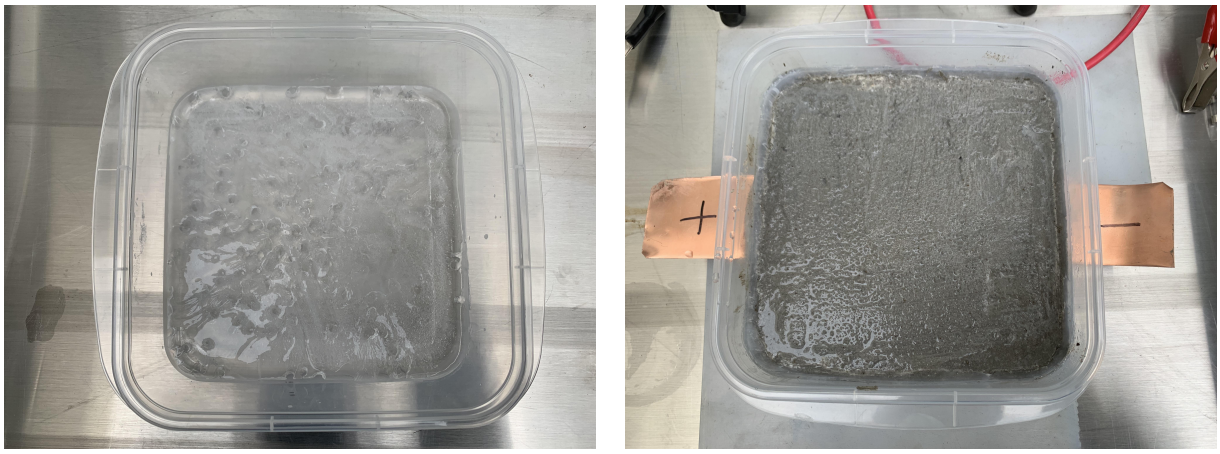


그림 B4-5 Mock-Up 시험 Set-up

3) 실험 결과

그림 B4-6에 실험 종료 후 시편 모습이 나타나 있다. 그림 B4-6(a)는 염화칼슘 살포 후 60분 경과 시점에 융빙된 얼음의 모습이며, 그림 B4-6(b)는 WCG mortar의 발열 시작 후 30분에 얼음이 완전히 융빙된 모습이다. WCG mortar는 시험 시작 후 약 27분경에 얼음이 완전히 융해되어 30분 시점에서 융빙량 측정 후 실험 종료하였다. 표 B4-2에 시간별로 융빙량 데이터가 정리되어 있다. 실험이 종료된 30분 기준으로 볼 때, WCG mortar의 융빙 성능은 1,470% 이다. 주목할 점은, 이미 15분 경과시점에서 2,704%의 융빙 성능을 보일 정도로 WCG mortar의 발열로 인해 상당량의 얼음이 초기 빠른 시간 내에 융해되었다는 것이다. 그림 B4-7은 WCG mortar 시편의 시간별 융빙 모습을 나타낸 것이다. 실험 결과, WCG 탄소나노소재 혼입 시멘트 복합체를 도로 포장에 적용시, 기존의 염화칼슘에 의한 제빙, 제설 방법을 대체할 수 있을 뿐만 아니라 그 성능이 월등히 우수함을 확인하였다.

