

20CTAP
-C1520
28-02

탄산화
유도를
통한 대기
중 CO₂
저감형
OLED
페유리
혼입
콘크리트
개발 및
시제품
제작

최
종
보
고
서

2021
국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()발간등록번호(11-B552989-000368-01)
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 20CTAP-C152028-02

탄산화 유도를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 페유리 혼입 콘크리트 개발 및 시제품제작 최종보고서

2021. 03. 03.

주관연구기관 / 금오공과대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

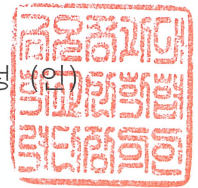
국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

‘탄산화 유도를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 폐유리 혼입 콘크리트 개발 및 시제품 제작’
(연구개발 기간 : 2019. 04. 15.~ 2020. 12. 31.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2020. 03. 03.

주관연구기관명 : 금오공과대학교 산학협력단

김 동 성 (인)



주관연구기관책임자: 장 일 영

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	1615011162	해당 단계 연구 기간	2020.04.15.~ 20 20.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	-			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	탄산화 유도를 통한 대기 중 CO ₂ 저감형 OLED 폐유리 혼입 콘크리트 개발 및 시제품 제작			
연구책임자	장 일 영	해당단계 참여연구원 수	총: 6 명 내부: 6 명 외부: 0 명	해당단계 연구비	정부: 200,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 200,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 7 명 내부: 7 명 외부: 0 명	총 연구비	정부: 360,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 360,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	금오공과대학교 산학협력단			-	
국제공동연구	-			-	
위탁연구	-			-	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안등급은 일반으로, 국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제24조4의1항에 의거 보안과제로 분류할 근거가 부족하여 일반과제로 결정함.
----------------------	---

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신제품	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

요약

1차년도 : 탄산화를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발

- XRF, BET 등을 활용한 OLED 폐유리 분말의 물리화학적 특성 평가
- OLED 혼입 시멘트를 활용한 페이스트 시편의 탄산화 저항성 평가
- XRD, TGA, SEM을 활용한 OLED 혼입 시멘트의 CO₂흡수 능력 평가

2차년도 : CO₂ 저감형 OLED 혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출 및 시제품 제작

- 압축강도, 휨강도 및 MIP 실험을 통한 OLED콘크리트의 기초물성 평가
- OLED 콘크리트의 내구성능 평가를 위한 탄산화 깊이측정 및 염화물 침투 실험
- OLED 콘크리트의 경제성 분석을 위한 전생애주기 관점 CO₂ 발생-흡수량 산정
- OLED 혼입 프리캐스트 콘크리트 시제품 제작 및 성능테스트

보고서 면수

84

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 최종 목표 : 탄산화 유도를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 콘크리트 개발 및 시제품 제작 - 1차년도 : 탄산화를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발 - 2차년도 : CO₂ 저감형 OLED 혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출 및 시제품 제작 ○ 탄산화를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발 - OLED 분말의 물리화학적 특성 평가 - 탄산화 조건 산정 및 수화물 조성에 따른 탄산화 영향성 정량 분석 - 탄산화를 통한 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 CO₂ 흡수량 산정 ○ CO₂ 저감형 OLED 혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출 및 시제품 제작 - OLED 혼입 콘크리트의 배합설계 도출 및 이에 따른 기초물성 및 내구성 평가 - OLED 혼입 콘크리트의 프리캐스트 시제품 제작 및 성능 평가 - 콘크리트 구조물 전생애주기 관점에서의 CO₂ 저감 효과 및 이에 따른 경제성 분석				
연구개발성과	○ 탄산화를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발 ○ CO₂ 저감형 OLED 혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출 ○ OLED 혼입 프리캐스트 콘크리트 시제품 제작				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ OLED 혼입에 따른 수화물 조성 변화 유도 및 이에 따른 CO₂ 흡수 능력 증대 ○ 국내·외 논문게재 및 학술발표를 통한 이론적 검증 및 특허 출원을 통한 기술력 확보 ○ 콘크리트 표면 마감 처리 개선에 따른 CO₂ 흡수 효과 상향 ○ 웅벽 등의 시제품 제작 및 기초 물성 및 CO₂ 흡수 능력 평가를 통한 현장적용성 제고				
국문핵심어 (5개 이내)	유기발광다이오드	탄산화	CO ₂ 흡수	콘크리트	
영문핵심어 (5개 이내)	OLED	Carbonation	CO ₂ adsorption	Concrete	

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

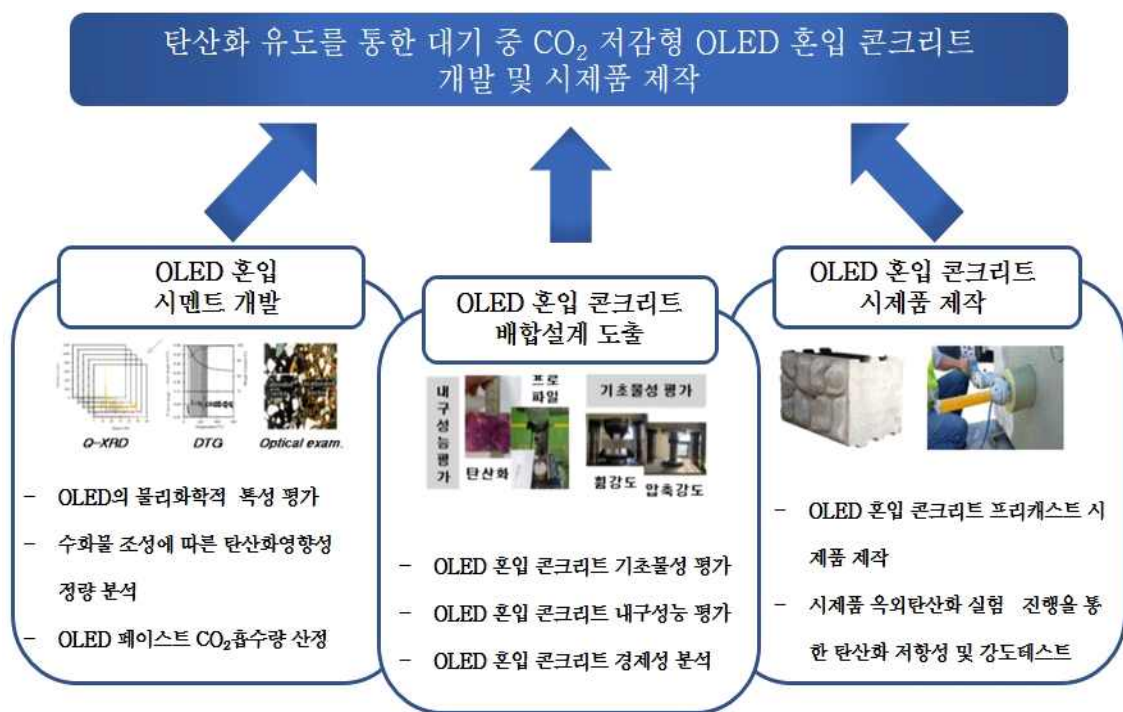
1. 연구개발과제의 개요	5
2. 연구수행내용 및 성과	13
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	78
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	80
붙임. 참고 문헌	82

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

본 연구의 최종목표는 ‘탄산화 유도를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 콘크리트 개발 및 시제품 제작’이며, OLED 폐유리 분말을 시멘트 대체제로 적용하여 포졸란 반응을 극대화 시키며 반응의 생성물로 하여금 대기중의 CO₂와 반응하게 하여 콘크리트 내부에 CO₂를 고정시켜 대기 중 농도를 감소시키는 것을 목적으로 한다. 이를 달성하기 위한 세부 핵심 연구 목표 [그림 1.1]과 같다.



[그림 1.1] 최종 연구 목표에 대한 모식도

○ 탄산화를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발

- OLED 분말의 물리화학적 특성 평가
- 탄산화 조건 산정 및 수화물 조성에 따른 탄산화 영향성 정량 분석
- 탄산화를 통한 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 CO₂ 흡수량 산정

○ CO₂ 저감형 OLED 혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출 및 시제품 제작

- OLED 혼입에 콘크리트의 배합설계 도출 및 이에 따른 기초물성 및 내구성 평가
- OLED 혼입 콘크리트의 프리캐스트 시제품 제작 및 성능 평가
- 콘크리트 구조물 전생애주기 관점에서의 CO₂ 저감 효과 및 이에 따른 경제성 분석

나. 연구개발의 필요성

(1) 유기 발광 다이오드(OLED) 폐유리의 재활용

- 산업통상자원부가 선정한 13대 주력품목 중 하나인 디스플레이는 전후방 연관효과가 기대되는 기술력 기반의 장치산업으로, 특히 차세대 디스플레이 OLED는 [그림 1.2], [그림 1.3]에 나타난 바와 같이 엄청난 성장 잠재력을 가지고 있음.
- 하지만, 해당 산업부산물인 폐유리의 재활용 및 유효활용은 개인·기업이 아닌 정부차원에서 해결해야 할 문제로 파리에서 개최된 제21차 유엔기후변화협약 (COP21)에 따라 2030년 온실가스 배출전망치 대비 약 2억 1,900만 톤의 CO₂ 감축이 필요한 실정임.
- 한편, 2013년 기준 국내 전체 폐유리 발생량은 약 65만 톤으로 이 중 75.6%만 재활용 되는 실정이며, 재활용 기술은 대부분 유리병에 의존하고 있어 다양한 종류의 폐유리 재활용 기술 확보가 필요함.
- 또한, 최근 OLED 디스플레이 산업이 발전함에 따라 OLED 폐유리의 발생량이 증가하는 추세이며 현재 전량 폐기(매립 또는 소각) 과정에서 다량의 CO₂가 발생할 것으로 예상됨.
- 따라서, 국내에서 발생된 OLED 폐유리의 재활용 기술 개발을 통해 폐기량을 줄임으로써 CO₂ 발생량을 감소시킬 것으로 기대됨.



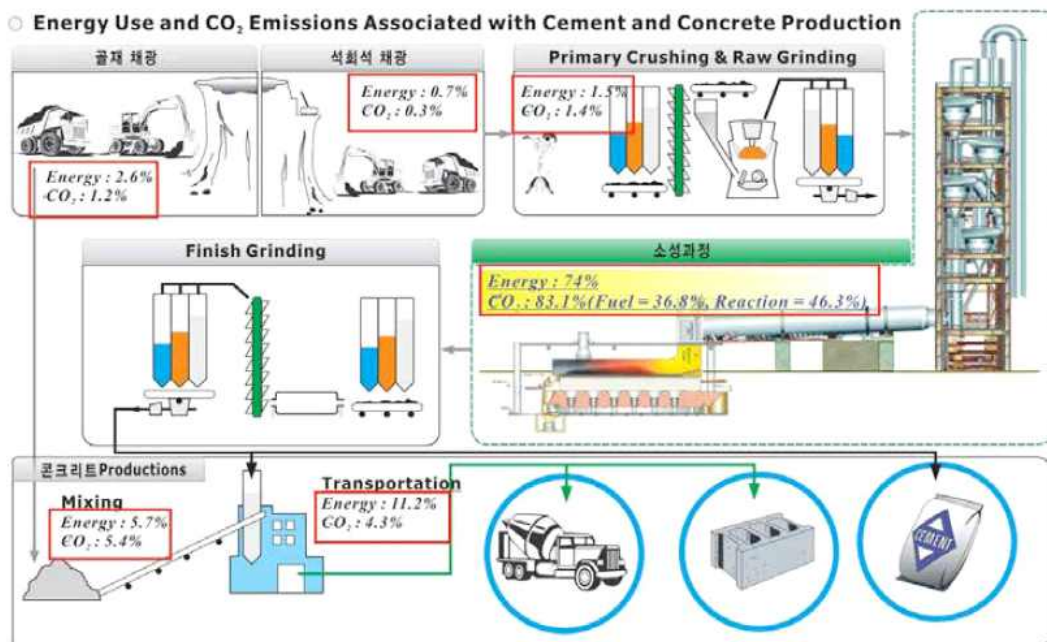
[그림 1.2] OLED 시장 전망 (한국디스플레이산업협회, 2018)



[그림 1.3] OLED 공급 능력 지속 확대 전망 (한국디스플레이산업협회, 2018)

(2) 건설 산업에서의 CO₂ 저감 필요성 대두

- 국내 전체 CO₂ 발생량에서 건설 분야는 38%를 차지하고 있으며, 이 중 시멘트 산업에서 연간 약 4,460만 톤의 CO₂를 배출하고 있어 이를 해결하기 위한 건설재료 및 활용 기술 개발이 시급한 실정임.
- CO₂ 저감 기술은 공공성이 큰 기반기술로서 정부 주도로 기술개발을 수행하여 민간으로 기술 전파가 필요하며 친환경 건설 소재·재료 시장은 전 세계적으로 크게 증가하고 있어 해외시장에서 기술 선점을 위한 집중적인 기술 개발 투자가 필요함.
- 건설 산업에서 중요한 재료인 시멘트 산업에서 CO₂ 배출량의 7%(연간 약 4,460만 톤 배출)를 차지할 정도임 따라서 건설 분야에서 CO₂를 획기적으로 줄이기 위해서는 혁신적인 CO₂ 저감 건설소재 및 시공 개발이 시급한 상황임.
- [그림 1.4]의 시멘트 생산과정에서 시멘트 1,000 kg 당 평균 830 kg의 CO₂가 발생하며 이 중 약 67% 가량이 석회석의 탈탄산화 공정에서 배출되지만, 이러한 시멘트는 건설 산업의 핵심 소재이므로 이외 과정에서의 CO₂ 저감 대책이 필요함.



[그림 1.4] 건설 산업에서의 CO₂ 배출 및 에너지 소비 (CO₂ 저감 스마트 건설소재 및 활용 개발 기획 연구, 2017)

(3) 시멘트 혼화재로써의 OLED 폐유리

- 콘크리트에 산업부산물을 혼화재로 적용할 경우 시멘트 사용량 저감에 의한 CO₂ 발생량 저감효과, 산업폐기물의 처리에 발생하는 비용, CO₂ 및 환경오염을 저감하는 등의 다양한 효과를 가져갈 수 있음.
- 전 세계적으로 방대한 양이 발생하는 폐유리 또한 시멘트 혼화재로 활용하기 위한 노력이 끊임없이 이어지고 있으며, 시멘트 혼화재로의 적용이 가능하다고 판단될 경우 다량의 폐유리를 효과적으로 소비할 수 있음.
- 표. 1과 같이 다양한 종류의 폐유리는 높은 SiO₂성분을 가지고 있으므로 SiO₂와 시멘트의 수화 생성물인 Ca(OH)₂와의 반응인 포졸란반응이 기대되며, 포졸란 반응은 겔을 형성하여 콘크리트 내부를 밀실하게 채움으로써 압축강도 및 내구성의 상승을 기대할 수 있음.
- 하지만 대부분의 폐유리는 알칼리 물질인 Na와 K를 포함하기 때문에 콘크리트에 적용되었을 때 알칼리-골재 반응을 일으켜 콘크리트 균열을 생성하므로 내구성 하락을 유발함.
- LCD 폐유리와 OLED 폐유리는 미량의 알칼리 물질만을 포함하므로 알칼리-골재반응에 의한 내구성 하락을 유발하지 않으며, 포졸란 반응의 이점만을 취할 수 있음.
- 시멘트 혼화재로의 규정이 없는 폐유리는 품질을 정의하기가 까다로움. 하지만 폐유리와 물리·화학적 성질이 유사한 포졸란계 재료인 플라이애시의 경우 미국재료시험협회(American Society for Testing and Materials; ASTM)에서 다음과 같은 규정에 의해 플라이애시의 품질을 결정함.
- 규정에서 화학성분만을 고려했을 때, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃의 함량이 70%이상이고 SO₃ 3%이하의 값을 가져야하며, 상기의 규정으로 LCD와 OLED의 성분을 비교하면 다음과 같음.
- SO₃의 경우 모두 포함하고 있지 않으며, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃의 함량은 LCD가 64%, OLED가 75%로 나타났으므로 포졸란계 시멘트 혼화재로의 적합성은 OLED 유리가 더욱 뛰어난 것으로 판단됨.

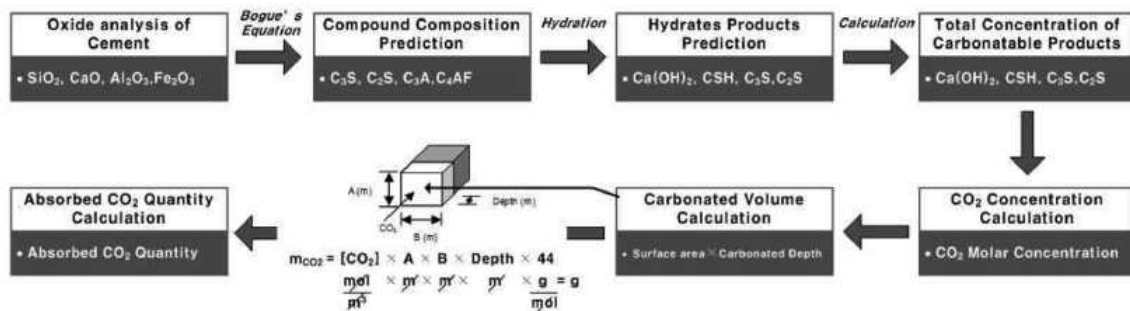
[표 1.1] 다양한 폐유리의 화학성분 조성(%)

	Bottle glass	Plate glass	CRT glass	LCD glass	OLED glass
SiO ₂	71.5	72.9	70.4	49.6	55.9
Al ₂ O ₃	1.5	1.1	1.1	14.2	19.0
Fe ₂ O ₃	0.9	0.2	0.1	0.2	0.1
Na ₂ O	4.2	7.0	8.0	0.37	0.3
K ₂ O	1.8	0.6	7.3	0.1	—
CaO	17.8	14.9	0.6	12.9	6.9
B ₂ O ₃	—	—	0.1	11.3	—
BaO	—	—	10.2	1.0	11.8
MgO	—	—	—	0.4	2.3
SrO	—	—	—	9.2	3.4
Other	2.3	3.3	2.2	0.7	0.3

(4) 콘크리트 탄산화를 통한 CO₂ 흡수 및 흡수량 계산

- 콘크리트는 공용 기간 중 필연적으로 CO₂와 반응하는 탄산화 과정을 통해 탄산칼슘(CaCO₃)을 생성하는데, 이로 인해 대기 중의 CO₂ 저감효과를 나타냄.
- CO₂흡수 시멘트 개발 및 활용 기술에 대한 국내연구는 아직 시작단계이기 때문에 국내 업체의 보유기술이나, 구체적인 연구 결과가 없음.
- 콘크리트 구조물의 공용기간이 길거나 대기에 면한 콘크리트 표면적이 증가할수록 사용에 따른 이산화탄소 배출량 대비 흡수량을 증가시킬 수 있으며 그 양은 80년 사용시 약 5.18%로 평가됨.
- 콘크리트 사용에 따른 이산화탄소 배출량 대비 흡수량의 개선을 위해 콘크리트 배합에 사용되는 시멘트를 대신하여 이산화탄소와 반응성이 높은 고로슬래그나 플라이애시와 같은 혼화재를 치환한 연구결과가 보고됨.
- 국내 연구에 따르면, 콘크리트 구조물의 공용 기간 및 노출된 콘크리트 표면적은 CO₂ 흡수량과 비례적인 관계를 가지며, 그 양은 콘크리트 내 수화물 조성에 따라 상이하므로 클링커 조성을 달리하여 CO₂ 흡수 능력을 조절할 수 있을 것으로 예상됨.

- 또한, 기존 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 흡수량 계산은 사용된 시멘트계 재료의 산화물 조성을 바탕으로 계산하였으나 이는 산화물 조성에 따른 클링커 및 생성 가능한 수화물을 산정하는 방식이므로 실제 흡수량과는 차이가 발생함.
- 이를 보완하기 위해 [그림 1.5]와 같이 수화물 조성을 정량적으로 판단하고 탄산화 가능 화합물의 몰농도를 계산하여 보다 정밀한 CO₂ 흡수량을 산정 하였지만 이마저도 실제 실험에 의해 얻어진 수화물 정량화 값이 아니므로, 더 현실적이고 구체적인 CO₂ 흡수량 계산이 필요하다고 판단됨.



[그림 1.5] 탄산화 과정에서 CO₂ 흡수량 산정 프로세스 (콘크리트의 탄산화 관점에서 CO₂ 배출량-흡수량 평가에 관한 연구, 2009)

다. 연구개발의 범위

1차년도 연구 개발 범위

탄산화를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발 (국립금오공과대학교)

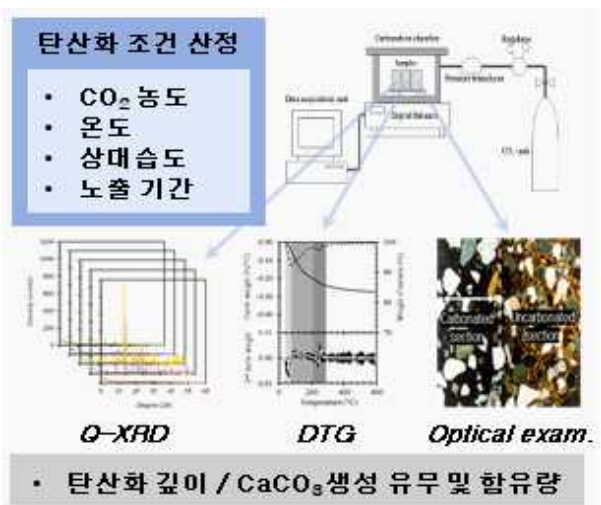
1. OLED 분말의 물리화학적 특성 평가

- OLED 혼입 시멘트의 수화 영향인자로써 OLED 분말의 화학 조성, 입자형태, 밀도, 비표면적 등을 사전 평가함.
- 특히, OLED 분말의 화학 조성은 폐유리 계열 미분말과 마찬가지로 높은 SiO₂ 함량으로 인해 시멘트 수화에서 다량의 C-S-H 겔 형성이 예상됨.
- 이러한 C-S-H 겔의 형성은 고강도, 고내구성 콘크리트 제작을 가능케하며, 더 나아가 탄산칼슘 (CaCO₃) 형성에 큰 역할을 할 것으로 기대됨.



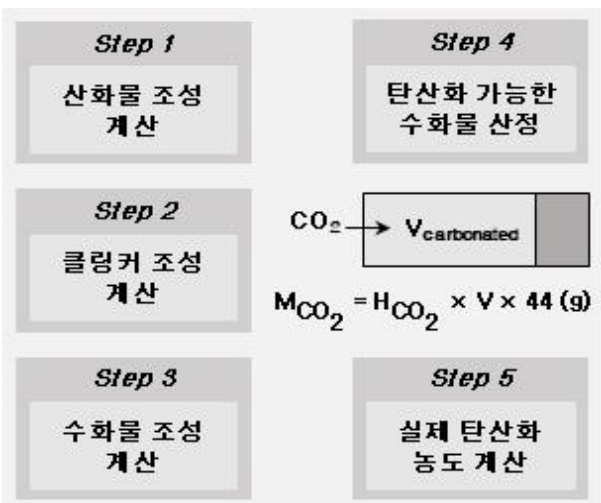
2. 탄산화 조건 선정 및 수화물 조성에 따른 탄산화 영향성 정량 분석

- 실제 환경을 모사한 탄산화 촉진 시험 변수 설정을 통해 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이, 속도 및 이로 인한 CaCO₃ 생성량을 정성/정량 분석함.
- 또한, 기존 측정 방법의 한계를 극복하기 위해 X선 분석 및 열중량 분석을 적용하여 탄산화 전/후 수화물 조성의 대조분석 (Cross-check)을 통해 분석 결과의 신뢰도를 제고함.



3. 탄산화를 통한 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 CO₂ 흡수량 산정

- 대기 중 CO₂와 반응 전/후 화학반응식 내 질량보존의 법칙을 근거로 OLED 치환율에 따른 CO₂ 흡수량을 계산함.
- 이 때, 기존의 보그식 (Bogue's equation)에 의거 산화물 조성에 따른 클링커 함량 도출이 아닌 실제 리트벨트법 (Rietveld method)을 적용한 X선 분석을 통해 클링커 및 수화물 조성을 정량화하여 기존 CO₂ 흡수량 계산식의 한계를 극복함.

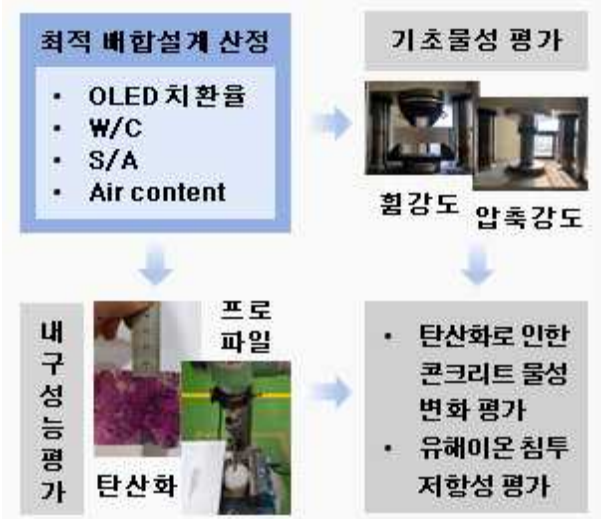


2차년도 연구개발 범위

CO₂ 저감형 OLED 혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출 및 시제품 제작 (국립금오공과대학교)

1. OLED 혼입 콘크리트의 배합설계 도출 및 이에 따른 기초물성 및 내구성 평가

- OLED 혼입에 따른 굳지 않은 콘크리트 (슬럼프 및 공기량) 시험을 통해 시공성이 확보된 콘크리트의 최적 배합설계를 도출함.
- 또한, 제작된 콘크리트의 탄산화 전/후 기초 물성 변화를 평가하여 CO₂ 저감 효과와 함께 기초물성에 대한 검증을 실시함.
- 뿐만 아니라 실제 탄산화가 발생 가능한 환경에서의 열화를 유발하는 유해이온의 침투 저항성에 대해 평가함.



2. OLED 혼입 콘크리트의 프리캐스트 시제품 제작 및 성능 평가

- 도출된 배합설계에 따라 제작된 OLED 혼입 콘크리트의 프리캐스트 시제품을 일정기간 옥외 폭로 후 샘플을 채취하여 탄산화 깊이, 속도 등 실험실 분위기의 결과와 비교 분석함.
- 또한, 시제품 제작 시 콘크리트 노출 면적을 늘리는 등의 표면 처리를 통해 탄산화를 극대화하여 CO₂ 흡수 효율을 제고함.



