

LCD 폐유리 콘크리트의 염화물 확산에 관한 연구

A Study on the Chloride Diffusion of LCD Waste Glass Concrete

양희준¹, 김재돈², 장일영^{3*}

Hee-Jun Yang¹, Jae-Don Kim², Il-Young Jang^{3*}

〈Abstract〉

The purpose of this study is to use waste resources and improve the physical properties of concrete by crushing LCD waste glass for which an appropriate recycling method has not been developed and mixing it into concrete. LCD waste glass was pulverized into two sizes with an average particle diameter of 5 μ m and 10 μ m using a ball mill, and cement paste and concrete were produced by substituting 10% and 20%. Cement paste was used for XRD analysis, and concrete was used for compressive strength test, micropore structure test, and rapid chloride penetration test. As a result of analyzing the hydrate composition by XRD, the reduction of calcium hydroxide due to LCD substitution was roughly confirmed, and in the result of compressive strength, concrete including LCD powder showed higher strength than OPC, and was up to 24% higher at 5 μ m-20%. In addition, the replacement of the LCD powder reduced the size of the pores inside the concrete, and reduced the penetration rate of chloride. The reason for this result is believed to be due to the pozzolanic reaction caused by SiO₂ contained in a large amount of waste LCD glass. Calcium hydroxide produced by the hydration reaction reacts with SiO₂ to form C-S-H gel, and it is thought that the gel fills the voids in the concrete to increase the compressive strength and prevent the penetration of harmful ions.

Keywords : *Liquid Crystal Display, concrete, rapid chloride penetration*

-
- | | |
|----------------------------------|--|
| 1 정회원, 주저자, 금오공과대학교 건설기술연구소, 연구원 | 1 Dept. of construction technology institute, Kumoh national Institute of Technology |
| 2 정회원, 공동저자, 금오공과대학교 토목공학과, 박사과정 | 2 Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology |
| 3* 정회원, 교신저자, 금오공과대학교 토목공학과, 교수 | 3* Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology |
- E-mail: jbond@kumoh.ac.kr

1. 서론

IT, 가전, 스마트폰 산업이 발전함에 따라 다양한 디스플레이 제품의 사용량 또한 지속적으로 증가하고 있다. 그 중에서도 액정표시장치(Liquid Crystal Display; LCD)는 저렴한 생산단가, 낮은 소비전력 그리고 경량화 등의 장점을 지니고 있어 현재 가장 널리 사용되어 지고 있는 디스플레이다. LCD 디스플레이 제품은 평균 5-6년 정도로 짧은 수명주기를 가지고 있기 때문에 방대한 양의 폐기물을 발생시키지만 마땅한 재활용 방안이 개발되지 않아 소각, 매립 등의 환경부하가 큰 방법들에 의해 처리되어지고 있다.^{1,2)}

또한, 건설 산업에 필수적으로 사용되는 재료인 시멘트는 제조하는 과정에서 탈탄산화를 거치기 때문에 다량의 이산화탄소를 배출한다. 이산화탄소는 지구온난화에 가장 밀접하게 작용하는 기체로써 국제적 협약을 통해 엄격하게 배출량이 통제되고 있다. 이에, 건설 산업에서는 이산화탄소 배출량을 감소시키기 위한 방안으로 플라이애시, 고로슬래그 등의 산업부산물을 시멘트 혼화재로 적용하여 이산화탄소의 배출이 많은 시멘트의 사용량을 줄임과 동시에 산업부산물을 효과적으로 처리하고 있다.³⁾

LCD 폐유리는 높은 함량의 가용성 SiO_2 성분을 포함하므로 실리카 폼, 플라이애시와 같은 포졸란계 재료와 마찬가지로 포졸란 반응을 기대할 수 있다. 포졸란 반응은 시멘트 경화체 내 생성된 수산화 칼슘과 혼화재로부터 용해된 SiO_2 와 반응하여 C-S-H 겔을 형성하는 것으로,^{4~5)} 유리 분말의 입경에 따라 반응성에 차이가 나타나며 일반적으로 $75\mu\text{m}$ 이하의 입경에서 뚜렷한 반응이 나타나기 시작하고 더욱 입경이 작아 질수록 반응성이 커진다.⁶⁾ 폐유리 분말을 평균 입경 $75\mu\text{m}$ 이하의 폐유리를 최대 치환율 40%까지 치환 시 재령 28

