

# 산업부산물을 활용한 LCD 유리 미분말 혼입 콘크리트의 황산염침식 저항성

## Resistance to Sulfate Attack of Concrete Containing LCD glass powder Using Industrial By-products

김성겸<sup>1</sup> · 송재호<sup>2\*</sup>Seong-Kyum Kim<sup>1</sup>, Jae-Ho Song<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Lecturer, Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea<sup>2</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

\*Corresponding author: Jae-Ho Song, jhsong@kumoh.ac.kr

### ABSTRACT

**Purpose:** This study aims to enhance the resistance against sulfate attack compared to ordinary Portland cement (OPC) concrete by using liquid crystal display (LCD) as binder. **Method:** The fundamental properties including compressive strength and porosity of concrete replaced by LCD up to 15% at increments of 5% and in turn, the weight, volume, and strength loss of LCD-mixed concrete was analyzed. **Results:** For the concrete substituted by 5% of LCD, it showed the highest compressive strength at 28 days of curing, and particular at immersion of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution, it was achieved the lowest loss of weight, volume and strength due to an decreased porosity at capillaries. In contrast, there is no distinct difference of the sulfate attack resistance between LCD-mixed concretes under exposure of  $\text{MgSO}_4$  solution, excepted for OPC concrete. **Conclusion:** In this study, comparison of resistance to sulfate attack between LCD-mixed concretes, and it would be proposed the possibility of LCD usage as binder through long-term verification with extended replacement ratio and identification of changes of hydrates in the cement matrix.

**Keywords:** LCD Glass Powder, Concrete Admixture, Pore Structure, Sulfate Attack, Industrial By-products

### 요약

**연구목적:** 본 연구는 LCD 미분말의 혼입을 통해 기존의 OPC 콘크리트와 비교하여 황산염 침식 저항성을 높이는 것을 목적으로 한다. **연구방법:** 연구를 위해 LCD 미분말의 치환율을 0-15%로 설정하여 콘크리트의 압축강도 및 공극률을 포함한 기초물성을 평가하고, 두 종류의 황산 용액 침지에 따른 중량, 부피 및 강도 변화를 비교분석하였다. **연구결과:** LCD 미분말을 5% 치환한 경우 재령 28일에서 가장 높은 압축강도를 보였고, 특히 OPC과 비교하여 감소된 모세관 공극률은  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  용액에 침지한 실험결과에서 가장 적은 중량, 부피 및 압축강도 감소율을 나타냈다. 반면,  $\text{MgSO}_4$ 에 노출된 경우, LCD 혼입은 OPC에 비해 높은 황산염 침식 저항성을 나타냈지만 혼입률에 따른 차이는 미비하였다. **결론:** 본 연구를 통해 LCD 미분말 혼입에 따른 황산염 침식 저항성을 비교하였고, 해당 재료의 치환 범위 확대 및 수화물 조성 변화 분석을 동반한 장기 검증을 통해 LCD 사용가능성을 제고해야한다.

**핵심용어:** 액정디스플레이 유리분말, 콘크리트 혼화재, 공극 구조, 황산염침식, 산업부산물

Received | 2 April, 2019

Revised | 8 April, 2019

Accepted | 20 June, 2019

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

건설재료로서 성능과 품질향상을 추구하는 콘크리트 재료의 기술발전은 근래 구조물의 대형화, 고층화 및 다기능화를 가능케 하였으며 각종 재해와 재난으로부터 인간의 생명과 재산을 보호하는 중추적인 역할을 수행하고 있다. 이러한 배경으로부터 콘크리트 구조물은 열악한 환경과 조건 속에서도 그 기능을 유지할 수 있도록 설계, 시공되고 있다. 따라서 콘크리트 구조물은 설계 시 노출된 환경으로부터 얼마나 안전하게 사용 가능할지에 대한 내구성 측면의 고려가 동반되어야 한다. 그러나 특수한 환경을 갖는 해양구조물, 폐수처리 시설 등에서 콘크리트 내구성은 염해 및 황산염과 같은 화학적 침식으로부터 열화가 상대적으로 쉽게 발생되어 종종 구조적 문제를 일으킨다(Liu et al., 2017; Yoshida et al., 2010; Haynes et al., 2008). 또한 최근 사회적 문제로 부각되는 미세먼지 및 초미세먼지는 황산이온을 다량 포함하고 있으며(Seo, 2015), 이는 인간의 건강뿐만 아니라 오랜 기간 콘크리트 구조물 표면에 침식되어 C-S-H 분해촉진에 따른 콘크리트 강도저하 등 열화를 발생시킬 수 있다(Park et al., 2017).

