

LCD 폐유리 미분말을 사용한 콘크리트의 염해내구성 평가

Durability Performance Evaluations on Resistance to Chloride Attack for Concrete Using LCD Waste Glass Powder

김성겸¹ · 이광운² · 송재호³ · 장일영^{3*}

Seong-Kyum Kim¹ · Kwang-Woon Lee² · Jae-Ho Song³ · Il-Young Jang^{3*}

(Received October 18, 2018 / Revised November 12, 2018 / Accepted November 12, 2018)

In this study, we evaluated the feasibility and performance of LCD waste glass as a replacement for cement by using LCD waste glass powder which is generated from manufacturing process due to development of LCD industry. Experiments were carried out by replacing 10% and 20% cement of LCD waste glass with particle size of 12um of LCD waste glass with OPC and particle size of 5um, respectively. Through experiments, basic properties, mechanical properties and durability of concrete were evaluated. Experimental results show that the compressive strength is high at 10% replacement ratio compared to 20%. The lower the particle size, the higher the strength. The durability test evaluated the chloride penetration performance through the chloride ion diffusion coefficient. The higher the substitution rate and the smaller the particle size, the lower the chloride ion diffusion coefficient and the better the OPC than the all substitution rate. As a result, LCD waste glass concrete with low granularity and proper replacement ratio is considered to be advantageous for durability under salt environment.

키워드 : LCD 미분말, 염소 이온 확산계수, 산업폐기물, 대체재

Keywords : LCD glass powder, Chloride diffusion coefficient, Industrial waste products, Replacement

1. 서론

세계적으로 정보화 기술의 발달로 LCD를 사용한 다양한 디스플레이 제품들이 대중화 되고 있다. 하지만 LCD를 사용한 제품들은 교체주기가 짧아 많은 LCD 폐유리가 발생하고 있는 실정이지만 처리 및 재활용 되지 못하고 대부분 매립에 의존하고 있어 해양, 토양 및 수질오염 등등 수많은 문제가 발생되고 있는 실정이다. 또한, 시멘트 생산 시 발생하는 이산화탄소량이 환경오염의 주범이 되고 있다. 한편, 건설기술이 발전함에 따라 해양 환경에 건설되는 철근콘크리트 구조물이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 구조물은 염소이온 침투로 인하여 콘크리트 속 철근이 부식되면서 내구수명 저하의 원인이 되고 있다. 이러한 해양 환경 하에 노출된 철근콘크리트 구조물의 내구수명 평가에 가장 큰 영향을 미치는 주요인자 중 하나인 염소이온 확산계수는 여러 실험을 통하여 측

정되고 있으며, 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 평가에 주요 변수로 고려된다(Kwon 2012).

최근 연구에 따르면 시멘트와 수화반응시 LCD 폐유리와의 포졸란 반응의 가능성이 있다고 확인되어 경화 콘크리트의 물리적 성능을 향상시킬 수 있다고 보고되고 있다(Yoon et al. 2012). 또한, 포졸란 반응으로 인하여 내부 조직이 치밀해져서 투수성이 낮아지고 외부로부터 유해물질이 침투할 가능성이 낮아져 내구성 향상에 기여할 것으로 판단된다(Kim et al. 2009; Kim et al. 2017).

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 강도 및 염화물 침투시험을 통하여 시멘트 감소 및 LCD 폐유리의 재활용, 해양구조물로서 LCD 폐유리의 활용 가능성을 판단한다.

* Corresponding author E-mail: jbond@kumoh.ac.kr

¹고려대학교 초대형구조기술연구소 연구원 (Research Institute for Mega Structures, Korea University, Seoul 02841, Korea)

²금오공과대학교 토목공학과 석사과정 (Department of Civil Engineering, Kumoh national institute of technology, Gumi, 39177, Korea)

³금오공과대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Kumoh national institute of technology, Gumi, 39177, Korea)