3. 콘크리트 구조물 전생애주기 관점에서의 CO₂ 저감 효과 및 이에 따른 경제성 분석

- 이산화탄소 배출권 거래제 (Cap & Trade)에 근거하여 콘크리트 생산부터 해체까지의 CO₂ 생산/흡수·제거되는 양을 산정 후 이에 따른 경제성 분석을 실시함.
- 이 때, 본 연구에서 도출된 결과 이외에 필요한 정보는 기존의 국·내외 관련 문헌 조사를 통해 해당 데이터베이스를 구축함.
- 또한, 콘크리트 탄산화를 통한 CO₂ 제거 이외 개발된 기술과의 비교 분석을 실시함.



2. 연구수행내용 및 성과

가. 탄산화를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발

(1) OLED 분말 물리·화학적 특성 평가

(가) 연구 목적

건설분야에서 콘크리트는 오랜 기간 동안 사용되어 인류와 문명의 엄청난 발전에 기여한 재료이다. 하지만 탄소배출량이 많은 시멘트산업은 최근 탄소배출규제, 환경 오염등과 같은 문제에 직면하여 달갑지 않은 시선을 받는 실정이다. 또한, 현재 각광 받는 OLED(Organic Light Emitting Diode, 유기발광다이오드) 디스플레이는 생산 과정에서 필연적으로 폐유리를 발생하게 되지만 마땅한 처리방법이 없어 매립, 소각 되어 막대한 환경부하를 가져온다.

이에 본 연구에서는 OLED 폐유리 분말을 시멘트 대체재로 활용하여 시멘트의 사용량 감소와 OLED 폐유리 재활용을 통한 직접적 CO₂ 저감 효과와 폐유리와 시멘트 수화물과의 포졸란반응을 촉진하여 반응의 산물인 C-S-H gel의 탄산화 반응을 통한 간접적 CO₂ 감소효과를 확보하고자 한다. 시멘트 대체재로의 OLED 폐유리 분말 적용성을 검토하기 위한 과정의 일환으로 분말의 물리·화학적 특성을 다양한 실험을 통해 평가하였다.

(나) 연구 내용

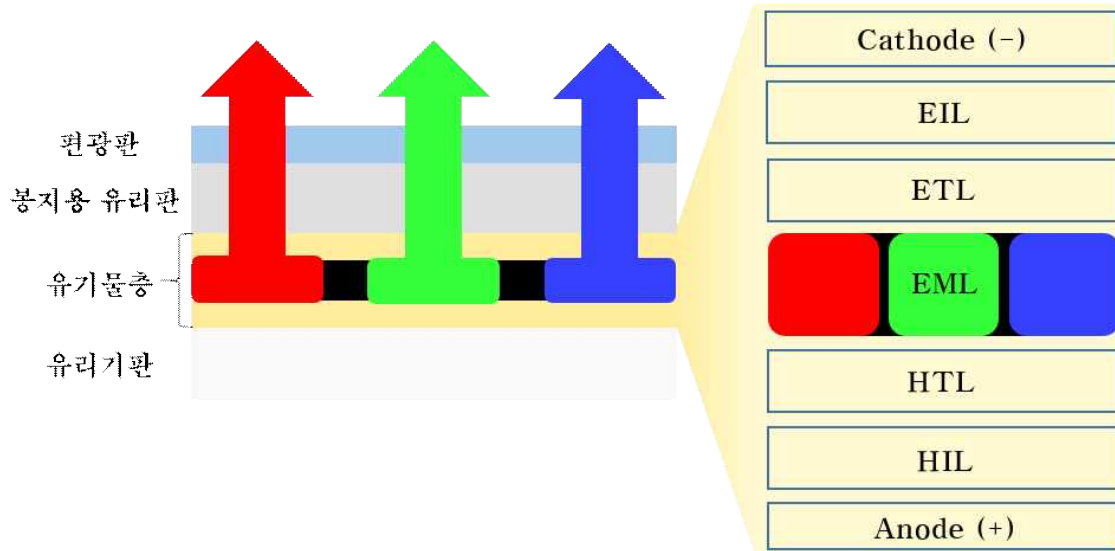
① OLED 분말

OLED는 유기물을 사용한 자체발광 디스플레이로 현재 가장 널리 사용되고 있는 LCD에 비해 빠른 응답속도, 넓은 시야각 및 얇은 두께 구현 등 차세대 디스플레이로서 적합한 특성을 가진다. OLED 시장은 2017-2020년 기간 중 연평균 29.9% 수준의 높은 성장률을 나타내고 있으며, 2017년 기준 한국이 전체 OLED의 96.6%를 공급하는 등 시장을 선도하고 있다(산업동향보고서).

OLED 패널의 구성은 [그림 2.1]과 같이 이루어져 있다. 기본적으로 OLED가 자체적으로 만드는 빛은 전자와 전공이 만나 발생시키는 에너지로부터 비롯된다. 즉, 유기물 층에서 EIL과 ETL은 전자를 운반하고 HTL과 HIL은 전공을 운반하여 EML(발광층)에서 만나 빛을 발생시키게 된다.

본 연구에서는 상대적으로 불순물 및 유해이온이 적게 함유된 가장아래층에 위치한

유리 기판(Substrate)을 사용하였다. 유리 기판은 아주 얇고 평평한 형태이며 기판의 거칠기, 투명도, 내화학성, 수분침투성 및 열팽창 계수 등 여러 가지 특성을 엄격한 품질관리를 통해 제어하여 생산한다.



[그림 2.1] OLED 디스플레이 구조

유리 기판은 생산 효율성등을 고려해 커다란 크기를 그대로 제조 공정에 투입하게 되고 이 후 적용될 디스플레이의 크기에 맞춰 재단되어 사용된다. 재단되는 과정에서 불가피하게 자투리나 불량 기판이 발생하게 되어 버려지게 된다. 이때 발생된 폐유리는 비교적 순도가 높고 불순물의 유입이 적어 일관된 품질의 확보가 가능하며 [그림 2.2]와 같은 일련의 과정을 거쳐 미분화 하게 된다.



폐유리 수집 및 운반

볼밀을 활용한 미분쇄

사일로 저장

[그림 2.2] OLED 디스플레이 구조

우선 OLED 제조 공정 중에 발생한 OLED 폐유리는 수집되어 미분쇄 설비가 갖춰진 곳으로 운반된다. 이후 해머크래셔와 원뿔형 볼밀을 이용하여 미분화의 과정을 거친다. 해당 미분말은 사일로에 보관되며 필요에 따라 배출하여 사용하게 된다.

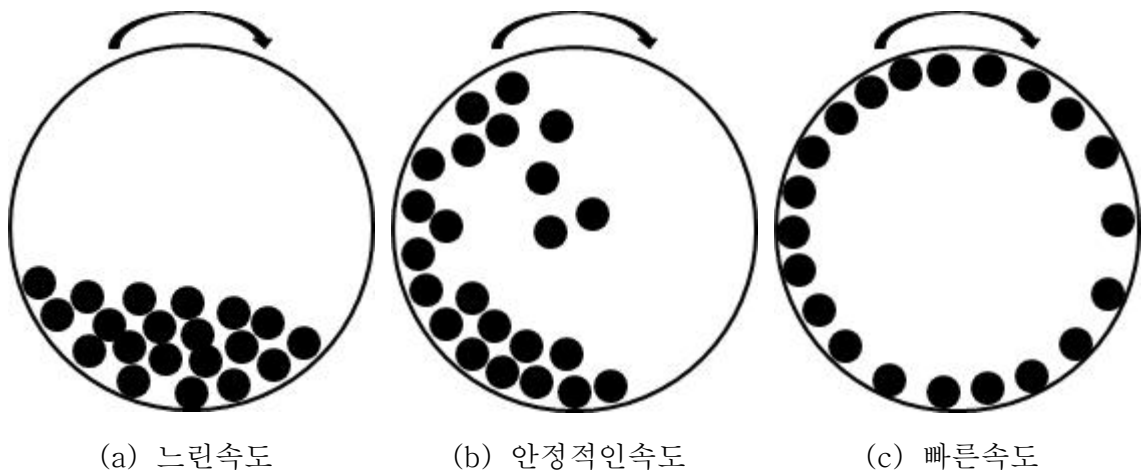
본 연구에서는 분쇄장비로 가장 널리 사용되고 있으며, 비교적 저렴한 투자비용으로 양산이 가능한 볼밀을 사용하였다. 볼밀은 금속 실린더와 볼로 구성되고 실린더가 회전 할 때 실린더에 투입된 볼과 분쇄대상이 마찰과 충격에 의해 점차 잘게 분쇄되는 원리를 이용한 장비이다. 볼밀의 작동효율은 실린더의 회전속도, 볼의 량, 볼의 크기, 분쇄대상재료의 투입량 및 분쇄시간에 따라 달라진다.

볼밀의 회전속도에 따라 실린더 내부의 볼은 [그림 2.3]와 같이 세 가지 상태를 가지게 된다. (a)의 경우 볼밀의 회전속도가 너무 느린 경우 원심력의 작용이 약해 볼이 높이 올라가지 못하고 미끄러지는 상태로 투입재료의 교반효과가 없고 볼의 낙하가 없어 분쇄가 일어나지 않는다. (b)의 경우 적절한 회전속도에 의해 발생한 원심력에 의해 일정 높이까지 볼이 올라간 후에 낙하하여 재료를 충격 하게 된다. 볼과 재료사이에서 선삭작용과 상호 마찰이 발생하여 혼합 및 분쇄 효율이 높은 상태이다. (c)의 경우 회전속도가 과도하여 실린더 벽에 볼이 붙어 낙하운동을 하지 않아 재료의 교반이나 분쇄효과를 나타내기 어렵다. 볼이 낙하운동이 가능한 볼밀의 속도는 [식 2.1]을 이용하여 도출 할 수 있다.

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_m}} \quad \text{[식 2.1]}$$

여기서, N_c : 회전밀의 임계속도 (RPM)

D_m : 회전밀의 유효내경(m)



[그림 2.3] 볼밀 회전속도에 따른 볼의 상태

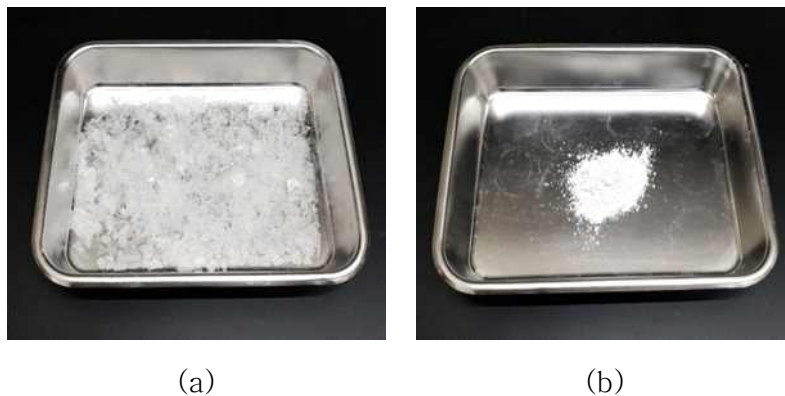
실린더 내의 볼의 양은 계산식에 의해 이론적으로 도출 될 수 있지만, 측정이 어려운 마찰계수 항을 포함하므로 경험적으로 결정되기도 한다. 일반적인 상황에서 볼은

실린더 체적의 40%~50%정도를 충전하여 사용하며, 충전량이 30%미만인 경우 볼은 미끄러지는 상태가 되기 쉬우며 분쇄의 효율이 떨어진다. 또한, 충전량이 50%이상인 경우 회전 중심부의 볼이 관성모멘트가 너무 작아 분쇄의 효율이 떨어진다.

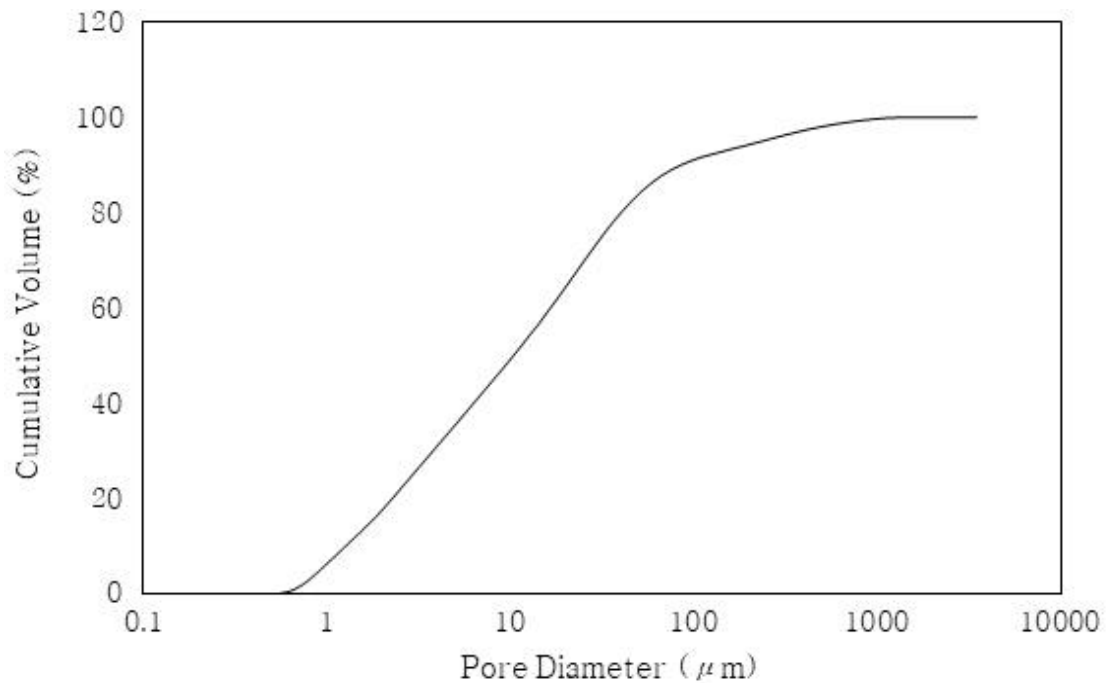
분쇄는 볼의 표면이 재료와 마찰하면서 발생하기 때문에 볼 직경이 감소함에 따라 분쇄 효율이 상승한다. 하지만 과도하게 볼이 작은 경우 충분한 낙하에너지를 확보하기 어려우며 분쇄된 재료의 배출에 어려움이 따르기 때문에 5~15mm 정도의 볼이 일반적으로 사용된다.

충전량은 일반적으로 볼과 투입재료의 비율로 판단한다. 대체적으로 볼의 비율이 높을수록 분쇄의 효율이 높아지지만 생산성이 감소하기 때문에 적절한 충전량을 결정하는 것이 중요하다. 보통 재료무게의 2~5배의 범위에서 볼을 투입하며 재료를 충전했을 때, 볼의 높이 이상으로 올라오지 않는 것이 이상적이다.

본 연구에서는 건식방법을 사용하였으므로 분쇄 전에 OLED 폐유리를 건조하는 과정을 우선적으로 진행되었고 볼밀의 회전속도는 200 RPM으로 하였다. 분쇄용 볼은 스테인리스 재질로써 3~12mm 직경으로 볼밀 체적의 60%까지 투입하였으며, OLED 폐유리는 소량씩 투입하여 분쇄용 볼 사이사이에 충분히 충전 되도록 투입하였다. 20시간의 볼밀 가동을 통해 평균입경 $10\mu\text{m}$ 이하의 미분말을 확보하였다. [그림 2.4]은 OLED 폐유리의 분쇄 전과 후를 나타낸 사진이며 분쇄 과정을 거친 미분말의 입경분포는 [그림 2.5]와 같다. 이후 혼화재료써의 사용성 검증을 위해 물리·화학적 특성평가를 진행 하였다.



[그림 2.4] OLED 폐유리 미분쇄 전(a)과 후(b)



[그림 2.5] OLED 페유리 미분말의 누적 입경분포 곡선

② 산화물 조성

OPC 및 OLED 페유리 분말의 산화물 조성을 파악하기 위해 KS L 5222에 의거하여 x선 형광분석(X-ray fluorescence)을 실시하였으며, 그 결과 값을 [표 2.1]에 나타내었다. OPC의 경우 CaO 함량이 70% 가장 높았으며, 뒤를 이어 SiO₂, Fe₂O₃ 및 Al₂O₃ 순서로 나타났다. OLED의 경우 SiO₂ 함량이 55.9%로 가장 높았으며 Al₂O₃ 및 BaO 등의 성분이 높은 함량을 나타냈다.

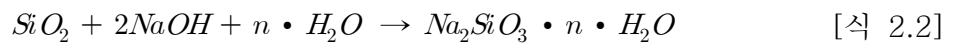
[표 2.1] OPC 및 OLED의 산화물 조성

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	BaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SrO	Na ₂ O
OPC	15.6	3.4	70.0	—	4.4	2.7	0.1	0.1
OLED	55.9	19.0	6.9	11.8	0.1	2.3	2.3	3.4
	K ₂ O	SO ₃	SnO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	NiO	ZnO
OPC	1.7	1.4	—	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
OLED	—	—	0.3	—	—	—	—	—

중금속은 OLED 페유리와 같은 산업부산물을 재활용하는데 상당한 제약을 가져오는 성분이다. 중금속이 환경에 배출되면 생물권을 순화하면서 먹이연쇄에 따라 인간

에까지 이동해 오며 미량이라도 체내에 축적되면 잘 배설되지 않고 우리 몸속의 단백질에 쌓여 장기간에 걸쳐 부작용을 나타낸다. 일반적으로 산업부산물의 중금속용출 중금속 위험도평가는 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 비소(As), 수은(Hg) 및 크롬(Cr)을 대상으로 이루어진다. 중금속 용출은 미국의 음용수 자재 시험법 ANSI 61-2007a에 따라 평가된다. 본연구의 사용된 OLED 폐유리 미분말의 경우 XRF 분석 결과에서 앞서 언급된 유해 중금속이 검출되지 않았으므로 환경 유해성은 우려되지 않으나 추후 연구에서 OLED 폐유리 미분말을 대상으로 ANSI 61-2007a에 따라 중금속 용출 시험을 진행할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 실제 콘크리트 구조물 적용을 고려하여 시편 제작 후 장기간 폭로기간 동안 유해 중금속 용출 모니터링을 통해 사용성 검증을 진행해야할 것으로 사료된다.

한편, 일반적인 폐유리는 [표 2.2]와 같이 높은 실리카성분과 알칼리성분을 함유하고 있어 콘크리트에 적용되었을 때 [식 2.2] 과같은 반응식으로 알칼리 골재반응(Alkali-Silicate Reaction ; ASR)을 일으키게 된다. 콘크리트 내부에서 발생하는 팽창압은 균열을 일으키며, 열화에 취약한 환경을 조성하게 된다.

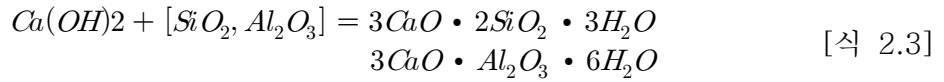


[표 2.2] 폐유리 종류에 따른 산화물조성

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
무색 판유리	71	1.47	0.07	8.91	4.04	0.23	0.83	13.1
녹색 병유리	70.3	2.5	0.7	11.5	1.6	0.1	1.1	11.5
거울 유리	70.6	1.5	1.4	10.6	3.2	0.3	0.6	11.0

ASR은 시멘트 기준으로 알칼리 성분이 0.6%이상 함유하고 있을 때 발생한다고 알려져 있다. 기존의 폐유리는 알칼리 성분을 10%이상 함유하고 있으므로 ASR의 위험도가 높지만, OLED 폐유리의 경우 약 0.3%의 Na₂O만을 포함하므로 반응도가 낮을 것으로 판단된다. 또한, OLED 폐유리 미분화에 의한 높은 포졸란 반응성은 SiO₂를 반응에 의해 소모하므로 ASR의 위험을 더욱 감소시킬 수 있다.

OLED 폐유리의 높은 SiO₂, Al₂O₃성분은 콘크리트 중에서 [식 2.3]과 같이 수산화칼슘과 반응해 C-S-H 및 C-A-H겔을 형성함으로써 콘크리트 내 공극구조를 개선하여 강성 및 내구성을 향상시키는 대표적인 산화물이므로, 콘크리트에 적용 할 경우 강도의 개선이 나타날 것으로 판단된다. C-S-H 겔은 대기 중 이산화탄소와 반응하여 탄산화 하는 성질을 가지고 있기 때문에 이산화탄소를 콘크리트 내에 고정시키는 효과 또한 기대 가능하다.



또한, OLED는 SO₃ 성분을 함유하지 않는 것으로 나타났다. SO₃는 시멘트 내에 석고 형태로 존재하는 황산염으로 시멘트 내의 주요 클링커 중 하나인 알루미네이트(C₃A)의 급결반응을 제어하는 역할을 하지만 과도하게 함유하고 있을 경우 강열감량의 증가 및 콘크리트의 체적 팽창이 발생하고 낮은 함량일 경우 시멘트 페이스트의 응결을 촉진할 수 있다. KS 규격에 제정된 콘크리트용 결합재의 SO₃ 품질 기준은 3%이하로 OPC에 혼입하여 사용하는 OLED 분말의 특성상 적절한 SO₃의 함량을 확보 가능할 것으로 판단된다.

③ 비중

OPC 및 OLED의 비중은 KS M 0602 고체 비중 측정 방법 중 르샤틀리에 비중병에 의한 측정 방법에 의거하여 실시하였고 그 결과를 [표 2.3]에 나타내었다. OPC의 비중은 3.17 g/cm³, OLED의 비중은 2.61 g/cm³로 OLED가 OPC에 비해 약 17% 정도의 낮은 비중을 가지는 것으로 나타났다. 이로 인해 OLED 분말을 치환할 경우 단위 무게당 부피의 증가로 시멘트 입자에 수화공간을 제공하고 상대적으로 높은 물-시멘트비가 되는 효과를 일으켜 초기 수화과정에서 클링커와 물과의 반응을 촉진할 것으로 예상된다.

[표 2.3] OPC 및 OLED의 비중

구분	OPC	OLED
비중(g/cm ³)	3.17	2.61

④ 비표면적

OPC 및 OLED의 비표면적은 KS L 5106에 의거하여 측정되었으며 그 결과를 [표 2.4]에 나타냈다. OPC의 비중은 3,610 cm²/g, OLED의 비중은 7,650 cm²/g로 OLED가 OPC에 비해 2배 이상의 높은 비표면적을 가지는 것으로 나타났다. [표 2.5]에서 알 수 있듯이 주로 쓰이는 포졸란계 혼화재의 비표면적에서 OLED 폐유리미분말은 실리카흙을 제외한 다른 재료들과 유사하거나 뛰어난 비표면적을 가지므로 반응성측면에서 긍정적인 효과를 나타낼 것으로 판단된다.

[표 2.4] OPC 및 OLED의 비표면적

구분	OPC	OLED
비표면적(cm ² /g)	3,610	7,650

[표 2.5] 포졸란계 혼화재의 비표면적

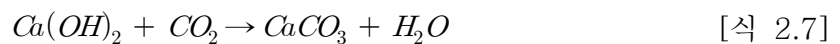
구분	고로슬래그	플라이애시	실리카흙
비표면적 (cm ² /g)	4,000-10,000	1,500-4,500	200,000

(2) OLED 페이스트의 탄산화 저항성 평가

(가) OLED 페이스트의 수화물 조성 분석

① 연구 목적

본 연구 단계에서는 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 탄산화에 의한 CO₂ 흡수량을 산정하기 앞서 수화물 조성을 정량적으로 도출하는 것을 목적으로 한다. 일반적으로 콘크리트 내 탄산화반응 메커니즘은 다음과 같다. 외부로부터 유입된 CO₂가 콘크리트 내부의 세공액에 도달하여 [식 2.4]와 같은 반응식으로 용해되어 탄산을 형성하며, 이것은 다시 [식 2.5]와 같이 해리하여 탄산이온의 형태로 존재하게 된다. 세공액에 존재하는 칼슘과 탄산이온은 [식 2.6]과 같이 물에 쉽게 용해되지 않는 탄산칼슘을 형성하게 되고 공극수 내의 칼슘이온의 농도는 낮아진다. 이로 인해 낮아진 세공액의 칼슘이온 농도를 보상하기 위해 수산화칼슘은 용해되며 [식 2.7]과 같이 반응한다. 지속적인 탄산화 반응은 수산화칼슘의 소모를 촉진하여 pH를 낮추는 동시에 대기 중의 CO₂를 콘크리트 내부에 탄산칼슘의 형태로 흡수하게 된다.



시멘트 수화물에서 탄산화반응을 통해 CO₂ 흡수가 가능한 물질은 탄산칼슘 외에도 C-S-H gel과 Ettringite가 존재한다. 본 연구에서는 포졸란계 재료인 OLED 폐유리를 활용하여 C-S-H gel 생성 반응을 증가시킴으로 탄산화 가능 수화물에 의한 CO₂ 흡수효과를 극대화 하고자 한다.

② 연구 방법

㉠ 페이스트 배합 및 타설

OLED 혼입율의 차이에 따른 수화물 조성을 분석하기 위해 [표 2.6]과 같은 배합비로 시멘트 페이스트를 배합하였다. OLED 분말의 치환율을 0%, 10%, 20% 및 30%로 10%씩 차이를 두어 배합비를 결정하였으며, 각각의 배합명을 0%-OL0, 10%-OL10, 20%-OL20 및 30%-OL30으로 명명하였다. OLED 폐유리 미분말의 혼입률과 관계없이 모든 배합종류의 물-시멘트비는 0.4로 고정하였다.

[표 2.6] 시멘트 페이스트 배합비 (kg/m^3)

Paste	Binder		Water	Sand	Gravel
	OPC	OLED			
OL0	1365.9	0.0	546.4	—	—
OL10	1229.3	136.6	546.4	—	—
OL20	1092.7	273.2	546.4	—	—
OL30	956.2	409.8	546.4	—	—

기계적 혼합은 [그림 2.6]의 소형 기계배합기를 사용하였으며, 혼화재를 포함하여 건비빔 3분 후에 증류수를 포함하여 습비빔을 3분간 진행하였다. 혼합을 마친 페이스트는 [그림 2.7]와 같은 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ 사각몰드에 타설되어 처음 24시간동안 기건 양생을 거치고 탈형 후 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 양생수조에서 요구재령일까지 수중양생 되었다. 양생을 마친 시편의 형상은 [그림 2.8]와 같다.



[그림 2.6] 소형 기계배합기



[그림 2.7] 사각몰드



[그림 2.8] 양생 후 페이스트시편

㉔ 시편 전처리

28일의 수중양생을 마친 페이스트는 [그림 2.9]과 같은 전처리 과정을 거친 후에 시험분석에 사용되었다. (a) 채령 28일의 페이스트를 쇠절구를 이용하여 파쇄과정을 거친다. (b) 수화정지를 위해 파쇄된 페이스트를 알코올계 용매에 48시간 동안 침지시켜 탈수시킨다. (c) 탈수가 완료된 시료를 30분간 건조시킨다. (d) 막자사발을 이용하여 미분화한다. (e) 150 μ m채를 이용하여 채거름을 실시한다. (f) 채거름이 완료된 시료는 시험분석이 진행되기 전까지 바이알에 담겨 밀봉된다.