이러한 황산염은 크게 황산나트륨(Sodium sulfate)과 황산마그네슘(Magnesium sulfate)을 예를 들 수 있으며 흔하게 흙과 물속에도 용해상태로 존재하고 산업과정에서도 쉽게 발생이 가능하다. 황산염에 의한 침식으로 콘크리트 내부구조는 시멘트에 의한 수화물보다 더 큰 부피를 갖는 에트링자이트(Tringite,  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ )와 석고(Gypsum,  $\text{CaSO}_4$ )가 생성되고 이로 인한 팽창균열이 연속적인 화학반응으로 구조물의 열화를 가속시키며 강도와 내구성의 저하를 초래한다(Metha, 1983). 이러한 콘크리트의 황산염 침식을 방지하고 내화학을 개선하기 위해 콘크리트와 함께 다양한 혼화재(Binder)를 혼입, 활용하는 연구가 많이 진행되고 있다(Lee., 2009; Kim et al., 2007; Moon et al., 2005; Santhanam et al., 2003; Moon et al., 2002; Wee et al., 2000). 특히 포졸란 반응성의 광물질을 시멘트 대체재로서 혼입하여 수산화칼슘(Calcium hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )의 소비를 유도하여 황산염과 반응 시 생성되는 석고 양을 줄이거나 에트링자이트의 생성에 기여하는 알루미늄이온( $\text{C}_3\text{A}$ )을 줄이기 위한 연구 결과가 보고되고 있다(Bae et al., 2010; Mangat et al., 1995).

한편, 국내 LCD (Liquid crystal display) 폐유리의 발생량은 연간 약 460,000톤 이상으로 집계되고 있으며 디스플레이 시장의 성장과 함께 급속도로 팽창하였다(Shin et al., 2015). 그러나 현재 대부분 매각, 소각, 매립 등을 통해 국가적 차원의 자원 낭비와 다양한 환경오염의 원인이 되고 있는 실정이다(Lee et al., 2013). 하지만 60% 이상의 높은  $\text{SiO}_2$ 를 포함한 LCD는 실리카흄(Silica fume; SF), 플라이 애쉬(Fly ash; FA), 고로슬래그 미분말(Ground granulated blast-furnace slag; GGBS) 등과 유사한 포졸란 반응성(Pozzolanic reaction)을 기대할 수 있고, 이로부터 콘크리트 미세구조의 수밀성 향상과 내구성 증진이 가능하다(Kim et al., 2018; Kim et al., 2017a; Kim et al., 2017b).

본 연구에서는 기존 건설재료인 OPC (Ordinary Portland cement; OPC)에 LCD 폐유리 미분말을 치환한 콘크리트의 황산염 침식에 대한 연구로서 황산나트륨( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 및 황산마그네슘( $\text{MgSO}_4$ ) 용액에 침지하여 화학적 침식의 영향을 압축강도, 부피 및 중량 변화를 측정하여 비교분석하였다. LCD 폐유리를 사용함으로써 황산염에 대한 콘크리트 구조물의 피해를 저감하고 콘크리트의 내구성에 미치는 영향을 확인하여 황산염 저항성을 높일 수 있는 새로운 방안을 제시하고자 하였다.

## 실험 방법

### 사용 재료

본 연구에서는 I사에서 생산된 LCD 폐유리를 평균 입경  $12 \mu\text{m}$ 로 미분쇄하여 혼화재로써 사용하였으며, OPC 및 LCD의 물리화학적 특성은 Table 1과 같다. 또한, 콘크리트 배합설계에 사용된 골재의 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다.

**Table 1.** Chemical and physical properties of binders

	Oxide composition								Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO		
OPC	65.42	19.09	4.06	3.11	3.79	0.10	1.58	2.85	3.15	3,450
LCD	10.88	69.39	19.01	-	-	0.23	0.05	0.44	2.79	2,940

**Table 2.** Physical properties of fine and coarse aggregate

	Fineness modulus	Water absorption (%)	Specific gravity
Fine aggregate	2.92	2.40	2.60
Coarse aggregate	7.27	0.60	2.65

### 시편 제작

본 연구에서는 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 따라  $\phi 100 \times 200$  원형 몰드를 사용하여 제작하였으며, 각 시편의 배합설계는 Table 3과 같다. 실험실 조건(온도  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 상대습도  $60 \pm 5\%$ )에서 콘크리트 타설 후 24시간 이내에 탈형을 실시하였으며, 측정 전까지 동일한 담수조건에서 양생을 진행하였다.

**Table 3.** Mix design for OPC concrete replaced by LCD powder

	W/B (%)	S/a (%)	Replacement ratio (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					
				Cement	LCD	Water	Sand	Gravel	AE
OPC			0%	9.94	0.00				0.099
OL5	44.0	42.8	5%	9.44	0.50	4.38	17.63	23.58	0.094
OL10			10%	8.94	1.00				0.089
OL15			15%	8.44	1.50				0.084

### 압축 강도

LCD 분말을 혼입한 콘크리트 시편의 압축강도 측정은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 따라 진행하였으며, 기초 물성 평가를 위해 재령 7, 28일, 황산염 침식 저항성 평가를 위해 침지 12, 26주 후 강도를 측정하였다.

