18CTAP
-C1298
30-02

LCD 폐유리를 주성분으로 하는 콘크리트 매뉴얼 개발과 실용화 연구

최종보고서

2018. 12. 31

국토교통부 국토교통과학기술진흥원

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호( )
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D /
18CTAP-C129830-02

LCD 폐유리를 주성분으로 하는 콘크리트 매뉴얼 개발과 실용화 연구 최종보고서

2018. 12. 31.

주관연구기관 / 금오공과대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘LCD 폐유리를 주성분으로 하는 콘크리트 매뉴얼 개발과 실용화 연구’(연구개발 기간 : 2017. 04.01 ~ 2018.12.31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 12. 31.

주관연구기관명 : 금오공과대학교 산학협력단 정 연 구 (인)

주관연구기관책임자: 장 일 영

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	1615009754	해당 단계 연구 기간	2017.04.01 ~ 2018.12.31	단계구분	
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	LCD 폐유리를 주성분으로 하는 콘크리트 매뉴얼 개발과 실용화 연구			
	세부과제명				
연구책임자	장 일 영	해당단계 참여연구원 수	총: 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 10 명 내부: 9 명 외부: 1 명	총 연구비	정부: 260,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속 부서명	주관기관 : 금오공과대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 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	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록·기탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

요약

1차년도 : LCD폐유리재료 특성 및 굳지 않은 콘크리트의 평가

- LCD폐유리의 기초물성평가를 통한 실용가능성 평가
- SEM, MIP, BSE 등을 통한 LCD폐유리와 시멘트의 성분 비교
- 콘크리트 목표강도 및 시공성, 내구성에 적합한 LCD 폐유리 미분말 제조
- 입경 및 치환율에 따른 맞춤강도 콘크리트 제조
- 최적배합비 도출 및 경제성을 고려한 40MPa급 압축강도 확보
- LCD 폐유리 미분말 시멘트 대체율 20%까지 확보

2차년도 : LCD폐유리 콘크리트의 내구성 테스트 및 실용화

- 콘크리트 블록식 옹벽 등 프리캐스트 시제품 제작
- LCD 콘크리트 내구성 확보
- LCD 콘크리트 매뉴얼 작성

보고서 면수 138쪽

〈 국문 요약문 〉

<table>
<tr><td>연구의
목적 및 내용</td><td colspan="5">○ 1차년도
□ LCD 폐유리를 주성분으로 하는 친환경 콘크리트 개발 및 실용화
- 산업폐기물인 LCD 폐유리의 시멘트 대체를 위해 모르타르 및 콘크리트 공시체의 강도 평가에 의해서 친환경적이고 경제성 있는 콘크리트를 개발하고자 함. 콘크리트의 개발과 동시에 ①고강도 구조물, ②콘크리트 블록식 옹벽에의 적용 등의 시제품 제작을 목표로 함.
□ 선행연구 사례조사
- 폐유리의 시멘트, 잔골재, 필러재의 대체 재료로써 활용 연구
- 폐유리 분석 및 처리공정에 관한 조사
□ 목표성능 설정 및 최적배합비 도출
- LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 목표강도 및 목표성능 설정
- 유동성별, 물-결합재비별, 입경별, 혼입률별 모르타르 및 콘크리트 공시체 제작 및 강도 평가
- 경제성, 시공성 등을 고려한 LCD 폐유리 콘크리트의 최적배합비를 도출
□ 기초 물성평가
- 굳지 않은 콘크리트의 공기량 및 슬럼프 측정 등의 시공성 평가
- 굳은 콘크리트의 압축강도, 휨강도 시험 등의 기초 물성평가
□ 성능실험
- LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트의 압축강도 시험을 통한 장기강도 평가 및 분석
- LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트의 화학적 저항성 확인

○ 2차년도
□ LCD폐유리 콘크리트의 내구성 실험
- 탄산화, 황산염저항성 평가, 동결융해, 염분침투 평가
□ 실용화 방안 제시
- LCD 폐유리를 혼입한 40~80MPa급 콘크리트의 매뉴얼을 작성
- LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트의 프리캐스트 규격품을 고안
□ 프리캐스트 콘크리트 시제품 제작
- LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트 프리캐스트 시제품 개발 및 제작</td></tr>
<tr><td>연구개발성과</td><td colspan="5">□ LCD 폐유리 미분말을 이용한 40~80MPa급 콘크리트 제작 매뉴얼
□ LCD 폐유리 미분말을 이용한 40~80MPa급 콘크리트를 이용한 프리캐스트 시제품 제작</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의
활용계획
(기대효과)</td><td colspan="5">- 산업폐기물인 LCD 폐유리를 재활용함으로써 정부 환경정책에 부응하고 미래지향적이고 지속가능한 효과를 도모함.
- 매뉴얼 제작을 통하여 새로운 건설 재료에 대한 국내 기술 확보
- 콘크리트의 고품질화를 통한 건설기술의 향상과 더불어 산업폐기물 활용을 통한 생산비용 절감 및 탄소배출 저감 효과가 기대됨.</td></tr>
<tr><td>핵심어
(5개 이내)</td><td>LCD 폐유리</td><td>친환경</td><td>자원재활용</td><td>경제성</td><td>산업폐기물</td></tr>
</table>

〈 SUMMARY 〉

<table>
<tr><td>Purpose & Contents</td><td>○ First year
☐ Development and practical use of the eco-friendly concrete by the main material as the LCD waste glass.
Development of the eco-friendly and economical concrete using the LCD waste glass. The replacement of the cement will be conducted for testing with specimens.
Practical use of ①high strength structures or ②concrete block type retaining wall with the LCD waste glass.
☐ Case survey of the previous study
- A study on the replacement of ①the cement, ②the filler, and ③the fine aggregate.
- Surveying the waste LCD glass and its treatment process.
☐ Determination of target performance and optimal mixture ratio
- Setting the target strength and performance of the LCD waste glass powder concrete.
- Making the concrete specimens and testing with different fluidity, W/B, particle size, and replacement ratio.
- Determining the optimal mixture ratio of LCD waste glass powder concrete considering the construct ability and economical efficiency.
☐ The basic properties evaluation
- Test of air content and slump with fresh concrete.
- Test of compressive strength and flexural strength with hardened concrete
☐ Experiment of the performance
- Evaluation and analysis the long-term strength of LCD waste glass powder concrete through the compressive strength test.
- Chemical resistant test with LCD waste glass powder concrete.

○ Second year
☐ Durability experiment of LCD waste glass powder concrete
- Carbonation, Sulfate resistance evaluation, Freeze-thaw, Salt penetration evaluation
☐ Practical use of the concrete
- Development of concrete model and manual for LCD waste glass powder concrete with 40 MPa ~ 80 MPa class
- Design the standardized precast products of LCD waste glass powder concrete.
☐ Display concrete precast prototype
- Development of concrete precast prototype with LCD waste glass powder.</td></tr>
<tr><td>Results</td><td>☐ Development of concrete model and manual for LCD waste glass powder concrete with 40 MPa ~ 80 MPa class
☐ Development of concrete precast prototype with LCD waste glass powder concrete with 40 MPa ~ 80 MPa class.</td></tr>
<tr><td>Expected Contribution</td><td>- By recycling LCD waste glass, which is industrial waste, we aim for future-oriented and sustainable effects. It is consistent with the government's environmental policy.
- Through the manual production, domestic technology of new construction material will be secured.
- Reduction of production cost and reduction of carbon dioxide emissions through utilization of industrial waste are expected with improvement of construction technology through high quality concrete.</td></tr>
<tr><td>Keywords</td><td>LCD waste glass</td><td>Eco-friendly</td><td>Resource recycling</td><td>Economical</td><td>Industrial waste</td></tr>
</table>

〈 TABLE OF CONTENTS 〉

Chapter 1. Summary of R&D ·····1
Chapter 2. Technology State-of-the-art in Korea and Overseas ·····9
Chapter 3. Contents and Results of Research ·····11
Chapter 4. Level of Achievement and Contribution to Related Domains ·····122
Chapter 5. Utilization Plan of Research Achievements ·····129
Chapter 6. Foreign Scientific Data Acquired throughout Research ·····130
Chapter 7. Security Level of Research Results ·····131
Chapter 8. Inventory of Research Facilities and Equipment Registered in National Science and Technology Information System ·····131
Chapter 9. Safety Measures in Laboratory Executed during the Accomplishment of the Research Project ·····131
Chapter 10. Representative Research Achievements ·····132
Chapter 11. Other Details ·····134
Chapter 12. References ·····134

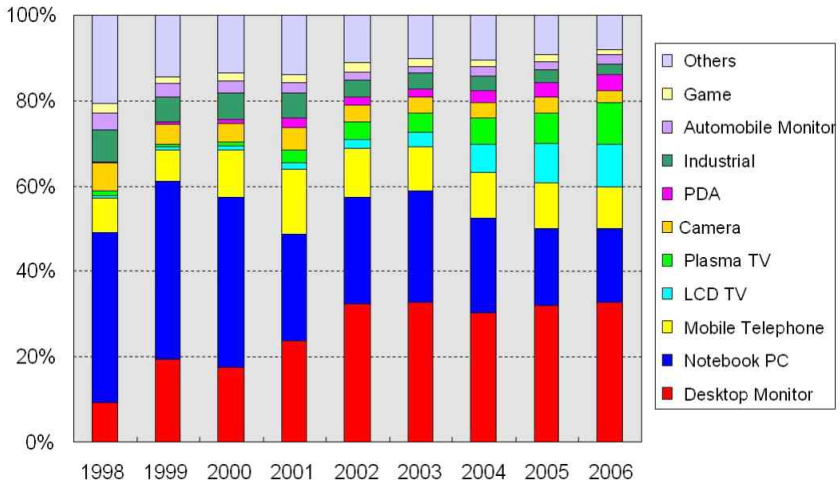
〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 9
3. 연구수행내용 및 성과 ····· 11
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 122
5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 129
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 130
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 131
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 131
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 131
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 132
11. 기타 사항 ····· 134
12. 참고 문헌 ····· 134

1. 연구개발 목적

-환경 오염문제가 전 세계의 공통적 과제로 비추어 지면서 환경오염을 줄이기 위한 다양한 방법에 관심이 고조되고 있다. 환경을 오염시키는 원인에는 여러 가지 요소가 있지만 그 중 시멘트를 생산하면서 발생되는 이산화탄소(CO_2)가 환경오염의 주범이 되고 있다. 또한 급격한 산업발달로 인해 대량의 산업폐기물이 발생되면서 대부분 재활용 되지 못하고 매립 및 소각에 의존하여 이로 인해 토양 및 수질오염의 문제가 발생하고 있다.

-이러한 산업폐기물 중 하나인 LCD 폐유리 또한 최근 각종 디스플레이 기기들이 개발되고 사용되어지면서 LCD를 적용한 다양한 전자 제품들이 널리 보급되고 있으며 이로 인해 LCD 폐유리 발생량 또한 나날이 증가하고 있는 추세이다. 유리폐기물의 국내 발생현황은 한국환경공단의 통계연감(2013) (Korea Environment Corporation 2013)을 기준으로 하루 평균 약 443톤이 발생하는 것으로 집계되었으며 이러한 폐유리의 약 94%(420톤)가 재활용 되지 못하고 매립 및 소각되고 있는 실정이므로 매립지 부족 문제와 폐기 비용 증가 문제를 해결함과 동시에 매립 및 소각으로 인한 환경오염을 방지하기 위하여 LCD 폐유리의 재활용 방안에 대한 다양한 연구가 필요하다.



[그림 1.1] 디스플레이 주요 제품

제 품	지 역	교체주기
휴대폰	NA, WE	3년
	Japan	3년
	Asia, Others	5년
노트북 PC	NA, WE, Japan	5년
	Asia, Others	10년
모니터	NA, WE, Japan	7년
	Asia, Others	10년
LCD TV	All	10년
PDA	All	5년
비디오 카메라	All	7년
디지털 카메라	All	5년
자동차 네비게이션	All	10년

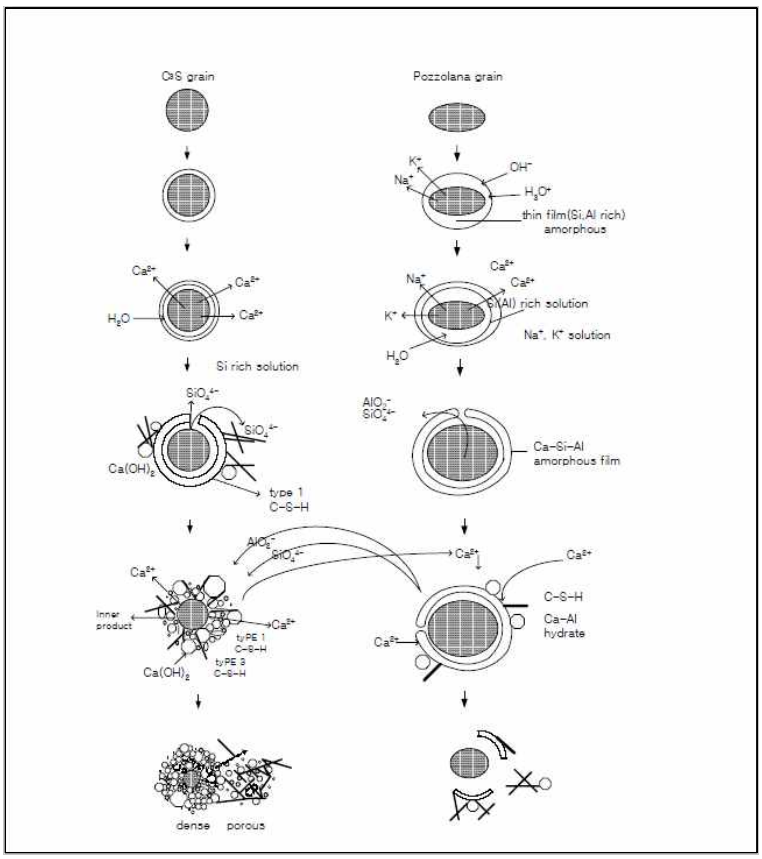
[표1.1] LCD 제품 교체주기

-LCD 폐유리를 시멘트 대체재료로 사용하게 되면 저시멘트 효과를 유도시킴으로써 CO_2 발생량을 저감시켜 이로 인해 발생하는 환경적인 문제를 해결할 수 있다. 또한, 폐유리를 매립 및 소각하지

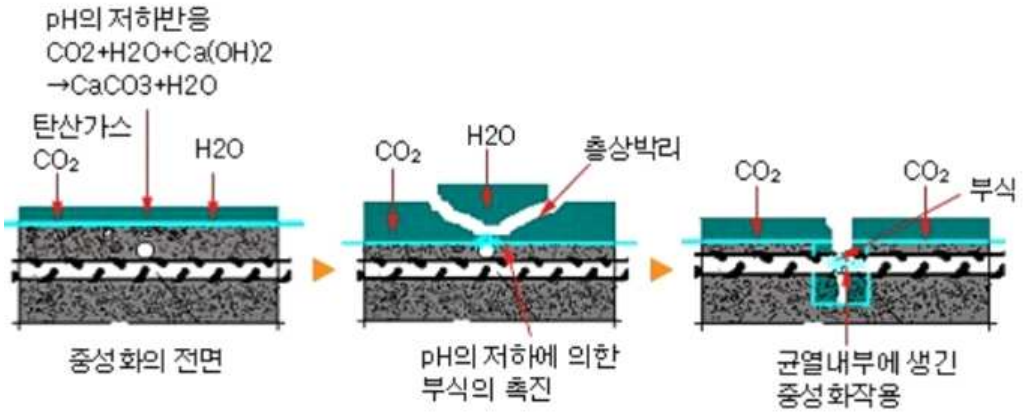
않아도 되므로 매립 처리 비용과 매립지 부족 문제 등의 환경적 문제를 해결할 수 있다.

-폐유리 중 건축물에 사용되는 유리는 보통유리와 특수용도의 유리로 나뉘어진다. 일반용도로 쓰이는 보통의 판유리는 분쇄 시 각이 지고 모가 나있고, 특수유리는 입형이 구형으로 형성되는데 화학성분의 70% 이상이 실리카질(SiO_2)성분과 붕산(BO_2)등 기타 성분으로 구성되어 있다.

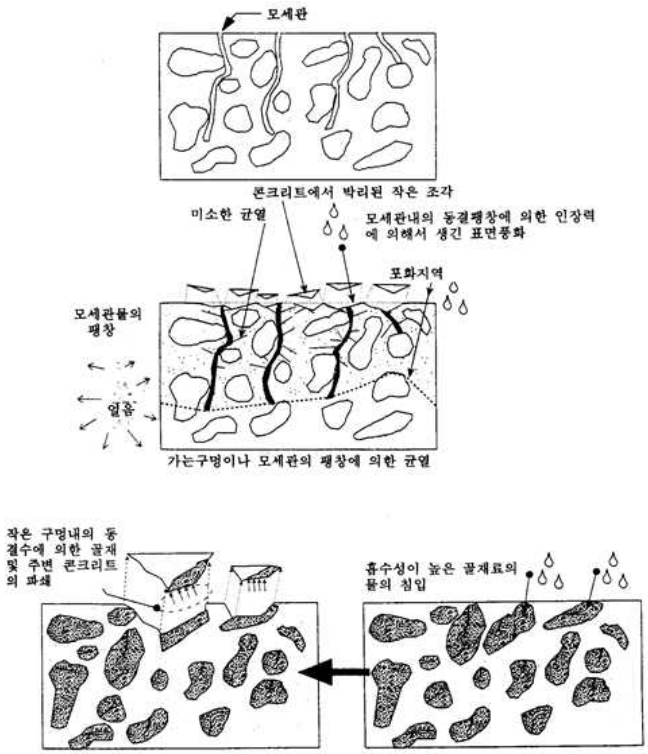
-본 연구에서 사용된 LCD 폐유리는 일반적인 유리와 달리 Alkali free 특성이 요구된다. 따라서 제조 시 실리카, 알루미나와 같은 원료를 용해, 성형하여 Alkali-Silica 반응이 없고, SiO_2가 다량 첨가된 Pozzolan계이므로 콘크리트 제품으로 활용이 가능하다는 점에 초점을 맞추어 LCD 폐유리 미분말을 시멘트 대체재로 사용함으로써 LCD 폐유리 미분말이 혼입된 콘크리트의 치환율별 시공성 및 역학적 특성과 황산염, 동결융해, 탄산화와 같은 콘크리트 열화 현상의 저항성 실험을 하고 또한 포졸란 반응에 의한 모세관공극의 변화는 액상과 기상의 투과성의 차이를 나타나게 하는데 투과성의 감소는 내구성 향상과 이어진다 하지만 현재 한국에서는 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트에 대한 내구성 평가가 거의 이루어지지 않은 실정이어서 이에 대한 다양한 연구를 할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 포졸란 반응이 투과성을 감소시킨다는 점에 착안하여 내구성 실험 중에서도 염화물 침투시험에 대해서도 평가하여 콘크리트 재료로써의 실용가능성을 확인하고 산업폐기물인 LCD 폐유리의 재활용 방안을 모색하고자 한다.



[그림 1.2] C3S와 포졸란 물질과의 수화반응 모식도
출처 한국시멘트협회



[그림 1.3] 콘크리트의 탄산화 과정



[그림 1.4] 동결융해에 의한 콘크리트의 균열

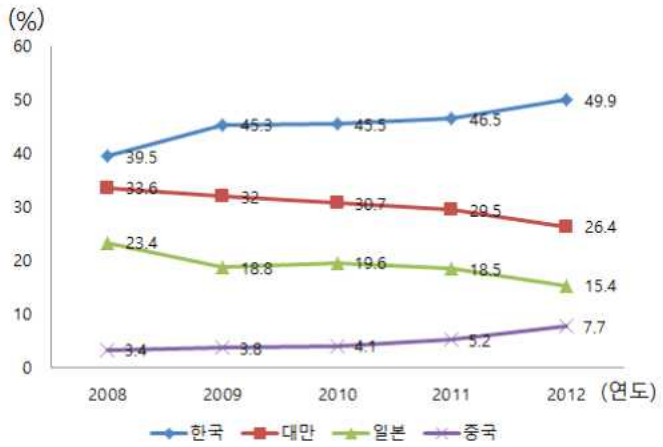
2. 연구개발의 필요성

○ LCD 폐유리는 일반적인 유리(CRT유리, 병유리, 판유리 등)와 달리 나트륨 성분이 매우 낮거나 없는 순도 높은 실리카 성질의 재료(아래 표 참조)이며, 나트륨 성분은 콘크리트에 혼합될 경우 강도를 저하시킬 수 있는 결정적인 요인이 될 수 있다는 점에서 LCD 폐유리가 콘크리트에 혼입될 수 있고 충분히 논의 가능한 재료로 사료됨. 또한, 가정용 디스플레이 용도로 많이 사용된다는 점에서 인체에 접근하더라도 유해한 물질이 거의 없다는 것이 일반적으로 알려진 내용임.

	CRT waste glass		Bottle waste glass	Plate waste glass	LCD waste glass
	Panel	Funnel			
SiO_2	70.4	48.8	71.5	72.9	64.4
CaO	0.6	2.7	17.8	14.9	4.8
K_2O	7.3	8.5	1.8	0.6	0.6
B_2O_3	0.1	–	–	–	3.4
Fe_2O_3	0.1	0.1	0.9	0.2	0.1
Na_2O	8.0	6.8	4.2	7.0	0.5
Al_2O_3	1.1	1.9	1.5	1.1	16.2
BaO	10.2	0.9	–	–	6.3
PbO	–	21.3	–	–	–
Others	2.2	9.0	2.3	3.3	3.7

[표1.2] 폐유리의 성분 분석표(이장수 등, 2013)

○ 현재 우리나라는 [그림 1.5]와 같이 세계 디스플레이 제품 시장 점유율 통계에 따르면 2008년도부터 2012년도까지 1위의 점유율을 차지하고 있을 정도로 디스플레이 부분에서 전 세계적으로 최고의 기술을 보유하고 있는 강국으로 많은 디스플레이 제품들이 개발되어지면서 생산되고 있음. 현 시점에서 디스플레이 화면 표시장치로 주로 사용되어지는 것은 평판디스플레이가 사용되고 있으며, 그 중 LCD의 비중이 평균 약 91% 정도로 LCD 사용량이 월등히 높은 상황임. 이러한 LCD는 액정이 인가전압에 따라 광의 특성을 변조하는 원리를 이용하여 휴대폰, 노트북, 컴퓨터, TV 등 전반적인 디스플레이에 걸쳐 사용되고 있는 실정임.

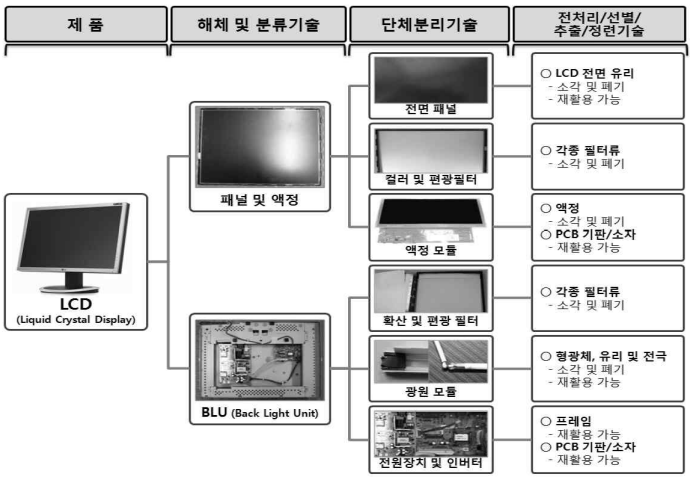


[그림 1.5] 세계시장의 디스플레이 점유율(박기태, 2016)

○ 디스플레이 산업에 대한 기술 개발 기간이 비교적 짧아 제품 교체 주기가 빨라지고 있음에 따라서 산업폐기물인 LCD 폐유리의 발생량 또한 증가할 것으로 사료됨. LCD 폐유리 중에서 LCD 기판 파유리는 대부분 재활용되고 있지만 패널 제조공정에서 발생하는 약품 및 코팅된 폐유리는 대부분 재활용 되지 못하고 있으며, 이는 LCD 폐유리와 같이 용해 공정이나 열가공 공정을 포함한 폐

기물은 대부분 안정적인 물질로서의 원료로 가공이 어렵고, 가공 후에도 재활용이 어렵다는 단점을 가짐. 이러한 이유로 현재 LCD 폐유리에 대한 마땅한 재활용 방안이 모색되어진 것이 아니므로 대부분 매립 또는 소각에 의존하면서 매립부지 부족, 토양 및 수질 오염과 소각에 의한 대기오염 및 폐기 처리비용 등의 문제가 발생하면서 환경적인 문제를 야기함.

○ LCD 폐유리의 처리량은 연간 약 800,000톤 이상으로 디스플레이 시장의 성장과 함께 급속도로 팽창하여, 현재 이를 재활용할 방안이나 사용처의 부재로 인해 심각한 경제적·사회적 문제를 야기하고 있으며 콘크리트의 포졸란 반응을 나타낼 수 있는 실리카 성분으로 이루어져 있고, 다른 여타의 유리와 달리 나트륨 성분이 매우 희박하여 콘크리트 강도 저하의 원인이 되지 않는다는 점에서 LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트에 대한 연구는 매우 중요한 요지를 가진다고 판단함.



[그림 1.6] 국내 LCD 재활용 상황 (홍현선 등, 2010)

○ 다른 여타의 LCD 패널 주요 생산국에 비해 우리나라의 LCD 폐유리 처리 방식은 대부분 매립에 의존하고 있는 실정으로, 이는 선두주자들에 비해 연구 진행이나 처리방안이 매우 미흡하며, 막대한 자원낭비와 동시에 경제적·사회적 문제를 동시에 지니고 있다고 판단함. 또한, 일부 토목재료에 국한되어 의존적으로 사용되는 자원들에서 탈피하여 경제성, 시공성을 고려한 고성능 콘크리트 개발을 통하여 LCD 폐유리를 획기적으로 사용할 수 있을 것이라 판단함.

○ 따라서, 본 연구에서는 산업폐기물인 LCD 폐유리를 역학적 특성에 대한 분석을 통하여 대체재로 활용하고자 하는 것에 그 목적을 가지고 있으며, 이를 위해 LCD 폐유리를 수집, 입자 크기별로 분쇄하여 이를 혼입한 모르타르 및 콘크리트 공시체의 강도 평가에 의해서 친환경적이고 경제성 있는 콘크리트를 개발하고자 함. 또한, 고강도 구조물 및 콘크리트 블록식 옹벽에의 적용 등을 통한 실용화를 하고자 함. 최종적으로 LCD 폐유리가 콘크리트 재료로써 사용가능성을 확인하여 산업폐기물인 LCD 폐유리의 재활용 방안을 모색함으로써 LCD 폐유리로 인하여 발생할 수 있는 사회적, 환경적 문제점을 해결할 수 있는 방안을 제시하고자 함.

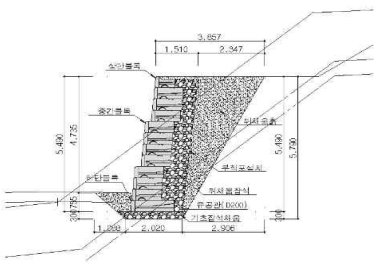
3. 연구개발 범위

가. 연구개발 최종목표 및 최종성과물

(1) 최종목표 및 최종성과물

□ 최종목표 : LCD 폐유리를 이용한 40~80MPa급 콘크리트 매뉴얼 및 프리캐스트 시작품 개발

□ 최종성과물 : LCD를 혼입한 콘크리트 제작 매뉴얼 작성과 LCD 콘크리트 블록식 옹벽 프리캐스트 시작품 제작

정 의	LCD 폐유리 미분말의 시멘트 대체를 통한 압축강도 40~80MPa급 콘크리트를 개발하고 LCD 콘크리트 프리캐스트 시작품을 제작	
설정사유	경제성과 구조물의 적용성을 고려하여 강도 40~80 MPa급으로 하였고, 산업폐기물의 재료화 및 원재료 절감을 통해 제조가격을 줄일 수 있는 범위로 판단하였음.	
목 적	산업폐기물인 LCD 폐유리를 건설재료로써 콘크리트 구조물에 적용하여 강도와 내구성을 확보한 LCD 콘크리트 제조 및 적용기술 개발	
성능목표	기존기술 수준	LCD 폐유리 미분말의 시멘트 대체시 40MPa급 이상의 콘크리트 제조 가능
	개발기술 수준	- LCD 폐유리 미분말의 입경 및 배합비에 따른 최적배합 도출 및 경제성을 고려한 40~80MPa급 압축강도 확보 - 시공성(슬럼프 플로우 750±50mm)을 확보한 기술 확보 - LCD 폐유리 미분말 시멘트 대체율 20% 이상 확보
	개발기술 수준 설정근거	기존 기술 개발 수준과 구조물의 적용에 따른 경제성 확보를 고려하여 강도 범위 및 대체율을 설정하였고, 시공성을 확보하기 위한 수준.
그림/사진		

□ 연구의 실현 가능성 및 한계

① 40~80MPa급 고강도 콘크리트의 LCD 폐유리 실용화 가능성

- LCD 폐유리를 사용한 고강도 콘크리트의 경우 LCD 폐유리 분말의 입자가 필러재의 입경과 유사할 경우 고가의 필러재를 대체하는 경제성을 가질 것으로 판단함.
- 고강도 콘크리트의 경우 대부분의 재료가 LCD 폐유리보다 고가이므로, 경제성 측면에서 매우 유리할 것으로 판단되나, 유동성을 고려하여 치환량을 확대할 수 있는 방안을 도출하는 것이 핵심과제

임.

② 콘크리트 매커니즘의 LCD 폐유리 적용가능성

- LCD 폐유리는 화학적으로 SiO_2 성분이 60% 이상으로 시멘트와의 수화반응시 포졸란 작용이 가능하나, 포졸란 작용은 시멘트와 반응하는 입자의 크기와도 관련이 있으므로, 포졸란 작용이 가능한 LCD 폐유리 분말의 입자 크기의 도출이 필요함
- 프리캐스트 콘크리트 제조시 시멘트, 필러재, 잔골재 대체 재료로서 LCD 폐유리를 활용하기 위하여 최적입경을 도출하고 최적 혼입률 제시하는 것이 필요함.
- 콘크리트 제품 공장의 제조설비 및 공정에 의하여 LCD 폐유리 분말을 이용한 콘크리트 구조물 적용 혹은 블록식 옹벽을 개발할 수 있을 것으로 판단됨

□ 연구범위

- 본 연구는 총 2차년도로 계획되며, 1차년도 연구로는 선행된 LCD 폐유리에 대한 연구사례를 조사하는 것으로 시작하여, LCD 폐유리 콘크리트에 대한 기초 물성평가를 진행하고 최적배합비를 도출하는 것으로 함.
- 2차년도에는 성능실험을 지속적으로 실시하며, 최종적으로는 이에 대한 매뉴얼 제작 및 실용화를 위한 프리캐스트 콘크리트 시작품을 제작하는 것을 목표로 함.

(2) 설정근거

□ 본 연구의 성과물은 LCD 폐유리를 이용한 콘크리트에 대한 매뉴얼 제작과 실용화를 위한 프리캐스트 콘크리트 시작품 제작에 있음.

- 매뉴얼의 경우 기존 기술 개발 수준과 구조물의 적용에 따른 강도, 경제성, 시공성 등을 고려하여 작성되는 보고서 형태의 문서가 될 것임.
- 프리캐스트 콘크리트 시작품의 경우 실제 사용가능하고 적용 가능한 분야의 적용을 우선적으로 하며, 현재로써는 콘크리트 블록식 옹벽이 경제성을 고려할 때 우수하여 적용될 것으로 판단됨.

□ 본 연구의 최종 목표로 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 매뉴얼과 프리캐스트 콘크리트 시작품 제작을 현 시점의 실현가능한 목표로 판단함.

- 21개월의 기간으로는 전제적인 구조물에 적용할 수 있을 만한 기술력을 확보하기에는 시간적으로 한계가 있음.
- 여러 가지 공인 시험성적 등 표준화를 하기에는 시간적인 부담과 연구비의 추가적 지원이 필요할 것으로 사료됨.
- 전체적인 구조물에 실제 적용하기에는 테스트베드의 부족과 시방규정상의 제약 등 연구단계에서 실현하기 어려운 제약요소가 다수 존재하며, 이를 해결하기에는 연구기간이 짧음.
- 하지만, 본 연구자는 다수의 콘크리트 재료에 대한 경험과 지식을 가지고 다년간 연구를 진행하여 왔으며, 설정된 목표가 다소 촉박한 일정으로 이루어져 있으나 충분히 수행할 수 있는 역량이 있다고 판단하여 목표를 다음과 같이 설정하였음.

나. 연구개발 핵심성과 및 연구내용

연번	핵심성과물	성과유형	핵심성과 개요
1	기존 시멘트를 LCD 폐유리 미분말로 대체한 고강도, 고내구성 콘크리트 개발	재료·자재	정의 : LCD 폐유리 미분말의 시멘트 대체를 통한 압축강도 40~80MPa급 콘크리트를 개발 목적 : 콘크리트 구조물에 적용하여 경제성, 시공성을 확보한 기술로 고강도, 고내구성의 친환경 콘크리트 배합 및 제조기술 개발
2	LCD 콘크리트를 이용한 프리캐스트 제품 개발	재료·자재	정의 : LCD 폐유리 미분말을 이용한 콘크리트 프리캐스트 시작품을 제작하여 실용화를 추진 목적 : LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 정형화된 모델을 제시하고 실용화를 위한 전초단계로 활용하기 위한 설정

연 차	세부 연구목표	세부 연구내용
1차년도	■ 선행연구 사례조사	- 일반 폐유리와 LCD 폐유리의 발생량 및 처리현황 조사 - 폐유리의 재활용에 관한 연구 조사 - 폐유리를 시멘트, 잔골재, 필러재의 대체 재료로써 활용 연구 분석 - 폐유리 분석 및 처리공정에 관한 연구 조사
	■ 목표성능 설정 및 최적배합비 도출	- LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 목표강도 및 목표성능 설정 - LCD 폐유리 수집 및 입자 크기별 분쇄 - 폐유리 입자 크기별 모르타르 및 콘크리트 공시체 제작 및 강도 평가 - 시멘트와의 포졸란 반응을 고려한 LCD 폐유리의 입자 크기 도출 - 유동성별, 물-결합재비별, 폐유리 혼입률별 모르타르 및 콘크리트 공시체 제작 및 강도 평가 - 경제성, 시공성 등을 고려한 LCD 폐유리 콘크리트의 최적배합비를 도출
	■ 기초 물성평가	- 굳지 않은 콘크리트의 공기량 및 슬럼프 측정을 통한 시공성 평가 - 굳은 콘크리트의 압축강도, 전단강도, 휨강도 시험 등을 통한 기초 물성평가
2차년도	■ 내구성능 및 장기강도 평가	- LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트의 압축강도 시험을 통한 장기강도 평가 및 분석 - LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트 화학적 저항성 확인
	■ 매뉴얼 제작 및 실용화 방안제시	- LCD 폐유리를 혼입한 고강도 콘크리트의 매뉴얼을 작성 - LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트의 프리캐스트 규격품을 고안
	■ 프리캐스트 콘크리트 시작품 제작	- LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트를 이용한 구조물 혹은 프리캐스트 블록식 옹벽 제작 및 개발

○ 국내 현황

- 유리는 다양한 종류가 생산되고 있고, 사용 용도도 건축물의 필수적인 요소로 광범위하게 사용되고 있을 뿐만 아니라 건축물 이외의 용도로도 유리의 사용량이 날로 증대 되고 있음.

- 한편, 국내 유리폐기물의 발생현황은 한국유리공업협동조합의 통계연감 2008년을 기준으로 약 813,000톤으로 집계되었으며, 폐유리 재활용률은 해마다 증가하고 있으나, 70% 정도로 다른 선진국(일본 90.3%)에 비해 아직은 재활용률이 낮은 실정임(한국유리공업협동조합, 2008; 윤승조 등, 2012).

- LCD 폐유리는 국내에서 매년 35,000톤 정도가 발생되고, LCD 제품 생산공정 중 유리판을 절단하다 남은 자투리나 버려지는 LCD 제품에서 파생되는데, LCD 폐유리의 대부분은 재활용되지 못하고 폐기되므로, 폐기장소 부족 문제와 폐기비용 증가 문제를 해결함과 동시에 매립에 따른 환경오염을 방지하기 위하여 LCD 폐유리의 재활용 방안에 관한 연구가 필요한 실정임.

- LCD 폐유리와 같은 디스플레이 산업에서 배출되는 산업부산물의 경우 배출되는 시기가 짧아 진행된 연구가 전무하며, 복잡한 생산 공정을 거치면서 배출되므로 재활용에 어려움이 많음.

- LCD용 기판유리산업에서 발생하는 파유리는 원료의 용해, 유리의 가공 및 용해로 보수과정에서 발생하는 것으로, 현재 국내에서 매년 35,000톤 정도가 발생되는 것으로 추정되며, 재활용 기술을 통해 콘크리트 혼화재로 사용시에 연간 약 2억원 정도의 원가 절감효과를 도모할 수 있음.

- 또한, 현재 사용 후 디스플레이 제품과 관련하여 발생하는 폐기물에 대한 체계적인 통계는 전무한 실정이며, 국내 생산량과 수입량을 고려하여 볼 때 국내에서 사용되는 디스플레이 장치는 2008년 기준 300만대 정도로 추정되고, 디스플레이 제품의 특성상 그 수명을 5~6년으로 가정하면 2014년 이후부터 약 200만대 이상의 폐 디스플레이 장치가 발생되었을 것으로 예상됨(홍현선 등, 2010; 전성환 등, 2012).

- 현재 국내에서 폐 LCD 제품의 재활용은 주로 수작업에 의한 각 모듈별 분해 과정을 거쳐 Case/Frame, DCU(Driving Circuit Unit) 등 비교적 재활용이 용이한 부품은 재활용하고, 재활용 기술력이 미비한 LCD 패널, BLU(Back Lighi Unit) 등은 위탁 처리하여 소각하고 있음. 그러나, 거의 대부분 소각에 의존하고 있는 LCD 패널과 BLU에는 유리, 플라스틱뿐만 아니라 전략적 희소금속, 형광체 등을 함유하고 있어 천연자원빈국으로 희소 금속 다소비형 산업구조를 가지고 있는 국내의 산업 환경에서 이들 자원에 대한 재활용 및 자원순환 기술 개발은 시급히 요구되고 있음(홍현선 등, 2010).

- 국내에서 LCD 유리 재활용에 관한 연구는 최근 들어 일부 업체 또는 대학에서 기초연구가 간헐으로 진행되고 있으나 실용화 단계로의 접근은 아직까지는 어려운 실정임(홍현선 등, 2010).

- 산업폐기물 중 LCD 유리와 같은 용해 공정이나 열가공 공정을 포함한 폐기물은 대부분 안정적인 물질로서의 원료로 가공이 어렵고, 가공 후에도 재활용이 어려워 특별한 사용처가 없어 대부분 매립되므로 이에 대한 처리 및 활용방안이 시급히 마련되어야 할 실정임(이승헌 등, 2010).

○ 국외 현황

□ 대만

- 대만의 TFT-LCD 패널 생산량은 전세계 생산량의 약 39.2%를 차지하여 LCD 폐유리를 콘크리트에 활용하고자 하는 연구가 일부 진행되어 왔으며, 대부분 일반강도 및 초기강도의 연구에 이루어져 있는 상황임.

- 대만에서 이루어진 LCD 폐유리를 이용한 콘크리트의 강도는 일반강도(20MPa급)에 머물러 있는 상황으로 확인되고 있음.

- 대만의 TFT-LCD 제조 산업은 13만톤 이상의 폐기물을 생산했으며 그 중 70%가 재활용되는 등 LCD 생산대비 높은 재활용율을 보이고 있음.

- 폐유리를 수집하여, 고온가열 과정을 거쳐 Glasstone(건축자재)을 생산하며, 대리석이나 화강암 대비 단단하고 마감처리가 쉬운 등 여러 가지 장점을 가지고 있어 건축물 내·외부 인테리어로 사용되고 있는 등 그 활용도를 높이고 있음.

□ 미국

- 미국은 Glassphalt에 아스팔트 혼합물중 골재부분을 파유리로 대체한 사례가 있으며, 1958년 영국에서 처음으로 특허가 출원 되었으며 미주리 주립대학에서 Glassphalt에 대한 기본적인 연구를 수행하여 1971년 볼티어시 Glassphalt란 최초의 아스팔트 포장이 실현 됨.

□ 일본

- 일본에서는 LCD 패널의 유리 기판을 일반폐기물의 소각 후 발생되는 재와 함께 1300℃의 고온의 용광로에서 용해시켜 화학적으로 안정된 슬래그를 생성하며, 이를 건축 자재 및 세라믹 등으로 활용하고 있으나 활용도가 낮은 상황임.

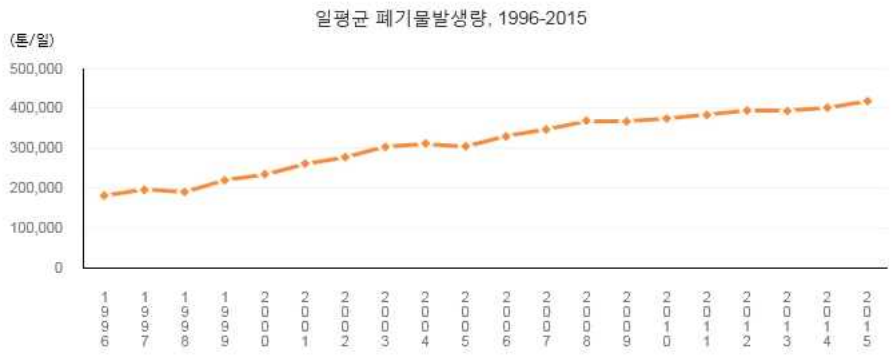
□ 핀란드

- 핀란드의 경우 폐유리를 아스팔트나 시멘트 콘크리트의 골재로서 활용하는 방법과 공업용품(연마재, 여과재 등), 건축재료, 토목재료 등 다양한 용도로 활용하고 있으나 그 양은 많지 않은 상황임.

3.1 1차년도

3.1.1 국내 LCD 폐유리 발생량 및 처리현황 실태조사

1) 산업폐기물 발생 현황

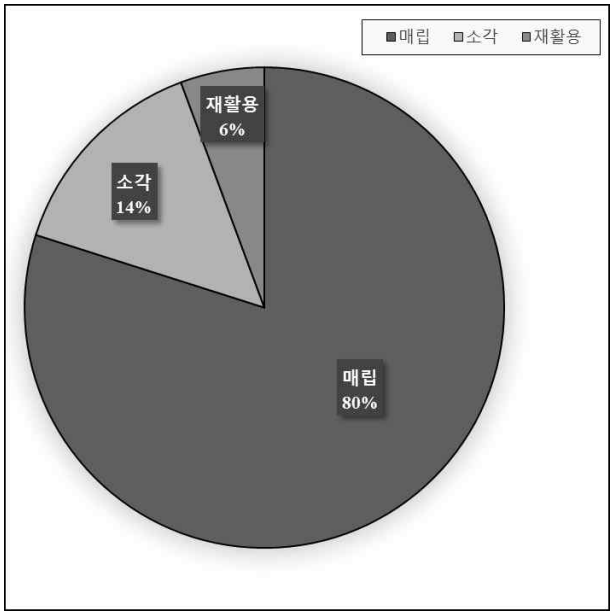


[그림 3.1] 일평균 폐기물발생량 (출처: 환경부)

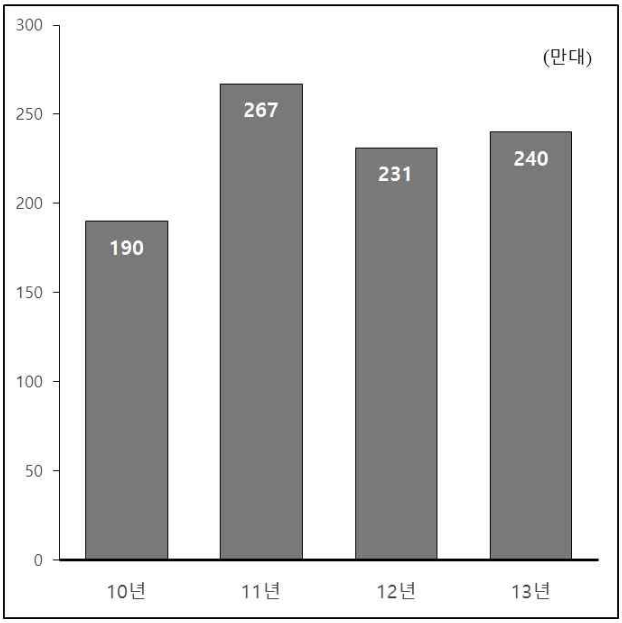
“폐자원”의 사전적 의미는 “쓰고 난 자원”이라는 뜻이지만 최근에는 폐기물 중 에너지원으로써 활용 잠재력을 가지고 있는 자원이라는 의미로 쓰이고 있다. 우리나라는 오는 2020년까지 에너지화가 가능한 폐자원 물량을 전량 에너지화 하는 것을 목표로 설정하여 정부 주도 초기투자 및 제도개선으로 민간시장을 활성화시키고, 산업계 지원 등을 통해 2020년까지 가용 폐자원의 전량 에너지화를 추진 중에 있다.

2) 국내 LCD 폐유리 발생량 및 처리현황

2015년 기준 국가별 디스플레이 세계시장 점유율은 한국 39.2%, 대만 27.4%, 중국 15.5% 기타 17.9%(2015, ‘디스플레이 산업 통계지표’, KDIA)로 한국의 LCD 투자비용은 3조원/년에 달하며, 생산량은 48만대/월(8세대, 50“)로 세계 최고 수준이다.(2015, ‘INVESTMENT OPPORTUNITIES IN KOREA’, Kotra) 스마트폰, 테블릿 등 휴대기기의 생산량과 앞으로의 수요량을 예상하면 LCD 생산량은 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.
LCD 폐유리는 LCD 제품 생산공정 중 유리판을 절단하다 남은 자투리나 버려지는 LCD 제품에서 파생되는데 2000년 초반부터 증가하기 시작한 발생량은 2015년 200만대 이상, 매년 약 460,000ton에 달한다. 이는 상당부분 재활용되지 못하고 매립 또는 폐기되는 실정이다. 매립이나 소각을 통한 방법은 토질오염, 매립장 확보 곤란, 지하수 오염, 이산화탄소로 인한 지구 온난화, 유지비용의 문제로 국가적 차원의 자원 낭비와 다양한 환경오염의 원인이 되고 있다.(신동윤 등, 2015)
LCD 폐유리의 분류는 크게 다음 3가지로 볼 수 있다. 1) LCD Cullet, 2) LCD processing waste glass, (LPWG), 3) End of Life(EOL) LCD waste glass. 본 연구에서 사용한 재료인 LPWG의 경우, LCD 제조업체에서 발생하는 폐유리로 제조과정 중 가공 및 결합불량 등의 이유로 발생하게 된다. 제조과정에서 일부 미량의 화학적 가공의 원인으로 유리표면에 PPM 수준의 Cu, Mn, Mo, Fe 과 같은 원소가 존재할 수 있다. 이러한 이유로 재용융 시 품질 저하로 재활용에 문제가 발생되며 재활용 되지 못하고 소각 또는 매립하고 있는 실정이다. 가공단계에서 필수적으로 발생하는 폐기물로써 2015년 기준, 약 40,000ton 정도가 발생하고 있으며 LCD 시장 크기에 의존한다.



[그림 3.2] 국내 LCD 폐유리 처리현황(2013년 기준)



[그림 3.3] 국내 LCD 폐유리(모니터, TV 등) 발생량(2013년 기준)

구분	업체명	발생량(월)	발생량(년간)
LCD 기판 파유리	코닝정밀소재 NEG ASAHI GLASS AVANSTRATE LG화학	1,500톤 1,400톤 100톤 100톤 150톤	18,000톤 16,800톤 1,200톤 1,200톤 1,800톤
	소계	3,250톤/월	39,000톤/년
PANEL 폐유리	삼성디스플레이 LG디스플레이	2,000톤 1,500톤	24,000톤 18,000톤
	소계	3,500톤/월	42,000톤/년

[표 3.1] 대경권 LCD 파/폐유리 발생량 (출처: 이노소재, 2014년)

3) 건설재료로써의 활용가능성

TFT LCD 유리의 제조에는 용해공정과 열가공 공정이 포함되어있어 다른 무기원료에 비하여 안정적으로 가공하여 재활용하는데 어려움이 있다. 이러한 TFT LCD유리를 원료로 하는 고강도 콘크리트 파일을 개발하는 연구가 진행되었다. TFT LCD 유리는 다음과 같은 장점 때문에 고강도 콘크리트 파일의 원료로 활용될 수 있다.
첫째, 일반 유리와 달리 알칼리가 함유되지 않아 콘크리트의 부피팽창 및 알칼리 실리카 반응에 대한 문제가 없으며, 둘째, 유리의 청징제로 사용된 비소가 SrO로 대체 사용됨으로써 인체에 무해하다. 셋째, 유리 원료인 규산질 소재가 수밀성을 증대 시킬 수 있다. 일반적으로 폐유리의 시멘트 대체재로써 연구는 soda-lime 유리를 대상으로 다량의 알칼리(Na, K)가 포함되어 있어 골재중의 실리카(SiO2)와 반응에 의해 부피 팽창 및 균열이 예상되었다. 시멘트를 대체하는 재료를 사용할 때에 이러한 알칼리-실리카 반응을 인식하는 것은 중요한 부분이다. 하지만, 유리의 반응성은 종류, 구성 물질, 물리적 특성 등에 따라서 달라지는 것을 인식하는 것 또한 중요하다. 특히 미세분말화 된 유리분말은 포졸란 재료로써 AAR 반응의 저감효과와 페이스트 내에서 ASR의 억제를 위한 컨트롤 역할을 하는 것으로 보고되고 있다.
콘크리트 혼합재로 사용하기 위한 TFT-LCD 유리분말과 활성화제의 최적 비율을 조사하기 위해 모르타르 압축강도 시험을 실시한 결과, 유리분말 첨가에 따라 포졸란 반응성이 향상되어 압축강도가 향상되었다. TFT LCD 유리분말의 최적 조건으로는 입도크기 100 ㎛이하, 첨가량은 10%이었으며, 활성화제의 최적 조건으로는 Ca(OH)2를 1% 가량 첨가하는 것이었다. 이는 활성화제 첨가로 인해 미반응 유리분말의 반응이 촉진되어 압축강도가 향상된 것으로 보인다.(전성환 등, 2010)

4) LCD 제조 공정에 따른 분류

TFT LCD는 초박막 액정표시장치(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display)의 약자로, TFT Array 와 컬러필터 사이에 고체와 액체의 중간 상태인 액정(LC : Liquid Crystal)을 상하가 서로 90°나 270° 비틀리도록 주입하고 상하 유리판의 전극에 전기적 신호를 인가하여 액정분자의 배열을 변화시킴으로서 명암을 발생시켜 숫자나 영상을 표시하는 디스플레이 장치로서 노트북PC, LCD TV 및 컴퓨터 모니터, MOBILE 이동기기 등에 이용되고 있다. TFT LCD는 트랜지스터를 구성하는 고체 물질의 종류에 따라 a-Si, Poly-Si으로 분류되며, Poly-Si는 LPTS와 HTPS로 나뉜다.