(a) 1차 파쇄



(b) 수화정지



(c) 용매 건조



(d) 2차 파쇄



(e) 채거름



(f) 밀봉

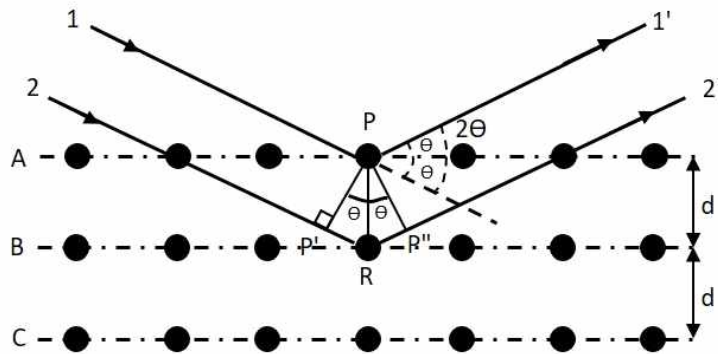
[그림 2.9] XRD 분석용 시편 전처리 과정

㉕ 분석 방법

OLED 혼입 시멘트 페이스트 내 수화물 조성분석을 위해 X선 회절분석(X-ray diffraction ; XRD)을 실시하였으며, 그 결과를 바탕으로 내부표준물(Internal standard material)을 이용한 리트벨트법(Rietveld refinement)을 통해 정량분석을 진행하였다.

X선은 [그림 2.10]과 같이 임의의 결정 상태에서 원자 간격 d 를 가지는 평행된 격자면 A, B, C로 배열되었을 때 파장 λ 을 가지고 있는 X선을 입사각 θ 로 조사하면, X선은 원자에 의해 모든 방향으로 산란된다. 산란된 X선의 행로차 $P'RP''$ 이 입사X선 파장의 정수배로 된 X선은 간섭효과에 의해 강해진다. 이 현상을 회절현상이라 하

고, 이렇게 하여 발생된 X선을 회절 X선이라 칭한다. 회절 현상이 발생하는 경우 입사 X선의 파장 λ 및 입사각 θ 와 격자면 간격 d 사이에는 [식 2.8]과 같은 관계가 성립된다.



[그림 2.10] 결정에 대한 X선의 회절

$$2d \cdot \sin\theta = n\lambda \quad [\text{식 2.8}]$$

이 관계식을 Bragg 식이라고 하며, 회절 X선이 나타내는 입사각 θ 가 결정되면 격자면 간격 d 가 구해지게 된다. 일반적으로, X선 회절법에 관해서는 입사 X선과 격자면이 이루는 각도 θ 보다도 측정계의 기하학적인 배치를 잘 반영하는 각도 2θ 가 사용되고 있다.

X선의 파장에 대한 $2\theta-d$ 대조표가 구해져 있으므로 이 표로부터 격자면 간격 d 를 알 수 있다. 분쇄한 시료를 사용한 분말 X선 회절법에는 각 입자의 배열이 λ 로 존재하여 여러 가지 격자면 간격의 원자면이 나타난다. 입사 X선의 각도를 연속적으로 변화시키면서 회절 X선 강도를 기록하면 강도가 다른 복수의 회절 peak로부터 패턴을 얻을 수 있다. 결정성 물질 원자와 나란한 방향, 즉 결정구조는 물질에 따라 상이하여 패턴은 물질에 고유 값으로 된다.

XRD 분석은 [그림 2.11]와 같이 SmartLab(Rigaku Corp.) 장비를 사용하였다. 회절각은 $5-65^\circ$ (2θ), 스캔속도 $4^\circ/\text{분}$ 의 조건에서 측정되었고, 정량 분석을 위해 기준 물질로 TiO_2 분말을 무게 대비 10% 첨가하였다.

XRD에 의해 얻어진 패턴을 이용하여 리트벨트법에 의한 수화물 정량화를 수행하게 된다. 리트벨트법은 사용자의 숙련도에 따라 결과 값이 상이할 수 있으나 아래 [식 2.9]에 제시된 신뢰성 지표를 통해 검증함. 이 때, GOF 값이 1.0 가까울수록 계산된 결과가 신뢰할만하다고 할 수 있으며, 다양한 화합물로 이루어진 세라믹 즉, 시멘트의 경우 1.5 부근의 값도 유의미하다.



(a) 전경



(b) 내부

[그림 2.11] XRD 분석 장비 (SmartLab, Rigaku Corp.)

$$GOF = \frac{R_p}{R_{exp}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\sum w_i (y_{i, obs} - y_{i, calc})^2}{\sum w_i (y_{i, obs})^2} \right)}}{\sqrt{\left(\frac{(N-P)}{\sum w_i (y_{i, obs})^2} \right)}} \quad [\text{식 2.9}]$$

여기서, w_i 는 가중치 ($\frac{1}{y_{i, obs}}$), $y_{i, obs}$ 는 i 지점에서의 관측 값, $y_{i, calc}$ 는 i 지점에서의 계산 값, N 은 지점의 수, P 는 적용된 변수의 개수를 의미한다.

정량화를 위한 리트벨트법은 MATCH! 3 및 Profex 프로그램을 이용하여 아래 절차에 따라 진행하였고, 계산 값의 이상 수렴을 방지하기 위해 조정할 변수(Scale factor 및 Unit Cell parameter)의 범위를 초기 값의 1% 미만, 조정 횟수는 3회로 제한하였다.

MATCH!3

- 1) XRD 회절 관측 값 입력
- 2) 배경 값 입력
- 3) 클링커 및 수화물 정보 입력
- 4) 기준 화합물 (Internal standard, TiO_2) 설정
- 5) 클링커 및 기준 화합물의 결정구조정보 조정
- 6) 수화물의 결정구조정보 조정
- 7) 각 화합물의 조정된 결정구조정보 저장

Profex

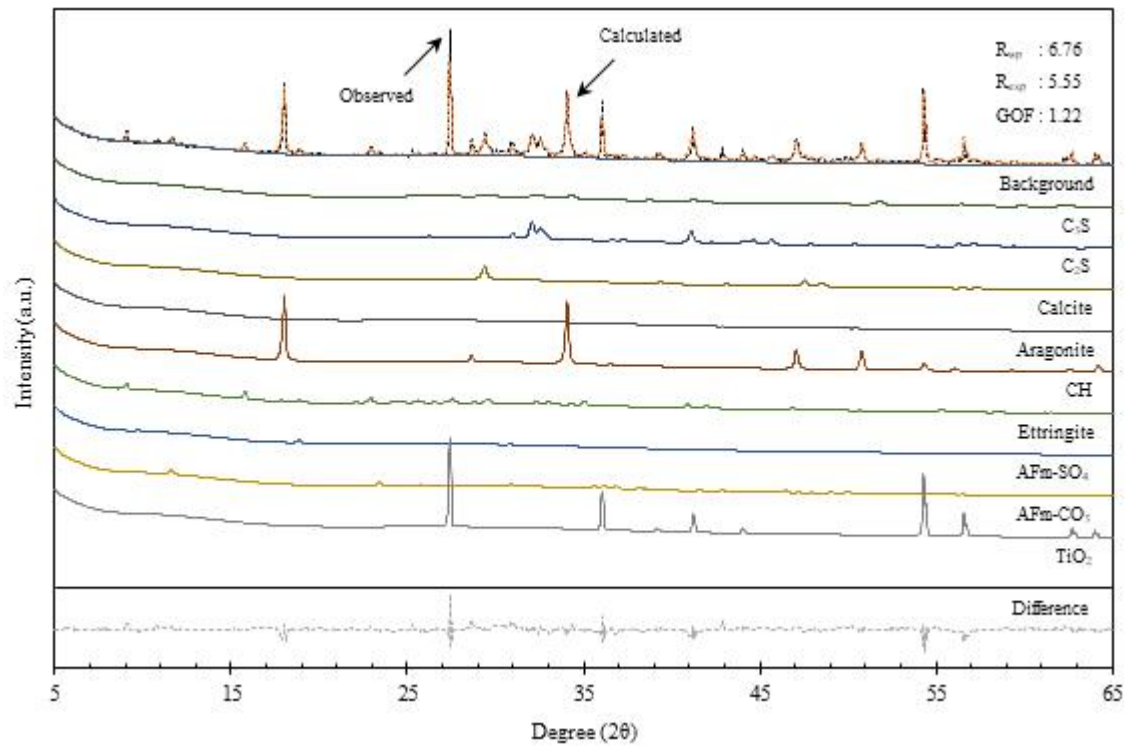
- 1) 조정된 결정구조정보의 Profex 포맷으로 변환
- 2) 클링커 및 수화물 정보 입력
- 3) 기준 화합물 및 해당 함량 설정 (TiO_2 , 10%)
- 4) Profile 변수 설정
- 5) 리트벨트법 실시

③ 연구 결과

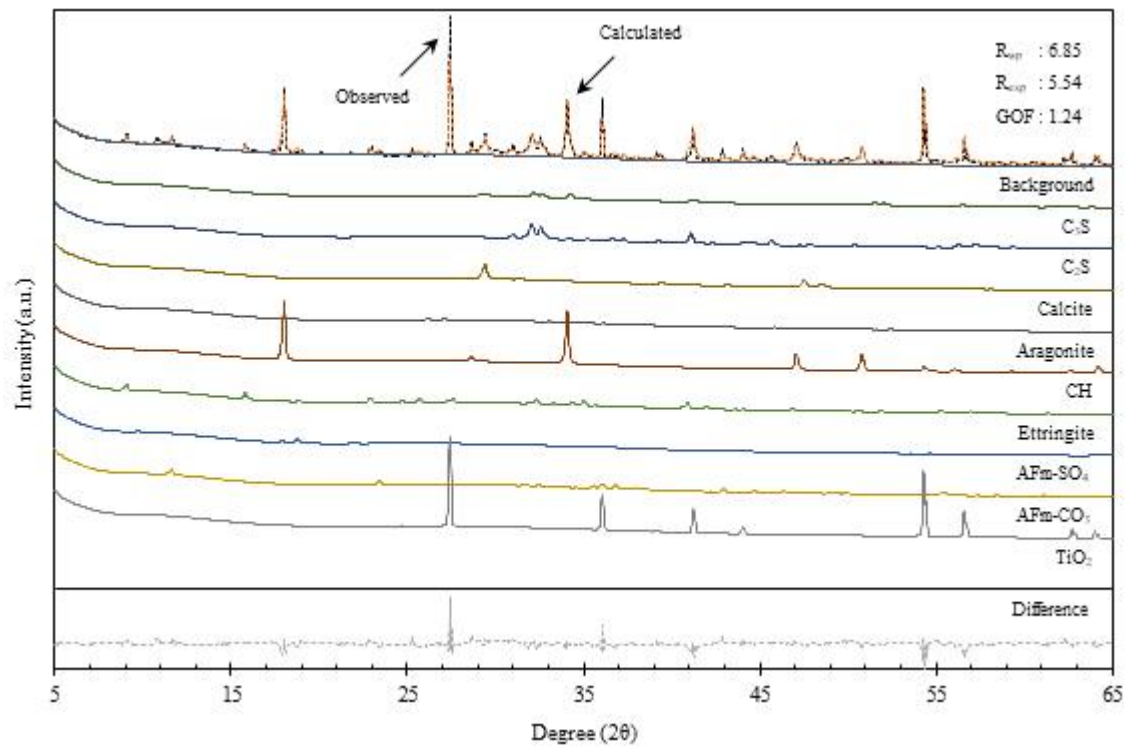
리트벨트법에 의한 OLED 혼입 페이스트 수화물 조성분석 결과를 [표 2.7]로 나타냈으며, 그것에 상응하는 OLED 혼입율에 따른 패턴정보를 [그림 2.12]에 나타냈다. 표 2.7의 결과에서 OLED 혼입 시멘트 페이스트 시편의 GOF 값은 종류에 따라 1.22-1.24로 1.0에 가까운 값을 나타냈으며, 이는 시멘트 분석에서 권고된 1.5에 비해 상당히 높은 정확도라 판단된다. 또한, OLED 분말의 혼입량이 증가할수록 수산화칼슘(CH)의 양은 감소하고, C-S-H 겔의 양은 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 수화과정 중 OLED 분말의 SiO_2 성분이 포졸란 반응을 보인 것으로 사료되며, 단순 계산으로 OLED 분말을 30% 치환 시 CH의 기댓값은 OL 0 함량(9.66%) 대비 약 6.76%이지만 4.81%로 나타났으므로 포졸란 반응이 일어났음 예상할 수 있다. OL 10 및 OL 20에서도 비슷한 경향을 나타냄에 따라 OLED 폐유리 분말은 포졸란계 혼화제로써 적합하다고 판단된다.

[표 2.7] 시멘트 페이스트 내 클링커 및 수화물 조성(%)

	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
C_3S	5.19	5.75	5.08	4.10
C_2S	13.16	11.58	9.18	9.49
Calcite	4.55	4.37	4.34	4.75
Aragonite	0.31	0.50	0.38	0.64
CH	9.66	7.30	5.86	4.81
Ettringite	12.00	7.90	8.19	8.74
AFm- SO_4	1.15	1.33	1.21	1.14
AFm- CO_3	5.62	6.66	4.77	3.22
C-S-H gel	48.37	54.61	60.99	63.12
R_{wp}	6.76	6.85	6.83	6.82
R_{exp}	5.55	5.54	5.54	5.52
GOF	1.22	1.24	1.23	1.24

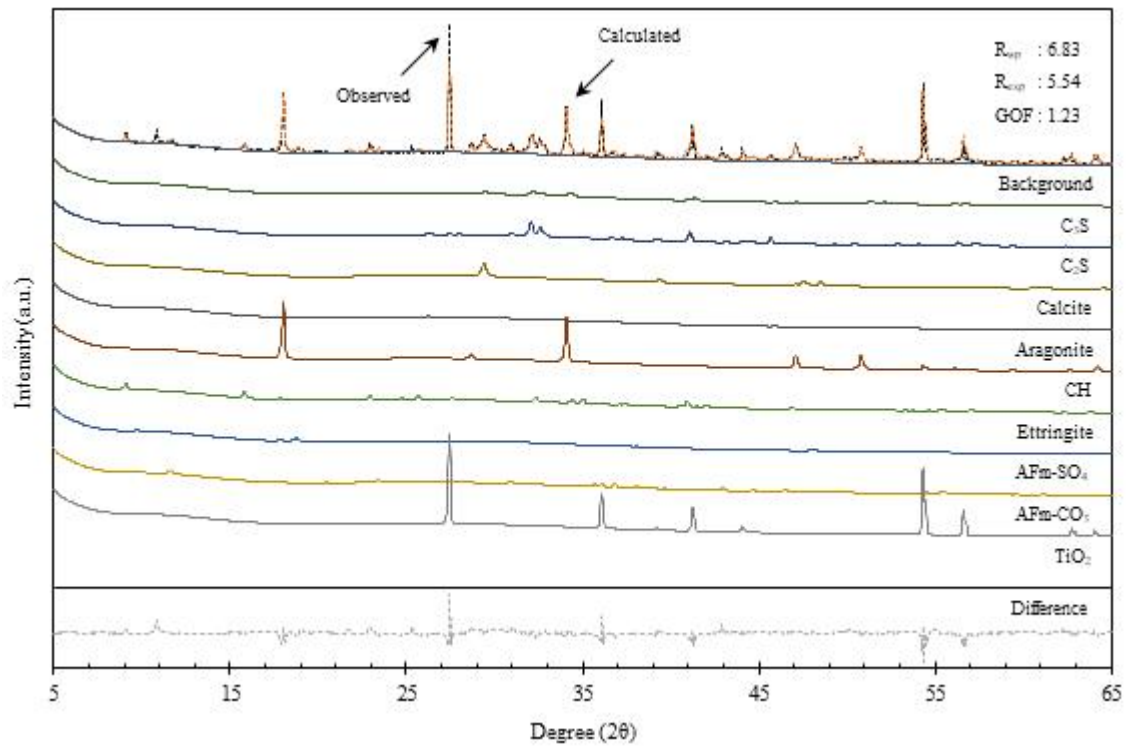


(a) OL 0

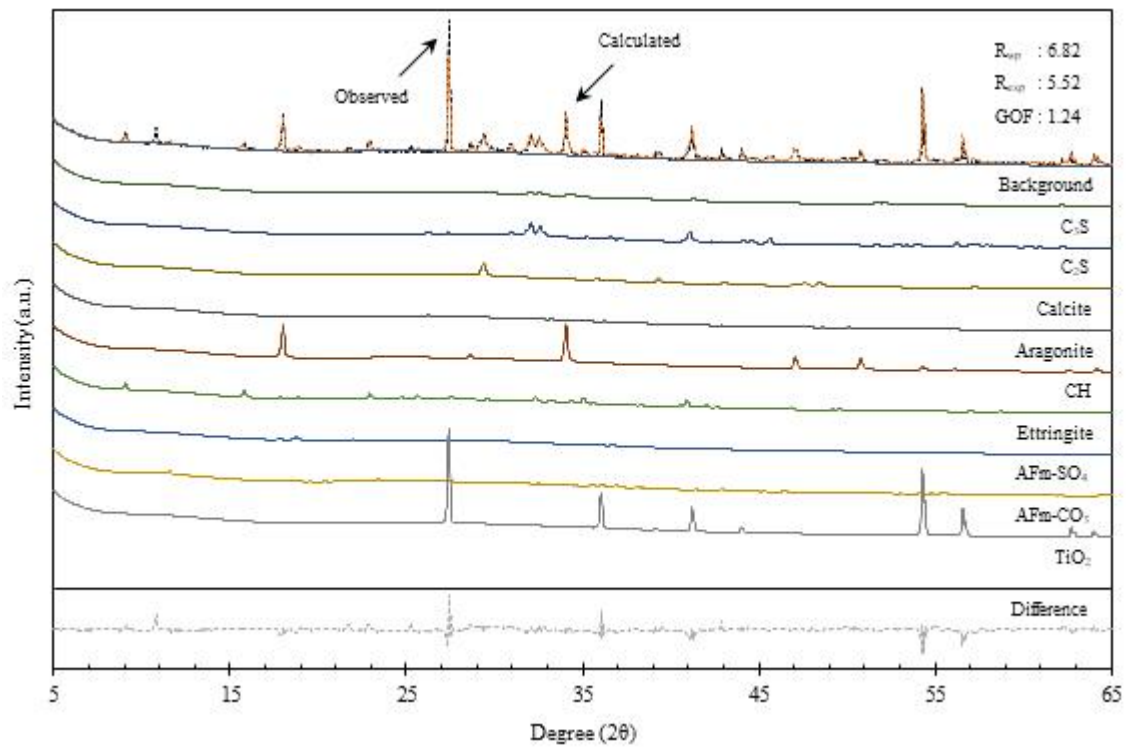


(b) OL 10

[그림 2.12] OLED 혼입 시멘트 페이스트의 X선 정량 분석 결과 (계속)



(c) OL 20



(d) OL 30

[그림 2.12] OLED 혼입 시멘트 페이스트의 X선 정량 분석 결과

(나) OLED 페이스트의 탄산화 특성 분석

① 연구 목적

OLED 혼입 시멘트 페이스트의 탄산화에 의한 CO_2 흡수량을 계산하기 위해 탄산화 환경 노출시간에 따른 탄산화 진행 깊이를 분석하는 것을 목적으로 한다. 탄산화 속도에 영향을 주는 인자는 크게 콘크리트의 배합 및 양생조건에 따른 영향과 콘크리트가 경화 후에 주위환경에 따른 영향이 있다. 배합조건에 해당하는 인자로는 시멘트종류, 골재의 종류, 물-시멘트비 및 혼화재 등이 해당되며 환경조건에 해당하는 인자로는 CO_2 농도, 온도, 습도 및 실내외 환경이 해당한다. 본 연구에서는 OLED 혼입량에 따른 수화생성물 차이에서 발생하는 탄산화 속도차이를 비교하였다.

② 연구 방법

㉠ 페이스트 배합 및 타설

페이스트의 배합 설계는 앞서 나타낸 [표 2.6]과 동일하게 하였으며, 기계적 혼합은 [그림 2.12]의 기계적 배합기를 사용하였으며, 결합재만을 포함하여 건비빔 3분 후에 증류수를 포함하여 습비빔을 3분간 진행하였다. 혼합을 마친 페이스트는 [그림 2.13]의 $100 \times 100 \times 400$ mm 직사각몰드에 타설되어 24시간동안 기건 양생을 거치고 탈형하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 조건에서 양생수조에서 요구재령일 까지 수중양생 되었다. 양생을 마친 시편의 형상은 [그림 2.14]과 같다.



[그림 2.12] 기계적 배합기 [그림 2.13] 직사각형 몰드 [그림 2.14] 시편형상

㉔ 시편 전처리

28일 동안 수중양생을 마친 페이스트 시편은 [그림 2.15]과 같은 전처리 과정을 거친 후에 급속 탄산화 실험을 진행하였다. (a) 재령 28일의 페이스트를 콘크리트 절단기를 이용하여 $50 \times 50 \times 100$ mm의 직사각형 모양으로 절단 하였다. (b) 시편의 길이방향 양쪽 끝단으로만 탄산화를 유도하기 위해 나머지 4면에 대해 2회 에폭시 코팅을 진행한다. (c) 48시간 동안 실험실 환경에서 건조시킨다. 건조가 완료된 후에 시편은 탄산화 챔버에서 급속탄산화 실험을 진행하였다.



(a) 절단



(b) 에폭시 도포



(c) 에폭시 건조

[그림 2.15] 급속탄산화 실험 시편 전처리

㉔ 분석 방법

탄산화 촉진을 위해 [그림 2.16]의 챔버에서 CO_2 농도 3%, 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도(RH) 60%의 환경을 유지하였다. 급속탄산화 환경에서 1, 2, 4, 및 8주 동안 노출시켰으며, 이후 탄산화 진행방향과 동일한 방향으로 시편을 절단하였다. 절단면을 대상으로 KS F 2596 콘크리트 탄산화 깊이 측정 방법에 따라 95%에탄올 90ml + 증류수 10ml 용액에 페놀프탈레인 분말 1g을 용해시킨 지시약을 제조하여 분무하였다. 페놀프탈레인을 적용한 시편은 [그림 2.17]에 나타내었으며, 페놀프탈레인에 의한 발색이 완료된 시편을 촬영하여 [그림 2.18]과 같은 과정으로 탄산화 깊이를 산정하였다.

[그림 2.18]에서 탄산화 깊이를 산정하기 위해 우선적으로 10×5 cm 크기의 시편을 촬영하였고 이는 2048×1024 pixel과 같다. 탄산화가 진행되지 않아 페놀프탈레인이 발색된 부분과 탄산화가 진행되어 발색되지 않은 부분을 구분하기 위해 발색된

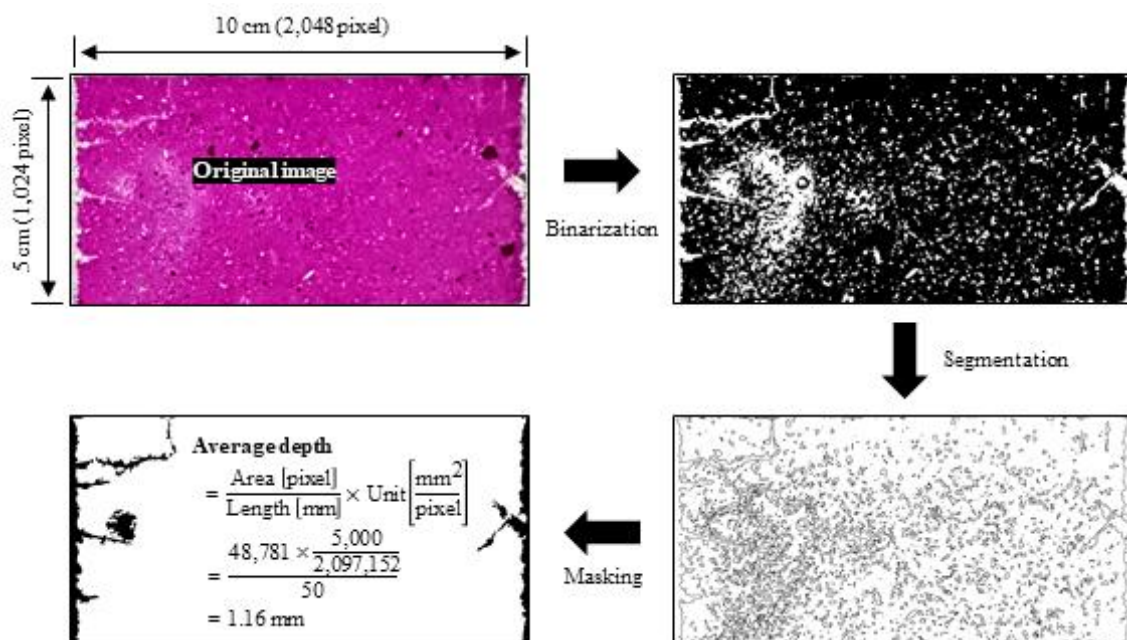
색을 기준으로 이원화(Binarization)를 진행한다. 이원화란 흑백 또는 색채 화상 등 다치의 화상으로부터 이원(1,0)의 화상을 얻기 위한 처리로써 얻어지는 화상은 이원 화상이라 부르며, 1, 0을 각각 흑백에 대응시켜 취급한다. 이원화는 화상 가운데서 대상물을 빼내기 위한 수단으로 쓰이며, 일단 이원 화상이 얻어지면 여러 가지 기하학적 취급이 가능하게 된다.



[그림 2.16] 탄산화 챔버



[그림 2.17] 페놀프탈레인적용 시편



[그림 2.18] 이미지 분석을 통한 탄산화깊이 산정

획득한 이원 화상을 대상으로 구분화(Segmentation)를 진행한다. 구분화는 화상 처리의 한 분야로, 원화상을 분석하고 화상이 갖는 성질이나 특징을 추출, 기술하는 것을 목적으로 한다. 이원화상의 경계면을 따라 구분화가 진행된 이미지는 탄산화 부분만 흑색으로 Masking작업을 거치게 된다. 최종적으로 탄산화가 진행된 부분의 픽셀 값은 1(흑)을 가지게 된다.

평균 탄산화 깊이는 [그림 2.18]의 마지막 그림의 식을 이용해 도출할 수 있다. Area는 Masking에 의해 획득한 흑색 픽셀의 수를 의미하며, Length는 탄산화 진행 방향과 수직인 방향의 길이를 뜻한다. Area에 Length를 나누고 한 픽셀이 차지하는 면적을 곱하여 탄산화 깊이를 산정할 수 있다.