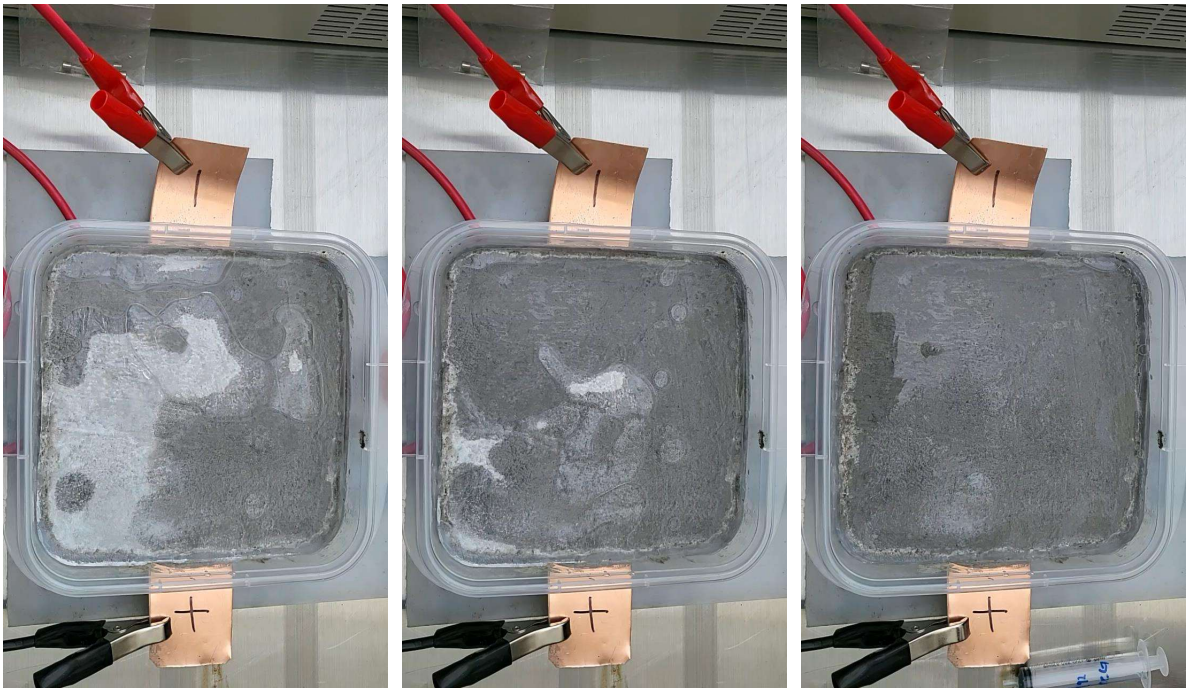


(a) 염화칼슘 살포(60분) (b) WCG mortar 발열 (30분)

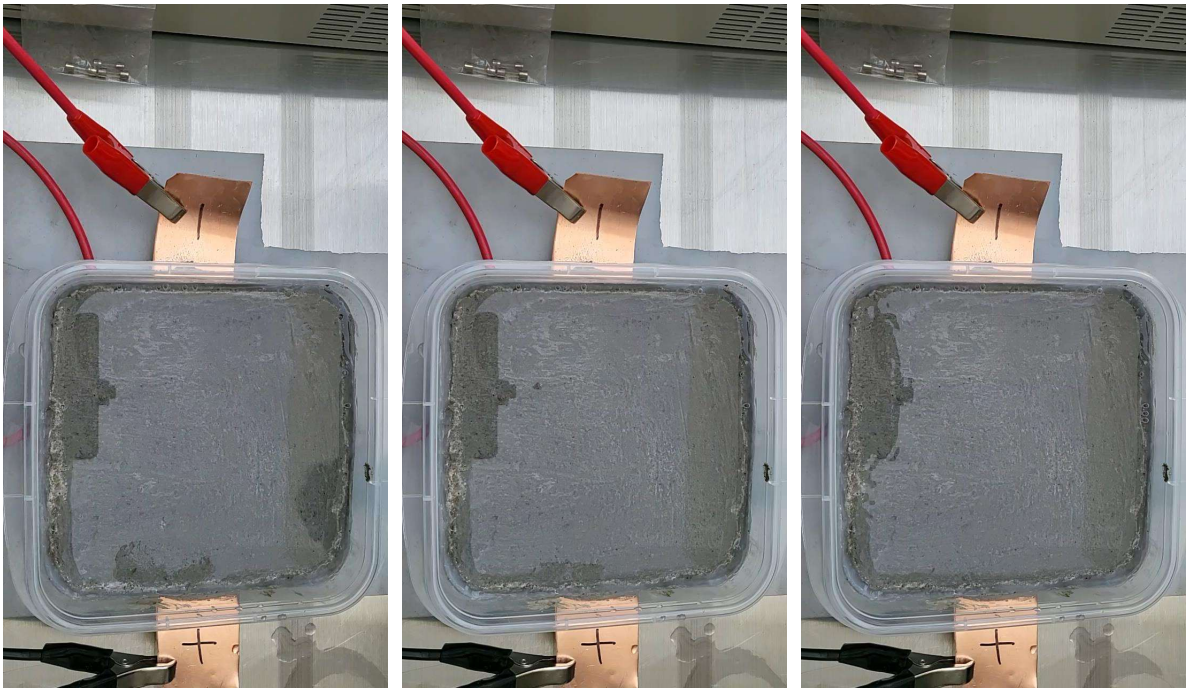
그림 B4-6 융빙성능 시험 종료 후 얼음 상태

표 B4-2 시간별 융빙량 결과

시간(분)	염화칼슘	WCG mortar	
	융빙량 (g)	융빙량 (g)	융빙성능 (%)
15	4.5	121.7	2,704
30	10.2	150.0 (얼음 완전 융빙)	1,470
60	23.0	N/A	N/A



