

LCD 산업부산물을 이용한 고강도 콘크리트의 품질 특성에 관한 연구

Study on the Quality Characteristics of High-strength Concrete Using LCD Industrial Waste

김동진¹ · 박승희² · 최성³ · 한양수^{4*}

Dong-Jin Kim¹ · Seung-Hee Park² · Sung Choi³ · Yang-Su Han^{4*}

(Received December 3, 2021 / Revised December 9, 2021 / Accepted December 10, 2021)

Alkali activators that stimulate mineral compounds are expensive materials, but in order to replace industrial products of high alkali ingredients, both product and economic feasibility must be satisfied. In this study, alkali industrial waste(LW) from the LCD manufacturing process were used for the purpose of alkali active reaction of GGBFS for high strength concrete over 50MPa. Concrete mixed with LW had reduced workability, but it had the characteristic of increasing compressive strength. Analysis using ACI 209 Compressive Strength Model Equation was made to compare the changes in strength coefficients according to LW mixing. The durability test of concrete, such as Chloride Penetration Resistance and carbonation resistance, also showed excellent performance. In the Adiabatic temperature rise test results, the concrete mixed with LW had the effect of accelerating the initial hydration heat. However, the final Adiabatic temperature rise was not significantly affected by the mixing of LW.

키워드 : LCD 산업부산물, 알칼리 활성화제, 압축강도, 염해저항성, 탄산화 저항성

Keywords : LCD industrial waste, Alkali activator, Compressive strength, Chloride penetration resistance, Carbonation resistance

1. 서론

지구 온난화로 인한 탄소배출저감이 국제적인 화두가 되고 있어 국내에서도 에너지 소비가 높고 탄소 배출이 많은 시멘트 산업을 축소하기 위한 노력을 기울이고 있다. 시멘트를 대체하기 위한 방안으로 광물질 혼화재의 사용량을 늘리거나, 시멘트를 사용하지 않은 무시멘트 콘크리트를 사용하는 방법이 있다(Pacheco et al. 2008). 광물질 혼화재로는 강 알칼리 환경하에서 포졸란 반응을 하여 시멘트와 유사한 수준의 강도를 발현할 수 있으며, 장기강도 개선, 내구성 및 화학적 안정성 향상 등의 장점이 있지만(Haha et al. 2011), 광물질 혼화재의 사용량이 많아지면 응결이 지연되고

초기강도가 급격히 저하될 수 있어 최대 사용량을 제한하고 있다(Collins and Sanjayan 1999). 알칼리 활성화제는 광물질 혼화재의 반응을 촉진하는 역할을 하기 때문에 알칼리 활성화제를 사용하면, 콘크리트 결합재에서 광물질 혼화재의 사용량을 높힐 수 있고, 안정적인 콘크리트 성능을 기대할 수 있다. Shi et al.(2003)는 알칼리 활성화제가 화학적 조성에 따라 6종류로 구분되며, 광물질 혼화재료의 종류에 적합한 활성화제를 사용하면 콘크리트 성능을 개선할 수 있다고 하였고, Davidovits(1991)은 고로슬래그의 활성화제로 NaOH, Na₂CO₃, Na₂O · nSiO₂ 등을 사용하였을 때 콘크리트 강도 발현 측면에서 가장 우수한 결과를 나타낸다고 보고하였다. 하지만, 콘크리트에 사용되는 알칼리 활성화제는 고순도의 제

* Corresponding author E-mail: hysddd@kduniv.ac.kr

¹성균관대학교 건설환경공학부 박사과정 (School of Civil, Architectural Engineering & Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea)

²성균관대학교 건설환경공학부 교수 (School of Civil, Architectural Engineering & Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea)

³경동대학교 토목공학과 겸임교수 (Department of Civil Engineering, KyungDong University 27, Gyeongdongdaehak-Ro, Yangju-Si 11458, Korea)

⁴경동대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, KyungDong University 27, Gyeongdongdaehak-Ro, Yangju-Si 11458, Korea)

품을 사용하고 있어 경제성 측면에서 불리하고, 구조물의 적용에 제약이 있었다. 이에 높은 알칼리 성분을 갖는 산업부산물을 콘크리트에 적용하고자 하는 연구가 진행되었고 산업부산물의 특징에 따라 우수한 성능을 나타내는 소재를 발굴하였지만, 대부분의 산업부산물은 별도로 가공하거나 첨가제를 혼합해야 하는 등의 전처리 작업이 필요하였고, 그 산업부산물의 발생량과 공급방법에 대한 문제가 해결되어야 했다.