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구는 LCD 제품의 공정과정 중 발생하는 LCD 폐유리를 사용하여 시멘트를 대체할 경우의 강도성능 및 염화물 침투 저항성을 검토하는 것으로서 Table 1은 연구계획을 정리하여 나타낸 것이고, 배합표는 Table 2와 같다. 먼저 본 연구에서 사용한 배합비 W/B는 40%로 설정하였다. LCD 폐유리 미분말은 입경에 따라 5um, 12um를 사용하였고, 치환율을 OPC, 10, 20(%) 총 5수준으로 시편을 제작하였다. 배합은 LCD 폐유리 미분말을 대체하였을 경우 미세공극 충전 효과 가능성에 대한 성능의 비교를 OPC와 상대적으로 평가하기 위해 사용되었다. 시편의 제작은 치환율에 관계없이 동일한 환경에서 실시하였으며, 압축강도용으로 모르타르 입방형 시편(50 × 50 × 50mm)로 제작 하였으며, 염화물 침투 저항성을 확인하기 위해 원주형 공시체를 $\Phi 100 \times 50$ (mm)으로 절단하여 제작하였다. 양생은 타설 후 24시간 기중양생을 실시하였고, 탈형 후 온도 23±1℃ 의 수중에서 28일간 표준양생을 하였다. 각 시편의 성능을 확인하기 위해 압축강도(7일, 14일, 28일, 56일)를 측정하였고, 염화물 침투 저항성 평가를 위해 NT BUILD 492, NT BUILD 443의 실험방법을 이용하였다.

Table 1. Experimental design

Experimental factors		Experimental item	
Mixture data	Target strength(MPa)	1	40 (W/B 40%)
	Ratio of binding material(%)	3	OPC : LCD = 100 : 0 OPC : LCD = 90 : 10 OPC : LCD = 80 : 20
	Fine aggregate	1	Wash aggregate
Experimental data	Compressive strength	1	Compressive strength (7, 14, 28, 56)
	Diffusion coefficient chloride ion	2	NT Build 492 NT Build 443

Table 2. Mix proportions

W/B (%)	S/B	LCD (%)	Unit weight(kg/m ³)				
			W	C	LCD	S	
40	2.13	0	255.6	639.2	0	1361.5	
		5um		10	575.1	63.8	1361
				20	511	127.7	1360.6
		12um		10	575.1	63.8	1361
				20	511	127.7	1360.6

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 각 재료의 물리적인 특성은 Table 3과 같으며, 화학적 성분은 Table 4와 같다. 시멘트는 밀도가 3.15(g/cm³)인 국내산 S사의 보통포틀랜드 시멘트(KS L 5201)를 사용하였고, 잔골재는 표준사를 사용하였고, 시멘트의 치환재료인 LCD 폐유리는 경북 구미 1사의 밀도가 2.79(g/cm³), 분말도가 5um의 경우 5,202(cm²/g)이고 12um의 경우 2,940(cm²/g)이며 형태는 Fig. 1과 같다. 또한, 침지 용액은 해수의 염소이온 농도가 해양과 해역에 따라 다소 차이가 있으나 NaCl로 환산하여 약 3~4% 정도의 염소를 함유하고 있으므로 본 실험에서는 염소이온에 의한 확산만을 고려하기 위하여 0.5M NaCl을 사용하였다.

Table 3. Physical properties of material

Item	Physical properties		Sign
Cement	Density(g/cm ³)	3.15	C
	Fineness(cm ² /g)	3,360	
Send	Density(g/cm ³)	2.53	S
	Water absorption ratio(%)	1.10	
LCD	Density(g/cm ³)	2.79	LCD
	5um Fineness(cm ² /g)	5,020	
	12um Fineness(cm ² /g)	2,940	

Table 4. Chemical composition of material(%)

Sample	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O
OPC	2.84	4.04	19.0	65.1	3.09	3.77	1.57
5um	0.45	18.2	66.9	10.0	0.079	-	0.057
12um	0.42	18.0	65.7	10.3	0.114	-	0.045



Fig. 1. LCD waste glass powder

2.3 LCD 폐유리의 화학적 성분

LCD 폐유리의 주요 화학성분은 SiO_2 로 나타났으며, 함유량은 약 66%로 FA와 거의 유사한 화학조성을 나타내었다. 특히 SiO_2 는 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 및 염분침투 개선이 나타날 것으로 판단된다. 또한, LCD 폐유리의 주요 화학성분 중 MgO, Al_2O_3 , SiO_2 의 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(Kim 2017).

또한 LCD 폐유리의 SO_3 함유량은 거의 없는 것으로 측정되었다. SO_3 는 시멘트 내에 석고 형태로 있는 황산염으로, 시멘트 내의 주요 화합물인 알루미늄에이트(C_3A)가 매우 높은 반응성을 나타내며, 알루미늄에이트를 에트링자이트(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 SO_3 함유량에 대한 영향성은 낮은 것으로 나타났다.