(a) 5분 경과 (b) 10분 경과 (c) 15분 경과



(d) 20분 경과 (e) 25분 경과 (f) 30분 경과

그림 B4-7 WCG mortar 발열 시편의 시간 경과에 따른 융빙 상태 변화

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Ultrahigh Strength and Modulus Graphene-Based Hybrid Carbons with AB-Stacked and Turbostratic Structures	Advanced Functional Materials	Sunghwan Jin	DOI: 10.1002/adfm.202005381	독일	Wiley-VCH GmbH	SCIE	2020.09.	1616-3028	50
2	Fabrication of Eco-Friendly Graphene Nanoplatelet Electrode for Electropolishing and Its Properties	Applied sciences	Junyoung Jeong	11권(7호)	스위스	MDPI	SCIE	2021.04	2076-3417	50
3	Electrical Conductivity and Compressive Strength of Cement Paste with Multiwalled Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets	Applied sciences	Kwang Mo Lim	12(3)	스위스	MDPI	SCIE	2022.01	2076-3417	50
4	Ecofriendly and electrically conductive cementitious composites using melamine-functionalized biochar from waste coffee bean	Cement and Concrete Research	Junyoung Jeong	심사중	네덜란드	Elsevier	SCIE	심사중	0008-8846	50
5	건설재료로 활용 가능한 탄소계열 나노소재 시멘트 복합체의 전기 전도성 분석	한국방재학회논문집	임광모	20권(6호)	국내	한국방재학회	비SCIE	2020.12	1738-2424	100
6	교량 방호벽의 염해 실태 분석 및 구조 안전성 평가	한국방재학회논문집	김국헌	21권(6호)	국내	한국방재학회	비SCIE	2021.12	1738-2424	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2020년도 한국방재학회 학술발표대회	탄소계열 재료를 혼입한 시멘트 복합체의 전도성측정	윤성연	2020.08.20	온라인	국내
2	한국콘크리트학회 2020년도 가을 학술대회	CNT혼입율에 따른 시멘트 복합체의 특성 평가	윤성연	2020.11.02	대구exco	국내
3	한국콘크리트학회 2021년도 봄 학술대회	친환경 탄소나노소재혼입 시멘트복합체의 전도성평가	임광모	2021.05.12	여수엑스포컨벤션센터	국내
4	2021년도 한국방재학회 학술발표대회 논문집	건설재료로 활용가능한 친환경 시멘트 복합체의 성능평가	이주하	2021.09.09	온라인	국내

□ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[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	전도성 시멘트 조성물 및 이의 제조방법	국내	수원대학교산학협력단	2020.10.08.	10-2020-0129945	수원대학교산학협력단	2021.09.10.	10-2303165	100	
2	특허	폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체	국내	수원대학교산학협력단	2021.12.27.	10-2021-0188959	-	-	-	100	

ㅇ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

□ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

□ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

□ 표준화

ㅇ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

ㅇ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

□ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획				
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수 출				

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

□ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	학위취득 (졸업예정포함)	2020.4 ~2021.12		5	1		6		6				

□ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	포상	표창장	행정안전부장관 표창	이주하	2020.10.30	행정안전부
2	포상	표창장	대한토목학회 회장 표창	이주하	2020.12.31	대한토목학회

[인프라 성과]

□ 연구시설・장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설・장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설・장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

<참고 1> 연구개발성과 실적 증빙자료 예시

성과유형	첨부자료 예시
연구논문	논문 사본(저자, 초록, 사사표기를 확인할 수 있는 부분 포함, 연구개발과제별 중복 첨부 불가)
지식재산권	지식재산권 등록증(또는 출원서) 사본(발명인, 발명의 명칭, 연구개발과제 출처 포함)
제품개발(시제품)	제품개발사진 등 시제품 개발 관련 증빙자료
기술이전	기술이전 계약서, 기술실시 계약서, 기술료 입금 내역서 등
사업화 (상품출시, 공정개발)	사업화된 제품사진, 매출액 증빙서류(세금계산서, 납품계약서 등 매출 확인가능 내부 회계자료) 등