최근에 디스플레이 산업이 발전함에 따라 LCD 기판의 생산이 증가되고 있는데 LCD가 고화질과 고해상도를 유지하기 위해서는 LCD 내부의 TFT 기판유리의 정밀도가 높아야 하며, 이러한 TFT 기판 유리는 높은 정제공정을 거쳐 알칼리 성분이 전혀 없는 무알칼리 유리를 사용하여야 한다. 이러한 정제공정에서 발생하는 부산물에는 알칼리 성분(SO_3 , Na_2O , K_2O 등)이 다량 함유되어 있고, 미분말의 형태로 발생되기 때문에 별도의 가공단계를 거치지 않고 콘크리트 생산공정에 투입이 가능하며, Choi and Pyo(2020)의 연구결과에 의하면 LCD 공정의 부산물을 알칼리 활성화제로 사용하기 위한 기초연구가 보고되어 있다. 하지만 이를 콘크리트에 적용하기 위해서는 강도 발현 성능 이외에도 굳지 않은 콘크리트의 특성과 경화된 콘크리트의 다양한 특성에 대한 검증과 설계에 반영할 수 있는 특성값이 적립되어야 한다.

본 연구에서는 LCD 산업부산물(LW)을 활용한 콘크리트의 특성을 검증하기 위해 고로슬래그를 다량 치환한 고강도 콘크리트에 LW를 적용하였다. LW를 사용량에 따라 단계별로 혼합한 콘크리트의 슬럼프와 압축강도를 측정하였고, ACI 209에서 제안한 압축강도 모델식을 이용하여 LW의 혼입율에 따른 강도 특성을 분석하였다. 또한 LW 콘크리트의 내구성을 평가하기 위해 염화물 침투 저항성과 탄산화 저항성에 대한 실험을 실시하였고, 그 결과를 이용한 예측 모델식의 계수값을 도출하여 내구성능의 변화를 정량적으로 분석하였다. 추가적으로 LW의 혼입으로 인해 GGBFS의 반응성이 촉진되어 콘크리트의 수화열이 높아질 수 있으므로 단열온도 상승시험을 통해 단열온도상승계수를 도출하여 비교하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 결합재

본 연구에서는 시멘트와 고로슬래그 미분말(GGBFS)을 기본 결합재로 사용하였고, GGBFS의 반응을 촉진하기 위해 LCD 제조 공정에서 발생한 고 알칼리 성분의 산업부산물을 혼입하였다. 결

합재에서 시멘트는 S사에서 생산한 1종 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였고, GGBFS는 KS 기준(KS F 2563)에 의거한 3종 GGBFS 미분말을 사용하였다. 결합재의 화학적 성분과 물리적 특성은 Table 1과 Table 2에 정리하였다. LW은 A사에서 LCD의 상판 유리를 정제하는 과정에 발생하는 것으로 분말의 형태이다. LW의 주요 화학성분은 K_2SO_4 와 Na_2SO_4 이며, 전체 화학성분 중에서 알칼리 성분이 80% 이상이다. LW의 밀도는 $2.54\text{g}/\text{cm}^3$ 이며, 분말도는 $7,703\text{cm}^2/\text{g}$ 이다. LW는 GGBFS에 비하여 분말도가 상당히 높지만, 평균입경은 $16.16\mu\text{m}$ 로 GGBFS보다 평균입경이 크다. LW는 정제 과정에서 유리정제에 사용되는 물질이 소모되면서 다공성 물질로 변하게 되기 때문에 비표면적은 높지만, 입자의 크기는 콘크리트에 사용되는 결합재(OPC, GGBFS)의 입경과 유사한 수준이다. LW를 용해하여 pH를 측정된 결과 13.1~13.5 수준으로 GGBFS를 자극하기 위한 최소한의 알칼리(pH 12 이상)를 상회한다.

Table 1. Chemical composition of OPC, GGBFS, and LW

Type	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
OPC	19.5	5.6	3.5	61.5	3.8	2.5	1.1	0.1
GGBFS	32.6	15.5	0.5	42.2	4.6	3.3	0.5	0.2
LW	4.3	-	0.2	10.0	0.5	47.4	4.3	30.4

Table 2. Physical properties of OPC, GGBFS, and LW

Type	Density (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	Particle size distribution(μm)		
			Mean	d_{10}	d_{90}
OPC	3.15	3,392	31.24	3.32	45.71
GGBFS	2.91	4,485	14.18	1.41	33.22
LW	2.54	7,703	16.16	3.56	31.53

2.1.2 골재

본 연구에서 사용된 잔골재와 굵은골재는 화강암질이며, KS F 2527의 기준을 만족한다. 잔골재는 부순모래이며, 굵은골재는 부순자갈이다. 골재의 주요 물리적 성능 결과를 Table 3과 Table 4에 정리하였다.