일 OPC 콘크리트 대비 100%를 상회하는 압축강도를 나타냈으며, 이러한 강도향상 경향은 치환율 범위 10-20%에서 더욱 확연하게 나타났다.⁷⁾

이에, 본 연구에서는 LCD 폐유리 분말을 시멘트 혼화재로 활용하여 페이스트 및 콘크리트를 제작하고 그에 따른 압축강도, 수화물 조성분석, 미세공극구조 및 염해내구성을 평가하여 LCD 혼입에 따른 포졸란반응 및 C-S-H gel의 생성을 확인함과 그에 따른 콘크리트의 물리 화학적 변화를 정립하여 LCD 폐유리의 시멘트 혼화재로의 적용 가능성을 판단하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement; OPC)와 LCD 분말을 반응성 분체로 활용하였다. LCD 폐유리의 입경에 따른 반응성을 분석하기 위해 LCD 제작 공정 중에 발생하는 순도 높은 폐유리를 불밀을 활용하여 $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ 두 가지 평균입경을 가지는 LCD 분말을 준비하였으며 형상은 Fig 1. 과 같다. 사용된 반응성



Fig. 1 LCD powder shape

분체의 물리화학적 특성을 Table 1.에 나타내었다.

Table 1. Physical and chemical properties of binders used in this study

		OPC	LCD	
			5 μ m	10 μ m
Oxides (%)	B ₂ O ₃	0.00	15.30	13.40
	Na ₂ O	0.09	0.27	0.37
	MgO	2.69	0.38	0.41
	Al ₂ O ₃	3.40	14.50	14.50
	SiO ₂	15.60	49.90	50.30
	K ₂ O	1.71	0.04	0.05
	SO ₃	1.45	0.00	0.00
	CaO	70.00	10.30	11.20
	Fe ₂ O ₃	4.37	0.15	0.13
	SrO	0.10	7.54	8.17
	BaO	0.00	1.12	0.97
Average diameter(μ m)		9.05	5.13	10.09
Specific gravity (g/cm ³)		3.17	2.79	2.79

OPC의 주요 화학성분은 CaO로 70%정도의 함량을 나타냈고, LCD는 SiO₂가 약 50%로 가장 높은 함량을 나타냈다. SiO₂는 시멘트의 수화 생성물인 수산화칼슘과 반응하여 C-S-H gel을 생성하는 물질로써 콘크리트 조직을 치밀하게 하므로 강도증진 및 유해이온 침투 저항성을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 또한, LCD 페유리는 다른 종류의 페유리와는 달리 알칼리성분을 극소량만 포함하므로 팽창으로 인한 균열을 야기하는 알칼리-골재 반응이 제한될 것으로 판단된다.

잔골재는 비중 2.58, 조립률 2.85, 흡수율 0.8인 세척사를 사용하였고, 굵은 골재는 최대치수 비중 2.61, 흡수율 0.76, 최대치수 25mm인 쇠석을 사용하였다.

2.2 배합설계 및 시편제작

LCD의 치환율에 따른 강도발현 특성, 및 염화물 침투특성을 평가하기 위해 Table 2. 과 같이 페이스트와 콘크리트 배합설계를 산정하였다. 페이스트는 물-결합재 비는 0.4로 고정하며, LCD 페유리 치환율을 0, 10 및 20%로 설정하였다. 콘크리트는 페이스트와 동일한 물-결합재 비와 LCD 치환율을 적용하고, 모든 배합에서 불필요한 화학 반응을 최소화하기 위해 화학 첨가제는 사용하지 않았다.