### 공극 구조

본 연구에서는 LCD 분말의 치환에 따른 콘크리트 내부 공극률 및 공극 분포를 산정하기 위해 콘크리트 시편에서 약  $1.0\text{cm}^3$  크기의 조각을 채취해 Autopore IV 9500 장비(MICROMERITICS)를 이용하여 수은압입법(Mercury intrusion porosimetry; MIP)을 실시하였다. 측정 전 샘플의 수화 정지를 위해 알코올계 용매에 일주일간 침지한 후  $105^\circ\text{C}$ 에서 건조하여 수분은 완전히 제거하였다.

## 황산염 침식 저항성

황산염 침식 저항성 실험은 Fig. 1과 같이 JSTM C 7401(콘크리트의 용액침지에 의한 내약품성 실험 방법)에 따라  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  및  $\text{MgSO}_4$  10% 용액에 재령 28일 콘크리트 시편을 침지하여 진행하였으며, 12주, 26주에 부피 및 질량 감소율과 함께 압축강도 변화율을 측정하였다.

## 실험 결과 및 고찰

### 콘크리트 기초 물성

#### 압축 강도

산업부산물 중 폐유리를 혼화재로써 활용한 콘크리트의 역학적 성능 검증을 위해 평균 입경  $12 \mu\text{m}$ 의 LCD를 각각 0, 5, 10 및 15% 혼입한 콘크리트의 재령에 따른 압축 강도 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 압축 강도 측정용 시편은 원주형 몰드 ( $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ )를 이용하여 제작하였으며, 각 배합별 3개씩 측정하여 평균값을 사용하였다. 초기 재령 7일에서의 OPC 콘크리트는 39.3 MPa이었으며, LCD 혼입 콘크리트는 치환율과 관계없이 OPC 콘크리트와 비슷한 강도 값을 나타내었다. 하지만 재령 28일에 LCD 혼입 콘크리트는 OPC와 비교하여 높은 강도 발현을 보였으며, 5%를 혼입한 경우 약 18% 높은 53.2 MPa의 강도 값을 가지는 것으로 알 수 있었다. Kim et al.(2018)의 연구 결과에 따르면, 이러한 강도 증진 효과는 미분쇄된 LCD 분말이 OPC 수화 과정에서 시멘트 경화체 내 공극을 채우는 즉, 공극 충전 효과(Micro-filler effect)로 인해 발생하는 것으로 알려져 있다. 뿐만 아니라 시간이 지남에 따라 미분쇄된 LCD 분말이 OPC의 수화생성물인  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 C-S-H 겔을 형성하므로 28일 재령에서 OPC에 비해 높은 강도를 가지는 것으로 판단된다. 하지만, LCD 분말의 혼입량이 증가로 인한 시멘트 양의 감소는 콘크리트 매트릭스 내  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  생성량 감소를 야기하며(희석효과, Dilution effect) (Narayanan, 2008), 이로 인해 재령 28일에서의 LCD 혼입 콘크리트의 압축 강도는 치환량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸 것으로 사료된다.