구분		장점	단점
a-Si		대형화면 구현이 용이 제조공정 용이	응답속도 느림 시야각 좁음
Poly-Si	LTPS	저소비전력, 고응답속도 고집적화 가능	제조공정 난해 a-Si에 비해 고가
	HTPS	고해상도 구현 높은 구동속도	구동전압 높음 대형화 불리

[표 3.2] TFT LCD의 종류 및 특징(출처: 국내 디스플레이 부품 소재 산업의 기술경쟁력 분석 및 육성방안, 한국산업은행)

Display 장치의 형태에 따라 CRT(Cathode Ray Tube)와 FPD(Flat panel Display)로 나눌 수 있는데, 디스플레이 제품의 구동 방식 및 제조 공정에 따라 적용되는 기판유리가 다르며, TFT LCD에는 주로 Alkali-free 유리가 사용된다.

구분	Soda-Lime 유리	Alkali-free 유리	High-strain Point 유리	두께
TN/STN LCD	O	O		0.4~1.1mm
TFT LCD		O		0.7mm
PDP	O		O	2.8mm
수동형 OLED	O			0.7mm
능동형 OLED		O		0.7mm
FED			O	2.8mm

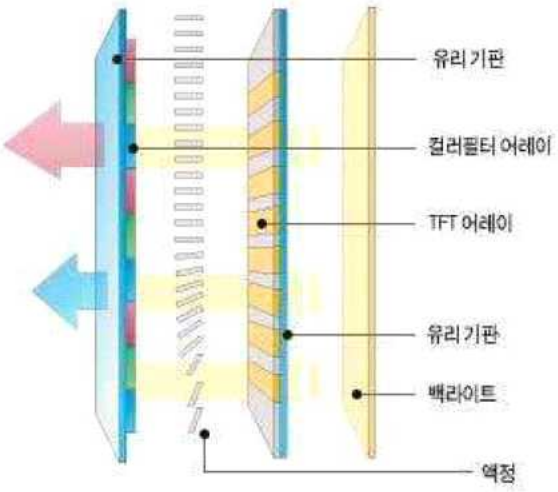
[표 3.3] TFT LCD의 종류별 사용기판유리(출처: 국내 디스플레이 부품 소재 산업의 기술경쟁력 분석 및 육성방안, 한국산업은행)

5) LCD 유리기판

TFT LCD 유리기판은 TFT LCD 패널 구성 요소인 TFT Array와 컬러필터에 부착되는 기판으로 TFT LCD 패널의 핵심소재이다. 일반적인 유리기판 속에 있는 알칼리 성분이 TFT기능을 저하시키기 때문에 TFT LCD용 유리기판은 알칼리 성분이 거의 없는 무 알칼리 유리를 사용한다. 유리기판은 육안으로는 구분이 불가능할 정도의 평탄한 표면과 열에 의한 변형이 없어야 하는 등의 고품질의 특성을 필요로 한다.

구분	Soda-Lime Glass	Non-Alkali Glass
특성	Na, Ca 등 알칼리 이온 함유	Na, Ca 등 알칼리 이온 없음
가공성	연마공정 필요	연마공정 불필요
유리기판 시장내 비중	80% 수준	20% 수준

[표 3.4] 유리기판 재료 비교(출처: 국내 디스플레이 부품 소재 산업의 기술경쟁력 분석 및 육성방안, 한국산업은행)



[그림 3.4] LCD패널에서의 유리기판
(출처: 국내 디스플레이 부품 소재 산업의
기술경쟁력 분석 및 육성방안, 한국산업은행)

6) LCD 폐유리 처리공정

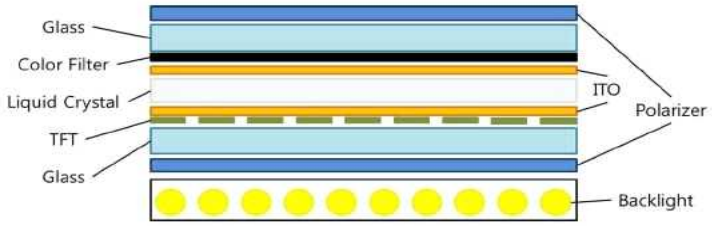


[그림 3.5] LCD 폐유리 처리 Process

3.1.2 LCD 폐유리 수집 및 크기별 분쇄

1) LCD 폐유리 수집

폐 디스플레이의 유리 소재를 재활용하기 위해서는 먼저 폐 디스플레이를 해체/분리하는 작업을 거쳐야 한다. 예를 들어, LCD를 해체하면 [그림 3.6]과 같은 구조를 가진 LCD 패널 부분을 분리해 낼 수 있는데 여기에서 backlight를 제거하면 두 장의 유리의 가장자리 부분을 절단하면 유리 상판 부분과 유리 하판 부분으로 분리할 수 있다. 재활용하고자 하는 최종 제품 형태에 따라 유리 상태 그대로 원료로 사용할 수도 있지만 인듐 등의 유가자원을 먼저 회수하는 경우도 있다. 그리고 color filter 등 유리에 붙어 있는 이물질들을 적절히 제거한 다음, 재활용 제품의 제조공정에 알맞은 크기로 유리를 파쇄하여 이렇게 분쇄된 분말을 선별 작업을 통해 활용 가능 여부를 판단한 후 이송하여 저장 및 출하한다. (신동윤 등, 2015)
LCD 폐유리를 활용하여 콘크리트용 결합재로의 사용성 확보와 더불어 활성도 개선을 위하여 전처리 공정을 거쳐 유용자원 선별 및 추출하여 정밀 분쇄 작업을 실시하였으며, 그에 대한 공정 과정을 아래 [그림3.7]에 나타내었다.



[그림 3.6] Cross-sectional view of TFT-LCD panel
(출처: 신동윤 등, 2015)



[그림 3.7] LCD 폐유리 처리 Process



[그림 3.8] LCD 폐유리 수집, 운반



[그림 3.9] 미분쇄 설비



[그림 3.10] 미분말 Silo 및 분급



[그림 3.11] LCD 폐유리의 미분말

2) 폐유리의 입자크기별 미분화

LCD 폐유리 및 Panel 폐유리를 활용하여 콘크리트용 결합재로써의 사용성을 확인하기 위해 해머크래셔와 대용량 원뿔형 볼밀을 이용한 미분말화 작업을 실시하였다. LCD 폐유리 및 Panel 폐유리의 경우 시멘트 대비 비중이 낮고, Fe 성분이 적어 분쇄가 용이하나 경도에 의해 일반적인 방법으로는 10 um이하의 미분말을 제조하기 어렵다. Y. Shao 등(1999) 은 시멘트 대체로써, 콘크리트 강도 및 알칼리 실리카 반응성 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 유리는 #100 체(150μm)를 통과하고 #200 체 (75μm)에 남는 것, #200체 (75μm)를 통과하고 #400체 (38μm)에 남는 것, #400체 (38μm)를 통과하는 것으로 입자별 3가지로 분류하였다. 압축 실험결과 [그림 3.12]과 같이 폐유리의 입도가 작을수록 압축강도가 크게 나타났고, 38 μm이상의 폐유리 분말을 혼입한 경우 일반 콘크리트에 비하여 재령 3일에 91%, 7일에 84%, 28일에 96%, 90일에 108%로 모든 양생기간 동안 배합강도의 75%를 초과하였다.

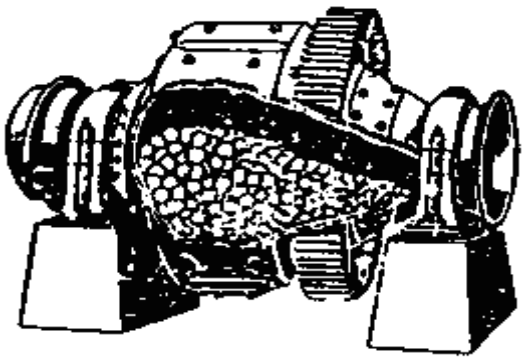


[그림 3.12] 폐유리를 혼입한 콘크리트의 압축강도(Y. Shao 등, 1999)

본 연구에서는 LCD 폐유리의 미분말화를 위해 볼밀을 이용하여 분쇄하였다. 회전원통용기 내에 LCD 폐유리와 분쇄매체인 알루미늄 ball을 넣어 분쇄를 행하는 분쇄기로, 긴 역사와 실적이 있고, 신뢰성이 높으며 구조가 간단하다. 그림 3.13과 3.14는 Conical ball mill을 나타내었다. Conical ball mill의 특징은 크고 작은 Ball을 장입해서 회전하는 것에 의해 큰 Ball은 공급구 측에 작은 Ball은 배출측에 분포하여 합리적인 분쇄가 행해질 수 있데 한다. 최적회전수 N(r. p. m)은 일반적으로 다음과 같은 식으로 주어진다. 여기서 D(m)는 mill의 내경이다.

$$N = \frac{32}{\sqrt{D}}$$

본 연구에서 사용된 건식방법에 의한 미분말 분쇄 시 가장 중요한 것은 시료 내에 잔류 수분이 전혀 없어야 하며, 입자와 입자사이에 존재하는 미립화 방해물질을 제거하여야 하고, 또한 미분화가 진행되는 동안 외부로부터의 수분 및 공기의 침투를 막아야 한다. 따라서 원료는 건조시킨 후 투입하고, 분쇄 매체로는 지름이 2mm인 스테인리스 ball과 미분화 진행시 오염을 줄이기 위하여 지름이 1, 2mm인 알루미늄 ball을 각각 사용하여 미분화 효율 및 오염의 정도를 확인하였다. 여기서 분쇄를 위한 분쇄 매체로 사용한 ball 장입량 결정은 기초실험에 의해 가장 경제적이며 목적으로 하는 입경의 LCD 폐유리의 미분립화 효율이 가장 좋은 조건인 분쇄 용량 전체 부피의 60%를 차지하는 양으로 결정하였다. LCD 폐유리의 투입량은 분쇄 매체로 사용된 ball 각 개개의 사이를 충분히 충진시켜줄 수 있는 량을 중심으로 투입량 조절하였다. 본 장비의 회전 속도 역시 기초실험 결과에 의하여 적용하였다. 따라서 LCD 미분말의 12um 분쇄 시 약 500rpm, 5um 분쇄 시 약 700rpm의 회전수를 사용하였다. 장입되는 ball의 무게비는 stainless와 alumina의 비중 차이 때문에 약 2배의 차이가 있었다.
실리카질 재료는 경도가 다른 광물보다 커서 분쇄하기가 대단히 어려운 광물 중 하나로, 분쇄 후에도 모서리가 뾰족한 모양이고 분쇄도중에 불순물에 따라서 품질의 저하가 발생하고, 분체의 이송과정에서 이송관 또는 토출구의 마모 등 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 입자의 모양을 구형화 하였다.



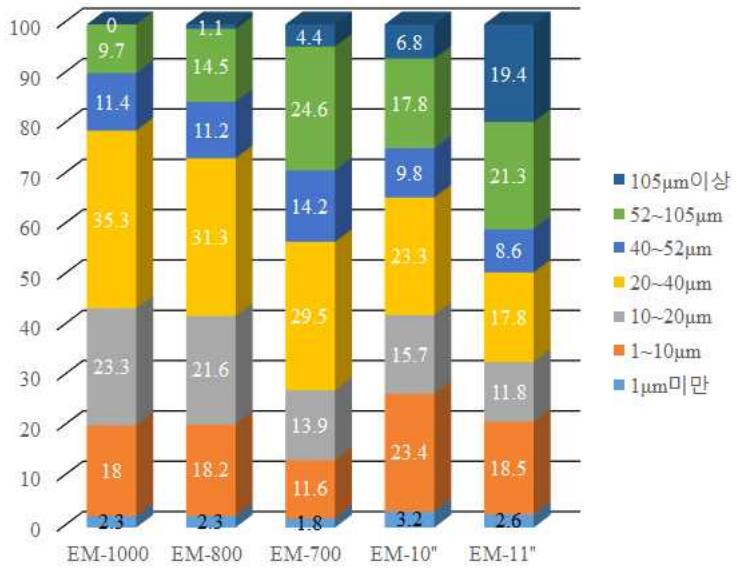
[그림 3.13] Conical ball mill



[그림 3.14] 'I'사의 Conical 볼밀(Ball Mill)

3) LCD 폐유리 입경 크기별 분쇄

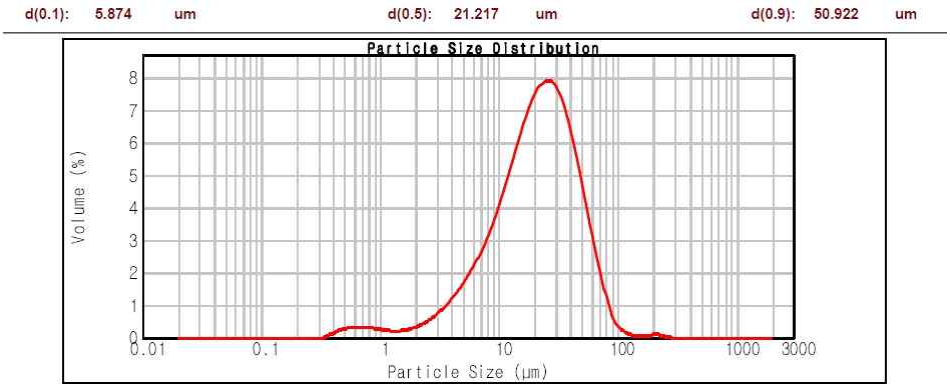
1차 미분화 작업을 통해 [그림 3.15]와 같이 파쇄형태에 따라 5개의 재료로 구분하고 이 중 10~20 um이 가장 많이 분포하고 있는 EM-1000의 시료를 선택하여 목적에 따라 시멘트와 유사한 평균입경 12 um 미분말과 평균적으로 시멘트보다 작은 입경인 5 um로 2차 미분을 수행하였다. 이러한 입경의 영향은 LCD 폐유리의 활용에 있어서 큰 영향을 미친다. 2차 분쇄된 최종 미분말의 입형은 [그림 3.11]과 같으며 장시간의 분쇄 공정을 통해 재료의 구상화가 다소 진행 되었다. 일반적으로 분체의 흡착성과 반응성의 증대에는 고체의 표면적이 관여하고 있다. 비표면적은 분쇄율에 따라 증대되며 재료내에서 화학적 반응의 속도를 촉진시킬 수가 있다.



[그림 3.15] 1차 분쇄 후 시료의 입도 현황

4) LCD 폐유리 입도분포 및 형상 평가

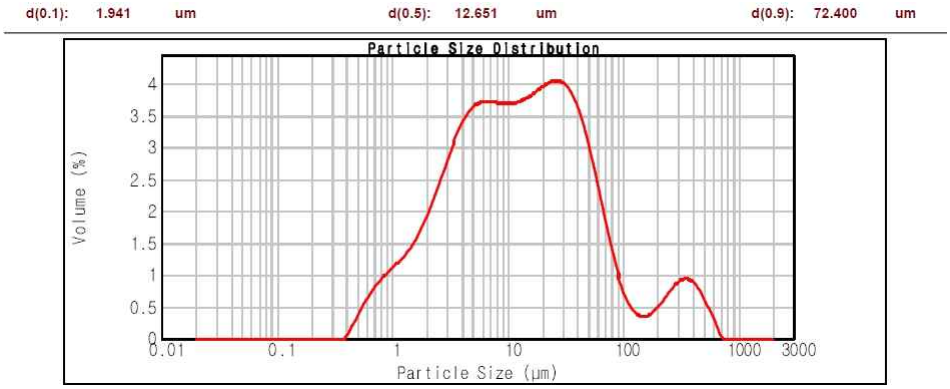
실험에 사용한 LCD 미분말은 볼밀을 이용하여 시멘트 대체재로서의 활용성과 성능을 높이기 위해 OPC 보다 재료의 평균입경을 작게 하였다. 실제로 OPC를 구성하는 가장 작은 입경이 3~5 마이크로미터를 포함하는 반면, LCD 미분말에는 일부 1마이크로미터보다 작거나 조금 더 큰 미세한 크기를 포함하고 있다. 즉, 시멘트 재료의 입도분포가 유사하지만 실제로 LCD 미분말이 OPC보다 입경이 더 작게 분쇄되었다. 이러한 작용은 콘크리트 내부의 시멘트 페이스트에서 물리적 또는 화학적으로 어떠한 과정을 통해서든지 필러역할과 포졸란 반응을 통해 강도와 내구성 측면에서 유리하게 작용할 것이다. 시멘트의 대체를 위한 LCD 유리 파우더는 평균입경에 따라서 2종류로 구분하였다. 연구목적에 따라 LCD 폐유리를 5um, 12um로 나누어 2차 분쇄하였고, 분쇄된 재료의 Particle Size Analyzer(PSA) 시험성적서 및 입도분석 결과를 그림 3.16부터 3.19까지 재료별로 나타내었다. 전체적인 LCD 폐유리의 입도분포는 크기는 OPC의 입도분포와 유사하게 나타났다.



[그림 3.16] OPC의 입도분포 곡선

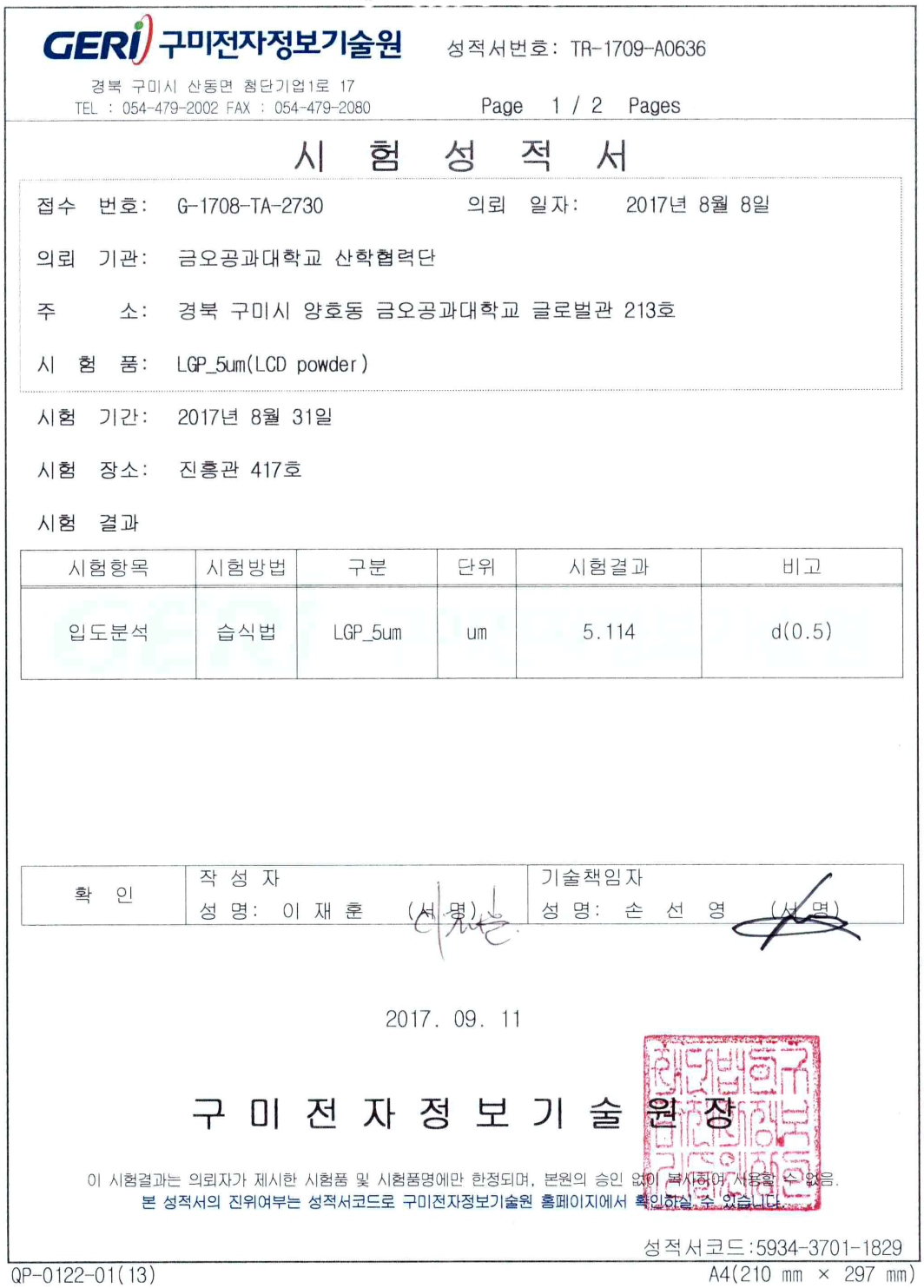


[그림 3.19] 평균입경 5.807 um LCD 폐유리의 입도분포 곡선



[그림 3.20] 평균입경 12.651 um LCD 폐유리의 입도분포 곡선

LCD 미분말의 낮은 입경은 높은 비표면적에 기인하여 포졸란 활성의 개선을 기대할 수 있으며, 실제 입경의 크기는 포졸란 반응의 특성에 있어서 중요한 파라미터이다. 이에 따라 평균입경 12.651 μm는 입경의 분포와 크기가 시멘트와 유사하고, 평균입경 5.807 μm의 미분말은 시멘트의 분말도가 약 2배 이상 되도록 분쇄되었다. 2가지 재료 모두 1 μm이하의 미분말을 포함하고 있으며 최소입경의 미분말 10%의 평균은 1.941 μm, 1.170 μm이다. LCD 5um 재료가 평균입경 5.807 um으로 비교적 미세한 입자로 구성되어있으며, LCD 12um 재료는 이보다 큰 평균 12.651um 로 나타났다. 이는 사용된 OPC의 평균 입경을 [그림 3.16]과 같이 21.217 um로 보았을 때 시멘트의 평균 입경보다 미분되어 분쇄된 것으로 나타났다. LCD 12um의 입도분포곡선 결과를 보면 시멘트와 상당히 유사한 입도분포를 보이고 있다. 2차 분쇄된 LCD 폐유리의 입도분포 평균입경을 고려할 때, 비교적 20 um 이하 미분의 입도가 상대적으로 많은 반면에 100 um 이상의 조대한 입자가 다수 함유되어 있음을 보여주고 있다. 평균입경에 비교해서 미분의 입자가 비교적 많이 함유되어 있는 것은 [그림 3.19]와 같이 SEM의 결과에서도 확인할 수 있었으며, 입자의 뾰족한 모서리들이 상당히 무뎌져 구형화 형태로 변한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 분쇄의 공정과 장비의 특성 등과 관련이 있는 것으로 판단된다.



GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0636

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 1 / 2 Pages

시 험 성 적 서

접수 번호: G-1708-TA-2730 의뢰 일자: 2017년 8월 8일

의뢰 기관: 금오공과대학교 산학협력단

주 소: 경북 구미시 양호동 금오공과대학교 글로벌관 213호

시 험 품: LGP_5um(LCD powder)

시험 기간: 2017년 8월 31일

시험 장소: 진흥관 417호

시험 결과

시험항목	시험방법	구분	단위	시험결과	비고
입도분석	습식법	LGP_5um	um	5.114	d(0.5)

확 인	작 성 자	기술책임자
	성 명: 이 재 훈 (서명)	성 명: 손 선 영 (서명)

2017. 09. 11

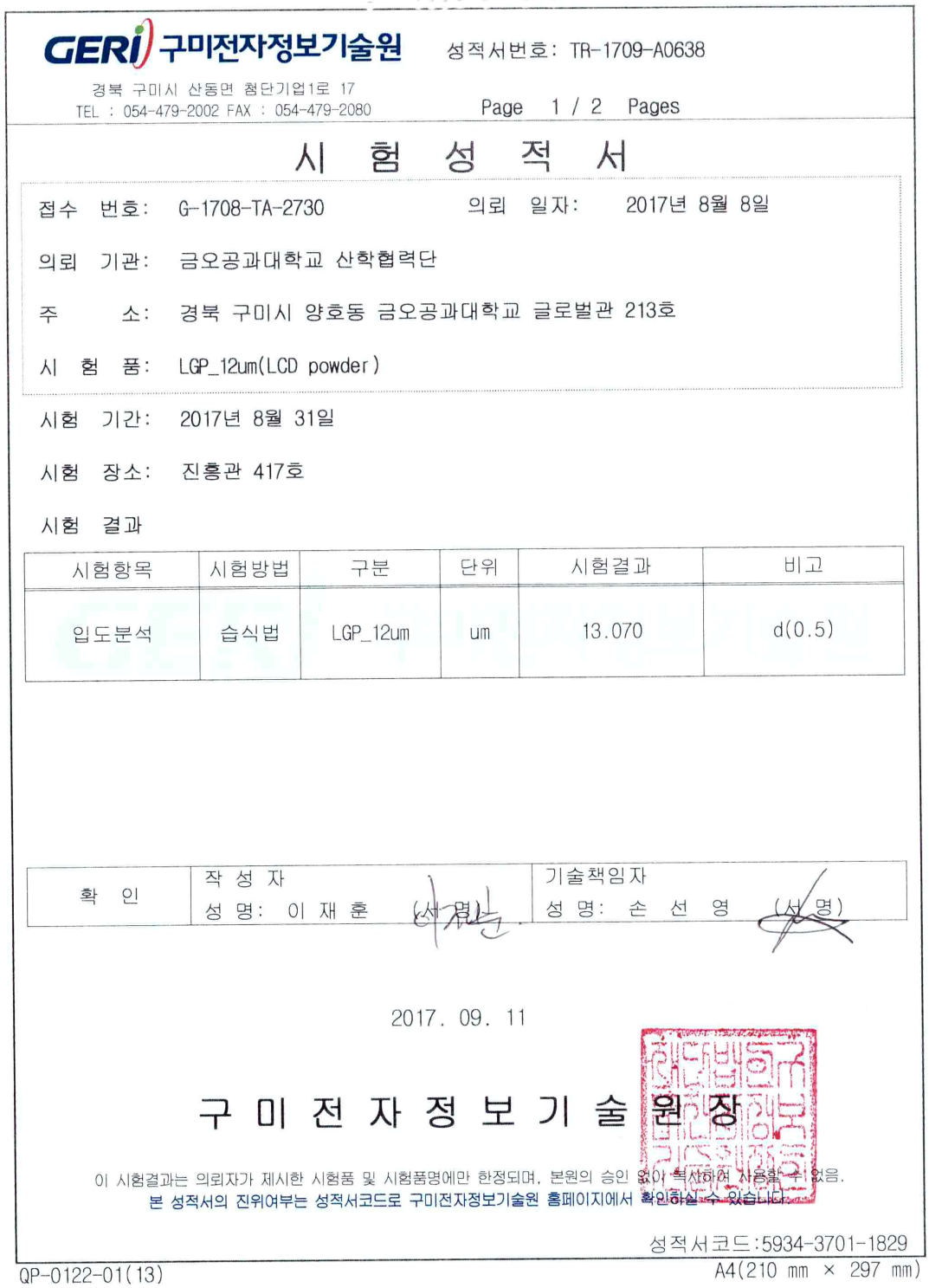
구 미 전 자 정 보 기 술 원 장

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시험품 및 시험품명에만 한정되며, 본원의 승인 없이 복사하여 사용할 수 없음.
본 성적서의 진위여부는 성적서코드로 구미전자정보기술원 홈페이지에서 확인하실 수 있습니다.

성적서코드:5934-3701-1829

QP-0122-01(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.17] 국가공인시험검사기관의 5um PSA 시험 결과 (1-2)



GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0638

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 1 / 2 Pages

시 험 성 적 서

접수 번호: G-1708-TA-2730 의뢰 일자: 2017년 8월 8일

의뢰 기관: 금오공과대학교 산학협력단

주 소: 경북 구미시 양호동 금오공과대학교 글로벌관 213호

시 험 품: LGP_12um(LCD powder)

시험 기간: 2017년 8월 31일

시험 장소: 진흥관 417호

시험 결과

시험항목	시험방법	구분	단위	시험결과	비고
입도분석	습식법	LGP_12um	um	13.070	d(0.5)

확 인	작 성 자	기술책임자
	성 명: 이 재 훈 (서명)	성 명: 손 선 영 (서 명)

2017. 09. 11

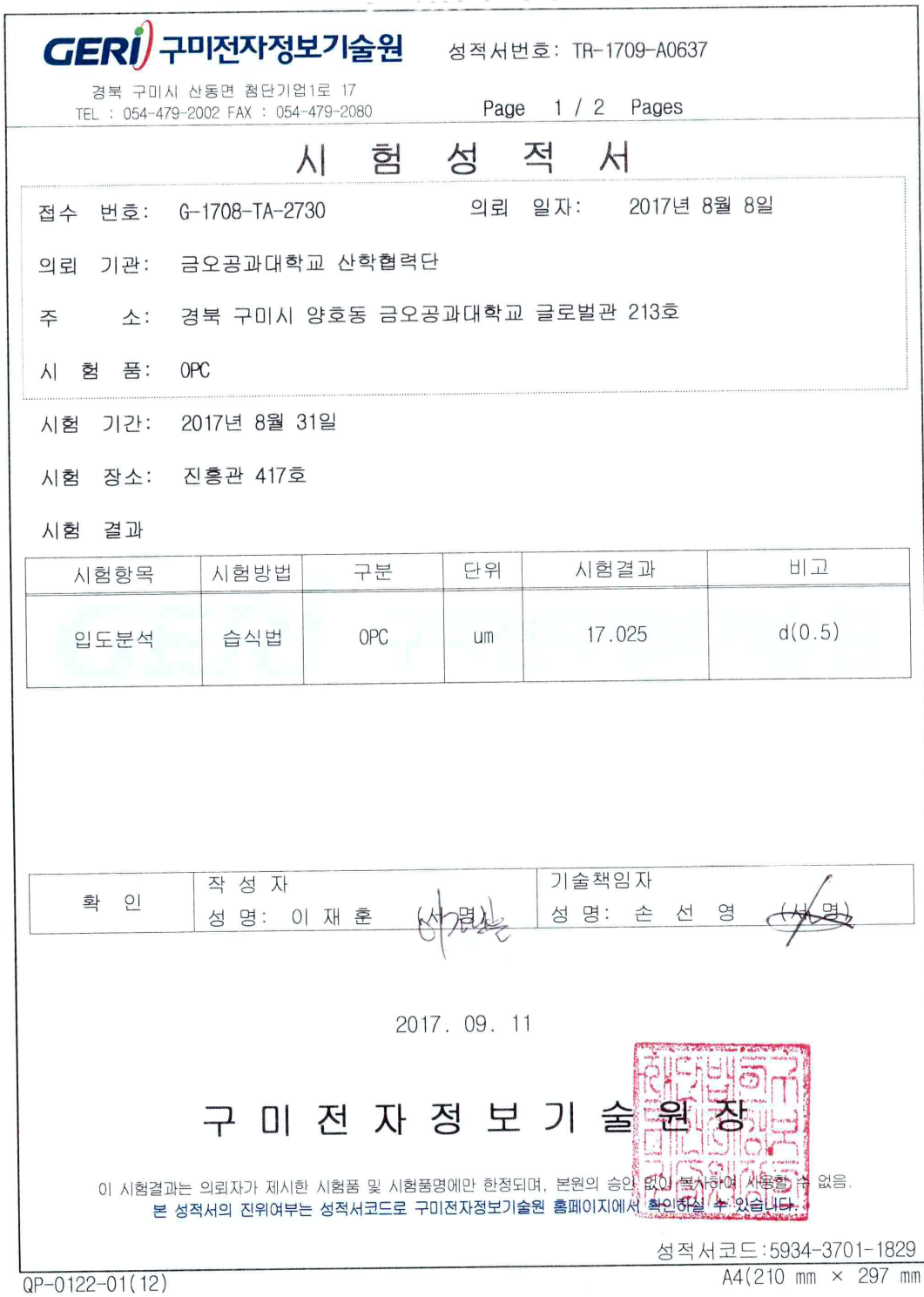
구 미 전 자 정 보 기 술 원 장

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시험품 및 시험품명에만 한정되며, 본원의 승인 없이 복사하여 사용할 수 없음.
본 성적서의 진위여부는 성적서코드로 구미전자정보기술원 홈페이지에서 확인하실 수 있습니다.

성적서코드:5934-3701-1829

QP-0122-01(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.18] 국가공인시험검사기관의 12um PSA 시험 결과 (1-2)



GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0637

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 1 / 2 Pages

시 험 성 적 서

접수 번호: G-1708-TA-2730 의뢰 일자: 2017년 8월 8일

의뢰 기관: 금오공과대학교 산학협력단

주 소: 경북 구미시 양호동 금오공과대학교 글로벌관 213호

시 험 품: OPC

시험 기간: 2017년 8월 31일

시험 장소: 진흥관 417호

시험 결과

시험항목	시험방법	구분	단위	시험결과	비고
입도분석	습식법	OPC	um	17.025	d(0.5)

확 인	작 성 자	기술책임자
	성 명: 이 재 훈 (서명)	성 명: 손 선 영 (서명)

2017. 09. 11

구 미 전 자 정 보 기 술 원 장

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시험품 및 시험품명에만 한정되며, 본원의 승인 없이 복사하여 사용할 수 없음.
본 성적서의 진위여부는 성적서코드로 구미전자정보기술원 홈페이지에서 확인하실 수 있습니다.

성적서코드:5934-3701-1829

QP-0122-01(12) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.21] 국가공인시험검사기관의 OPC PSA 시험 결과 (1-2)

GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0637

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 2 / 2 Pages

시 험 결 과

1. 사용장비

Used equipment	Equipment Specifications
Particle Size Analyzer	1. Range: 0.02 ㎛ ~ 2000 ㎛ 2. Measurement principle: Mie scattering 3. Light sources - Red light : helium-neon laser - Blue light : solid-state light source

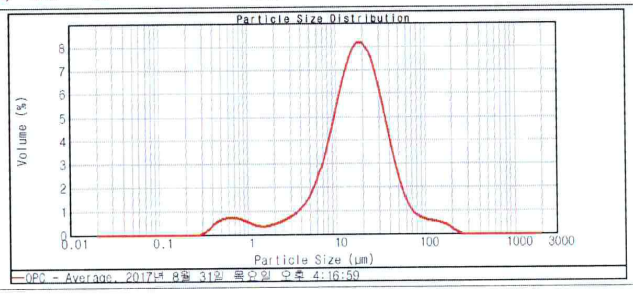
2. 시험결과

OPC

Result Analysis Report

Sample Name: OPC - Average	**SOP Name:**	**Measured:** 2017년 8월 31일 목요일 오후 4:16:59	
Sample Source & type:	**Measured by:** 입도분석기	**Analysed:** 2017년 8월 31일 목요일 오후 4:17:00	
Sample bulk lot ref:	**Result Source:** Averaged		
Particle Name: Default	**Accessory Name:** Hycro 2000S (A)	**Analysis model:** General purpose	**Sensitivity:** Normal
Particle RI: 1.520	**Absorption:** 0.1	**Size range:** 0.020 to 2000.000 um	**Obscuration:** 8.55 %
Dispersant Name: Water	**Dispersant RI:** 1.330	**Weighted Residual:** 0.946 %	**Result Emulation:** Off
Concentration: 0.0099 %Vol	**Span :** 2.321	**Uniformity:** 0.818	**Result units:** Volume
Specific Surface Area: 0.923 m?g	**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 6.497 um	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 23.224 um	

d(0.1): 4.505 um d(0.5): 17.025 um d(0.9): 44.027 um



끝.

QP-0122-02(12) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.22] 국가공인시험검사기관의 OPC PSA 시험 결과 (2-2)

GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0636

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 2 / 2 Pages

시 험 결 과

1. 사용장비

Used equipment	Equipment Specifications
Particle Size Analyzer	1. Range: 0.02 ㎛ ~ 2000 ㎛ 2. Measurement principle: Mie scattering 3. Light sources - Red light : helium-neon laser - Blue light : solid-state light source

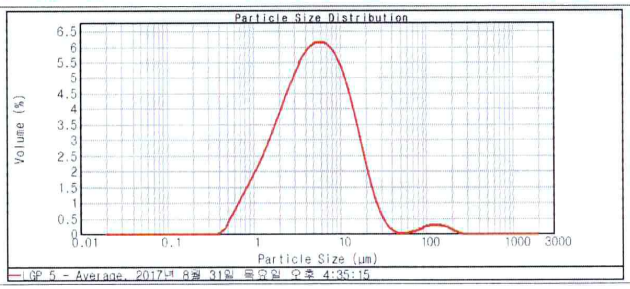
2. 시험결과

LGP_5um

Result Analysis Report

Sample Name: LGP 5 - Average	**SOP Name:**	**Measured:** 2017년 8월 31일 목요일 오후 4:35:15	
Sample Source & type:	**Measured by:** 입도분석기	**Analysed:** 2017년 8월 31일 목요일 오후 4:35:16	
Sample bulk lot ref:	**Result Source:** Averaged		
Particle Name: Default	**Accessory Name:** Hydro 2000S (A)	**Analysis model:** General purpose	**Sensitivity:** Normal
Particle RI: 1.520	**Absorption:** 0.1	**Size range:** 0.020 to 2000.000 um	**Obscuration:** 7.20 %
Dispersant Name: Water	**Dispersant RI:** 1.330	**Weighted Residual:** 2.102 %	**Result Emulation:** Off
Concentration: 0.0034 %Vol	**Span :** 2.837	**Uniformity:** 1.21	**Result units:** Volume
Specific Surface Area: 1.88 m?g	**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 3.195 um	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 8.845 um	

d(0.1): 1.374 um d(0.5): 5.114 um d(0.9): 15.885 um



끝.

QP-0122-02(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.23] 국가공인시험검사기관의 5um PSA 시험 결과 (2-2)

GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0638

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 2 / 2 Pages

시 험 결 과

1. 사용장비

Used equipment	Equipment Specifications
Particle Size Analyzer	1. Range: 0.02 ㎛ ~ 2000 ㎛ 2. Measurement principle: Mie scattering 3. Light sources - Red light : helium-neon laser - Blue light : solid-state light source

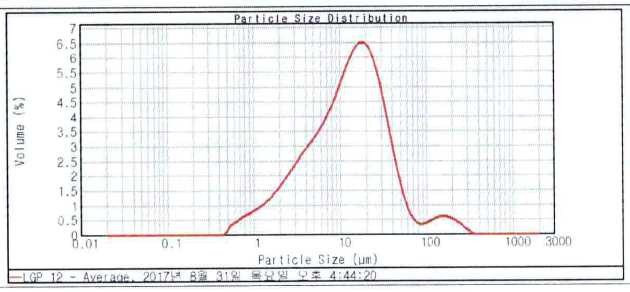
2. 시험결과

LGP_12um

Result Analysis Report

Sample Name: LGP 12 - Average	**SOP Name:**	**Measured:** 2017년 8월 31일 목요일 오후 4:44:20	
Sample Source & type:	**Measured by:** 실드분보기	**Analysed:** 2017년 8월 31일 목요일 오후 4:44:21	
Sample bulk lot ref:	**Result Source:** Averaged		
Particle Name: Default	**Accessory Name:** Hydro 2000S (A)	**Analysis model:** General purpose	**Sensitivity:** Normal
Particle RI: 1.520	**Absorption:** 0.1	**Size range:** 0.020 to 2000.000 um	**Obscuration:** 7.41 %
Dispersant Name: Water	**Dispersant RI:** 1.330	**Weighted Residual:** 1.313 %	**Result Emulation:** Off
Concentration: 0.0064 %Vol	**Span :** 2.810	**Uniformity:** 1.17	**Result units:** Volume
Specific Surface Area: 1.01 m²g	**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 5.915 um	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 21.416 um	

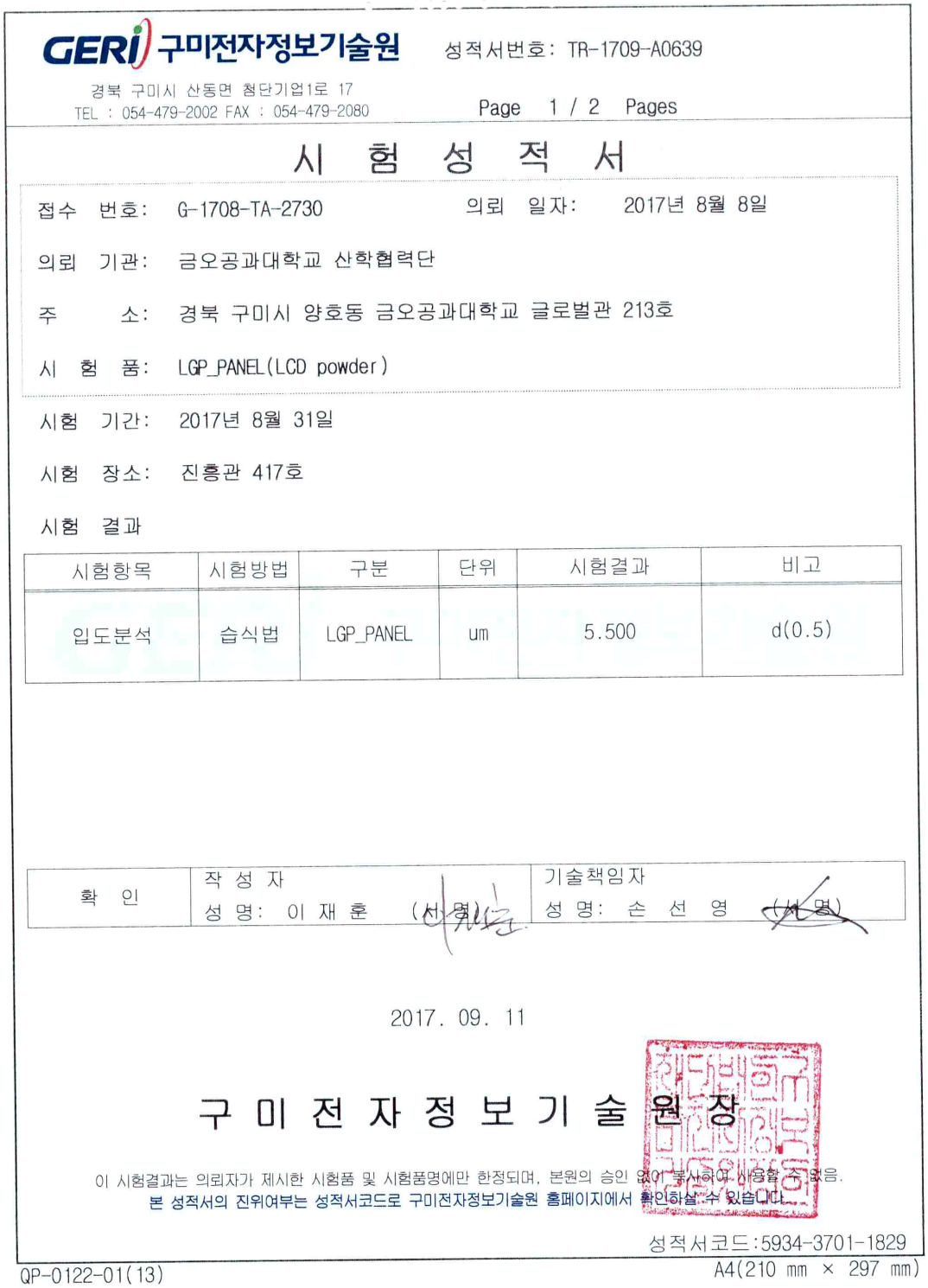
d(0.1): 2.451 um d(0.5): 13.070 um d(0.9): 39.175 um



끝.

QP-0122-02(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.24] 국가공인시험검사기관의 12um PSA 시험 결과 (2-2)



GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0639

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 1 / 2 Pages

시 험 성 적 서

접수 번호: G-1708-TA-2730 의뢰 일자: 2017년 8월 8일

의뢰 기관: 금오공과대학교 산학협력단

주 소: 경북 구미시 양호동 금오공과대학교 글로벌관 213호

시 험 품: LGP_PANEL(LCD powder)

시험 기간: 2017년 8월 31일

시험 장소: 진흥관 417호

시험 결과

시험항목	시험방법	구분	단위	시험결과	비고
입도분석	습식법	LGP_PANEL	um	5.500	d(0.5)

확 인	작 성 자	기술책임자
	성 명: 이 재 훈 (서명)	성 명: 손 선 영 (서명)

2017. 09. 11

구 미 전 자 정 보 기 술 원 장

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시험품 및 시험품명에만 한정되며, 본원의 승인 없이 복사하여 사용할 수 없음.
본 성적서의 진위여부는 성적서코드로 구미전자정보기술원 홈페이지에서 확인하실 수 있습니다.

성적서코드:5934-3701-1829

QP-0122-01(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.25] 국가공인시험검사기관의 Panel PSA 시험 결과 (1-2)

GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0639

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 2 / 2 Pages

시 험 결 과

1. 사용장비

Used equipment	Equipment Specifications
Particle Size Analyzer	1. Range: 0.02 ㎛ ~ 2000 ㎛ 2. Measurement principle: Mie scattering 3. Light sources - Red light : helium-neon laser - Blue light : solid-state light source

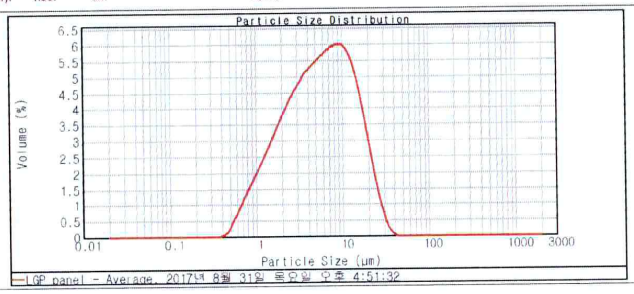
2. 시험결과

LGP_PANEL

Result Analysis Report

Sample Name: LGP panel - Average	**SOP Name:**	**Measured:** 2017년 8월 31일 목요일 오후 4:51:32	
Sample Source & type:	**Measured by:** 입도분석기	**Analysed:** 2017년 8월 31일 목요일 오후 4:51:34	
Sample bulk lot ref:	**Result Source:** Averaged		
Particle Name: Default	**Accessory Name:** Hydro 2000S (A)	**Analysis model:** General purpose	**Sensitivity:** Normal
Particle RI: 1.520	**Absorption:** 0.1	**Size range:** 0.020 to 2000.000 um	**Obscuration:** 7.56 %
Dispersant Name: Water	**Dispersant RI:** 1.330	**Weighted Residual:** 1.886 %	**Result Emulation:** Off
Concentration: 0.0036 %Vol	**Span :** 2.707	**Uniformity:** 0.848	**Result units:** Volume
Specific Surface Area: 1.84 m²g	**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 3.261 um	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 7.401 um	

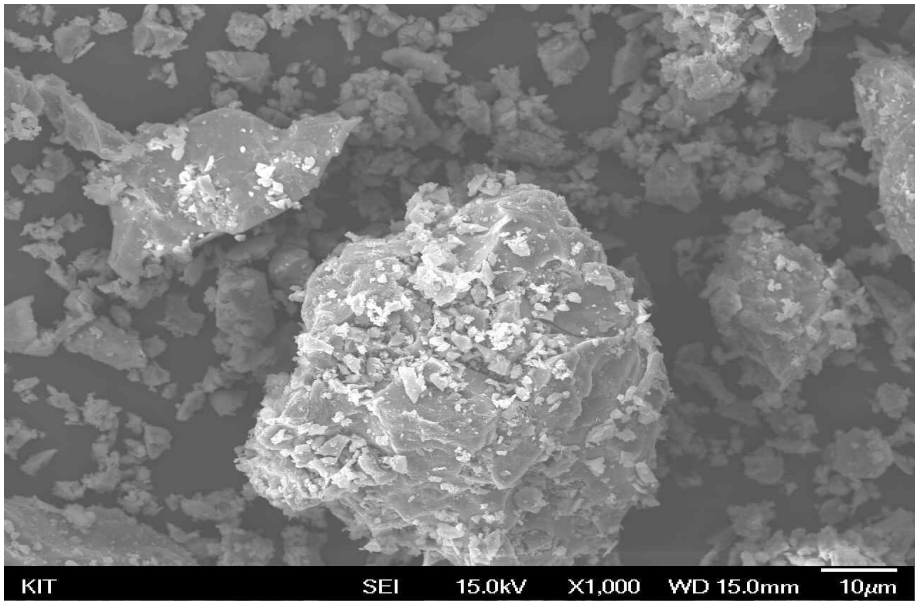
d(0.1): 1.367 um d(0.5): 5.500 um d(0.9): 16.255 um



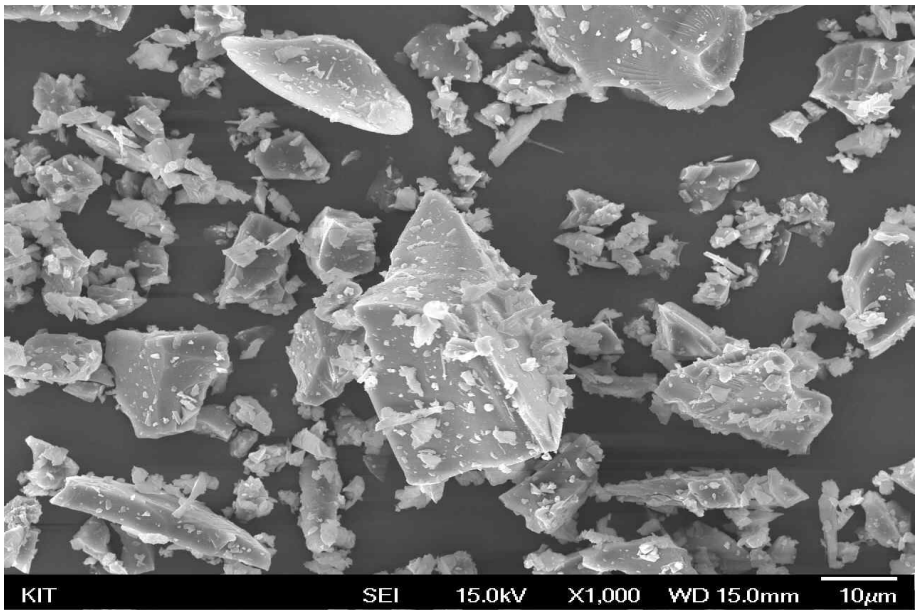
끝.