X선 회절 분석을 위한 페이스트의 배합은 비커와 유리막대를 활용하여 5분간 비빔을 진행하고 50 × 50 × 50mm 크기의 정사각형 몰드에 타설하였다. 콘크리트는 재료가 충분히 혼합 될 수 있도록 기계식 배합기를 활용하여 2분간 건비빔 후 배합수를 투입하여 4분 동안 실시하고, 압축강도 측정을 위해 원주형 몰드 (Ø 100 × 200mm)에 타설하였다. 모든 배합은 24시간 후에 탈형 하여 20±2°C 조건에서 28일간 수중 양생하였다. 염소이온 침투 특성 실험을 위한 시편은 원주형 몰드를 50mm 두께로 절단하여 준비하였다.

2.3 수화생성물 분석

LCD 혼입에 따른 수화물 조성 변화 특성을 평가하기 위해 X선 회절분석을 실시하였다. 재령 28일의 페이스트 시편을 잘게 부수어 이소프로판올에 약 24시간동안 침지시켜 수분을 제거하고, 진공데시케이터에서 약 3일간 건조를 실시하였다. 이후에 막자사발을 통해 더욱 분쇄하고 150 μ m체를 통과한 분말 시료를 채취하여 분석에 사용하였다. XRD 분석은 측정범위 5-55° (2 θ), 측정 속도 4° /분의 조건으로 실시하였다.

2.4 압축강도 특성

LCD 폐유리의 입경별 혼입률에 따른 강도 발현 특성을 평가하기 위해 KS F 2405 (콘크리트 압축강도 시험)에 의거하여 재령 28일의 콘크리트 시편의 압축강도를 측정하였다. 최대하중 2000kN의 만능재료시험기(Universal Testing Machine; UTM)를 이용하여 재하속도 200kN/분의 하중제어 방식으로 수행되었다. 모든 배합별 콘크리트 시편은 5번의 압축강도 실험을 통해 획득한 강도 값을 평균하여 표기하였다.



Fig 2. Concrete compressive strength test

2.4 미세공극구조 분석

본 연구에서는 LCD 폐유리 분말의 입경별 혼입률에 따른 콘크리트 미세공극의 분포 및 공극률 등을 분석하고자 모든 배합의 재령 28일 콘크리트의 심부에서 모르타르 부분을 채취하여 진공데시케이터를 활용하여 약 24시간동안 건조를 거친 후에 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry)을 진행하였다. Micromeritics Instruments Corporation사의 장비를 사용 하였으며, 기공직경 1-1,000,000nm 최대압력 60,000PSI의 조건으로 진행하였다.

2.5 촉진 염화물 침투실험

LCD 입경별 혼입률에 따른 염화물 침투 특성을 평가하기 위해 촉진 염화물 침투 실험을 진행하였다. 실험방법은 Fig 3과 같이 KS F 2711(전기 전도도에 의한 염소이온 침투 저항성)에 준하여 실시하였다. 50mm 두께의 원주형 시편을 일방향 침투가 일어나도록 측면을 에폭시로 코팅하고, 콘크리트 내부를 포화상태로 유지하기 위해 수중에서 24시간 침지하였다. 콘크리트의 양쪽 단면에 원활한 전하의 이동을 위해 스테인리스 매쉬를 적용하였고 음극 셀에는 3% 염화나트륨용액, 양극 셀에는 0.3M 수산화나트륨 용액을 채운 후 60V의 직류전압을 6시간 동안 유지하고 매 30분마다 전류량을 모니터링하였다.