2.4 실험방법

2.4.1 전위차에 의한 염소이온 확산 특성(NT Build 492)

LCD 폐유리를 사용한 콘크리트의 염분침투 저항성을 평가하기 위해 NT BUILD 492에 따라 염화물확산계수시험을 수행 하였다. 이 시험은 전기장의 양극성을 활용하여 염소이온(Cl^-)이 콘크리트 내부로 침투 시 발생하는 저항 및 침투깊이를 활용하여 콘크리트의 염소이온 확산계수를 결정하는 시험법이고 실험전경은 Fig. 2

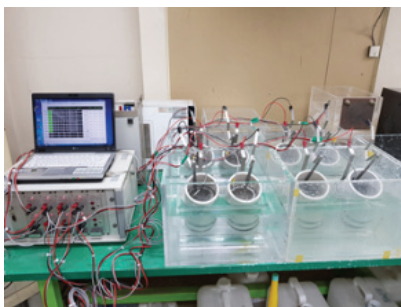


Fig. 2 NT BUILD 492 Test view

와 같다. 이는 콘크리트 시편 양단에 인위적으로 전류를 부가함으로써, 콘크리트 내 염분이동을 유발시키며, 특정 시간동안 침투된 염수의 이동깊이를 주 변수로 이용하여 확산계수를 결정하였다.

염화물확산계수시험 이후 각 배합 별 파라미터 및 시편단면의 10개의 종 방향에 해당하는 염수침투 깊이를 측정하고 이들의 평균값을 이용하여 해당 시편의 확산계수를 다음 식 1을 이용하여 산정하였다.

$$D_{rcm} = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

여기서 D_{rcm} 는 비정상상태 하 염소이온 확산계수를 나타내며 R 은 기체상수, T 은 절대온도, L 은 시편두께, z 은 이온 전자가, F 는 패러데이 상수, U 는 전위차, x_d 는 비색법에 의한 침투깊이, α 는 시험 상수를 나타내며 t 는 전위차 적용시간을 나타낸다. 여기서 시험상수 α 는 $\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \operatorname{erf}^{-1}\left[1 - \frac{2C_d}{C_0}\right]$ 의 식을 사용하며, erf^{-1} 는 오차함수의 역함수를 나타내며, C_0 는 음극셀의 염소이온 농도, C_d 는 비색법에 의한 반응 농도를 나타낸다.

2.4.2 비정상상태에서의 염소이온 측정법(NT Build 443)

LCD 폐유리를 사용한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성을 평가하기 위하여 북유럽에서 규정화된 NT BUILD 443의 방법으로 염소이온 확산계수를 측정하였다. 콘크리트 시편은 원주형 공시체를 50mm의 두께로 절단하였으며, 측면과 하단면에 에폭시를 도포하여 24시간 경과 후 0.5M의 NaCl 용액에 35일간 침지하였다. 35일 후 시편을 2mm에서 20mm까지 2mm간격으로 총 10개에 대한 시료를 채취하였고, 이를 'D'사의 Chloride Meter기기를 이용하여 Fig. 3에서 보는 것과 같이 염화물 농도를 측정하였다. 측정된



Fig. 3 NT BUILD 443 Test view

염화물의 농도를 식 2의 형태로 회귀분석하여 확산계수를 구한다. 이때 확산계수는 35일의 비교적 짧은 시간동안 침지하므로 일정하다고 가정한다.

$$C(x,t) = C_i + (C_o - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_1t}} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 C_i 는 초기 염소이온 농도, C_o 는 외부 염소이온 농도를 나타내고, x 는 위치, t 는 시간, D 는 확산계수, $\operatorname{erf}()$ 는 오차함수를 나타낸다.