<참고 2> 「국가연구개발혁신법」 시행령 제33조 제4항 및 별표 4에 따른 연구개발성과의 등록・기탁 대상과 범위

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설・장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상(부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설・장비 또는 공동활용이 가능한 모든 연구시설・장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열・발현정보 등 유전체정보, 서열・구조・상호작용 등 단백체정보, 유전자(DNA)칩・단백질칩 등 발현체정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보(소관 기술위원회를 포함한 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함)
기탁	생명자원 중 생물자원	세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물자원, 인간 또는 동물의 세포・수정란 등 동물자원, 식물세포・종자 등 식물자원, DNA, RNA, 플라스미드 등 유전체자원 및 그 밖의 생물자원
	화합물	합성 또는 천연물에서 추출한 유기화합물 및 관련 정보
	신품종	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신품종 및 관련 정보

2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체 (WCG-CC) 개발	● 폐 커피분말(WCG) 바이오매스 기반 탄소 나노 소재 개발 - 폐 커피분말의 고온 열처리를 통한 전도성 탄소물질 제조 ● 폐 커피분말 기반 전도성 나노소재의 시멘트 복합체 적용 기법 개발 - 멜라민을 이용한 WCG 탄소나노소재의 비공유 기능기화 성공 - 세계 최초 WCG 탄소나노소재 보강 전도성 시멘트 복합체 (WCG-CC) 개발 ● 폐 커피분말 추출 탄소 나노 소재 보강 전도성 시멘트 복합체의 기본 배합비 및 기본 성능 확보 - WCG 탄소나노소재 보강 전도성 시멘트 복합체의 Percolation zone 도출 - KCS '시멘트콘크리트 포장공사'의 기본 요구성능 확보	100
도로 결빙 방지용 WCG-CC 적용 도로 포장 기술 개발	● WCG-CC의 도로 포장체 기능 확보 - WCG-CC의 도로 포장체 역학적 성능 목표 초과 달성 목표치/달성치: 압축강도 30㎫ / 39.9㎫ 휨강도 4.5㎫ / 5.8㎫, 접착강도 1.4㎫ / 3.5㎫ - WCG-CC의 도로 포장체 내구 성능 목표 초과 달성 목표치/달성치: 동결융해저항성 80% / 88% 표면박리저항성 Rating 1 / Rating 1 염소이온침투저항성 1000c / 743C ● WCG-CC의 도로 결빙 방지 성능 확보 - WCG-CC의 발열 성능 목표 초과 달성 목표치/달성치: 발열성능 0.025 ㎡℃/W / 0.0264 ㎡℃/W - 동절기 유사 환경 하 융빙 성능 확보 목표치/달성치: 제설제 대비 100% / 1,470%	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○ SCI 논문 실적 미달
- 당초 계획은 SCI 논문 3건이 목표였으나, 현재 기여율 50%의 SCI 논문 3편이 게재되었음
- 내구성능 실험의 장기간 소요 및 동절기 유사환경하 실험을 위한 2차년도 연구기간 종료시점(겨울철)에 실험진행 등으로 데이터 획득의 지연이 논문투고 지연으로 연결됨
- 연구결과에 대한 자부심으로 좀 더 좋은 저널에 투고하였으나 심사 결과 소요기간이 타 저널에 비해 오래 걸리는 단점이 있음 (Cement and Concrete Research 심사 중).

2) 자체 보완활동

○ 현재 폐커피분말 추출 탄소나노소재 개발에 관한 SCI 논문 1편이 투고되어 심사 중에 있음
○ SCI 논문 추가 작성 및 투고 (SCI 논문 최소 2편 이상 추가 투고 가능)
- WCG-CC의 실험결과 중 내구성 실험 결과 관련
- WCG-CC의 발열성능 및 융빙성능 관련 실험 결과