Table 3. Physical properties of fine aggregate

Type	Density (g/cm^3)	Absorptivity (%)	F.M	0.08mm pass efficiency(%)
KSF 2527	>2.5	<3.0	-	<7.0
Fine agg.	2.58	1.20	2.58	0.83

Table 4. Physical properties of coarse aggregate

Type	Density (g/cm ³)	Absorptivity (%)	F.M	0.08mm pass efficiency(%)	Abrasion ratio(%)
KSF 2527	>2.5	<3.0	-	<1.0	<40
Coarse agg.	2.69	1.12	6.83	0.15	19.64

2.1.3 고성능감수제

GGBFS를 70% 이상 사용한 콘크리트는 점성이 높기 때문에 유동성능이 높은 고성능감수제를 사용하여야 한다. 본 연구에 사용된 화학혼화제는 S사에서 제조한 폴리칼본산계 혼화제이며, 고형분은 25%이다. GGBFS를 자극하기 위한 용도로 사용되는 고알칼리 성분의 활성화제는 화학혼화제의 성능을 저해하는 요인이 된다. 이에 알칼리 환경하에서도 성능의 저하가 적은 에테르 계열의 고성능 감수제를 사용하였다.

2.2 콘크리트 배합비

Table 5는 LW를 혼합한 고강도 콘크리트의 배합비를 나타낸다. 콘크리트의 목표강도는 KS F 4009에서 고강도 콘크리트 기준으로 사용되는 40MPa이며, W/B는 35.5%, S/a는 44.5%로 고정하였다. 결합재의 종류는 OPC와 GGBFS를 혼합한 2성분계 결합재이며, 단위 결합재량은 450kg/m³이다.

Table 5. Mix proportions of concrete

Type	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)					
			Water	Binder			Fine agg.	Coarse agg.
				OPC	BFS	LW		
S7-0	35.5	44.5	160	135	315	0	820	892
S7-3				135	302	14	820	892
S7-5				135	293	23	820	892
S7-8				135	279	36	820	892
S8-0				90	361	0	819	890
S8-3				90	347	14	819	890
S8-5				90	338	23	819	890
S8-8				90	325	36	819	890

결합재는 GGBFS의 조성비율에 따라 S7(GGBFS의 조성비 : 70%), S8(GGBFS의 조성비 : 80%) 2종류로 구분된다. LW를 내할로 치환하였다. LW는 전체 결합재량의 0%, 3%, 5%, 8%를 사용하였으며, LW의 사용량은 GGBFS의 사용량에 대해 치환하였다. 화학혼화제는 고성능감수제와 AE를 분리하여 사용하였다. LW의 사용량에 따른 콘크리트 작업성을 평가하기 위해 고성능감수제의

사용량은 단위결합재량의 0.8%(3.6kg/m³)로 고정하였고, AE제의 사용량은 단위결합재량의 0.09%(0.405kg/m³)로 고정하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 염소이온 확산시험

콘크리트의 내염해 특성을 평가하기 위해 복유립 규정인 NT Build 492 방법(전위차에 의한 촉진 시험방법)에 의해 시험을 실시하였다. 실험을 위해 ø100×200mm 원주형 공시체를 만들고, 재령 7일, 28일, 56일에 높이 50mm가 되도록 절단하여 염소이온 확산셀 장치에 시편을 설치하였다. 염소이온을 콘크리트에 침투시키기 위해 염소이온 확산셀에서 양극(+)에는 0.3N NaOH 수용액을, 음극(-)에는 10% NaCl 수용액으로 채우고 24시간 동안 전압을 가하였다. NT Build 492에서 제시하는 바와 같이 통과전류량에 따라 인가전압을 조정하였다. 시험을 마친 후 시편을 2등분하여 절단면에 질산은 용액을 도포하고 염소이온이 침투하여 변색된 깊이를 측정하였다. 측정된 염소이온 침투깊이는 Tang and Nilsson(1992)에 의해 제안된 식을 적용하여 염소이온 확산계수를 산출하였다.

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - a\sqrt{x_d}}{t} \tag{1}$$

여기서, $E = \frac{U-2}{L}$, $a = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}(1 - \frac{2c_d}{c_0})$ 이고, D는 염소이온 확산계수(m²/sec)이고, z는 이온의 원자가(z=1), F는 패러데이 상수(9.648×10⁴J/V · mol)이고, U는 양극/음극의 전압차(V)이고, R는 기체상수(8.314J/K · mol)이다. 그리고, T는 용액의 온도(K), L는 시편의 두께(m), x_d는 염소이온의 침투깊이(m), t는 실험 지속시간(s), c_d는 비색법에 의한 반응 농도(0.07N), c₀는 음극셀의 염분농도(2N)이다.

염소이온 확산계수는 시간의존적 특성을 가지고 있어 재령이 증가할수록 감소하게 된다. 이러한 특성을 반영하여 ACI 365.1R-00에서는 Fick`s의 제2법칙을 이용한 염소이온 확산계수의 추정모형을 제시하였다.

$$D_{(t)} = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \tag{2}$$

여기서, D_(t)은 재령 t일에서 염소이온 확산계수(m²/sec)이고, D_{ref}은 기준재령(t_{ref})에서 염소이온 확산계수(m²/sec)이고, m은 재

령계수이다.