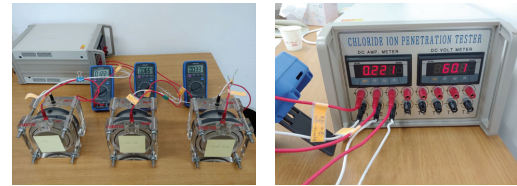


Fig 3. Rapid chloride penetration test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수화생성물 분석

재령 28일 LCD혼입 페이스트의 XRD 피크를 Fig 4에 나타내었다. XRD 피크 값으로 수화물의 양을 정확히 평가하기는 어렵지만, 동일한 조건에서 각 물질의 주요 피크치의 세기를 비교분석하여 상대적인 함량비교는 가능하다. XRD 분석 결과 C_3S , C_2S , Calcite, Aragonite, Ettringite, CH,

Table 2. Mix design of concrete and paste mixes

	LCD (%)	Binder		Water	Sand	Gravel	
		OPC	LCD				
Paste	0	1369.8	0	547.9	-	-	
	5 μ m	10	1232.8				137.0
		20	1095.8				274.0
	10 μ m	10	1232.8				137.0
		20	1095.8				274.0
	Concrete	0	403.3				0
5 μ m		10	362.9	40.3	802.7		
		20	322.6	80.6	798.2		
10 μ m		10	362.9	40.3	802.4		
		20	322.6	80.6	798.2		

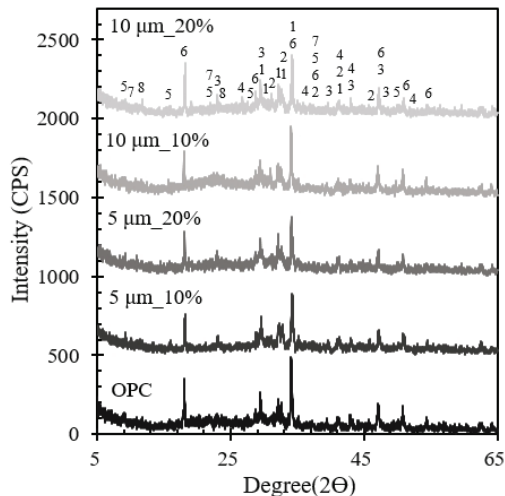


Fig. 4 XRD patterns of LCD-mixed pastes (1-C₃S, 2-C₂S, 3-Calcite, 4-Aragonite, 5-Ettringite, 6-CH, 7-Monosulfate, 8-Monocarbonate)

Monosulfate 및 Monocarbonate 피크가 확인되었다. 특히, CH 피크의 경우 눈에 띄는 변화를 나타내었다. 35° (2θ)부근에서 나타나는 CH의 메인피크가 입경에 상관없이 LCD 혼입률이 증가할수록 세기가 약해지는 결과를 보여주었다.

CH 피크 감소의 원인의 첫 번째로 LCD 치환에 따른 시멘트량 감소에 의한 CH의 생성량 부족과 두 번째로 포졸란 반응에 의한 CH의 소모의 가능성이 있다. 시멘트량의 감소에 의한 CH의 감

소는 비교적 명확하여 논란의 여지가 없으나, LCD 폐유리 분말의 포졸란 반응에 의해 CH 소모를 주장하기에는 근거가 부족하다. 포졸란 반응의 생성물인 C-S-H gel의 함량을 도출한다면 명확한 근거가 될 수 있지만 비결정성 고체인 C-S-H gel의 함량을 XRD 결과로 도출하기엔 많은 어려움이 있다.

이에, C-S-H gel이 콘크리트의 물리적 성질을 개선한다는 점에 착안하여 LCD 혼입에 따른 압축강도 및 미세공극 구조를 분석하여 포졸란 반응성을 확인하고자 한다.

3.2 압축강도 특성

재령 28일의 LCD 콘크리트 압축강도 결과를 Fig 5에 나타내었다. LCD가 혼입된 콘크리트의 경우가 OPC에 비해 높은 강도를 발현하는 것으로 나타났으며, 특히 평균입경 5 μ m의 LCD가 혼입된 시편에서 가장 높은 강도의 발현을 나타냈다. 이는 LCD 분말의 포졸란 반응에 의해 C-S-G gel이 생성되어 콘크리트 조직을 밀실하게 하여 압축강도의 상승을 이끌었다고 판단되며, LCD의 입경이 작을수록 비표면적확대에 의한 반응성 증대로 더 높은 강도의 상승을 나타낸 것으로 생각