QP-0122-02(13) A4(210 mm × 297 mm)

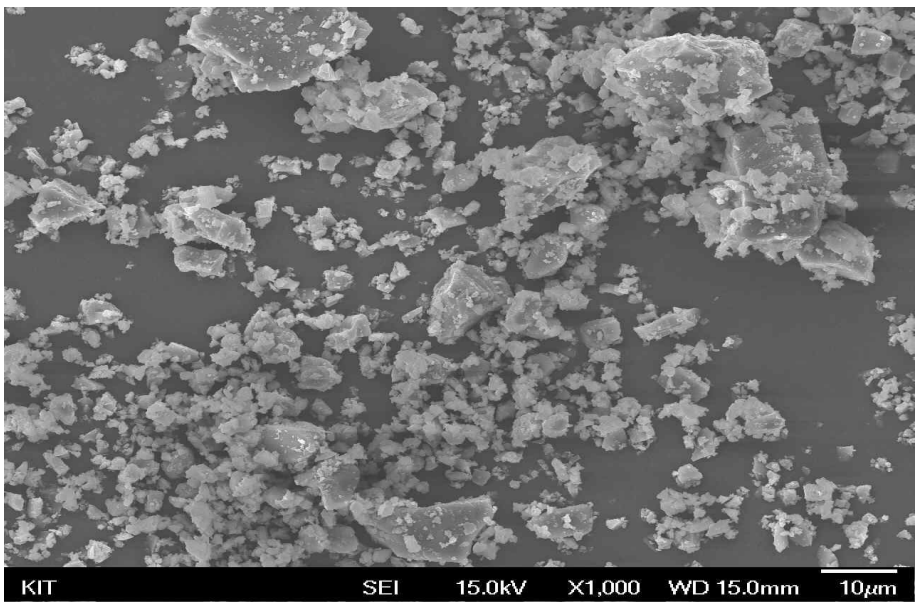
[그림 3.26] 국가공인시험검사기관의 Panel PSA 시험 결과 (2-2)



[그림 3.27] OPC 입형(SEM X 1,000)



[그림 3.28] LCD 12 um 입형(SEM X 1,000)



[그림 3.29] LCD 5 um 입형(SEM X 1,000)

3.1.3 일반 폐유리와 LCD 폐유리의 화학적 성분 비교 분석

1) 화학조성

OPC, 5um, 12um, Panel에 대하여 XRF를 통하여 산화물에 대한 정량적인 분석을 실시한 결과를 아래 표에 나타내었다. 화학적 성분에서 SiO_2는 66.3 ~ 66.9%, Al_2O_3는 18.0 ~ 18.2 %로 가장 많은 비율의 성분으로 나타났다. 이러한 특성은 수분이 존재하는 경우 수용성의 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 반응하여 수경성의 실리케이트 또는 알루미늄 실리케이트의 생성이 가능하다. 낮은 알카리 함량과 높은 SiO2 함량을 가지는 LCD 폐유리 미분말은 더욱 많은 수산화칼슘과 결합할 수 있으며 포졸란 반응의 범위를 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

구 분	MgO	Al2O3	SiO2	CaO	Fe2O3	SO3	K2O
OPC	2.84	4.04	19.0	65.1	3.09	3.77	1.57
5um	0.452	18.2	66.9	10.0	0.0794	-	0.0571
12um	0.421	18.0	65.7	10.3	0.114	-	0.0445
Panel	1.05	18.1	66.3	9.10	0.104	-	-

[표 3.6] 국가공인시험검사기관의 화학성분 시험 결과(%)

LCD 폐유리의 주요 화학성분은 SiO2로 나타났으며, 함유량은 약 66%으로 FA와 거의 유사한 화학조성을 나타내었다. 특히 SiO2는 콘크리트 중에서 수산화칼슘과 반응해 C-S-H 겔을 형성함으로써 콘크리트 중의 공극구조를 개선하여 강성 및 내구성을 향상시키는 대표적인 산화물이므로, LCD 폐유리를 활용한 콘크리트의 경우 포졸란 반응에 의한 강도 개선이 나타날 것으로 판단된다. 또한, LCD 폐유리의 주요 화학성분 중 MgO, Al2O3, SiO2의 전체 산화물에 대한 함유량은 각각 약 4.21~1.05%, 18%, 66%로 나타났다. LCD 폐유리의 경우 수화반응과 관련된 Si, Mg, Al으로 인하여 C-S-H겔 형성 및 변형된 형태의 수화물이 생성될 가능성이 있다.
또한 LCD 폐유리의 SO3 함유량은 거의 없는 것으로 측정되었다. SO3는 시멘트 내에 석고 형태로 있는 황산염으로, 시멘트 내의 주요 화합물인 알루미네이트(C3A)가 매우 높은 반응성을 나타내며, 알루미네이트를 에트린자이트(Ettringite)로 변화시켜 시멘트가 급결하는 것을 막아 응결을 지연시키는 역할을 한다. 시멘트 내에 삼산화황이 너무 많으면 강열감량이 증가 및 콘크리트의 팽창이 발생하고, 너무 적으면 강열감량 감소 및 응결 촉진이 발생한다. 또한 KS에 제정된 콘크리트용 결합재에 대한 삼산화황 품질기준은 OPC 3.0% 이하로 LCD폐유리의 활용에 따른 결합재의 SO3 함유량에 대한 영향성은 낮은 것으로 나타났다.

2) LCD 폐유리와 일반 폐유리의 화학성분 비교

일반 폐유리 중 건축물에서 사용되는 유리는 보통유리와 특수용도의 유리로 나뉘어지는데 일반용도로 쓰이는 보통의 판유리는 분쇄 시 각이 지고 모가 나있고, 특수유리의 경우는 입형이 구형으로 형성되는데 화학성분의 70% 이상이 실리카질(SiO_2)성분과 붕산(BO_2) 등 기타 성분으로 구성되어 있다. 실리카 성분은 그 자체로는 굳어지는 성질이 없으나 물의 존재로 상온에서 $CaOH_2$와 반응하여 안정된 불용해성 화합물을 생성하여 경화시키는 성질을 가지고 있다.
최근 연구에서 시멘트와의 수화반응시 포졸란 반응가능성이 있는 것으로 확인되어 경화 콘크리트의 물리적 성질을 향상시키고 굳지 않은 콘크리트의 레올로시 특성을 개선하여 블리딩의 저감, 수화열 억제 등에 효과적인 것으로 보고되고 있다. 또한, 포졸란 반응에 의해 내부 조직이 치밀해져 투수성이 낮아지므로 유해물질이 외부로부터 침입하는 것을 막아주어 내구성 향상에도 기여를 것으로 판단된다. LCD 폐유리는 일반적인 폐유리와는 달리 알칼리 금속(Na와 K)성분이 적으므로 실리카 성분과

물이 함께 반응하여 균열을 발생시키는 알칼리 실리카 반응 유발 가능성이 적다.

구 분	화 학 성 분							
	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O
LCD 폐유리 (5um)	66.9	18.2	0.0794	10	0.452	-	0.0571	0.272
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

[표 3.7] LCD폐유리 및 일반적인 폐유리의 화학 성분 비교(%)

3) LCD 폐유리와 주요 혼화재의 화학성분 비교

일반적으로 콘크리트의 강도는 시멘트의 수화반응에 의해 발현하는데, LCD폐유리 미분말의 화학성분이 기존의 혼화재보다 OPC에 유사하고 포졸란 반응물인 SiO2 성분을 다량 함유하고 있어 콘크리트 성능 향상에 크게 기여할 것으로 보인다.

구 분	OPC 대비 화학성분 비교										
	SiO2	SiO2 / SiO2 P	Al2O3	Al2O3 / Al2O3 P	Fe2O3	Fe2O3 / Fe2O3 P	MgO	MgO / MgO P	CaO	CaO / CaO P	평 균
OPC	19	1.0	4.04	1.0	3.09	1.0	2.84	1.0	65.1	1.0	1.0
LCD 폐유리 (5um)	66.9	3.52	18.2	4.5	0.0794	0.03	0.452	0.16	10	0.15	1.67
고로슬래그	36	1.89	18	4.56	0.35	0.11	10	3.52	45	0.69	2.14
플라이애시	57	3	26	6.44	7	2.27	3	1.06	10	0.15	2.58

[표 3.8] 주요 혼화재의 화학 성분 비교 및 OPC 대비 혼화재의 화학성분비(%)

4) 비중, 비표면적

본 연구에서는 5um, 12um, Panel에 대하여 비중, 비표면적에 대한 정량적 평가를 통하여 콘크리트용 결합재로의 신뢰성 확보를 실시하였다.

(1) 비중

OPC, LCD 폐유리, Panel에 대한 비중 시험 결과를 아래 [표 3.4]에 나타내었다.

구 분	OPC	5um	12um	Panel
비중 (g/cm3)	3.15	2.79		2.98

[표 3.9] 국가공인시험검사기관의 비중 시험 결과

LCD 폐유리 및 Panel의 비중은 각각 2.79, 2.98g/cm3로 측정되었다. KS에 제정된 콘크리트용 결합재에 대한 비중은 OPC 3.14g/cm3 이상이며, LCD 폐유리의 경우 다른 콘크리트용 결합재에 비하여 매우 낮은 비중을 나타냄에 따라, 콘크리트 배합 시 동일한 단위 시멘트량을 적용한다면 유동성 확보를 위하여 감수제, AE제 등의 화학 첨가제 활용이 필요하다고 판단된다.

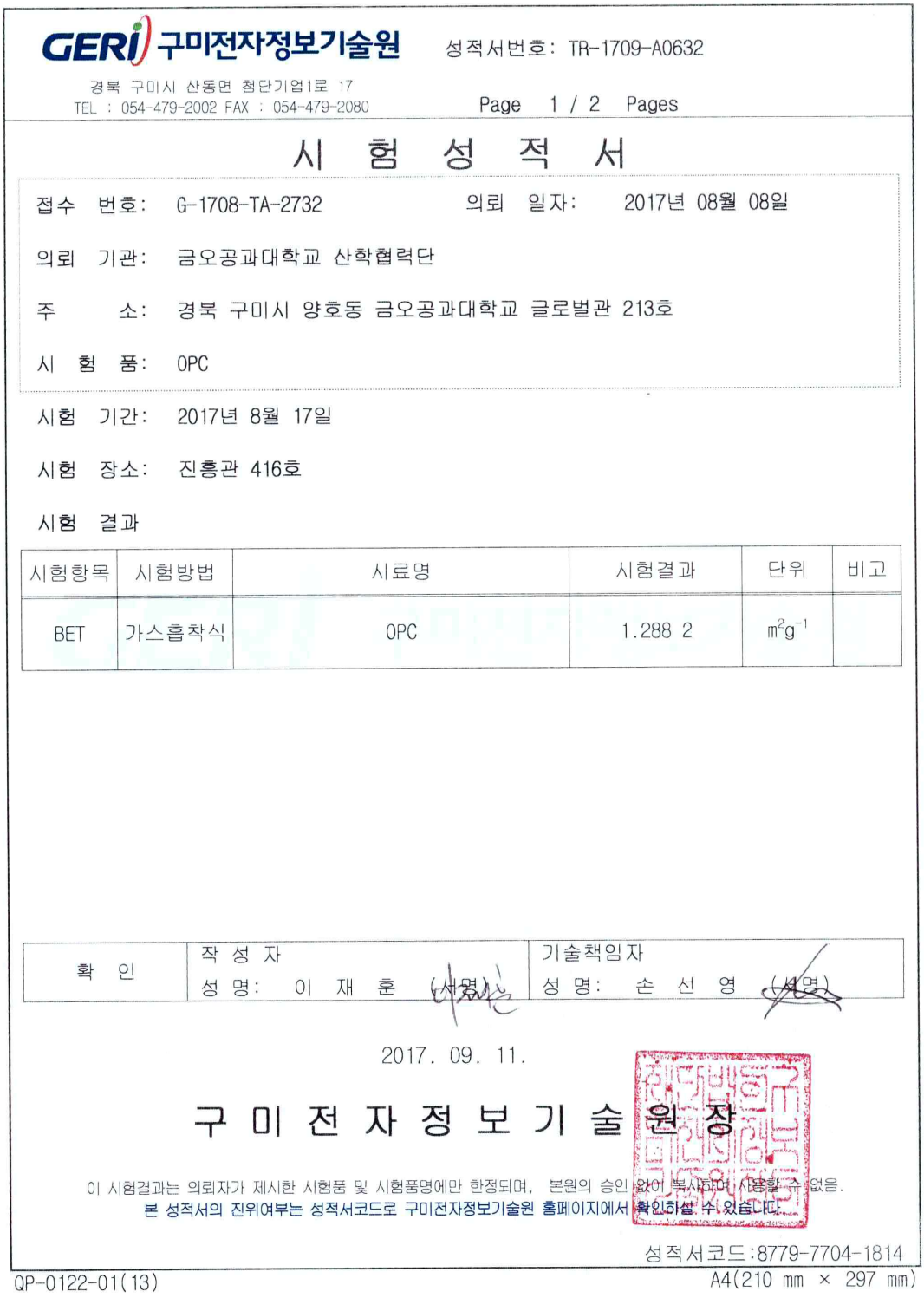
(2) 비표면적 (BET)

OPC, LCD 폐유리, Panel에 대한 비표면적 시험 결과를 아래 [표 3.5]에 나타내었다.

구 분	OPC	5um	12um	Panel
비표면적 (m2/g)	1.2882	0.99628	0.93554	1.3429

[표 3.10] 국가공인시험검사기관의 비표면적 시험 결과

5um, 12um 및 Panel의 비표면적은 각각 9,962.8, 9,355.4, 13,429cm2/g으로 측정되었다. 표면이 매끄러운 유리재료의 특성상 비표면적은 OPC보다 낮게 측정되었다. 그러나 12um 미분말을 5um로 2차 분쇄함에 따라 비표면적의 증가가 된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 화학적 반응을 활성화하기 위한 접촉면적의 증가에 따라 강도 및 내구성 증진에 영향을 줄 것으로 판단된다.



GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0632

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 1 / 2 Pages

시 험 성 적 서

접수 번호: G-1708-TA-2732 의뢰 일자: 2017년 08월 08일

의뢰 기관: 금오공과대학교 산학협력단

주 소: 경북 구미시 양호동 금오공과대학교 글로벌관 213호

시 험 품: OPC

시험 기간: 2017년 8월 17일

시험 장소: 진흥관 416호

시험 결과

시험항목	시험방법	시료명	시험결과	단위	비고
BET	가스흡착식	OPC	1.288 2	m^2g^{-1}	

확 인	작 성 자	기술책임자
	성 명: 이 재 훈 (서명)	성 명: 손 선 영 (서명)

2017. 09. 11.

구 미 전 자 정 보 기 술 원 장

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시험품 및 시험품명에만 한정되며, 본원의 승인 없이 복사하여 사용할 수 없음.
본 성적서의 진위여부는 성적서코드로 구미전자정보기술원 홈페이지에서 확인하실 수 있습니다.

성적서코드:8779-7704-1814

QP-0122-01(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 30] 국가공인시험검사기관의 OPC BET 시험 결과 (1-2)

GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0632

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 2 / 2 Pages

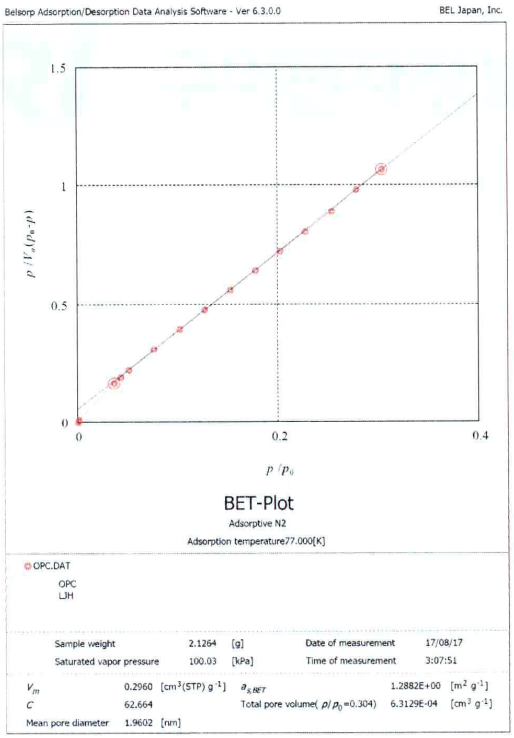
시 험 결 과

1. 사용장비

사용장비	장비 규격
BET & Poresize analyzer	1. Vacuum and Heat degas Method 2. Flow and Heat degas Method 3. Measurement - Specific Surface area : 0.0005 ~ 0.01 m^2/g - Pore size distribution : 0.35 ~ 500 nm

2. 시험결과

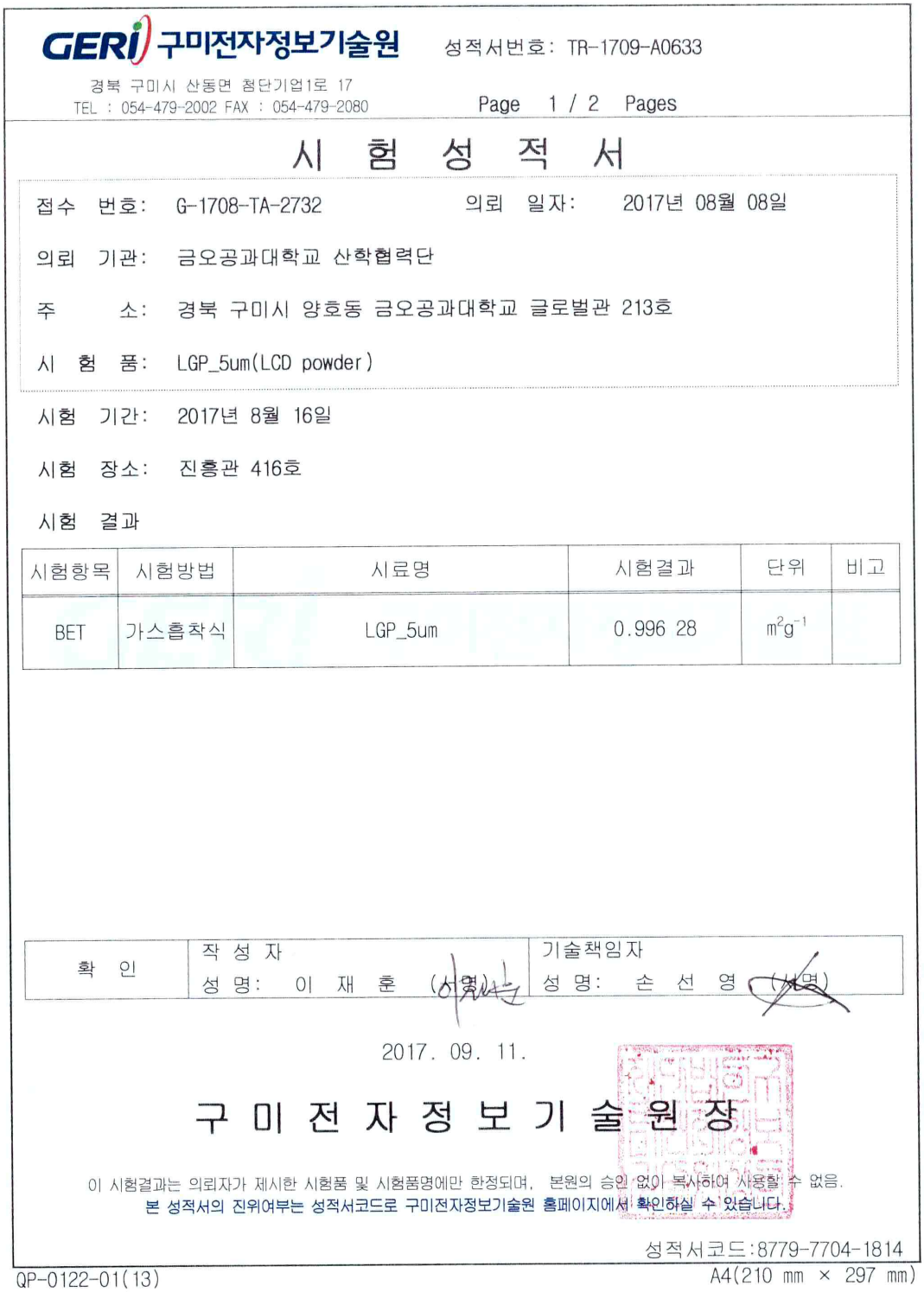
OPC



끝.

QP-0122-02(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.31] 국가공인시험검사기관의 OPC BET 시험 결과 (2-2)



GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0633

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 1 / 2 Pages

시 험 성 적 서

접수 번호: G-1708-TA-2732 의뢰 일자: 2017년 08월 08일

의뢰 기관: 금오공과대학교 산학협력단

주 소: 경북 구미시 양호동 금오공과대학교 글로벌관 213호

시 험 품: LGP_5um(LCD powder)

시험 기간: 2017년 8월 16일

시험 장소: 진흥관 416호

시험 결과

시험항목	시험방법	시료명	시험결과	단위	비고
BET	가스흡착식	LGP_5um	0.996 28	m^2g^{-1}	

확 인	작 성 자	기술책임자
	성 명: 이 재 훈 (서명)	성 명: 손 선 영 (서명)

2017. 09. 11.

구 미 전 자 정 보 기 술 원 장

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시험품 및 시험품명에만 한정되며, 본원의 승인 없이 복사하여 사용할 수 없음.
본 성적서의 진위여부는 성적서코드로 구미전자정보기술원 홈페이지에서 확인하실 수 있습니다.

성적서코드:8779-7704-1814

QP-0122-01(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.32] 국가공인시험검사기관의 5um BET 시험 결과 (1-2)

GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0633

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

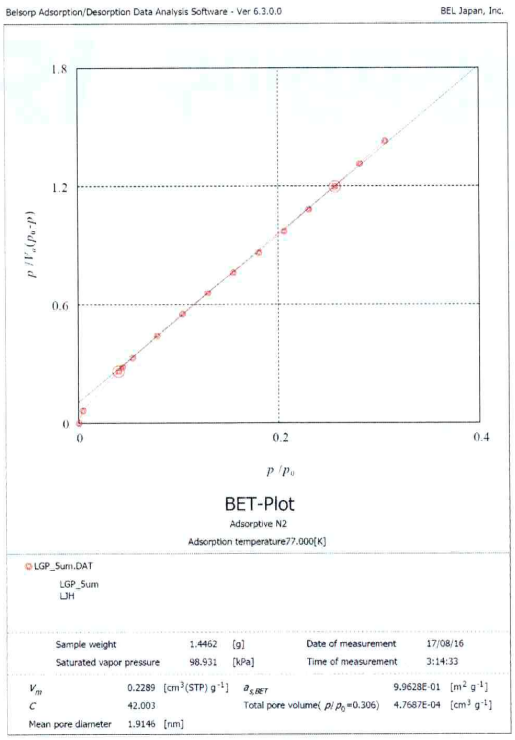
시 험 결 과

1. 사용장비

사용장비	장비 규격
BET & Poresize analyzer	1. Vacuum and Heat degas Method 2. Flow and Heat degas Method 3. Measurement - Specific Surface area : 0.0005 ~ 0.01 m^2/g - Pore size distribution : 0.35 ~ 500 nm

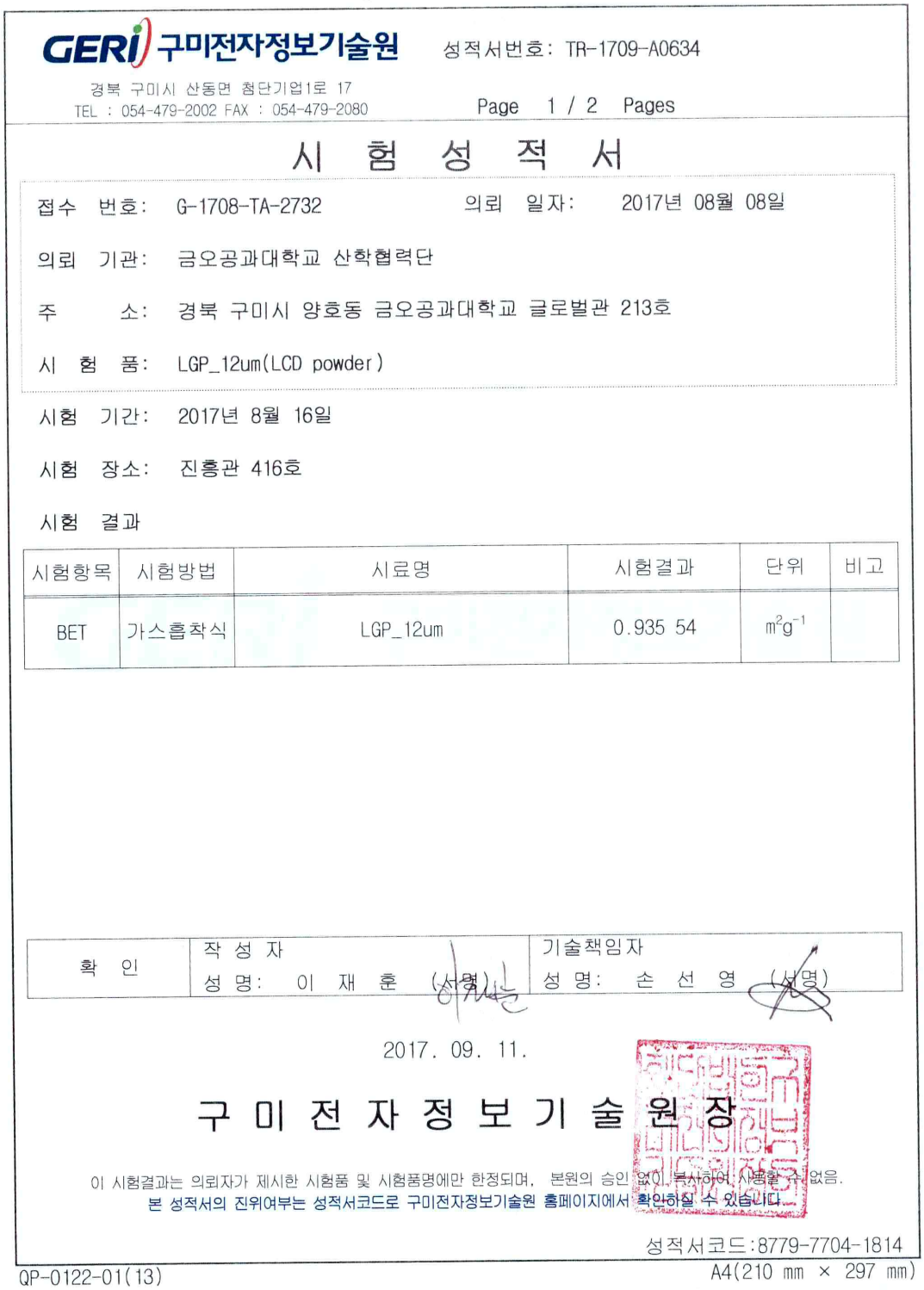
2. 시험결과

LGP_5um



끝.

[그림 3.33] 국가공인시험검사기관의 5um BET 시험 결과 (2-2)



GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0634

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 1 / 2 Pages

시 험 성 적 서

접수 번호: G-1708-TA-2732 의뢰 일자: 2017년 08월 08일

의뢰 기관: 금오공과대학교 산학협력단

주 소: 경북 구미시 양호동 금오공과대학교 글로벌관 213호

시 험 품: LGP_12um(LCD powder)

시험 기간: 2017년 8월 16일

시험 장소: 진흥관 416호

시험 결과

시험항목	시험방법	시료명	시험결과	단위	비고
BET	가스흡착식	LGP_12um	0.935 54	m^2g^{-1}	

확 인	작 성 자	기술책임자
	성 명: 이 재 훈 (서명)	성 명: 손 선 영 (서명)

2017. 09. 11.

구 미 전 자 정 보 기 술 원 장

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시험품 및 시험품명에만 한정되며, 본원의 승인 없이 무사하여 사용할 수 없음.
본 성적서의 진위여부는 성적서코드로 구미전자정보기술원 홈페이지에서 확인하실 수 있습니다.

성적서코드:8779-7704-1814

QP-0122-01(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.34] 국가공인시험검사기관의 12um BET 시험 결과 (1-2)

GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0634

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 2 / 2 Pages

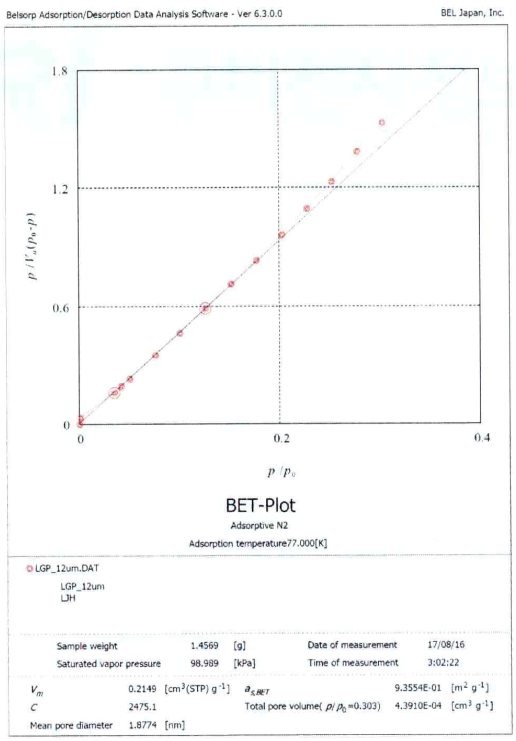
시 험 결 과

1. 사용장비

사용장비	장비 규격
BET & Poresize analyzer	1. Vacuum and Heat degas Method 2. Flow and Heat degas Method 3. Measurement - Specific Surface area : 0.0005 ~ 0.01 m^2/g - Pore size distribution : 0.35 ~ 500 nm

2. 시험결과

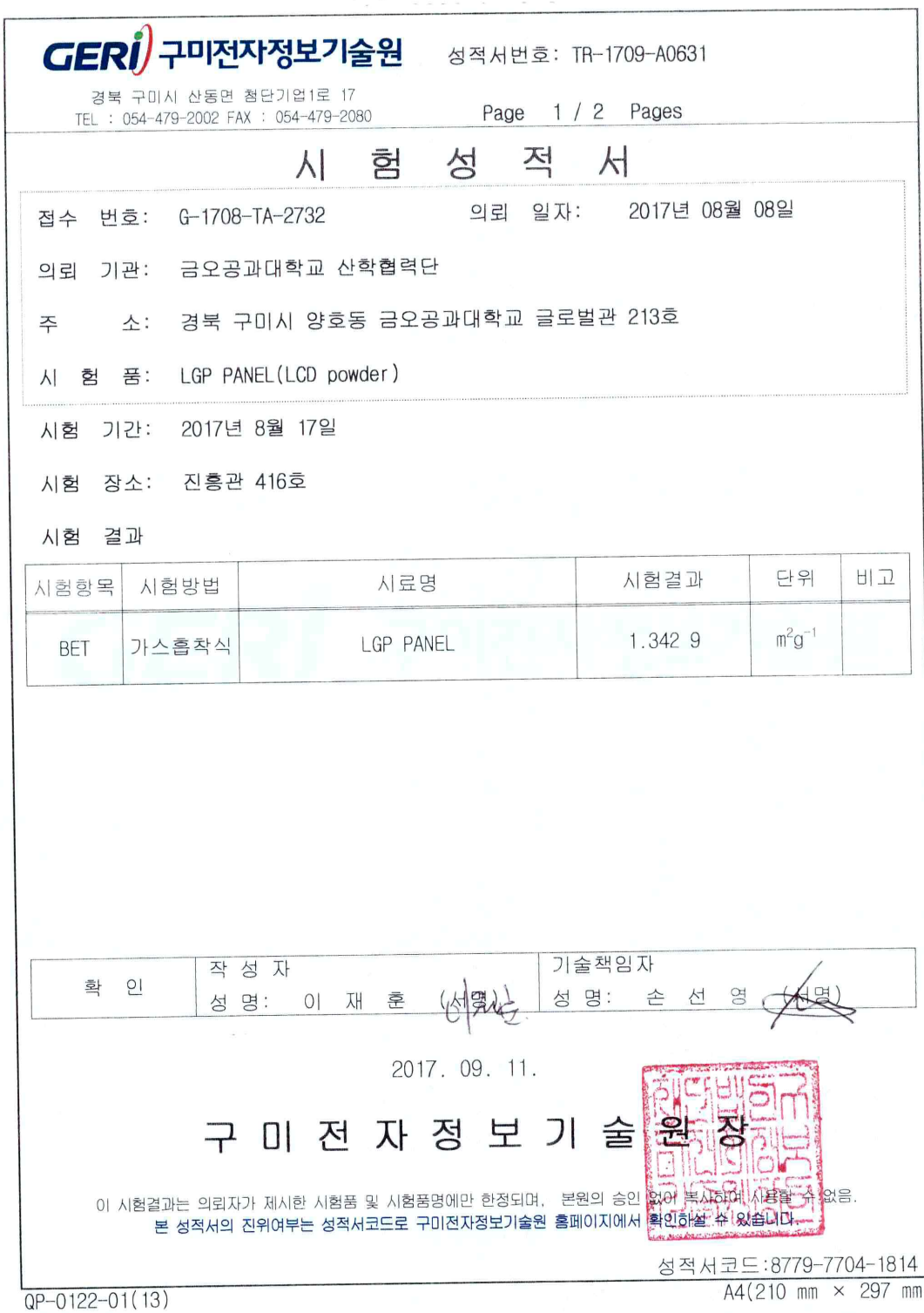
LGP_12um



끝.

QP-0122-02(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.35] 국가공인시험검사기관의 12um BET 시험 결과 (2-2)



GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0631

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 1 / 2 Pages

시 험 성 적 서

접수 번호: G-1708-TA-2732 의뢰 일자: 2017년 08월 08일

의뢰 기관: 금오공과대학교 산학협력단

주 소: 경북 구미시 양호동 금오공과대학교 글로벌관 213호

시 험 품: LGP PANEL(LCD powder)

시험 기간: 2017년 8월 17일

시험 장소: 진흥관 416호

시험 결과

시험항목	시험방법	시료명	시험결과	단위	비고
BET	가스흡착식	LGP PANEL	1.342 9	m^2g^{-1}	

확 인	작 성 자	기술책임자
	성 명: 이 재 훈 (서명)	성 명: 손 선 영 (서명)

2017. 09. 11.

구 미 전 자 정 보 기 술 원 장

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시험품 및 시험품명에만 한정되며, 본원의 승인 없이 복사하며 사용할 수 없음.
본 성적서의 진위여부는 성적서코드로 구미전자정보기술원 홈페이지에서 확인하실 수 있습니다.

성적서코드:8779-7704-1814

QP-0122-01(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.36] 국가공인시험검사기관의 Panel BET 시험 결과 (1-2)

GERI 구미전자정보기술원 성적서번호: TR-1709-A0631

경북 구미시 산동면 첨단기업1로 17
TEL : 054-479-2002 FAX : 054-479-2080

Page 2 / 2 Pages

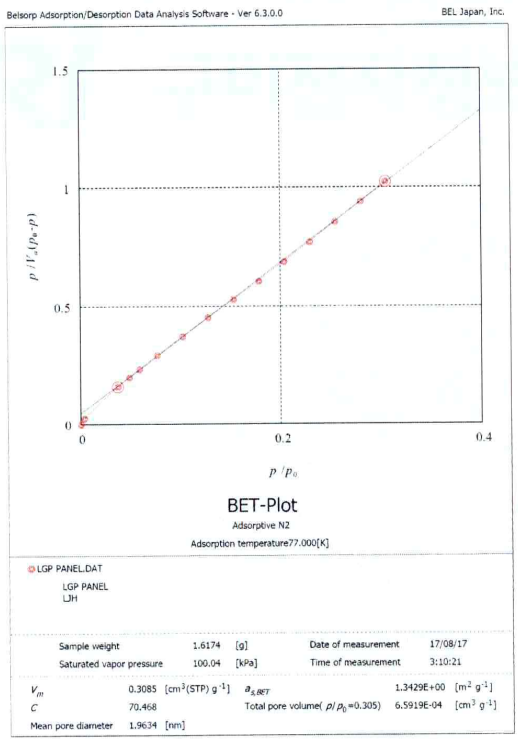
시 험 결 과

1. 사용장비

사용장비	장비 규격
BET & Poresize analyzer	1. Vacuum and Heat degas Method 2. Flow and Heat degas Method 3. Measurement - Specific Surface area : 0.0005 ~ 0.01 m^2/g - Pore size distribution : 0.35 ~ 500 nm

2. 시험결과

LGP PANEL



끝.

QP-0122-02(13) A4(210 mm × 297 mm)

[그림 3.37] 국가공인시험검사기관의 Panel BET 시험 결과 (2-2)

3.1.4 LCD 미분말의 입자크기별 혼입 모르타르 제작 및 강도 평가

LCD폐유리 분말의 경우는 입형이 구형으로 형성되는데 화학성분의 60% 이상이 실리카질(SiO2)성분과 붕산(BO2)등 기타 성분으로 구성되어 있다. 최근 연구에서 시멘트와의 수화반응시 포졸란 반응가능성이 있는 것으로 확인되어 경화 콘크리트의 물리적 성질을 향상시키고 굳지 않은 콘크리트의 레올로시 특성을 개선하여 블리딩의 저감, 수화열 억제 등에 효과적인 것으로 보고되고 있다. 또한, 포졸란 반응에 의해 내부 조직이 치밀해져 투수성이 낮아지므로 유해물질이 외부로부터 침입하는 것을 막아주어 내구성 향상에도 기여를 것으로 판단된다. LCD폐유리 미분말의 물리적 성질 및 화학성분은 [표 3.11]과 같다.

밀도	분말도	화 학 성 분(%)				
(g/cm3)	(cm2/g)	SiO2	Al2O3	CaO	B2O2	SrO
2.79	1,580	60.1	16.2	7.85	9.91	4.41

[표 3.11] LCD 폐유리 미분말의 물리적 성질 및 화학성분

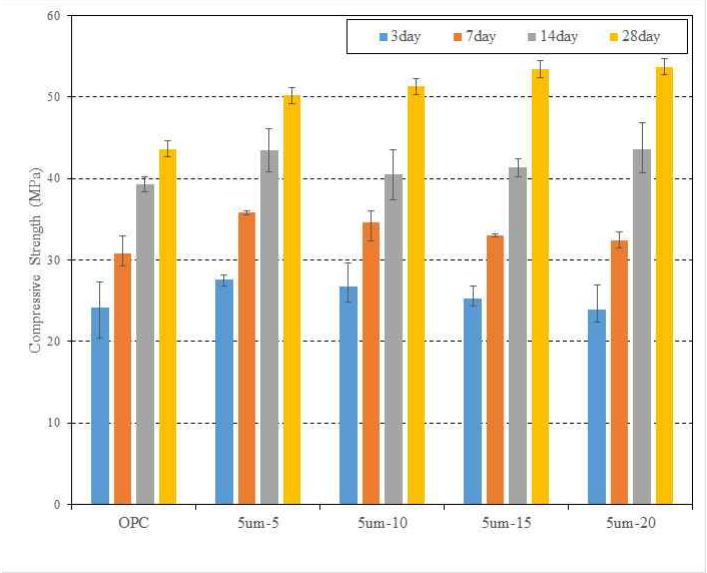
1) 최적 치환율

최적 치환율 시험은 OPC콘크리트에 기준하여 LCD 폐유리 및 Panel 폐유리를 활용한 콘크리트의 압축강도 활성도를 거의 근접하게 하기 위하여 모르타르 시험체를 제작하여 압축강도 시험을 실시하였다. KS F2563 (콘크리트용 고로슬래그 미분말)의 표준배합에 따라 물-시멘트비(W/C) 0.5, 잔골재량(결합재의 3배) 고정 후 LCD 폐유리 및 Panel 폐유리의 치환율 10-20 %에 대하여 압축강도 측정 후 활성도를 비교하였다. 압축강도 시험은 OPC, LCD 폐유리 및 Panel 폐유리을 활용한 모르타르(50×50×50 mm) 시편에 대하여, 시험체 제작 후25 ℃에서 수중 양생하여 각 재령일의 압축강도를 측정하였다.

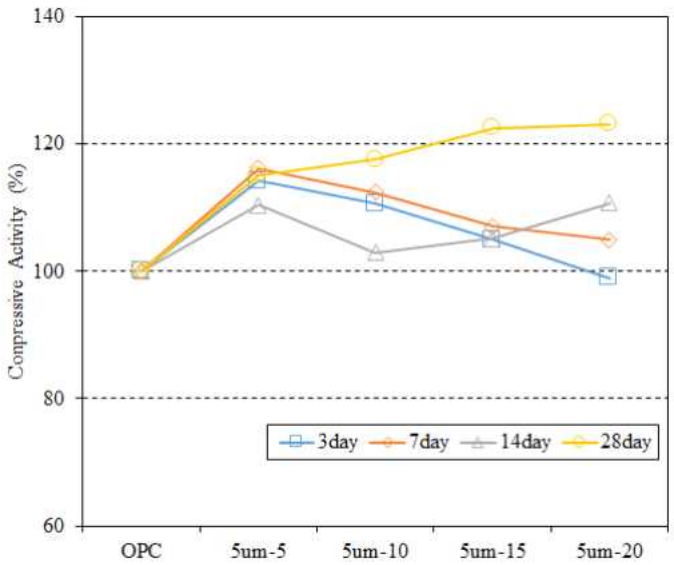
2) LCD 미분말 입경크기별 혼입 모르타르의 강도 특성

(1) LCD 폐유리 5 um를 혼입한 모르타르의 압축강도

LCD 폐유리의 역학성능 발현 검증을 위하여 물-결합재 비 0.5 %, 골재량은 결합재의 3배를 적용한 모르타르 제작 후 LCD 폐유리 5 um 재료의 치환율에 따른 압축강도 시험 결과를 [그림 3.38]에 나타내었다. OPC 100 %, LCD 5 um 5 %, 10 %, 15 %, 20 %의 재령 28일 압축강도는 각각 43.61, 50.17, 51.29, 53.41, 53.72 MPa으로 측정되었다. 재령에 상관없이 모든 강도가 OPC보다 높게 나타났으며 재령 28일의 OPC 100 %에 대한 각 치환율 별 활성도 지수는 각각 115.04, 117.61, 122.47, 123.17 %로 OPC에 비하여 높게 나타났다. [그림 3.39]에서와 같이 재령 28일 20 %의 치환율에서 가장 큰 활성도 지수가 나타나는 것을 확인하였다.
LCD 폐유리 5 um 모르타르에서 재령과 치환율에 관계없이 모든 압축강도가 높게 나타났으며 이러한 원인은 기존 폐유리 연구결과에서 보고되는 것과 같이 미분화된 입경에 기인하는 것으로 판단된다. 많은 연구결과에서 최적 치환율을 10%이하로 보고하고 있으나 본 결과에 따르면 재령 28일에서 5%의 치환율이 가장 낮은 115.04 %의 활성도를 나타냈다. LCD 폐유리의 비중이 상대적으로 시멘트 보다 낮기 때문에 단위시멘트량 증가로 인한 유동성 확보를 위하여 본 연구에서는 최적 치환율을 전체 결합재의 20 %로 제한하였다. LCD 폐유리 5 um 모르타르는 미분화 과정에서 LCD 폐유리 비표면적이 증가되어 수화물과의 반응 공간을 확장함으로써 수화의 촉진 및 C-S-H 형성이 더욱 활발해져 재령 초기의 강도 발현이 양호 한 것으로 판단된다.



[그림 3.38] LCD 폐유리 5 um 재료의 치환율에 따른 압축강도(W/B : 0.5)

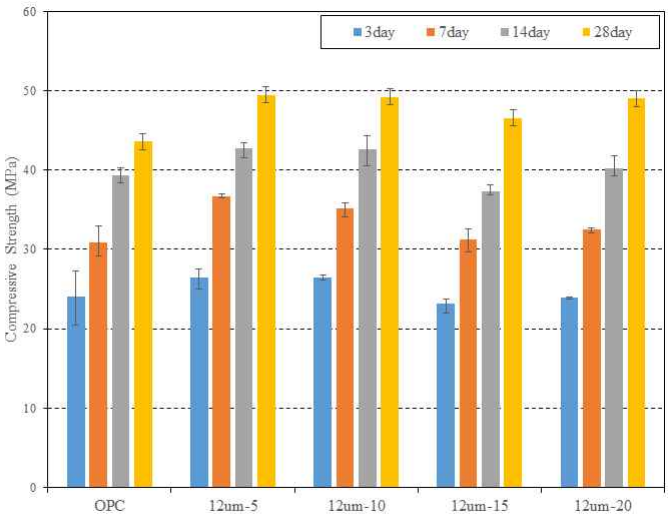


[그림 3.39] LCD 폐유리 5 um 재료의 치환율에 따른 강도 활성도(W/B : 0.5)

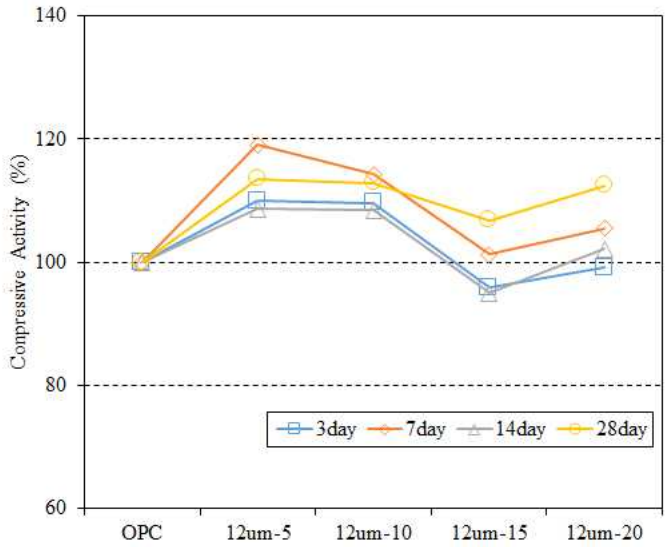
(2) LCD 폐유리 12 um를 혼입한 모르타르의 압축강도

[그림 3.40] 은 물-결합재 비 0.5 %, 골재량은 결합재의 3배, 평균입경 12 um의 LCD 미분말을 시멘트 대체재로 혼입한 압축강도 결과이다. 평균입경 12 um에서는 평균입경 5㎛보다는 다소 강도가 떨어지는 경향이 있으나 치환율에 상관없이 모든 시편에서 포졸란 재료로서 유효한 강도발현특성을 발휘하는 것으로 판단된다. [그림 3.41]은 LCD 미분말 12 um의 치환율에 따른 재령별 압축강도 측정 결과를 나타낸 것으로, 각 재령별에 대한 시험결과는 시험체 3개의 평균값을 사용하였다. 초기재령인 재령 3일에서는 LCD 미분말을 혼입하지 않은 경우에 비해 LCD 미분말을 5, 10, 15, 20% 치환함에 따라 강도가 각각 9.89%, 9.62%, -4.15%, 2.14% 강도변화 결과를 보였다. 그리고 재령 7일에서는 치환율 10%미만의 강도 증진 폭이 가장 높게 나타났다. 재령 14일의 압축강도 활성도는 가장 낮게 나타났으며 최대 5.08%의 강도감소가 발생하였다. 재령 28일에 치환율 20% 시편은 OPC 대비 가장 높은 12.44%의 압축강도 증진이 나타났다. LCD 미분말의 포졸란 반응에 의한 강도발현은 장기재령에서 더욱 유리할 것으로 판단된다.

LCD 미분말 12um의 치환율과 재령별 압축강도를 전체적으로 살펴보았을 때, LCD 미분말을 시멘트 대체재로 사용함으로 인한 압축강도의 변화는 양호하게 증진되는 것으로 나타났으며, 치환율 0~10% 범위 내에서는 치환율에 따른 강도변화도 크지 않은 것으로 판단된다. 초기재령에서 강도증진 효과를 볼 수 있었으며 28일 재령에서도 20% 치환율 시편의 강도가 향상되는 경향을 나타내었다. 이에 대한 분명한 장기재령에서의 강도특성을 파악하기 위해서는 추가적인 평가가 필요할 것이다. 콘크리트의 강도에 미치는 LCD 미분말의 효과는 명백하였고 작은 입경은 콘크리트의 높은 압축 강도뿐만 아니라 내구성의 개선이 가능하였다. 더욱 미세하게 분쇄 가능할 경우 포졸란 활성이 개선 될 수 있을 것이라고 판단된다.