2.4.3 MIP(Mercury Intrusion Porosimetry)

본 연구에서는 LCD 폐유리 미분말의 치환율에 따른 콘크리트 내부의 공극 분포 및 크기, 공극율 등을 측정하고자 치환율별(OPC, 5um-10%, 5um-20%, 12um-10%, 12um-20%), 재령별(7일, 14일, 28일) 공시체의 중앙부를 채취하여 24시간 건조로에서 건조시킨 후 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry)을 이용하여 채취한 시료의 내부 공극량을 확인한다. 시험에 사용된 장비는 Micromeritics Instruments Corporation의 POROSIMETER 장비를 사용하여 최대압력 60,000PSI, 기공직경 1~1,000,000nm의 기공을 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 압축강도

LCD 폐유리의 역학성능 발현 검증을 위하여 물-결합재 비 40% 평균입경 5um 및 12um의 LCD 미분말을 시멘트 대체재로 혼합한 모르타르를 각 배합의 측정항목마다 3개 시편의 평균압축강도 결과를 다음 Table 5에 나타내었다. 압축강도실험은 모르타르 입방형 시편(50 × 50 × 50mm)을 이용하여 측정하였으며, Fig. 4에 압축강도 측정결과를 나타내었다.

초기재령 7일에서의 OPC는 39.17MPa로 나타났으며, 전체 압축강도는 35.85MPa ~ 46.13MPa의 분포를 보였다. 전반적으로 12um보다는 5um에서 압축강도가 우수하였고, 그중 10%에서 가장 높은 압축강도를 보였다.

재령 56일 강도에서도 5um에서 가장 높은 압축강도가 나타났으며, Fig. 5에서 보이는 바와 같이 OPC 대비 15~20% 높은 강도가 발현되었다. 하지만 12um에서는 OPC와 비슷하거나 낮은 강도를 나타내었다. 이는 기존 폐유리 연구결과에서 보고되는 것과 같

Table 5. Compressive strength and activity

Specimens		7 days	14 days	28 days	56 days	
OPC	Str.(MPa)	31.74	32.69	39.17	45.57	
	Act.(%)	69.65	71.74	85.96	100	
5um	10%	Str.(MPa)	33.52	38.84	46.13	54.8
		Act.(%)	61.17	70.88	84.18	100
	20%	Str.(MPa)	32.84	41.75	45.37	52.31
		Act.(%)	62.78	79.8	86.73	100
12um	10%	Str.(MPa)	32.92	41.19	42.76	45.43
		Act.(%)	72.45	90.67	94.13	100
	20%	Str.(MPa)	27.55	33.25	35.85	39.55
		Act.(%)	69.66	84.09	90.66	100

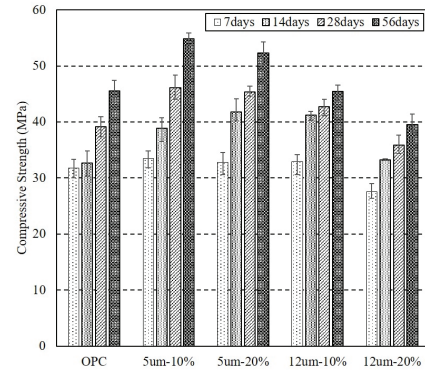


Fig. 4. Compressive strength

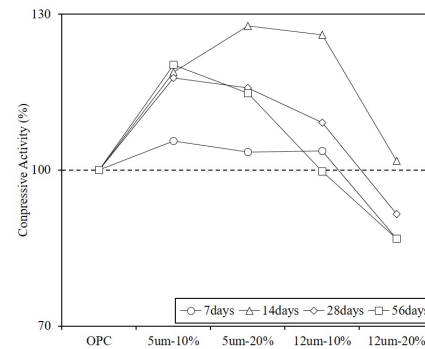


Fig. 5. Compressive activity

이 미분화된 입경에 기인하는 것으로 판단된다. 특히 LCD 폐유리 5um에서는 미분화 과정에서 LCD 폐유리 비표면적이 증가되어 수화물과의 반응 공간을 확장함으로써 수화의 촉진 및 C-S-H 형성이 더욱 활발해져 재령 초기의 강도 발현이 양호한 것으로 판단된다. 또한, 20% 치환율에서 압축강도의 성능이 저하되는 원인은 치환된 만큼 시멘트의 양이 줄어들면서 Ca(OH)₂의 양 또한 줄어들게 되어 치환율이 높아질수록 포졸란 반응에 필요한 SiO₂가 증가하지만 결합할 Ca(OH)₂가 부족하기 때문에 오히려 포졸란 반응의 가능성이 줄어든 것으로 판단된다.