3) 연구개발 과정의 성실성

○ 게재된 SCI 논문 중 하나는 Impact Factor 16.836의 'Advanced Functional Materials'에 게재되어 대외적으로 성과의 우수성을 인정받았으며, 현재 심사 중인 논문은 IF 10.933의 Construction & Building Technology 분야 Ranking 2위의 저널인 'Cement and Concrete Research'에 투고하였음.
○ 본 연구는 실험적 연구가 주를 이뤄 연구진들이 연구기간 내내 밤낮없이 성실히 실험에 매달렸다. 다량의 폐커피분말에 대해 탄화과정을 반복하며 최적의 탄소나노소재 개발에 성공하였으며, 멜라민을 이용한 비공유 기능기화 과정의 실험 특성상 밤샘 실험도 다수였다. 또한, 1차년도 중간평가시 심사위원의 의견을 실험변수에 반영하였으며, WCG-CC의 발열성능 및 융빙성능, 역학적 성능 등 다양한 실험을 수행하여 당초 계획목표를 달성하였다. 특히 WCG-CC의 융빙성능 평가를 위한 동절기 환경하 실험을 위해, 겨울철 영하 온도가 가능한 12월말 연구기간 종료시점까지도 실험이 진행되었다. 연구종료 후에도 WCG-CC의 장기 재령별 전기전도성, 발열성능, 융빙성능을 지속적으로 관찰하여 부족한 SCI 논문성과를 도출할 예정이다.

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 세계 최초 폐 커피분말 추출 탄소나노소재 보강 전도성 시멘트 복합체 개발
- 폐 커피분말을 이용하여 바이오 탄소소재로 변환하는 기술은 화학 및 소재 분야에서 발표된 바 있으나, 이를 활용하여 건설재료로써 전도성 시멘트 복합체에 응용하는 기술은 본 연구가 세계 최초 개발함. 관련 연구 및 기술 발전의 초석이 될 수 있는 연구자료 제공 가능

○ 폐 커피분말 산업폐기물 저감을 위한 친환경 기술
- 산업폐기물인 커피분말은 2018년도 기준 약 15만톤에 달하여 대부분 매립 처리함
- 폐커피분말을 단순 건조시켜 콘크리트 배합시 혼합 사용하는 연구가 일부 있지만, 초기 연구 단계이며 콘크리트 물성 저하 현상 발생함
- 본 연구를 통해 폐 커피분말 산업폐기물의 활용처 다양화에 기여하며, 이를 통해 점진적인 폐기물 감소 효과 기대됨

○ 도로 융설/융빙 기술을 통한 교통 안전 향상 및 유지관리비용 절감
- 동절기 도로의 블랙아이스로 인한 교통 사고 등을 미연에 방지할 수 있는 기술로써 국민의 생명과 재산을 지키는 교통 안전 기술임
- 염화칼슘과 같은 제설/제빙제를 대체하여 도로 포장의 사용수명 향상 및 유지관리비용 절감

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

1) 연구 개발 성과의 활용 방안

(1) 콘크리트 포장 결빙/블랙아이스 예방 대책 기술의 현장 적용

- 서울시설공단 교량 방호벽 관련 유지관리 기술 적용 협의

- 한국도로공사 등 관계 부처 협조를 통한 현장 적용
  ↳ 도로처: 콘크리트 포장도로의 결빙/블랙아이스 대책 수립 시 개발 기술 적용
  ↳ 건설처: 콘크리트 포장 시공 시 본 과제 성과물 전도성 시멘트복합체 적용
  ↳ 도로교통연구원: 도로 결빙/블랙아이스 예방 자체연구 시 본 연구과제 성과 활용

- 국가 도로 및 교량의 유지관리 담당부서 협조를 통한 현장 적용
  ↳ 도로 결빙/블랙아이스 집중발생구역에 적용하기 위한 방안 마련
  ↳ 동절기 사고다발지역에서의 사고예방 대책기술 적용



그림 6.1 융빙용 콘크리트 적용 및 운영사례, 미국 Nebraska, Spur Bridge



(a) 미 연방항공청 FAA 공항 (b) Helsinki 공항

그림 6.2 융빙용 콘크리트 시범 적용 및 연구 사례

(2) 탄소 나노 신소재 및 전도성 건설 재료 관련 분야 산업에 적용

- 폐 커피분말 산업폐기물의 재활용 산업에 활용
- 폐 커피분말 기반 탄소 나노소재를 활용한 연료전지 산업 분야
- 자가 센싱, 철근방식 등 다양한 전도성 콘크리트 활용 분야에 적용
- 전도성 시멘트 복합체를 활용한 ESS(Energy Storage System)분야에 적용 가능
- 기존의 탄소계열 나노소재보다 경제적이며 사용성이 우수한 소재의 개발을 통해 관련 연구 분야의 활성화를 도모하며, 실용화 기술개발에 기여