[그림 3.40] LCD 폐유리 12 um 재료의 치환율에 따른 압축강도(W/B : 0.5)



[그림 3.41] LCD 폐유리 12 um 재료의 치환율에 따른 강도 활성도(W/B : 0.5)

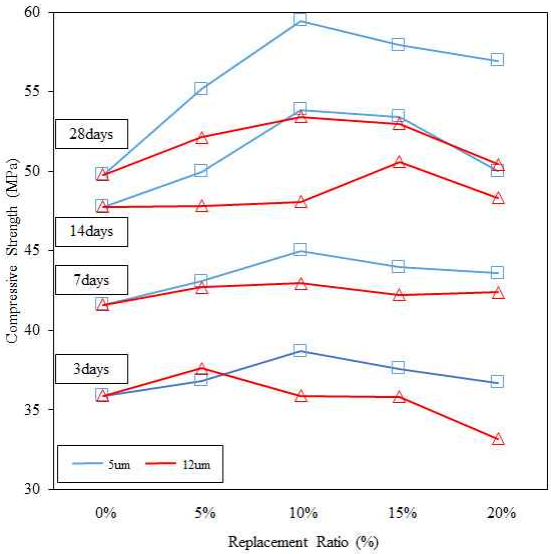
3) 물-결합재 비에 따른 모르타르의 강도 특성

1차 분쇄된 LCD 폐유리 및 Panel 폐유리 미분말을 활용한 시멘트 경화체의 역학성능 발현 검증을 위하여, 치환율 10%에 대하여 물-결합재 비 0.4, 0.5 모르타르의 압축강도 시험을 실시하였다. LCD 폐유리 및 Panel 폐유리 활용 시 물-결합재 비가 감소할수록 압축강도는 증가하였으나, OPC 모르타

르에 따른 활성도 지수에서는 서로 다른 차이를 나타내었다.

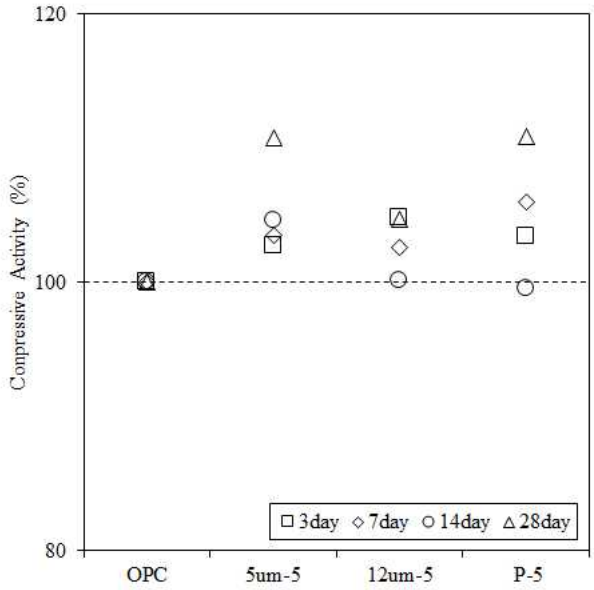
(1) 물-결합재 비 0.4에 따른 LCD 모르타르 압축강도 비교

물-결합재 비 0.4에서는 입경이 작은 5um LCD 미분말의 강도 활성도가 가장 높게 나타났으며 10% 동일하게 치환한 경우 12um 입경의 LCD 미분말과 12.13%의 큰 차이를 나타냈다. 5um LCD 미분말의 10% 치환한 모르타르의 강도는 OPC에 비해 최대 19.47% 증가하였으며 그 다음으로 15%에서 16.39%, 20%에서 14.39%, 5%에서 10.8%의 순서로 높은 강도를 나타냈다. 결과에서 보여지듯이 이는 최소 10%이상의 강도가 증가한 상태이다. 물-결합재 비 0.4에서 5um LCD 미분말을 치환한 모르타르의 강도 향상은 재령에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈으며 모든 재령에서 최대 압축강도를 나타내는 시편은 10% 치환한 모르타르로 나타났다. 특히 재령 7일 이후 14, 28일에서 높은 활성도가 나타났으며 이후 치환율이 증가할수록 강도 발현은 다소 낮아지는 경향을 나타냈다. [그림 3.42]는 12um LCD 미분말을 치환한 모르타르 시편의 강도와도 큰 차이가 있음을 나타내고 있다. 재령 3일에서 작은 차이로 12um LCD 미분말을 5% 치환한 시편의 강도가 높게 나타났으나 이후 모든 재령, 동일 치환율에서 강도의 차이는 크게 차이나는 것으로 나타났다. 또한 12um LCD 미분말 모르타르의 경우 물-결합재 비 0.4에서 초기재령 3일에서 치환율 5%를 제외한 모든 치환율에서 OPC보다 강도가 저하되는 경향을 나타냈다.



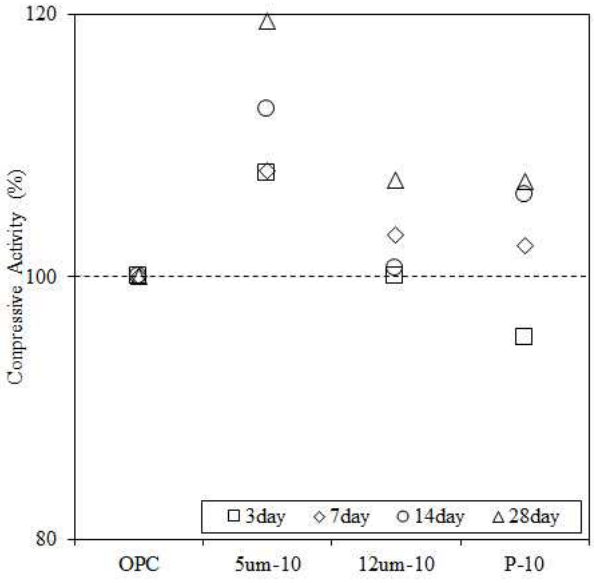
[그림 3.42] W/B 0.4에서 입경이 다른 LCD
미분말을 치환한 모르타르의 압축강도

[그림 3.43]은 각각의 대체재를 5% 치환을 한 시편들의 압축강도 활성도를 나타낸 것이다. [그림 3.43]에 따르면 28일 재령에서 높은 압축강도 활성도를 나타내는 것은 재료에 상관없이 평균입경에 의존하는 것을 확인할 수 있다. 5um와 P는 평균입경이 5um LCD 미분말이다. 이에 반해 12um LCD 미분말을 5% 치환한 시편은 OPC보다 높지만 상대적으로 낮은 활성도를 나타내고 있다.



[그림 3.43] 5% 혼입 시 각 재료에 따른
압축강도 활성도(W/B 0.4)

그러나 10% 동일하게 치환한 경우 재료의 종류에 따라 5um LCD Panel 미분말의 초기재령 강도 저하가 분명하게 나타나고 있다. 이후 재령이 증가할수록 활성도가 개선되어 높아지는 것을 알 수 있다. 이에 반해 5% 치환한 시편의 활성도는 가장 높게 나타났다. 초기재령 시에도 높은 활성도를 나타냈으나 재령 14일 이후부터 10% 이상의 강도 증가가 나타났다.

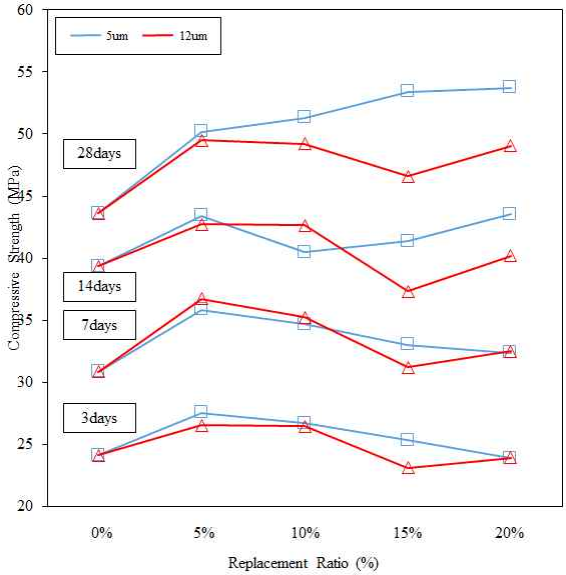


[그림 3.44] 10% 혼입 시 각 재료에 따른
압축강도 활성도(W/B 0.4)

(2) 물-결합재 비 0.5에 따른 LCD 모르타르 압축강도 비교

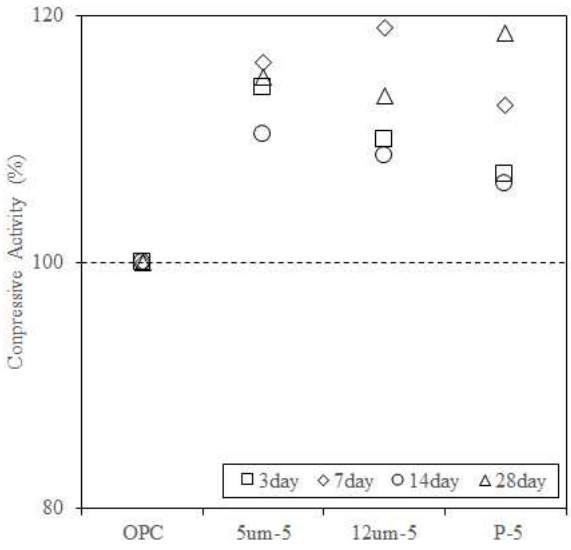
물-결합재 비에서 강도발현 특성이 일반적인 물-결합재 비와 강도의 관계식을 따르는지를 살펴보았다. 물-결합재 비 0.5에서 28일 재령의 압축강도 결과는 [그림 3.45]과 같다. 압축강도 결과에 따르면 LCD 폐유리 미분말을 혼합한 모르타르의 강도특성이 초기재령을 제외하고 치환율에 상관없이 압축강도가 증가되는 경향을 나타내었다. 물-결합재 비 0.5에서 초기재령의 강도증가 경향은 입경의 크기와 상관없이 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 이후 본격적인 포졸란 반응이 예상되는 재령 14일부터 5um LCD 미분말의 치환율이 증가할수록 강도가 높게 나타나는 양상을 보여줬다. LCD 미분말

의 치환으로 인한 모르타르의 수화반응은 결합수가 충분한 경우 초기의 강도발현이 높게 나타나지 않고 장기재령의 강도발현에 유리한 것으로 판단된다.



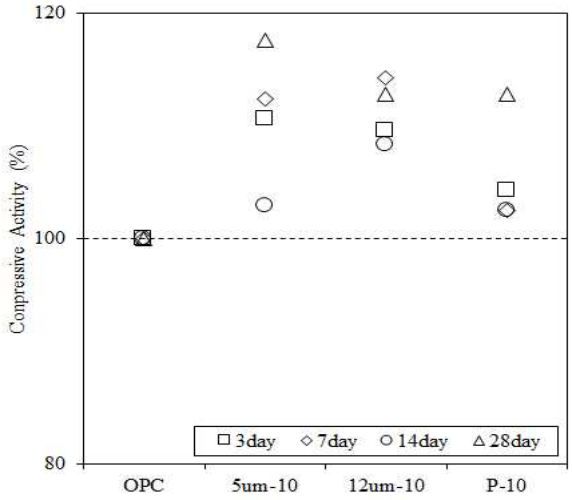
[그림 3.45] W/B 0.5에서 입경이 다른 LCD 미분말을 치환한 모르타르의 압축강도

물-결합재 비 0.5에서 동일한 5% 치환율에 따른 압축강도의 비교를 활성도로 [그림 3.46]에 나타내었다. 재령과 재료에 상관없이 모든 시편의 재령에서 OPC보다 높은 강도를 나타낸 것으로 나타났다. 재령 28일 가장 높은 강도 활성도를 나타낸 것은 LCD Panel 미분말을 치환한 시편으로 나타났으며 재령 14일 이후 가장 높은 강도 발현이 나타났다. 수화반응에 시멘트의 의존도가 높은 초기재령에서 12um LCD 미분말을 5% 치환한 시편에서 가장 큰 강도 활성도가 나타났다.



[그림 3.46] 5% 혼입 시 각 재료에 따른 압축강도 활성도(W/B 0.5)

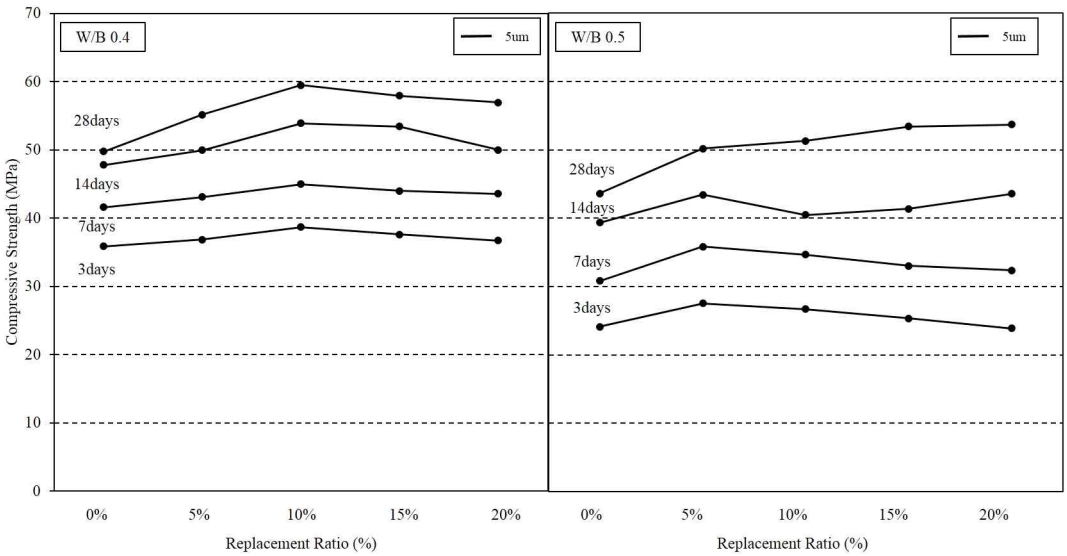
[그림 3.47]에 따른 동일한 치환율인 10% 모르타르의 압축강도는 치환율 5%와 유사한 경향으로 나타났으나 Panel의 강도 활성도 저하를 확인하였다. 특히 재령 28일을 제외하고 모두 5%미만의 낮은 활성도를 나타냈다. 물-결합재 비 0.5에서 모든 재령 14일 시편의 강도 활성도가 가장 낮게 나타났다.



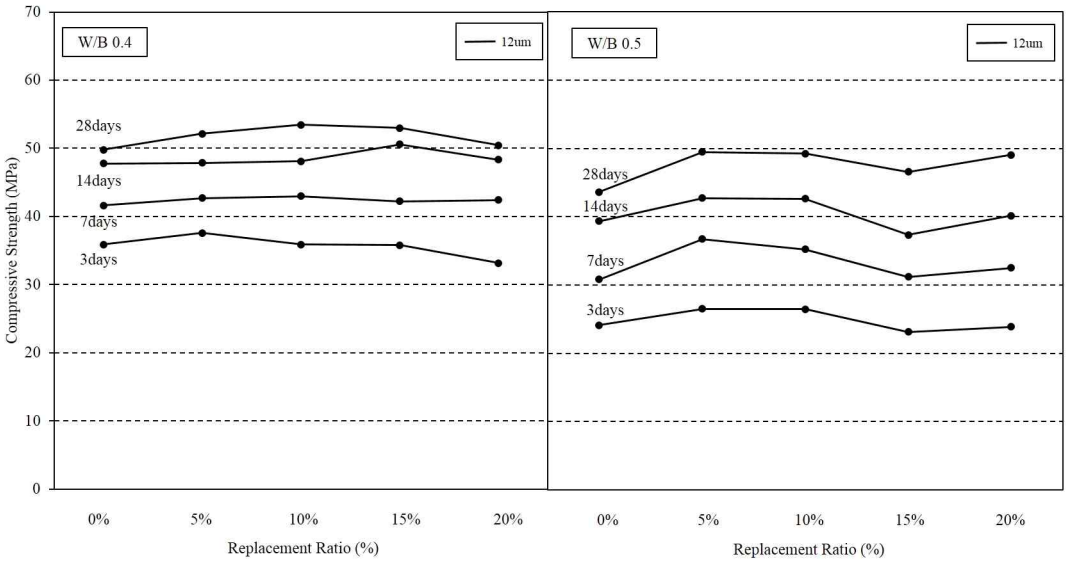
[그림 3.47] 10% 혼입 시 각 재료에 따른
압축강도 활성도(W/B 0.5)

(3) 물-결합재 비 차이에 따른 LCD 모르타르 압축강도 비교

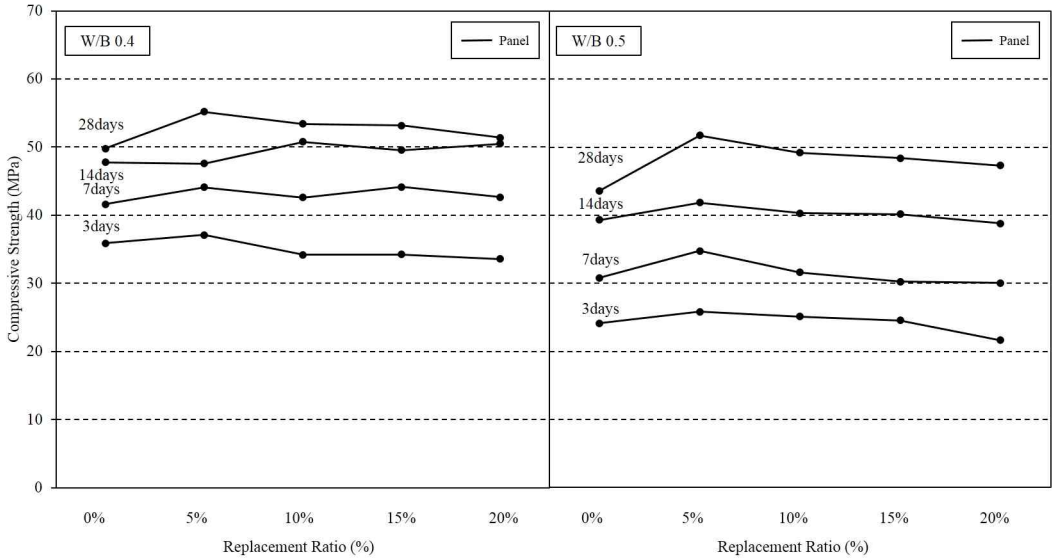
[그림 3.48]은 동일재료의 치환율별 물-결합재 비가 강도에 미치는 영향을 알 수 있다. 물-결합재 비가 낮아짐으로 평균 15%이상의 강도 증가가 나타났다. 이러한 경향은 [그림 3.49]의 12um LCD 미분말보다 더 뚜렷하게 나타났으며 LCD 폐유리가 미분화 될수록 고강도 콘크리트 제조에 더 효율적일 것으로 판단된다. 또한 그림 3.48과 3.49의 결과를 비교하면 물-결합재 비가 0.4인 경우 초기재령의 강도는 입경의 영향을 받지 않는 것으로 보여지고 있으나 장기재령으로 갈수록 평균입경의 영향은 큰 것으로 나타나고 있다. 또한 물-결합재 비가 0.5인 경우 재령 14일 이후 치환율 15%이상을 제외하고는 전체적인 강도발현 양상은 LCD 폐유리의 평균입경에 상관없이 유사하지만 물-결합재 비 0.4에서는 재령 14일 이후, 특히 재령 28일에서 LCD 폐유리의 평균입경의 차이에 대한 강도발현의 큰 차이가 발생하였다. 이러한 경향은 Panel 폐유리를 치환한 시편에서도 동일하게 나타났다. 따라서 물-결합재 비가 낮은 시편에서 평균입경이 12um보다 5um인 시편의 강도가 확연하게 높게 나타났으며 LCD 폐유리 미분말의 강도 활성도는 시멘트 매트릭스 내에 존재하는 결합수의 양에 따라 차이가 있음을 확인하였다.



[그림 3.48] 물-결합재 비가 다른 5um LCD 폐유리 미분말을 혼입한 모르타르의
압축강도



[그림 3.49] 물-결합재 비가 다른 12um LCD 폐유리 미분말을 혼입한 모르타르의 압축강도



[그림 3.50] 물-결합재 비가 다른 Panel LCD 폐유리 미분말을 혼입한 모르타르의 압축강도

3.1.5 LCD 미분말 혼합비율에 따른 콘크리트 성능 비교

1) LCD 폐유리 콘크리트 제작

강제식 믹서를 이용하여 골재의 건비빔 후 혼화제와 물을 투입하여 콘크리트 믹싱을 하였다. [표 3.12]과 같은 배합비를 통해 시험편을 제작하였다. W/B 비는 모두 0.44로 같고 치환을 위한 12 um LCD 폐유리 미분말을 사용하였다. 시멘트 대체재로써 효과적인 효율 및 성능을 위해 20% 내에서 중량비 5%, 10%, 15%, 20%로 치환하여 총 5타입의 시험체를 제작하였다. 콘크리트의 고강도 및 작업성 개선을 위해 폴리카본산(PC, polycarboxylate based high-range water-reducing admixture with a specific gravity of 1.05 ± 0.05)계의 고성능 감수제(Dongnam Ltd. Co. FlowMix 3000S, 비중 : 1.05 ± 0.05, pH : 5.0 ± 1.5)를 OPC 대비 1.0% 첨가하였다. 시험체는 KS F 2403에 준하여 원형실린더 몰드(100 × 200 mm)로 제작(KS F 2403)하였으며 타설 후 24시간 후 몰드를 제거하였다. 이 후 습윤양생 챔버(21 ± 2 °C, 100% RH)를 이용하여 소요기간까지 양생하였다. 양생조건은 각각 3일, 7일, 14일, 28일이며 필요한 시험에 따라 구분되었다.

W/C (%)	단위수량 (kg/m3)	S/a(%)	시멘트 치환율(%)	질량배합(kg/m3)				
				C	S	G	LCD	AE
44	175.03	43.7	plain	397.8	705.3	943.1	0	3.9
			5% - 12μm	377.9			19.9	3.7
			10% - 12μm	358.0			39.8	3.5
			15% - 12μm	338.1			59.7	3.3
			20% - 12μm	318.2			79.6	3.1

[표 3.12] LCD 미분말 12um 입경을 혼입한 콘크리트 배합비

2) 실험 방법

OPC Plain 콘크리트를 포함한 5개의 LCD 콘크리트 시편은 다음과 같이 굳지않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트의 성능 실험을 수행하였다.

(1) Test for air content of fresh concrete by pressure method(KS F 2421) : 실험 용기는 7L의 용량을 가지며 최소직경은 높이의 0.75에서 1.25배의 철제 실린더형을 사용하였다. 압력은 7.5에서 30.0psi(51에서 207kPa)를 사용하여, 굳지 않은 콘크리트의 공기함유량을 공기실의 압력 감소에 의해 확인하였다.
(2) Test for slump of concrete(KS F 2402) : 제원이 윗면 100mm, 밑면 200mm,높이 300mm 및 두께 1.5mm인 슬럼프콘을 이용하여 1/3높이 마다 25회의 다짐을 실시한 후 슬럼프콘을 제거하였을 때 무너지는 높이를 측정하였다.
(3) Test for compressive strength of concrete(KS F 2405) : 재령 3, 7, 14, 28일의 콘크리트 시편을 KS F 2403을 따라 만들고 압축시험기로부터 시험체가 항복할 때까지 지속적으로 0.6 ± 0.4 MPa/s의 하중을 가력하여 측정하였다.
(4) Test for Splitting tensile strength of concrete(KS F 2423) : 재령 28일 기준으로 KS F 2403을 따라 만든 시험편을 시험기로부터 시험체가 파괴될 때까지 지속적으로 0.06 ± 0.04 MPa/s의 하중을 가력하여 측정하였다.
(5) SEM-EDX
EDX(energy dispersive X-ray) 활용이 가능한 주사식 전자 현미경(SEM)을 통해 LCD 콘크리트 재령별 시편의 미세구조을 확인하였다. 3일과 28알의 시멘트 페이스트 수화과정 관찰 및 이미지 상 특정위치 성분을 분석하였다. 사용한 장비는 JEOL 사의 JSM-6500F를 사용하였으며 장비는 0.5kV ~

20kV, 1.5 nm(15kV)를 지원한다.

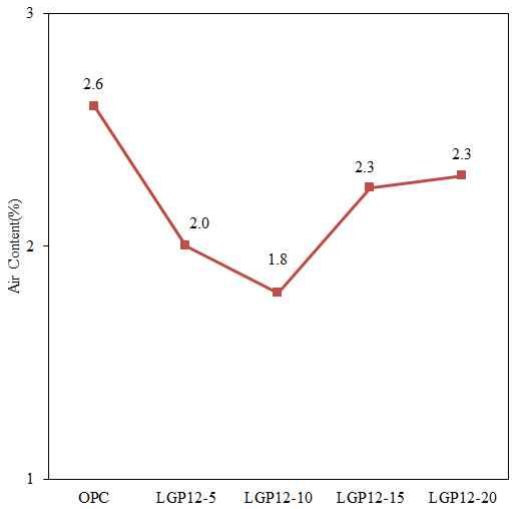
(6) MIP

시편 내부의 기공분포 및 크기를 측정하기 위해 7, 28일 재령 시편을 24시간 건조로에서 건조한 후 수은압입법을 통해 내부 구조를 확인하였다. micromeritics 사의 POROSIMETER 장비를 이용하여 최대압력 60,000 psi를 사용하여, 0.003 ~ 360 μm의 기공 범위내에서 분석하였다.

3) 실험 결과

(1) 공기량 평가

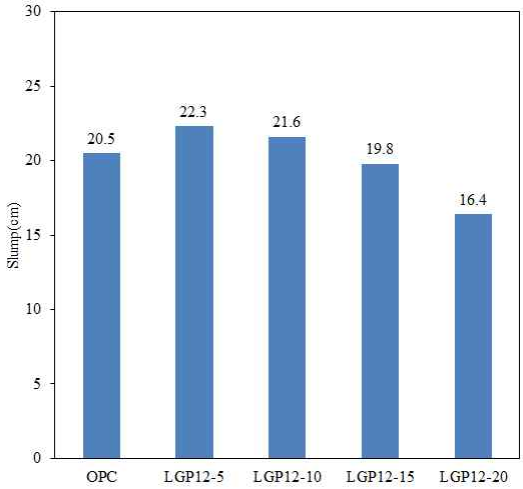
[그림 3.51]은 LCD 미분말의 치환율에 따른 공기량을 보여준다. 전체적인 공기량은 1.8%에서 2.6% 수준이며 전반적으로 OPC에 비해 낮은 경향을 확인했다. PC계의 고성능 AE제를 사용함에도 3% 이하의 공기량을 나타냈다. 치환율에 따른 비교는 10%까지 감소했다가 15%, 20%에서 약간 높아져 OPC보다 높은 수준으로 나타났다. N.A. Soliman et al의 보고에 따르면 고강도 콘크리트(PC계 AE제 사용)의 시멘트 대체재로 유리미분말(입경 크기 30um이하)을 10%씩 50%까지 치환한 결과, 공기 함량은 각 0%, 10.52%, 7.89%, 10.53%, 23.68% 증가하는 것으로 나타났다. LCD 미분말의 입형은 구상화하지 않을 경우 시공성을 저하 시킬 수 있다. 따라서 적량의 AE제는 입경이 작은 LCD 폐유리의 시공성 및 내구성 확보를 위해 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.



[그림 3.51] LCD 콘크리트 공기량(12um)

(2) 슬럼프 평가

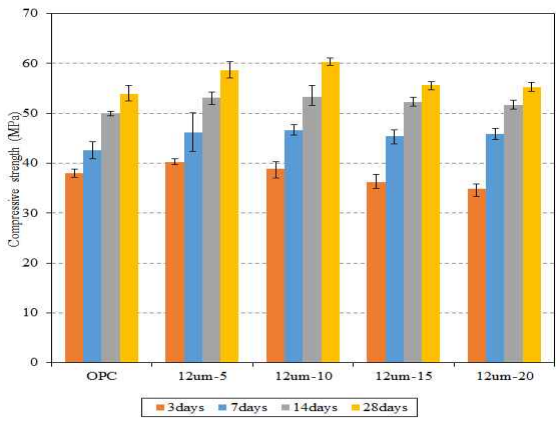
[그림 3.52]는 치환별 시편의 슬럼프를 보여주고 있다. LCD 폐유리 12 um 은 치환율 5%에서 OPC에 비에 9% 정도 높은 슬럼프를 나타냈다. 치환량의 증가에 따라 10%에서는 다소 떨어졌지만 여전히 OPC보다 높은 슬럼프를 나타내고 있다. 이러한 현상은 비슷한 입경을 갖더라도 상대적으로 흡수율이 낮고 표면이 매끈한 LCD의 특성이 반영된 유동성의 향상으로 보여진다. 그러나 상대적으로 치환량이 많아지는 15%에서는 OPC와 유사한 거동을 보이며 20%에서는 슬럼프가 현저하게 저하되었다. 일반적으로 굳지않은 콘크리트의 유동성은 비슷한 입경(Particle size)이라 할지라도 재료의 조도나 형상의 영향을 받게 된다. LCD 미분말은 표면 및 가장자리가 각이 지고 거칠어서 10%이상의 치환율에서 급격하게 저하된 슬럼프를 나타났다.



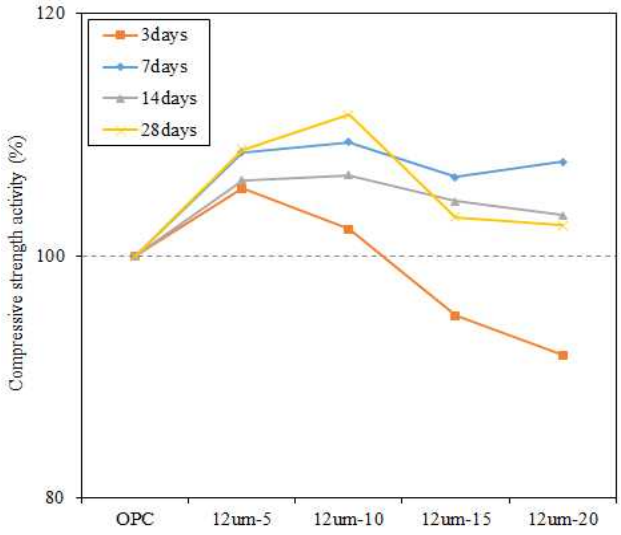
[그림 3.52] LCD 콘크리트 슬럼프(12um)

(3) 압축강도 평가

OPC와 치환량에 따른 LCD 콘크리트의 재령별 압축강도 결과를 [그림 3.53]에 나타냈다. 전체적으로 높은 강도발현은 배합에 포함된 폴리카본산계 혼화제(PCA)의 영향으로 감수효과와 분산성, 유동성 증가에 의한 결과로 보여진다. 또한 실험환경 조건(양생온도, 실험시 평균기온 38도)의 영향으로도 판단된다. 경화시 온도의 증가는 유리분말을 포함하는 포졸란 재료의 활성화를 가속화하여, 강도결과에 따르면 플라이애쉬보다 유리분말의 포졸란 활성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다[4].
LCD 콘크리트의 강도는 초기 재령 3일을 제외하고 전체적으로 기존의 OPC보다 증가하는 경향을 나타낸다. [그림 3.54]는 OPC를 기본으로 하는 강도발현의 활성도를 나타내었다. 재령 3일의 경우, 평균입경 12 um를 15%, 20% 치환했을 때, OPC보다 각각 4.93%, 8.17% 낮은 강도를 나타냈다. 그러나 재령 7일 이후부터 모든 시편에서 OPC보다 높은 강도를 나타냈다. 15% 이상 치환한 경우, 재령 7일에서 가장 높은 활성도를 보였으나, 이후 전체 중 가장 낮은 수준의 활성도를 나타냈다. 포졸란 물질의 직접적인 반응 참여가 수화반응이 시작되고 나서 3일에서 14일이 경과한 다음에 본격적으로 시작되기 것을 고려하면 일반적으로 이 시기에 OPC에 포함된 alite(C_3S를 주성분으로 하는 시멘트 주요 광물상)는 약 70-80% 정도의 반응을 진행한 상태이다. 따라서, LCD로부터 용출된 Si 이온과 Al 이온은, 공극에 존재하는 세공액 중에 포함된 Ca 이온과 반응하여 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H) 및 칼슘알루미네이트 수화물(C-A-H)을 형성하여 경화체의 조직을 보다 치밀하게 만들어 준 것으로 판단된다. LCD 콘크리트의 전체적인 강도 발현은 LCD가 시멘트 매트릭스 내부에서 포졸란 재료의 성질과 궁극적으로 플라이애쉬의 유용한 특성과 유사한 경향이 있다.



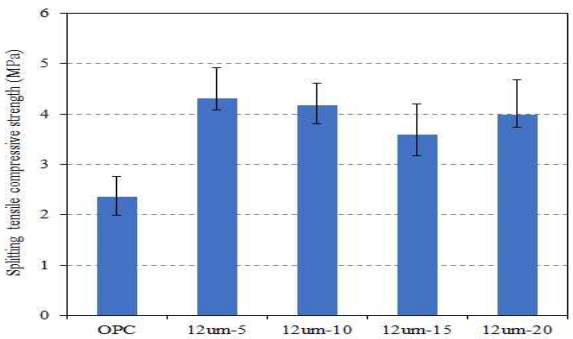
[그림 3.53] LCD 폐유리 콘크리트
압축강도(12um)



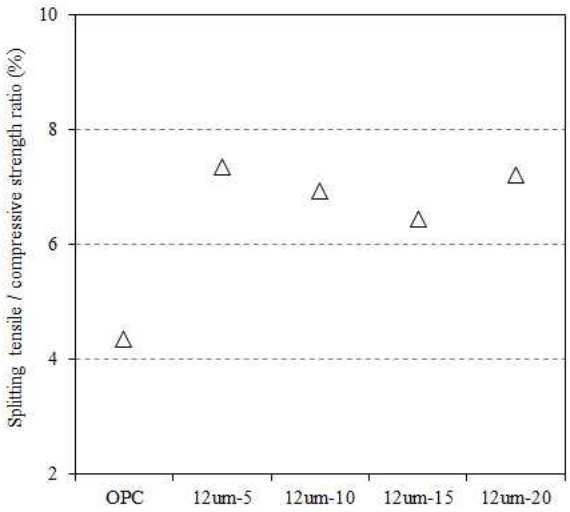
[그림 3.54] LCD 폐유리 콘크리트 압축강도 활성도(12um)

(4) 쪼갬인장강도 평가

[그림 3.55]는 OPC와 LCD 콘크리트에 대한 재령 28일 기준의 쪼갬인장강도 결과를 보여준다. LCD를 사용한 콘크리트의 쪼갬인장강도의 발현은 기존의 OPC 콘크리트에서 관찰되어지는 것과 유사하다. LCD 콘크리트는 압축강도가 증가함에 따라 인장강도 역시 증가하지만, 치환량이 늘어날수록 강도증가 비율은 점차 감소한다. 가장 높은 강도를 보인 것은 5% 치환으로 4.31MPa이며 이것은 OPC의 83%이상 증가된 값이다. 가장 낮은 강도를 나타낸 15%는 3.58MPa이지만 역시 OPC에 비해 높은 강도를 보여준다. [그림 3.56]은 28일 재령에서 압축강도에 대한 쪼갬인장강도의 비이다. LCD의 경우 전체 약 4.5 ~ 7.35% 수준으로 나타났다. 최대 비는 7.35%로 LCD12-5에서 나타났으며 OPC에 대한 비는 4.36%로 나타났다. Her Yung Wang의 연구에서는 w/b = 0.485인 몰탈에 LCD미분말(분말도 3850 cm2/g)의 치환량을 증가할수록 강도는 감소하며 10% 치환했을 경우 OPC에 근접한 쪼갬인장강도를 보인다고 나타냈다. 또한 전체적인 강도수준은 28일 압축강도의 10%수준으로 나타나는 것으로 보고하고 있다.[1] McDonald는 포졸란 재료인 실리카흄을 혼입한 콘크리트의 splitting tensile strength가 같은 재령에서 압축강도의 5.8에서 8.2% 범위에서 변화한다고 보고하였다. 또한 Luther et al.은 플라이애쉬와 실리카흄 콘크리트의 splitting tensile strength가 압축강도의 9.7에서 10.6% 사이의 범위에서 유사함을 발견하였다.[2], [3] 경화된 콘크리트의 압축강도에 대한 인장강도의 비율은 사용되어진 재료의 특성에 크게 영향을 받으며, LCD의 경우 강도발현에 긍정적인 영향으로 작용하는 것으로 판단된다.



[그림 3.55] LCD 폐유리 콘크리트 쪼갬인장강도(12um)



[그림 3.56] LCD 폐유리 콘크리트
쪼갬인장강도/압축강도 비(12um)

3.1.6 산업폐기물 혼입에 따른 미세구조 변화 분석

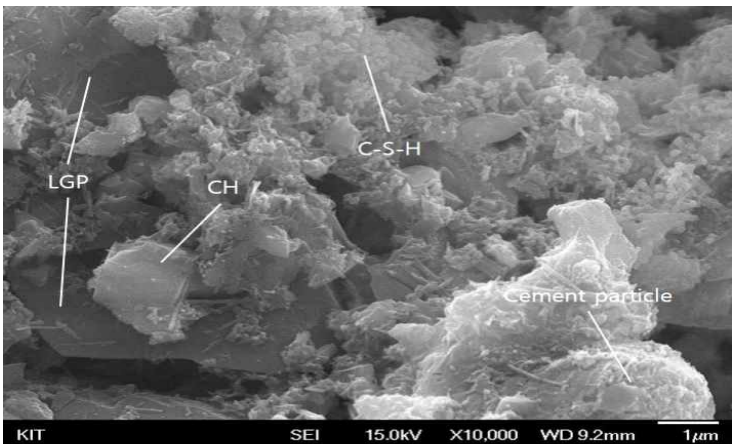
1) SEM-EDX 미세구조 분석

콘크리트의 수화과정에 따라 재령 3일과 28일로 나누어 SEM을 이용한 분석을 하였다. EDX를 통해 SEM 이미지 내에서 목표하는 대상 표면의 특성에 따라 원자의 종류 및 중량비를 확인하였다. [그림 3.57]의 SEM 이미지는 OPC의 재령 3일 미세구조이다. 전형적인 모습으로 수화하여 규산칼슘 수화물(C-S-H)과 수산화칼슘(Ca(OH)2) 수화물을 생성하고 있으나 어두운 곳으로 표시되는 다량의 물을 포함하고 있는 공극상태가 나타난다.

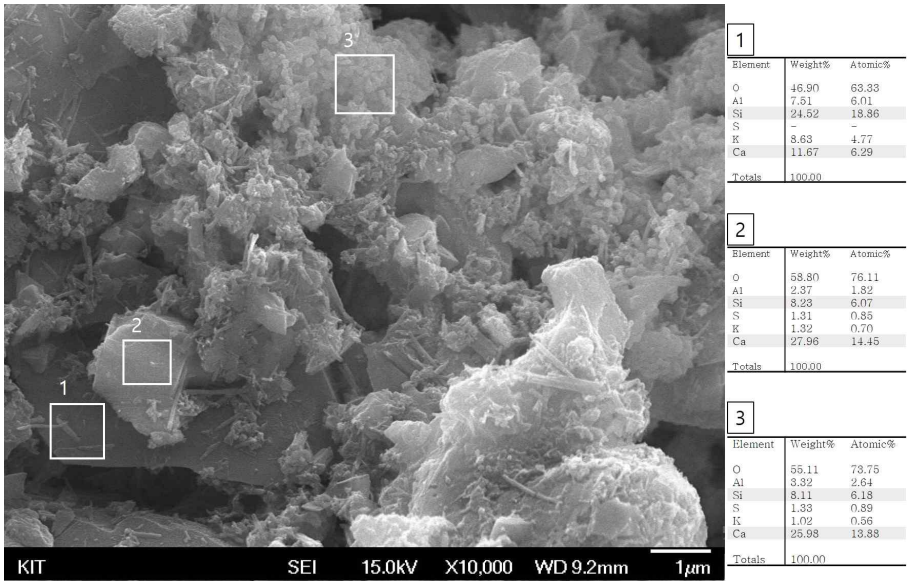


[그림 3.57] OPC 콘크리트의 재령 3일 SEM

[그림 3.58]은 재령 3일의 LCD를 치환한 시멘트 페이스트 구조이다. C-S-H(gel)와 CH 수화물(crystals) 사이에 안정적으로 존재하고 있는 LCD입자를 확인할 수 있다. LCD를 고배율로 촬영한 단면에서 파쇄면에 존재하는 표면의 특징으로 수화물 내의 LCD를 확인이 가능하다. LCD 폐유리의 높은 경도에 의해 미분말로 분쇄 시 단면에 물결과 같은 형상을 남기게 된다. 초기 3일째 사진에서는 생성된 수화물과, LCD 미분말이 본격적으로 포졸란 반응(Pozzolanic reaction)을 시작하지 않은 상태로 존재하는 것을 보여준다. 사진에서 짙은 음영으로 표시된 부분은 공극으로 밀착되지 못한 상태로 존재하는 것을 나타낸다. 이러한 현상은 재령 초기에 시멘트처럼 즉각적으로 물과 반응하여 직접적인 수화반응이 일어나지 못하는 것을 보여주며 초기 콘크리트 내부에 많은 LCD 치환량은 강도에 악영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 실제로 압축강도의 특성에 나타나고 있다. [그림 3.59]의 EDX를 이용한 표면 성분 조사에서 LCD는 원재료와 같이 Si성분이 풍부하고 비슷한 구성으로 존재하는 것을 볼 수 있다.

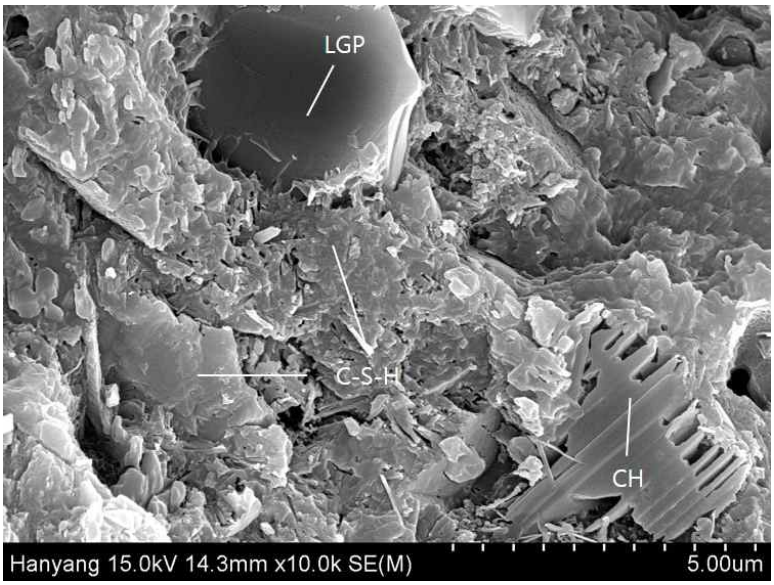


[그림 3.58] 재령 3일 LCD 12um 10% 치환 콘크리트의 미세구조 SEM

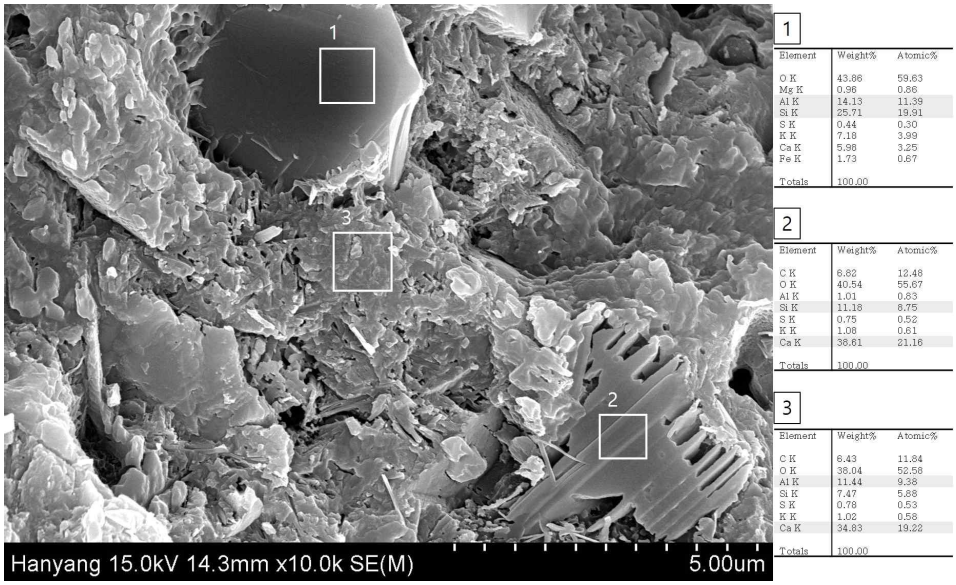


[그림 3.59] 재령 3일 LCD 12um 10% 치환 콘크리트의 미세구조 SEM 및 EDX

그림 3.60와 3.61은 재령 28일의 LCD 시멘트 페이스트의 미세구조이다. 그림 4에서 보이듯이 수화상들이 매우 잘 발달하여 OPC보다 치밀한 구조를 보이고 있으며, 더 이상 독립적으로 존재하는 LCD 입자를 확인하기 어렵다. LCD 미분말의 존재는 시멘트 페이스트와 동화되어 수화물 속의 일부분으로 존재하게 된다. 전반적으로 검은 공극부분이 많이 줄어들고 C-S-H의 증가는 포졸란 반응에 의한 수화물의 구성을 잘 반영하고 있다. 또한 LCD입자로 보이는 재료 주위로 C-S-H 수화물과 결합이 되어지는 부분을 확인할 수 있었다. 시멘트 구성 화합물인 C3S, C2S등이 수화할 때 생성된 Portlandite와 서서히 반응하여 불용성 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H gel)이나 칼슘알루미네이트 수화물(C-A-H gel)을 형성하는 것을 확인 할 수 있다. 상대적으로 매끄럽고 안정된 표면보다 파쇄된 단면에서 포졸란 반응이 쉽게 일어나는 것으로 보여진다. LCD로부터 파생되는 포졸란 입자의 표면은 음전하를 띠기 때문에 C3S입자에서 용출된 Ca^{2+} 이온과 반응하여 포졸란 입자 주위에 C-S-H 층을 형성하며, 입자 표면 혹은 부근에서 생성된 C-S-H gel의 C/S 비가 변하게 된다. 재령 7일과 28일의 EDX 분석으로부터 이와 같이 C-S-H 수화물의 C/S 비가 변하는 것을 확인하였는데 재령 28일의 C/S 비가 OPC에 비해 낮게 측정됨에 따라 포졸란 반응이 발생하였다고 판단된다.



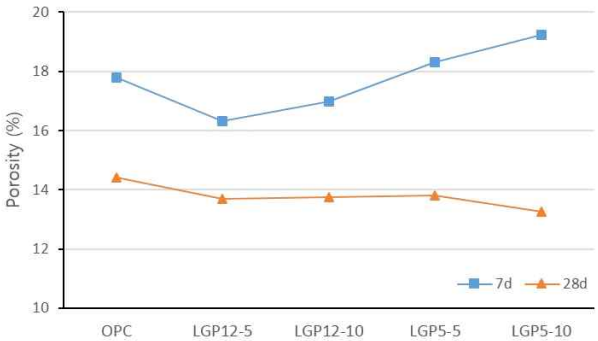
[그림 3.60] 재령 28일 LCD 12um 10% 치환 콘크리트의 미세구조 SEM



[그림 3.61] 재령 3일 LCD 12um 10% 치환 콘크리트의 미세구조 SEM 및 EDX

2) MIP 미세공극 분석

일반적으로 시멘트 매트릭스의 공극분포는 수화량에 의존한다. 이는 시멘트 내부의 수화물에 의해 공극이 분산되기 때문이다. [그림 3.62]의 결과에 따르면 재령 7일, 높은 분말도를 치환한 5um의 전체 공극량(porosity)은 OPC 17.79%, 5um-5 18.31%, 5um-10 19.23%로 OPC보다 더 높게 나타난다. 재령 28일로 지나면 OPC 14.43%, 5um-5 13.79%, 5um-10 13.27%로 2.6%에서 6%까지 감소하였지만, 공극량(porosity)의 감소는 내구성(durability)과 관련된 투과성(permeability)에 영향을 준다. LCD 미분말의 포졸란 반응 및 2차 수화반응으로 생성된 C-S-H겔과 Hydrotalcite로 인하여 2차 수화물과 Ca(OH)2와의 사이의 공극인 Macro공극은 감소되고, 그에 따른 Micro겔공극은 증가하고, 전체 공극률 또한 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 공극량의 감소는 강도와도 밀접한 관계를 갖고 있다. 일반적으로 포졸란 반응은 OPC의 시멘트 수화반응 보다 상대적으로 느리기 때문에, 시멘트의 일정부분을 포졸란 물질로 대체한 경화체는 초기에는 오히려 높은 투과성을 나타내지만, 반응이 진행됨에 따라 투과성이 감소하게 된다. 따라서, 모세관공극은 투과성과 관련되었기 때문에, LCD 미분말의 첨가로 인하여 액상과 기상의 투과성은 감소되어 내구성 향상에 기여할 수 있다고 판단된다.