3.2 전위차에 따른 염분침투 저항성 평가

Fig. 6은 NT BUILD 492방법을 이용하여 측정된 LCD의 입경 및 치환율에 따른 염화물이온의 확산계수 값을 나타낸 것이다. 실험결과 모든 경우에서 OPC를 사용한 일반 콘크리트의 촉진염소이온 확산계수의 범위 $5.59 \sim 19.52 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ (Spiesz and Brouwers, 2012)에 비해 매우 낮으므로 염분 침투저항성이 탁월한 것으로 나타났다. OPC의 경우 염소이온 확산계수는 $5.69 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 측정되었고, 5 μm 의 LCD 폐유리를 사용한 경우 10%, 20% 각각 $3.50 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$, $1.56 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 으로 OPC에 비해 월등히 낮으며 매우 우수한 결과를 나타내었다. 반면에 12 μm 의 LCD 폐유리를 사용한 경우에는 10%, 20% 각각 $6.58 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$, $4.79 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 OPC와 비슷하거나 오히려 높은 염소이온 확산계수를 나타내었다. LCD 폐유리를 사용한 콘크리트 중 혼입율이 높을수록 혹은 폐유리 최대입자 크기가 작을수록 염분침투 저항성이 높게 나타났고 이는 콘크리트 내부에서 확산에 의한 물질 이동에 영향을 미치는 인자로서 내부의 공극구조가 많은 영향을 끼친다는 점(Basheer et al. 1995)에 착안해 LCD 폐유리가 콘크리트의 치밀한 공극구조에 기인됨으로 추정된다. 또한 콘크리트 내 총 공극량 대비 염소 이온의 이동을 위한 유효 공극량이 폐유리 혼입율 및 조립도와 반비례적인 경향을 갖기 때문에 LCD 폐유리를 사용한 경우 일반적으로 OPC 콘크리트 대비 높은 염분침투 저항성을 보임을 추정할 수 있다. 결국 낮은 조립율 및 적정 혼입율을 갖는 LCD 폐유리 콘크리트는 염해환경 하 내구성 확보에 유리한 재료라 판단된다.

3.3 염분침투 프로파일에 대한 평가

Fig. 7은 표면으로부터 깊이에 따른 염소이온 농도를 나타낸 것이고, 이를 농도Y, 깊이X로 하여 최소자승법을 이용하여 회귀분석을 통해 확산계수를 측정하였고, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 실험결과 모든 경우에서 OPC를 사용한 일반 콘크리트의 촉진염소이온 확산계수의 범위 $5.59 \sim 19.52 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ (Spiesz and Brouwers 2012)를 모두 만족하였고, 특히 20% 치환율에서 많이 감소하였다. 먼저 OPC의 경우 염소이온 확산계수를 계산하면 $12.28 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 로 나타났다. 5 μm 의 LCD 폐유리를 사용한 경우 치환율에 따라 33%~61%의 감소율을 나타내었고, 12 μm 의 LCD 폐유리를 사용한 경우 27~47%의 감소율을 보여 LCD 폐유리 콘크리트의 성능이 OPC에 비해 매우 우수한 성능을 보이고, 특히 12 μm 에 비해 5 μm 에서 높은 감소율을 나타내었다.

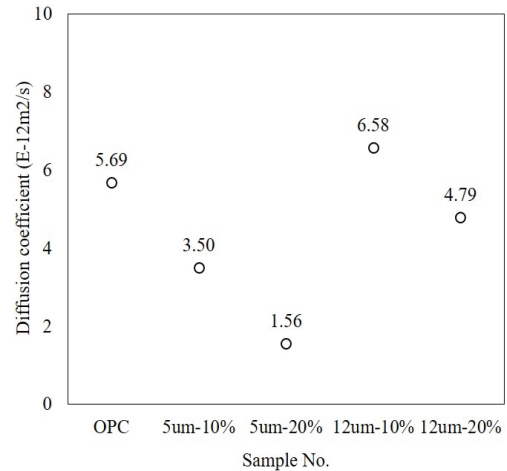


Fig. 6 Diffusion coefficient(NT BUILD 492)