2.3.2 탄산화 저항성 시험

콘크리트의 탄산화 저항성을 평가하기 위하여 KS F 2596에 의거하여 실시하였다. 탄산화 시험을 위한 시편은 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 만들어 28일간 수중 양생을 실시한 후에 시편의 높이가 50mm가 되도록 절단하였다. 시편의 절단면을 제외한 나머지 면은 에폭시 수지로 마감하고 축진 탄산화 시험기(온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, CO_2 농도 5% 및 습도 $60 \pm 5\%$)에 넣어 CO_2 가스를 주입하였다. 재령별 탄산화 깊이를 측정하기 위해 축진 탄산화 시험기에서 각 재령에 시편을 꺼내어 2등분하고 절단면에 1% 페놀프탈레인 용액(KS M 8238)을 살포하여 변색된 깊이를 측정하였다. 탄산화가 진행된 부분은 변색되지 않으며, 탄산화가 진행되지 않은 면은 적자색으로 변한다. 절단면의 5 개소에 대해 탄산화 깊이를 측정하여 그 평균값으로 탄산화 진행 정도를 판별하였다. 이산화탄소의 확산 속도와 탄산화 전면의 변화속도를 고려한 중심부 수축 모델(Shrinking core model)을 이용하여 탄산화 속도를 예측하였다.

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_c}{a}(C_1 - C_2) \cdot t} \quad (3)$$

여기서, D_c 는 콘크리트의 구성재료와 함수상태에 따른 CO_2 확산계수(cm^2/day)이고, x_c 는 시간에서의 탄산화 깊이(cm)이고, a 는 콘크리트 알칼리량(mol/cm^3)이고, C_1 은 노출면의 대기 CO_2 농도(mol/cm^3), C_2 는 콘크리트 CO_2 농도(mol/cm^3)이다.

2.3.3 단열온도 상승시험

LW를 사용한 콘크리트의 단열온도 상승량을 측정하기 위하여 온도 측정범위가 $0 \sim 80^\circ\text{C}$ 인 시험장치(IATER)를 사용하였고, 콘크리트 배합 직후부터 7일간 측정하였다. 단열온도 상승시험은 단열상태에서 콘크리트의 수화열에 의해 상승되는 온도를 측정하는 실험으로 결과값을 콘크리트 표준시방서에서 제시한 단열온도 상승식에 적용하여 회귀분석하면 최대 온도 상승량(Q_∞)과 콘크리트의 온도가 상승되는 속도(γ)를 구할 수 있다.

$$Q(t) = Q_\infty(1 - e^{-\gamma t}) \quad (4)$$

여기서, $Q(t)$ 는 t일에서 단열온도상승량($^\circ\text{C}$)이고, t는 시간(일)이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 슬럼프 및 공기량

LW는 입도분포는 GGBFS와 유사한 수준이지만, 정제과정으로 인해 다공성을 갖게 되어 분말도가 높기 때문에 콘크리트의 작업성에 영향을 줄 수 있다. Fig. 1은 LW를 혼입한 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 시험결과이다.

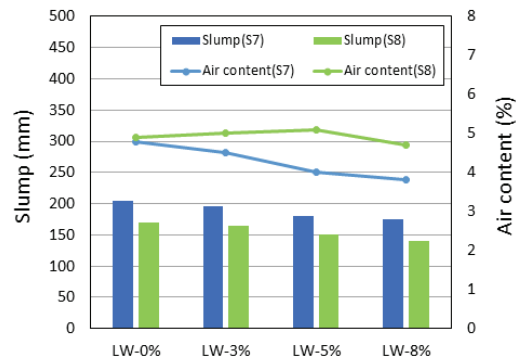


Fig. 1 Slump and air content of concrete

GGBFS의 혼입량에 따른 슬럼프 결과를 보면 분말도가 높은 GGBFS의 사용량이 증가함에 따라 슬럼프가 감소하며, S7에 비하여 S8는 슬럼프가 15.4~20.0% 감소되는 결과를 나타내었다. LW를 사용한 콘크리트는 슬럼프가 감소되었는데, LW의 사용량이 8%인 경우 0%에 비하여 슬럼프는 약 16.7~17.6%가 저하되었다. 분말의 입자가 다공질로 구성된 LW가 작업성에 영향을 미치는 잉여수를 흡수함에 따라 슬럼프가 저하된 것으로 LW의 사용량이 증가할수록 슬럼프의 감소량이 커지게 된다. 공기량 시험결과에서는 S7은 LW의 사용량에 따라 공기량이 다소 감소하는 경향을 나타내었으나, S8에서는 LW에 따른 공기량의 변화가 크지 않았다. LW는 다공질 물질이지만 FA와 같이 AE제를 흡착하는 효과가 크지 않기 때문에 공기량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.2 압축강도 및 ACI 209.2R-08 예측모델

LW의 혼입량에 따른 콘크리트 압축강도를 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 재령별 압축강도 시험결과를 정리하고, ACI 209.2R-08에서 제안한 압축강도 모델식에 따라 예측하였다. LW를 혼입한 콘크리트의 압축강도 시험결과를 보면 재령 28일의 압축강도는 모든 배합에서 50MPa를 넘어서는 결과를 나타내었다. S7-0의 28