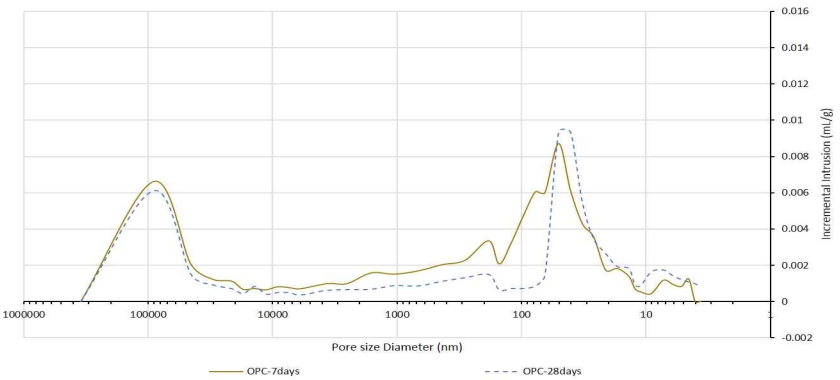


[그림 3.62] LCD 콘크리트의 공극 특성

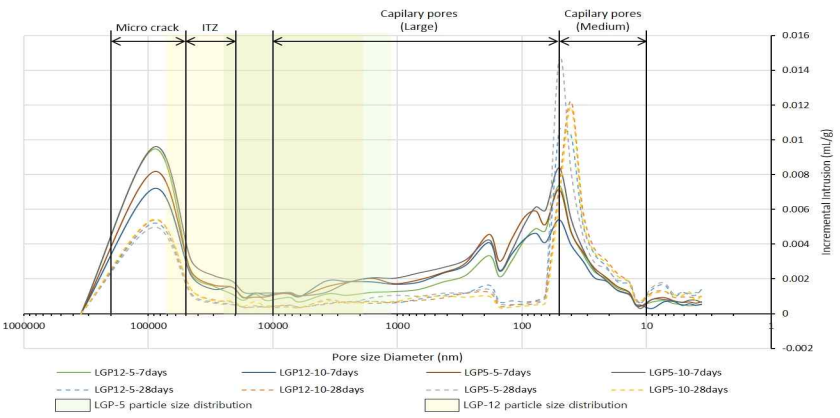
	Average pore diameter(nm)	
	7 days	28 days
OPC	17.7926	14.4250
5um-5	18.3079	13.7930
12um-5	16.3242	13.6883
5um-10	19.2284	13.2687
12um-10	16.9954	13.7393

[표 3.13] 재령에 따른 LCD 미분말 콘크리트의 평균 공극 직경

LCD 콘크리트의 재령이 경과하면서 수화반응과 포졸란의 2차 반응 진행으로 모세공극(중간) 범위를 제외한 전 구간에 대하여 모세관 공극량이 감소하고 최대 공극 직경도 작아지게 된다. [표 3.13]은 재령별 LCD 미분말 콘크리트의 평균 공극 직경을 나타냈다. 공극의 감소는 특히 50 ~ 110nm 범위에서 크게 나타났다. LCD의 입도분포와 함께 고려했을 때 이 구간에서의 공극감소는 단순한 LCD의 공극의 충진 효과라고 보기 어렵다. 이는 시멘트페이스트가 충분히 수화되어 생성된 수화물이 치밀한 조직으로 발전되어 연결된 모세관 내부를 차단하고 분할하여 겔공극만으로 연결된 공극을 만들어 강도를 상당부분 증진한 것으로 보여진다. 특히, 재령 28일 LCD 미분말의 경우 4 ~ 50nm구간의 겔공극을 포함하는 모세공극(중간) 범위에서 7일에 비해 높은 공극(porosity)량 증가를 보여주고 있다. 전반적으로 크기가 큰 공극량은 줄어들고 50nm이하 크기의 모세공극 양은 OPC 콘크리트보다 소량 늘어났다. 이러한 현상은 모세공극(큰) 범위에서 실제 LCD 입자의 팩킹과 함께 포졸란 반응성에 의한 수화물 생성으로 상대적으로 큰 모세공극(Large capillary porosity) 구조를 채우거나 공극을 분할함으로써 연결된 공극에서 닫힌 공극으로 전이된 것이라 판단된다. 미세한 차이이지만 전이되는 공극 크기는 입경에 상관없이 LCD 미분말의 치환량이 증가함에 따라 더 작은 공극 사이즈로 전이 되었다.



[그림 3.63] OPC 콘크리트의 공극분포 곡선



[그림 3.64] LCD 콘크리트의 치환율별 공극분포 곡선

또한, 공극 직경 50~200um의 범위(ITZ)에서 LCD 콘크리트의 공극량 크기가 재령 28일에 상당부분 감소하였다. 이 구간의 공극특성은 콘크리트 배합(mixing)시 AE제에 의해 혼입된 연행공기(entrained air)가 LCD와 함께 수화되면서 감소한 것으로 판단된다. [그림 3.63]의 OPC 콘크리트를 보면 재령 7일과 28일에서 이 구간에 대한 감소량은 크지 않다. 그러나 [그림 3.64]을 보면 이 구간에서 모든 LCD 미분말을 혼입한 콘크리트의 공극량이 눈에 띄게 감소하는 것을 확인하였다. 입도분포 곡선을 보면 100um 구간의 입도는 분포하지 않는 것으로 보여지며 12um는 입도분포 편차의 상위 10%의 평균입경은 72.4um로 일부 존재한다. 그러나 [그림 3.64]의 결과에 따르면 LCD는 입경에 상관없이 이 구간의 공극량은 상당히 유사한 수준으로 감소하였다. 재령 28일까지 시간이 지남에 따라 생성된 수화물이 공극을 밀실하게 만들어 강도 증진으로 이어진 것으로 판단된다. 실제로 ITZ에서의 기공분포 및 크기 감소는 실리카흄, 고로 슬래그, 플라이 애쉬와 같은 포졸란 재료를 혼입한 콘크리트의 염화이온 투과실험으로부터 확인 가능했다. 이러한 원인의 가장 큰 요소는 미세입자의 밀실한 충진(팩킹)과 수화물 생성으로 인한 성능 변화이다. 이는 콘크리트 LCD 재료의 혼입이 콘크리트 시스템의 공극률 감소, 매트릭스의 밀도를 증가시키고, 강도를 발현 시키는 것을 알 수 있다.

3.1.7 폐유리를 이용한 콘크리트의 최적 배합비 도출

1) 콘크리트 배합설계

(1) 25 - 40 - 150

가) 배합설계 일반 사항

① 적용 결합재 : LCD 폐유리 미분말(12um), 결합재 대비 10% 치환
② 굵은골재 최대치수 : 25mm
③ 설계 기준 강도(fck) : 40MPa
④ 슬럼프 : 150mm
⑤ 공기량 : 5.0%

나) 사용재료의 선정 및 시험성과

구분	1 종 시멘트	LCD	잔골재	굵은골재	비 고
밀도	3.10	3.05	2.53	2.54	
흡수율			1.7	1.7	
조립률			2.68	6.61	
감수율					
치환율	90%	10%	100%	100%	

[표 3.14] 사용재료의 선정

다) 배합강도 결정 및 W/C 결정 (콘크리트 표준시방서에 의거)

① 배합기준 강도 결정(fcr)

압축강도의 시험횟수가 14회 이하인 경우의 배합강도는 다음과 같이 적용한다.

설계기준강도 fck(Mpa)	배합강도 fcr(Mpa)
21미만	fck + 7
21이상 35이하	fck + 8.5
35초과	fck + 10

[표 3.15] 배합기준 강도 결정

* 상기의 적용배합강도는 40MPa임으로 인해 +10Mpa임으로 인해 당 배합의 배합기준강도는 50Mpa로 결정한다.

② B/W - fc 관계식 결정

적당하고 생각되는 범위 내에서 3종이상의 서로 다른 W/B비로 배합하고 표준양생한 공시체의 압축강도 시험을 실시하여 B/W-fc관계식을 만든다. AE콘크리트의 경우 소요의 공기량을 가지는 콘크리트로 공시체를 만들어 압축강도 시험을 한 후 B/W와 fc와의 직선식을 만들어야 한다.
단, 미얀마 대우아마라 호텔 현장의 경우 선행 매트기초의 재료조건과 유사한 환경조건이므로, 선행사례를 근거로 물-시멘트비를 적용하기로 한다.
* W/B(물-시멘트 비)는 46.7% 가 된다.

라) 잔골재율(S/a) 및 단위수량 결정

굵은골재의 최대치수 (mm)	단위굵은골재용적 (%)	AE제를 사용하지 않는 콘크리트			AE 콘크리트				
		갇힌공기 (%)	잔골재율 s/a (%)	단위수량 W (kg)	공기량 (%)	양질의 AE제를 사용한 경우		양질의 AE감수제를 사용한 경우	
						잔골재율 s/a(%)	단위수량 W(kg)	잔골재율 s/a(%)	단위수량 W(kg)
20	62	2.5	45	185	6.0	44	175	45	165
25	67	1.5	41	175	5.0	42	170	43	160

[표 3.16] 잔골재율(S/a) 및 단위수량 결정

주1) 이 표의 값은 보통의 입도를 가진 모래(조립률 2.8정도)와 및 부순돌을 사용한 물-시멘트비 55% 정도, 슬럼프 8cm의 콘크리트에 대한 것이다.
주2) 사용재료 또는 콘크리트의 품질이 주1)의 조건과 다른 경우에는 위의 [표 3.16]의 값을 배합 보정 조건에 대하여 보정한다.
※ 양질의 AE감수제를 사용할 경우 (굵은골재 25mm)
초기 조건을 S/a = 39.8% W = 175kg으로정함.
기준에 따르면 S/a = 43.0% W = 160kg을 만족해야함.

마) 절대 잔골재율(S/a) 및 단위수량(W) 보정

구분	S/a의 보정 (%)	W의 보정 (kg)
슬럼프 값이 1cm 만큼 클(작을) 때마다	보정하지 않는다.	1.2%만큼 크게(작게)한다.
공기량이 1% 만큼 클(작을) 때마다	0.5～1.0만큼 작게(크게)한다.	3% 만큼 작게(크게)한다.
물-시멘트비가 0.05 클(작을) 때마다	1만큼 크게(작게)한다.	보정하지 않는다.
S/a가 1% 클(작을) 때마다	보정하지 않는다.	1.5kg만큼 크게(작게)한다.
모래의 조립율이 0.1 만큼 클(작을) 때마다	0.5만큼 크게(작게)한다.	보정하지 않는다.
자갈을 사용할 경우	3～5만큼 크게 한다.	9～15만큼 작게 한다.
부순모래를 사용할 경우	2～3만큼 크게 한다.	6～9만큼 크게 한다.

[표 3.17] 절대 잔골재율(S/a) 및 단위수량(W) 보정

바) S/a보정 및 W의 보정

구 분	기 준	조건	S/a = 39.8%	W = 175Kg
슬럼프	150	150	보정하지 않는다	(150.0 - 150.0) * 0.12 = 0.00%
공기량	5.0	5.0	(5.0 - 5.0) * 0.75 = 0.00%	(5.0 - 5.0) * 3.0 = 0.00%
W/B	55.0	46.7	(46.7 - 55.0) ÷ 5.0 = -1.7%	보정하지 않는다
S/a	43.0	39.8	-	(39.8 - 43.0) * 1.5 = -4.80kg
조립율	2.80	2.68	(2.68-2.80)*0.5/0.1 = -0.6%	보정하지 않는다
자갈	-	-	0%	0kg
부순모래	-	-	0%	0kg
합 계			-2.3%	-4.8kg
보 정			37.5%	170kg

[표 3.18] S/a보정 및 W의 보정

사) 시험배치별 배합비 계산 및 시험

① 제1시험 BATCH

Gmax (mm)	설계강도 (MPa)	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	W/B (%)	S/a (%)	W (kg/㎥)	AD (C*%)
25	40	150	5.0	46.7	37.5	170	1.00 %

[표 3.19] 시험배치별 배합비 계산 및 시험

- 사용 재료량 산출

구 분	계 산 식	용적 및 재료량
단위결합재량	170÷46.7%	364kg/m^3
시멘트 절대용적	364×0.90÷3.10	106ℓ/m^3
설계공기량 절대용적	1000×0.050	50ℓ/m^3
골재의 절대용적	1000-170-106-0.0-50	674ℓ/m^3
잔골재 절대용적	674×37.5%	253ℓ/m^3
굵은골재 절대용적	674-253	421ℓ/m^3
단위잔골재량	253×2.53	640kg/m^3
단위굵은골재량	421×2.54	1069kg/m^3

[표 3.20] 사용 재료량 산출

- 단위재료량과 시험 재료량

구분	W/B	S/a	단위 재료량(kg)					
	(%)	(%)	W	C	LCD	S	G	AD
1㎥	46.7	37.5	170	328	36	640	1069	3.64
35ℓ			5.96	11.47	1.274	22.40	37.415	0.1274

[표 3.21] 단위재료량과 시험 재료량

- 제 1 시험 Batch의 시험결과

구 분	슬럼프	공기량	작업성 및 유동성	재료분리상태	조 치
시험 및 육안관찰	190	5.5%	불량	골재 상태불량	s/a + 7%

[표 3.22]시험 Batch의 시험결과

- 제 1 시험 Batch의 배합조정

구 분	결과	기 준	S/a = 37.5%	W = 170Kg
슬럼프	190	150	보정하지 않는다	(150.0 - 190.0) × 0.12 = -4.80%
공기량	5.5	5.0	(5.5 - 5.0) × 0.75 = 0.37%	(5.5 - 5.0) × 3.0 = 1.50%
S/a	-	-	+7.0%	(7.0 / 1.0) × 1.5 = 10.5kg
합 계			7.4%	4.9kg
보 정			44.9%	175.1kg

[표 3.23] 제 1 시험 Batch의 배합조정

② 제2시험 BATCH

- 사용 재료량 산출

구 분	계 산 식	용적 및 재료량
단위결합재량	175÷46.7%	375kg/m^3
시멘트 절대용적	375×0.90÷3.10	109ℓ/m^3
설계공기량 절대용적	1000×0.050	50ℓ/m^3
골재의 절대용적	1000-175-109-0.0-50	666ℓ/m^3
잔골재 절대용적	666×44.9%	299ℓ/m^3
굵은골재 절대용적	666-299	367ℓ/m^3
단위잔골재량	299×2.53	757kg/m^3
단위굵은골재량	367×2.54	932kg/m^3

[표 3.24] 사용 재료량 산출

- 단위재료량과 시험 재료량

구분	W/B	S/a	단위 재료량(kg)					
	(%)	(%)	W	C	LCD	S	G	AD
1㎥	46.7	44.9	175	338	38	757	932	3.75
30ℓ			5.25	10.13	1.13	22.70	27.96	0.1125

[표 3.25] 단위재료량과 시험 재료량

- 제 2 시험 Batch의 시험결과

구 분	슬럼프	공기량	작업성 및 유동성	재료분리상태	비 고
시험 및 육안관찰	150	5.0 %	양호	양호	

[표 3.26] 제 2 시험 Batch의 시험결과

아) 기준 콘크리트 재료량

구분	W/B	S/a	단위 재료량(kg)					
	(%)	(%)	W	C	LCD	S	G	AD
1㎥	46.7	44.9	175	337	37	756	932	3.75

[표 3.27] 기준 콘크리트 재료량

자) 기준배합에 대한 W/B비 별 실내배합

기준 배합에 대한 W/B비의 ±2%에 해당하는 배합비를 산출하여 품질시험 및 공시체를 제작하여 콘크리트 품질의 균질성, 소요강도, 수밀성, 작업성 등을 검토한다.

① 기준 콘크리트 W/B의 -2% 재료량 산출(W/B : 44.7 %)

구 분	계 산 식	용적 및 재료량
단위결합재량	175÷44.7%	392kg/m^3
시멘트 절대용적	392×0.90÷3.10	114ℓ/m^3
설계공기량 절대용적	1000×0.050	50ℓ/m^3
골재의 절대용적	1000-175-114-0.0-50	661ℓ/m^3
잔골재 절대용적	661×44.4%	294ℓ/m^3
굵은골재 절대용적	661-294	367ℓ/m^3
단위잔골재량	294×2.53	744kg/m^3
단위굵은골재량	367×2.54	932kg/m^3

[표 3.28] 기준 콘크리트 W/B의 -2% 재료량 산출(W/B : 44.7 %)
(단 : W/B가 5% 작을때 마다 S/a 1%만큼 작게함으로 -0.5%를 보정해 S/a는 44.4% 적용)

② 기준 콘크리트 W/B의 +2% 재료량 산출 (W/B : 48.7 %)

구 분	계 산 식	용적 및 재료량
단위결합재량	175÷48.7%	359kg/m^3
시멘트 절대용적	359×0.90÷3.10	104ℓ/m^3
설계공기량 절대용적	1000×0.050	50ℓ/m^3
골재의 절대용적	1000-175-104-0.0-50	671ℓ/m^3
잔골재 절대용적	671×45.4%	305ℓ/m^3
굵은골재 절대용적	671-305	366ℓ/m^3
단위잔골재량	305×2.53	772kg/m^3
단위굵은골재량	366×2.54	929kg/m^3

[표 3.29] 기준 콘크리트 W/B의 +2% 재료량 산출 (W/B : 48.7 %)
(단 : W/B가 5% 클때 마다 S/a 1%만큼 크게함으로 +0.5%를 보정해 S/a는 45.4% 적용)

③ W/B에 대한 3수준의 단위재료량 (kg/m3)

구 분	W/B	S/a	단위 재료량(kg)						비 고
	(%)	(%)	W	C	LCD	S	G	AD	
-2%	44.7	44.4	175	352	39	744	932	3.92	
Control	46.7	44.9	175	337	37	756	932	3.75	
2%	48.7	45.4	175	323	36	772	929	3.59	

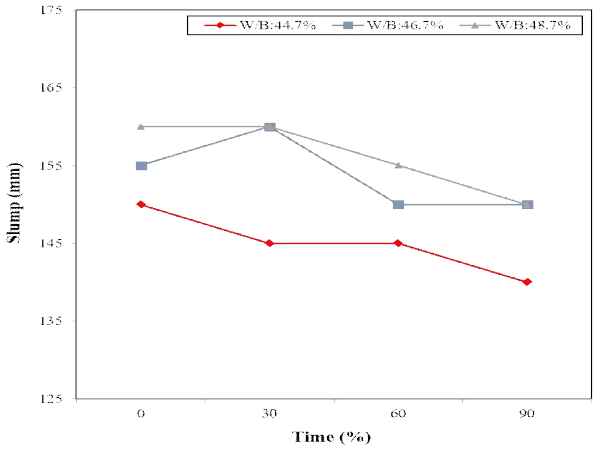
[표 3.30] W/B에 대한 3수준의 단위재료량 (kg/m3)

④ W/B별 굳지않은 콘크리트 시험결과

구분	W/B (%)	Elapse Time	Slump (mm)	Air (%)	Air Temp(℃)	Con'c Temp(℃)	Chloride (kg/㎥)	비고
-2%	44.7	0'	150	5.0	24.8	31.3	0.091	
		30'	145	4.8	24.8	28.8		
		60'	145	4.5	24.8	27.0		
		90'	140	4.2	24.8	26.2		
P	46.7	0'	155	4.8	25.0	31.4	0.077	
		30'	160	4.5	25.0	29.0		
		60'	150	4.2	24.8	27.6		
		90'	150	4.0	24.8	26.7		
+2%	48.7	0'	160	4.5	24.8	31.4	0.069	
		30'	160	4.4	25.0	28.9		
		60'	155	4.1	25.0	27.3		
		90'	150	4.0	25.0	26.5		

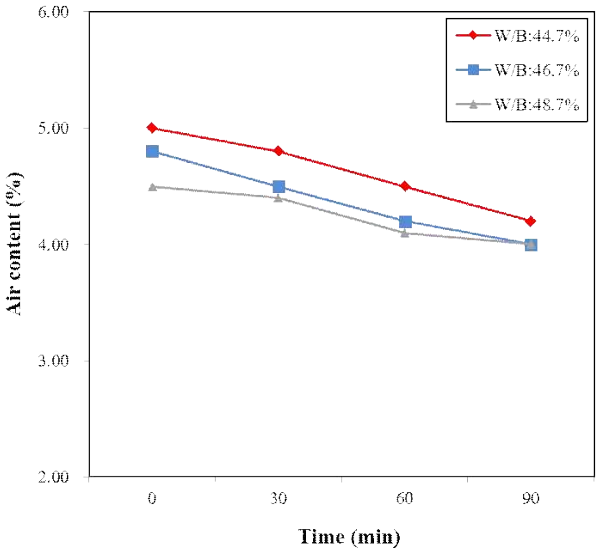
[표 31] W/B별 굳지않은 콘크리트 시험결과

▷ 슬럼프 경시변화 시험결과



[그림 3.65] W/B별 슬럼프 시험결과

▷ 공기량 경시변화 시험결과



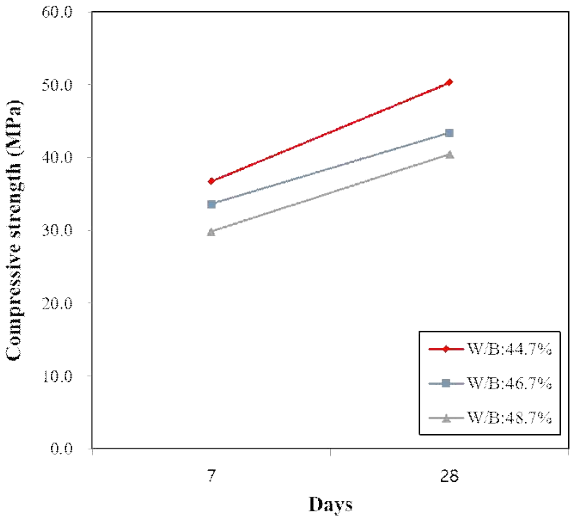
[그림 3.66]W/B별 공기량 시험결과

⑤ W/B별 압축강도 시험결과

구분	W/B (%)	7일강도 (Mpa)		28일강도 (Mpa)		56일강도 (Mpa)	90일강도 (Mpa)	비고
-2%	44.7	36.8	36.7	49.6	50.3	N/A	N/A	
		35.9		50.8				
		37.5		50.4				
P	46.7	33.7	33.6	42.4	43.4	N/A	N/A	
		32.8		42.8				
		34.3		44.9				
+2%	48.7	38.5	29.8	40.3	40.5	N/A	N/A	
		30		39.7				
		30.8		41.5				

[표 3.32] W/B별 압축강도 시험결과

▷ W/B별 압축강도 시험결과



[그림 3.67] W/B별 압축강도 시험결과

⑥ W/B결정

상기의 실내배합에 대한 시험결과 콘크리트의 작업성, 유지성능 및 압축강도를 만족하는 배합은 W/B 42.0%로 결정한다. 또한 혼화제의 사용 범위는 기준 혼화제 첨가량에서 재료변동, 계절적 변화 등 환경적인 요인에 의해서 첨가 비율을 사용 Binder량의 ±0.1%를 조정할 수 있다.

차) 시방배합의 결정

① 사용 재료량 산출

구 분	계 산 식	용적 및 재료량
단위결합재량	175÷41.0%	427kg/m^3
시멘트 절대용적	427×0.90÷3.10	124ℓ/m^3
설계공기량 절대용적	1000×0.050	50ℓ/m^3
골재의 절대용적	1000-175-124-0.0-50	651ℓ/m^3
잔골재 절대용적	651×43.8%	285ℓ/m^3
굵은골재 절대용적	651-285	366ℓ/m^3
단위잔골재량	285×2.53	721kg/m^3
단위굵은골재량	366×2.54	930kg/m^3

[표 3.33] 사용 재료량 산출

② 시방배합

구분	W/B	S/a	단위 재료량(kg)					
	(%)	(%)	W	C	LCD	S	G	AD
1㎥	44.0	43.8	175	384	43	721	930	4.27

[표 3.34] 시방배합

3.2 2차년도

3.2.1 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 열화저항성 실험 준비

1) 사용재료

시멘트는 가장 기본적인 수경성 무기재료로 최적의 성능을 발휘하기 위해 사용 혼화재의 분말도 및 혼합비율의 최적화, 그리고 혼화제와의 적합성을 고려하여 선정하여야 한다. 포틀랜드 시멘트는 그 중 가장 많이 사용되고 보편화된 것으로서 비교적 공정이 간단하고 생산량이 많으며, 일반적인 콘크리트 공사에 널리 사용된다. 본 연구에서 사용한 시멘트는 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 사용된 시멘트의 화학성분과 물리적 성질은 아래의 [표 3.35], [표 3.36]과 같다.

화학성분(%)							
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	lg−$loss$
21.0	6.0	2.8	62.1	3.4	1.2	2.0	1.7

[표 3.35] 시멘트의 화학성분

밀도 (g/cm^3)	분말도 (cm^2/g)	안정도 (%)	응결시간		압축강도(MPa)		
			초결(분)	종결(분)	3일	7일	28일
3.15	3,360	0.04	185	254	28.9	39.9	54.7

[표 3.36] 시멘트의 화학성분

본 연구에서 사용한 LCD 폐유리 미분말은 (주)이노소재에서 시료를 받아 실험하였고 아래 [그림 3.68]은 치환재료의 원재료 사진이다. 이를 시멘트 대체재로 사용하게 된 이유는 LCD 폐유리 미분말의 입도가 작아 콘크리트의 강도 발현에 영향을 주는 공극 및 시료들의 결합 시 생길 수 있는 공극을 메워줌으로 인해 밀도가 높아져 워커빌리티를 개선하고 압축강도 및 염해 등의 내구성을 향상 시킬 것으로 예상되어 실험하였다.



[그림 3.68] LCD 폐유리 미분말

2) 배합

OPC 콘크리트를 포함, LCD 폐유리 미분말을 혼입하여 아래 [표 3.37]와 같이 시멘트를 대체하여 KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법에 따라서 실험체를 제작하였다.

	W/B(%)	S/a(%)	LCD(%)	Air(%)	Unit weight (kg/m^3)					
					W	B	C	LCD	S	G
OPC	40.00	43.00	0.00	5.00	170.00	425.00	425.00	0.00	701.78	963.36
LCD12-5	40.00	43.00	5.00	5.00	170.00	425.00	403.75	21.25	700.56	961.68
LCD12-10	40.00	43.00	10.00	5.00	170.00	425.00	382.50	42.50	699.34	960.00
LCD12-15	40.00	43.00	15.00	5.00	170.00	425.00	361.25	63.75	698.11	958.32
LCD12-20	40.00	43.00	20.00	5.00	170.00	425.00	340.00	85.00	696.89	956.65
LCD5-5	40.00	43.00	5.00	5.00	170.00	425.00	403.75	21.25	700.56	961.68
LCD5-10	40.00	43.00	10.00	5.00	170.00	425.00	382.50	42.50	699.34	960.00
LCD5-15	40.00	43.00	15.00	5.00	170.00	425.00	361.25	63.75	698.11	958.32
LCD5-20	40.00	43.00	20.00	5.00	170.00	425.00	297.50	85.00	693.99	952.66

[표 3.37] 시험 배합표

제작한 각 공시체의 재령 7, 28, 56, 91일 압축강도를 측정하고 황산염, 동결융해, 탄산화와 같은 열화현상의 저항성 확인을 위한 실험을 각 실시하였다.

3.2.2 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 열화저항성 실험 및 결과

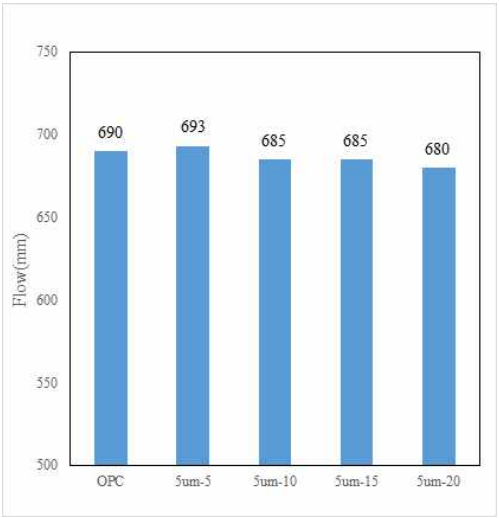
1) 시공성 및 압축강도

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 플로우는 KS F 2402 슬럼프 콘 시험규정에 따라 측정하였으며, 굳지 않은 콘크리트의 공기량 측정은 KS F 2421 공기실압력방법 시험규정 에 따라 측정하였다.

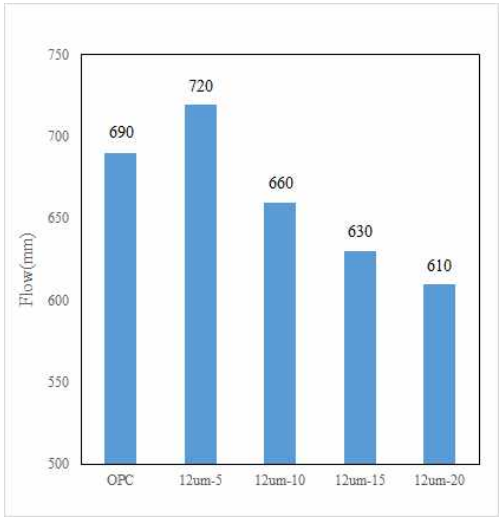
압축강도 시험은 KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법 규정에 따라 시편 Φ 100×200mm 원주형 공시체를 제작하였으며, KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 의하여 시험하였다. LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 공시체 제작 후 재령 7일, 28일, 56일, 91일 압축강도를 측정하였으며 재령별 공시체 3개의 압축강도 값의 평균값을 압축강도 시험 결과 값으로 사용하였다.

2) 시공성 및 압축강도 결과

본 연구에서 LCD 폐유리 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 유동성을 확인하여 현장에서의 시공성을 평가하기 위해 슬럼프 플로우 및 공기량 측정을 실시하였다.

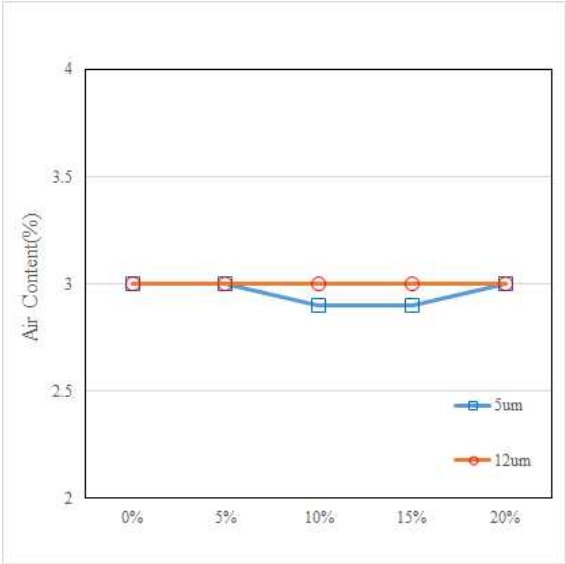


[그림 3.69] 5μm 치환율별 슬럼프 플로우



[그림 3.70] 12μm 치환율별 슬럼프 플로우

우선 치환하지 않은 경우의 슬럼프 플로우는 690mm가 측정되었으며, 5μm와 12μm 모두 5% 치환 시의 슬럼프 플로우 값이 가장 높게 측정되었다. 그 외의 경우 치환율이 증가할수록 슬럼프 플로우 값이 감소하였고 치환하지 않은 경우보다 낮은 슬럼프 플로우 값이 측정되었다. 이는 대체 재료인 LCD 폐유리 미분말의 입형이 각이 지고 모가 난 방추형으로 접촉 면적이 증가하여 점성이 증가함으로서 유동성을 저하시킨 것으로 사료된다.



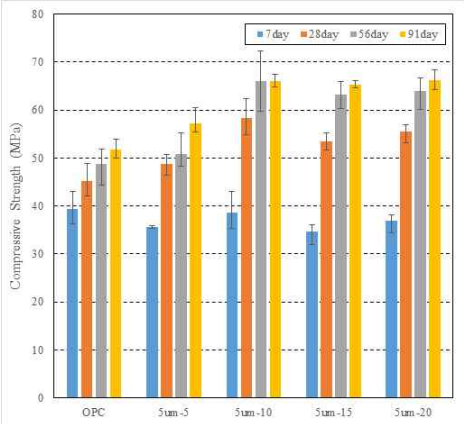
[그림 3.71] 공기량 측정 결과

본 연구에서는 목표 공기량을 3% 이하로 정하였으며 시험 결과, 5μm치환율 10%와 15%의 경우 2.9%의 공기량이 측정되어 치환하지 않은 경우보다 낮은 공기량을 나타내었다. 그 외의 경우 3%의 공기량이 측정되어 목표 공기량인 3% 이하를 만족하였다.

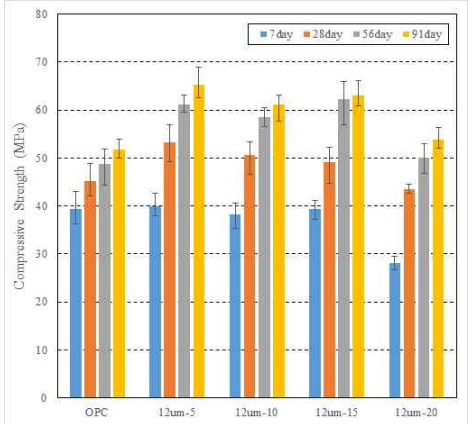
본 연구에서는 [그림 3.72]와 같이 압축시험장비를 사용하였으며 LCD 폐유리 미분말의 치환율별 압축강도 시험 결과는 아래의 [그림 3.73], [그림 3.74]에 나타냈다.



[그림 3.72] 콘크리트 압축강도 시험

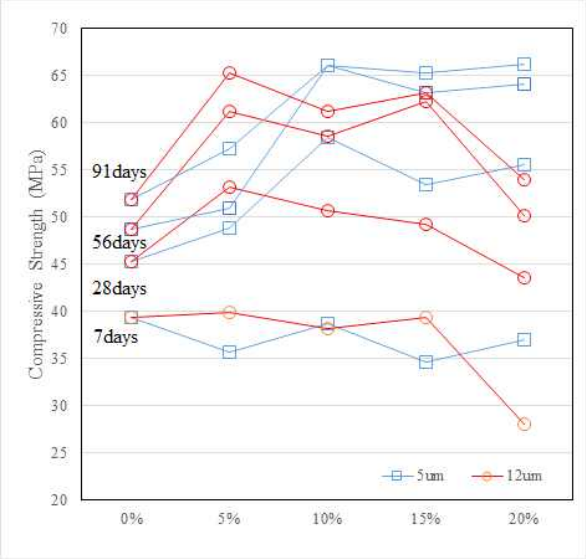


[그림 3.73] 5μm 치환율별 압축강도(MPa)



[그림 3.74] 12μm 치환율별 압축강도(MPa)

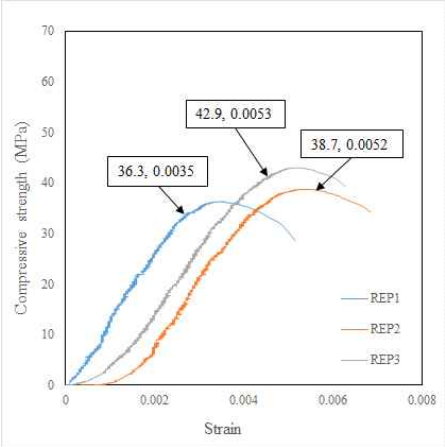
압축강도 시험 결과 전체적으로 재령이 증가함에 따라 높은 압축강도가 발현되었으며, 5μm의 경우 치환율 10%, 12μm의 경우 치환율 5%에서 높은 압축강도가 측정되었다. OPC를 제외한 치환율별 평균 압축강도를 비교해보면, 재령 7일의 경우 12μm 치환율 5%의 평균 압축강도가 39.9MPa로 가장 높았고, 12μm 치환율 20%가 28.0MPa로 가장 낮았다. 재령 28일의 경우 5μm 치환율 10%의 평균 압축강도가 58.4MPa로 가장 높았고, 12μm 치환율 20%가 43.5MPa로 가장 낮았다. 56일의 경우 5μm 치환율 20%가 64.0MPa로 가장 높았으며, 12μm 치환율 20%가 50.1MPa로 가장 낮았다. 91일의 경우 5μm 치환율 20%가 66.2MPa로 가장 높았고 12μm 치환율 20%가 53.9MPa로 가장 낮은 강도발현을 보였다.



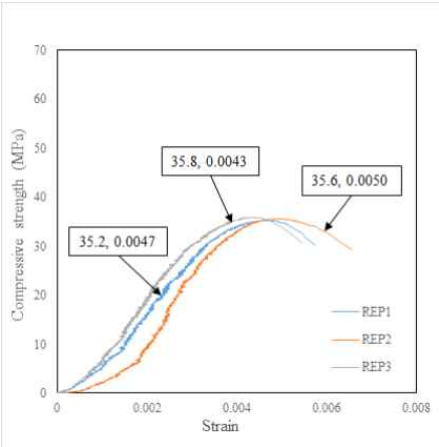
[그림 3.75] 치환율별 평균 압축강도 비교

[그림 3.75]과 같이 5μm, 12μm의 치환율별 평균 압축강도를 비교해보면 5%의 경우 12μm가 5μm의 경우보다 높은 경향을 보였고, 그 외 치환율 10%와 15%, 20%의 경우 5μm가 12μm보다 높은 압축강도를 보였다.

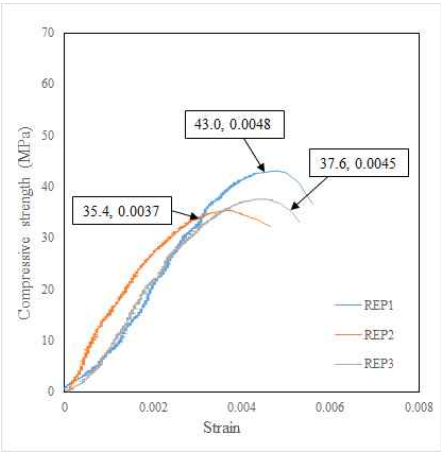
각 시료의 압축강도 시험 시 변위와 하중값을 이용하여 응력과 변형률을 구하고 이를 응력-변형률 그래프로 나타내어 재령별로 정리하면 다음과 같다.