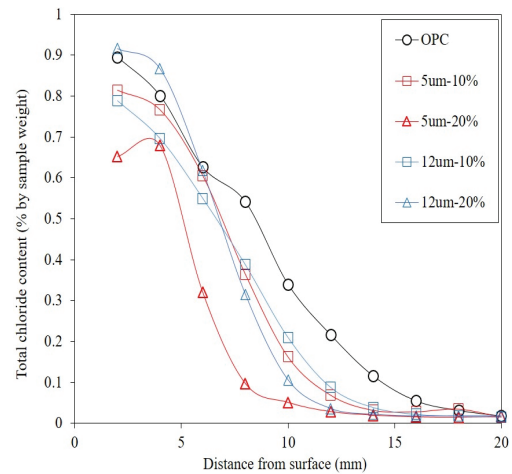


Fig. 7 Total chloride content

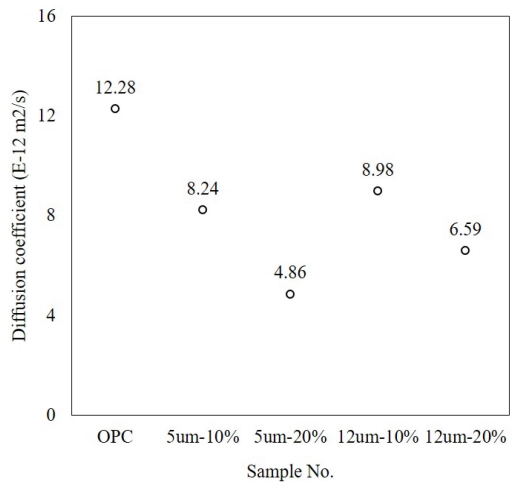


Fig. 8 Diffusion coefficient(NT BUILD 443)

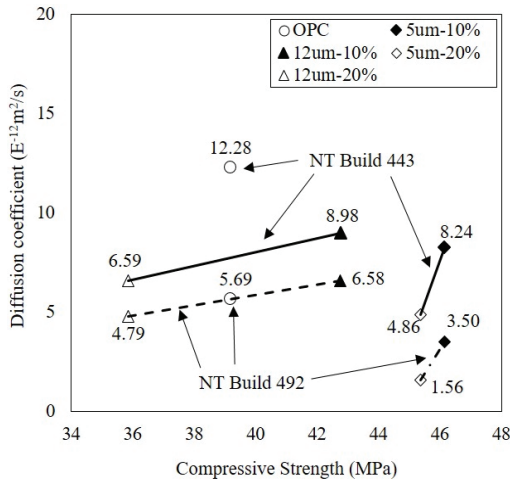


Fig. 9 Relationship between diffusion coefficient and compressive strength

다음 Fig. 9에서 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 침투능력이 향상되는 것으로 보인다. 또한 같은 치환율에서 분말도가 높을수록 높은 압축강도를 나타내고 있고 낮은 확산계수를 보이고 있어 염화물 침투능력은 혼화재의 치환율과 분말도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 압축강도 면에서는 치환율이 증가함에 따라 시멘트양이 감소하여 콘크리트 강도에 영향을 미치는 Ca(OH)₂의 생성량이 줄어들어 결과적으로 강도증가에 좋지 않은 영향을 주므로 확산계수의 경향과는 반대성향을 보인다. 따라서 치환율을 강도와 확산계수의 필요성에 따라 조절하여 설계할 필요성이 있다.

3.4 MIP

일반적으로 시멘트 매트릭스의 공극분포는 수화량에 의존한다. 이는 시멘트 내부의 수화물에 의해 공극이 분산되기 때문이다. Fig. 10의 결과에 따르면 재령 28일의 공극량은 OPC의 경우 12.59%, 5um-10%의 경우 10.29, 5um-20%의 경우 10.74%, 12um-10%의 경우 11.63%, 12um-20%의 경우 11.85%로 나타났다. 모든 경우에서 OPC보다 낮은 공극량을 나타내었으며 이는 LCD 폐유리 미분말의 포졸란 반응 및 2차 수화반응으로 생성된 C-S-H겔과 Hydratalcite로 인하여 2차 수화물과 Ca(OH)₂와의 사이의 공극인 Macro공극은 감소되고, 그에 따른 Micro겔공극은 증가하게 되어 전체 공극률 또한 감소하는 것으로 판단된다. Fig. 11은 MIP 측정을 통한 내부공극 분포를 도시화한 것이다. 비교적 큰 공극인 Micro