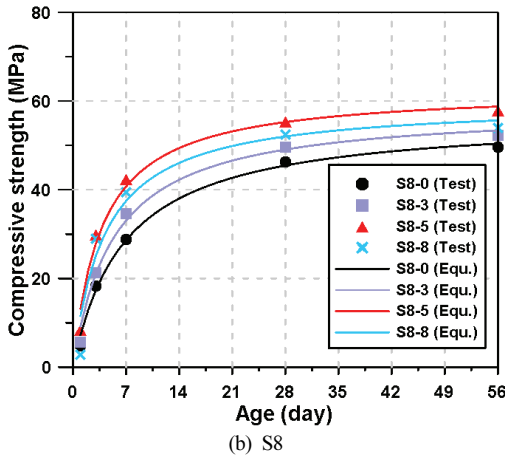
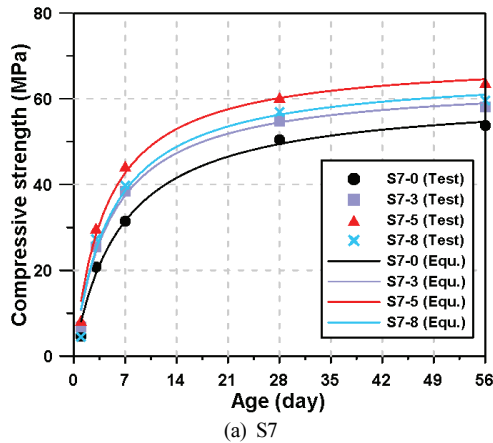


Fig. 2. Result of compressive strength test and ACI 209.2R-08

일 압축강도는 50.4MPa이며, LW의 사용량이 증가함에 따라 압축 강도가 증가하여 S7-5의 재령 28일 압축강도가 60.3MPa로 가장 높았지만, S7-8은 57.0MPa로 오히려 감소하였다. 이러한 결과는 S8에서도 유사한 경향으로 나타났고, S8-5의 재령 28일 압축강도가 55.3MPa로 가장 높은 압축강도 결과를 나타내었다. Chang (2003)은 알칼리 활성화제가 다량 혼입된 경우 초기에 GGBFS의 반응이 촉진되어 응결이 급격하게 발생된다고 보고하였는데, LW의 사용량이 8%인 경우에도 알칼리 활성화제의 과다 투입으로 인해 급결이 발생되어 강도가 저하된 것으로 판단된다.

ACI 209.2R-08 모델식은 28일 압축강도를 기준으로 강도계수 a, b를 도출하고 재령별 압축강도를 예측하고, 이를 통해 콘크리트의 강도발현 특성을 정량적으로 분석할 수 있다.

$$F_{cm(t)} = \frac{t}{a+bt} F_{cm28} \tag{5}$$

여기서, $F_{cm(t)}$ 는 재령 t일에서 압축강도이며, F_{cm28} 은 기준 재령 일(재령 28일)의 압축강도이다. a와 b는 압축강도 계수이다. 강도 계수에서 a는 압축강도가 수렴하는 최종 압축강도에 관한 계수이며, $F_{cm(t)}$ 와 반비례 관계에 있다. b는 재령(t)에 따른 압축강도에 상승률을 나타내는 계수이며, ACI 209 모델식은 재령 28일을 기준으로 압축강도를 예측하기 때문에 b는 재령 28일까지 강도 발현 속도를 의미한다. Table 6은 LW를 혼입한 콘크리트의 압축강도 계수 a, b를 정리한 것이다. a는 LW의 혼입율이 증가함에 따라 감소하였는데, LW의 혼입율 5%에서 S7과 S8이 각각 3.33, 3.82로 가장 낮은 a값을 나타내었고, LW의 혼입율이 8%인 경우 a값은 상승하였다. b는 LW의 혼입량에 따라 다소 증가하였으나, LW가 0%와 5%에서 b값의 차이는 최대 0.056으로 큰 영향을 미치지 못하였다.

Table 6. Compression strength constants a and b

LW (%)	S7			S8		
	a	b	R ²	a	b	R ²
0	5.42	0.826	0.995	5.59	0.819	0.997
3	4.26	0.854	0.995	4.57	0.848	0.995
5	3.33	0.882	0.990	3.82	0.866	0.994
8	3.66	0.877	0.971	4.34	0.858	0.987

3.3 염화물 침투 저항성

Fig. 3은 LW의 혼입율이 0%, 5%인 콘크리트의 재령별 염소이온 확산계수 시험결과와 ACI 365.1R-00에서 제안한 염소이온 확산계수 모델식에 의해 회귀한 결과를 정리한 것이다. 실험결과를 보면 LW를 사용한 콘크리트는 동일한 재령에서 염소이온확산계수가 감소되는 것을 알 수 있다. 압축강도 높은 콘크리트는 페이스트 조직이 치밀하여 염소이온의 침투속도가 늦어져 염소이온확산계수가 낮아지게 된다(Bae et al. 2009). LW를 혼입한 콘크리트는 GGBFS의 반응이 촉진되어 압축강도가 향상되었으며, 이로 인해 염소이온확산계수가 감소된 것으로 판단된다.