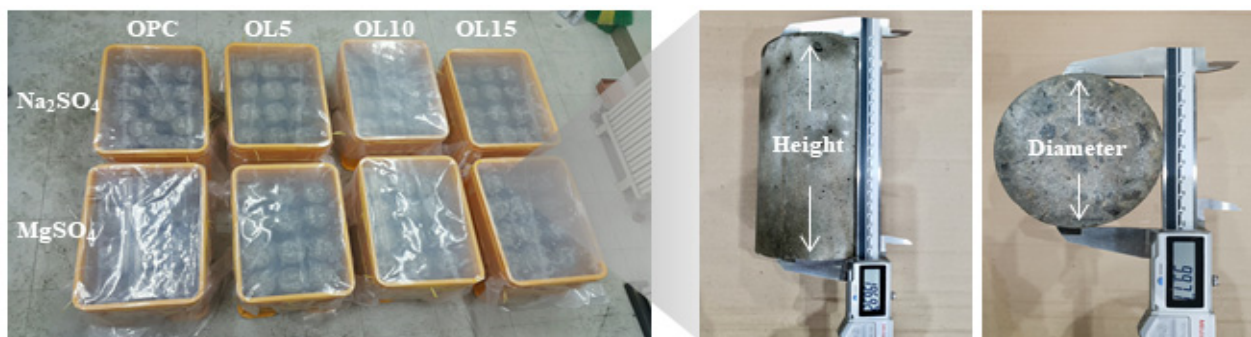


Fig. 1. Compressive strength for concrete partially substituted by LCD powder

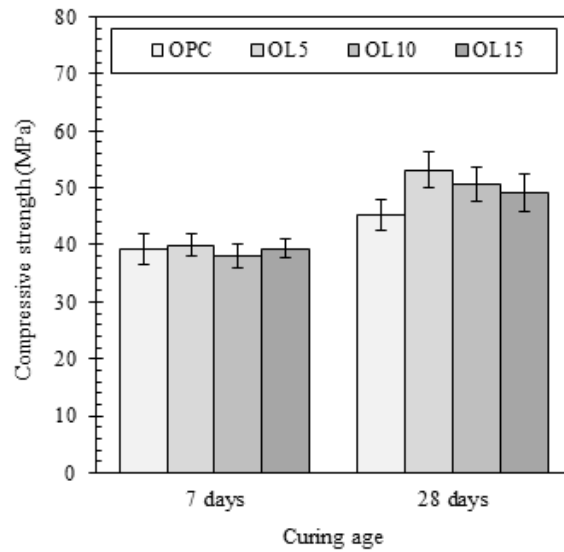


Fig. 2. Compressive strength for concrete partially substituted by LCD powder

### 공극 구조

재령 28일에서의 공극구조 분포 및 공극량을 확인하기 위해 콘크리트 압축 강도 시험 중 일부(약  $1.0\text{cm}^3$ )를 채취하여 수은 압입법을 실시하였다. 이 때, 공극 분포를 다음과 같이 정의하였다(Aligizaki, 2006).

- 1) Voids:  $> 10 \mu\text{m}$
- 2) Large-capillaries:  $0.05\text{-}10 \mu\text{m}$
- 3) Medium-capillaries:  $0.01\text{-}0.05 \mu\text{m}$
- 4) Small-capillaries:  $< 0.01 \mu\text{m}$

Fig. 3에서 알 수 있듯이, LCD 분말의 혼입은 총 공극의 감소하는 결과를 나타냈다. 예를 들어, OPC의 총 공극량은 19.23%로 가장 높았으며, 뒤를 이어 OL15 (18.90%), OL10 (16.99%), OL5 (16.33%) 순이었다. 또한, 모세관 공극 (Capillary pores) 영역에서의 공극양이 재령 28일 압축 강도와 비슷한 경향을 나타내었는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 LCD 분말의 포졸란 반응에 의한 것으로 판단된다. 시간이 지남에 따라 C-S-H 겔이 형성되어  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 차지하는 모세 공극은 줄어들고 겔 공극(Gel pores)이 증가하여 전체 공극양이 감소하고, 더 나아가 강도 발현에도 영향을 미친 것으로 사료된다. 하지만 본 연구에서 실시된 수은압입법은 제한적으로 겔 영역의 공극이 측정 가능하므로 이에 대해 질소, 헬륨 등을 이용한 가스흡착법과 같은 시험분석을 추가적으로 수행하여 겔 공극에 대한 정성/정량 분석이 뒷받침되어야 할 것으로 사료된다.