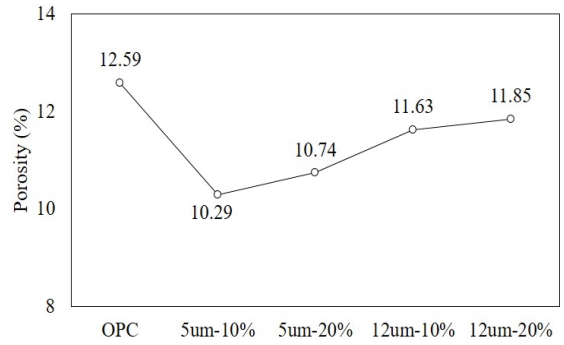


Fig. 10 Porosity properties of LCD concrete

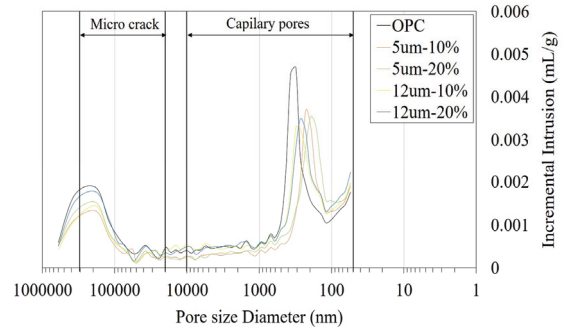


Fig. 11 Relationship incremental intrusion and pore size distribution with LCD waste glass powder

crack구간(20um~200um)에서는 같은 크기의 공극이 OPC에 비해 LCD 폐유리 미분말을 혼합한 콘크리트에서 상당부분 감소하였다. 특히 200um 부근에서 뚜렷하게 감소한 것으로 보인다.

Capillary pores구간(10nm~10um)에서는 모든 LCD 폐유리 미분말을 혼합한 콘크리트가 OPC에 비해 공극의 양이 감소할 뿐만 아니라 미세공극의 크기도 많이 분할된 것으로 보인다. 이는 시멘트페이스트가 충분히 수화하여 생성된 수화물이 치밀한 조직으로 발전되어 연결된 모세관 내부를 차단하고 분할하여 겔공극만으로 연결된 공극을 만들어 강도를 상당부분 증진한 것으로 보여진다.

전반적으로 크기가 큰 공극량은 줄어들고 500nm이하 크기의 모세공극 양 또한 OPC에 비해 감소하였다. 이러한 현상은 모세공극 범위에서 실제 LCD 입자의 팩킹과 함께 포졸란 반응성에 의한 수화물 생성으로 상대적으로 큰 모세공극 구조를 채우거나 공극을 분할함으로써 연결된 공극에서 닫힌 공극으로 전이된 것이라 판단된다. 미세한 차이이지만 전이되는 공극 크기는 입경이 작을수록 더 작은 공극 사이즈로 전이됨을 알 수 있다(Kim 2017).