Waste coffee grounds recycling
산업폐기물 커피분말 재활용으로 막대한 양의 폐기물 감소



Energy Storage Pavement
도로 포장에 적용하여 대용량의 에너지 저장장치로 활용



Biomass fuel cell
폐 커피분말 바이오매스를 활용한 탄소 연료전지 구동



Energy Storage System
태양광, 태양열, 풍력 등의 신재생 에너지 저장 및 전기 공급



Self-sensing
구조물 균열, 처짐 등 추가 센서 없이 자가 모니터링 가능



Corrosion Protection
철근부식방지를 통한 구조물 유지보수비용 절감 및 수명 극대화

그림 6.3 폐 커피분말 나노소재의 다양한 활용처

(3) 향후 연구성과의 실용화를 위해 보완 연구되어야 할 사항

- 폐 커피분말 추출 탄소나노소재의 대량 생산 기술 개발
- 폐 커피분말 원재료 대비 탄소나노소재 추출양의 극대화를 통한 생산 수율 향상
- 현재 전기전도성 수준 (10^{-6}~10^{-5} S/cm) 향상을 통한 저전압 하 발열성능 극대화
- 폐 커피분말 추출 탄소나노소재를 혼입한 시멘트 모르타르의 일부 내구성능 향상을 위한 배합비 최적화
- 폐 커피분말 원재료 품질관리방안 마련
- 폐 커피분말 원재료 품질에 따른 탄소나노소재 특성 상관성 규명

2) 기대 효과

(1) 기술적 측면

○ 시멘트 복합체의 전도성 부여를 위한 폐 커피분말 나노소재의 개발

- 기존의 탄소계열 나노소재를 대체할 수 있는 소재의 개발로 전도성 시멘트 관련 기술 발전

○ 전도성 시멘트 복합체를 적용한 도로의 유지관리 기술 발전 도모 및 데이터 축적

- 전도성 시멘트 복합체를 적용한 도로 융빙용 포장기술 개발로 해당 분야의 기술 발전 및 관련 연구 분야의 활성화 도모로 산학연 관심 고취

○ 선진국 수준의 기술력 확보

- 국내 동절기 도로 환경을 고려한 기술 개발로 국내 기술자립도 향상 및 국가 기술경쟁력의 선진국 수준 제고

(2) 경제적·산업적 측면

○ 기존의 도로 융설/융빙 기술과 비교하여 비용절감 가능

- 현행 인력/장비를 통한 기술보다 융설/융빙을 간편하고 경제적으로 수행 가능

○ 교량 및 도로 등의 콘크리트 포장 유지관리비용 절감

- 본 기술 적용으로 염화칼슘 제설제로 인한 구조물 열화, 주변 식생에 미치는 악영향 감소로 유지관리비용의 절감

○ 동절기 사고발생률 감소로 차량 파손 등 재산 피해 예방

- 도로의 결빙/블랙아이스에 의한 차량 파손 등 국민의 직접적인 재산 피해 예방 가능

○ 교통 장애, 개인별 경제활동 손실 등의 사회적 비용 절감

- 제설작업으로 인한 교통체증 등 경제활동에 장애를 초래하는 요소의 발생을 미연에 방지

(3) 사회적 측면

○ 국민의 생명 안전 보호

- 동절기 도로의 결빙/블랙아이스로 인해 발생하는 대형사고 발생률이 증가하고 있으나, 기술의 적용으로 사고를 사전에 예방하며 국민의 생명 안전 보호 및 교통안전 확보