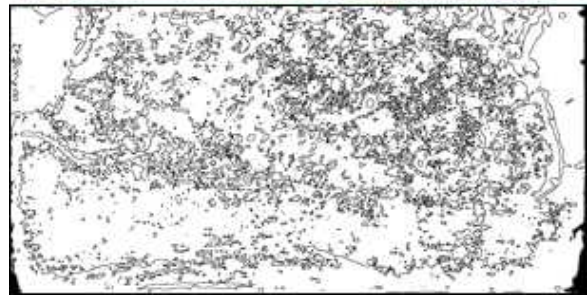
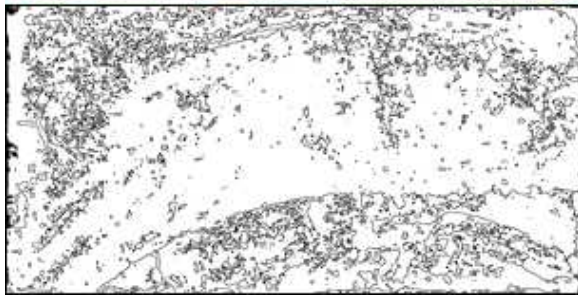
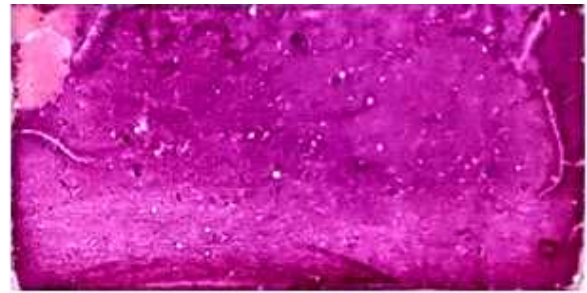
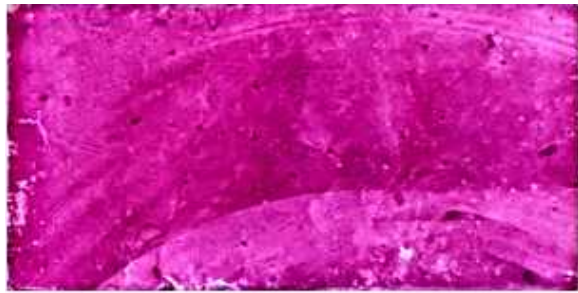
③ 연구 결과

1-8주 급속탄산화 실험에 의한 OLED 혼입 페이스트의 탄산화 산정 정보를 [표 2.8]에 기입 하였으며 페놀프탈레인 적용 페이스트 시편과 그것의 이미지 분석을 [그림 2.18] - [그림 2.21]에 나타냈다. 1-8주간 급속 탄산화 환경에 노출된 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이 측정 결과, OLED 혼입량이 증가할수록 탄산화 깊이가 또한 증가하는 것을 확인하였다. 예를 들어 8주간 탄산화 환경에 노출된 OL 30의 경우 3.52 mm로 OL 0 대비 1.85배 이상의 침투 깊이를 나타낸다. 이는 포졸란 반응으로 OLED가 혼입된 페이스트 시편의 CH 함량이 감소하여 CO₂의 침투가 촉진된 것으로 판단된다. 하지만 시간이 지남에 따라 침투된 CO₂는 포졸란 반응으로 생성된 C-S-H겔과 반응하고 결과적으로 탄산칼슘이 형성되어 CO₂가 흡수되는 것이 예상 가능하다. 따라서 대기 중의 CO₂ 침투가 촉진되고 결국 경화체 내 수화물과 반응하여 탄산칼슘을 형성하므로 OLED 페유리의 혼입은 탄산화 관점에서 CO₂ 흡수에 유리할 것으로 사료된다.

[표 2.8] 급속 탄산화 환경에서의 시간에 따른 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이

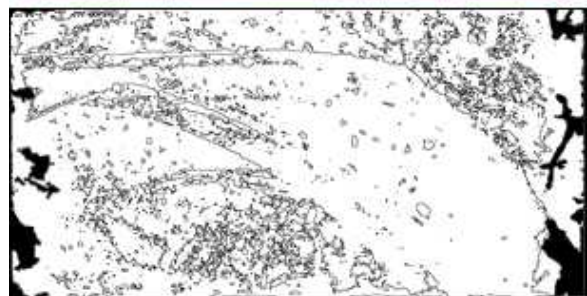
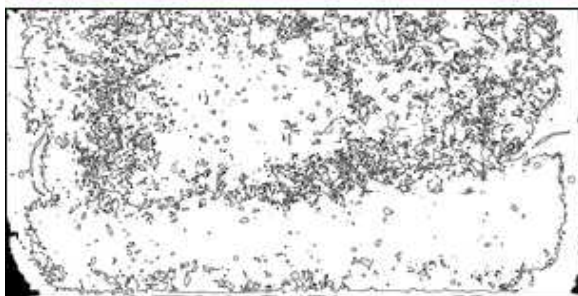
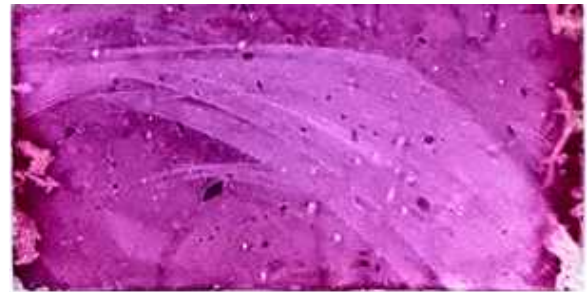
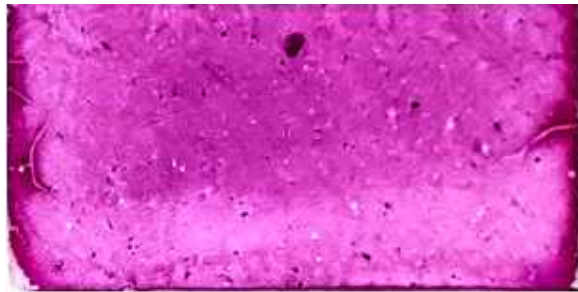
		OL 0				OL 10				OL 20				OL 30			
		1 w	2 w	4 w	8 w	1 w	2 w	4 w	8 w	1 w	2 w	4 w	8 w	1 w	2 w	4 w	8 w
Pixel	Left	4150	2541	10940	29209	2588	6128	35904	43485	22797	4637	28488	64197	14943	29257	61496	56721
	Right	2431	7057	2759	50352	11396	10716	20138	48021	5461	26692	20293	54026	11041	17829	32871	90960
Area (mm ²)	Left	9.89	6.06	26.08	69.64	6.17	14.61	85.60	103.68	54.35	11.06	67.92	153.06	35.63	69.75	146.62	135.23
	Right	5.80	16.83	6.58	120.05	27.17	25.55	48.01	114.49	13.02	63.64	48.38	128.81	26.32	42.51	78.37	216.87
Depth (mm)	Left	0.20	0.12	0.52	1.39	0.12	0.29	1.71	2.07	1.09	0.22	1.36	3.06	0.71	1.40	2.93	2.70
	Right	0.12	0.34	0.13	2.40	0.54	0.51	0.96	2.29	0.26	1.27	0.97	2.58	0.53	0.85	1.57	4.34
Average (mm)		0.16	0.23	0.33	1.90	0.33	0.40	1.34	2.18	0.67	0.75	1.16	2.82	0.62	1.12	2.25	3.52

* The image resolution of the specimen is 2048×1024 , which equals to 100×50 mm in the length.



(a) 1 week

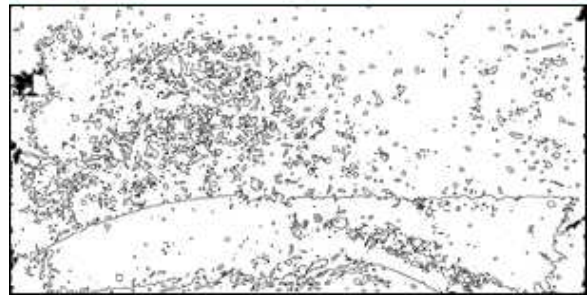
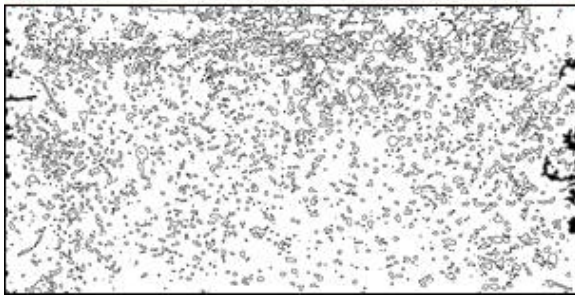
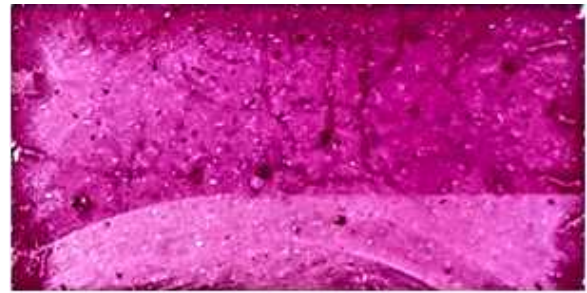
(b) 2 weeks



(c) 4 weeks

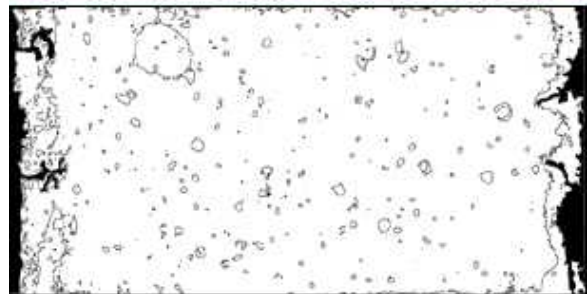
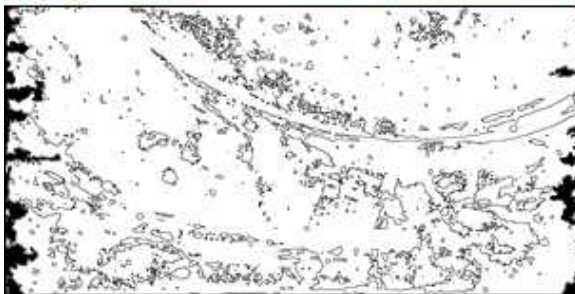
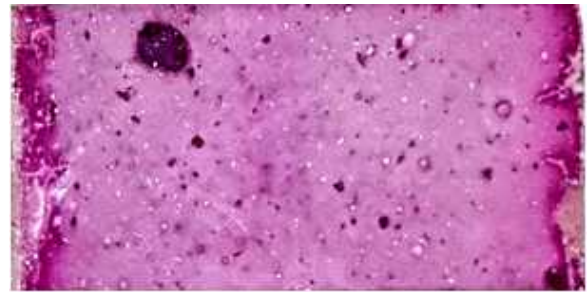
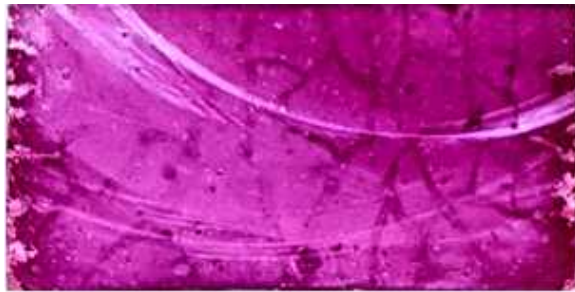
(d) 8 weeks

[그림 2.18] OL 0 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이 측정



(a) 1 week

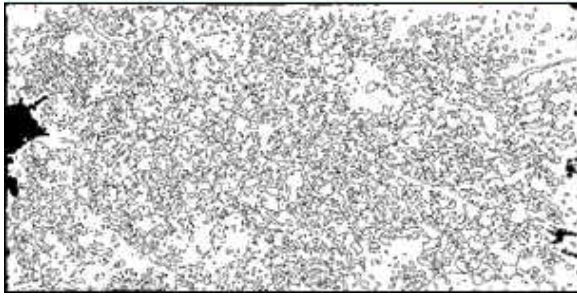
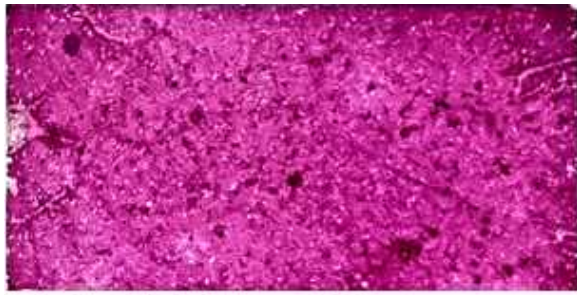
(b) 2 weeks



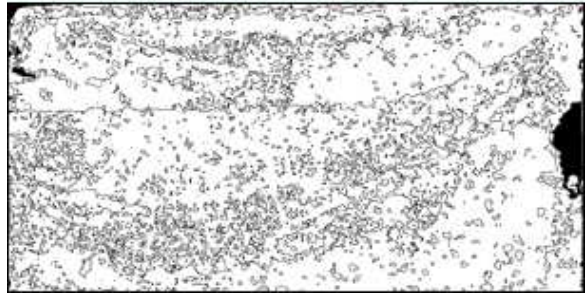
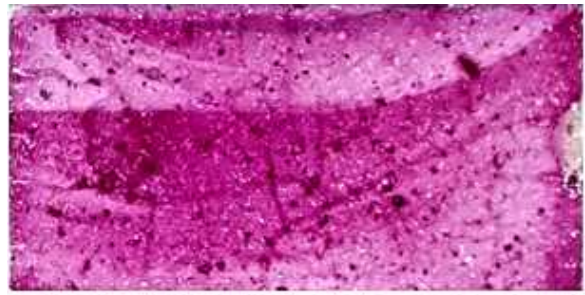
(c) 4 weeks

(d) 8 weeks

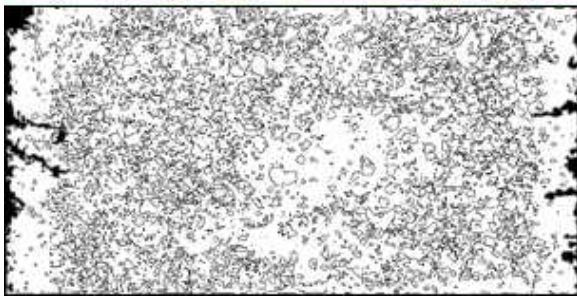
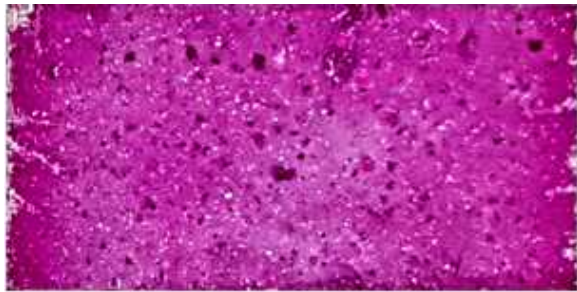
[그림 2.19] OL 10 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이 측정



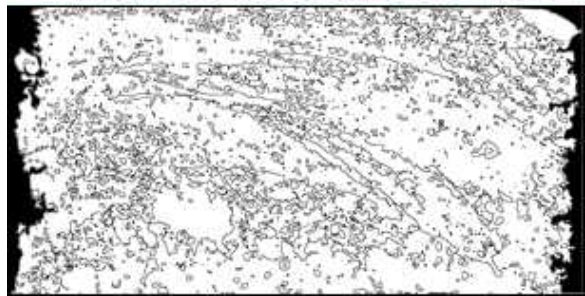
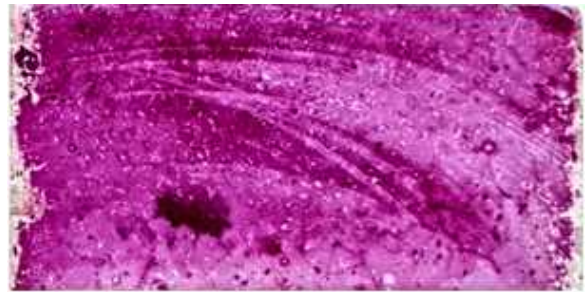
(a) 1 week



(b) 2 weeks

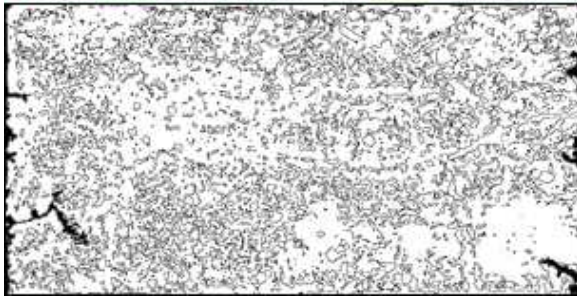
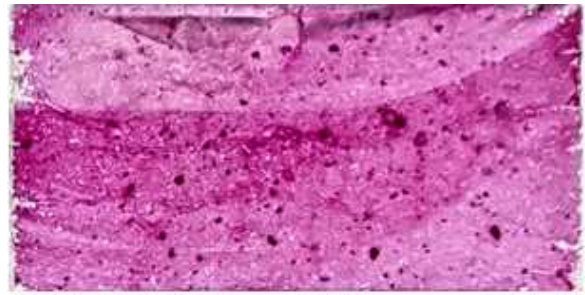
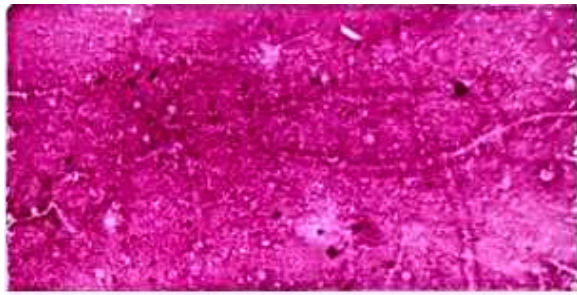


(c) 4 weeks



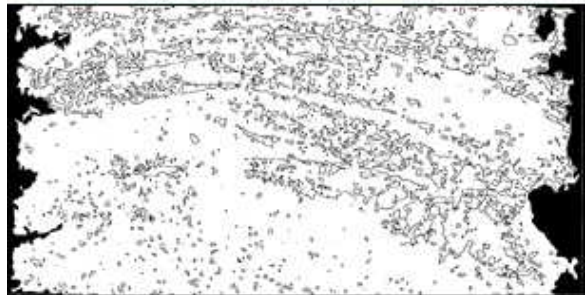
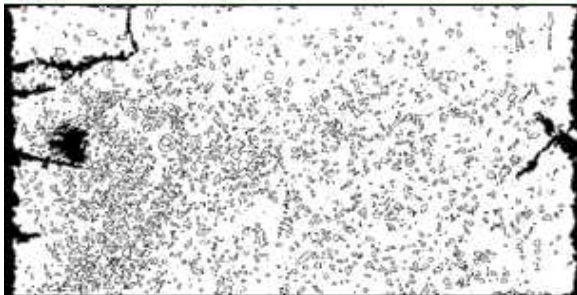
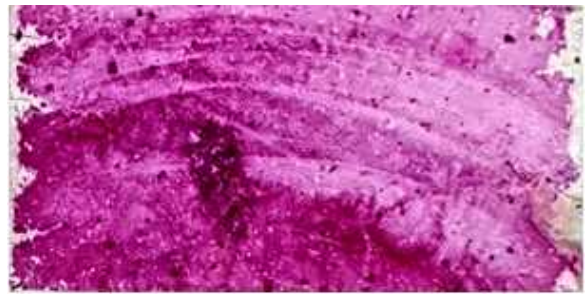
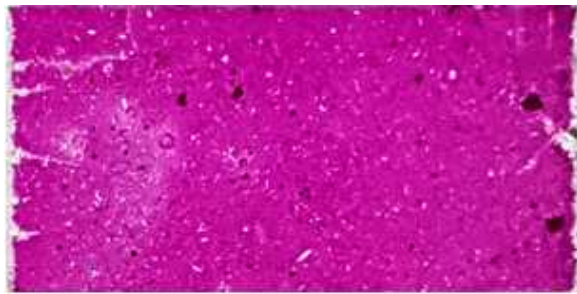
(d) 8 weeks

[그림 2.20] OL 20 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이 측정



(a) 1 week

(b) 2 weeks



(c) 4 weeks

(d) 8 weeks

[그림 2.21] OL 30 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이 측정

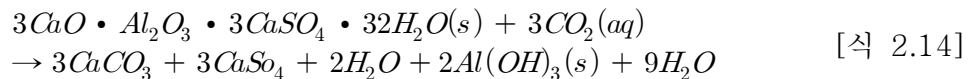
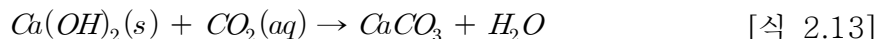
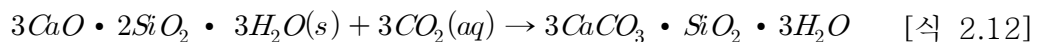
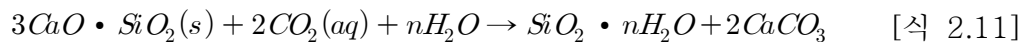
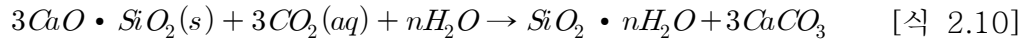
(3) OLED 페이스트의 CO₂ 흡수능력 평가

(가) 연구 목적

OLED 혼입 시멘트 페이스트 내 CO₂ 흡수량은 기존의 산화물 조성 기반 계산이 아닌 실제 클링커 및 수화물 조성 분석 결과를 토대로 계산하여 보다 정확한 흡수량을 산정함과 동시에 OLED 혼입량에 따른 CO₂ 흡수량을 비교하여 OLED 분말의 효용성을 판단하고, 급속 탄산화 기간에 따른 탄산화 깊이를 회귀 분석하여 장기탄산화 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다.

(나) 연구 내용

시멘트 경화체 내 탄산화는 수산화칼슘(CH), C-S-H gel 등 과 같이 칼슘성분을 함유한 화합물과 대기로부터 흡수된 CO₂의 반응으로 탄산칼슘이 생성되는 것을 의미한다. 기존의 CO₂ 흡수량 산정은 사용된 시멘트계 재료의 산화물 조성(Oxide composition)을 바탕으로 계산하였으나 이는 산화물 조성에 따른 클링커(Clinker) 및 생성 가능한 수화물을 추정하여 산정하는 방식이므로 실제 흡수량과는 차이가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 리트벨트법을 이용한 X선 정량분석을 통해 특정 재령일의 OLED 혼입 시멘트 내 클링커 및 수화생성물 조성을 파악하고 아래 탄산화와 관련된 반응 [식 2.10] - [식 2.14]을 기반으로 CO₂ 흡수량을 계산하였다.



위 반응식에서 알 수 있듯이 CO₂가 반응하는 클링커 및 수화물의 몰농도와 생성되는 CaCO₃의 몰농도가 같으므로 이를 통해 아래 [식 2.15]를 이용하여 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 탄산화 가능한 양을 산정하였다.

$$m_{CO_2} = [CO_2] \times Area \times Carbonation\ depth \times MW_{CO_2} \quad [\text{식 2.15}]$$

여기서, m_{CO_2} 는 시멘트 페이스트의 CO₂ 흡수량(g), $[CO_2]$ 는 시멘트 페이스트 내 CO₂와 반응할 수 있는 화합물의 몰농도(mol/m³), $Area$ 는 대기에 노출된 시멘트 페이스

트의 면적(m^2), *Carbonation depth*는 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이(m), MW_{CO_2} 는 CO_2 의 물질량(g/mol)이며, OLED 혼입 시멘트 페이스트의 시간에 따른 CO_2 흡수량 계산과정은 다음과 같다.

① $[CO_2]$

시멘트 페이스트 내 CO_2 와 반응할 수 있는 화합물의 몰농도는 X선 정량분석 결과를 이용하여 물-혼화재 비 0.4로 산정된 배합설계에서의 혼화재 양 (1365.9 kg/m^3)에 대해 계산하였고 해당 결과를 [표 2.9]에 나타내었다.

[표 2.9] OLED 혼입 시멘트 페이스트 내 CO_2 와 반응 가능한 화합물의 단위 몰농도 (mol/m^3)

		C_3S	C_2S	Calcite	Araginite	CH	Ettringite	$AFm-SO_4$	$AFm-CO_3$	C-S-H	Total
wt. %	OL 0	5.2	13.2	4.6	0.3	9.7	12.0	1.2	5.6	48.4	100.0
	OL 10	5.8	11.6	4.4	0.5	7.3	7.9	1.3	6.7	54.6	100.0
	OL 20	5.1	9.2	4.3	0.4	5.9	8.2	1.2	4.8	61.0	100.0
	OL 30	4.1	9.5	4.8	0.6	4.8	8.7	1.1	3.2	63.1	100.0
$[CO_2]$	OL 0	310.5	1043.6	0.0	0.0	1780.7	130.6	0.0	0.0	1929.2	5194.5
	OL 10	344.0	918.3	0.0	0.0	1345.7	86.0	0.0	0.0	2178.0	4871.9
	OL 20	303.9	728.0	0.0	0.0	1080.2	89.1	0.0	0.0	2432.5	4633.7
	OL 30	245.3	752.5	0.0	0.0	886.7	95.1	0.0	0.0	2517.4	4497.0

* 화합물의 물질량은 다음과 같음. C_3S : 228.33 g/mol , C_2S : 172.25 g/mol , CH : 74.10 g/mol , Ettringite : 1255.26 g/mol , C-S-H : 342.48 g/mol

② Area

대기에 노출된 시멘트 페이스트의 면적의 경우 위 배합설계에 따라 단위면적인 $1m^2$ 으로 산정하였다.

③ Carbonation depth

탄산화 깊이의 경우 급속 탄산화 환경에서의 OLED 혼입 시멘트의 탄산화 깊이측정 값[표 2.8]을 이용하여 아래 [식 2.15]에 대해 회귀분석을 통해 탄산화 속도 계

수(α)를 구한 후 최대 100년까지의 탄산화 깊이를 산정하여 [표 2.10] 및 [표 2.11]에 나타내었다.

$$\text{carbonation depth}(mm) = \alpha \times \sqrt{\text{Exposure time (yrs)}} \quad [\text{식 2.15}]$$

[표 2.10] OLED 혼입 시멘트 페이스트의 탄산화 속도 계수

	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
Carbonation coefficient, α	3.10	4.66	5.74	7.97

[표 2.11] OLED 혼입 시멘트 페이스트의 시간에 따른 탄산화 깊이

Exposure time (yrs)	Carbonation depth(mm)			
	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
30	16.96	25.50	31.45	43.65
50	21.89	32.92	40.60	56.36
100	30.96	46.55	57.41	79.70

④ m_{CO_2}

위 과정을 토대로 계산된 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 CO_2 흡수량은 [표 2.12]와 같다.

[표 2.12] 시간에 따른 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 CO_2 흡수량

Exposure time (yrs)	Carbonation adsorption (kg/m ³)			
	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
30	3.88	5.83	7.19	9.98
50	5.00	7.52	9.28	12.88
100	7.08	10.64	13.12	18.22

OLED 혼입 시멘트 페이스트의 30, 50 및 100년의 CO_2 흡수량을 산정해본 결과 혼입율이 높아질수록 흡수량도 함께 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 탄산화 환경 노출 기간 30년을 기준으로 OLED 혼입이 10% 증가할 때 마다 평균적으로 CO_2 흡수량은 37%정도 상승하는 것으로 나타났다.