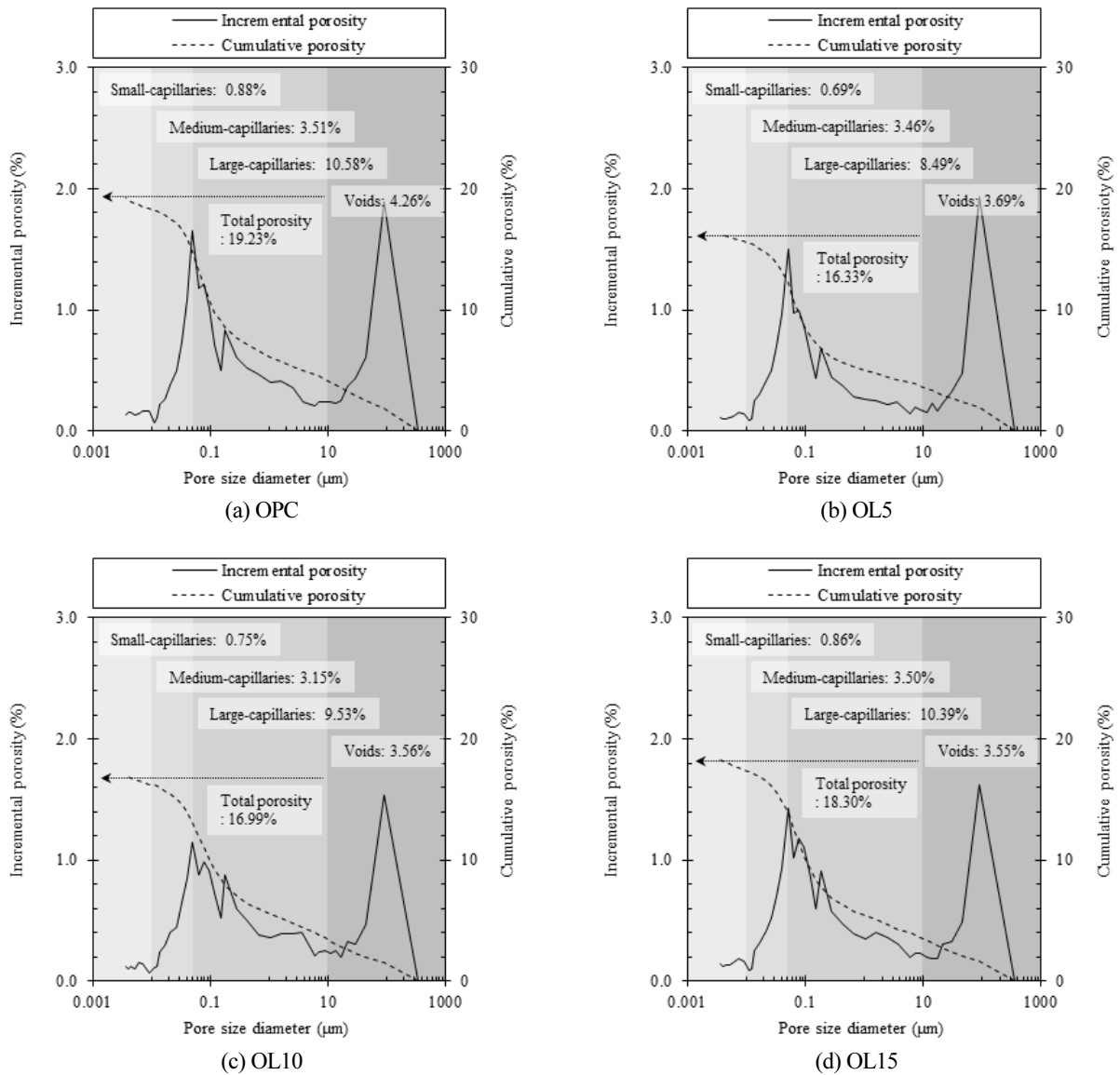


Fig. 3. Pore distribution of specimen obtained from concrete blended with LCD powder

## 황산염 침식 저항성

### 중량 및 부피 변화

LCD 분말을 혼입한 콘크리트의 황산염 침식 저항성을 평가하기 위해 ASTM C 267에 의거하여 10%의 황산나트륨 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 및 황산마그네슘( $\text{MgSO}_4$ )에 26주간 침지한 후 중량, 부피 및 압축강도를 측정하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 LCD 혼입 콘크리트는 황산염 종류와 관계없이 OPC 콘크리트에 비해 중량 및 부피 감소율이 적은 것으로 나타났다. 특히  $\text{NaSO}_4$ 를 사용한 경우 LCD 혼입에 대한 영향이 두드러지게 나타났는데, 이는 공극 구조와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 콘크리트 내 침투된 황산이온은 일차적으로  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여  $\text{CaSO}_4$  및 에트링자이트를 형성하고, 생성된 수화물은 공극 내에 축적되어 시간이 경과함에 따라 내부 응력으로 작용하여 콘크리트 내 균열, 탈락, 박리 등의 결과는 낫는다

(Metha, 1983). 또한 일정량의  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 소모된 이후 C-S-H 겔의 탈석회작용(Decalcification)을 유발한다(Zhou et al., 2015; Zheng, 2013). 이러한 반응을 결과적으로 콘크리트 자체의 물성치 변화 즉, 강도 저하 현상을 발생시킬 수 있다. 하지만 Yang et al.(2016)의 연구에 따르면, 외부로부터 콘크리트 내 이온의 침투 저항성은 모세관 공극량이 감소함에 따라 높아 지므로 모세관 공극량이 적은 LCD 혼입 콘크리트는 근본적으로 유입되는 황산염이온의 양이 감소하고 콘크리트 매트릭스 내 수화물과의 반응이 제한되어 황산염 침식 저항성이 커지는 효과를 나타낼 수 있다. 뿐만 아니라 LCD 혼입에 따른 포졸란 반응에 의한 콘크리트 내  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  양의 감소 역시 높은 황산염 침식 저항성에 기인한 것으로 판단된다.