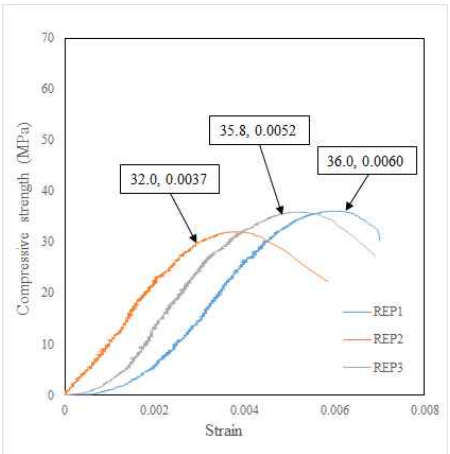
[그림 3.76] 7일 OPC 응력-변형률



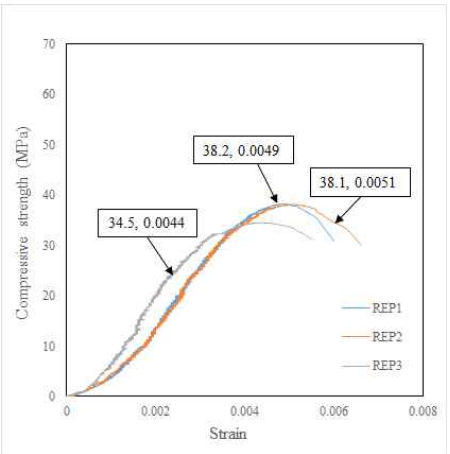
[그림 3.77] 7일 5μm -5% 응력-변형률



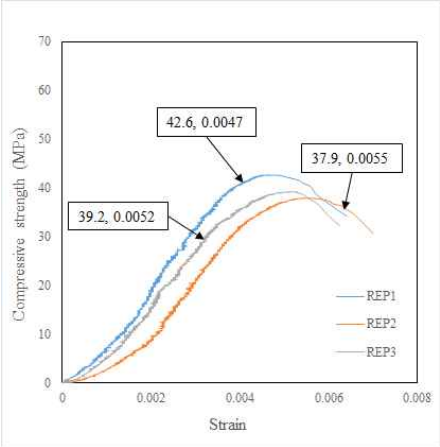
[그림 3.78] 7일 5μm -10% 응력-변형률



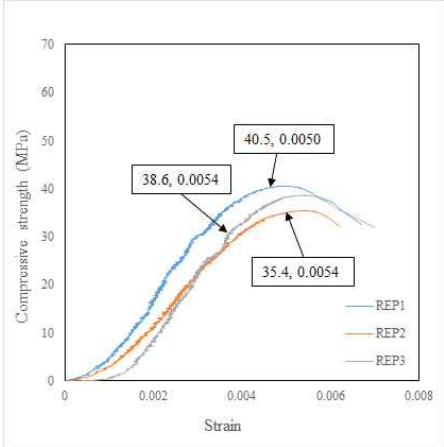
[그림 3.79] 7일 5μm -15% 응력-변형률



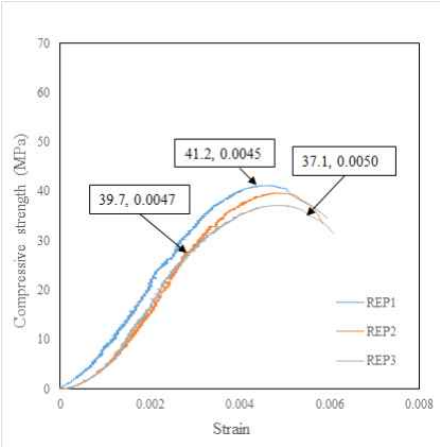
[그림 3.80] 7일 5μm -20% 응력-변형률



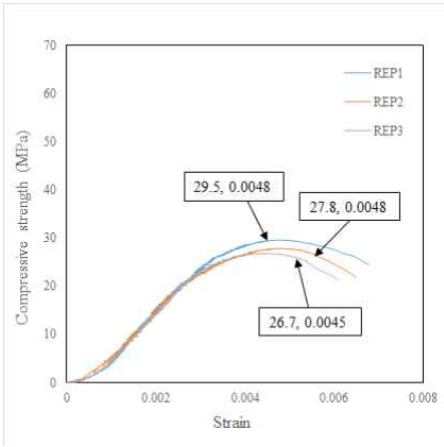
[그림 3.81] 7일 12μm-5% 응력-변형률



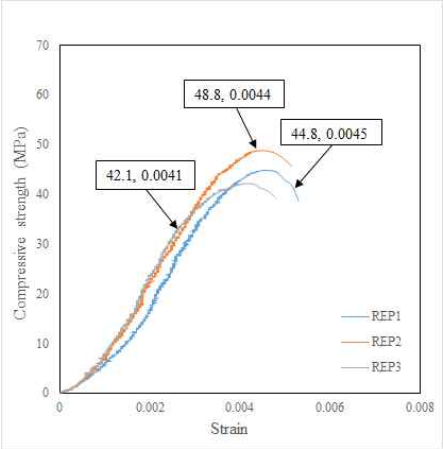
[그림 3.82] 7일 12μm-10% 응력-변형률



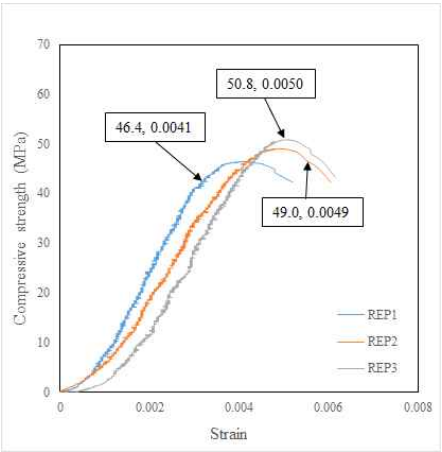
[그림 3.83] 7일 12μm-15% 응력-변형률



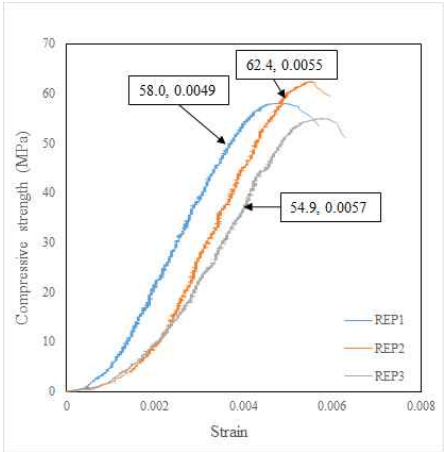
[그림 3.84] 7일 12μm-20% 응력-변형률



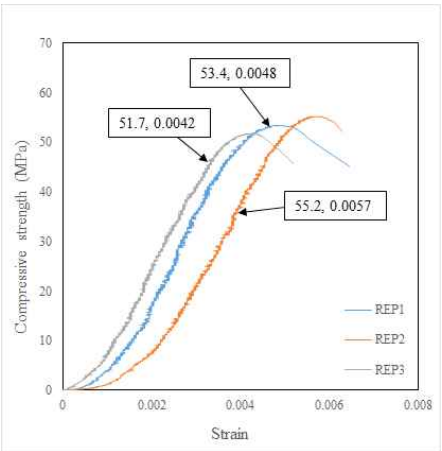
[그림 3.85] 28일 OPC 응력-변형률



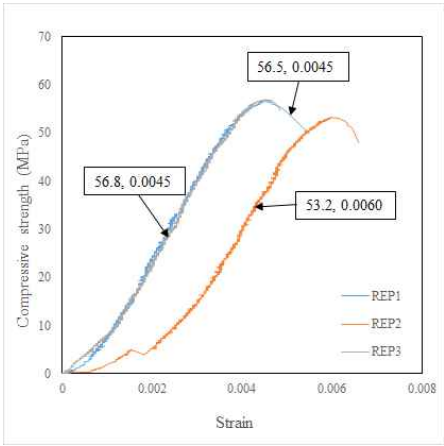
[그림 3.86] 28일 5μm-5% 응력-변형률



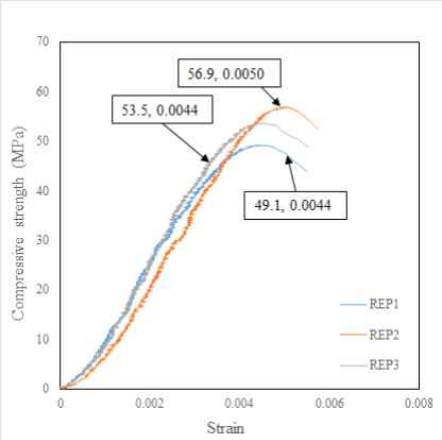
[그림 3.87] 28일 5μm-10% 응력-변형률



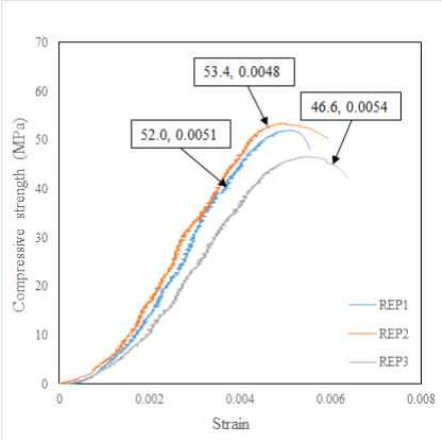
[그림 3.88] 28일 5μm-15% 응력-변형률



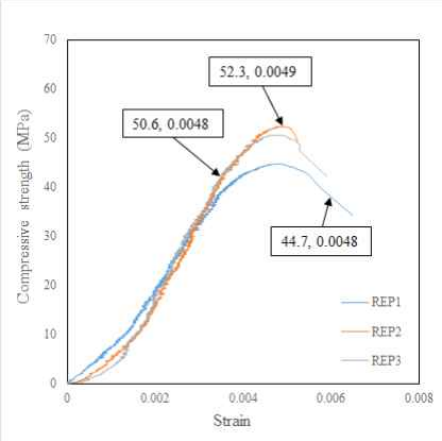
[그림 3.89] 28일 5μm-20% 응력-변형률



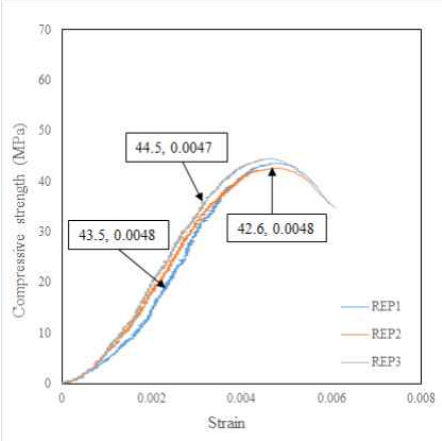
[그림 3.90] 28일 12μm-5% 응력-변형률



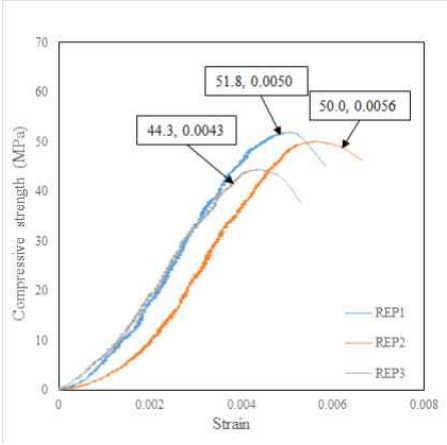
[그림 3.91] 28일 12μm-10% 응력-변형률



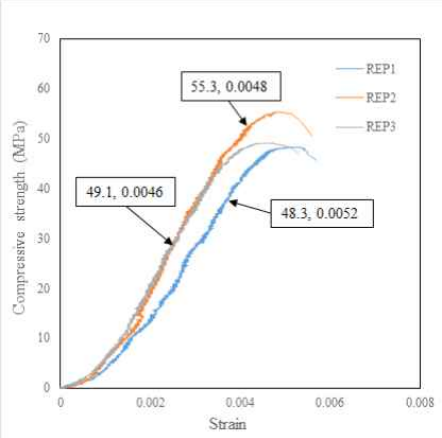
[그림 3.92] 28일 12μm-15% 응력-변형률



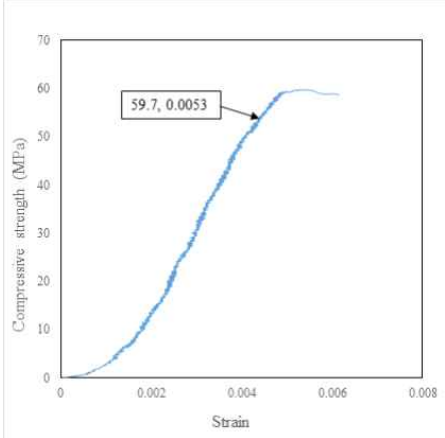
[그림 3.93] 28일 12μm-20% 응력-변형률



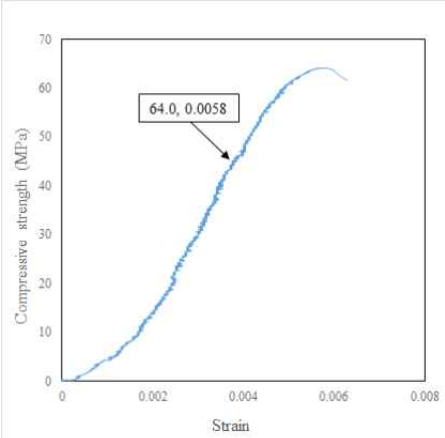
[그림 3.94] 56일 OPC 응력-변형률



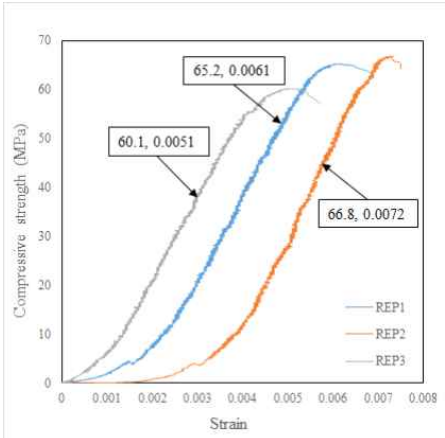
[그림 3.95] 56일 5μm-5% 응력-변형률



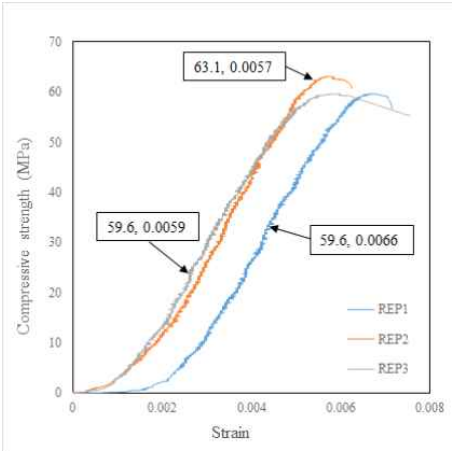
[그림 3.96] 56일 5μm-10% 응력-변형률



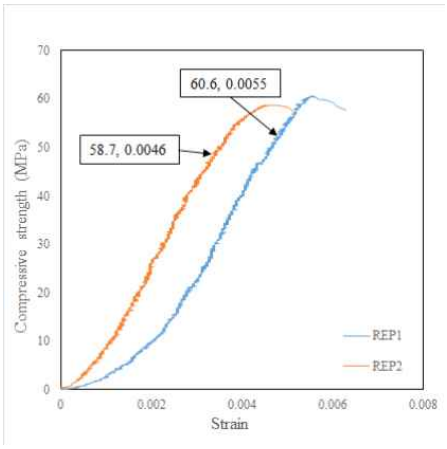
[그림 3.97] 56일 5μm-15% 응력-변형률



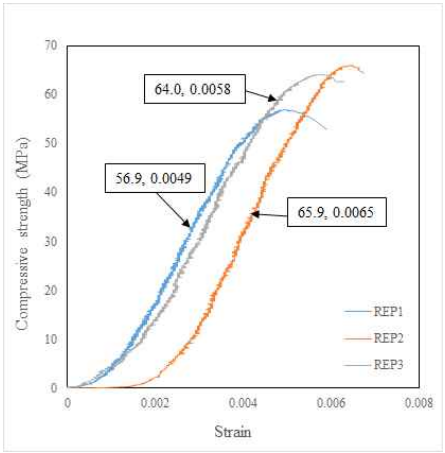
[그림 3.98] 56일 5μm-20% 응력-변형률



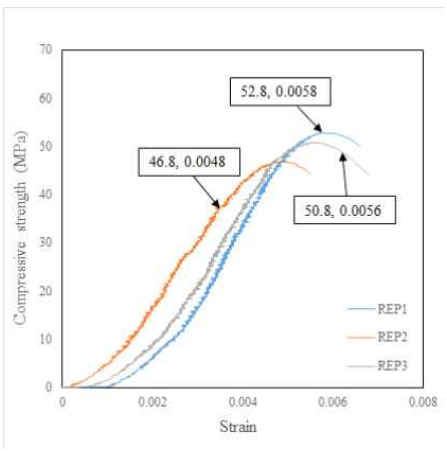
[그림 3.99] 56일 12μm-5% 응력-변형률



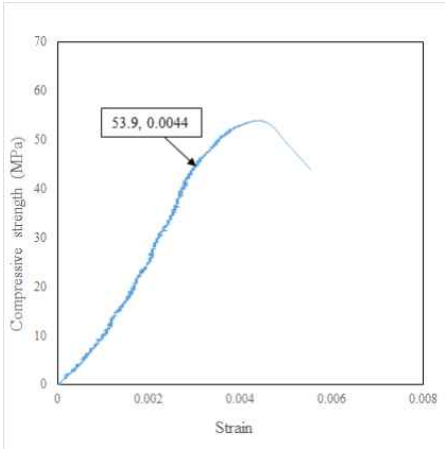
[그림 3.100] 56일 12μm-10% 응력-변형률



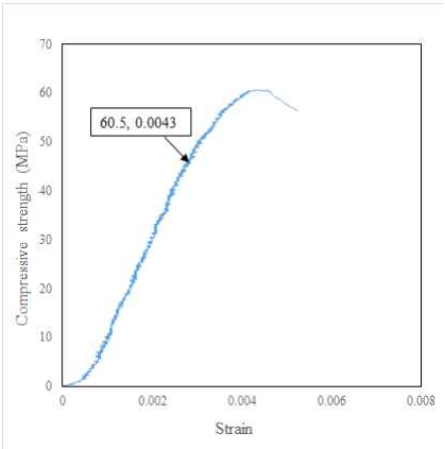
[그림 3.101] 56일 12μm-15% 응력-변형률



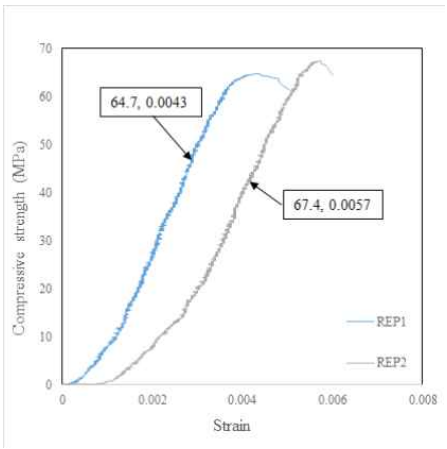
[그림 3.102] 56일 12μm-20% 응력-변형률



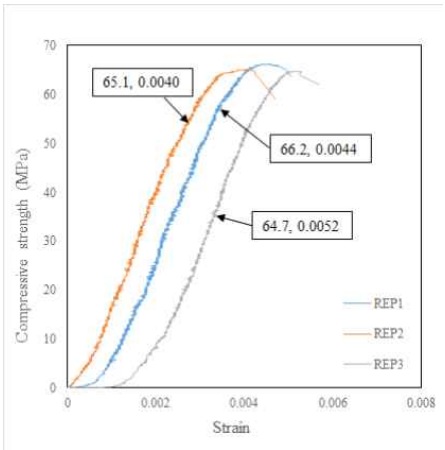
[그림 3.103] 91일 OPC 응력-변형률



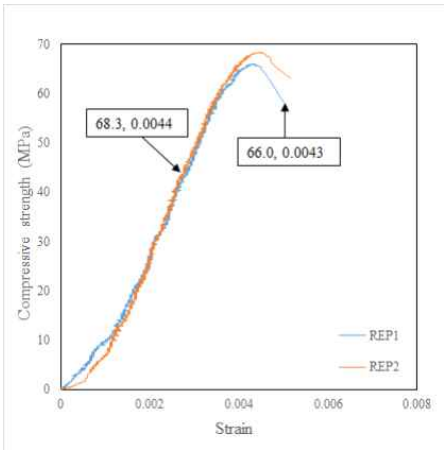
[그림 3.104] 91일 5μm-5% 응력-변형률



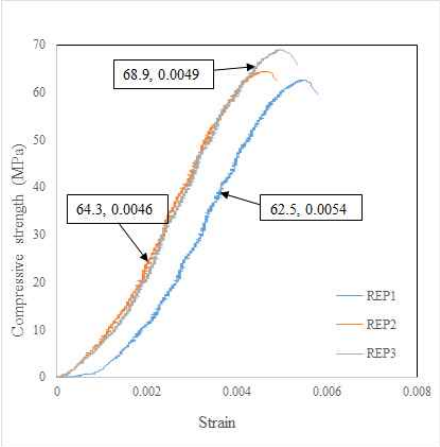
[그림 3.105] 91일 5μm-10% 응력-변형률



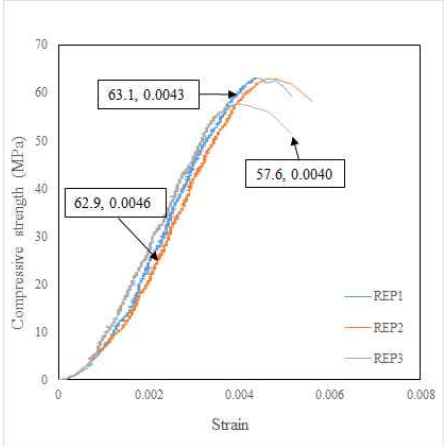
[그림 3.106] 91일 5μm-15% 응력-변형률



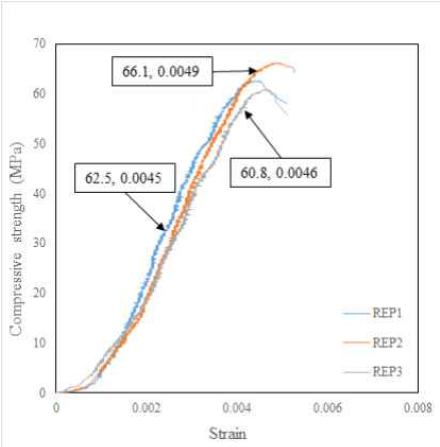
[그림 3.107] 91일 5μm-20% 응력-변형률



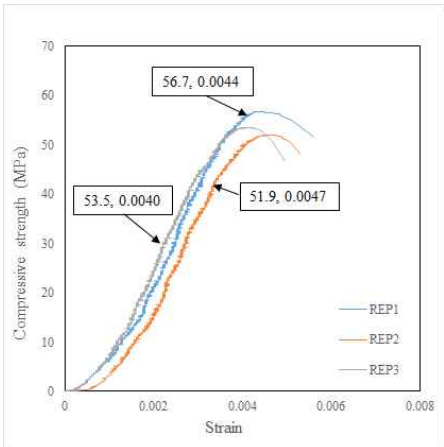
[그림 3.108] 91일 12μm-5% 응력-변형률



[그림 3.109] 91일 12μm-10% 응력-변형률



[그림 3.110] 91일 12μm-15% 응력-변형률



[그림 3.111] 91일 12μm-20% 응력-변형률

위와 같이 구한 응력-변형률을 평균으로 나타내어 표로 나타내면 아래의 [표 3.38]와 같다.

		OPC	5-5	5-10	5-15	5-20	12-5	12-10	12-15	12-20
Ave. Stress	7days	39.3	35.5	38.6	34.6	36.9	39.9	38.1	39.3	28.0
	28days	45.2	48.7	58.4	53.4	55.5	53.1	50.6	49.2	43.5
	56days	48.7	50.9	59.7	64.0	64.0	60.7	59.7	62.3	50.1
	91days	53.9	60.5	66.1	65.3	67.2	65.2	61.2	63.1	54.0
Ave. Strain	7days	0.0046	0.0046	0.0043	0.0049	0.0048	0.0051	0.0052	0.0047	0.0047
	28days	0.0043	0.0046	0.0053	0.0049	0.0050	0.0046	0.0051	0.0048	0.0047
	56days	0.0049	0.0048	0.0053	0.0058	0.0061	0.0060	0.0050	0.0057	0.0054
	91days	0.0044	0.0043	0.0050	0.0045	0.0043	0.0049	0.0043	0.0046	0.0043

[표 3.38] 응력-변형률 평균 비교표

3) 휨 강도

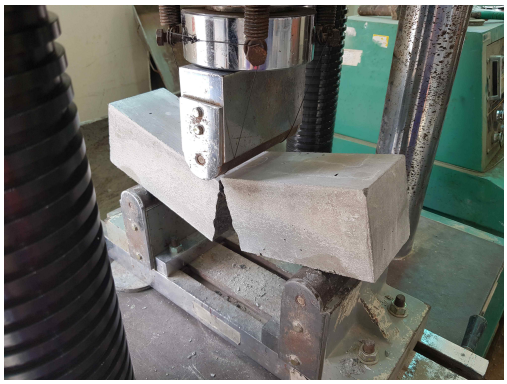
휨강도 시험은 KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법 규정에 따라 시편 100x100x400mm 각주형 시험체를 제작하였으며, 상온의 수조에서 재령 91일간 수중양생을 하였다. 그 후 KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험 방법에 의거하여 각 실험체의 휨 강도를 측정하였다.

4) 휨강도 결과

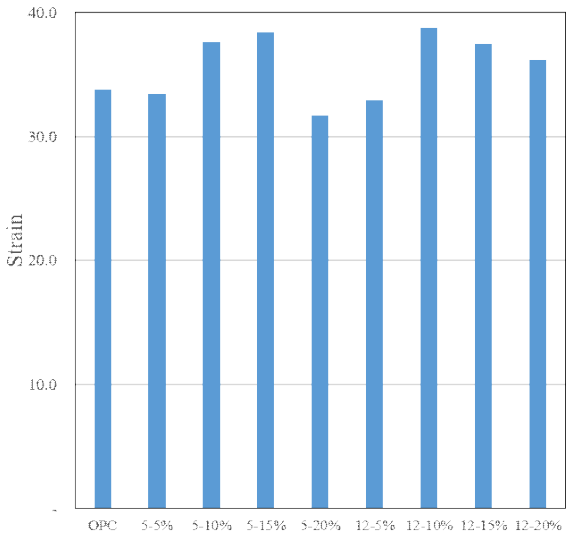
본 연구에서는 아래 [그림 3.112]와 같이 휨 강도 시험 장비를 사용하여 휨 강도를 측정하였으며 LCD 폐유리 미분말의 치환율 별 휨 강도 시험 결과는 아래 [그림 3.113]과 같다.



[그림 3.112] 휨 강도 시험 장비



[그림 3.113] 콘크리트 휨 강도 시험



[그림 3.114] 휨 강도 시험 결과

휨 강도 시험 결과 12μm 치환율 10%의 경우에서 38.8(kN)으로 가장 높은 강도가 측정되었고 5 μm 치환율 20%의 경우 31.7(kN)으로 가장 낮은 강도 값이 측정되었다.

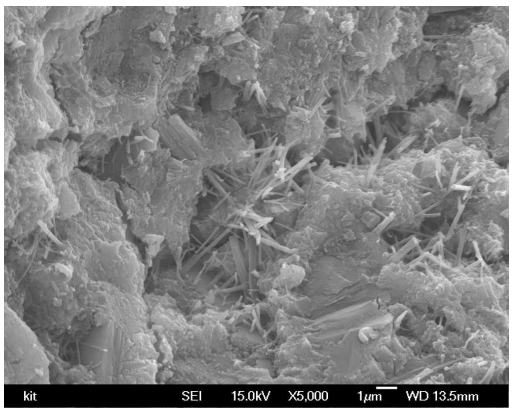
5) 미세 구조

본 연구에서는 LCD 폐유리 미분말이 혼입된 콘크리트의 치환율별 미세구조와 공극 분포 및 크기, 공극률 등을 측정하고자 재령 7일, 28일 시편의 SEM 촬영을 실시하고 공시체의 일부를 채취하여 24시간 건조로에서 건조 후 수은압입법(Mercury Instrusion Porosimetry)을 이용하여 채취한 시료의

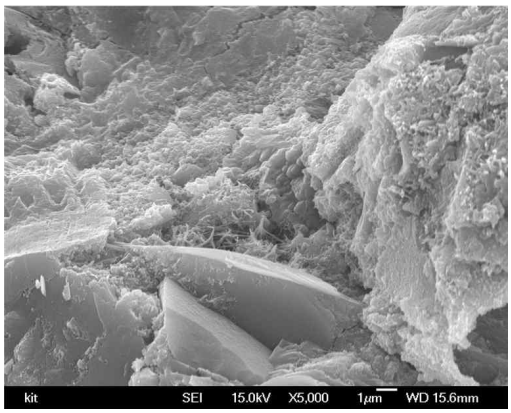
내부 공극량을 측정하였다. 시험에 사용된 장비는 Micromeritics Instruments의 제작사의 POROSIMETER 장비를 사용하여 최대압력 60,000 PSI, 기공 직경 0.003~360μm 내의 기공을 측정하였다.

6) 미세 구조결과

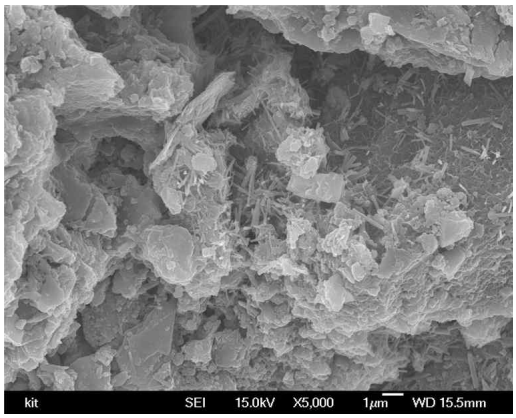
LCD 폐유리 미분말이 혼입된 콘크리트의 수화 과정에 따른 치환율별 미세구조 분석을 위해 재령 7일, 재령 28일 각 시편의 일부를 채취하여 SEM 촬영을 실시한 결과는 아래 [그림 3.115]와 같다.



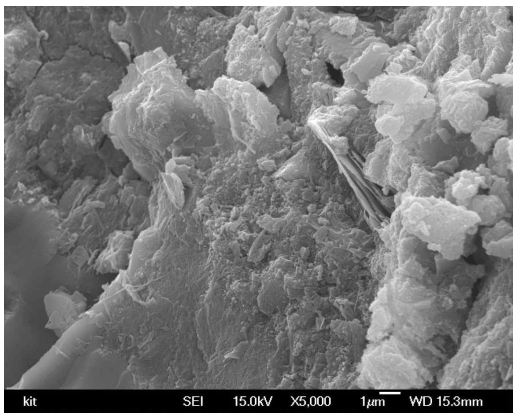
OPC 재령 7일(×5,000)



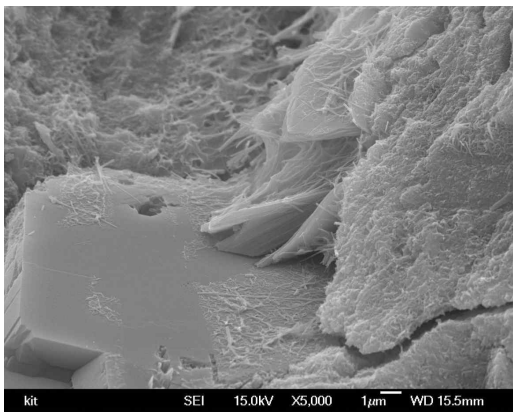
치환율 10% 재령 7일(×5,000)



치환율 20% 재령 7일(×5,000)



OPC 재령 28일(×5,000)



치환율 10% 재령 28일 (×5,000)



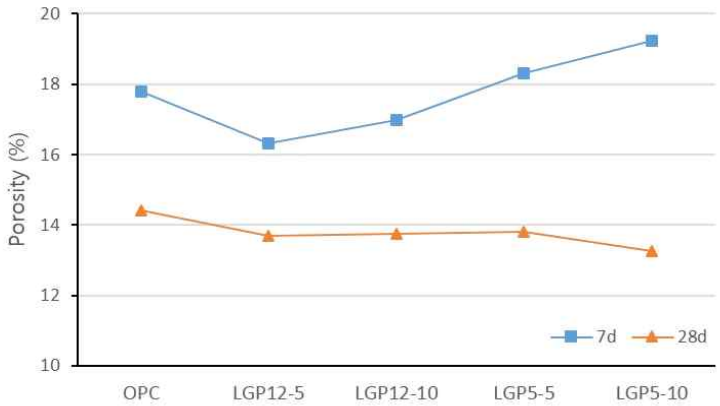
치환율 20% 재령 28일 (×5,000)

[그림 3.115] LCD 폐유리 미분말의 치환율별 SEM 촬영 결과

OPC 콘크리트와 치환율 10%, 20%를 비교해보면 재령 7일의 경우, OPC는 전형적인 모습으로 수화하여 규산칼슘수화물(C-S-H)과 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)수화물을 생성하고 있으며 짙은 색의 음영으로 표시되는 부분은 공극 상태를 나타낸다. 치환율이 증가함에 따라 LCD 폐유리 미분말에 의해 포졸

란 반응이 촉진되고 침상 구조를 비롯한 수화물이 보다 많이 생성됨을 확인할 수 있다. 재령 28일의 경우, OPC에 비해 LCD 폐유리 미분말이 혼입된 콘크리트가 수화상들이 발달하여 치밀한 구조를 보이고 있으며 이는 시멘트 구성 화합물이 수화할 때 생성된 Portlandite와 반응함으로써 불용성 칼슘 실리케이트 수화물(C-S-H gel)이나 칼슘알루미네이트 수화물(C-A-H gel)을 형성하기 때문인 것으로 사료된다.

일반적으로 시멘트 매트릭스의 공극분포는 수화량에 의존하며 이는 시멘트 내부 수화물에 의해 공극이 분산되기 때문이다. LCD 콘크리트의 공극량을 측정한 [그림 3.116]의 결과에 따르면 재령 7일, 5μm의 전체 공극량(porosity)은 OPC 17.79%, 5μm 치환율 5%의 경우 18.31%, 5μm 치환율 10%의 경우 19.23%로 OPC보다 높게 나타난다. 재령 28일의 경우 OPC 14.43%, 5μm 치환율 5%의 경우 13.79%, 5μm 치환율 10%의 경우 13.27%로 2.6%에서 6%까지 감소하는 경향을 보였다. 공극량의 감소는 내구성과 관련된 투과성에 영향을 준다. LCD 폐유리 미분말의 포졸란 반응 및 2차 수화반응으로 인해 생성된 C-S-H겔과 Hydrotalcite로 인해 2차 수화물과 $Ca(OH)_2$와의 사이 공극인 Macro 공극은 감소되고, 그에 따른 Micro겔 공극은 증가되어 전체 공극률 또한 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 공극량의 감소는 강도와도 관련이 있는데 일반적으로 포졸란 반응은 OPC의 시멘트 수화반응에 비해 상대적으로 느리기 때문에, 시멘트의 일정부분을 포졸란 물질로 대체한 경화체는 초기에는 높은 투과성을 보이지만, 반응이 진행됨에 따라 투과성이 감소한다. 따라서, LCD 폐유리 미분말의 첨가로 인하여 액상과 기상의 투과성은 감소되어 내구성 향상에 기여할 수 있다고 판단된다.

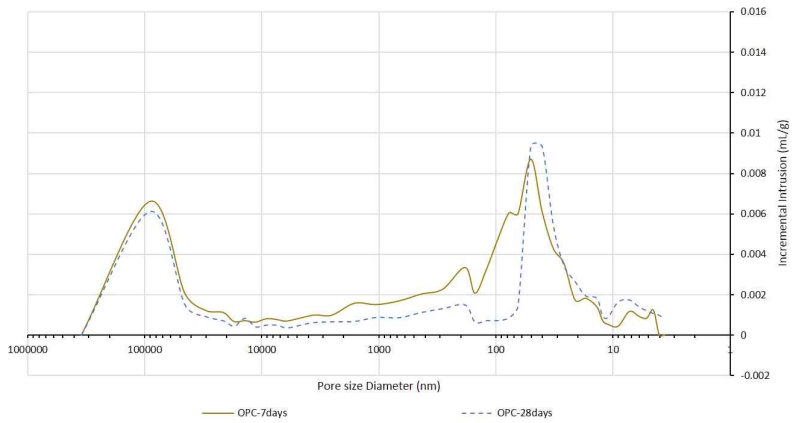


[그림 3.116] LCD 혼입 콘크리트의 공극 특성

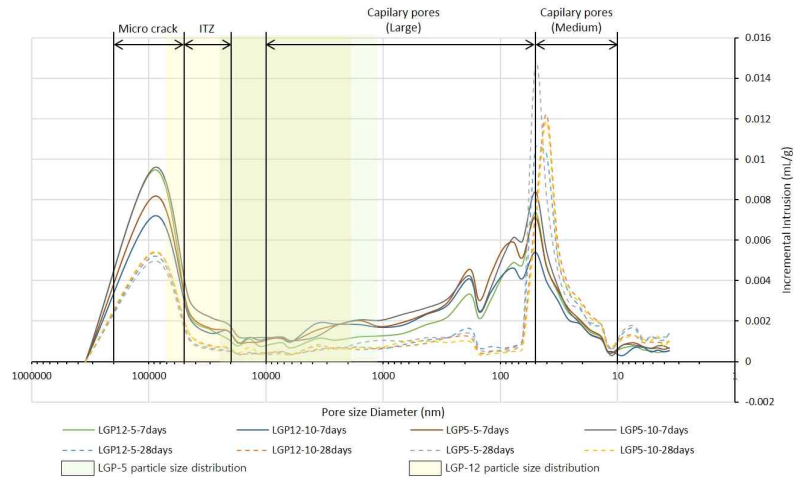
	Average pore diameter(nm)	
	7 days	28 days
OPC	17.7926	14.4250
5μm -5%	18.3079	13.7930
5μm -10%	19.2284	13.2687
12μm -5%	16.3242	13.6883
12μm -10%	16.9954	13.7393

[표 3.39] 재령별 LCD 미분말 혼입 콘크리트 평균 공극 직경

[표 3.39]는 재령별 LCD 폐유리 미분말 혼입 콘크리트의 평균 공극 직경을 나타낸 것이며 [그림 3.117]과 [그림 3.118]의 그래프는 X축은 공극의 직경이며, Y축은 공극의 양을 나타낸 그래프이다. LCD 폐유리 미분말 혼입 콘크리트의 재령이 경과함에 따라, 수화반응과 포졸란의 2차 반응 진행으로 모세공극 범위를 제외한 전 구간에 대해 모세관 공극량이 감소하고 최대 공극 직경 또한 작아지게 된다. 공극의 감소는 특히 50~110nm 범위에서 크게 나타났다. LCD의 입도분포와 함께 고려했을 때 이 구간의 공극감소는 단순한 LCD의 공극 충진 효과라 보기 어렵다. 이는 시멘트페이스트가 충분히 수화되어 생성된 수화물이 치밀한 조직으로 발전되어 연결된 모세관 내부를 차단하고 분할하여 겔공극만으로 연결된 공극을 만들어 강도를 상당부분 증진하게 한 것으로 보여진다. 특히 재령 28일 LCD 미분말 혼입 콘크리트의 경우, 4~50nm 구간의 겔공극을 포함하는 모세공극 범위에서 재령 7일에 비교하여 높은 공극량 증가를 보이고 있다. 전반적으로 크기가 큰 공극량은 줄어들고 50nm 이하 크기의 모세공극의 양은 OPC보다 소량 증가하였다. 이러한 현상은 모세공극 범위에서 실제 LCD 입자의 팩킹과 함께 포졸란 반응에 의한 수화물 생성으로 상대적으로 큰 모세공극 구조를 채우거나 공극을 분할함으로서 연결된 공극에서 닫힌 공극으로 전이된 것으로 판단된다.



[그림 3.117] OPC 콘크리트의 공극분포 곡선



[그림 3.118] LCD 혼입 콘크리트의 치환율별 공극분포 곡선

또한, 공극 직경 50~200nm의 범위(ITZ)에서 LCD 미분말 혼입 콘크리트의 공극량 크기가 재령 28일에 상당부분 감소하였다. 이 구간의 공극 특성은 콘크리트 배합 시 AE제에 의해 혼입된 연행공

기가 LCD와 함께 수화되며 감소한 것으로 판단된다. [그림 3.117]의 OPC 콘크리트 공극분포를 보면 재령 7일과 재령 28일 구간에서 감소량은 크지 않다. 그러나 [그림 3.118]을 보면 이 구간에서 모든 LCD 미분말 혼입 콘크리트의 공극량이 눈에 띄게 감소함을 확인할 수 있다. 이는 시간이 지남에 따라 생성된 수화물이 공극을 밀실하게 만들어 강도 증진으로 이어진 것으로 판단된다. 이러한 원인의 가장 큰 요소는 미세입자의 밀실한 충진(팩킹)과 수화물 생성으로 인한 성능변화로 콘크리트 LCD 재료의 혼입이 콘크리트 시스템의 공극률 감소, 매트릭스의 밀도를 증가시키고, 강도를 발현시키는 것으로 판단된다.

7) 황산염 침투 저항성

황산에 노출된 콘크리트 구조물의 화학적 저항성을 평가하는 것은 내구성능 측면에서 중요한 부분이며, 이러한 열화현상에 노출된 환경으로는 해양, 하수관거, 지하구조물 등 각 환경마다 주로 존재하는 다양한 황산염에 의해 콘크리트 내부 및 표면으로부터 침식이 일어날 수 있다. 특히, 황산에 의한 콘크리트의 침식은 산에 의해 시멘트 수화조직이 손실되는 연화작용과 시멘트 수화생성물과 황산 성분의 이차반응을 통한 팽창현상에 따라 콘크리트 균열 및 이에 따른 추가적인 유해인자 침투 촉진으로 콘크리트의 심각한 열화현상을 야기한다.

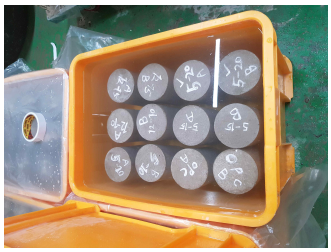
본 연구에서는 황산염에 의한 콘크리트 화학저항성 시험으로 ASTM C 267(Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacings and Polymer Concretes)에 따라 시험하였다. KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법 규정에 따라 시편 Φ100×200mm 원주형 공시체를 제작하였으며, 상온의 수조에서 재령 91일간 수중양생을 하였다. 규정에 따라 먼저 5% 황산마그네슘 용액을 제조하였고 침지 후 재령 0일, 10일, 30일, 50일의 중량 변화율을 측정하였으며 각각에 대해서 압축강도를 측정하여 비교 분석하였다. 또한, 실험에 사용된 용액은 증발에 의한 수분의 손실 등의 요인을 고려하여 침지 재령 30일에 새로운 용액으로 교체해주었다.

8) 황산염 침투저항성 결과

본 연구에서는 아래 [그림 3.119], [그림 3.120]과 같이 제작한 원주형 공시체를 5% 황산마그네슘($MgSO_4$) 용액에 침지시켜 침지 재령 0일, 10일, 30일, 50일 각각의 중량 변화와 압축강도를 측정하였다.



[그림 3.119] 황산염 침지 모습



[그림 3.120] 황산염 침지 모습

가) 중량 변화

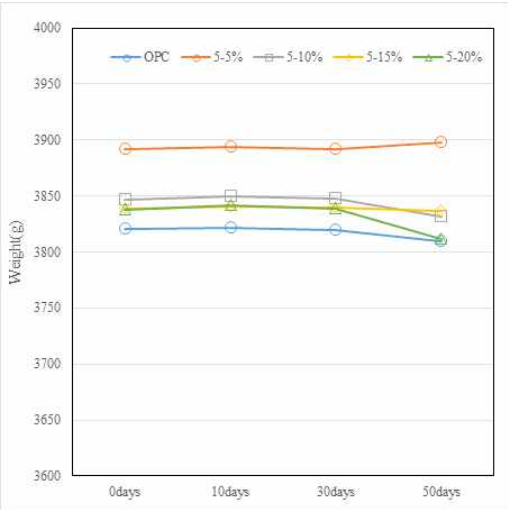
아래 [그림 3.123]과 같이 침지 재령 0일, 10일, 30일, 50일의 각 원주형 공시체를 그램(g)단위 저울을 이용하여 공시체 표면의 수분 제거 후 중량을 측정하여 비교하였다.



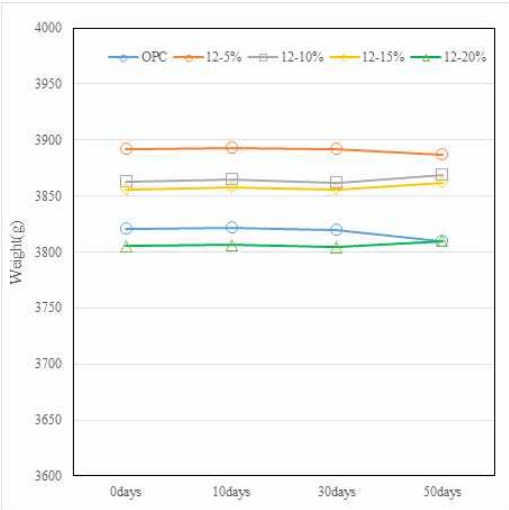
[그림 3.121] 중량 측정 공시체



[그림 3.123] 중량 측정 모습



[그림 3.124] OPC와 5um 중량변화



[그림 3.125] OPC와 12um 중량변화

침지 당일과 비교하여 재령 10일에는 전체적으로 중량이 증가하였다. 이러한 중량 변화는 시멘트 수화물과 황산이온이 반응하여 석고를 생성하고, 이러한 석고의 일부는 C_3A와 반응해 다시 Ettringite가 생성되어 조직이 팽창함으로써 콘크리트의 공극을 치밀하게 하므로, 침지재령 초기에 중량이 증가하는 것으로 판단된다.

이어 침지재령이 증가함에 따라 재령 30일 결과를 보면 황산마그네슘 용액이 규산칼슘수화물(C-S-H)의 석회질을 제거하여 규산칼슘수화물이 부분적으로 파괴되었기 때문에 콘크리트의 내부 조직이 화학적 침식을 받아 질량이 전반적으로 감소된 것으로 판단된다.

재령에 따라 분석한 OPC 콘크리트의 중량 변화율은 LCD 폐유리 미분말이 혼입된 콘크리트보다 작아 OPC 콘크리트가 황산 용액에 대한 저항성이 우수한 것으로 보인다. 이는 OPC 콘크리트보다 LCD 폐유리 미분말 속에 포함된 실리카(SiO_2) 성분이 규산칼슘수화물의 분해작용을 가속화시키기 때문인 것으로 판단된다.

나) 압축 강도

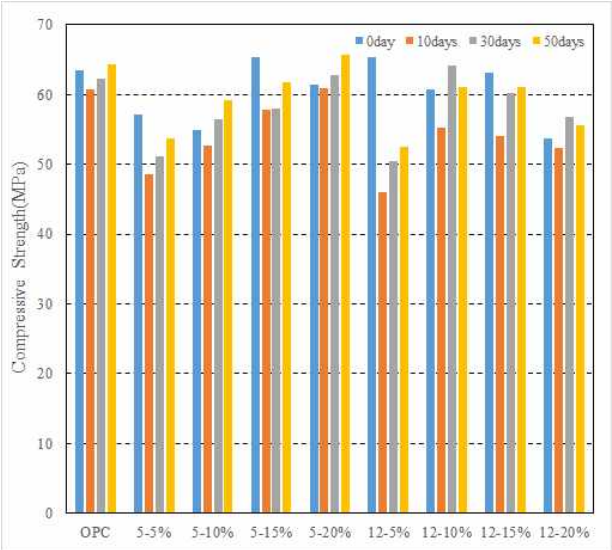
본 연구에서는 [그림 3.126]과 같이 압축강도 시험장비를 사용하였으며 LCD 폐유리 미분말이 혼입된 콘크리트의 황산염 침지 재령에 따른 압축강도 시험 결과는 아래의 [그림 3.128]에 나타냈다.



[그림 3.126] 압축강도 시험장비



[그림 3.127] 압축강도 시험 모습



[그림 3.128] 황산염 침지 압축강도 시험결과

5% 황산마그네슘($MgSO_4$) 용액에 침지시킨 콘크리트 공시체의 압축강도를 재령별로 측정 및 분석한 결과, 침지 재령 10일의 경우 전반적으로 압축강도가 감소하는 경향을 보였으며 이후 재령이 지남에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한, LCD 폐유리 미분말이 혼입된 콘크리트가 OPC 콘크리트보다 압축강도 감소율이 큰 것으로 나타났다. 이는 황산마그네슘이 수산화칼슘과 반응한 후 규산칼슘수화물(C-S-H)을 분해하는데, 이 때 LCD 폐유리 미분말에 포함된 실리카 성분이 규산칼슘수화물의 분해 작용을 가속화시키기 때문인 것으로 판단된다.

LCD 폐유리를 혼입한 공시체의 황산염 저항성을 평가한 결과, 황산마그네슘은 장기간에 걸쳐 구조물에 작용하며 강도감소에 있어서 OPC 콘크리트가 LCD 폐유리 미분말이 혼입된 콘크리트에 비해 강도 감소율이 작은 것으로 나타났다.

9) 동결융해 저항성

동결융해 시험은 KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법 규정에 따라 시편 100x100x400mm의 각주형 시험체를 제작하였으며, KS F 2456 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법의 A법인 수중 급속 동결 융해 시험방법 규정에 따라 시험이 시작되기 전까지 상온의 수조에서 91일간 수중양생을 하였다. 동결융해 시험은 2주 간격으로 총 8주간 100cycle(4시간 이하로 중심부의 온도를 기준으로 하여 4℃에서 -18℃로 떨어지고, -18℃에서 4℃로 다시 되돌아오는 것이 1cycle이다)을 주기로 300cycle까지 각 cycle에 대한 공명진동에 의한 콘크리트 1차 공명 진동수(Hz)를 측정하여 다음과 같은 식(4.4)를 사용하여 각 cycle의 상대동탄성계수를 산출하였다.

$$P_c = \left(\frac{n_c^2}{n_0^2} \right) \times 100$$

여기서 P_c는 상대동탄성계수(%)를 나타내며, n_0은 동결융해 0 cycle에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz), n_c는 각 cycle에 해당하는 진동의 1차 공명 진동수(Hz)이다.

10) 동결융해 저항성 결과

LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 치환율별 동결융해 저항성 시험결과는 아래 [표 3.40], [표 3.41]와 같다.

진동주파수(Hz)	OPC	5μm -5%	5μm -10%	5μm -15%	5μm -20%
0cycle	2439.5	2568.5	2479	2476.5	2507
100cycle	2421.5	2486	2388.5	2471	2476
200cycle	1891.5	2455.5	2206	2458.5	2473.5
300cycle	1650.5	2494.5	1994.5	2472	2511.5

[표 3.40] Cycle별 진동주파수(5μm)

진동주파수(Hz)	OPC	12μm -5%	12μm -10%	12μm -15%	12μm -20%
0cycle	2439.5	2444.5	2435.5	2438.5	2497.5
100cycle	2421.5	2450.5	2420	2432	2422.5
200cycle	1891.5	2428.5	2402.5	2417	2391
300cycle	1650.5	2419	2421.5	2420	2372.5

[표 3.41] Cycle별 진동주파수(12μm)

이를 이용해 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 치환율별 상대동탄성계수 측정 결과 [표 3.42], [표 3.43]과 같이 나타났으며 이를 각 비교한 결과를 아래 [그림 3.129], [그림 3.130]과 같이 나타내었다. 이를 고찰하여 보면, 300사이클에서의 상대동탄성계수는 5μm의 경우 혼입률이 5%,

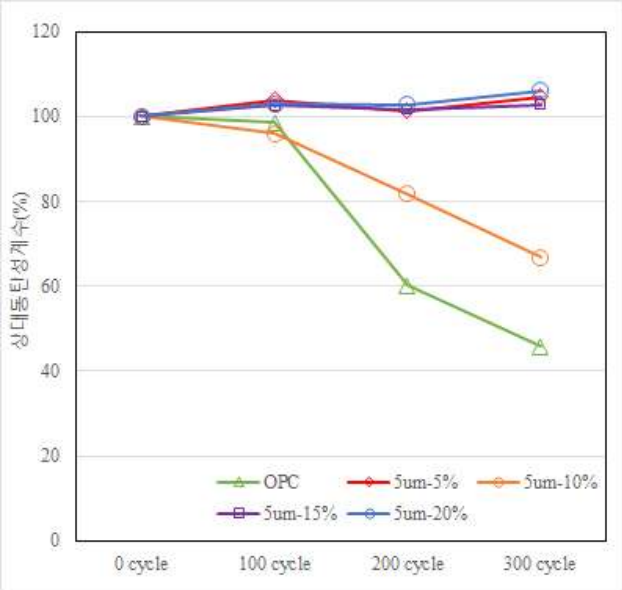
10%, 15%, 20%로 증가함에 따라, OPC의 상대동탄성계수에 비하여 128.4%, 46.0%, 124.3%, 131.5% 높은 값을 보였다. 12μm의 경우 혼입률이 5%, 10%, 15%, 20%로 증가함에 따라, OPC의 상대동탄성계수에 비하여 114.8%, 115.2%, 115.0%, 106.6% 높은 값을 보였고 이는 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트가 일반 콘크리트에 비해 내동해성에 효과가 있는 것으로 판단된다.

진동주파수(Hz)	OPC	5μm -5%	5μm -10%	5μm -15%	5μm -20%
0cycle	100	100	100	100	100
100cycle	98.53	103.85	95.86	102.60	103.01
200cycle	60.12	101.32	81.77	101.56	102.81
300cycle	45.78	104.56	66.84	102.68	105.99

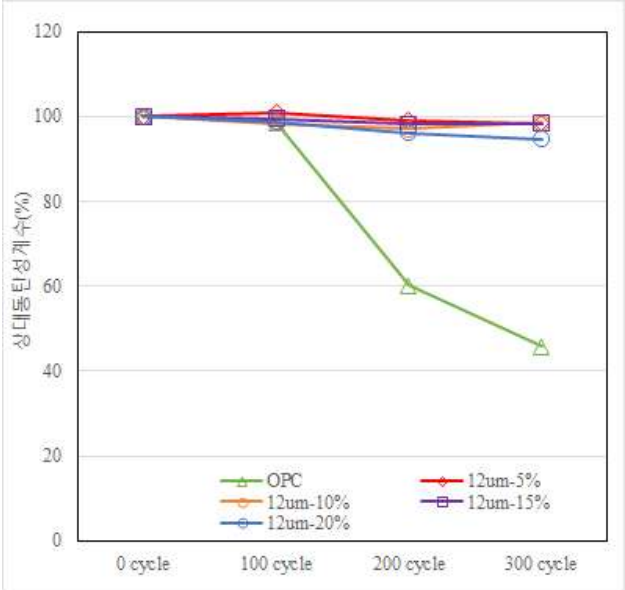
[표 3.42] Cycle별 상대동탄성계수(%) (5μm)

진동주파수(Hz)	OPC	12μm -5%	12μm -10%	12μm -15%	12μm -20%
0cycle	100	100	100	100	100
100cycle	98.53	100.90	98.41	99.39	98.61
200cycle	60.12	99.10	96.99	98.16	96.06
300cycle	45.78	98.33	98.53	98.41	94.58

[표 3.43] Cycle별 상대동탄성계수(%) (12μm)



[그림 3.129] 콘크리트의 상대동탄성계수 변화(5μm)



[그림 3.130] 콘크리트의 상대동탄성계수 변화(12μm)

11) 탄산화 저항성

급속 탄산화시험은 KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법 규정에 따라 시편 Φ100×200mm 원주형 공시체를 제작하였다. 그 후 시험이 시작되기 전까지 규정에 따라 항온•항습실에 재령 8주까지 정치하였다. 그 후 시편을 콘크리트 전기커터로 Φ100×50mm으로 시편을 절단한 뒤, 각 옆면을 에폭시로 코팅하였다. KS F 2584 콘크리트의 촉진 탄산화 시험방법 규정에 따라 실험을 진행하고, KS F 2596 콘크리트 탄산화 깊이 측정방법 규정에 따라 2주 간격으로 2주, 4주, 6주, 8주의 탄산화 깊이를 측정하였다. 탄산화 깊이의 측정은 페놀프탈레인법에 의하여 실시하였으며, 페놀프탈레인법이란 1% 페놀프탈레인 용액을 pH지시약으로 사용하여 탄산화 깊이를 알아보는 시험으로 콘크리트의 알칼리 부분, 즉 비탄산화 구역은 분홍색, 탄산화가 진행된 부분은 무색을 띄어 이를 통해 탄산화 깊이를 알아보는 시험이다.



[그림 3.131] 공시체 절단 과정



[그림 3.132] 절단된 공시체의 모습



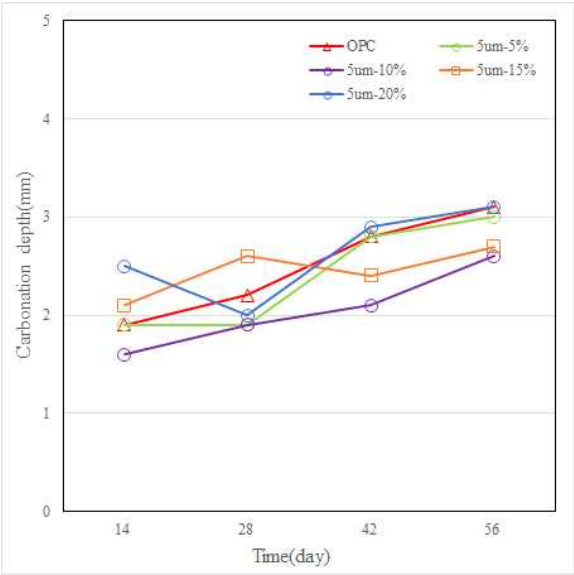
[그림 3.133] 에폭시 코팅 과정



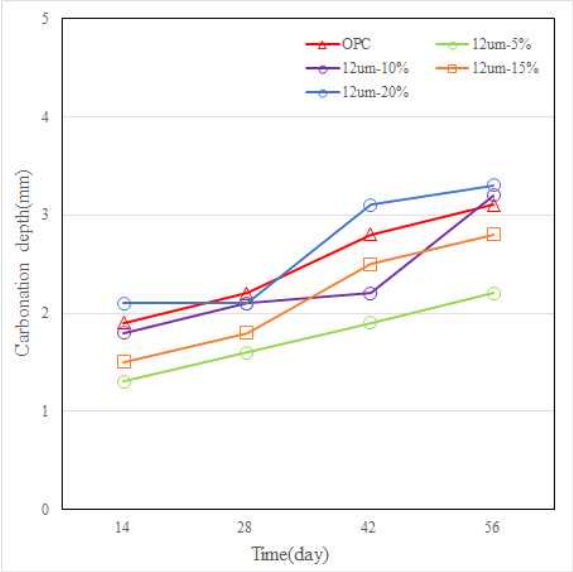
[그림 3.134] 탄산화 깊이 측정 모습

12) 탄산화 저항성 결과

본 연구에서는 약 5cm 간격으로 절단된 원주형 공시체를 침투 방향(일방향 침투)을 제외한 나머지 부분에 에폭시 코팅을 실시하여, 탄산화 촉진 시험기에 거치 후 이산화탄소의 유입을 강제적으로 가하였다. 그 이후 시편에 대해 페놀프탈레인 용액을 이용하여 변색이 발생하는 부위에 대해 탄산화 깊이로 정의하였다. [그림 3.135], [그림 3.136]은 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 각 치환율에 따른 재령별 탄산화 깊이 측정 결과를 나타낸 것으로 2주, 4주, 6주, 8주 동안 2주 간격으로 측정하였다.



[그림 3.135] LCD 혼입 콘크리트 탄산화 깊이($5\mu m$)



[그림 3.136] LCD 혼입 콘크리트 탄산화 깊이($12\mu m$)

[그림 3.135]를 보면 2주 경과 된 콘크리트의 탄산화 깊이는 $5\mu m$의 경우 혼입율에 따라 0%일 때 1.9mm, 5%일 때 1.9mm, 10%일 때 1.6mm, 15%일 때 2.1mm, 20%일 때 2.5mm로 나타났다. $12\mu m$의 경우 0%일 때 1.9mm, 5%일 때 1.3mm, 10%일 때 1.8mm, 20%일 때 2.1mm로 나타났다. 8주 경과 된 콘크리트는 $5\mu m$의 경우 혼입율에 따라 0%일 때 3.1mm, 5%일 때 3.0mm, 10%일 때 2.6mm, 15%일 때 2.7mm, 20%일 때 3.1mm로 나타났으며 $12\mu m$의 경우 0%일 때 3.1mm, 5%일 때, 2.2mm, 10%일 때 3.2mm, 15%일 때 2.8mm, 20%일 때 3.3mm로 나타났다. 이 둘을 각 비교했을 때 8주차의 OPC의 탄산화 깊이는 2주차에 비해 약 63% 증가하였으며, $5\mu m$의 LCD 폐유리 미분말을 5% 혼입한 경우 약 57%, 10% 혼입한 경우 약 62%, 15% 혼입한 경우 약 28%, 20% 혼입한 경우 약 24% 증가하였다. 또한, $12\mu m$의 LCD 폐유리 미분말을 5% 혼입한 경우 약 69%, 10% 혼입한 경우 약 77%, 15% 혼입한 경우 약 86%, 20% 혼입한 경우 약 57% 증가하였다. 이러한 결과 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 경우 전반적으로 탄산화 깊이가 증가함을 보여주고 있다. 일반적으로 포졸란 재료를 혼입한 경우 포졸란 반응에 의한 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)의 소비로 탄산화가 촉진되는 경향이 나타나지만 이 때 발생되는 생성물에 의해 공극구조가 치밀해져 외부로부터의 이산화탄소 침입이 억제되어 전체적으로는 포졸란 재료를 혼입한 경우에도 탄산화에 미치는 영향이 크지 않다.



(a) OPC (b) 5μm -10% (c) 12μm -10%

[그림 3.137] 탄산화 시편의 절단면 (14days)



(a) OPC (b) 5μm -10% (c) 12μm -10%

[그림 3.138] 탄산화 시편의 절단면 (28days)



(a) OPC (b) 5μm -10% (c) 12μm -10%

[그림 3.139] 탄산화 시편의 절단면 (42days)



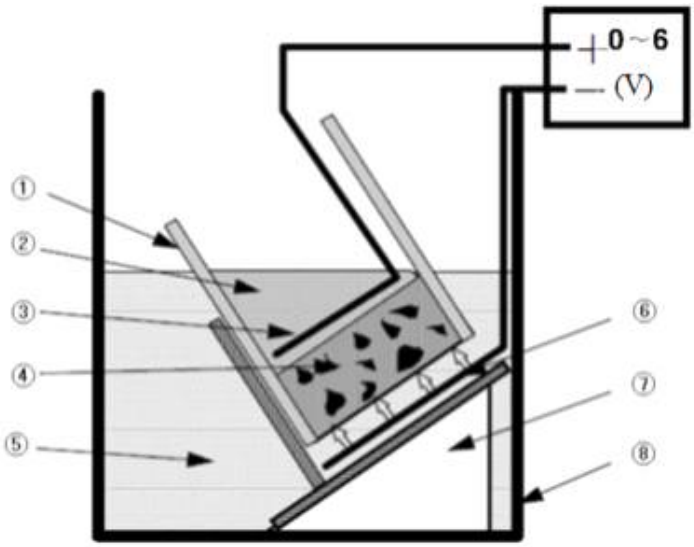
(a) OPC (b) 5μm -10% (c) 12μm -10%

[그림 3.140] 탄산화 시편의 절단면 (56days)

13) 염화물 확산 시험

가) 전위차에 의한 염소이온 확산 특성 (NT Build 492)

LCD 폐유리 미분말을 사용한 콘크리트의 염분침투 저항성을 정량평가하기 위해 북유럽에서 규정된 NT BUILD 492 (Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials)에 따라 염화물확산계수시험을 수행하였다. 이 시험은 염소이온(Cl^-)이 콘크리트 내부로 침투 시 발생되는 저항 및 침투깊이를 활용하여 콘크리트의 염소이온 확산계수를 결정하는 시험법이다. [그림 3.141]과 같이 확산 셀 장치를 활용하여 음극 셀(-)에는 10% 염화나트륨(NaCl) 용액을 충전하였고 양극 셀(+)에는 0.3M 수산화나트륨(NaOH) 용액을 충전하였다. 이후 콘크리트 시편 양단에 인위적으로 전류를 부가함으로써 콘크리트 내 염분이동을 유발시키며 특정 시간동안 침투된 염수의 이동깊이를 주 변수로 이용하여 확산계수를 결정하는 시험이다.