(4) OLED 페이스트의 철근 부식 위험성 평가

(가) 염소이온 고정화 능력

① 연구 목적

철근 콘크리트 구조물의 경우 공극수의 pH 저하, 전기화학적 불안정 등 다양한 원인에 의해 콘크리트 내 철근의 부식으로 인한 콘크리트 열화가 발생할 수 있고 특히, 바닷물, 제설제 등 염소 이온이 포함된 환경에 오랜 시간 노출이 지속될 경우 염소 이온에 의해 부식이 가속화될 수 있다. 하지만 본 연구의 최종 목표는 OLED 혼입 콘크리트의 탄산화를 유도하여 대기 중 CO₂ 흡수에 따른 저감 효과를 높이는 것으로 탄산화가 철근 깊이까지 발생할 경우 낮은 pH 환경이 조성되어 부식의 위험성이 증가하는 상황에 놓이게 된다. 이 때, 철근 부식의 기저 원인 중 하나인 염소 이온 고정화 능력(Chloride binding capacity)이 OLED 혼입으로 인해 증가 또는 유지될 수 있다면 염소 이온의 침투 저항성을 높여 부식 위험성을 완화시킬 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 다양한 염소 이온 농도에서의 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 고정화 능력을 평가하였다.

② 연구 내용

㉠ 페이스트 배합 및 타설

OLED 혼입 시멘트 배합설계는 ‘(2) OLED 페이스트의 탄산화 저항성 평가’에서의 제작 시편과 동일하게 진행하였으며, 일반적인 바닷가의 염소 이온 농도가 약 2.5%임을 감안하여 농도는 0%, 1%, 2% 및 3%로 설정하였다.

㉡ 시편 전처리

다양한 농도 수준의 염소 이온을 함유한 OLED 시멘트 페이스트를 양생 28일 후 ‘(2) OLED 페이스트의 탄산화 저항성 평가, (가) 수화물 조성’에서와 마찬가지로 시편 전처리를 진행하였다. 이 때, 염소 이온의 유출을 막기 위해 알콜계 용매를 이용한 수화 정지 과정은 제외하였고, 분쇄 작업 후 즉시 염소 이온 고정화 실험을 실시하였다.

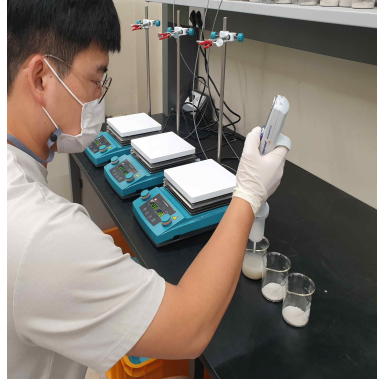
㉢ 분석 방법

염소 이온 고정화 능력 실험은 [그림 2.22]에 나타난 순서로 진행되었다. (a) 비커에 분쇄된 시료 5 g을 계량한다. (b) 미리 온도를 50℃에 맞춰놓은 2M 질산 50ml

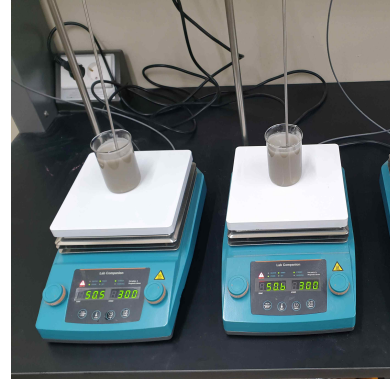
를 시료에 투입한다. (c) 가열교반기를 이용하여 50℃의 온도를 유지하면서 15분간 교반한다. (d) 교반이 끝나면 상온(약 25℃)이 될 때까지 정치한 후 거름종이를 활용하여 용액을 여과한다. (e) 염소이온 측정 전극을 사용하여 용액의 염소이온을 측정한다. 상기의 과정은 배합별로 3회씩 진행되었다.



(a) 시료개량



(b) 질산 투입



(c) 가열 교반



(d) 용액 여과

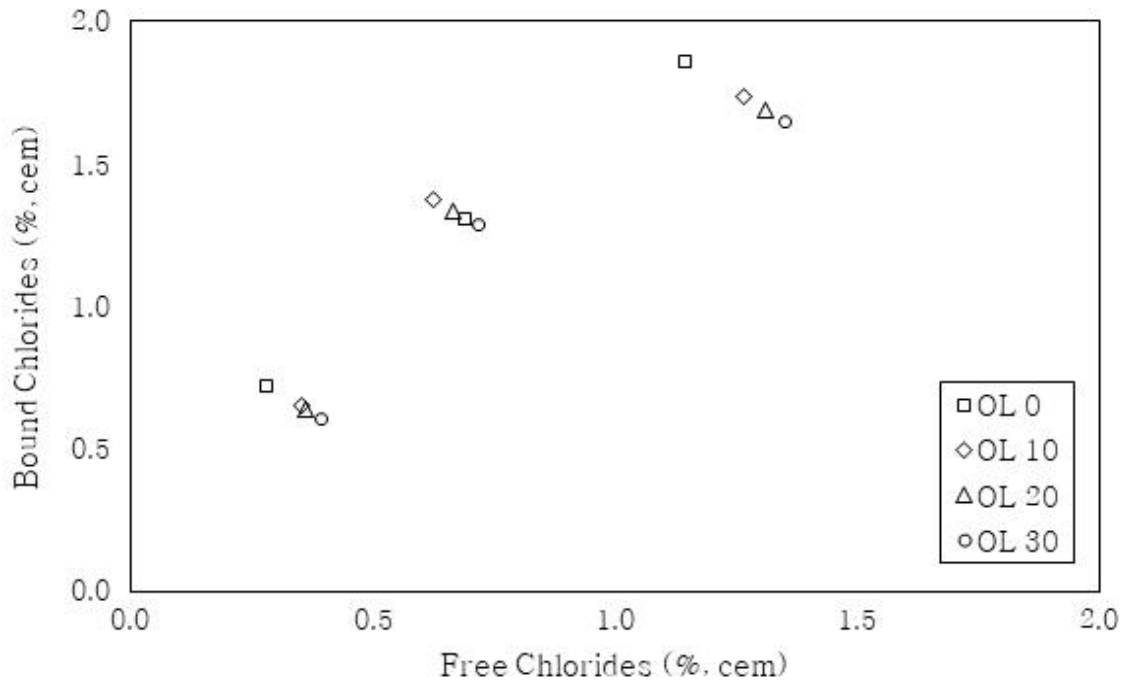
(e) 전극을 이용한 이온농도 측정

[그림 2.22] 염소 이온 측정 실험

③ 연구 결과

OLED 혼입 시멘트 페이스트의 염소 이온 고정화 능력 결과 값은 [그림 2.23]과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 총 염소 이온 농도가 증가할수록 고정화된 염소 이온의 농도 역시 증가하였다. 총 염소 이온 농도 2%를 제외하고 OLED 폐유리 미분말을 치환할수록 고정화 능력은 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 염소 이온 고정화에 관련된 클링커 C_3A 의 함량이 OLED 치환율이 높아질수록 감소하기 때문인 것으로 사료된다. C_3A 클링커는 수화과정 동안 AFm 또는 AFt가 되어 이미 존재하거나 외부로부터 유입된 염소 이온과 반응하여 Friedel 염을 생성한다. 앞선 연구 결과에서 채령 28일에서의 OLED 혼입 시멘트 페이스트 내 AFm 또는 AFt 수화물의 함량은 OLED 혼입율이 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다 [표 2.7]. 하지만 바닷물의

염소 이온 농도 부근에서의 고정화 능력 차이는 미비하므로 철근 부식 위험성에서는 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.



[그림 2.23] OLED 혼입율에 따른 염소 이온 고정화 능력

(나) 산 중화 능력

① 연구 목적

앞서 설명한 바와 같이 본 연구 과제의 최종 목표와 콘크리트 내 철근 부식의 위험성은 상반되는 결과를 가져올 수 있다. 철근 깊이까지의 탄산화는 많은 양의 CO_2 흡수하는 효과를 나타내지만 해당 깊이의 공극수 내 pH를 저하시킬 수 있다. 낮은 pH 환경에서는 철근 부식 특히 국부적인 부식(Pit corrosion)을 발생시킬 수 있다. 이는 내부 팽창압에 의한 콘크리트 균열뿐만 아니라 철근 단면력의 손실을 야기한다. 결국 공극수의 pH 저하 환경에서 시멘트 경화체(Cement matrix)의 완충(Burffering) 작용은 철근 부식 위험성을 판단하는 하나의 지표가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 산 중화 능력(Acid neutralization capacity) 실험을 통해 염소 이온 고정화 능력과 별개로 철근 부식의 위험성을 평가하였다.

② 연구 내용

㉠ 페이스트 배합 및 타설

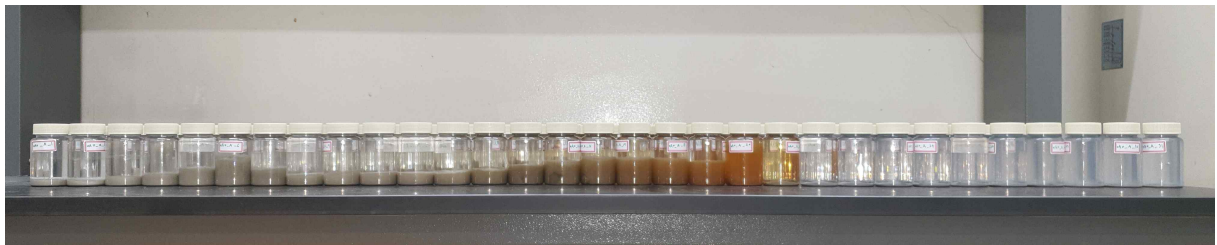
OLED 혼입 시멘트 배합설계는 ‘(2) OLED 페이스트의 탄산화 저항성 평가’에서의 제작 시편과 동일하게 진행하였다.

㉠ 시편 전처리

재령 28일의 OLED 시멘트 페이스트를 ‘(2) OLED 페이스트의 탄산화 저항성 평가, (가) 수화물 조성’와 동일한 시편 전처리를 진행하였다.

㉡ 분석 방법

OLED 시멘트 페이스트의 산 중화 능력 평가를 위해 4.0 M의 질산(Nitric acid, HNO_3)을 이용하여 [표 2.13]에 제시된 총 30 수준의 산 용액(50 ml)을 준비한다. 제작된 용액에 전처리 과정을 거친 분말 시료 4 g을 첨가한 후 15분간 교반한다. 이후 용액의 pH 안정화를 위해 약 10일 동안 정치시킨다. 완성된 용액은 [그림 2.24]와 같다. 이후 pH 전극을 이용하여 용액의 pH를 측정하였다. 모든 실험 과정을 상온의 실험실 분위기에서 진행되었다.



[그림 2.24] 산 중화 능력 실험을 위한 용액 제조

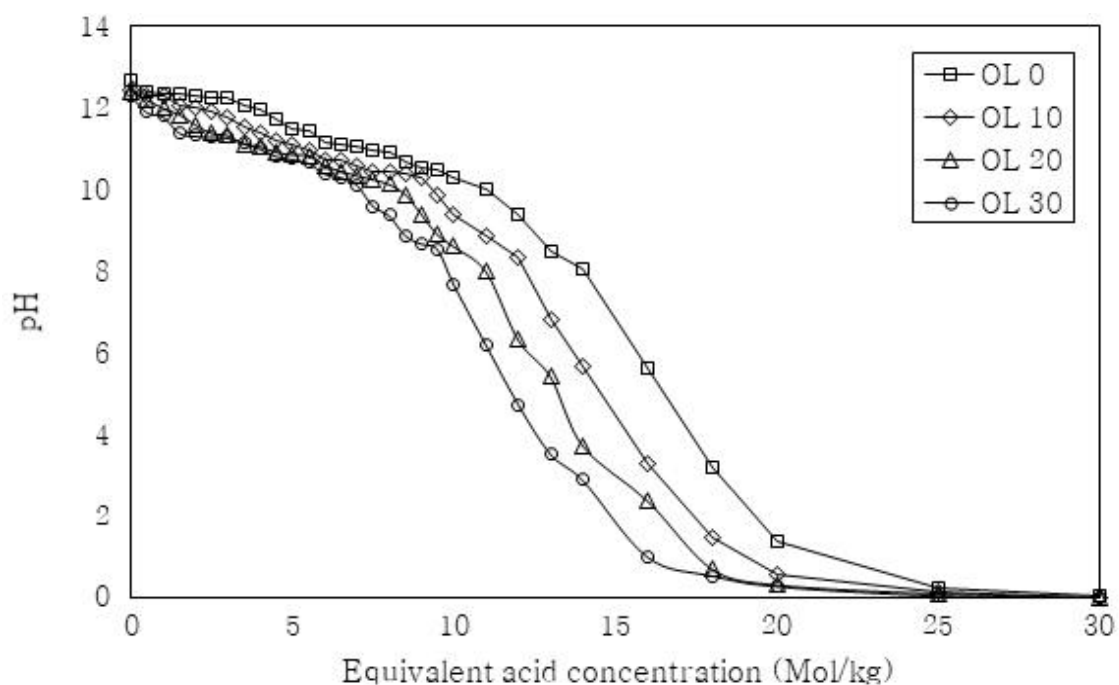
③ 연구 결과

OLED 시멘트 페이스트의 산 중화 능력 실험 결과는 [그림 2.25]와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 질산으로 제조된 용액의 당량농도(Equivalent acid concentration)가 증가할수록 OLED 치환율과 관계없이 용액의 pH는 감소하는 결과를 보였다. 한편 OLED 치환율이 증가할수록 pH 0에 도달하는 당량농도의 양이 감소하는 것을 알 수 있었다. 수용액 상태에서 철(Fe)의 Pourbaix diagram에 따르면 pH가 약 10 이하로 떨어지는 시점부터 철의 부동태 피막(Passive film)이 사라지면서 본격적인 부식이 시작되는데, 이를 기준으로 삼아 각 시편별 pH 10까지 도달하는데 요구되는 당량 농도를 계산하였다. OL 0의 경우 약 11.0 Mol/kg이었으며 이는 OLED 치환량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 pH 12.5 부근에서 저항하는 수산화칼슘(CH)의 양이 OLED 폐유리 미분말의 치환 및 포졸란 반응에 의해 감소했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 pH 저하에 따른 완충 능력만을 고려하였을 때 콘크리트 내

[표 2.13] 산 중화 능력 실험을 위한 수준별 당량농도

No.	Equivalent concentration (Mol/kg)	Sample weight (g)	4 M NNH_3 (ml)	Distilled water (ml)
1	0.0	4	0.00	50.00
2	0.5	4	0.50	49.50
3	1.0	4	1.00	49.00
4	1.5	4	1.50	48.50
5	2.0	4	2.00	48.00
6	2.5	4	2.50	47.50
7	3.0	4	3.00	47.00
8	3.5	4	3.50	46.50
9	4.0	4	4.00	46.00
10	4.5	4	4.50	45.50
11	5.0	4	5.00	45.00
12	5.5	4	5.50	44.50
13	6.0	4	6.00	44.00
14	6.5	4	6.50	43.50
15	7.0	4	7.00	43.00
16	7.5	4	7.50	42.50
17	8.0	4	8.00	42.00
18	8.5	4	8.50	41.50
19	9.0	4	9.00	41.00
20	9.5	4	9.50	40.50
21	10.0	4	10.00	40.00
22	11.0	4	11.00	39.00
23	12.0	4	12.00	38.00
24	13.0	4	13.00	37.00
25	14.0	4	14.00	36.00
26	16.0	4	16.00	34.00
27	18.0	4	18.00	32.00
28	20.0	4	20.00	30.00
29	25.0	4	25.00	25.00
30	30.0	4	30.00	20.00

철근 부식의 위험성은 OLED 혼입율이 증가할수록 높아진다고 판단할 수 있다. 하지만, 철근 깊이까지 탄산화가 진행되기 위해서는 상당히 많은 시간이 필요하므로 단기적인 관점에서는 위험성이 크게 증가한다고 말하기 어려울 것으로 사료된다. 뿐만 아니라 적당한 깊이까지의 탄산화는 탄산칼슘의 생성으로 인해 공극을 채울 수 있어 오히려 외부로부터 염소 이온과 같은 유해 이온의 침투 저항성을 증가시키는 결과를 낼 수 있다. OLED와 같은 폐유리를 시멘트 대체제로 사용한 많은 문헌에서 높은 비표면적 및 매끄러운 형상을 가진 폐유리 특성상 이온의 침투를 저해하는 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이온 침투 저항성 평가를 통해 추가적인 부식 위험성 검증이 필요할 것으로 사료된다.



[그림 2.25] OLED 혼입 시멘트 페이스트의 산 중화 능력 실험 결과

나. CO₂ 저감형 OLED 혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출

(1) OLED 혼입 콘크리트 기초물성 평가

(가) 연구 목적

콘크리트는 시멘트, 모래, 자갈 및 물 등의 재료를 일정한 비율에 맞게 혼합하여 경화시켜 사용하는 재료이다. 다양한 재료와 비율을 사용하므로 비균질성 및 다공성을 띄고 있기 때문에 콘크리트의 물리적 성질을 파악하는 것은 중요한 일이다. 본 연구에서는 OLED 혼입 콘크리트의 혼입율에 따른 슬럼프, 공기량, 압축강도, 휨강도 및 공극량 분석을 통하여 기초적인 물리적 성질을 파악하여 적절한 혼입율을 결정하는 것을 목적으로 하였다.

(나) 연구 내용

① 시편제작

시험분석에 사용되는 모든 종류의 콘크리트는 아래의 [표 2.14]와 같은 배합비에 따라 배합 되었다. 결합재로는 OPC와 OLED 분말을 사용하였다. OLED 분말의 치환율을 0%, 10%, 20% 및 30%로 10%씩 차이를 두어 배합비를 결정하였으며, 각각의 배합명을 0%-OL 0, 10%-OL 10, 20%-OL 20 및 30%-OL 30으로 명명하였다. 물-시멘트비는 0.4로 고정하였으며, 잔골재-결합재 비는 2, 굵은골재-결합재 비는 2.5로 하였으며, OLED와 OPC의 비중 차이에 의한 체적증가는 잔골재의 양을 조절하여 보정하였다.

[표 2.14] OLED 콘크리트 배합비 (kg/m³)

Concrete	Binder		Water	Sand	Gravel
	OPC	OLED			
OL0	403.3	0.0	161.3	806.6	1008.2
OL10	362.9	40.3	161.3	802.4	1008.2
OL20	322.6	80.7	161.3	798.2	1008.2
OL30	282.3	121.0	161.3	794.1	1008.2

기계적 혼합은 [그림 2.26]의 기계적 배합기를 사용하였으며, 결합재 및 골재만을 포함하여 건비빔 3분 후에 배합수를 포함하여 습비빔을 3분간 진행하였다. 혼합을 마친 콘크리트는 시험 종류에 따라 즉시 사용되거나 몰드에 타설되었다. 슬럼프와 공기

량 측정은 콘크리트 혼합 후 즉시 사용되었고, 압축강도의 경우 [그림 2.27]의 $\varnothing 100 \times 200$ mm 실린더몰드, 휨강도의 경우 [그림 2.28]의 $100 \times 100 \times 400$ mm 직사각몰드에 타설되어 24시간동안 기건 양생을 거치고([그림 2.29]), 탈형하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 조건에서 양생수조에서 요구재령일까지 수중양생 되었다.

[그림 2.26] 기계적 배합기

[그림 2.27] 실린더 몰드



[그림 2.28] 직사각 몰드

[그림 2.29] 타설 직후

② 슬럼프

슬럼프의 측정은 배합 직후 KS F 2425 콘크리트 슬럼프 시험에 준하여 이루어졌다. 바닥에 편편한 판을 바닥에 놓고 [그림 2.26]의 슬럼프 콘을 직경이 큰 부분이 판에 마주 닿게 올린다. 배합된 콘크리트를 슬럼프 콘 내부로 3회에 나누어 충전하며, 각 충전 횟수마다 25회씩 다짐봉을 활용해 다짐을 실시하였다. 슬럼프 콘 내부 충전 후 상단을 고르게 하여 콘을 천천히 연직으로 들어올린다. [그림 2.27]과 같이 콘크리트 중앙부에서 슬럼프 콘 상단까지와 높이 차이를 측정한다. 추가적으로, 슬럼프 콘의 상하를 바꾸고 위의 과정을 반복하여 [그림 2.28]과 같이 슬럼프 플로우를 측정했다.



[그림 2.30] 슬럼프 콘



[그림 2.31] 슬럼프 시험

[그림 2.32] 슬럼프 플로우 시험

③ 공기량

공기량의 측정은 배합 직후 KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법에 준하여 이루어졌다. 공기량 측정기의 형상 및 각부 명칭을 [그림 2.33]에 나타냈다. 우선 용기를 수평한 바닥에 놓고 콘크리트를 용기 내부로 3회에 걸쳐 충전하며, 각 충전 횟수 마다 다짐봉으로 25회 다짐을 실시하고 용기옆면을 고무망치로 두드려 다짐봉 자국을 제거 하였다. 뚜껑을 닫고 공기가 새지 않도록 뚜껑을 잠근 후 배기구에서 물이 넘칠 때 까지 주수구를 통해 물을 넣는다. 공기펌프 조작하여 압력을 초기압력보다 크게하고 약 5초 후에 작동밸브를 서서히 열어 압력계의 지침을 초기 압력의 눈금에 정확히 일치시킨다. 작동밸브를 열고 고압의 공기를 용기 내에 넣고 압력계의 지침이 안정되고 나서 공기량의 눈금을 읽어 겉보기 공기량을 결정한다.



(a) 전경

(b) 명칭

[그림 2.33] 공기량 측정기

④ 압축강도

압축강도의 측정은 KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법에 준하여 이루어 졌다. 우선 목표한 재령일까지 수중양생을 마친 콘크리트 시편을 편심의 영향을 배제하기 위해 [그림 2.34]의 콘크리트 연마기를 통해 양 끝단 면을 평평하게 연마하였다. 연마를 마친 시편은 [그림 2.35]과 같은 최대용량 2,000 kN의 만능 재료 시험기(Universal testing machine; UTM)를 이용하여 재하속도 150 kN/분의 하중제어방식으로 최대 강도를 측정 하였다. 모든 배합 설계에 대해 5개의 시편을 측정하여 평균값을 압축강도 값으로 사용하였다. [그림 2.36]과 [그림 2.37]에 시험 전후의 콘크리트시편을 나타냈다.



[그림 2.34] 콘크리트 연마기



[그림 2.35] 만능 재료 시험기



[그림 2.36] 압축강도 시험 전



[그림 2.37] 압축강도 시험 후

⑤ 휨강도

휨강도의 측정은 KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험방법에 준하여 이루어 졌다. 목표한 재령일 까지 수중양생을 마친 콘크리트시편을 4점 시험용 지그에 거치한 후 최대용량 2,000 kN의 UTM을 이용하여 재하속도 50 kN/분의 하중제어 방식으로 최대 강도를 측정하고 모든 배합에 대해 3개의 시편을 측정하여 평균값을 압축강도 값으로 사용하였다. [그림 2.38]와 [그림 2.39]에 시험 전후의 콘크리트 시편을 나타냈다.



[그림 2.38] 휨강도 시험 전



[그림 2.39] 휨강도 시험 후

⑥ 공극량

OLED 혼입 콘크리트의 공극구조 분석은 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry ; MIP)에 의해 이루어졌다. MIP는 수은 침투를 이용한 기공률 측정원 리로써 미세한 기공에 액체가 침투하는 모세관 현상을 이용한다. 수은과 같은 소수성(Hydrophobicity) 액체는 외부로부터 압력이 가해져야 기공 내 침투가 일어나며 기공의 크기가 작을수록 높은 압력이 요구된다. 측정결과를 압력에 따라 침투되는 수은의 누적부피의 함수로써 나타낸다. 임의의 압력에서 침투된 원형 기공의 직경은 [식 2.16]에 표현된 Washburn식에 의해 계산되어 질 수 있다.

$$R = \frac{2\sigma \cos\theta}{P} \quad \text{[식 2.16]}$$

여기서, R 은 기공반경(Pore radius), σ 는 수은주의 표면장력(485 dynes/cm), θ 는 접촉각(contact angle, 130°), P 는 압력(psi)이다.

OLED 치환율에 따른 콘크리트의 공극률 측정은 [그림 2.40]의 Micromeritics사의 Auto Pore IV 9500를 이용하여 최고 압력 60,000 psi까지 측정하였다. 공극의 측정 범위는 직경 $360\ \mu\text{m}$ 에서 3 nm까지 측정되었다. 분석을 위한 샘플은 콘크리트 시편을 분쇄하여 2-3 mm크기의 조각을 채취한 후 [그림 2.41]과 같이 알코올계 용매에 침지시켜 수화를 정지시켰으며, 진공데시케이터에서 충분히 건조시킨 후 분석을 진행하였다.



[그림 2.40] Auto Pore IV 9500 [그림 2.41] 콘크리트 수화정지

(다) 연구결과

① 슬럼프

슬럼프 및 슬럼프 플로우 시험 결과 값을 아래의 [표 2.15]와 [표 2.16]에 나타냈다. 슬럼프와 슬럼프 플로우 두 가지 시험 모두 OLED의 치환율이 증가 할수록 유동성도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 슬럼프의 경우 10%씩 치환율을 늘릴 경우 평균적으로 2.7% 만큼 값이 증가하는 것으로 나타났고, 슬럼프 플로우의 경우 10%씩 치환율을 늘릴 경우 평균적으로 3.0%씩 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 OLED 분말의 혼입량 증가에 따른 슬럼프 및 슬럼프 플로우의 증가 현상은 시멘트양의 상대적인 감소에 의한 것으로 판단된다. OLED 분말은 직접적으로 물과 반응하지 않고 시멘트에 비해 흡수율이 낮으므로 혼입량이 증가할수록 단위 시멘트당 차지할

수 있는 물의 양이 증가하므로 물-시멘트비가 상승하는 것과 동일한 효과를 나타낸 것으로 판단된다.

[표 2.15] OLED 혼입량에 따른 슬럼프(mm)

횟수	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
1	206	214	216	222
2	212	214	218	230
3	199	204	205	214
평균	205	210	213	222

[표 2.16] OLED 혼입량에 따른 슬럼프 플로우(mm)

횟수	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
1	667	682	691	733
2	678	688	717	738
3	696	703	736	763
평균	680	691	714	744

② 공기량

압력법에 의한 공기량 측정 결과를 [표 2.17]에 나타냈다. 공기량 측정 결과 2.48%~2.61% 사이의 값을 가지는 것을 알 수 있다. OLED 분말이 혼입되지 않은 OL 0의 경우에서 2.61%로 가장 높은 값을 나타냈으며, OL 30-2.55%, OL 10-2.48, OL 20-2.45% 순이었다. OL 0과 OL 10의 비교에서 0.13%로 가장 큰 차이를 나타냈지만 유의미하다고 판단될 만큼 값이 크지 않으며, 실험 중 발생할 수 있는 오차까지 생각한다면 OLED 치환율에 따른 특별한 경향이 없다고 판단된다.