한편, 동일한 환경에서 콘크리트 시편을  $\text{MgSO}_4$  용액에 12주간 침지시킨 경우 LCD 혼입과 관계없이 중량 및 부피 감소율이  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 와 비교하여 낮은 것을 알 수 있었는데 이는 황산이온 외에  $\text{Mg}^{2+}$  이온과 기 생성된 수화물의 반응 때문인 것으로 사료된다. Lee(2009)의 연구에 따르면, 침지 초기에 황산염으로 인한 석고 및 에트링자이트 외에 공극수 내  $\text{OH}^-$  이온과  $\text{Mg}^{2+}$  이온이 반응하여 수산화마그네슘( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )을 생성하고 이는 공극 채움 효과를 나타낼 수 있다. 따라서, 공극 구조의 변화로 인해 이온 침투 저항성이 높아져 초기 황산염으로 인한 콘크리트 열화가 덜 발생했을 것으로 판단된다. 하지만 침지 기간이 길어질수록 생성된 수화물이  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  노출 환경에 비해 증가할 수 있으며 이에 따라 콘크리트 내부에 발생하는 응력의 축적으로 열화현상이 가속화 수 있다. 뿐만 아니라  $\text{Mg}^{2+}$  이온은 기존의 C-S-H 겔과 반응하여 M-S-H 겔을 형성하여 강도 발 현에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Bonen, 1992). 결과적으로 침지 26주에서의 중량 및 부피 감소율은  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 의 경우와 비교하여 증가하는 경향을 보였다.

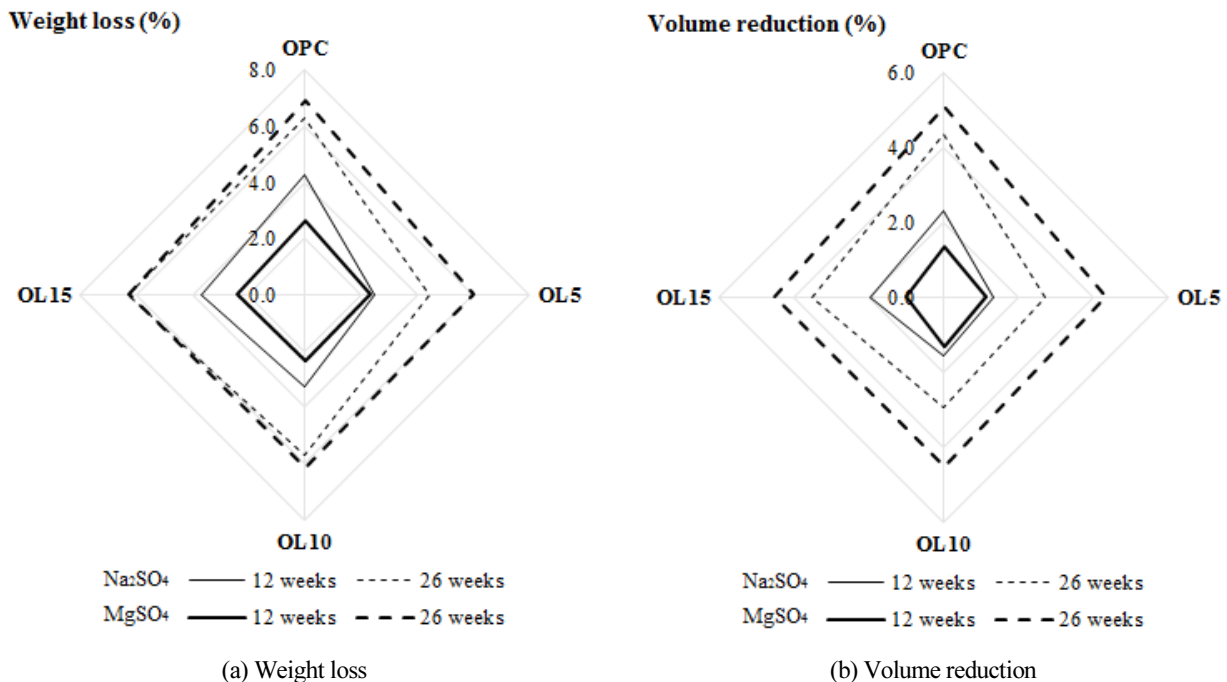


Fig. 4. Deterioration of LCD-mixed concrete after exposure of different sulfate solutions for 12, 26 weeks