염소이온 확산계수는 재령이 증가함에 따라 점차 감소하였는데, S8은 S7에 비하여 재령 7일 염소이온 확산계수는 높지만, 재령이 증가함에 따라 S8의 염소이온확산계수가 더 낮아지는 결과를 나타내었다. 이는 GGBFS가 염소이온을 물리적으로 흡착하는 효과가 있어 사용량이 증가할수록 염소이온의 침투속도는 늦어지게 된 것이며(Luo et al. 2003), 이로 인해 재령이 증가함에 따라 조직이 치밀해지면서 염소이온흡착효과는 더 크게 작용한 것으로 판단된다. ACI 365.1R-00에서 제안한 식에서 재령계수(m)는 시간이

경과함에 따른 염소이온확산계수의 감소율을 나타내는 계수이다. m은 광물질 혼화재료의 사용량이 증가함에 따라 높아지는데, ACI 365.1R-00에서는 Fly ash와 GGBFS의 사용량을 제한하고 있으며, 이때 광물질 혼화재료에 의해 증가되는 최대 재령계수는 0.6 이다.

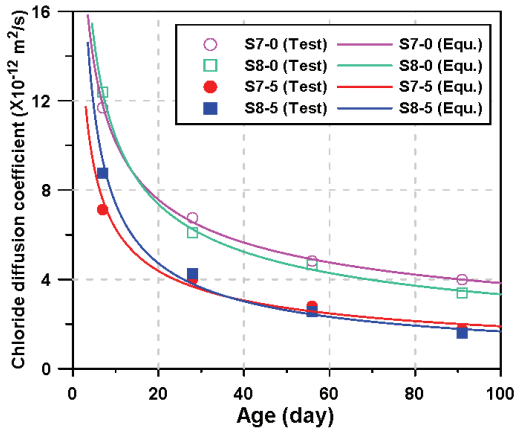


Fig. 3. Chloride diffusion coefficient for LW

Table 7은 LW 콘크리트의 재령 28일 염소이온확산계수와 재령 계수를 정리한 것이다. S7-0과 S8-0의 재령계수는 0.423, 0.493으로 ACI 365.1R-00에서 제한한 재령계수 예측식의 결과(0.6)보다 낮은 결과를 나타내었는데, 이는 콘크리트의 배합 조건과 GGBFS의 화학조성 및 분말도 등 원재료의 특성에 따라 콘크리트의 공극분포가 달라지기 때문이다. LW를 5% 혼입한 콘크리트는 재령계수가 증가하였는데 이는 LW 혼입으로 재령 28일의 염소이온확산계수가 감소함에 따라 염소이온확산계수 곡선의 기울기가 증가하였기 때문이다. 특히 S8-5의 재령계수는 0.646으로 ACI 365.1R-00에서 제한하는 최대치(0.6)보다 높은 결과를 나타내었다.

Table 7. Chloride diffusion coefficient and m

LW (%)	S7			S8		
	D_{28} ($10^{-12}m^2/s$)	m	R^2	D_{28} ($10^{-12}m^2/s$)	m	R^2
0	6.749	0.423	0.998	6.099	0.519	0.968
5	4.036	0.493	0.996	4.243	0.646	0.982

3.4 탄산화 저항성

콘크리트의 탄산화는 중심부수축모델에 의해 예측할 수 있으며, 여기서 탄산화에 영향을 미치는 요인을 반영하는 계수를 탄산화 속도계수(X)라 한다. 탄산화 속도계수는 탄산화 깊이는 CO_2 가

스에 노출될 시간의 제곱근에 비례한다는 일반적인 이론에 따라 선형회귀 분석한 비례상수를 의미한다.

$$x_c = X\sqrt{t} \tag{6}$$

탄산화 속도계수를 이용하여 콘크리트의 배합조건에 따른 탄산화 특성을 비교할 수 있다. 탄산화는 CO_2 가스가 콘크리트 내부에 침투하여 결합재의 수화물과 반응하는 것으로 대표적으로 수산화칼슘과 반응하여 탄산칼슘을 석출하는 반응이 있으며, Puertas et al.(2006)의 연구에 의하면 CSH겔과 반응하여 비정질의 실리카겔을 생성하여 강도를 저하시키는 반응 등이 있다. 또한, Song et al.(2012)에 의하면 GGBFS에 의해 생성된 CSH겔은 탄산화 과정에서 조직이 붕괴될 수 있으며, 알루미나 수화생성물은 탄산화에 아주 취약한 것으로 보고되었다. Fig. 4는 LW를 혼입한 콘크리트의 탄산화 시험결과를 정리한 것이다. 본 실험결과에서도 LW를 혼입하지 않은 S7과 S8의 탄산화 깊이가 크게 나타났다. 기존의 연구결과에서도 알칼리 활성화제를 혼입한 경우에는 탄산화 깊이가 감소하는 것으로 나타났는데, GGBFS를 다량 사용한 콘크리트는 $Ca(OH)_2$ 가 소비되어 대부분 CSH겔의 탄산화가 대부분으로 나타난다. 하지만, LW와 같은 알칼리 활성화제를 사용한 경우 GGBFS의 수화반응으로 CSH의 생성량이 많아져 탄산화 속도가 늦어지는 것이다(Song et al. 2012). 탄산화 속도계수를 통해 LW에 의한 탄산화 저항성을 정량적으로 비교할 수 있다. Table 8은 LW의 혼입율이 0%, 5%인 콘크리트의 탄산화 속도계수를 정리한 것이다. S7-0과 S8-0의 탄산화 속도계수는 각각 $1.002mm/\sqrt{day}$ 와 $1.328mm/\sqrt{day}$ 이지만, LW를 5% 혼입한 경우 탄산화속도계수는 각각 30.7%, 32.3% 감소하는 결과를 나타내었다.