이는 위의 염화물침투 결과와 연관 지어 설명할 수 있는데 공극의 크기와 양이 OPC에 비해 상당히 감소하는 경향으로 보았을 때 LCD 폐유리 미분말의 첨가로 인하여 액상과 기상의 투과성이 감소되어 내구성 향상에 기여할 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 한국에서 생산되는 LCD 폐유리를 시멘트보다 작은 입경으로 대체하여 치환율에 따라 압축강도를 측정하였고, 염분 침투 저항성 두 개의 실험방법(NT BUILD 492, NT BUILD 443)을 통하여 실험한 결과, 시멘트 대체제로서 좋은 성능과 활용 가능성에 대하여 평가하였다. 실험으로부터 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 압축강도는 초기재령 7일에서 OPC가 39.17MPa로 나타났으며, 전체 압축강도는 35.85MPa ~ 46.13MPa의 분포를 보였다. 전반적으로 12 μ m보다는 5 μ m에서 압축강도가 우수하였고, 그 중 10%에서 가장 높은 압축강도를 보였다. 이는 미분화된 입경이 콘크리트 내에 미세공극 충전에 기인하는 것으로 판단되며, 특히 LCD 폐유리 5 μ m에서는 미분화 과정에서 LCD 폐유리 비표면적이 증가되어 수화물과의 반응 공간을 확장함으로써 수화의 촉진 및 C-S-H 형성이 더욱 활발해져 재령 초기의 강도 발현이 양호한 것으로 판단된다.
- 2) NT BUILD 492 실험결과 12 μ m-10%를 제외 한 모든 시편에서 염소 이온 확산계수가 OPC보다 낮게 나왔으며, 5 μ m-20%에서 가장 높은 확산계수를 나타내었다. 전반적으로 치환율이 증가함에 따라 낮은 염소 이온 확산계수를 나타내었고, 평균입경이 작을수록 낮은 염소 이온 확산계수가 나타났다. 이는 콘크리트 내부에서 확산에 의한 물질 이동에 영향을 미치는 인자로서 내부의 공극구조가 많은 영향을 끼친다는 점에 착안해 LCD 폐유리가 콘크리트의 치밀한 공극 구조에 기인됨으로 판단된다.
- 3) NT BUILD 443 실험에서는 모든 시편에서 OPC보다 낮은 염소 이온 확산계수를 보이며, NT BUILD 492와 유사한 결과를 보였다. 하지만, 압축강도와와의 연관성을 고려했을 때, 치환율이 낮을수록 강도가 높아지고 치환율이 높을수록 염소이온 확산계수가 낮아진다는 점에서 적정 혼입율을 갖는 LCD 폐유리 콘크리트를 사용하면 강도 및 염화물 침투성능을 모두 우수한 콘크리트를 만들 수 있을 것이라 판단된다.
- 4) 재령 28일 MIP 결과로부터 LCD 폐유리 미분말의 포졸란 반응에 의해 생성된 수화생성물이 모세공극을 분할하여 미세공극의 크기가 보다 작은 범위로 전이되는 것이 확인되었다. 또한 입경이 작아짐에 따라 전이되는 폭이 큰 것으로 나타났고 이는 입경이 작을수록 포졸란 반응성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-C129830-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Basheer, P.M.A. (1995). Predictive models for deterioration of concrete structures, *Construction and Building Materials*, **10(1)**, 27-37.
- Kim, S.S., Ryou, J.S., Lee, S.T., Jung, H.S. (2009). *Construction Materials Engineering*, **3**, 49-52 [in Korean].
- Kim, S.K. (2017). Material behavior and strength character of 150MPa ultra high strength concrete using LCD glass powder as fine aggregate, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **29(6)**, 615-623 [in Korean].
- 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*, **2017(7)**, 1-12.
- Kim, B.C. (2015). An experimental study on high strength concrete using the LCD waste glass powder, *Korean Recycled Construction Resources Institute*, **3(4)**, 335-341 [in Korean].
- Kwon, S.O. (2012). Comparative Analysis on Experimental Method of Diffusion Coefficient for Chloride Ion in Concrete, Ph.D Thesis, Andong National University [in Korean].
- Lee, J.T. (2017). Evaluation Method for Cracked Concrete by Chloride Diffusion Test, Ph.D Thesis, Sungkyunkwan University [in Korean].
- Park, S.B. (2000). A Experimental study on the chloride diffusion properties in concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **12(1)**, 33-44 [in Korean].
- Park, K.T. (2016). A Study on the Utility of Ultra-High Strength Concrete with Fine Aggregates Replaced by LCD Waste Glass Powder, Ph.D Thesis, Kumoh National Institute of Technology [in Korean].
- Spiesz, P. (2012). 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*, **27**, 293-304.
- Yoon, S.J., Park, J.M. (2012). A study on the possibility of concrete using waste LCD glass powder, *Journal of Architectural Institute of Korea*, **28(8)**, [in Korean].

LCD 폐유리 미분말을 사용한 콘크리트의 염해내구성 평가

본 연구에서는 LCD 산업의 발전으로 인하여 제조 공정으로부터 발생하는 산업폐기물인 LCD 폐유리 미분말을 활용하여 시멘트 대체재로서 활용 가능성과 성능을 평가하였다. 실험은 OPC와 5 μ m의 입경을 가진 LCD 폐유리 12 μ m의 입경을 가진 LCD 폐유리를 각각 10%, 20% 시멘트와 치환하고 제작하여 실험을 통해 콘크리트의 기초 물성 및 역학적 특성 그리고 내구성 평가를 실시하였다. 실험결과 압축강도에서 20%에 비해 10%의 치환율에서 높은 강도가 나타났으며, 입경이 낮을수록 높은 강도를 보였다. 내구성 평가는 염소 이온 확산계수를 통하여 염화물 침투성을 평가하였는데, 치환율이 높을수록 그리고 입경이 작을수록 낮은 염소 이온 확산계수가 나타났고, 모든 치환율에서 OPC 보다 좋은 결과값을 나타내었다. 결국 낮은 조립율 및 적정 혼입율을 갖는 LCD 폐유리 콘크리트는 염해환경 하 내구성 확보에 유리한 재료라 판단된다.