된다. 또한, 치환율 20%까지는 압축강도 저하를 나타내지 않으므로 더 높은 치환율의 적용 또한 고려 가능할 것으로 판단된다.⁸⁾

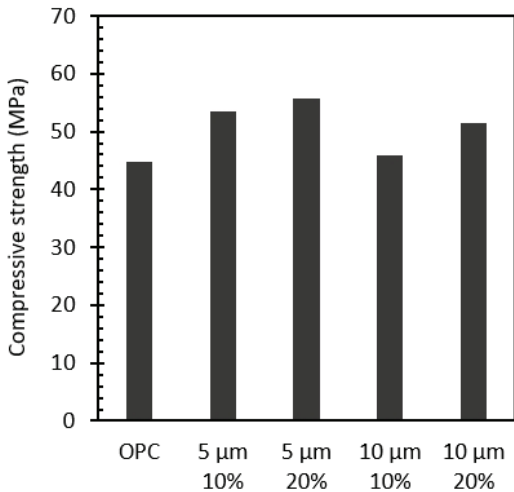


Fig. 5 Compressive strength of LCD-mixed concrete

3.3 미세공극구조 분석

MIP 분석에 의한 LCD 콘크리트의 공극입경에 따른 분포를 Fig 6에 나타내었다. 전체적으로

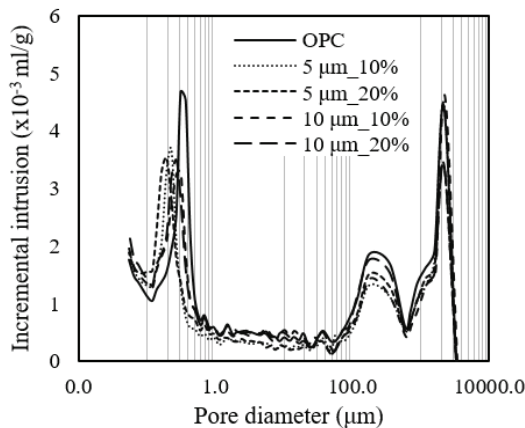


Fig. 6 Micropore structure of LCD-mixed concrete

LCD의 혼입은 공극량을 줄이는 것으로 나타났으며, 특히 1μm이하의 공극에서는 공극의 양이 감소됨과 동시에 더욱이 미세한 공극으로 전이되는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 모세관 공극 범위에서 LCD 입자의 채움 효과와 함께 포졸란 반응에 의한 C-S-H gel의 생성으로 비교적 큰 공극구조를 채우거나 공극을 분할하였기 때문으로 판단되며, 이와 같은 미세 공극구조 변화는 콘크리트 내부로 이온이 침투하는 특성에 변화를 줄 것으로 생각된다.

3.4 촉진 염화물 침투실험

LCD 콘크리트의 촉진 염화물 침투실험의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. KS F 2711에서는 통과 전하량(Coulombs)에 따라 콘크리트의 염소이온 침투성을 구분하고 있다. 4,000이상은 높음, 2,000-4,000은 보통, 1,000-2,000은 낮음, 100-1,000은 매우 낮음, 100이하는 무시 할 만하다로 규정하고 있다. OPC 콘크리트의 경우 약 3,182 Coulombs으로 일반적인 침투량을 나타내고 있지만, LCD 콘크리트의 경우 10μm_10%를 제