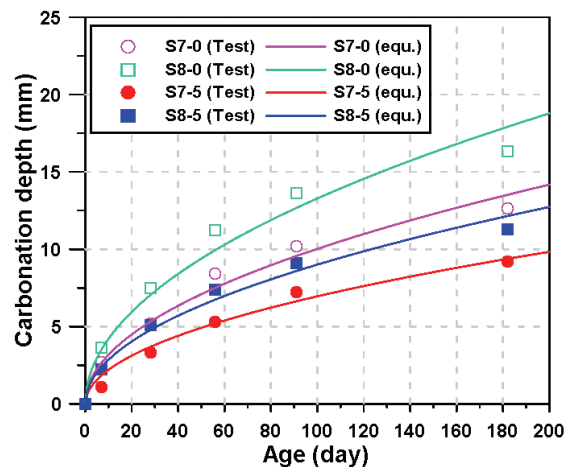


Fig. 4. Carbonation depth of concrete

Table 8. Carbonation rate coefficient of concrete

LW (%)	S7		S8	
	X (mm/√day)	R ²	X (mm/√day)	R ²
0	1.002	0.983	1.328	0.973
5	0.695	0.986	0.900	0.984

3.5 콘크리트 단열온도 상승량

Fig. 5는 LW의 혼입율이 0%, 5%인 콘크리트의 단열온도상승시험결과이다. 실험결과를 보면 LW의 혼입 유, 무에 따라 초기 온도 상승속도는 다르게 나타나지만, 재령 7일에서는 단열온도상승량의 차이가 크지 않았다. LW를 혼입한 S7-5와 S8-5는 초기에 온도가 빠르게 상승하였는데, 특히 재령 1일 이후에 급격하게 온도가 상승하였다. 약 1.5일 이후에 시간에 따른 온도의 상승량은 감소하였지만, 재령 7일까지 지속적으로 온도가 상승하였다. 일반적으로 OPC를 100% 사용한 콘크리트는 초기 온도 상승 이후에 수화열이 일정하게 수렴하게 되는데, 본 실험에서는 수화반응이 늦은 GGBFS의 사용량이 높아 장기적으로 수화열이 발생된 것으로 판단된다.

Table 9는 LW 콘크리트의 단열온도상승계수 Q_∞와 γ를 정리한 것이다. Q_∞는 LW를 5% 혼입한 경우 S7에서는 약 1.23이 상승하였고, S8에서는 약 0.56가 상승하였다. 하지만, 이는 압축강도의 증가율에 비교하면 적은 수준이었다. 초기 온도상승량을 나타내는 γ은 LW의 혼입으로 인해 크게 증가되었다. 결합재 종류에 따라 S7은 약 32.5%, S8은 약 21.2%가 증가되었는 LW의 혼입으로 GGBFS의 초기 반응이 촉진되었기 때문이다.

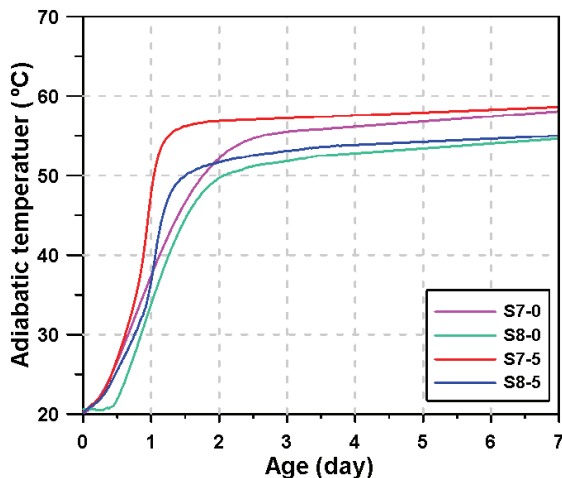


Fig. 5. Adiabatic temperature rise of concrete

Table 9. Q_∞ and γ of concrete

LW (%)	S7			S8		
	Q _∞ (°C)	γ	R ²	Q _∞ (°C)	γ	R ²
0	57.05	1.20	0.961	53.87	1.13	0.956
5	58.28	1.59	0.957	54.43	1.37	0.954