[표 2.17] OLED 치환율에 따른 공기량(%)

횟수	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
1	2.64	2.46	2.47	2.44
2	2.63	2.50	2.44	2.54
3	2.55	2.47	2.43	2.66
평균	2.61	2.48	2.45	2.55

③ 압축강도

OLED 혼입 콘크리트의 압축강도 시험에 의해 측정된 결과 값을 [그림 2.42]에 나타내었다. 모든 배합에서 재령일이 증가함에 따라 압축강도가 함께 증가하는 것을 확인되었으며, 1일과 3일의 차이에서 가장 높은 강도상승률을 나타내었다. 상대적으로 초기인 재령 1-14일까지는 OPC 콘크리트(OL 0)에서 가장 높은 강도발현을 나타냈으나 28일 이후로는 OLED 분말이 혼입된 시편에서 OPC 콘크리트의 강도를 초과하는 모습을 나타내었으며, 그 차이는 점차 증가하여 재령 365일의 OL 0 및 OL 30 시편 압축강도에서 최대 16 MPa의 차이가 확인되었다.

또한 OLED 분말의 혼입율에 따른 강도의 차이가 나타났다. 재령 14일까지는 혼입률이 낮을수록 높은 강도의 발현을 보이다가 재령 28일 이후 경향은 반대되어 혼입률이 높을수록 높은 강도의 발현을 보였다. 그 후 그 격차는 점차 증가하는 경향을 나타냈다.

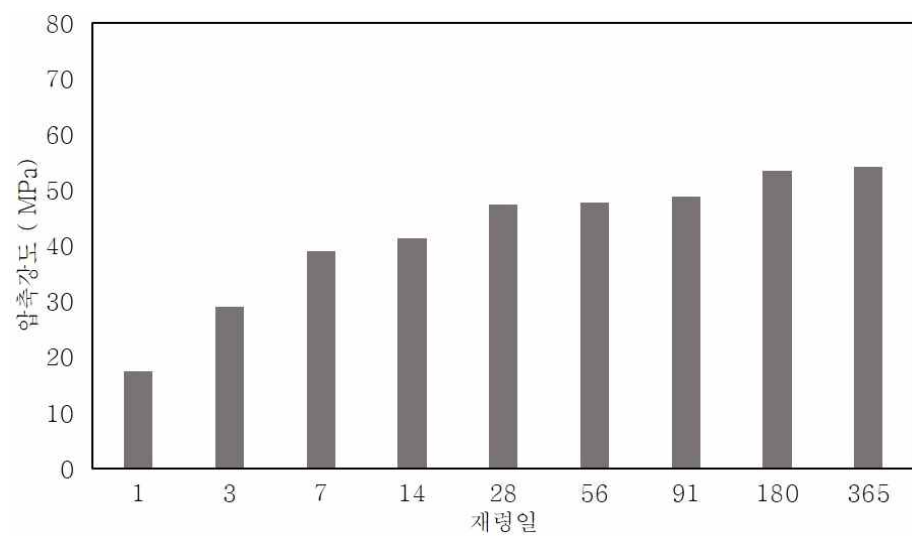
이와 같은 경향으로 강도가 발현된 원인은 포졸란 반응에 의한 C-S-H gel 생성에 의한 것으로 판단된다. 일반적으로 C-S-H gel은 콘크리트 내 공극을 채움으로써 밀실하게 하여 압축강도 증진에 기여한다고 알려져 있다. 하지만 포졸란반응은 수화반응에 비해 비교적 느리게 발현되므로 초기에는 OPC 콘크리트에 비해 낮은 강도를 나타내지만 중장기 재령으로 진행됨에 따라 높은 강도의 발현을 보이게 된다. 또한 혼입율이 높을수록 포졸란 반응을 일으킬 SiO_2 성분이 다량 포함되므로 장기재령에서의 강도발현에 유리하다고 판단된다.

④ 휨강도

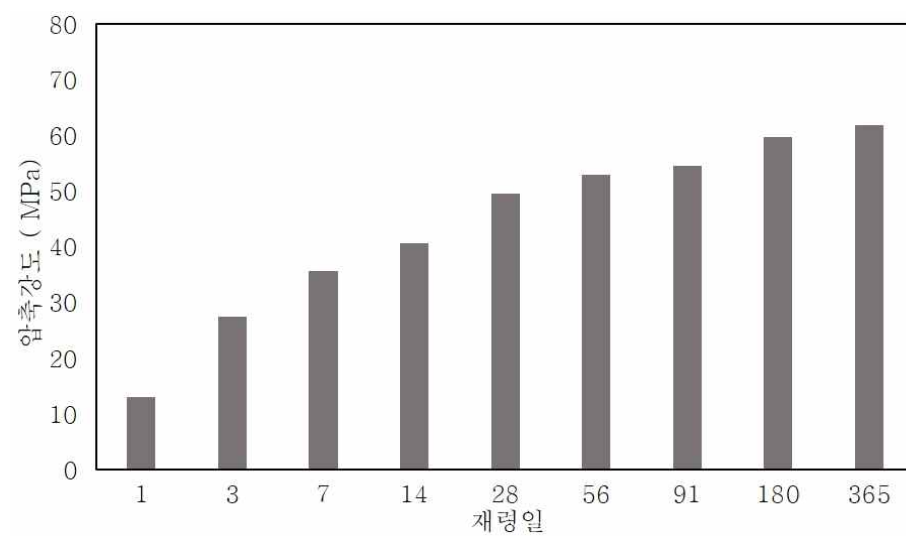
OLED 혼입 콘크리트의 휨강도 시험에 의해 측정된 결과 값을 [그림 2.43]에 나타내었다. 휨강도 역시 압축강도와 마찬가지로 초기에는 OPC 콘크리트에서 높은 강도의 발현을 나타냈으나, 재령의 중장기화가 진행됨에 따라 포졸란 반응이 촉진되어 OLED 분말의 혼입률이 높은 콘크리트의 경우가 더 높은 강도의 발현을 나타냈다.

⑤ 공극량

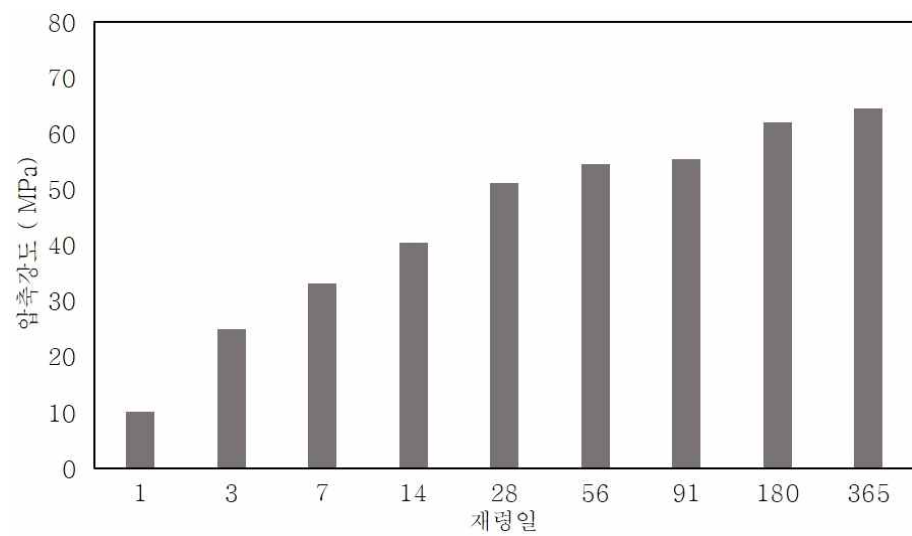
OLED 혼입 콘크리트의 수은 압입법에 의한 공극률 및 평균 공극크기를 [표 2.18], 공극 크기별 누적 수은압입량 곡선을 [그림 2.44]에 나타냈다. [표 2.18]에서 치환율에 관계없이 재령일의 증가와 함께 공극률이 감소하는 것을 확인 할 수 있었고, 180일 이후부터 OLED의 치환율이 높아짐에 따라 공극률도 함께 상승하는 것으로 나타났다.



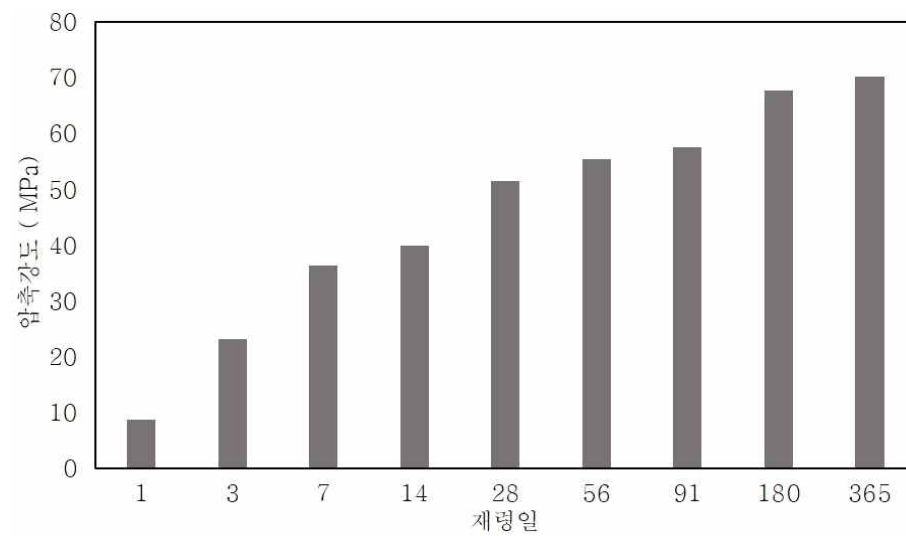
(a) OL 0



(b) OL 10

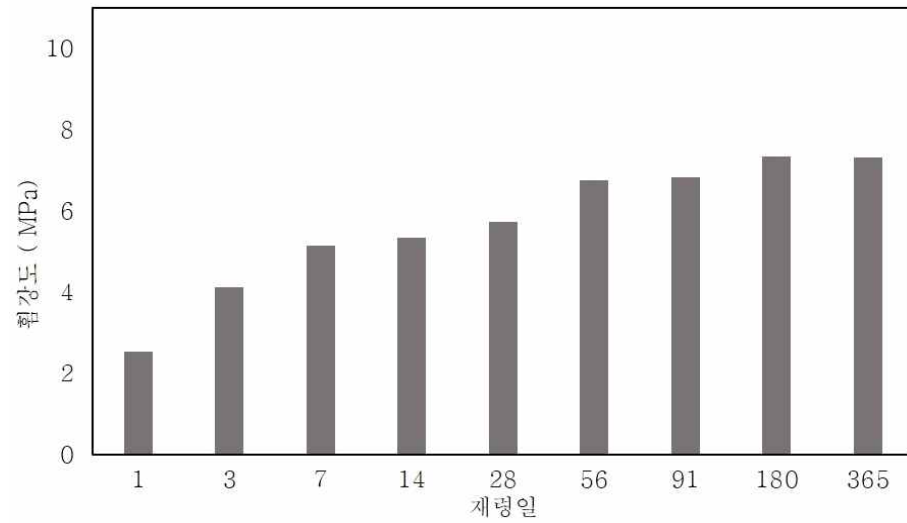


(c) OL 20

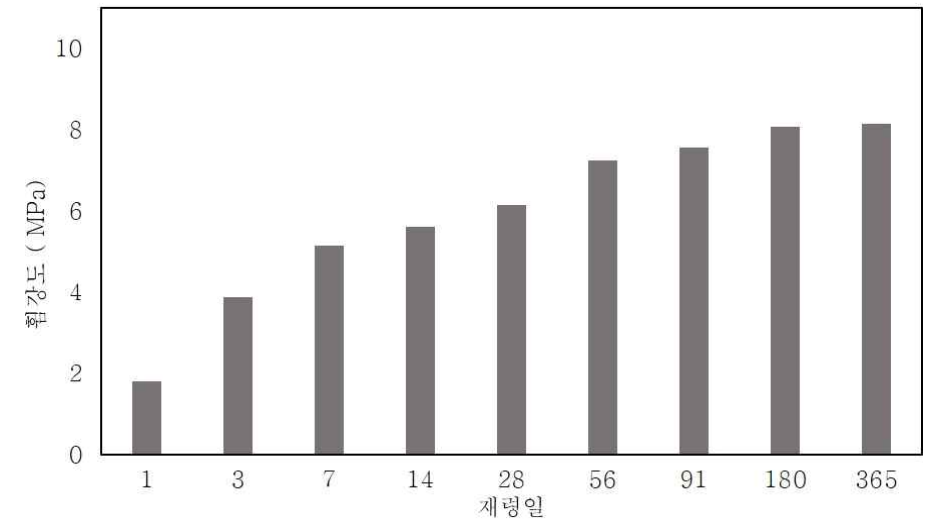


(d) OL 30

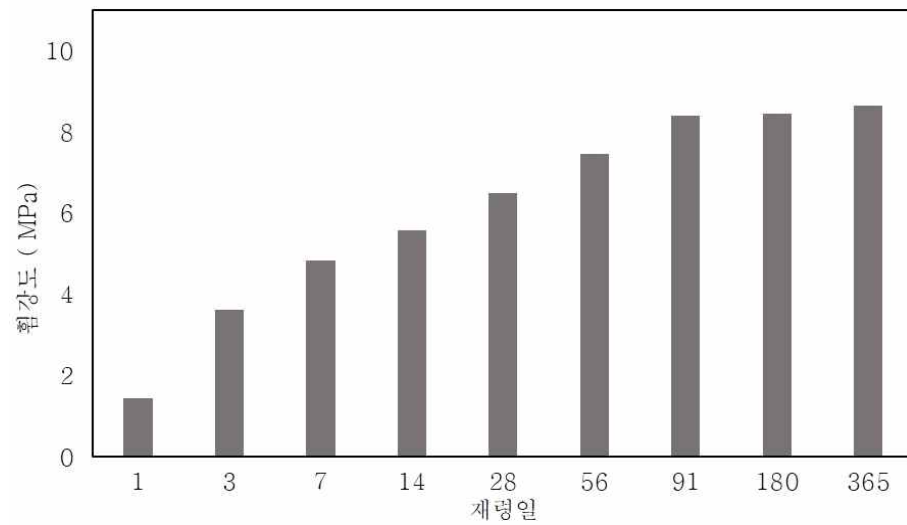
[그림 2.42] OLED 치환율별 압축강도



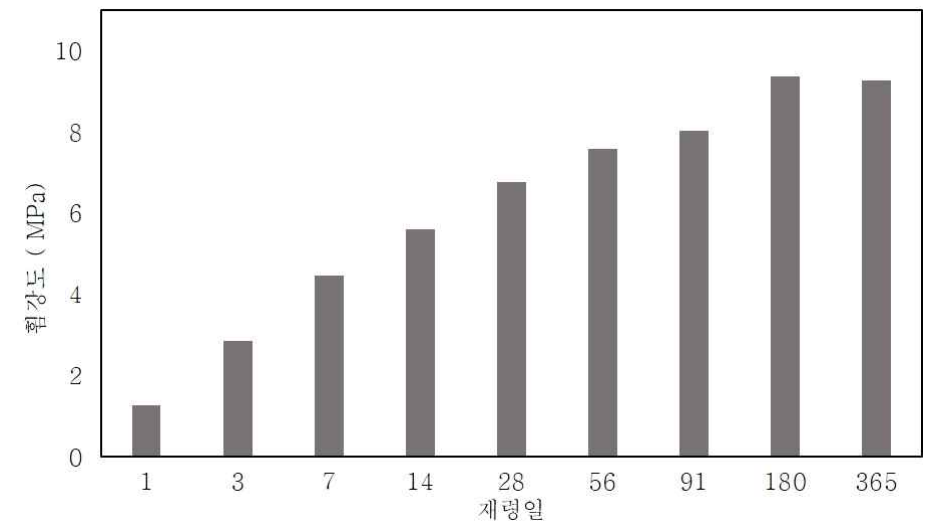
(a) OL 0



(b) OL 10



(c) OL 20



(d) OL 30

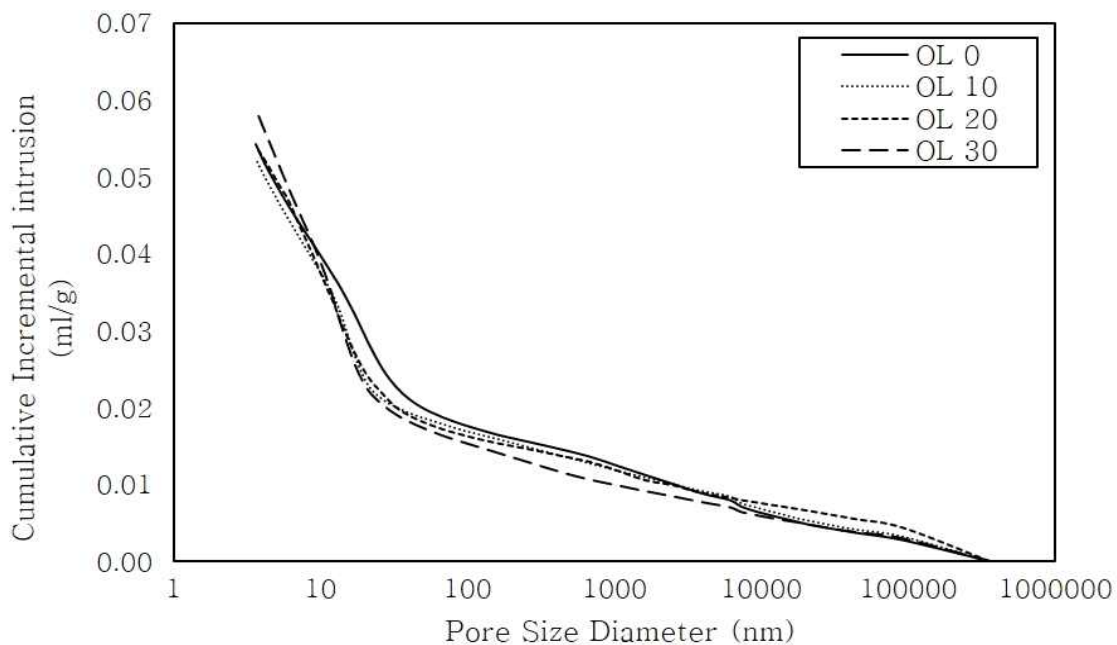
[그림 2.43] OLED 치환율별 힘강도

또한, 치환율에 관계없이 재령일의 증가와 함께 평균 공극크기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 재령 28일에서 265일 동안 평균적으로 약 33% 정도의 공극 크기가 감소하였다. 또한, OLED 치환율이 높아짐에 따라 평균 공극의 크기가 감소하는 것을 확인 가능하며, 그 값은 최대는 OL 0 과 OL 30의 비교에서 35%로 나타났다.

결론적으로 OLED의 혼입은 콘크리트가 포함하는 공극의 양은 증가시키고, 그 공극의 평균크기는 감소시키는 것으로 나타났다. 이와 같은 반응은 포졸란 반응에 기인한 것으로 OLED 분말의 SiO₂성분이 수산화칼슘을 만나 C-S-H gel 이 생성되는 과정에서 gel공극이 생성되며, gel공극은 매우 작은 크기의 공극을 가지므로 평균 공극 크기를 감소시킨 것으로 판단된다.

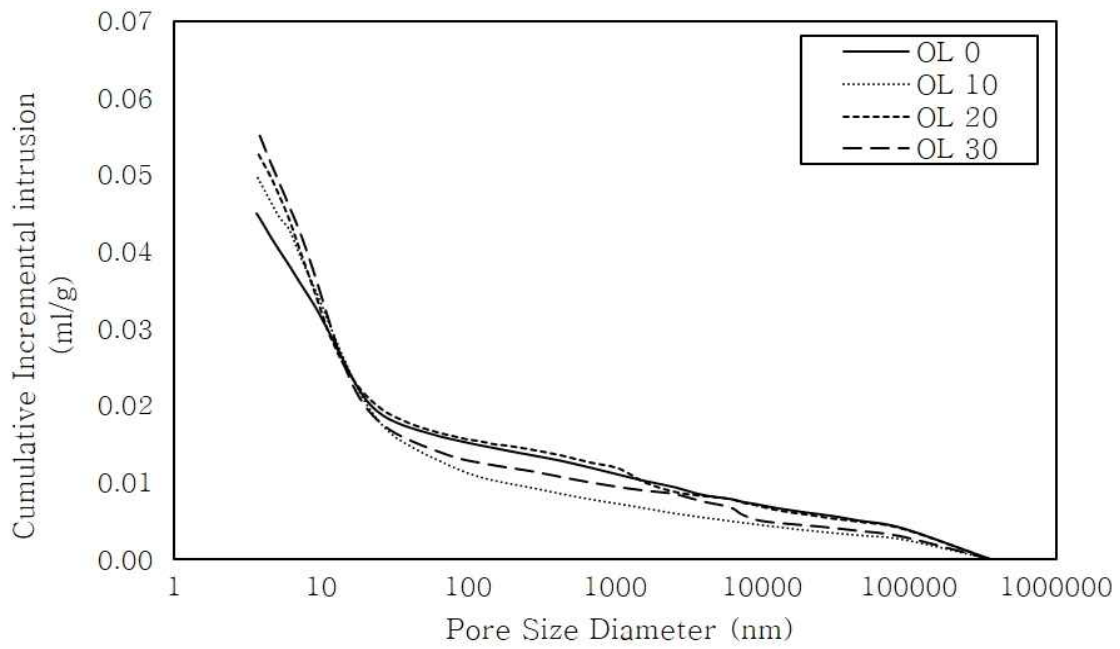
[표 2.18] 재령에 따른 OLED 콘크리트의 공극률 및 평균 공극 크기

재령(일)		OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
공극률 (%)	28	11.27	10.86	11.25	12.84
	180	9.63	10.45	10.72	11.01
	365	8.10	9.83	10.02	10.47
평균 공극 크기 (nm)	28	23.05	17.43	17.27	14.46
	180	17.58	15.23	13.14	12.64
	365	15.04	11.58	10.56	10.51

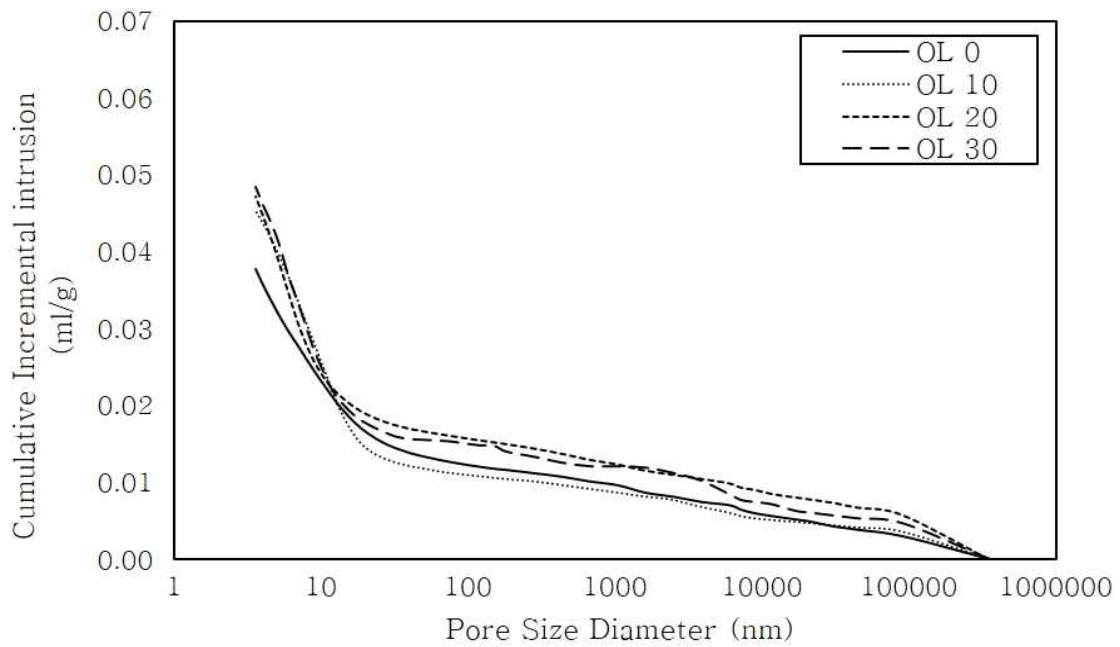


(a) 28일

[그림 2.44] 재령별 OLED 콘크리트의 수은압입량 누적 곡선(계속)



(b) 180일



(c) 365일

[그림 2.44] 재령별 OLED 콘크리트의 수은압입량 누적 곡선

(2) OLED 혼입 콘크리트 내구성능 평가

(가) 탄산화 저항성

① 연구 목적

OLED 혼입 콘크리트의 탄산화에 의한 CO_2 흡수량 계산 및 내구성능을 평가하기 위해 탄산화 환경 노출시간에 따른 탄산화 진행 깊이를 분석하는 것을 목적으로 한다. 골재를 포함하고 있는 콘크리트의 경우 페이스트와 다른 탄산화특성을 나타낸다. 확산에 의한 탄산화는 시멘트 수화물 및 그것의 화합물사이에서 발생하므로 상대적으로 단위시멘트량이 적은 콘크리트의 경우 탄산화 속도가 시멘트 페이스트에 비해 빠른 것이 일반적이다.

② 연구 내용

㉠ 콘크리트 배합 및 타설

탄산화 깊이분석에 사용할 콘크리트의 배합 및 타설은 ‘(1) OLED 혼입 콘크리트 기초물성 평가’의 휨강도 측정 시편과 동일하게 하였다.

㉡ 시편 전처리

28일 동안 수중양생을 마친 페이스트 시편은 앞선 페이스트 탄산화 실험과 마찬가지로 콘크리트 절단기를 이용하여 $50 \times 50 \times 100$ mm의 직사각형 모양으로 절단하였고, 불필요한 탄산화를 배제하기 위해 시편의 길이방향 양쪽 단면을 제외하고 에폭시 코팅을 진행 하였다. [그림 2.45]과 같이 48동안 에폭시를 건조시킨 후에 [그림 2.46]과 같이 탄산화 챔버에서 촉진 실험을 진행하였다.