① 시편 봉합제	② 양극액 (0.3N NaOH)	③ 양극판	④ 시편
⑤ 음극액 (10% NaCl)	⑥ 음극판	⑦ 시편 받침대	⑧ 음극액 저장용기

[그림 3.141] 염화물확산계수시험법 (NT Build 492) 모식도

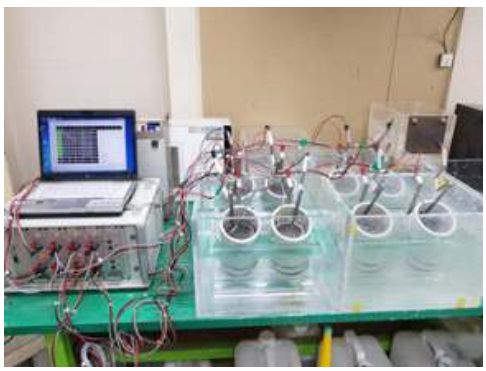
LCD 폐유리 미분말 콘크리트의 염분침투 저항성을 정량평가하기 위해 28일 양생시킨 원주형 시편을 대상으로 염화물확산계수 시험을 수행하였다. 약 50mm 높이의 원주형 시편을 얻기 위해 콘크리트 슬라이서를 사용하여 실린더 몰드 형태의 시편을 절단하였으며 일방향 침투를 유도하기 위해 양 끝 면을 제외한 나머지 부분에 [그림 3.9]와 같이 에폭시코팅제를 도포하였다.





[그림 3.142] 시편 전처리 과정 (NT Build 492)

이후 [그림 3.143a]와 같이 전원 공급 장치와 시편을 결합한 음극액과 양극액에 각각 전선을 연결하고 전류공급을 유도하였으며 각 채널마다의 전류, 전압, 온도를 실시간으로 모니터링 하였다. 시편에 6시간동안 초기전압 30V를 가하였으며 수용액의 온도범위를 7.4~8.5℃인 상태로 유지하였다. 전기를 가한 후 얻어진 샘플에 대해 [그림 3.143b]와 같이 침투방향에 대해 절단 후 질산은 용액($AgNO_3$)을 이용하여 염소이온의 침투단면에 침전 색을 입힌다.





(a) 염화물확산계수시험 전경 (b) 질산은 침전

[그림 3.143] 염화물확산계수시험 전경 및 질산은 침전

이후 슬라이드 캐필러를 통해 각각의 침투깊이의 길이를 측정한다. 이때 측정 깊이 간격은 약 10mm로 둔다. 여기서 골재를 포함한 깊이는 계산과정에서 제외하며 양 외각으로부터 10mm 간격에서는 시편의 불균일성에 의해 계산과정에서 제외한다.

염화물확산계수시험 이후 각 배합 별 파라미터 및 시편단면의 10개의 종 방향에 해당하는 염수침투 깊이를 측정하고 이들의 평균값을 이용하여 해당 시편의 확산계수를 다음 [식 3.1]을 이용하여 산정하였다.

$$D_{rcm} = \frac{RTL}{zFU}\frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t}$$ [식 3.1]

여기서 D_{rcm} = 비정상상태 하 염소이온 확산계수 (m^2/s)

R = 기체상수 (=8.314J/(mol·V)

T = 절대온도 (K)

L = 시편두께 (m)

z = 이온의 전자가 (염소이온일 경우 $z=1$)

F = 패러데이 상수 (=96,480J/(mol·V)

U = 확산셀의 전압차 (V)

x_d = 비색법에 의한 염소이온 침투깊이 (m)

t = 전위차 적용시간 (s)

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}}\,erf^{-1}\left[1-\frac{2C_d}{C_0}\right]$$

erf^{-1} = 오차함수의 역함수

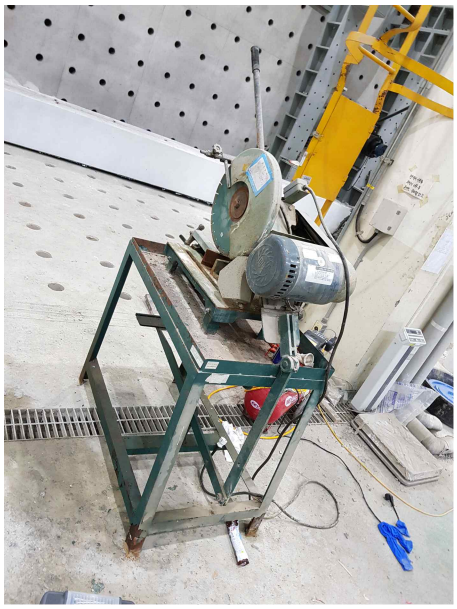
C_0 = 음극셀의 염소이온 농도 (N)

C_d = 비색법에 의한 반응 농도 (N)

나) 비정상상태에서의 염소이온 측정법 (NT Build 443)

LCD 폐유리 미분말을 사용한 모르타르의 염소이온 침투 저항성을 평가하기 위하여 북유럽에서 규정화된 NT BUILD 443 (Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration)에 따라 염화물 확산계수시험을 수행하였다. 이 시험은 일정한 염분 환경에서 35일간 노출시킨 후 콘크리트 표면을 깊이 별로 프로파일링 하여 침투깊이별 염화물 농도를 측정하고 이를 이용하여 확산계수를 결정하는 시험법이다.

콘크리트 시편은 실린더 몰드 형태의 공시체에 슬라이서를 사용하여 원주형 공시체를 50mm의 두께로 절단하였다. 이를 28일간 표준양생을 실시하고 측면과 하단 면에 [그림 3.144b]와 같이 에폭시 코팅제를 도포 하였다.



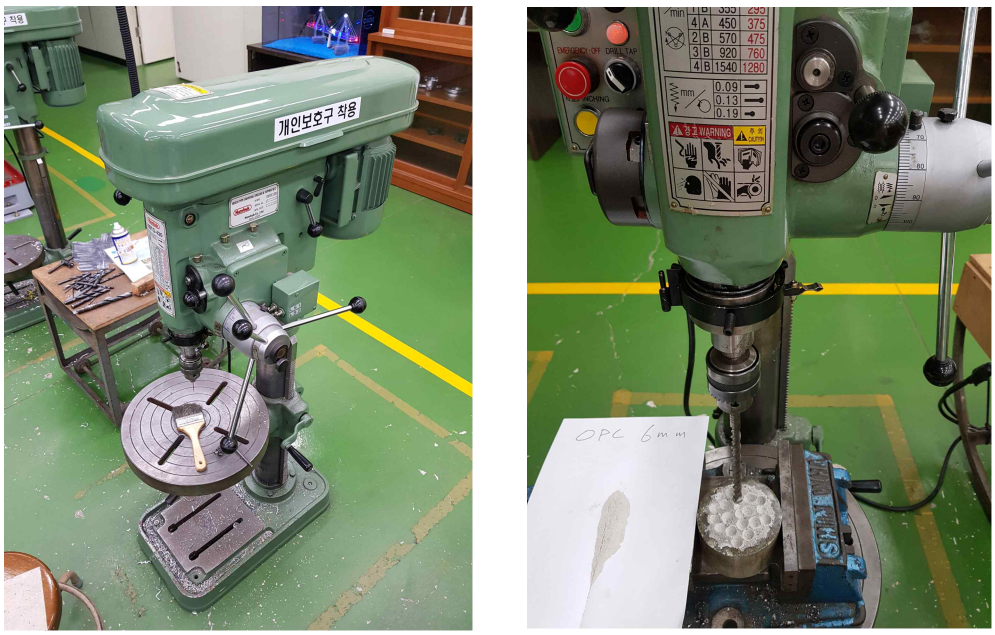
(a) 콘크리트 슬라이서



(b) 에폭시 코팅제

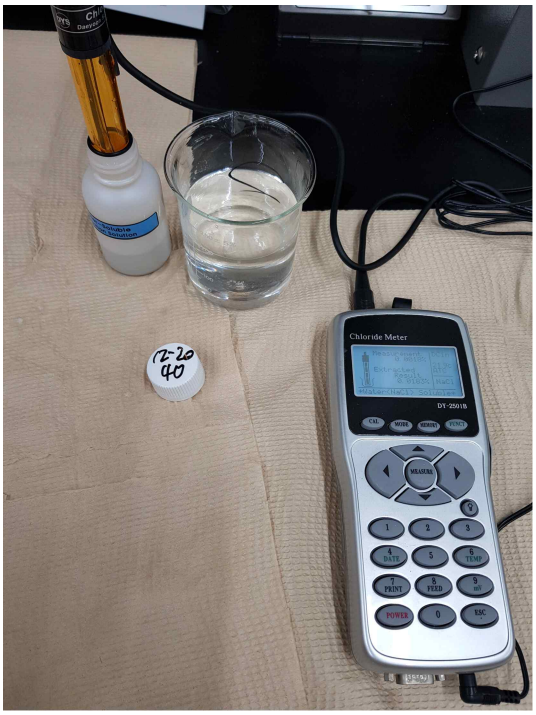
[그림 3.144] 시편 전처리 과정 (NT Build 443)

24시간 경과 후 0.5M의 NaCl 용액에 35일간 침지하였다. 35일 후 [그림 3.145]와 같은 탁상드릴을 이용하여 시편을 2mm에서 20mm까지 2mm간격으로 총 10개에 대한 시료를 채취하였다.



[그림 3.145] 탁상드릴 및 시료 프로파일링

채취된 시료를 가지고 'D'사의 Chloride Meter기기를 이용하여 다음 [그림 3.146]과 같이 염화물 농도를 측정하였다.



[그림 3.146] NT BUILD 443 시험전경

측정된 염화물의 농도를 [식 3.2]의 형태로 회귀 분석하여 확산계수를 구한다. 이때 확산계수는 35일의 비교적 짧은 시간동안 침지하므로 일정하다고 가정한다.

$$C(x,t) = C_i + (C_o - C_i)\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t}}\right)\right] \qquad [식\ 3.2]$$

여기서 $C(x,t)$ = 시간t 동안의 깊이x에 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 (m^2/s)

$erf()$ = 오차함수

다) 전기 전도도에 의한 염소이온 침투 저항성 (KS F 2711)

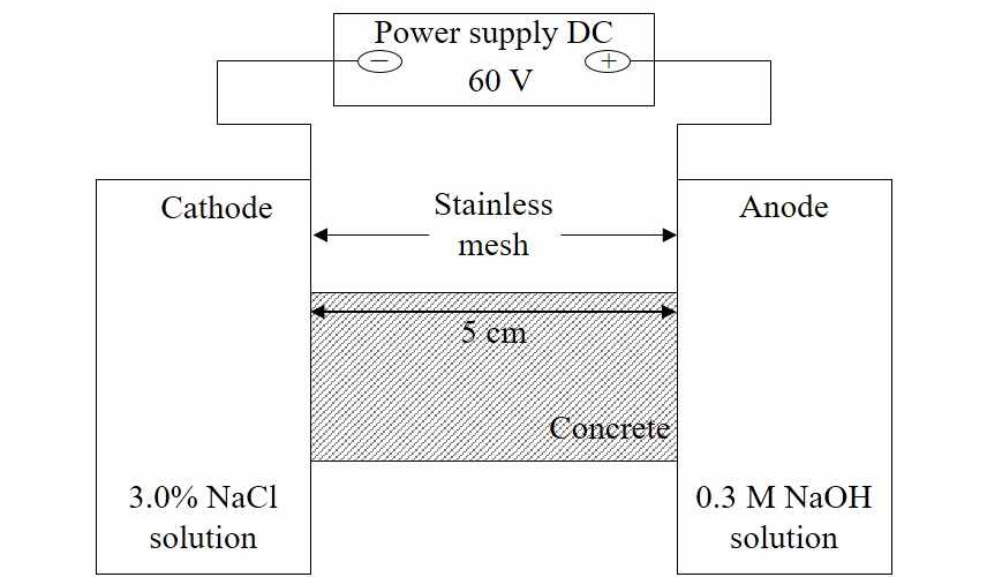
LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트의 염소이온침투저항성 시험은 KS F 2711(전기 전도도에 의한 콘크리트의 염소이온침투저항성 방법)에 따라 수행하였다. 시험은 전기장의 양극성을 활용하여 염소이온(Cl^-)이 콘크리트에 침투시 발생되는 저항을 통하여 콘크리트의 차염성능 및 내부조직의 밀실한 정도를 상대적으로 평가하였다.

콘크리트 시편은 원주형 몰드 (Φ10×20cm)에 제작하여 28일 양생 후 높이가 5cm가 되도록 시편을 절단하여 일방향 침투가 일어날 수 있도록 측면을 코팅한다. 시편을 전 처리하는 과정에서 콘크리트 내부에 수분 손실 발생을 방지하기 위해 에폭시 코팅처리가 끝난 후 24시간동안 수중에 침지하여

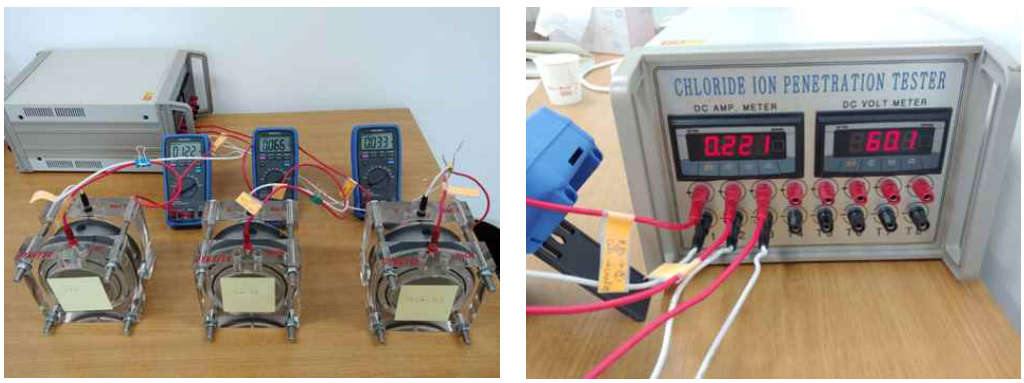
실험을 실시한다.

콘크리트의 양단면은 전하의 원활한 이동을 위해 스테인레스 메쉬 (Stainless mesh)를 사용하였고 음극 셀(-)에는 3% 염화나트륨(NaCl)용액과 양극 셀(+)에는 0.3 M 수산화나트륨(NaOH) 용액을 양 끝 챔버에 채운 후 콘크리트 시편과 연결한다. 파워 서플라이를 각 챔버와 연결한 후 60V의 직류전압을 6시간 동안 공급하여 매 30분마다 모니터링하여 전류량을 확인한다. 아래 [그림 3.147]에 시험 준비에 대해 도식화하였다.

매 시간 마다 샘플 내 공극수의 온도를 확인해야 하는데 너무 높을시 온도에 대한 영향으로 부적절한 시험 결과 값을 나타낼 수 있으므로 20~25℃ 정도로 유지한다.



[그림 3.147] 촉진 염화물 침투 시험 모식도



[그림 3.148] 촉진 염화물 침투 시험 전경

촉진 염화물 침투 시험법에서 제시하는 통과 전하량에 따른 콘크리트의 이온 투과 저항성을 평가하는 기준으로 다음 [표 3.44]와 같이 나타낸다. 이는 분석하고자 하는 콘크리트의 품질 적합성 판정에 이용하는 경우 반드시 이러한 평가 지표를 적용해야 한다.

통과 전하량 (Coulombs)	염소이온 침투성
〉 4,000	높 음
2,000 ~ 4,000	보 통
1,000 ~ 2,000	낮 음
100 ~ 1,000	매우 낮음
〈 100	무시할만함

[표 3.44] 염소이온 침투 저항성 (KS F 2711)

본 연구에서는 LCD 폐유리 미분말에 대해서 통과 전하량 시험을 실시하였다. 유해이온 차단을 위한 표면처리로 에폭시 코팅제의 도포는 염분침투 방향에 수직인 시편 양 표면에 적용하였다.

각 시편에 대해서 수중양생을 하였으며 28 일 재령에 대해 시험을 실시하였다. 시험환경 온도는 해당 시험법(KS F 2711)에서 명시한 공기 순환이 자유로운 건조실 내 온도 23±2 ℃, 상대 습도 50±4 %로 유지시켰다. 염소이온의 침투성능은 KS F 2711에 규정되어 있는 기준을 사용하였고 각각 높음, 보통, 낮음, 매우 낮음, 무시할만함 총 5가지의 지표로 판단하였다.

14) 염화물 확산실험 결과

가) 압축강도

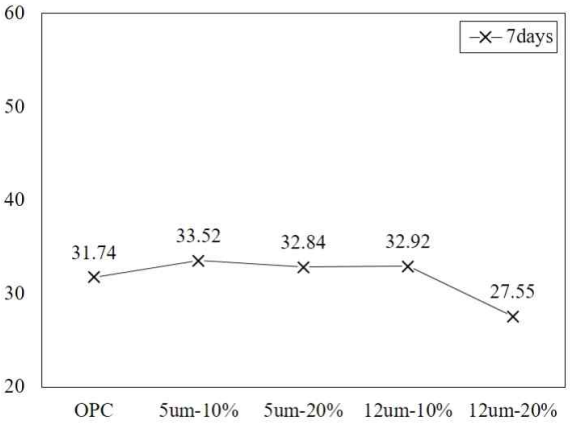
본 연구에서는 LCD 폐유리 미분말의 역학성능 발현 검증을 위하여 평균입경 5μm 및 12μm의 LCD 폐유리 미분말을 시멘트 대체재로 혼입한 모르타르를 각 배합의 측정항목마다 3개 시편에 대해 압축강도를 측정하였고 3개의 압축강도 결과값에 대한 재령별 압축강도 결과를 다음 [표 3.45]에 나타내었다. 압축강도실험은 모르타르 입방형 시편 (50×50×50mm)을 이용하여 측정하였으며 [그림 3.149]에 압축강도 측정결과의 평균을 도시화 하였다.

재령	시편	제어속도 (kN/min)	압축강도 (MPa)	평균압축강도 (MPa)
7일	OPC	90	31.9	31.74
			30	
			33.32	
	5μm-10%		34.84	33.52
			33.92	
			31.8	
	5μm-20%		30.6	32.84
			33.32	
			34.6	
	12μm-10%		30.64	32.92
			34.2	
			33.92	
	12μm-20%		27.28	27.55
			26.36	
			29	
14일	OPC	90	34.8	32.69
			32.96	
			30.32	
	5μm-10%		39.32	38.84
			36.48	
			40.72	
	5μm-20%		40.16	41.75
			44.16	
			40.92	
	12μm-10%		40.32	41.19
			41.32	
			41.92	
	12μm-20%		33.4	33.25
			33.24	
			33.12	

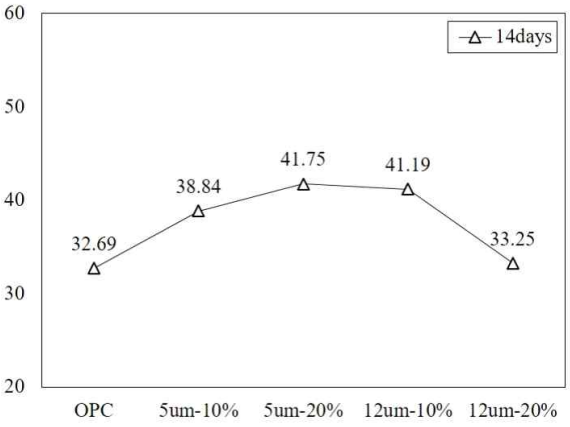
[표 3.45] 재령별 압축강도 시험 결과표

재령	시편	제어속도 (kN/min)	압축강도 (MPa)	평균압축강도 (MPa)
28일	OPC	90	40.96	39.17
			37.36	
			39.2	
	5μm-10%		44.04	46.13
			48.4	
			45.96	
	5μm-20%		46.36	45.37
			44.64	
			45.12	
	12μm-10%		43.12	42.76
			44.04	
			41.12	
	12μm-20%		35.52	35.85
			34.4	
			37.64	
56일	OPC	90	45.4	45.57
			43.92	
			47.4	
	5μm-10%		53.76	54.8
			55.88	
			54.76	
	5μm-20%		50.16	52.31
			52.46	
			54.32	
	12μm-10%		46.56	45.43
			45.84	
			43.88	
	12μm-20%		39.08	39.55
			38.16	
			41.4	

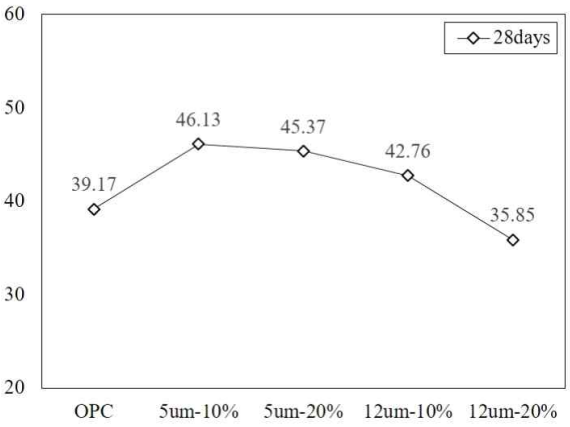
[표 3.45] 재령별 압축강도 시험 결과표 (계속)



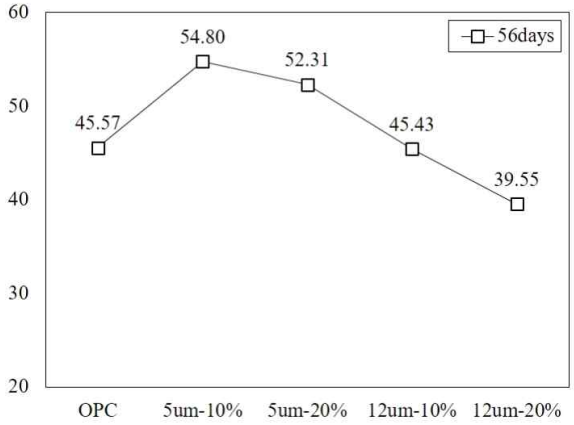
(a) 재령 7일의 모르타르 압축강도



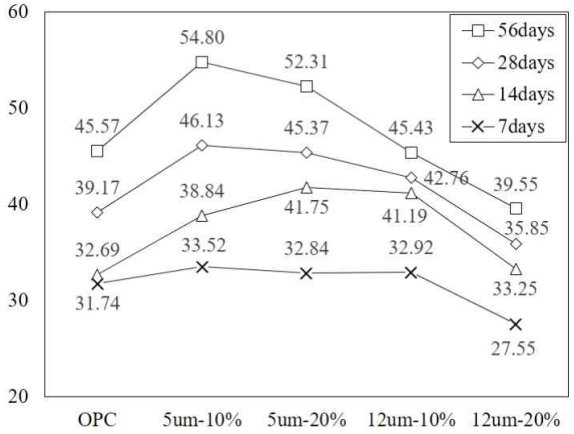
(b) 재령 14일의 모르타르 압축강도



(c) 재령 28일의 모르타르 압축강도



(d) 재령 56일의 모르타르 압축강도

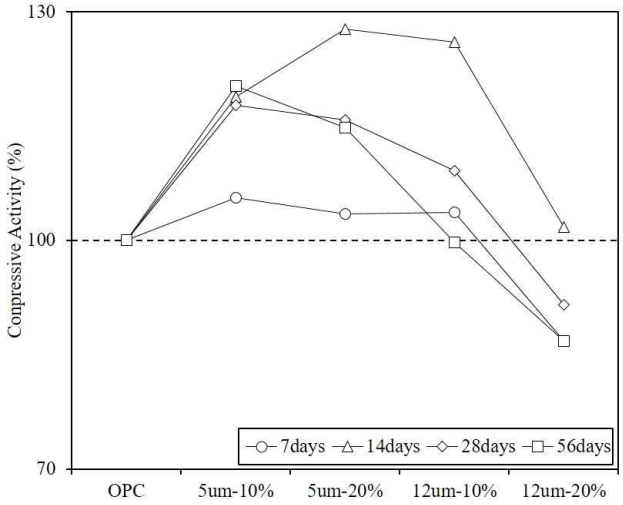


[그림 3.149] 재령별 모르타르의 압축강도 그래프

압축강도 시험결과 초기재령 7일에서 OPC의 압축강도는 31.74MPa로 나타났다. 5μm 입경의 LCD 폐유리 미분말의 경우 10% 치환율에서 33.52MPa로 나타났고 20% 치환율에서 32.84MPa의 강도 발현이 나타났다. 12μm 입경의 LCD 폐유리 미분말을 사용한 경우 10% 치환율에서 32.92MPa로 나타났고 20% 치환율에서 27.55MPa의 강도 발현이 나타났다. 12μm-20%의 경우를 제외한 모든 치환율에서 OPC보다 높은 압축강도를 나타내었다.

재령 14일의 경우 전반적으로 12μm보다는 5μm에서 압축강도가 우수하였고 그 중 10%에서 가장 높은 압축강도를 보였다.

재령 56일 강도에서도 5μm에서 가장 높은 압축강도가 나타났으며 [그림 3.150]에서 보이는 바와 같이 OPC 대비 15~20% 높은 강도가 발현되었다. 하지만 12μm에서는 OPC와 비슷하거나 낮은 강도를 나타내었다. 이는 기존 폐유리 미분말의 연구결과에서 보고되는 것과 같이 미분화된 입경 및 높은 분말도에 기인하는 것으로 판단된다(Kim, et al. 2017). 특히 LCD 폐유리 미분말 5μm에서는 미분화 과정에서 LCD 폐유리 미분말의 비표면적이 증가되어 수화물과의 반응 공간을 확장함으로써 수화의 촉진 및 C-S-H 형성이 더욱 활발해져 재령 초기의 강도 발현이 양호 한 것으로 판단된다.



[그림 3.150] 재령별 모르타르의 압축강도 활성도

나) 염분침투 저항성

① 전위차에 의한 염소이온 확산 특성 (NT Build 492)

본 연구에서는 염화물확산계수시험 이후 각 배합 별 파라미터 및 시편단면의 10개의 종 방향에 해당하는 염수침투 깊이를 각각 다음 [표 3.46]과 [표 3.47]에 정리 하였으며 이들의 평균값을 이용하여 해당 시편의 확산계수를 [식 3.1]을 이용하여 산정하였다.

시편	NT BUILD 492의 파라미터 결과										
	V	z	F	R	A	t	T	Cd	C_0	L	α
OPC-1	30	1	9648	8.314	0.0209	2160	280.5	0.07	2	0.05248	0.01723
OPC-2					0.0299		280.5			0.05149	0.01707
OPC-3					0.0241		281			0.05137	0.01706
5μm-10%-1					0.0231		280.4			0.05093	0.01697
5μm-10%-2					0.0178		280.6			0.05146	0.01707
5μm-10%-3					0.0102		280.9			0.05232	0.01722
5μm-20%-1					0.0003		280.4			0.04886	0.01662
5μm-20%-2					0.0065		280.5			0.05048	0.01690
5μm-20%-3					0.0111		281.2			0.04977	0.01680
12μm-10%-1					0.0255		281			0.04963	0.01677
12μm-10%-2					0.0338		281.5			0.05178	0.01715
12μm-10%-3					0.0282		280.9			0.05113	0.01702
12μm-20%-1					0.022		280.5			0.04879	0.01661
12μm-20%-2					0.0293		281.3			0.05045	0.01692
12μm-20%-3					0.017		279.5			0.05183	0.01709

[표 3.46] 염화물확산계수시험 (NT BUILD 492)의 파라미터 결과정리

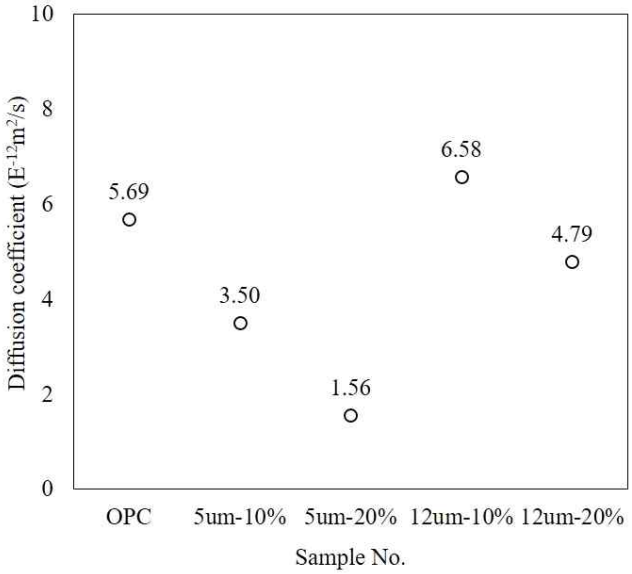
시편	Chloride penetration depth (mm)											
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	Avg.	Drcm ($\times 10^{-12}$ m^2/s)
OPC-1	3.65	3.20	2.61	1.81	2.71	2.80	3.28	2.67	1.81	2.47	2.70	3.79
OPC-2	2.82	4.20	4.56	3.50	3.23	2.41	5.10	5.11	3.93	3.43	3.83	5.71
OPC-3	4.72	5.75	3.95	4.35	6.19	4.45	4.88	3.89	6.91	3.59	4.87	7.56
5μm-10%-1	2.06	3.22	3.81	1.02	3.68	2.64	3.87	1.97	2.35	2.59	2.72	3.74
5μm-10%-2	2.06	3.22	3.81	1.02	3.68	2.64	3.87	1.97	2.35	2.59	2.72	3.77
5μm-10%-3	2.41	2.64	1.80	2.62	1.66	2.50	2.29	1.51	2.49	2.50	2.24	2.99
5μm-20%-1	1.42	0.98	1.35	0.83	1.29	0.98	0.85	1.18	0.85	1.13	1.09	1.05
5μm-20%-2	0.81	1.11	0.48	2.38	1.87	1.42	1.70	1.22	1.24	0.67	1.29	1.38
5μm-20%-3	2.43	1.69	2.10	1.66	2.25	1.81	1.62	0.97	1.79	2.19	1.85	2.25
12μm-10%-1	3.94	3.12	8.24	5.93	5.05	6.09	4.24	6.84	3.55	6.38	5.34	8.17
12μm-10%-2	1.11	1.86	1.50	4.68	4.77	3.53	6.39	4.99	2.84	3.33	3.50	5.16
12μm-10%-3	4.80	4.49	4.58	4.00	4.50	4.64	4.94	3.69	3.38	3.44	4.25	6.42
12μm-20%-1	2.81	3.15	3.66	3.85	3.49	2.57	1.86	3.72	2.33	1.32	2.88	3.87
12μm-20%-2	4.83	2.16	3.33	6.36	3.72	4.51	4.13	3.40	4.27	2.99	3.97	5.87
12μm-20%-3	3.27	3.64	3.30	3.89	3.65	3.48	2.22	1.26	2.78	4.63	3.21	4.63

[표 3.47] 염화물확산계수시험 이후 시편 별 각 침투깊이 및 확산계수

염화물확산계수 시험 결과 OPC 콘크리트와 비교 시 일반적으로 LCD 폐유리 미분말을 사용한 콘크리트 시편들은 염수 투과성이 낮은 결과를 보였다. 이는 전위차, 음극셀 농도, 셀 온도, 전류 인가 등 동일한 시험조건에서 얻은 결과이며 염소이온 확산계수의 결정 인자는 염분침투깊이임을 알 수 있다.

일 방향 침투를 가정으로 원주형 시편 중앙부분을 절단 후 질산은 침전 부분의 1cm 간격마다 얻은 10가지 침투깊이를 평균화하여 해당 배합에 대한 확산계수를 산정하였다. 총 6시간동안 전위차 상태에서 콘크리트 내부 공극을 통해 이동되는 염분은 시멘트 수화물과 반응하기엔 인가시간이 매우 짧

으며 충분한 침투속도를 갖기 때문에 염분흡착과정은 무시될 수 있다. 따라서 본 실험에서 얻은 이온의 투과성은 결국 재료의 유효 확산속도에 의존됨을 알 수 있다.

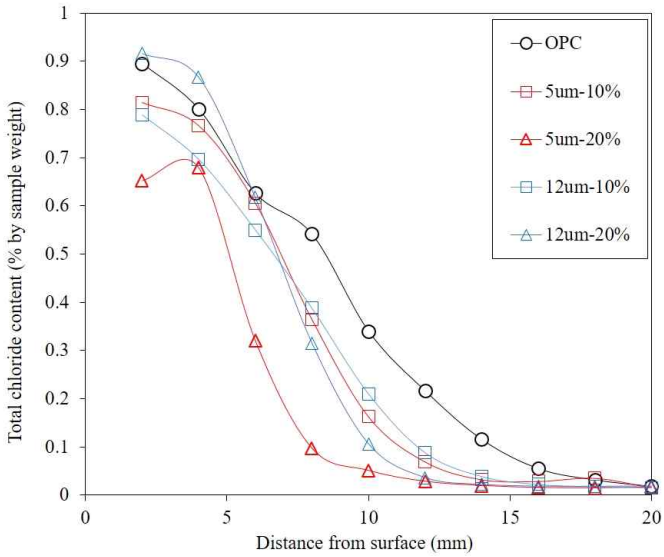


[그림 3.151] 시료별 확산계수 (NT Build 492)

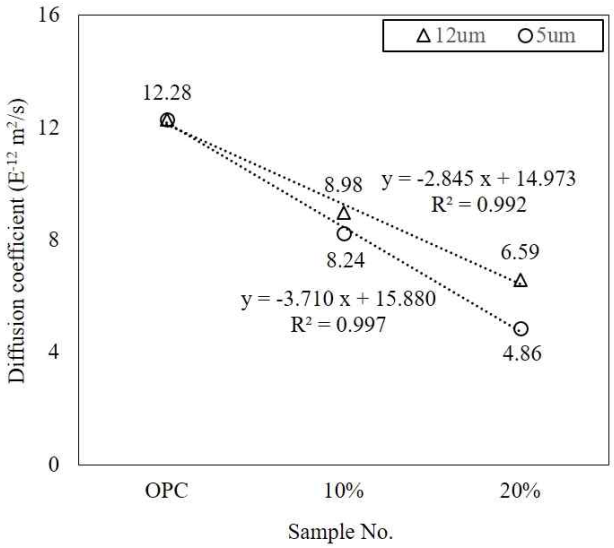
[그림 3.151]은 NT BUILD 492방법을 이용하여 측정한 LCD의 입경 및 치환율에 따른 염화물이온의 확산계수 값을 나타낸 것이다. 실험결과 모든 경우에서 OPC를 사용한 일반 콘크리트의 촉진염소이온 확산계수의 범위 5.59 ~ 19.52×10^{-12} m^2/sec [27]에 비해 매우 낮으므로 염분 침투저항성이 탁월한 것으로 나타났다. OPC의 경우 염소이온 확산계수는 5.69×10^{-12} m^2/sec로 측정되었고 5μm의 LCD 폐유리 미분말을 사용한 경우 10%, 20% 각각 3.50×10^{-12} m^2/sec, 1.56×10^{-12} m^2/sec으로 OPC에 비해 월등히 낮으며 매우 우수한 결과를 나타내었다. 반면에 12μm의 LCD 폐유리 미분말을 사용한 경우에는 10%, 20% 각각 6.58×10^{-12} m^2/sec, 4.79×10^{-12} m^2/sec로 OPC와 비슷하거나 오히려 높은 염소이온 확산계수를 나타내었다. [그림 3.151]에서 알 수 있듯이 LCD 폐유리 미분말을 사용한 콘크리트 중 혼입율이 높을수록 혹은 폐유리 미분말의 분말도가 높을수록 염분침투 저항성이 높게 나타났고 이는 콘크리트 내부에서 확산에 의한 물질 이동에 영향을 미치는 인자로써 내부의 공극구조가 많은 영향을 끼친다는 점[26]에 착안해 LCD 폐유리 미분말이 콘크리트의 치밀한 공극구조에 기인됨으로 추정된다. 또한 콘크리트 내 총 공극량 대비 염수이동을 위한 유효 공극량이 폐유리 미분말 혼입율 및 조립도와 반비례적인 경향을 갖기 때문에 LCD 폐유리 미분말을 사용한 경우 일반적으로 OPC 콘크리트 대비 높은 염분침투 저항성을 보임을 추정할 수 있다. 결국 낮은 조립율 및 적정 혼입율을 갖는 LCD 폐유리 미분말 혼입 콘크리트는 염해환경 하 내구성 확보에 유리한 재료라 판단된다.

② 비정상상태에서의 염소이온 측정법 (NT Build 443)

[그림 3.152]는 표면으로부터 깊이에 따른 염소이온 농도를 나타낸 것이고 이를 농도Y, 깊이X로 하여 최소자승법을 이용하여 회귀분석을 통해 확산계수를 측정하였고 그 결과는 [그림 3.153]과 같다.

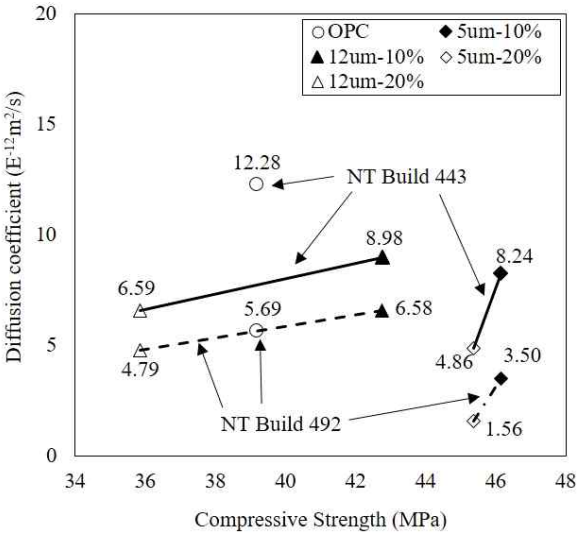


[그림 3.152] Total Chloride Content (%)



[그림 3.153] 시료별 확산계수 (NT Build 443)

LCD 폐유리 미분말 콘크리트의 치환율별 염화물 확산계수는 [그림 3.153]과 같다. 실험 결과 모든 경우에서 OPC를 사용한 일반 콘크리트의 촉진염소이온 확산계수의 범위 5.59~19.52×10^{-12} m^2/sec [27]를 모두 만족하였고 특히 20% 치환율에서 많이 감소하였다. 먼저 OPC 의 경우 염소이온 확산계수를 계산하면 12.28×10^{-12} m^2/sec 로 나타났다. 5μm의 LCD 폐유리 미분말을 사용한 경우 치환율에 따라 33%~61%의 감소율을 나타내었고 12μm의 LCD 폐유리 미분말을 사용한 경우 27~47%의 감소율을 보여 LCD 폐유리 미분말 혼입 콘크리트의 성능이 OPC에 비해 매우 우수한 성능을 보이고 특히 12μm에 비해 5μm에서 높은 감소율을 나타내었다.



[그림 3.154] 압축강도와 확산계수와의 관계

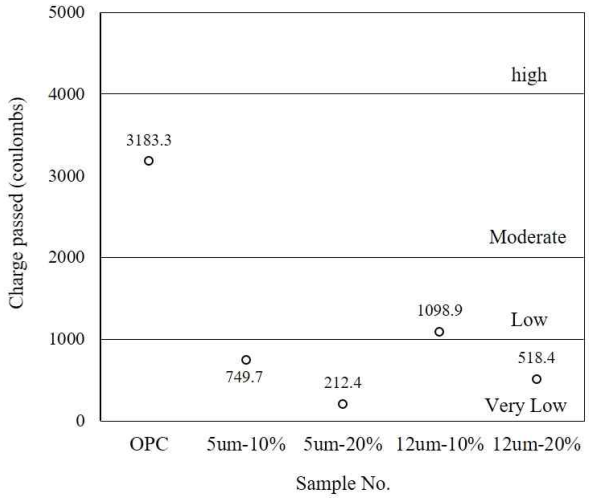
다음 [그림 3.154]에서 보는 바와 같이 압축강도에 대하여 확산계수를 분석한 결과 NT Build 443과 NT Build 492의 결과양상이 비슷하게 나타났다. 또한 같은 분말도에서 치환율이 높을수록 낮은 확산계수를 나타내어 LCD 폐유리 미분말의 혼입량이 증가할수록 공극이 더 치밀해져 염화물 침투성능이 향상되는 것으로 보인다. 또한 같은 치환율에서 분말도가 높을수록 높은 압축강도를 나타내고 있고 낮은 확산계수를 보이고 있어 염화물 침투성능은 혼화재의 치환율과 분말도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 압축강도 면에서는 치환율이 증가함에 따라 시멘트양이 감소하여 콘크리트 강도에 영향을 미치는 $Ca(OH)_2$의 생성량이 줄어들어 결과적으로 강도증가에 좋지 않은 영향을 주므로 확산계수의 경향과는 반대성향을 보인다. 따라서 강도와 확산계수의 필요성에 따라 LCD 폐유리 미분말의 치환율을 조절하여 설계할 필요성이 있다.

③ 전기 전도도에 의한 염소이온 침투 저항성 (KS F 2711)

본 연구에서는 LCD 폐유리 미분말의 입경 및 치환율에 따른 촉진 염화물 시험 평가를 실시하였다. 시간에 따른 각 시편의 전하량을 [표 3.48]에 정리하였으며 시편별 통과전하량을 [그림 3.155]에 정리하였다.

측정 시간	Ampere				
	OPC	5μm-10%	5μm-20%	12μm-10%	12μm-20%
12:30	0.122	0.033	0.01	0.052	0.024
13:03	0.132	0.034	0.01	0.05	0.024
13:34	0.138	0.035	0.01	0.05	0.024
14:05	0.142	0.035	0.01	0.05	0.024
14:36	0.147	0.035	0.01	0.051	0.024
15:06	0.149	0.035	0.01	0.051	0.024
15:36	0.151	0.035	0.01	0.051	0.024
16:06	0.153	0.035	0.01	0.051	0.024
16:36	0.153	0.035	0.01	0.051	0.024
17:06	0.155	0.035	0.01	0.051	0.024
17:37	0.155	0.035	0.009	0.052	0.024
18:06	0.155	0.034	0.009	0.051	0.024
18:36	0.155	0.034	0.01	0.051	0.024
Charge passed (coulombs)	3183.3	749.7	212.4	1098.9	518.4
Evaluation	Moderate	Very Low	Very Low	Low	Very Low

[표 3.48] 시편 별 각 측정전류 및 통과전하량 결과



[그림 3.155] 시편별 통과전하량 (KS F 2711)

OPC의 경우 통과 전하량이 3,183.3C으로 보통정도의 침투성능을 나타났다. 또한 모든 LCD 폐유리 미분말에서 낮음 이하의 침투성능을 보였으며 OPC에 비해 우수한 침투성능이 보이는 것으로 나타났다. 특히 12μm의 경우에 비해 5μm에서 우수한 침투성능을 보였고 두 입경 모두 치환율이 높을수록 침투성능이 좋은 것으로 나타났다. 특히 포졸란 계열의 첨가에 따른 잠재 수경성 성질, 염분 흡착 성질을 갖는 수화물 분포(CH, C-S-H)는 촉진 염화물 시험 중 염분 이동에 대한 저항성 향상의 결정적인 역할을 한다[28]. 결과적으로 LCD 폐유리 미분말을 사용한 콘크리트에서 높은 저항성 원인은 포졸란 반응에 따른 물성향상으로 사료된다.

3.2.3 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 수로관의 구조적 성능 평가

LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트를 이용하여 제작한 수로관에 대한 구조적 성능 평가를 수행하였다. 수로관은 재령 28일에 대하여 측정하였으며 측정결과를 KS 기준의 휨 강도와 비교하여 LCD 폐유리 미분말을 사용한 수로관의 구조 거동의 적정성을 평가하였다.

1) 시험 방법

(1) 현장 배합표

본 연구에서는 실제 현장에서 사용하고 있는 현장 배합표에 시멘트를 10%, 20%로 치환하여 사용하였으며 그 배합표는 아래 [표 3.49]과 같다.

W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)					
		배합수	시멘트	LCD 폐유리		잔골재	굵은골재
47.2	39.6	150	360	0%	0	402	1109
			324	10%	36		
			288	20%	72		

[표 3.49] 철근 콘크리트 수로관 Ⅲ종 제작을 위한 현장 배합표

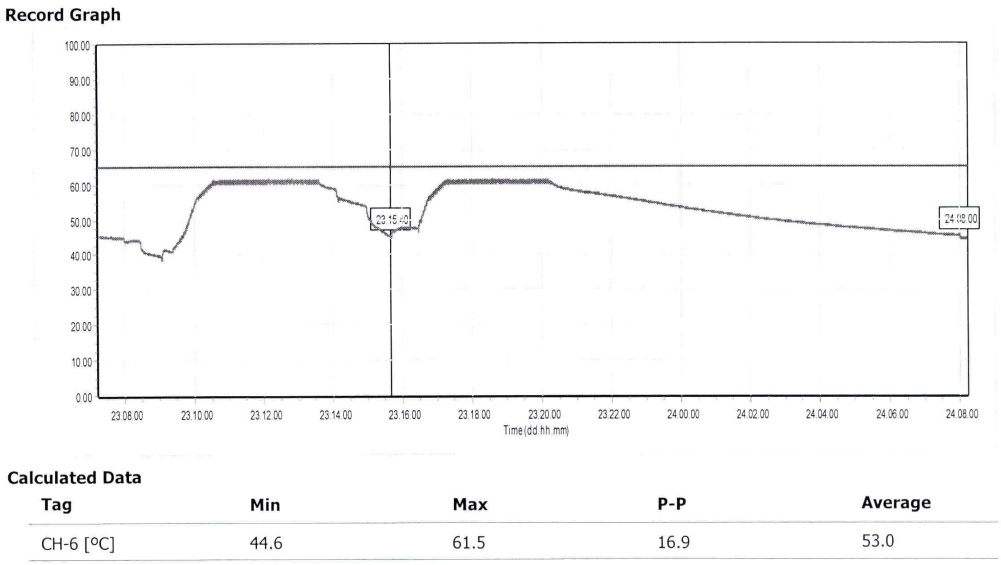
(2) 수로관 제작 및 양생

철근 콘크리트 벤치 플룸관 Ⅲ종은 KS F 4010 「철근 콘크리트 플룸 및 벤치 플룸」의 기준에 따라 기성품과 동일한 모양과 치수로 제작하였으며 본 연구에서는 600C를 적용하였다. 사용재료 중 시멘트에 대한 중량비는 각 10%, 20% 치환하여 제작하였다.

제작은 경북 김천시 소재의 'I'콘크리트 공장에서 제작하였으며 현장과 동일한 양생조건하에 진행이 되었으며 양생기록 보고서는 [그림 3.157]와 같다.



[그림 3.156] LCD 콘크리트 수로관 제작 전경



[그림 3.157] 양생기록 보고서

(3) 슬럼프

현장 배합 시 콘크리트의 시공성을 확인하고자 KS F 2402 「콘크리트 슬럼프 시험방법」에 준하여 시험을 하였다. 슬럼프 콘을 수평으로 설치 후 평판 위에 놓고 누른 후 시료를 3회에 걸쳐 나누어 채운다. 각 회 마다 다짐봉으로 고르게 한 후 25회씩 다진다. 이때 다짐은 재료의 분리를 일으킬 염려가 있을 때에는 분리를 일으키지 않을 정도로 다짐수를 줄이고 다짐봉의 다짐 깊이는 아래층에 거의 도달할 정도로 다짐한다. 슬럼프 콘에 콘크리트를 채운 후 윗면을 슬럼프 콘의 상단부에 맞춰 고르게 한 후 슬럼프 콘을 연직방향으로 들어 올리고 아래 [그림 3.158]과 같이 슬럼프 콘 상단으로부터 콘크리트 중앙부까지의 높이 차를 측정하였다.



[그림 3.158] 슬럼프 시험 전경

(4) 압축강도

콘크리트의 압축강도를 확인하기 위해 KS F 2405 「콘크리트 압축강도 시험방법」에 준하여 시험을 하였다. 압축강도를 측정하기 위한 재료는 수로관 제작시 일부를 채취하여 실린더 몰드에 담아 제작하였다. 양생 후 시편 상부에 편심이 생기지 않게 하기 위해 [그림 3.159]의 콘크리트 연마기를 사용하여 시편 방부를 연마하였고 다음 [그림 3.160]와 같이 압축강도기를 사용하여 압축강도를 측정하였다. 재령별 시편 3개의 압축강도를 측정한 값들의 평균값을 사용하였다.