4. 결 론

LCD 생산 공정의 산업부산물인 LW를 사용한 고강도 콘크리트의 작업성, 압축강도, 내구성 및 단열온도상승시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. LW를 사용한 콘크리트는 광물질 혼화재의 혼입율이 높더라도 기존 시멘트 콘크리트보다 초기에 높은 강도를 발현할 수 있으며, 강도 예측 모델식에 의해 장기강도를 예측할 수 있으므로 광물질 혼화재의 알칼리 활성화제로 LW를 활용할 수 있으며 고강도 콘크리트 배합설계가 가능할 것으로 판단된다.
2. LW를 사용한 콘크리트는 염화물 침투 저항성을 개선하는 효과가 있으며, 특히 장기재령에서 염소이온확산계수가 크게 저하되는 특징이 있고, GGBFS를 다량 사용한 콘크리트에서도 탄산화 속도를 낮출 수 있기 때문에 콘크리트의 내구수명을 개선할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 다양한 환경조건에 대한 내구성 실험결과를 통해 내구성 설계를 위한 특성값을 적립하여야 할 것으로 판단된다.
3. LW으로 인해 GGBFS의 반응성이 촉진되어 재령 1~2일에서 콘크리트의 수화열이 급격하게 증가되므로 초기 양생관리에 유의하여야 하며, 재령 7일의 단열온도상승시험결과에서는 LW의 사용으로 인한 최종 수화열이 유사한 수준으로 평가되었으나, 이후에도 지속적으로 수화열이 증가되었으므로 추후 장기 재령에 대한 콘크리트 수화열 시험을 통해 수화 균열의 특성에 대한 분석이 보완되어야 할 것으로 사료된다.

Conflicts of interest

None.

References

Bae, S.H., Park, J.I., Lee, K.M., Choi, S. (2009). Influence of mineral admixtures on the diffusion coefficient for chloride ion in

- concrete, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, **29(4A)**, 347-353 [in Korean].
- Chang, J.J. (2003). A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes, Cement and Concrete Research, **33**, 1005-1011.
- Choi, S., Pyo, S. (2020). Fresh and hardened properties of portland cement-slag concrete activated using the by-product of the liquid crystal display manufacturing process, Materials, **13(19)**, 4354.
- Collins, F.G., Sanjayan, J.G. (1999). Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete, Cement and Concrete Research, **29**, 455-458.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers : inorganic polymeric new materials, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, **37(8)**, 1633-1656.
- Haha, M.B., Le Saout, G., Winnefeld, F., Lothenbach, B. (2011). Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags, Cement and Concrete Research, **41**, 301-310.
- Luo, R., Cai, Y., Wang, C., Huang, X. (2003). Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete, Cement and Concrete Research, **33(1)**, 1-7.
- Pacheco, T.F., Castro, G.J., Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: a review: part 1. historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, Construction and Building Materials, **22**, 1305-1314.
- Puertas, F., Palacios, M., Vazquez, T. (2006). Carbonation process of alkali-activated slag mortars, Journal of Materials Science, **41(10)**, 3071-3082.
- Shi, C., Roy, D., Krivenko, P. (2003). Alkali-Activated Cements and Concretes, CRC Press, London and New York, 6-29.
- Song, G.I., Yang, K.H., Lee, B.Y., Song, J.K. (2012). Carbonation characteristics of alkali activated blast-furnace slag mortar, Journal of the Korea Concrete Institute, **24(3)**, 315-322 [in Korean].
- Tang, L., Nilsson, L.O. (1992). Chloride diffusivity in high strength concrete, Nordic Concrete Research, **11**, 162-170.

LCD 산업부산물을 이용한 고강도 콘크리트의 품질 특성에 관한 연구

광물질 혼화재를 자극하는 알칼리 활성화제는 고가의 소재이지만, 고 알칼리 성분의 산업부산물 대체하기 위해서는 제품성과 경제성을 모두 만족하여야 한다. 본 연구에서는 50MPa 이상의 고강도 콘크리트에 GGBFS의 알칼리 활성 반응을 위한 목적으로 LCD 제조 공정에서 발생하는 알칼리 산업부산물(LW)을 사용하였다. LW를 혼입한 콘크리트는 작업성이 다소 저하되었으나, 압축강도가 증진되는 특징이 있었다. ACI 209.2R-08 압축강도 모델식을 이용하여 분석하여 LW 혼입에 따른 강도계수의 변화를 비교하였다. 콘크리트의 내구성 시험에서도 염화물 침투 저항성 및 탄산화 저항성에서 우수한 성능을 나타내었다. 단열온도 상승시험 결과에서는 LW를 혼입하면 초기 수화열이 빨라지는 효과가 있으나, 최종 단열온도상승량은 LW의 혼입 유, 무에 큰 영향을 받지 않았다.