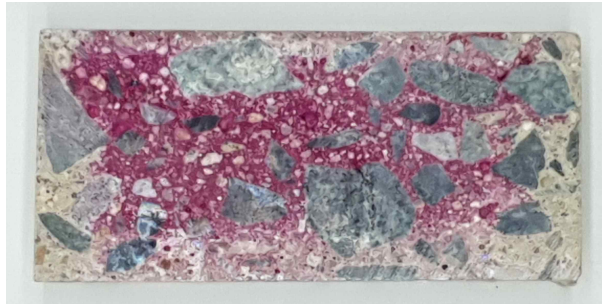
[그림 2.45] 에폭시 건조



[그림 2.46] 탄산화 실험 전경

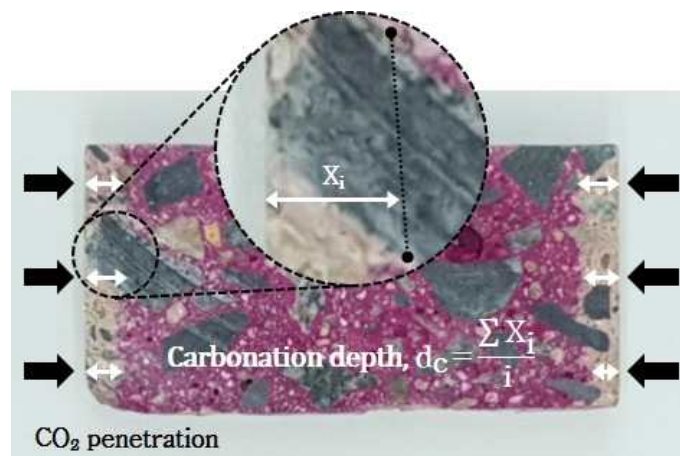
㉔ 분석방법

탄산화 측진을 위해 CO₂ 농도 3%, 온도 20±2℃, 상대습도(RH) 60%의 챔버에서 1, 2, 4, 8, 16 및 32주 동안 노출 시켰다. 이후 탄산화 진행방향과 동일한 방향으로 시편을 절단하고 절단면을 대상으로 KS F 2596 콘크리트 탄산화 깊이 측정 방법에 따라 95%에탄올 90 ml + 증류수 10 ml 용액에 페놀프탈레인 분말 1 g을 용해시킨 지시약을 제조하여 분무하였다. 페놀프탈레인을 적용한 콘크리트 시편을 [그림 2.47]에 나타냈다.



[그림 2.47] 페놀프탈레인 시약이 도포된 콘크리트 시편

OLED 혼입 콘크리트의 탄산화 깊이 산정은 ‘(2) OLED 페이스트의 탄산화 저항성 평가’와 달리 골재로 인해 이원화가 원활히 진행되지 않아 버니어 캘리퍼를 이용하여 탄산화 깊이를 측정하였다. [그림 2.48]와 같이 0.1 mm 축적으로 시편 양단에서 각 3개 지점의 깊이를 측정하였고, 이의 평균 값을 이용하였다. 골재가 있을 경우 탄산화가 진행된 경계면 양 끝점을 연결하는 선을 그어 해당 깊이까지의 길이를 탄산화 깊이로 가정 하였다.



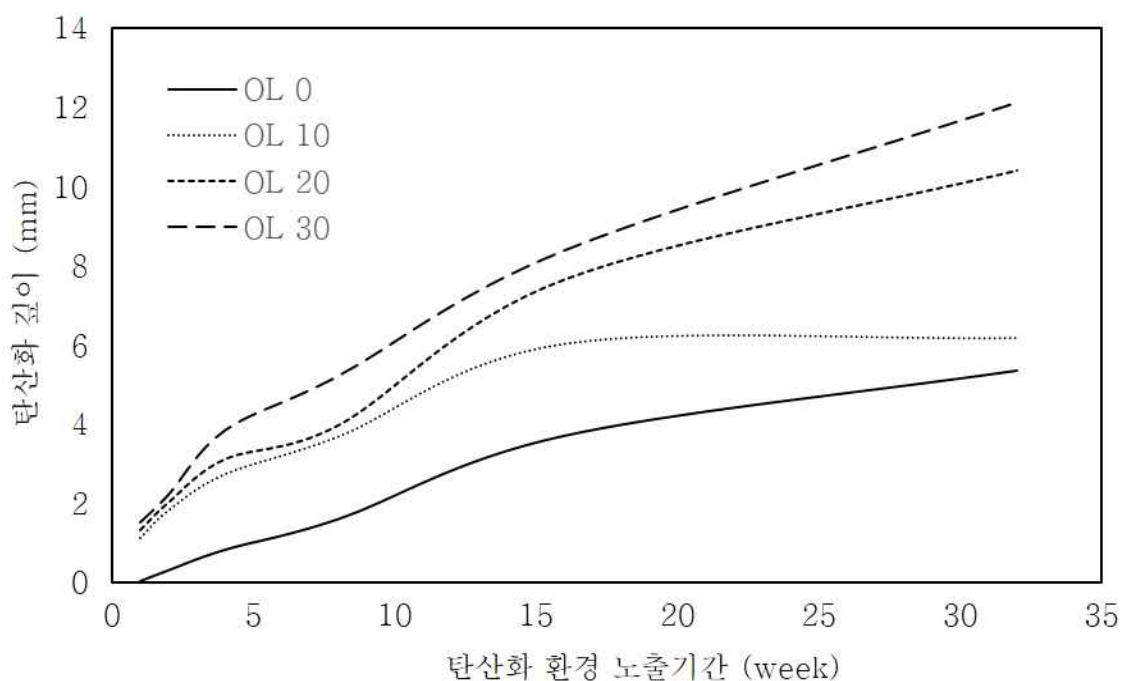
[그림 2.48] 페놀프탈레인 시약이 도포된 콘크리트 시편

③ 연구 결과

OLED 혼입 콘크리트의 32주 동안의 급속 탄산화 환경에 노출된 시편에 페놀프탈레인 용액을 분무하여 발색되지 않은 면 즉, 탄산화 깊이를 측정하였고 해당 결과는 [그림 2.49]와 같다([그림 2.50] - [그림 2.53] 참고). 모든 배합은 노출시간이 증가함에 따라 탄산화 깊이 또한 증가하는 경향을 나타냈다. 특히, OLED 혼입율과 관계없이 OL 0과 비교하여 낮은 탄산화 저항성을 보였는데, 이는 포졸란 반응으로 인한 콘크리트 내 수산화칼슘 함량의 감소 때문인 것으로 사료된다.

대기 중 CO_2 가 콘크리트내부로 침투하는 과정에서 여러 가지 화합물과 탄산화 반응이 일어나는데 이 중 일차적으로 반응하는 수화물은 수산화칼슘이다. 하지만, OLED를 혼입한 콘크리트의 경우 포졸란 반응으로 인해 수산화칼슘을 우선적으로 소비하여 더 많은 양의 CO_2 침투를 허용한다. 반대로 OLED를 혼입하지 않은 OL 0의 경우 충분한 양의 수산화칼슘이 존재하고 이는 유입된 CO_2 와 반응하여 다량의 탄산칼슘을 형성한다.

생성된 탄산칼슘은 수산화칼슘과 비교하여 높은 밀도를 가지므로 탄산화가 진행될수록 콘크리트 내 공극구조를 치밀하게 만들어 더 이상의 CO_2 침투를 제한하고, 이러한 현상은 콘크리트 표면에서부터 발생하여 결과적으로 탄산화 반응을 느리게 만드는 원인으로 작용할 수 있다.



[그림 2.53] 탄산화 노출 기간에 따른 탄산화 깊이

(나) 염소 이온 침투 저항성

① 연구 목적

OLED 혼입 콘크리트의 염소이온 침투 저항성을 평가하여 혼입량에 따른 내구성능을 평가하는 것을 목적으로 한다. 철근 콘크리트에서 철근 부동태 피막에 파괴를 유발할 수 있는 이온 중에 가장 유해한 이온은 염소이온이며, 염소이온은 결함이 있는 피막에 작용하여 파괴를 유발하게 되며 철근 표면에 공식을 일으키게 되기 때문에 염소이온의 침투를 방지 것은 중요하다. 이온의 침투속도는 여러 가지 요인에 의해 변하기 때문에 정확하게 판단하기 어려우며, 직접 실험에 의해 침투계수를 구하는 것이 가장 효과적이다.

② 연구 내용

㉠ 콘크리트 배합 및 타설

탄산화 깊이분석에 사용할 콘크리트의 배합 및 타설은 ‘(1) OLED 혼입 콘크리트 기초물성 평가’의 휨강도 측정 시편과 동일하게 하였다.

㉡ 시편 전처리

앞선 탄산화 실험과 동일한 28일 재령의 $50 \times 50 \times 100$ mm의 직사각형 에폭시 코팅 실험체를 사용하여 [그림 2.50]과 같이 0.5 M 농도의 염소이온 용액에 침지하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 환경에서 365일 동안 유지하였다. 침지가 완료된 후에 침투저항성을 평가하기 위해 시편을 염소이온 침투 면을 시작점으로 3 mm 간격으로 [그림 2.51]과 같이 절단하였다. 절단된 시편은 진공 챔버를 활용해 24시간 동안 건조 후 $150 \mu\text{m}$ 체에 걸러 통과한 분말 시료를 채취하였다.

[그림 2.50] 콘크리트 시편 침지 [그림 2.51] 콘크리트 시편 깊이별 커팅

㉔ 분석방법

‘가. 탄산화를 통한 대기 중 CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발, (4) OLED 페이스트의 철근 부식 위험성 평가, (가) 염소이온 고정화 능력’ 과 동일한 절차로 염소이온 농도를 측정하였다. 이 때, 총 염소 이온 농도 측정을 위해 증류수 대신 2.0 M 질산을 이용하여 용액을 제조하였다. 측정된 염화물의 농도를 [식 2.17]의 형태로 회귀 분석하여 확산계수를 구한다.

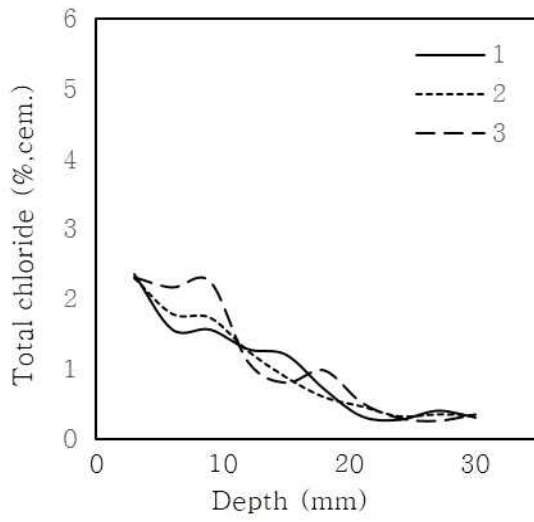
$$C(x,t) = C_i + (C_o - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} \right) \right] \quad [\text{식 2.16}]$$

여기서, $C(x,t)$ = 시간 t 동안의 깊이 x 에 대한 염소이온 농도 (mass %), C_i = 초기 염소이온 농도 (mass %), C_o = 외부 염소이온 농도 (mass %), x = 노출 표면으로부터의 깊이 (m), t = 노출시간 (s), D = 염소이온 확산계수 (m²/s), $\operatorname{erf}()$ = 오차함수이다.

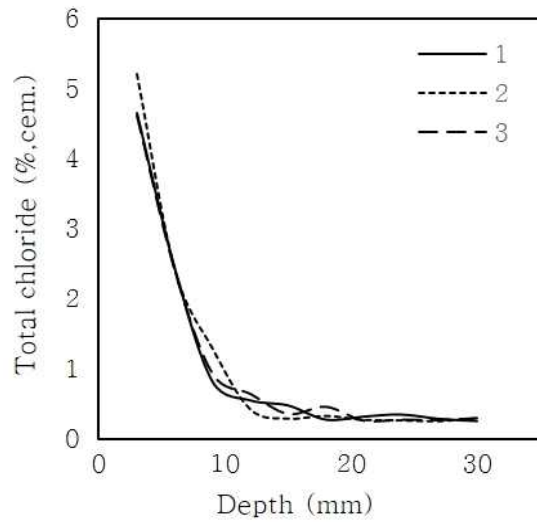
㉕ 연구 결과

OLED 혼입 콘크리트를 대상으로 염화물 침투시험을 시료당 3회 측정하여 값을 [그림 2.52]에 나타내었다. 모든 배합에서 콘크리트의 깊이가 증가할수록 염화물의 농도는 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 OLED가 혼입된 시료는 표면에서의 염화물 농도가 높게 나온 반면 OLED가 혼입 되지 않은 OL 0은 그렇지 않은 것으로 나타났다. 하지만 OLED가 혼입된 콘크리트는 깊이가 증가함에 따라 급격한 염화물 농도의 감소를 나타냈다.

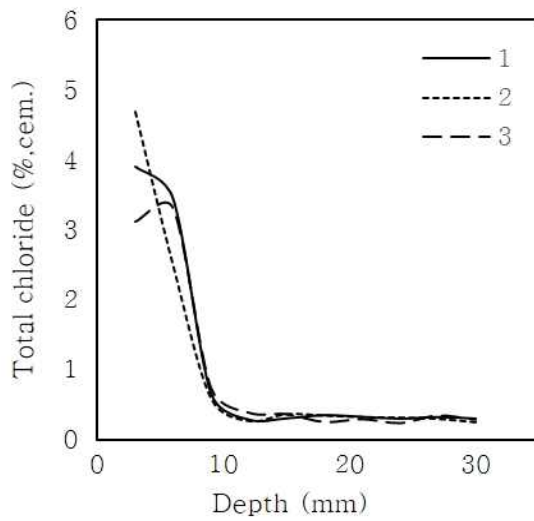
측정된 콘크리트 깊이별 염화물 농도 값을 토대로 염소이온 확산계수 값을 계산했으며, 그 값을 [표 2.19]에 나타냈다. OLED를 포함하지 않은 OL 0이 가장 높은 침투계수를 가지며, OL 30, OL 20 및 OL 10 순서로 높은 침투계수를 나타냈다. 확산계수는 얼마만큼 빠르게 염소이온이 콘크리트 내부로 침투하는가를 나타내는 것으로 높을수록 확산이 빠르게 일어난다. 따라서 OLED의 혼입은 콘크리트의 염소이온 침투저항성을 향상시키므로 내구성향상에 기여할 것으로 판단된다.



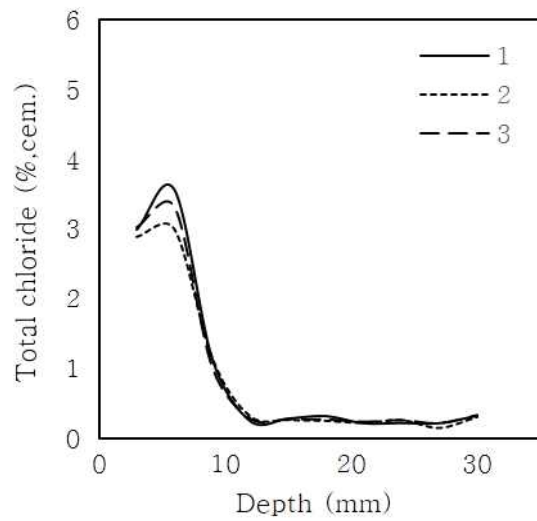
(a) OL 0



(b) OL 10



(c) OL 20



(d) OL 30

[그림 2.52] 콘크리트 깊이에 따른 염화물 침투율

[표 2.19] OLED 혼입 콘크리트의 염소 이온 확산계수($\times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$)

횟수	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
1	41.9	4.9	6.66	10.4
2	38.5	4.81	4.08	10.3
3	38.9	5.33	8.95	9.68
평균	39.77	5.01	6.56	10.13

(3) CO₂ 흡수 능력 평가

(가) 연구 목적

앞서 수행된 OLED 혼입 시멘트 페이스트의 탄산화 관점에서의 CO₂ 흡수량 평가 방법을 바탕으로 OLED 폐유리 미분말을 활용한 콘크리트의 급속 탄산화 깊이 결과를 적용하여 CO₂ 흡수량을 계산하였다.

(나) 연구 내용

① [CO₂] 및 Area

‘가. CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발, (3) OLED 페이스트의 CO₂ 흡수 능력 평가’와 동일한 값을 적용하였다.

② Carbonation depth

OLED 혼입 콘크리트의 급속 탄산화 저항성 평가 결과를 활용하여 ‘가. CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발, (3) OLED 페이스트의 CO₂ 흡수능력 평가’와 동일한 방법으로 탄산화 속도 계수 및 시간에 따른 탄산화 깊이를 계산하였다. 계산 결과는 [표 2.20] 및 [표 2.21]과 같다.

[표 2.20] OLED 혼입 콘크리트의 탄산화 속도 계수

	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
Carbonation coefficient, α	5.91	8.98	12.71	14.78

[표 2.21] OLED 혼입 콘크리트의 시간에 따른 탄산화 깊이

Exposure time (yrs)	Carbonation depth(mm)			
	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
10	24.32	29.97	35.64	38.45
20	48.64	59.94	71.29	76.89
30	72.96	89.91	106.93	115.34

③ m_{CO_2}

위 과정을 토대로 계산된 OLED 혼입 콘크리트의 CO_2 흡수량은 [표 2.22]와 같다.

[표 2.22] 시간에 따른 OLED 혼입 콘크리트의 CO_2 흡수량

Exposure time (yrs)	Carbonation adsorption (kg/m^3)			
	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
10	1.64	1.90	2.15	2.25
20	3.28	3.79	4.20	4.49
30	4.92	5.69	6.44	6.74

OLED 혼입 콘크리트의 10, 20 및 30년의 CO_2 흡수량을 산정해본 결과 혼입율이 높아질수록 흡수량도 함께 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 급속 탄산화 환경 노출 기간 30년을 기준으로 OLED 혼입이 30%일 경우 CO_2 흡수량은 36.9% 정도 상승하는 것으로 나타났다.

다. OLED 혼입 콘크리트 시제품 제작 및 경제성 분석

(1) 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 탄산화 저항성 평가

(가) 연구 목적

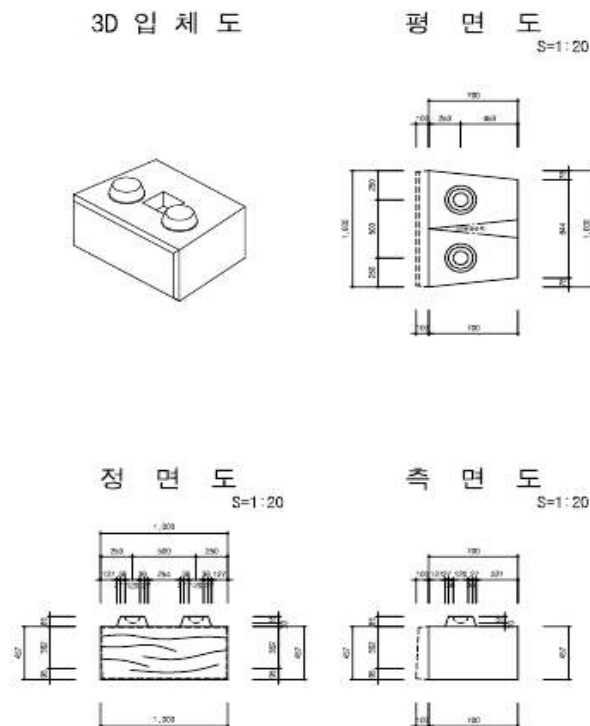
본 연구의 최종 목표에 따라 실제 환경에서 OLED 혼입 콘크리트를 적용하였을 때 시멘트 대체 사용 및 탄산화를 통한 CO₂ 흡수에 따른 저감 효과를 검증하고자 시제품을 제작하여 옥외 폭로를 실시하였다. 별도의 규격이 존재하지 않으므로 비구조체 이면서 노출 면적을 최대화할 수 있는 구조물을 검토한 결과 프리캐스트 옹벽이 가장 적합한 것으로 판단되었다.

(나) 연구 내용

① 배합 설계

OLED 혼입 콘크리트 옹벽의 배합설계는 앞선 연구와 동일하게 진행하였다.

② 도면



[그림 2.53] 프리캐스트 콘크리트 옹벽 설계도면

③ 시제품 제작

[그림 2.54] OLED 혼입 콘크리트 용벽 시제품

④ 탄산화 깊이 측정 및 결과

OLED 혼입 콘크리트 용벽의 실제 환경에서의 탄산화 저항성 평가를 위해 프리캐스트 제작 공장 근처(충북 충주시 엄정면 김생로)에서 옥외 폭로 후 일정 시간 간격으로 [그림 2.55]와 같이 코어링을 실시하였다. 옥외 환경 탄산화 실험은 4, 8, 16 및 32주 동안 진행되었으며 채취한 시편([그림 2.56])은 탄산화 깊이 측정을 위해 [그림 2.57]처럼 UTM을 이용하여 할렬 파괴를 유도하였다. 이후 탄산화 깊이 측정 과정은 ‘가. CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발, (2) OLED 페이스트의 탄산화 저항성 평가, (나) 탄산화 깊이 ‘와 동일하게 진행하였다.



[그림 2.55] 콘크리트 코어링

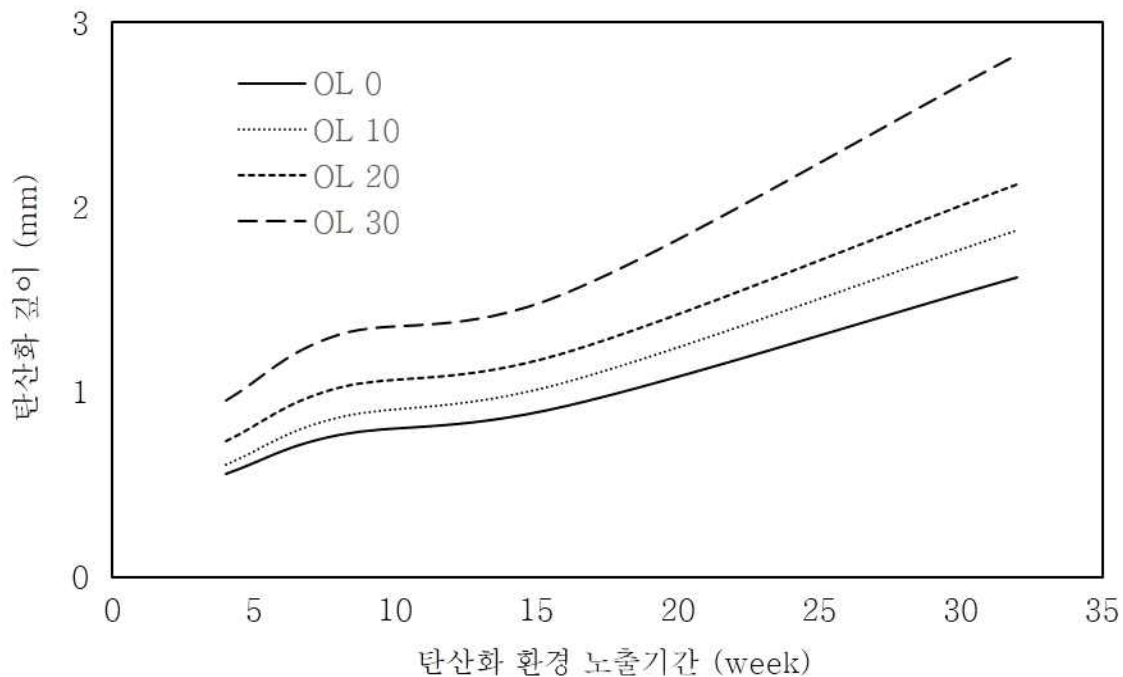


[그림 2.56] 코어링 시편



[그림 2.57] 할렬 파괴

OLED 혼입 콘크리트의 32주 동안의 옥외 탄산화 실험의 결과 값을 [그림 2.58]에 도시하였다. 옥외 폭로 32주의 결과에서 급속 탄산화 대비 평균 1/4 수준의 탄산화 깊이를 나타냈으며, 탄산화 깊이는 OL 30, OL 20, OL 10 및 OL 0 순으로 OLED 함량에 대해서는 급속 탄산화 실험과 비슷한 경향을 보여 주었다.



[그림 2.58] 탄산화 노출 기간에 따른 탄산화 깊이

(2) 전 생애주기 관점에서의 경제성 분석

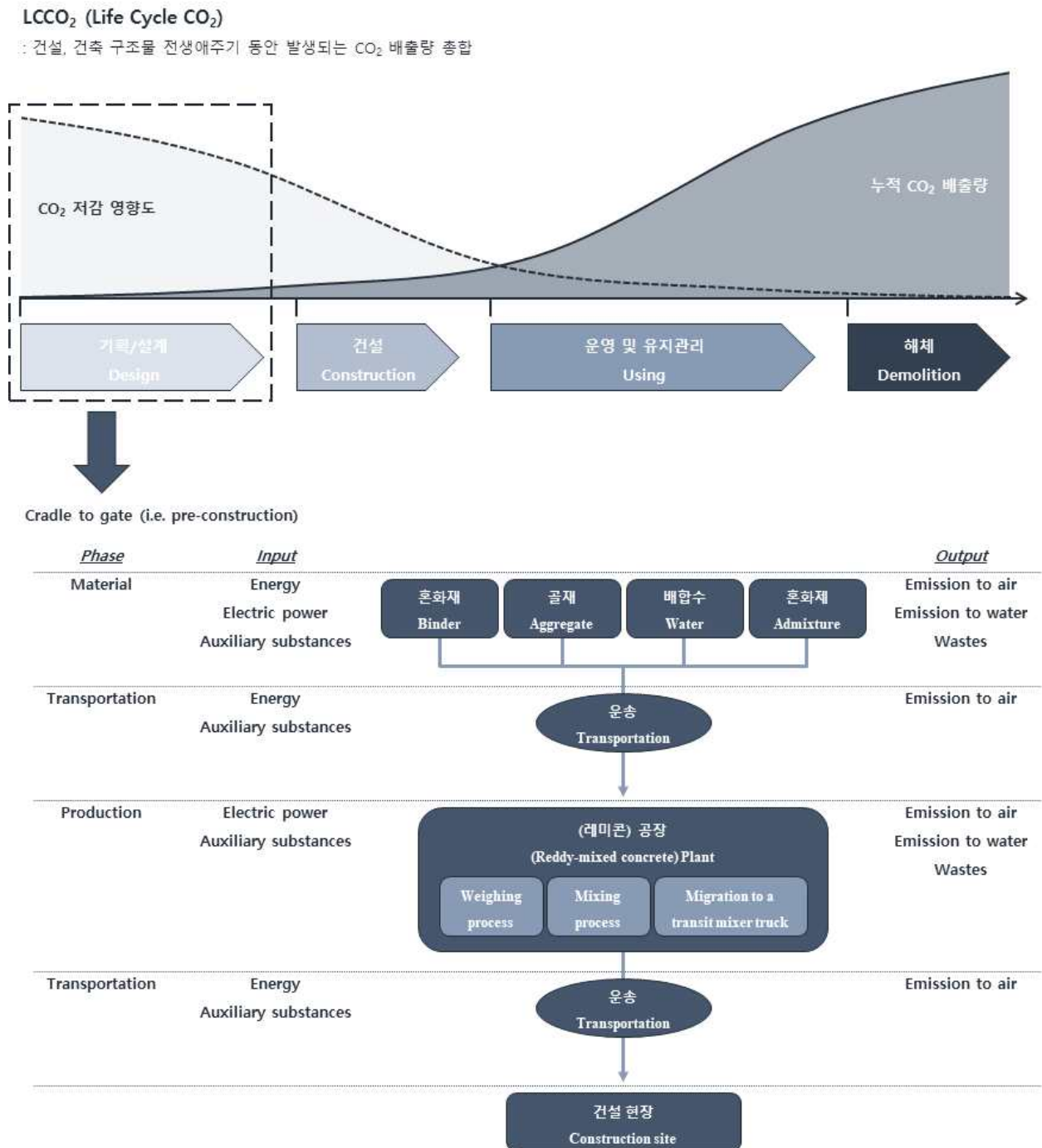
(가) 연구 목적

앞서 도출한 OLED 콘크리트의 탄산화 특성을 바탕으로 치환율별 CO₂ 흡수량을 산정하는 것을 목적으로 한다. OLED 콘크리트의 실제적인 CO₂ 흡수량을 비교하기 위해 탄산화 가능 수화물 및 클링커를 정의하고 탄산화 속도계수를 산정 하여 시간에 따른 CO₂ 흡수량을 평가하였다.