### 압축 강도 변화

LCD 혼입 콘크리트의 황산염 침식에 따른 역학적 성능 변화를 분석하기 위해 황산염 용액에 침지한 콘크리트 시편을 중량 및 부피 변화를 측정 후 KS F 2405에 따라 압축 강도 측정을 실시하였다. 이때, 콘크리트 표면 손상에 따른 측정 오차를 최소화하기 위해 동일 규정 부속서 A에 명시된 언본드 캐핑 방법을 적용하였고, 배합 종류별 압축강도 결과는 Fig. 5와 같다. 예상했던 바와 같이 황산염에 노출된 콘크리트의 압축강도 변화는 모든 조건(침지 기간 및 용액 종류)에서 OPC와 비교하여 LCD 분말을 혼입할 경우 압축 강도 감소율이 낮은 것을 알 수 있었다. 앞서 설명한 것처럼 LCD 혼입은 따라 물리적인 공극 채움 현상뿐만 아니라 2차 반응에 의한 수화물 생성 및 이로 인한 내부 조직의 밀실화가 진행되어 이온 침투와 관련된 모세관 공극량이 감소하고 이는 곧 황산이온 침투 저항성의 차이로 이어진다. 예를 들어 LCD 분말을 5% 치환한 OL5의 경우 침지 전 모세관 공극량이 가장 낮았으며 이에 따라 침지 기간 및 황산이온 용액 종류와 관계없이 가장 낮은 압축 강도 감소율을 나타냈다. 하지만 MgSO<sub>4</sub> 용액에 침지한 경우 Mg 계열의 수화물이 추가적으로 생성되고, 또한 M-S-H 겔의 형성으로 강도발현이 제한되어 침지 26주에서 OL15를 제외한 시편에서 급격한 강도의 저하가 발생하였다. 상기 결과는 중량 및 부피 감소율과도 비슷한 경향임을 확인할 수 있었고, 따라서 노출된 환경 즉, 요구되는 조건에 따라 LCD 분말의 치환량을 조절하여 사용함으로써 OPC 콘크리트에 비해 바닷가, 지하수와 같은 황산이온에 노출된 환경에서 높은 화학적 저항성을 가질 것으로 예상된다.

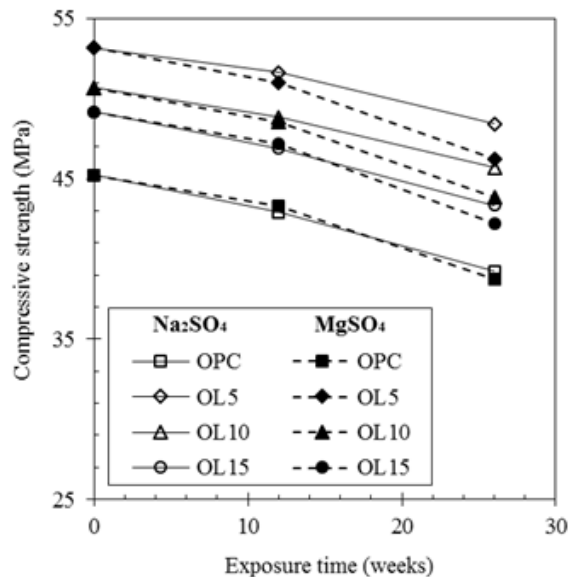


Fig. 5. Variation of Compressive strength for concrete containing LCD powder under sulfate-bearing environments

### 결론

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 황산염 침식 저항성을 높이기 위해 산업폐기물 중 LCD 분말을 혼화재로써 사용하여 압축강도, 공극구조를 포함한 콘크리트 기초 물성과 두 종류의 황산 용액에서의 중량, 부피 및 강도 변화를 측정하여 비교분석하였다. 이에 따라 도출된 결과는 다음과 같다.



- 1) 압축강도는 재령 7일에서 LCD 분말 치환율에 관계없이 38.2-39.9 MPa로 비슷한 수준이었으나 시간이 지남에 따라 LCD 혼입 콘크리트의 강도는 OPC를 초과하였다. 이때 LCD를 5% 혼입한 OL5 콘크리트는 53.2 MPa로 가장 우수한 성능을 보였다.
- 2) 재령 28일에서의 콘크리트 내 공극률은 LCD 혼입 양에 따라 OPC와 비교하여 최대 15.1%(OL5) 감소하였고, 특히 이온 침투와 관련깊은 모세관 공극률( $10 \mu\text{m}$  이하)은 OPC(14.97%), OL15(14.75%), OL10(13.43%) 및 OL(12.64%) 순이었다.
- 3) 황산염 침식 저항성 실험 결과 LCD를 혼입한 경우 OPC에 비해 모든 조건에서 중량 및 부피 감소율이 낮음을 확인할 수 있었다. 이 중 OL5 콘크리트의 침지 26주 후의 부피 및 중량 감소율이  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  용액에서 4.4 및 2.7%,  $\text{MgSO}_4$  용액에서 6.0 및 4.3%로 가장 낮게 나왔으며, 이는 황산염 침식에 따른 압축강도 변화 결과와도 부합하는 경향이었다.

## Acknowledgement

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비(2017-104-120)에 의하여 연구된 논문이며, 본 연구를 위해 많은 지원을 아끼지 않으신 관계자 제위께 깊은 감사를 드립니다.