○ 도로 주행성 향상으로 교통안전에 대한 불안감 해소

- 동절기 고속도로 주행 시 미끄러짐 사고에 대한 불안감 해소

○ 도로 주변 식생의 보호에 의한 환경보호

- 염화칼슘계열 제설제가 주변 식생에 미치는 악영향을 사전에 방지하며 환경보호 가능

○ 도로 포장의 사용수명 향상

- 염화칼슘계 제설제의 사용량 감소로 콘크리트의 내구성을 확보하여 도로의 사용수명 향상

○ 도로 포장 보수보강 시장 확대 및 관련 산업 활성화

- 개발 기술을 활용한 도로 포장 관련 보수보강 시장 확대 및 관련 산업 활성화

○ 해외 도로 건설시장의 전략적 기술수출 및 수주경쟁력 강화

- 높은 적설량의 영향을 받는 해외 도로 건설시장에 전략적 기술수출 및 수주경쟁력 강화

7. 참고 문헌

1. 국토교통부 KCS 44 50 15 시멘트콘크리트 포장공사, 2016
2. Hansaem Jang, Joey D. Ocon, Seunghwa Lee, Jae Kwang Lee, Jaeyoung Lee, Direct power generation from waste coffee grounds in a biomass fuel cell, Journal of Power Sources, Volume 296, 2015, 433-439
3. Ji Hyun Um, Yunok Kim, Chi-Yeong Ahn, Jinsoo Kim, Yung-Eun Sung, Yong-Hun Cho, Seung-Soo Kim, and Won-Sub Yoon, Biomass Waste, Coffee Grounds-derived Carbon for Lithium Storage, Journal of Electrochemical Science and Technology, 2018, 9(3), 163-168
4. Chatwarin Poochai, Assadawoot Srikhaow, Jaruwit Lohitkarn, Tanaporn Kongthong, Sorawit Tuantranont, Sirirada Tuantranont, Vitsarut Primpray, Nattida Maeboonruan, Anurat Wisitsoraat, Chakrit Sriprachuabwong, Waste coffee grounds derived nanoporous carbon incorporated with carbon nanotubes composites for electrochemical double-layer capacitors in organic electrolyte, Journal of Energy Storage, Volume 43, 2021, 103169, https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103169.
5. Mohammad Saberian, Jie Li, Anita Donnoli, Ethan Bonderenko, Paolo Oliva, Bailey Gill, Simon Lockrey, Rafat Siddique, Recycling of spent coffee grounds in construction materials: A review, Journal of Cleaner Production, Volume 289, 2021, 125837, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125837.
6. Lin, Y.; Du, H. Graphene reinforced cement composites: A review. Constr. Build. Mater. 2020, 265, 120312. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120312
7. Raki, L.; Beaudoin, J.; Alizadeh, R.; Makar, J.; Sato, T. Cement and concrete nanoscience and nanotechnology. Materials 2010, 3, 918-942. https://doi.org/10.3390/ma3020918
8. Assi, L.; Alsalman, A.; Bianco, D.; Ziehl, P.; El-Khatib, J.; Bayat, M.; Hussein, F.H. Multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) dispersion & mechanical effects in OPC mortar & paste: A review. J. Build. Eng. 2021, 43, 102512, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102512
9. Jiang, Z.; Sevim, O.; Ozbulut, O.E. Mechanical properties of graphene nanoplatelets-reinforced concrete prepared with different dispersion techniques. Constr. Build. Mater. 2021, 303, 124472. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124472
10. S. Ponte, The `Latte Revolution' Regulation, Markets and Consumption in the Global Coffee Chain, World Dev. 30 (2002) 1099-1122. https://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00032-3.
11. N. Reddy, Y. Yang, Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications, Trends Biotechnol. 23 (2005) 22-27. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.11.002.
12. B. Glaser, K. Wiedner, S. Seelig, H. Schmidt, H. Gerber, Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers, Agron. Sustain. Dev. 35 (2015) 667-678. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0251-4.
13. E. Marris, Putting the carbon back: Black is the new green, Nature. 442 (2006) 624-626. https://doi.org/10.1038/442624a.
14. J.L. Smith, H.P. Collins, V.L. Bailey, The effect of young biochar on soil respiration, Soil Biol. Biochem. 42 (2010) 2345-2347. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.013.
15. B. Glaser, M. Parr, C. Braun, G. Kopolo, Biochar is carbon negative, Nat. Geosci. 2 (2009) 2-2. https://doi.org/10.1038/ngeo395.
16. B. Sajjadi, W. Chen, N.O. Egiebor, A comprehensive review on physical activation of biochar for energy and environmental applications, Rev. Chem. Eng. 35 (2019) 735-776. https://doi.org/10.1515/revce-2017-0113.
17. M. Giorcelli, M. Bartoli, Development of coffee biochar filler for the production of electrical conductive reinforced Plastic , Plast. Polym. (Basel). 11 (2019) 1916. https://doi.org/10.3390/polym11121916.

< 별첨 >

별첨 자료
1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

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.