[그림 3.159] 콘크리트 연마기

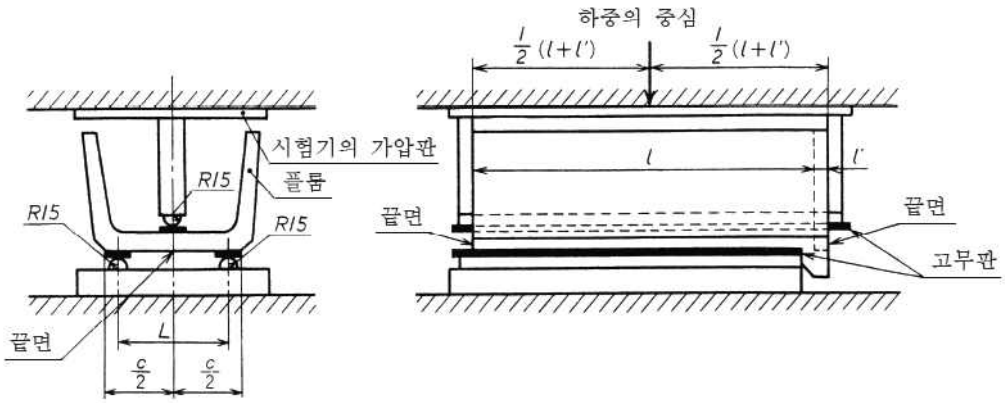




[그림 3.160] 압축강도용 공시체 타설 직후 모습 및 압축강도 시험 전경

(5) 최대 휨 강도

콘크리트 수로관의 성능 검증을 위해 국토교통부 분산공유형실험시설인 첨단건설재료실험센터로부터 실험을 수행하였다. 5MN 사양의 대형부재시험기에 다음 [그림 3.161]과 같이 시험기의 가압판에 가력장치를 부착하고 벤치플룸관의 길이방향으로 중앙부에 하중을 재하한다. 가압판에 1mm/min로 변위제어를 하여 시간별 하중을 측정하였다. 본 연구에서는 600C를 사용하였고 KS F 4010에 따라 지간(L)=550mm로 세팅하였다.



[그림 3.161] 수로관 Ⅲ종의 시험도 (출처 : KS F 4010)



[그림 4.162] 5MN 대형구조시험기

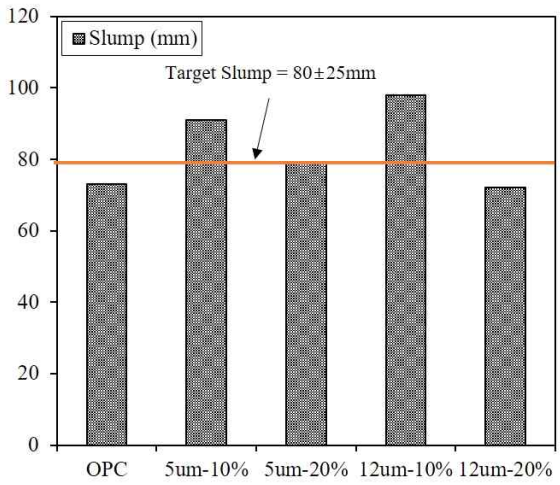
(6) 0.05mm도달 휨 강도

KS F 4010에서는 휨 강도 하중은 끝면에 너비 0.05mm의 균열이 처음 발생하였을 때의 하중값을 KS Q 5002에 따라 휨 강도 하중으로 규정하고 있으며 수로관 Ⅲ종 600C의 경우에는 휨 강도 측정값이 48.5kN이상이어야 한다.

2) 시험결과

(1) 슬럼프

설계목표 슬럼프는 현장에서 시공성을 고려하여 80±25mm 범위로 설정하였고 모든 슬럼프에서 80±25mm 범위의 슬럼프를 만족시켰고 각 입경 및 치환율별 결과 값을 다음 [그림 3.163]과 같이 나타냈다.

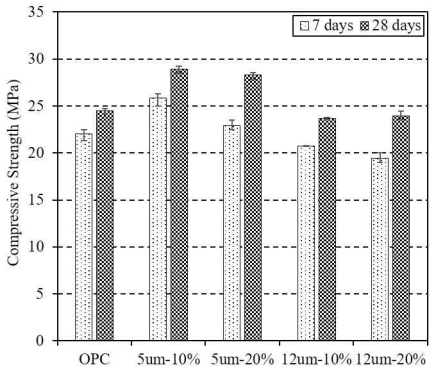


[그림 3.163] LCD 콘크리트 수로관의 슬럼프 결과

OPC의 경우 목표 슬럼프를 만족하는 73mm가 측정 되었으며 입경과 관계없이 치환율 10%에서 높은 슬럼프가 측정이 되었고. 치환율 20%에서 낮은 슬럼프가 측정이 되었다. 이는 시멘트 대체재인 LCD 폐유리 미분말의 입형이 각이 지고 모가 난 방추 형태를 띠고 있어 다른 분말과의 접촉 면적을 증가시켜 점성이 증가함으로 인해 유동성을 저하시키는 것으로 사료된다.

(2) 압축강도

본 연구에서는 LCD 폐유리 미분말 혼입 콘크리트를 현장배합에 적용하였을 때의 강도 발현효과를 평가하기 위하여 LCD 폐유리 미분말을 콘크리트의 혼입 후 압축강도 시험을 수행하였다. 시편은 OPC, 5μm-10%, 5μm-20%, 12μm-10%, 12μm-20% 총 5수준으로 나누어 시험을 수행하였고 그 결과는 다음 [그림 3.164]와 같다.



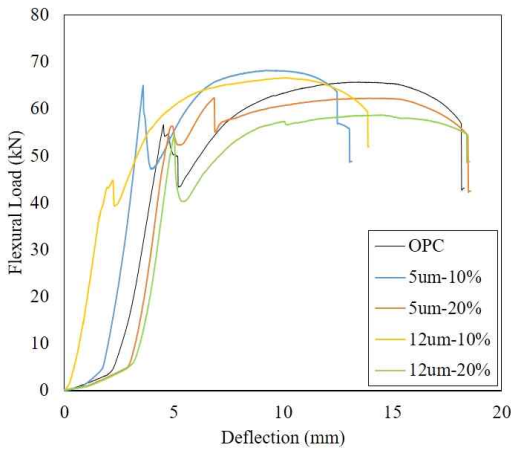
[그림 3.164] LCD 콘크리트 수로관의 압축강도 결과

앞선 모르타르 시험과 동일하게 초기재령 압축강도는 평균입경이 작은 5μm-10%, 5μm-20%이 OPC보다 높은 압축강도를 나타냈으나 치환율이 20%로 증가함에 따라 강도발현 활성도는 떨어지는 것으로 나타났다.

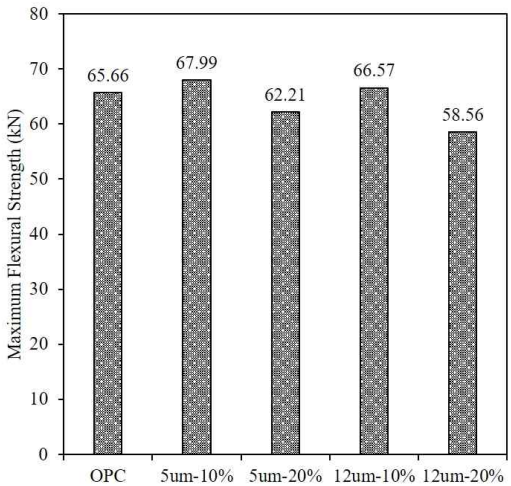
28일 재령 강도는 OPC보다 근소하게 작거나 상회하는 것으로 나타났으며 특히 평균입경이 작은 5μm 시험체에서 높은 강도 발현율을 보였다.

(3) 휨 강도-변위

수로관 휨 성능실험은 KS F 4010에 준하여 시험을 수행하였으며 하중은 변위제어로 1mm/min의 속도로 재하하였다. 휨 성능 시험에서 치환율이 10%일 때 5μm에서 67.99kN가 측정되었고 12μm에서는 66.57kN이 측정되어 OPC보다 높은 휨 강도가 나타났다. 하지만 치환율 20%의 경우에는 5μm에서 62.21kN이 측정되었고 12μm에서는 56.56kN이 측정되어 OPC 보다 낮은 휨 강도가 발현되었다. [그림 3.165]에서 휨 강도-변위 관계로부터 치환율이 낮을수록 고강도화에 따른 취성적인 거동 특성이 분명하게 나타났다. 또한 압축강도 결과 그래프와 비교하였을 때 최대 휨 강도는 LCD 콘크리트의 압축강도 증가영향에 비례하여 커지지 않는 것으로 판단된다.



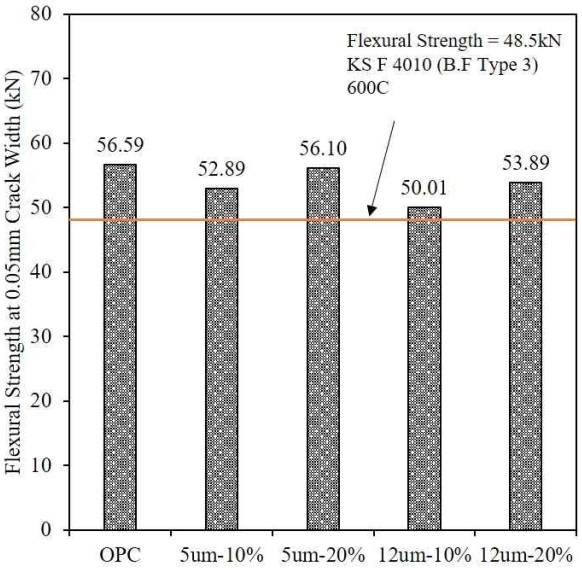
[그림 3.165] LCD 콘크리트 수로관의 휨 강도-변위 관계 곡선



[그림 3.166] LCD 콘크리트 수로관의 최대 휨 강도

(4) 0.05mm도달 휨 강도

0.05mm도달 휨 강도를 측정하기 위에 소캣부 하단면에 스트레인 게이지를 부착하여 데이터 로거와 연결하여 균열이 0.05mm 발생하였을 때의 휨 강도를 측정하였고 그 결과는 [그림 3.167]과 같다. KS F 4010에서는 수로관 Ⅲ종 600C일 경우 48.5kN을 초과하여야 한다고 규정하고 있다.



[그림 3.167] LCD 콘크리트 수로관의 균열폭 0.05mm 휨 강도

측정결과 모든 경우에 대하여 시험결과 기준인 48.5kN을 초과하여 성능을 만족하였다. 하지만 최대 휨 강도가 높을수록 0.05mm 균열폭일 때의 휨 강도는 낮게 측정이 되었으며 모든 경우에서 OPC(56.59kN)보다 낮게 나타났다.

3) LCD 폐유리 미분말을 혼입한 수로관의 구조적 성능 평가 결론

비구조체인 철근 콘크리트 수로관에 LCD 폐유리 미분말을 혼입하여 제작한 후 휨 강도 측정을 한 결과 모든 경우에서 KS 기준값인 48.5kN을 상회하였으며 강도성능을 만족하였다. 압축강도의 경우 5μm에서 우수한 압축강도를 나타내었지만 0.05mm 균열 휨 강도의 경우에서는 모든 시편에 대해 OPC보다 낮은 결과값이 나타나 압축강도의 증가영향과 비례하여 커지지 않는 것으로 판단한다.

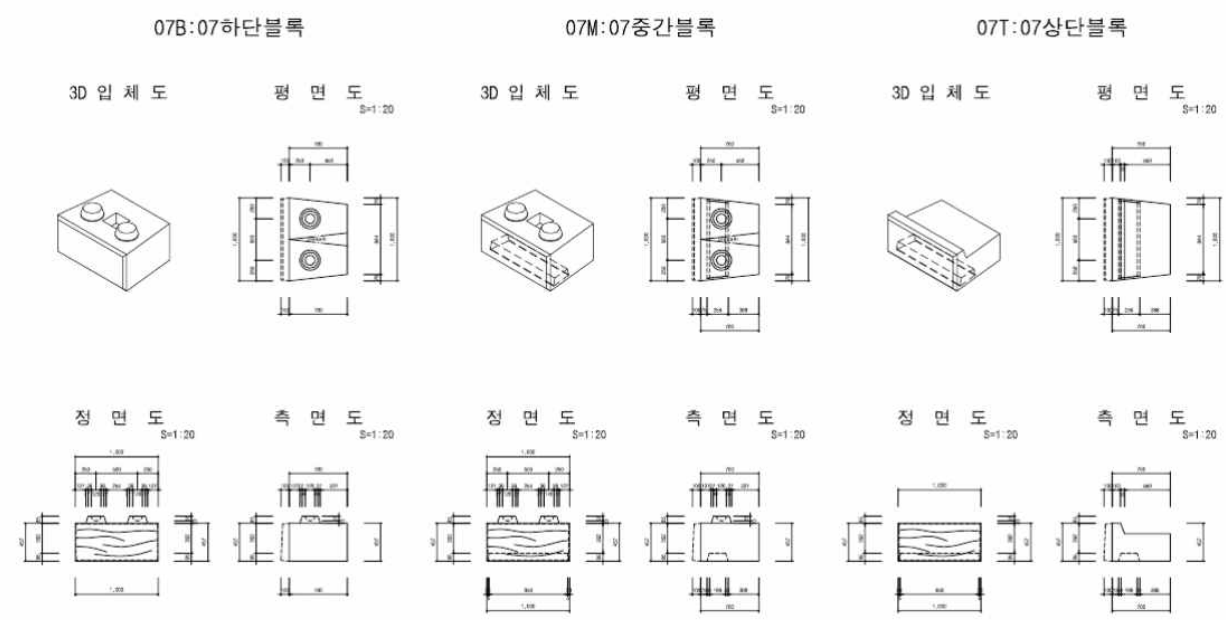
위의 실험적 연구를 통하여 염해내구성을 향상시키기 위해 LCD 폐유리 미분말 치환율을 증가함으로써 해양환경 및 바닷가 인근지역에 매립되는 콘크리트 수로관의 내구수명을 향상시킬 수 있다고 판단하였고 LCD 폐유리 미분말을 활용한 고내구성 프리캐스트의 현장적용 가능성이 충분할 것으로 판단된다.

3.2.4 LCD 폐유리 미분말을 혼입한 프리캐스트 콘크리트 옹벽 시제품 제작



[그림 3.168] 프리캐스트 콘크리트 옹벽 모형

1) 도면



[그림 3.169] 프리캐스트 콘크리트 옹벽 도면

2) 배합비

구분	W/B	S/a	단위 재료량(kg)					
	(%)	(%)	W	C	LCD	S	G	AD
kg/ m3	132.0	131.4	525	1152	129	2163	2790	12.81

[그림 3.170] 프리캐스트 콘크리트 옹벽 배합비

3) 경제성 분석

	구 분	
재료단가 산정	'H'사 OPC	137.5원/kg
	LCD 폐유리	45원/kg
옹벽 타입	콘크리트 블록 중력식 옹벽	1,000(가로)X457(세로)X700(길이)
단위용적	0.293m^3	0.293m^3/블록
단위시멘트량	배합비	218kg/m^3
필요시멘트량	0.293m^3 ×218kg/m^3	63.87kg
OPC	63.87kg×137.5원/kg	8,780원
10%	57.48kg×137.5원/kg	8,190원
	6.39kg×45원/kg	
20%	51.1kg×137.5원/kg	7,600원
	12.77kg×45원/kg	
적용수량	10블록	OPC : 87,800원
		10% : 81,900원
		20% : 76,000원
절감액	10블록	10% : 5,900원
		20% : 11,800원
0.293m^3 100블록 시공 시 10%, 20% 치환에서 각각 59,000원 118,000원으로 원가절감 가능		
0.293m^3 1000블록 시공 시 10%, 20% 치환에서 각각 590,000원 1,180,000원으로 원가절감 가능		

[표 3.50] 프리캐스트 콘크리트 옹벽 경제성 분석

4) 공사 및 옹벽 정보

No.	목 록	내 용
1	공사명	REPAIR DRAINAGE CANAL AND FLOOD PRONE AREA(18F0115)
2	현장적용 장소	평택 미군부대 내
3	기간	2018/11/26 ~ 2019/03/31
4	압축강도	40MPa
5	슬럼프	135mm~ 150mm
6	공기량	4.5±1.5(%)

[표 3.51] 공사 및 옹벽 정보

5) 제작과정

ㄱ. 미분말 사진



[그림 3.171] 미분말 사진(1)

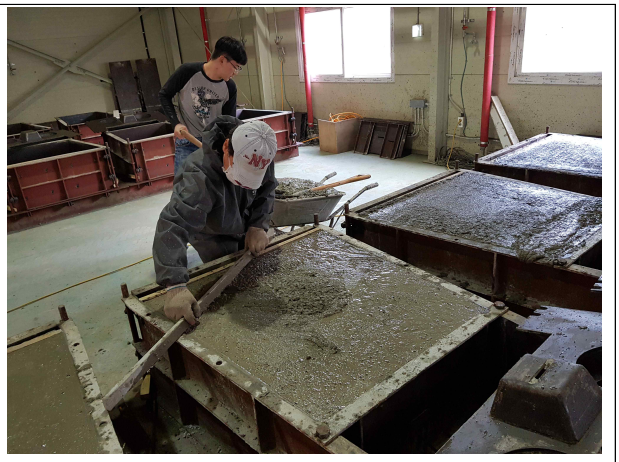


[그림 3.172] 미분말 사진(2)

ㄴ. 제작 과정



[그림 3.173] 제작 과정(1)



[그림 3.174] 제작 과정(2)

ㄷ. 완성사진



[그림 3.175] 완성 사진(1)



[그림 3.176] 완성 사진(2)

ㄹ. 현장적용 사진



[그림 3.177] 현장적용 사진(1)



[그림 3.178] 현장적용 사진(2)

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ 성과점검기준표

[총괄]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	LCD 폐유리를 혼입한 경제성 있는 콘크리트의 개발 및 매뉴얼 제작	1-1	국내 LCD 폐유리 발생량 및 처리현황	①	화학 성분비교	국내 LCD 폐유리 100%	국내 LCD 폐유리 100%	전문가 평가	연차보고서	10	특허 : 출원 1 건 논문 : SCI급 1 건 비SCI급 3 건 국내외학술회의 : 9 건 시작품 : 2 건 연구인력양성 : 석사 연구원 2 명
			1-2	LCD 폐유리 수집 및 크기별 분쇄	①	공시체 제작	평균입경 1mm 이하	평균입경 5um, 12um	SEM, 입도분포 시험	공인시험 성적서	10	
			1-3	LCD 폐유리 혼입 최적배합비 도출	①	압축강도	기존대비 100%이상	OPC 대비 최대 120%	KS규격	연차보고서	15	
					②	배합비 도출	10wt% 이내	시멘트 중량비 20wt% 이내	전문가평가	연차보고서	15	
			1-4	LCD 폐유리를 사용한 콘크리트 배합 매뉴얼 제작	①	장기강도	기존대비 100%이상	91재령일 기준 OPC 대비 100% 이상	KS규격	연차보고서	15	
					②	내화학성	기존대비 100%이상	OPC 대비 100% 이상	KS규격	연차보고서	15	
	2	LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트 프리캐스트 시작품 제작 및 개발	2-1	LCD 폐유리 혼입 프리캐스트 콘크리트 시제품 제작	①	프리캐스트 콘크리트 시작품	LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트 시작품	프리캐스트 수로관, 블럭식 옹벽	시작품제작	시작품제작	20	
계											100	특허 : 출원 1 건 논문 : SCI급 1 건 비SCI급 3 건 국내외학술회의 : 9 건 시작품 : 2 건 연구인력양성 : 석사 연구원 2 명

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	LCD 폐유리를 혼입한 경제성 있는 콘크리트의 개발 및 매뉴얼 제작	1-1	국내 LCD 폐유리 발생량 및 처리현황	①	화학 성분비교	국내 LCD 폐유리 100%	국내 LCD 폐유리 100%	전문가 평가	연차보고서	10	논문 : BI30급 1 건 국내외학술회의 : 3 건 인력양성 : 석사 0 명
			1-2	LCD 폐유리 수집 및 크기별 분쇄	①	공시체 제작	평균입경 1mm 이하	평균입경 5um, 12um	SEM, 입도분포 시험	공인시험 성적서	10	
			1-3	LCD 폐유리 혼입 최적배합비 도출	①	배합비 도출	10wt% 이내	시멘트 중량비 20wt% 이내	전문가평가	연차보고서	15	
					②	압축강도	기존대비 100%이상	OPC 대비 최대 120%	KS규격	연차보고서	15	
계											50	논문 : BI30급 1 건 국내외학술회의 : 3 건 인력양성 : 석사 0 명

[2차년도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	LCD 폐유리를 혼입한 경제성 있는 콘크리트의 개발 및 매뉴얼 제작	1-4	LCD 폐유리를 사용한 콘크리트 배합 매뉴얼 제작	①	장기강도	기존대비 100%이상	91재령일 기준 OPC 대비 100% 이상	KS규격	연차보고서	15	특허 : 출원 1 건 논문 : SCI급 1 건 비SCI급 2 건 국내외학술회의 : 6 건 시작품 : 2 건 연구인력양성 : 석사 연구원 2 명
					②	내화학성	기존대비 100%이상	91재령일 기준 OPC 대비 100% 이상	KS규격	연차보고서	15	
	2	LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트 프리캐스트 시작품 제작 및 개발	2-1	LCD 폐유리 혼입 프리캐스트 콘크리트 시제품 제작	①	프리캐스트 콘크리트 시작품	LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트 시작품	프리캐스트 수로관, 블럭식 옹벽	시작품제작	시작품제작	20	
계											50	특허 : 출원 1 건 논문 : SCI급 1 건 비SCI급 2 건 국내외학술회의 : 6 건 시작품 : 2 건 연구인력양성 : 석사 연구원 2 명

2. 관련 분야 기여도

가. 재료분야

구분	관련분야 기여도					
	R&D 전			R&D 후		
소분류	국외 기술수준	국내 기술수준	분석	국외 기술수준	국내 기술수준	분석
배합비	해당 사례가 없음	LCD 폐유리 혼입 콘크리트의 치환율별 연구는 있지만 최적 배합비 도출은 아직 없음	LCD 폐유리 혼입 콘크리트의 치환율별 연구는 있지만 최적 배합비 도출은 아직 없음	해당 사례가 없음	40MPa급 LCD폐유리 혼입 콘크리트의 최적 배합비 도출	최적 배합비 도출
염분침투 저항성	일반콘크리트(30MPa) 염분침투 저항성평가에서 OPC보다 높은 염해 내구성 확보	해당 사례가 없음	일반콘크리트(30MPa) 염분침투 저항성평가에서 OPC보다 높은 염해 내구성 확보	일반콘크리트(30MPa) 염분침투 저항성평가에서 OPC보다 높은 염해 내구성 확보	고강도콘크리트(60MPa) 염분침투 저항성평가에서 OPC보다 높은 염해 내구성 확보	일반 콘크리트 뿐만 아니라 고강도콘크리트에서도 염분침투 저항성 평가를 하여 5um는 150%, 12um기준 OPC보다 16% 높은 내구성 보유
압축 강도	70um LCD폐유리 치환 콘크리트압축강도가 40MPa에 달하는 고강도 콘크리트 생성가능	70um LCD폐유리 치환 콘크리트압축강도가 40MPa에 달하는 고강도 콘크리트 생성가능	국외 뿐 아니라 국내에서도 70um LCD폐유리 혼입 콘크리트압축강도가 40MPa에 달하는 고강도 콘크리트 생성가능	70um LCD폐유리 치환 콘크리트압축강도가 40MPa에 달하는 고강도 콘크리트 생성가능	5um,12um LCD 폐유리 분말을 이용한 콘크리트압축강도 60MPa에 도달함.	5um,12um LCD 폐유리 분말을 이용한 콘크리트압축강도 60MPa에 도달함.
쪼갬 인장강도	LCD미분말 혼입 콘크리트 쪼갬인장강도는 3 MPa 강도 발현	LCD미분말 혼입 콘크리트 쪼갬인장강도는 3 MPa 강도 발현	일반 및 고강도콘크리트에서의 쪼갬인장강도 3MPa발현	5um,12um LCD 폐유리 분말을 이용한 콘크리트 쪼갬인장강도 4MPa발현	5um,12um LCD 폐유리 분말을 이용한 콘크리트 쪼갬인장강도 4MPa발현	5um,12um LCD 폐유리 분말을 이용한 콘크리트 쪼갬인장강도 4MPa발현

구분	관련분야 기여도					
	R&D 전			R&D 후		
소분류	국외 기술수준	국내 기술수준	분석	국외 기술수준	국내 기술수준	분석
동결융해	입경 5um, 12um 미세분말 LCD 혼입 콘크리트에 대한 동결융해연구 사례가 없음	입경 5um, 12um 미세분말 LCD 혼입 콘크리트에 대한 동결융해연구 사례가 없음	-	입경 5um, 12um 미세분말 LCD 혼입 콘크리트에 대한 동결융해연구 사례가 없음	상대동탄성계수의 결과 입경 5um LCD 폐유리 미분말을 혼입한 콘크리트가 OPC에 비해 120% 높은 값을 보임	미세 5um의 LCD 폐유리 혼입 콘크리트의 내동해성 효과 확보
탄산화	입경 5um, 12um 미세분말 LCD 혼입 콘크리트에 대한 탄산화연구 사례가 없음	입경 5um, 12um 미세분말 LCD 혼입 콘크리트에 대한 탄산화연구 사례가 없음	-	입경 5um, 12um 미세분말 LCD 혼입 콘크리트에 대한 탄산화연구 사례가 없음	탄산화 깊이(8주)가 LCD미분말 입경 5um가 5%, 10%일 때 각각 3.0mm, 2.6mm 12um일 때 2.2mm, 3.2mm 발생	OPC와 비교해서 LCD미분말 콘크리트 탄산화의 차이는 미미함
황산염침지	입경 5um, 12um 미세분말 LCD 혼입 콘크리트에 대한 황산저항성연구 사례가 없음	입경 5um, 12um 미세분말 LCD 혼입 콘크리트에 대한 황산저항성연구 사례가 없음	-	입경 5um, 12um 미세분말 LCD 혼입 콘크리트에 대한 황산저항성연구 사례가 없음	OPC 콘크리트가 LCD 폐유리 미분말이 혼입된 콘크리트에 비해 강도 감소율과 중량 감소율이 5% 작음	입경 5um, 12um LCD 폐유리 미분말 혼입된 콘크리트의 경우 황산염에 대한 저항성의 성능이 약간 떨어지므로 타 재료의 혼입을 통한 보완이 필요함
플로우	고강도(40MPa)에 해당하는 LCD 폐유리 콘크리트 슬럼프 150mm 보유	고강도(40MPa)에 해당하는 LCD 폐유리 콘크리트 슬럼프 150mm 보유	-	고강도(40MPa)에 해당하는 LCD 폐유리 콘크리트 슬럼프 150mm 보유	60MPa급 고강도 슬럼프 플로우 플로우 600mm도달	60MPa급 고강도 슬럼프 플로우 600mm도달
공기량	고강도(40MPa)에 해당하는 LCD 폐유리 콘크리트 공기량 4%보유	고강도(40MPa)에 해당하는 LCD 폐유리 콘크리트 공기량 4%보유	-	고강도(40MPa)에 해당하는 LCD 폐유리 콘크리트 공기량 보유	5um, 12um LCD 폐유리 혼입 고강도 콘크리트(60MPa)에 해당하는 LCD 폐유리 콘크리트 공기량 3% 보유	5um, 12um LCD 폐유리 혼입 고강도 콘크리트(60MPa)에 해당하는 LCD 폐유리 콘크리트 공기량 3% 보유

구분	관련분야 기여도					
	R&D 전			R&D 후		
소분류	국외 기술수준	국내 기술수준	분석	국외 기술수준	국내 기술수준	분석
미세구조	5um, 12um급 고도미세 LCD 미분말 혼입 콘크리트, 모르타르, 페이스트의 미세 공극 이미지, 성분, 입도분포 미보유	5um, 12um급 고도미세 LCD 미분말 혼입 콘크리트, 모르타르, 페이스트의 미세 공극 이미지, 성분, 입도분포 미보유	-	5um, 12um급 고도미세 LCD 미분말 혼입 콘크리트, 모르타르, 페이스트의 미세 공극 이미지, 성분, 입도분포 미보유	5um, 12um LCD 미분말 혼입 콘크리트, 모르타르, 페이스트의 미세 공극 이미지, 성분, 입도분포 보유	5um, 12um LCD 미분말 혼입 콘크리트, 모르타르, 페이스트의 미세 공극 이미지, 성분, 입도분포 보유

나. 적용분야

구분	관련분야 기여도					
	R&D 전			R&D 후		
소분류	국외 기술수준	국내 기술수준	분석	국외 기술수준	국내 기술수준	분석
LCD 폐유리 혼입 프리캐스트 콘크리트 With-rock 옹벽	해당 사례가 없음	해당 사례가 없음	-	해당 사례가 없음	LCD폐유리 혼입 프리캐스트 콘크리트 옹벽 시제품 제작 및 적용	내구성과 염해저항성이 좋은 LCD폐유리 혼입 콘크리트를 이용하여 프리캐스트 콘크리트에도 적용가능
철근콘크리트 600c 수로관 3종	해당 사례가 없음	해당 사례가 없음	-	해당 사례가 없음	LCD폐유리 혼입 U형 수로관 제작 및 적용	내구성과 염분저항성이 좋은 LCD폐유리 혼입 콘크리트를 이용하여 U형 수로관에도 적용가능

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

5.1연구개발성과의 활용방안

○ LCD 폐유리를 이용한 콘크리트의 매뉴얼 작성
- 산업폐기물인 LCD 폐유리를 이용하므로써 지속가능한 개발을 하고 사회적 문제를 해소하는 방안으로 신규 시장을 창출함.
- 매뉴얼 작성을 통하여 LCD 폐유리 미분말이 콘크리트 재료로써 구조물에 사용가능할 수 있는 표준화 작업의 기틀로 활용 가능함.

○ LCD 폐유리를 이용한 프리캐스트 콘크리트 시작품 제작
- 최종성과물로써 유력한 프리캐스트 시작품으로 고려되는 환경친화적인 콘크리트블록은 자연암석과 같은 질감을 가지고 있어 미관이 뛰어나고 블록을 조립하듯이 시공이 간편하여 타 공법에 비하여 공사기간이 1/4로 줄일 수 있는 등의 효과가 예상됨.
- 절토부 옹벽은 전체공사의 약 50% ~ 60% 수준으로 금액으로는 2.5천억원~3천억원 규모로 예상되며, 각 도·시·군 관급 토목공사, 단지조성공사 등 국가 및 민간사업에 활용 가능한 상황임.
- 이와 같이 현 상태에서 요구가 예상되는 산업 폐기물에 대한 처리 방안 및 맞춤 제품 개발에 초점을 맞춤.
- 산업폐기물인 LCD 폐유리를 이용하므로써 지속가능한 개발을 하고 사회적 문제를 해소하는 방안으로 신규 시장을 창출함.
- 본 연구기간 내에 LCD 폐유리 분말을 이용한 프리캐스트 콘크리트 시작품을 개발하여 특허등록 후 실용화 가능
- 본 연구에서 개발하게 될 고강도 콘크리트 및 고성능 콘크리트 제품을 새로운 사업모델을 필요로 하는 2차 제품 업체에 기술이전의 방법으로 실용화.
- 고성능이 요구되는 건설영역에서 성능이 차별화된 콘크리트 제품으로 활용 가능함.

5.2 기대효과

○ 기술적 측면
- LCD 폐유리를 혼입한 콘크리트의 매뉴얼 제작을 통하여 새로운 건설 재료에 대한 국내 기술 확보
- 본 연구에서 기획중인 구조물을 포함한 여타의 토목 구조물로 확대 적용 및 사용 가능성의 기대
- LCD 폐유리 분말을 이용한 프리캐스트 콘크리트 제조시 LCD 폐유리에 다량 함유된 SiO2 성분의 포졸란 작용으로 콘크리트 품질 향상 도모함
- 고강도 콘크리트로서 소요성능 확보를 위한 부재크기의 축소 및 감소로 인한 다양한 시공성능과 현장 적용성 확보 가능

○ 경제적·산업적 측면
- 시멘트 대체재료로서 LCD 폐유리 분말을 이용함으로써 비용절감 효과 및 탄소배출 저감효과 있음
- 콘크리트의 고품질화를 통한 건설기술의 향상과 더불어 산업폐기물 활용을 통한 생산비용 절감 효과 기대됨
- 제품의 고강도 및 고성능화로 내구성 향상과 내구 연한의 증가, 유지관리비 및 시공비 저감효과

○ 사회적 측면
- 산업폐기물인 매립되는 LCD 폐유리를 재활용함으로써 정부 환경정책에 부응하고 미래지향적이고

지속가능한 효과를 도모함

- 지역 당면 과제인 LCD 폐유리의 처리문제에 대한 선택지를 늘려주는 성과를 가져 매립으로 일관하던 방식에서 건설 재료로 사용가능할 것으로 기대됨

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

-Y. Shao 등(2000)은 시멘트 대체로써, 콘크리트 강도 및 알칼리 실리카 반응성 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 유리는 입자별로 #100 체(150μm)를 통과하고 #200체 (75μm)에 남는 것, #200체 (75μm)를 통과하고 #400체 (38μm)에 남는 것, #400체 (38μm)를 통과하는 것으로 총 3가지로 분류하였다. 압축강도 실험결과 폐유리의 입도가 작을수록 압축강도가 크게 나타났으며, 38μm이상의 폐유리 분말을 혼입한 경우 일반 콘크리트에 비해 재령 3일에 91%, 재령 7일에 84%, 재령 28일에 96%, 재령 90일에 108%로 모든 양생기간 동안 배합강도의 75%를 초과하였다. 폐유리와 실리카 흄을 동시에 혼입한 콘크리트의 강도발현 특성을 보면 재령 7일에는 실리카 흄만 혼입한 콘크리트와 비교하여 20%이상 낮은 압축강도가 측정되었으나 재령 28일 이후에는 실리카 흄만 혼입한 콘크리트와 유사한 압축강도를 나타냈다. 이는 폐유리의 혼입에 의한 포졸란 반응의 특성이 빠르게 반응하는 실리카 흄에 비해 늦게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 유리와 실리카 흄의 하이브리드(hybrid) 혼입을 통해, 콘크리트 배합의 경제성 및 압축강도 성능을 이끌어 낼 수 있음을 나타낸다.

-Collins(1994)는 ice lens formation theory를 주장하였다. 이 이론은 응집력을 지니지 않은 다공성 재료에 열 흐름(Heat flow)이 수직방향으로 흘러 얼음이 점진적으로 형성된다고 설명한다. 그러나 이 이론은 air void의 중요성을 설명하지 못하고 있다. 이 후 Power(1945, 1949)[7]는 air void의 역할을 설명한 “수압 이론(hydraulic pressure theory)"를 발표하게 되고, 그 후 Power and Helmuth(1953)[8]에 의해 ”삼투압이론(osmotic pressure theory)"이 제안되어진다. 이러한 이론을 바탕으로, Litvan(1972, 1973, 1975, 1980)에 의해 이론이 발전되어졌고, 콘크리트의 동결융해 작용에 의한 메커니즘 이론을 정립하게 되었다.

-N. Salemi 외(2013)의 연구에 의하면 최근 이슈가 되고 있는 나노 기술을 콘크리트 포장에 접목시켜 고성능 콘크리트 포장에 대한 연구를 하였다. 사용된 nano-silica의 경우 C-S-H겔 사이에서 나노 필러 역할을 하며 nano-silica와 수산화칼슘의 포졸란 반응으로 인해 C-S-H가 증가하고 이로 인하여 콘크리트의 강도 및 내구성이 향상된다. nano-alumina는 알루미늄산 칼슘의 수화 반응에 따라 수산화칼슘과 반응하며, 이로 인해 콘크리트의 압축 및 휨과 같은 물리적 성능을 향상시키는 역할을 한다. 또한 동결융해에 대한 저항성을 향상시키기 위하여 사용되는 섬유를 혼입한 콘크리트와 비교하였다. 내구성능은 ASTM C 666 규정에 따라 동결융해 후 300cycle까지의 강도감소율로 비교·분석하였다. 그 결과, nano-silica 및 nano-alumina를 혼입한 경우에 PP섬유를 혼입한 경우보다 우수한 동결융해 저항성을 나타내었다. nano-silica의 경우 5% 혼입한 경우 동결융해 환경 하에서 가장 낮은 강도 감소율을 나타내었으며, nano-alumina의 경우 3% 혼입한 경우 가장 낮은 강도 감소율을 보였다

-R. Nassar 외(2013)는 다량의 플라이애쉬를 치환하여 현장에 적용하여 시험을 수행하였으며, 치환율 25, 50%에 대하여 비교 분석을 실시하였다. 사용된 플라이애쉬는 Class C 플라이애쉬이며, 현재 사용되고 있는 플라이애쉬 25% 혼입한 시험체를 표준시험체로 설정하였다. 압축 강도 및 휨강도 결과, 재령 7일, 재령 28일 조기강도의 경우 낮은 강도를 나타내었으며, 재령 90일에서 표준시험체 보다 높은 강도를 나타내었다. 또한 염소이온 저항성의 경우 현장 코어 및 실내 시험의 모든 결과에서 낮은 투과성을 나타내었다

-LCD 폐유리 미분말을 시멘트 치환재료로써 사용한 연구로서 유동성 측면에서는 치환율 15%까지는 비슷하거나 더 양호하게 나타냈었고 강도발현에서도 치환율 15%까지는 유사하거나 더 양호한 강도 발현 경향이 나타나 LCD 폐유리 미분말의 분말도를 시멘트와 유사한 분말도로 제조한다면 LCD 폐유리 미분말을 콘크리트용 혼화재로서 사용이 가능할 것으로 판단된다

-콘크리트에서의 염화물 이동에서 골재의 경우 투수성이 매우 낮으므로 염화물 이동에 거의 영향을 미치지 않지만 굵은 골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면부에 발생하는 공극으로 인하여 염화물 이동이 일어난다. 이때 골재의 크기가 염소이온 확산계수에 영향을 주기도 하지만 시멘트 페이스트의 특성이 콘크리트에서 염화물 이동에 큰 영향을 미친다. 염화물의 이동방법으로는 자유 염화물 이온의 확산, 염화물이 포함된 용액의 모세관 작용 또는 삼투작용, 전기장에 의한 전자의 이동 등 각각의 방법들이 복합적으로 일어난다.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Incorporating Liquid Crystal Display (LCD) Glass Waste as Supplementary Cementing Material (SCM) in Cement Mortars—Rationale Based on Hydration, Durability, and Pore Characteristics	금오공과대학교 산학협력단	교신저자	materials	-	2018.12.13	단독 사사	SCI
2	논문	LCD 폐유리를 잔골재로 사용한 150 MPa급 초고강도 콘크리트의 재료거동 및 강도특성	금오공과대학교 산학협력단	교신저자	Journal of the Korea Concrete Institute	-	2017.10.24	단독 사사	비SCI
3	논문	LCD 폐유리 미분말을 사용한 콘크리트의 염해내구성 평가	금오공과대학교 산학협력단	교신저자	한국건설순환자원한회 논문집	-	2018.12.30	단독 사사	비SCI
4	논문	PSC I형 거더 실물 모형체 실험을 통한 동적거동특성 분석의 실용적 모델링 기법 연구	금오공과대학교 산학협력단	교신저자	Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection	-	2018.11.02	단독 사사	비SCI
5	특허	LCD 폐유리 혼입 프리캐스트 콘크리트 옹벽	금오공과대학교 산학협력단	발명자	대한민국	-	2018.12.31	-	출원
6	시제품	LCD 폐유리 혼입 프리캐스트 콘크리트 With-rock 옹벽 시제품 제작	금오공과대학교 산학협력단	제작자	대한민국	-	2018.10.22	-	-
7	학술 발표 논문	LCD 미분말로 잔골재를 대체한 초고강도 콘크리트의 강도비교	금오공과대학교 산학협력단	교신저자	KSCE 2017 CONVENTION	-	2017.10.19	단독 사사	-

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
8	학술 발표 논문	황산염해에 따른 LCD 미분말 혼입 콘크리트의 강도 특성	금오공 과대학 교 산학협 력단	교신저 자	2017 콘크리트학 회 가을학술대 회	-	2017.11.02	단독 사사	-
9	학술 발표 논문	LCD 미분말을 혼입한 콘크리트 수로관의 휨 거동	금오공 과대학 교 산학협 력단	교신저 자	2017 한국건설순 환자원학회 가을학술발 표	-	2017.11.17	단독 사사	-
10	학술 발표 논문	Study on the compressive strength of mortar with finely pulverized LCD glass powder	금오공 과대학 교 산학협 력단	교신저 자	2018 2nd International Conference on Civil Engineering	-	2018.05.06	단독 사사	-
11	학술 발표 논문	A Properties of Concrete Using LCD waste glass Subjected to Sulfate Attack	금오공 과대학 교 산학협 력단	교신저 자	3rd Third International Conference on Applied Engineering , Materials and Mechanics 2018 (3rd ICAEMM 2018)	-	2018.04.21	단독 사사	-
12	학술 발표 논문	LCD 혼입 콘크리트의 염분침투 저항성 평가	금오공 과대학 교 산학협 력단	교신저 자	한국콘크리 트학회 2018년 봄학술대회	-	2018.05.03	단독 사사	-
13	학술 발표 논문	물-결합재 비에 따른 LCD 폐유리 모르타르의 강도특성	금오공 과대학 교 산학협 력단	교신저 자	KSCE 2018 CONVENTI ON	-	2018.10.18	단독 사사	-
14	학술 발표 논문	LCD 혼입 모르타르의 열중성자 차폐 특성	금오공 과대학 교 산학협 력단	교신저 자	한국콘크리 트학회 2018년 가을학술대 회	-	2018.11.08	단독 사사	-
15	학술 발표 논문	황산마그네슘 침식의 기간별 LCD 미분말 혼입 콘크리트에 미치는 영향	금오공 과대학 교 산학협 력단	교신저 자	한국콘크리 트학회 2018년 가을학술대 회	-	2018.11.08	단독 사사	-

제12장. 참고 문헌

[1] 윤승조, 박정민, “ 폐 LCD 유리 미분말을 이용한 콘크리트의 활용가능성에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제 28권, 제 8호, p95-102 (2012)

[2] 이승태, 김성수, 김종필, “ 콘크리트의 황산염침식 및 평가 규준”, 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, p911-914 (2008)

[3] Y. Shao, T. Leforta, S. Morasa, D. Rodriguezb , “Studies on concrete containing ground waste glass” Cement and Concrete Research (2000)

[4] 조세아, “잔골재를 대체한 LCD 폐유리 콘크리트의 특성”, 금오공과대학교 대학원 석사학위논문 (2016)

[5] 박상훈, “폐LCD유리 미분말 치환율 변화에 따른 콘크리트용 혼화재로써 활용 가능성 분석”, 충주대학교 산업대학원 석사논문 (2011)

[6] Collins, A. R., The destruction of concrete by frost, Institute of civil engineering (1994)

[7] T. C. Powers, “The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete”, Research Laboratories of the Portland Cement Association”, Vol. 29, pp. 184-211 (1949)

[8] T. C. Powers, R. H. Helmuth, “Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste during Freezing”, Highway Research Board, No. 32 (1953)

[9] 정범석, 최판길, 윤경구, 권수안, “열화된 줄눈콘크리트 포장의 파손원인 분석”, 한국도로학회 봄학술대회 논문집, pp. 211-217 (2009)

[10] 이승훈, 김형두, “복합열화 환경하에서의 고로슬래그미분말 사용 콘크리트의 내구성능 평가”, 구조물진단학회지, Vol.14, No.2, pp. 171~175 (2010)

[11] 나옥빈, 이재승, “제설제 사용에 따른 콘크리트 포장의 염화물 침투 예측기법”, 한국방배학회논문집, Vol. 14, No. 2, pp. 77~83 (2014)

[12] N. Salemi and K. Behfarnia, “Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement”, Construction and Building Materials, Vol. 48, pp. 934-941 (2013)

[13] R. Nassar, P. Soroushian and T. Ghebrab, “Field investigation of high-volume fly ash pavement concrete”, Resource, Conservation and Recycling, Vol. 73, pp. 78-85 (2013)

[14] 박기태, “LCD 폐유리 미분말로 잔골재를 대체한 초고강도 콘크리트의 효용성에 관한 연구”, 금오공과대학교 대학원 석사학위논문 (2017)

[15] 김용무, “재활용 고밀도 산업 폐유리가 콘크리트 내구성에 미치는 영향”, 강릉원주대학교 일반대학원 석사학위논문 (2017)

[16] 최성, “플라이 애쉬를 혼입한 콘크리트의 탄산화 특성 연구”, 성균관대학교 일반대학원 석사학위논문 (2009)

[17] 박재임, 배수호, 이광명, 하재담, “황산염 침투를 받은 콘크리트의 내염해 특성”, 한국도시환경학회집, 제 11권, 제 2호, p145~152 (2011)

[18] 최성, 이광명, 정상화, 김주형, “급속 촉진 탄산화 시험을 통한 플라이애쉬 콘크리트의 탄산화 특성 연구”, 콘크리트학회논문집, 제 21권, 제 4호, p449-455 (2009)

[19] 유성원, 방기성, 정상화, 장승필, “급속탄산화 시험기에 의한 플라이애시 콘크리트의 탄산화 특성 연구”, 대한토목학회논문집, 제 27권, 제 4호, p601-607 (2007)

[20] 심종성, 박철우, 박성재, 강태성, 주민관, 김태수, “차염성 저발열시멘트의 급속동결융해 저항성에 관한 실험성 연구”, 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, Vol. 2008, No. 5, p589-592 (2008)

[21] 고경택, 한민철, 이병덕, “동결융해에 대한 내구성 설계”, 콘크리트학회지, Vol. 27, No. 5, p30-35 (2015)

[22] 임정호, “플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성 및 기포조직에 관한 연구”, 명지대학교 대학원 석사학위논문 (1998)

[23] 유일환, “폐유리와 플라이애쉬를 혼입한 포장 콘크리트의 내구성 평가”, 고려대학교 대학원 석사학위논문 (2014)

[24] 김길수, “균열 및 철근부식에 의해 열화된 콘크리트 구조물의 성능저하 해석”, 연세대학교 대학원 석사학위논문 (2005)

[25] 정동환, “폐유리 미분말과 메타카올린을 사용한 내 황산염 콘크리트의 개발에 관한 연구”, 원광대학교 대학원 박사학위논문 (2018)

[26] 이민우, “염해 및 탄산화의 복합열화 작용에 의한 부식촉진 시험과 장기폭로 시험의 상관성에 관한 연구”, 상명대학교 대학원 석사학위논문 (2015)

[27] Caijun, S. and Keren, Z. “A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete”, Resources, Conservation and Recycling Vol.52, No.2, pp.234-247, 2007.

[28] Saraya, M. E. S. I. “Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study“, Construction and Building Materials Vol.72, pp.104-112, 2014.

[29] 박상훈. “폐LCD유리 미분말 치환율 변화에 따른 콘크리트용 혼화재로써 활용 가능성 분석”, 충주대학교 산업대학원 석사논문, 2011.

[30] Yoon, S.J., Park, J.M. “A study on the possibility of concrete using waste LCD glass powder”, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol.28, No.8, pp.95-102, 2012.

[31] KDIA. 디스플레이산업 주요 통계, 2017.

[32] Shin, D. Y., Kang, L. S., Park, J, L., Lee, C. G., Yoon, J. H., and Hong, H. S. “Current Research Trend on Recycling of Waste Flat Panel Display Panel Glass”, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, Vol.24, No.1, pp.58-65, 2015.

[33] 전성환, 민경산, 소양섭. “TFT-LCD 폐유리 사용 고강도 콘크리트 파일의 특성”, 한국

세라믹학회지, 제47권, 제5호, pp.419-425, 2010.

[34] Oh, B.H., Jang, S.Y., and Shin, Y.S. "Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures", Magazine of Concrete Research, vol.55, No.2, pp.117-124, 2003.

[35] Buenfeld, N.R., Shurafa-Daoudi, M.T., and Mcloughlin, I.M. "Chloride transport due to wick action in concrete," In: Chloride penetration into Concrete, L.O. Nilsson, and J.P. Oliver,. eds., RILEM Publication, Pari, France, pp.302-324, 1997.

[36] 송하원, 백승우, 안기용. "해안 환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 시간의존적 염화물침투 평가", 한국콘크리트학회 논문집, Vol.19, No.5, pp.585-593, 2007a.

[37] Bamforth, P.B., and Price W.F. "Factors influencing chloride ingress into marine structures", In: International Conference Concrete 2000, R.K. Dhir and M.R. Jones, eds, pp.1105-1118, 1993.

[38] Bentz, E.C., Evans, C.M., and Thomas, M.D.A. "Chloride diffuison modeling for marine exposed concretes", In: corrosion of reinforcement in concrete construction, C.L. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg, eds., Cambridge, UK, pp.136-145, 1996.

[39] 송하원, 안기용, 이창홍, 정민선. "부식 개시 시 시멘트 수화물의 pH 저하 저항성", 한국콘크리트학회 2007 봄 학술발표회, 제2007권, 제5호, pp.661-664, 2007b.

[40] Song, H.W., Lee, C.H., and Ann, K.Y. "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments", Cement and Concrete Composites, Vol.30, No.2, pp.113-121, 2008b.

[41] KS F 2402, "콘크리트의 슬럼프 시험방법, 한국표준협회", 2017.

[42] KS F 2403, "콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법", 한국표준협회, 2014.

[43] KS F 2425, "시험실에서 콘크리트 시료를 만드는 방법", 한국표준협회, 2017.

[44] NT BUILD 492 , "Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments", Nordtest, 1999.

[45] NT BUILD 443, "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration", Nordtest, 1995.

[46] KS F 2711, "전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험방법", 한국표준협회, 2017.

[47] Kim, S. K., Kang, S. T., Kim, J. K., and Jang, I. Y. "Effects of Particle Size and Cement Replacement of LCD Glass Powder in Concrete", Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2017, Article ID 3928047, 2017.

[48] KS L 5109 "굳지 않은 수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합 방법", 한국표준협회, 2017.

[49] KS L 5105 "수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법", 한국표준협회, 2017.

[50] Basheer, P.M.A. "Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures", Construction and Building Materials, Vol.10, No.1, pp.27-37. 1995.

[51] Spiesz, P. "RCM: A new model accounting for the non-linear chloride binding isotherm and the non-equilibrium conditions between the free- and bound-chloride

concentrations, Construction and Building Materials, Vol.27, No.1, pp.293-304, 2012.
[52] 김재환. “염화물 침투에 따른 알루미나 시멘트 콘크리트의 내구성 평가”, 연세대학교 대학원 석사논문, 2009.

9. 뒷면지

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.