## References

- [1] Aligizaki, K.K. (2006). Pore structure of cement-based materials – Testing, interpretation and requirements. CRC Press, Florida, USA.
- [2] Bae, S., Park, J., Lee, K. (2010). “Influence of mineral admixtures on the resistance to sulfuric acid and sulfate attack in concrete.” Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 22, No. 2, pp. 219-228.
- [3] Bonen, D. (1992). “Composition and appearance of magnesium silicate hydrate and its relation to deterioratino of cement-based materials.” Journal of the American Ceramic Society, Vol. 75, No. 10, pp. 2904-2906.
- [4] Haynes, H., O’Neill, R., Neff, M., Mehta, P.K. (2008). “Salt weathering distress on concrete exposed to sodium sulfate environment.” ACI Materials Journal, Vol. 105, No. 1, pp. 35-43.
- [5] Kim, M., Baek, D. (2007). “Unit weight and compressive strength of cement mortars using crushed sand under sulfate attacks.” Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 4-A, pp. 585-591.
- [6] Kim, S.K., Kang, S.T., Kim, J.K., Jang, I.Y. (2017). “Effects of particle size and cement replacement of LCD glass powder in concrete.” Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2017, pp. 1-12.
- [7] Kim, S., Hanif, A., Jang, I. (2018). “Incorporating Liquid Crystal Display (LCD) Glass Waste as Supplementary Cementing Material (SCM) in Cement Mortars-Rationale Based on Hydration, Durability, and Pore Characteristics.” Materials, Vol. 11, No. 12, pp. 1-14.
- [8] Kim, S., Jang, P., Jang, I. (2017). “Material bahaviour and strength character of 150 MPa ultra high strength concrete using LCD glass powder as fine aggregate.” Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 29, No. 6, pp. 615-623.
- [9] Kim, S., Lee, K., Song, J., Jang, I. (2018). “Durability performance evaluations on resistance to chloride attack for concrete using LCD waste glass powder.” Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, Vol. 4, No. 4, pp. 289-296.
- [10] Lee, S.k., Kang, L., Lee, C.G., Hong, M.H. (2013). “Disassembly and Compositional, Analysis of Waste LCD Displays.” Journal of the Korean Resources Recycling, Vol. 22, No. 2, pp. 29-36.

- [11] Lee, S. (2009). "Magnesium sulfate attack and deterioration mode of matakaolin blended cement matrix." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 1, pp. 21-27.
- [12] Liu, Z., Zhang, F., Deng, D., Xie, Y., Long, G., Tang, X. (2017). "Physical sulfate attack on concrete lining – A field case analysis." *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 6, pp. 206-212.
- [13] Mangat, P.S., Khatib, J.M. (1995). "Influence of Fly Ash, Silica Fume, and Slag on Sulfate Resistance of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 5, pp. 542-552.
- [14] Mehta, P.K. (1983). "Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete—Another Look." *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, pp. 401-406.
- [15] Moon, H., Lee, S., Kim, H., Kim, S. (2002). "Evaluation on the resistance of Portland cement mortars due to chemical attack." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 1-A, pp. 181-191.
- [16] Moon, H.Y., Jeon, J.K., Kim, H.S. (2005). "Resistance on the sulfuric acid corrosion of cement matrix containing mineral admixture." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 1-A, pp. 225-232.
- [17] Narayanan, N. (2008). "Quantifying the effects of hydration enhancement and dilution in cement pastes containing coarse glass powder." *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 397-408.
- [18] Park, K., Cho, Y., Shin, D. (2017). "Effects of magnesium and sulfate ions on the sulfate attack resistance of alkali-activated materials." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 29, No. 4, pp. 415-424.
- [19] Santhanam, M., Cohen, M.D., Olek, J. (2003). "Mechanism of Sulfate Attack : A Fresh Look Part 2 : Proposed Mechanisms." *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 341-346.
- [20] Seo, Y. (2015). "Characterization of high concentration PM2.5 by nitrate and ammonium ions of PM2.5 in Seoul." *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-7.
- [21] Shin, D., Kang, L., Park, J.L., Lee, C.G., Yoon, J., Hong, H.S. (2015). "Current research trend on recycling of waste flat panel display panel glass." *Journal of Korean Institute of Resources Recycling*, Vol. 24, No. 1, pp. 58-65.
- [22] Wee, T.H., Suryavanshi, A.K., Wong, S.F., AnisurRahman, A.K.M. (2000). "Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures." *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 5, pp. 536-549.
- [23] Yang, H.J., Jin, S.H., Ann, K.Y. (2016). "Chloride transport of high alumina cement mortar exposed to a saline solution." *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2016, pp. 1-8.
- [24] Yoshida, N., Matsunami, Y., Nagayama, M., Sakai, E. (2010). "Salt weathering in residential concrete foundation exposed to sulfate-bearing ground." *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 121-134.
- [25] Zheng, K. (2013). *Eco-efficient concrete – 11. Recycled glass concrete*. Woodhead publishing, Cambridge, UK.
- [26] Zhou, Y., Tian, H., Sui, L., Xing, F., Han, N. (2015). "Strength deterioration of concrete in sulfate environment: An experimental study and theoretical modeling." *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2015, pp. 1-13.