(나) 연구 내용

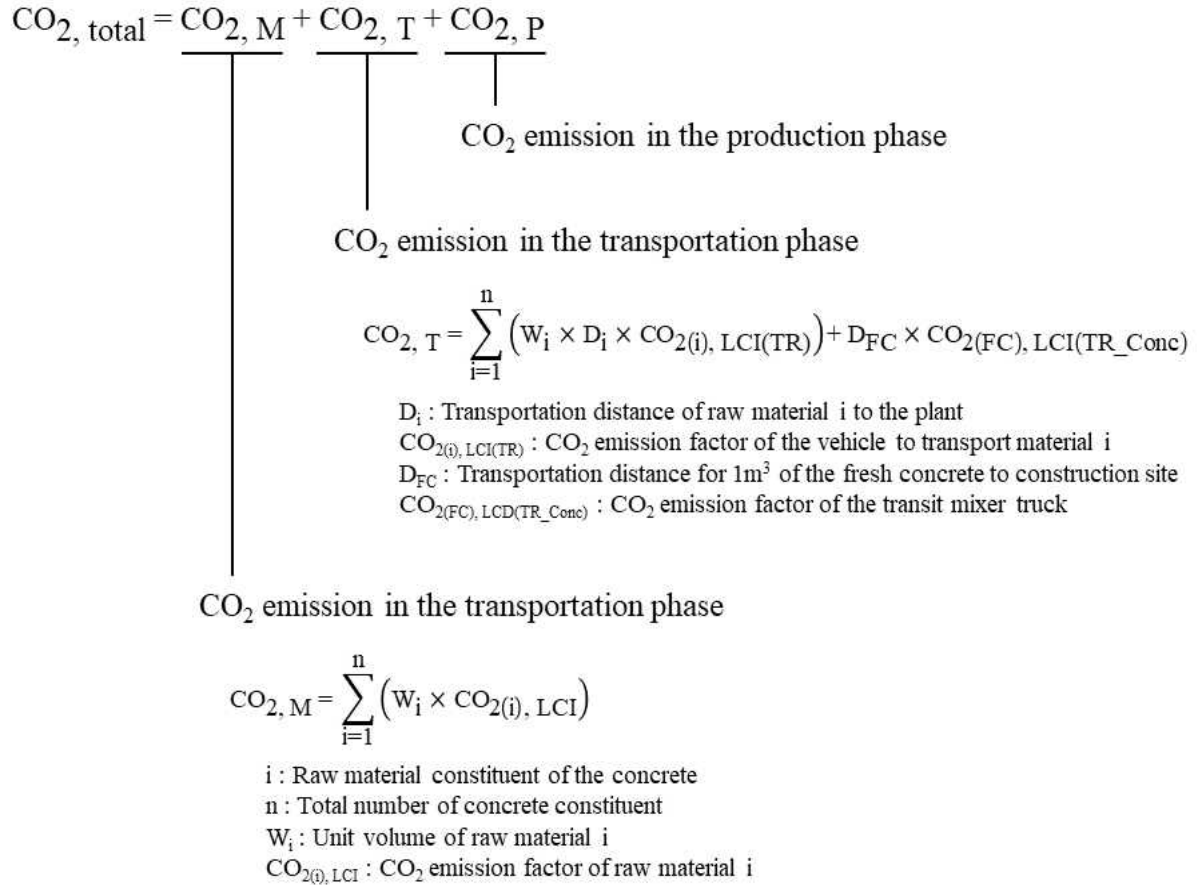
콘크리트를 활용한 건설, 건축 구조물의 전생애주기 중 CO₂ 저감을 가장 효과적으로 이끌어 낼 수 있는 과정은 기획/설계 단계이다. 아래의 [그림 2.59]에서 기획/설계외의 과정들은 콘크리트 구조물이라는 가정 하에 비슷한 건설방식, 운영 및 유지관리, 해체 과정이 진행되기 때문에 획기적인 CO₂ 발생량 저감을 이끌어 내기 어려운

실정이다. 이에 본 연구에서는 콘크리트 구조물의 기획/설계 단계에서 OLED 혼입 콘크리트를 적용하여 OPC 콘크리트에 비해 CO₂ 저감에 효과적이지를 판단해 보고자 한다. 콘크리트를 제조에 있어서 이산화탄소는 크게 4가지의 과정에서 발생한다. 첫 번째로 각각의 재료들이 가공 및 생산되는 과정, 두 번째로 각각의 재료들이 레미콘 공장으로 운송되는 과정, 세 번째로 레미콘 공장 내에서 운반 및 혼합되는 과정, 마지막으로 혼합된 콘크리트가 건설현장까지 운송되는 과정이다.



[그림 2.59] 콘크리트 구조물의 전 생애주기 CO₂ 배출

기획/설계 단계에서의 CO₂ 발생량은 [그림 2.60]의 과정을 통해 계산이 진행된다.



[그림 2.60] 기획/설계 단계에서의 CO₂ 발생량 계산 과정

① 전 생애주기 CO₂ 발생량

위 설명을 바탕으로 본 연구의 OLED 혼입 콘크리트 구조물 전 생애주기 관점에서 CO₂ 배출량 총 합을 산정하기 위해서는 몇 가지 가정 사항이 필요하다.

첫째로 계산에 필요한 LCI(Life cycle inventory) 값은 한국환경산업기술원에서 제공하는 국가 LCI 데이터베이스 정보망(Korea LCI database information network)로부터 취득한 값을 사용한다. 존재하지 않는 항목에 대해서는 일부 문헌에서 차용한다.

둘째로 혼화재, 골재의 운송은 각각 23톤, 15톤 디젤 트럭을 기준으로 계산하고, 재료별 이동 거리는 [표 2.23]와 같다.

셋째로 제작(혹은 생산)된 콘크리트는 6 m³ 규모의 레미콘을 이용하여 S사 레미콘 구미사업부에서 G사 충주 생산 공장까지의 이동 거리는 총 144 km이다.

[표 2.22] 시간에 따른 OLED 혼입 콘크리트의 CO₂ 흡수량

품목	출발	경유	도착	총 이동 거리 (km)
보통 포틀랜드 시멘트	S사 울산출하공장 (울산)	—	S사 레미콘 구미사업부 (구미)	164
OLED 폐유리	L사 구미공장 (구미)	I사 (구미)		30
잔골재	D사 (대구)	—		52
굵은 골재				

위 가정 사항을 바탕으로 OLED 혼입 콘크리트 1 m³ 시공 시 발생하는 CO₂ 총량은 다음 과 같다([표 2.23]—[표 2.26]).

[표 2.23] OL 0의 CO₂ 발생량 계산 결과

Item		Material			Transportation		
		A	B	A×B	C	D	A×C×D
		Amount (kg/m ³)	CO ₂ emission factor (CO ₂ -kg/kg)	Total CO ₂ amount (CO ₂ -kg/m ³)	Distance (km)	CO ₂ emission factor (CO ₂ -kg/kg · km)	Total CO ₂ amount (CO ₂ -kg/m ³)
Binder	OPC	403.3	9.31E-01	375.47	164	5.18E-05	3.43
	OLED	0.0	2.44E-02	0.00	30	5.18E-05	0.00
Aggregate	FIne	806.6	2.60E-03	2.10	52	6.30E-05	2.64
	Coarse	1008.2	7.50E-03	7.56	52	6.30E-05	3.30
Water		161.3	1.96E-04	0.03	—	—	—
Production	Fresh concrete	2379.4	7.68E-03	18.27	144	6.74E-01*	97.06
Total Sum (CO ₂ -kg/m ³)							509.86

* Unit : CO₂-kg/m³ · km

[표 2.24] OL 10의 CO₂ 발생량 계산 결과

Item		Material			Transportation		
		A	B	A×B	C	D	A×C×D
		Amount	CO ₂ emission factor	Total CO ₂ amount	Distance	CO ₂ emission factor	Total CO ₂ amount
		(kg/m ³)	(CO ₂ -kg/kg)	(CO ₂ -kg/m ³)	(km)	(CO ₂ -kg/kg · km)	(CO ₂ -kg/m ³)
Binder	OPC	362.9	9.31E-01	337.86	164	5.18E-05	3.43
	OLED	40.3	2.44E-02	0.98	30	5.18E-05	0.00
Aggregate	FIne	802.4	2.60E-03	2.09	52	6.30E-05	2.64
	Coarse	1008.2	7.50E-03	7.56	52	6.30E-05	3.30
Water		161.3	1.96E-04	0.03	—	—	—
Production	Fresh concrete	2375.1	7.68E-03	18.24	144	6.74E-01*	97.06
Total Sum (CO ₂ -kg/m ³)							472.89

* Unit : CO₂-kg/m³ · km

[표 2.25] OL 20의 CO₂ 발생량 계산 결과

Item		Material			Transportation		
		A	B	A×B	C	D	A×C×D
		Amount	CO ₂ emission factor	Total CO ₂ amount	Distance	CO ₂ emission factor	Total CO ₂ amount
		(kg/m ³)	(CO ₂ -kg/kg)	(CO ₂ -kg/m ³)	(km)	(CO ₂ -kg/kg · km)	(CO ₂ -kg/m ³)
Binder	OPC	322.6	9.31E-01	300.34	164	5.18E-05	3.43
	OLED	80.6	2.44E-02	1.96	30	5.18E-05	0.00
Aggregate	FIne	798.2	2.60E-03	2.08	52	6.30E-05	2.64
	Coarse	1008.2	7.50E-03	7.56	52	6.30E-05	3.30
Water		161.3	1.96E-04	0.03	—	—	—
Production	Fresh concrete	2370.9	7.68E-03	18.21	144	6.74E-01*	97.06
Total Sum (CO ₂ -kg/m ³)							436.02

* Unit : CO₂-kg/m³ · km

[표 2.26] OL 30의 CO₂ 발생량 계산 결과

Item		Material			Transportation		
		A	B	A×B	C	D	A×C×D
		Amount	CO ₂ emission factor	Total CO ₂ amount	Distance	CO ₂ emission factor	Total CO ₂ amount
		(kg/m ³)	(CO ₂ -kg/kg)	(CO ₂ -kg/m ³)	(km)	(CO ₂ -kg/kg · km)	(CO ₂ -kg/m ³)
Binder	OPC	282.3	9.31E-01	262.82	164	5.18E-05	3.43
	OLED	120.9	2.44E-02	2.95	30	5.18E-05	0.00
Aggregate	FIne	794.0	2.60E-03	2.06	52	6.30E-05	2.64
	Coarse	1008.2	7.50E-03	7.56	52	6.30E-05	3.30
Water		161.3	1.96E-04	0.03	—	—	—
Production	Fresh concrete	2366.7	7.68E-03	18.18	144	6.74E-01*	97.06
Total Sum (CO ₂ -kg/m ³)							399.15

* Unit : CO₂-kg/m³ · km

② 전 생애주기 CO₂ 흡수량

㉠ [CO₂] 및 Area

‘가. CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발, (3) OLED 페이스트의 CO₂ 흡수능력 평가’와 동일한 값을 적용하였다.

㉡ Carbonation depth

OLED 혼입 콘크리트의 옥외 폭로 탄산화 저항성 평가 결과를 활용하여 ‘가. CO₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발, (3) OLED 페이스트의 CO₂ 흡수능력 평가’와 동일한 방법으로 탄산화 속도 계수 및 시간에 따른 탄산화 깊이를 계산하였다. 계산 결과는 [표 2.29] 및 [표 2.30]과 같다.

[표 2.29] OLED 혼입 콘크리트 시제품의 탄산화 속도 계수

	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
Carbonation coefficient, α	2.84	3.12	3.64	4.79

[표 2.30] OLED 혼입 콘크리트 시제품의 시간에 따른 탄산화 깊이

Exposure time (yrs)	Carbonation depth(mm)			
	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
10	16.86	17.66	19.07	21.89
20	33.72	35.32	38.14	43.78
30	50.58	52.98	57.21	65.67

㉢ mCO₂

위 과정을 토대로 계산된 OLED 혼입 콘크리트 시제품의 CO₂ 흡수량은 [표 2.31]와 같다.

[표 2.22] 시간에 따른 OLED 혼입 콘크리트 시제품의 CO₂ 흡수량

Exposure time (yrs)	Carbonation adsorption (kg/m ³)			
	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
10	1.14	1.19	1.29	1.48
20	2.28	2.38	2.57	2.95
30	3.41	3.57	3.86	4.43

OLED 혼입 콘크리트 시제품의 10, 20 및 30년의 CO₂ 흡수량을 산정해본 결과 혼입율이 높아질수록 흡수량도 함께 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 급속 탄산화 환경 노출 기간 30년을 기준으로 OLED 혼입이 30%일 경우 CO₂ 흡수량은 29.8% 정도 상승하는 것으로 나타났다.

③ 경제성 분석

앞선 연구 결과를 바탕으로 OLED 폐유리 미분말을 혼입할 경우 OPC 100% 콘크리트(OL 0) 1 m³ 대비 CO₂ 감소량을 탄소배출권 가격으로 환산하여 비교 분석하였다. 콘크리트 탄산화로 인한 CO₂ 저감 효과를 반영하기 위해 시공된 콘크리트 구조물의 공용연수를 10, 20 및 30년으로 설정하였다. 또한, 탄소배출권 가격은 한국거래소에서 제공되는 전년도(2020.01-2020.12) 가격 중 최고가로 가정하였고 해당 결과는 [표 2.23]과 같다. 계산 결과에 따르면 OLED 폐유리 미분말을 혼입하여 콘크리트 제작 시 1m³ 당 최대 28.3%의 비용 저감 효과가 발생하는 것으로 나타났다.

[표 2.23] OLED 혼입 콘크리트 단위 생산당 CO₂ 환산 가격(원/m³)

Exposure time (yrs)	Carbonation adsorption (kg/m ³)			
	OL 0	OL 10	OL 20	OL 30
0	21,669	21,621	21,572	21,524
10	20,098	20,047	19,997	19,946
20	18,531	18,476	18,421	18,367
30	16,964	16,901	16,838	16,775

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준						양적성과 현황		
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	목표치	달성치	가중치
주관	A	탄산화를 통한 대기 중 CO ₂ 저감형 OLED 혼입 시멘트 개발	A-1	OLED 분말 물리화학적 특성 평가	① 산화물 조성	SiO ₂ 함량 60% 이상	100%	XRF	시험성적서	5	논문(SCI) : <u>1건</u> 논문(비SCI) : <u>1건</u> 학술회의 : <u>2건</u>	논문(SCI) : <u>0건</u> 논문(비SCI) : <u>0건</u> 학술회의 : <u>2건</u>	35
					② 비중	2.5 이상	100%	KS M 0602	시험성적서	5			
					③ 비표면적	0.8 m ² /g 이상	100%	BET	시험성적서	5			
			A-2	OLED 혼입 시멘트 탄산화 저항성 평가	① 수화물 조성	GOF 1.5기준 10% 이내	100%	Q-XRD	학술회의, 보고서	10			
					② 탄산화 깊이	OPC 대비 100% 이상	100%	KS F 2596	학술회의, 보고서	10			
			A-3	OLED 혼입 시멘트의 CO ₂ 흡수능력 평가	① CO ₂ 흡수량	OPC 대비 100% 이상	100%	XRD, TGA, SEM	학술회의, 보고서	10			
	B	CO ₂ 저감형 OLED 혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출	B-1	OLED 혼입 콘크리트 기초물성 평가	① 압축강도	OPC 대비 100% 이상	100%	KS F 2405	시험성적서	5	특허 : 출원 <u>1건</u> 논문(SCI) : <u>2건</u> 논문(비SCI) : <u>1건</u> 학술회의 : <u>2건</u> 인력양성 : 석사 <u>2건</u>	특허 : 출원 <u>1건</u> 논문(SCI) : <u>3건</u> 논문(비SCI) : <u>1건</u> 학술회의 : <u>2건</u> 인력양성 : 석사 <u>2건</u>	55
					② 휨강도	OPC 대비 100% 이상	100%	KS F 2403	시험성적서	5			
					③ 총 공극량	OPC 대비 100% 이하	100%	MIP	시험성적서	5			
			B-2	OLED 혼입 콘크리트 내구성능 평가	① 탄산화 깊이	OPC 대비 100% 이상	100%	KS F 2596	시험성적서	10			
					② 염소이온 고정화 및 침투저항성	OPC 대비 100% 이상	100%	NT Build 443	학술회의, 보고서	10			
			B-3	OLED 혼입 콘크리트 경제성 분석	① 전생애주기 관점 CO ₂ 발생-흡수량	OPC 대비 100% 이상	100%	기존 계산식	학술회의, 보고서	10			
	C	OLED 혼입 프리캐스트 콘크리트 시제품 제작	C-1	OLED 혼입 프리캐스트 콘크리트 시제품 제작	① 프리캐스트 콘크리트 시제품	시제품 제작	100%	-	보고서	10	시제품 : <u>1건</u>	시제품 : <u>1건</u>	10
계							-			100	특허 : 출원 <u>1건</u> 논문(SCI) : <u>3건</u> 논문(비SCI) : <u>2건</u> 학술회의 : <u>4건</u> 시제품 : <u>1건</u> 인력양성 : 석사 <u>2건</u>	특허 : 출원 <u>1건</u> 논문(SCI) : <u>3건</u> 논문(비SCI) : <u>1건</u> 학술회의 : <u>4건</u> 시제품 : <u>1건</u> 인력양성 : 석사 <u>2건</u>	100

나. 목표 달성 여부

성과 기준표 상에서의 질적성과는 모두 달성하였으나, 양적성과에서 중 비SCI 논문 1건(1차년도 양적성과)을 미달성함.

나. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

코로나 사태로 인한 시험분석 기관의 분석지연으로 논문에 사용 될 데이터의 수급이 원활하지 못하여 비SCI논문 1건을 달성하지 못하였지만 추적연구 기간 동안 데이터를 확보하여 달성하겠음.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 추가 연구의 필요성

(1) OLED 콘크리트 배합 가이드라인 제시

본 연구에서는 입경, 분말도등 물리적 성질이 같은 OLED분말을 활용하여 0%, 10%, 20% 및 30%의 비교적 차이가 크고 최대치가 낮은 치환율을 적용하여 탄산화 특성을 비교하였다. 그로인해 가장 효율적인 입경, 분말도를 결정하거나, 보다 의사결정에 도움이 되는 치환율을 제공하지 못하였다고 판단되는바 제어 가능한 물리적 성질을 다양화하고 보다 넓고 정밀한 치환율을 적용하는 연구를 통해 OLED 혼입 콘크리트의 배합 가이드라인을 제시하는 것이 바람직하다고 판단된다.

(2) 장기재령에서의 OLED 콘크리트 성능검증

본 연구에서는 시제품을 활용해 64주 옥외환경 탄산화 성능검증을 진행하였다. 하지만 콘크리트의 공용기간은 40년 정도로 매우 긴 편이기 때문에 64주의 탄산화 결과만으로 OLED 콘크리트의 완전히 파악하기란 쉽지 않다. 때문에 보다 오랜 기간 동안의 옥외환경 탄산화 실험을 진행하여 OLED 콘크리트의 탄산화특성을 파악하는 과정이 필요할 것으로 판단됨.

나. 활용계획

(1) 탄산화 효과 증대

콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 흡수는 대기 중 농도와 노출되어있는 표면적에 크게 좌우되기 때문에 효율적인 탄산화를 위해서 적절한 사용처를 정하는 것이 중요하다. 상기의 특성을 고려할 때 OLED 콘크리트는 다음과 같은 활용에 의해 효과적인 CO₂ 흡수가 가능할 것으로 판단된다.

- 발전소, 오·폐수 차집관거 등 CO₂ 농도가 높아 탄산화가 집중될 수 있는 구조물
- 조적조 등과 같은 건축물의 외벽 마감재 또는 코팅제
- 경량기포콘크리트 등의 넓은 표면적을 가지는 무근 콘크리트

(2) 수화열 발생 저감

콘크리트는 시멘트 수화과정에서 열을 발생시키게 되며, 이 열은 평소에는 콘크리트에 큰 영향을 주지 않지만 댐, 교각등과 같은 매스콘크리트 구조물에서는 그 양이 많아 균열 등의 문제를 일으키게 된다. 하지만 OLED 콘크리트의 경우 시멘트의 양을 조절 수 있기 때문에 비교적 작은 열의 생성을 유도 할 수 있고 강도 또한 확보 가능하므로 매스콘크리트에 효과적인 적용이 가능할 것으로 판단됨.

붙임. 참고문헌

- Achal, V., Pan, X., Ёzyurt, N., (2011) Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation. *Ecological Engineering* 34(4), 554-559.
- Ana, M. M., Joana, S. C., (2016) Waste glass powder in cement: macro and micro scale study. *Advances in Cement Research* 28(7), 423-432.
- Du, H., Tan, K. H., (2014) Waste Glass Powder as Cement Replacement in Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology* 12(11), 468-477.
- Idir, R., Tagnit-Hamou, A., (2011) Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. *Cement And Concrete Composites* 33(1), 19-29.
- Jack, M. C., Ran, H., Yang, C. C., (2002) Effects of Carbonation on Mechanical Properties and Durability of Concrete Using Accelerated Testing Method. *Journal of Marine Science and Technology* 10(1), 14-20.
- Jeon, B. H., Kim, H. S., Lee, S. H., (2018) A Study on the Evaluation of the Carbonation Resistance and Properties Ternary blended Concrete According to Replacement Ratio of Blast Furnace Slag and Fly ash. *Journal of the Korea Concrete Institute* 30(1), 23-30.
- Jiangm, Y., Ling, T. C., Mo, K. H., Shi, C., (2019) A critical review of waste glass powder - Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. *Journal of Environmental Management* 242, 440-449.
- Jin, Y. M., Park, J. H., (2014) The Analysis of the Status of China's Carbon Dioxide Emission according to Economic Growth. *Korea E-Trade Research Institute* 12(3), 79-99.
- Jung, Y. B., Yang, K. H., (2015) Mixture-Proportioning Model for Low-CO₂ Concrete Considering the Type and Addition Level of Supplementary Cementitious Materials, *Journal of the Korea Concrete Institute* 27(4), 427-434.
- Karamberi, A., Moutsatsou, A., (2004) Participation of coloured glass cullet in cementitious materials. *Cement And Concrete Composites* 27(2), 319-327.
- Kim, H. K., (2017) The Appraisal of Paris Climate Agreement and Korea`s Response. *environmental laws institute* 39(2), 195-230.
- Kim, S. K., Hanif, A., Jang, I. Y., (2018) Incorporating Liquid Crystal Display (LCD) Glass Waste as Supplementary Cementing Material (SCM) in Cement

Mortars—Rationale Based on Hydration, Durability, and Pore Characteristics. *Materials* 11(12), 2538.

Lagerblad Björn (2007) Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - State of the art. Swedish Cement and Concrete Research Institute.

Lee, S. H., Lee, S. B., Lee, H. S., (2009) Study on the Evaluation CO₂ Emission—Absorption of Concrete in the View of Carbonation. *Journal of the Korea Concrete Institute* 21(1), 85–92

Ling, T. C., Poon, C. S., (2013) Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview. *Construction And Building Materials* 46, 55–62.

Liu, S., Xie, G., Wang, S., (2015) Effect of curing temperature on hydration properties of waste glass powder in cement-based materials. *Journal of thermal analysis* 119(1), 47–55.

Lu, J. X., Zhan, B. J., Duan, Z. H., Poon, C. S., (2017) Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates. *Materials and Design* 135, 102–111.

Matos, A. M., Sousa-Coutinho, J., (2012) Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS* 36, 205–215.

Maraghechi, H., Maraghechi, M., Rajabipour, F., Pantano, C. G., (2014) Pozzolanic reactivity of recycled glass powder at elevated temperatures: Reaction stoichiometry, reaction products and effect of alkali activation. *Cement And Concrete Composites* 53, 105–114.

Martin, C., Philippe, L., Erick, R., (2004) Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration. *Cement and Concrete Research* 35(4), 719–730.

Mirzahosseini, M., Riding, K. A., (2015). Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). *Cement And Concrete Composites* 56, 95–105.

Pade, C., Guimaraes, M., (2007) The CO₂ Uptake of Concrete in a 100 Year Perspective. *Cement and Concrete Research* 37(9), 1348–1356.

Park, B. D., (2017) International Legal Issues on Post-2020 Climate Change Regime – Focusing on compliance mechanism –. *The Korean journal international law* 62(1), 37–61.

Pereira-de-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., Santos, P. M. S., (2012) The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement

- mortars components. *Construction And Building Materials* 31, 197–203.
- Sanjuan, M. A., Andrade, C., Cheyrezy, M., (2003) Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. *Advances in Cement Research* 15(4), 171–180.
- Schwarz, N., DuBois, M., Neithalath, N., (2007) Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes. *Cement And Concrete Composites* 29(9), 656–666.
- Scrivener, K. L., Föllmann, T., Gallucci, E., Walenta, G., Bermejo, E., (2004) Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods. *Cement and Concrete Research* 34(9), 1541–1547.
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., Wang, H., (2005) Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research* 35(5), 987–993.
- Song, D. S., (2019) The renovation of korean environmental legislation on the new UN framework convention on climate change. *Public land law review* 85, 335–363.
- Toby, B. H., (2006) R factors in Rietveld analysis: How good is good enough? *Powder Diffraction* 21(1), 67–70.
- Yang, H. J., Shim, H. B., Jin, S. H., Ann, K. Y., (2018) Evaluation of Rate of Chloride Transport for Alumina Cement Mortar with Different Composition of Clinkers. *Journal of the Korea Concrete Institute* 30(4), 383–390.
- Yoo, S. W., Bang, G. S., Jung, S. H., Chang, S. P., (2007) Study on the Carbonation Properties of Fly Ash Concrete by the New Rapid Carbonation Experimental System. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 27(4A), 601–607.

주 의

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