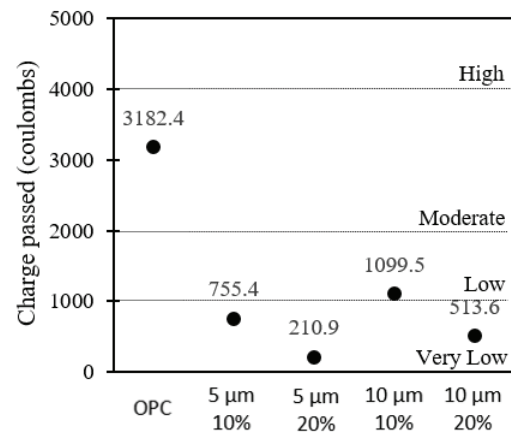


Fig. 7 RCPT result of LCD-mixed concrete

외한 경우에서 1,000 Coulombs이하의 낮은 통과 전하량을 나타냈다. 또한, 앞선 실험들과 마찬가지로 5 μ m의 LCD를 사용한 콘크리트가 우수한 성질을 나타냈다. 이러한 결과 역시 포졸란 반응에 의해 이온이 확산될 수 있는 공극의 양과 형태가 개선되었기 때문인 것으로 판단된다.⁹⁾

4. 결론

본 연구에서는 LCD 페유리를 입경 및 치환율에 따른 시멘트 페이스트와 콘크리트를 제작하여 수화생성물, 압축강도, 미세공극구조 및 촉진염화물 침투실험을 진행하였고 그 결과는 다음과 같다.

1. LCD 분말을 치환함에 따라 생성되는 CH의 양은 감소하였으며, 이는 치환함에 따라 시멘트의 절대량이 감소함과 동시에 LCD 분말에 의한 포졸란 반응에 의한 CH소모에 기인한 것으로 판단된다.
2. 최대 20%의 LCD를 치환한 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비해 최소 2.6%, 최대 24% 높은 강도의 발현을 나타냈고, 10 μ m보다 5 μ m의 LCD를 혼입한 콘크리트가 보다 평균 12% 높은 강도의 발현을 나타냈다. 이는, 포졸란 반응의 생성물인 C-S-H gel에 의해 콘크리트 내부 조직이 치밀해졌기 때문인 것으로 판단되며, 보다 미세한 입경을 가진 5 μ m의 경우 더 넓은 비표면적으로 인해 더욱 많은 gel이 생성 되었을 것으로 생각된다.
3. 촉진염화물 침투실험결과 LCD 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비해 낮은 침투량을 나타냈으며, 그 값은 5 μ m-10%, 5 μ m-20%, 10 μ m-10, 10 μ m-20% 순서로 76%, 91%, 66%, 84%로 나타났다. 이는 C-S-H gel의 생성에

의해 이온이 이동할 수 있는 공극의 크기를 줄이거나 공극을 분할하여 이동을 저하시킨 것으로 판단된다.

4. 콘크리트에서 시멘트의 일정부분을 LCD 페유리 분말로 치환한 결과 LCD의 높은 SiO₂ 함량으로 인한 포졸란반응이 확인되었고, 반응에 의해 생성된 C-S-H gel에 의해 콘크리트 내의 공극이 채워짐으로써 압축강도의 상승, 공극크기의 감소 및 이온침투 저항성이 향상되는 것을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 교내학술연구비(2018104055)에 의하여 연구된 논문이며, 본 연구를 위해 많은 지원을 아끼지 않으신 관계자께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 홍현선, 이희민, 공만식, 강홍윤, 한국지구시스템공학회지, 47, 5, (2010).
- [2] Wang, H.Y., Huang, W.L., Construction and Building Materials, 24, 6, (2010).
- [3] 안혜영, 박철우, 박희문, 송지현, 한국도로학회 논문집, 17, 2, (2015).
- [4] Matos, A. M., Sousa-Coutinho, J., CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS 36, (2012).
- [5] Liu, S., Xie, G., Wang, S., Journal of thermal analysis 119, 1, (2015).
- [6] Idir, R., Tagnit-Hamou, A., Cement And Concrete Composites 33, 1, (2011).
- [7] Pereira-de-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., Santos, P. M. S., Construction And Building

Materials, 31, (2012).

- [8] Kim, S.K., Kang, S.T., Kim, J.K., Jang, I.Y.
Advances in Materials Science and Engineering,
2017, 7, (2017).

- [9] Basheer, P.M.A., Construction and Building
Materials, 10, 1, (1995).

(접수: 2021.03.17. 수정: 2021.04.07. 게재확정: 2021.04.09.)