

EOS 잔골재 및 GGBFS를 혼입한 초기재령 콘크리트의 성능 평가에 관한 연구

권성준¹, 조성준², 임희섭^{3*}

A Study on Performance Evaluation of Early-age Concrete with EOS Fine Aggregate and GGBFS

Seung Jun Kwon¹, Sung Jun Cho², Hee Seob Lim^{3*}

Abstract: Many researches on alternative materials as construction materials is continuing by recycling industrial byproducts due to shortage of sitereclamation and natural aggregates. In this paper, engineering properties in early-aged OPC (Ordinary Portland Cement) and GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag) concrete are evaluated with EOS aggregate replacement. The related experiments were carried out with 0.6 of water to binder ratio, three levels of EOS replacement ratios (0%, 30% and 50%) for fine aggregate, and two levels of cement replacement with GGBFS (0% and 40%). Several tests such as slump air content, and unit mass measurement are performed for fresh concrete, and compressive strength and diffusion coefficient referred to NT BUILD 492 method are measured for hardened concrete. Through the tests, it was evaluated that the compressive strength in concrete with EOS aggregate increased to 3 days and 7 days but slightly decreased at the age of 28 days. In the accelerated chloride penetration test, GGBFS concrete showed reduced diffusion coefficients by 60 - 67% compared with OPC concrete. The lowest chloride diffusion coefficient was evaluated in the 50% replacement with EOS aggregate, which showed an applicability of EOS aggregate to concrete production.

Keywords: Electric arc furnace oxidizing slag(EOS), Ground Granulated Blast Furnace Slag(GGBFS), Concrete, Accelerated chloride diffusion

1. 서 론

콘크리트는 건설 분야의 중요한 재료로 현대 문명의 최고 발명품 중 하나이다. 이는 콘크리트가 경제적이고 재료 수급에 용이하기 때문이다. 하지만, 최근 생태계 파괴가 극심하여 국가적 차원에서 환경 규제가 강화되어 섬진강 골재 채취 및 남해 EEZ 골재 채취를 중단하는 등으로 골재 부족 현상이 심화되고 있다. 이에 따라 순환골재, 산업부산물을 재활용하여 건설 재료로서의 대체 재료에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다(Kim et al., 2012; Tam et al., 2005). 특히 철강 산업의 발전으로 인하여 철강 생산량이 증가함에 따라 지속적으로 철강 부산물이 발생되고 있다. 2015년 기준으로 국내 철강 부산물은 약 2,400만 톤이 발생되었으며, 고로 슬래그가 약 52%, 전로 슬래그가 28%, 전기로 슬래그가 약 20% 비중으로 발생되었다(Kwon et al., 2018). 고로 슬래그는 제철소 고로에서 선철을 제조하는 과정에서 SiO_2 와 Al_2O_3 등을 주성분으로

고온에서 석회와 반응하여 잠재수경성을 갖는 대표적인 콘크리트 혼화제로 장기강도 개선, 수밀성 향상, 수화열 저감 등의 장점이 있어 건설 산업에서 주로 사용되고 있다. 또한 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag-GGBFS)을 사용한 콘크리트는 염화물 이온의 침투에 대한 관점에서 잠재수경성으로 인하여 공극률의 감소를 통하여 염화물 확산 계수의 감소 등으로 고내구성 재료로 이미 많은 연구가 진행되어 왔다(Song et al., 2003; Song et al., 2009; Kwon et al., 2013; Oh et al., 2016). 하지만 철강 부산물 중 대부분의 슬래그는 저부가가치로 도로용 또는 성토용으로 재활용되고 있는 실정이다(Faraone et al., 2009). 전기로 산화슬래그(Electric Arc Furnace Oxidizing Slag-EOS)는 생산되는 계강 종류에 따라 3.0~3.8 kg/cm³의 높은 밀도로 방사선 차폐 콘크리트 등의 연구에 진행되었다(Lim et al., 2011). 또한 전기로 산화슬래그는 콘크리트 혼입 시 압축강도 증진효과가 나타나 골재 대체 재료의 적용성에 대한 연구가 진행되었다(Cho et al., 2009; Lee et al., 2013; Roslan et al., 2016; Sheen et al., 2015; Lim et al., 2017). 하지만 콘크리트 대체 골재로 사용되기 위해서는 열악한 환경에 노출하여 콘크리트 구조물로서 내구적인 성능 평가는 필수적이다. 특히 염해로 인한 염화물 이온의 침투에 따른 내부철근 부식의 가능성에 대해서는 충분한 실험을 통한 평가가 진행되어야 한다.

¹정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 교수

²정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 석사과정

³정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 박사후 연구원

*Corresponding author: heesubjm@naver.com

Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

콘크리트의 대표적인 염화물 확산계수 평가 방법은 Fick's 2nd law의 일반해에 의한 겉보기 염화물 확산계수를 평가하는 방법이 있으며, 전기화학적 이론을 도입하여 전위차 구배를 통한 염화물 이온의 이동을 촉진시키는 전기적 촉진 시험 방법이 있다. 특히 전기적 촉진 실험은 짧은 시간내에 염화물 확산계수를 평가할 수 있다(Chun et al., 2017; Yoo, 2010). 이러한 전기적 촉진 시험방법은 주로 NT BUILD 492 방법으로 전기적 이동과 확산을 통하여 염화물 확산계수를 구할 수 있다(Tang et al., 1992; Tang, 1996; NT BUILD 492, 1999).

본 연구에서는 EOS 잔골재를 치환하여, OPC 콘크리트 배합과 GGBFS 콘크리트 배합을 대상으로 초기재령에서의 공학적 특성을 평가하였다. GGBFS 혼입 시 초기재령에서 강도 발현이 늦다는 단점을 보완하고, EOS 골재가 콘크리트 대체 골재로서 기계적 특성을 검토하고자 하였다. 또한 염화물 확산실험은 NT BUILD 492를 이용하여 촉진 염소이온 확산깊이를 측정하여 염화물 확산계수를 도출하고 EOS 골재 치환에 따른 내구성능을 평가하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 사용 재료

시멘트는 국내 H사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 물리적 특성은 Table 1에 나타났다. 또한 GGBFS는 3종 고로슬래그 미분말을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 골재는 세척사, 전기로 산화슬래그 잔골재, 부순 굵은골재를 사용하였다. 전기로 산화슬래그는 H사에서 배출되고 있는 잔골재로 KS F 2527(콘크리트용 골재)에 만족하는 골재를 사용하였으며, Table 2에 사용 재료의 물리적 특성을 나타냈다.

Table 1 Physical properties of cement

Type	Density	Blaine (cm ² /g)	Setting time (h :m)		Compressive strength (MPa)		
			initial	final	3d	7d	28d
OPC	3.15	3,000	3:20	5:50	12.5	22.5	42.5

Table 2 Physical properties of aggregate

Division	Fine aggregate		Crushed gravel
	Sand	EOS	
Max. Size(mm)	5	5	25
Density(kg/cm ³)	2.59	3.38	2.61
Fineness Modulus	2.76	2.71	6.90
Absorption(%)	1.56	1.72	1.23

전기로 산화슬래그와 세척사의 조립률의 차이는 나타나지 않았지만, 전기로 산화슬래그 잔골재가 세척사에 비해 500 μm 이하의 미립분량이 많은 것으로 Fig 1에 나타났다. 콘크리트 혼화제는 고성능 감수제로 A사 폴리카르본산계를 사용하였으며, Table 3에 물리적 특성을 나타냈다.

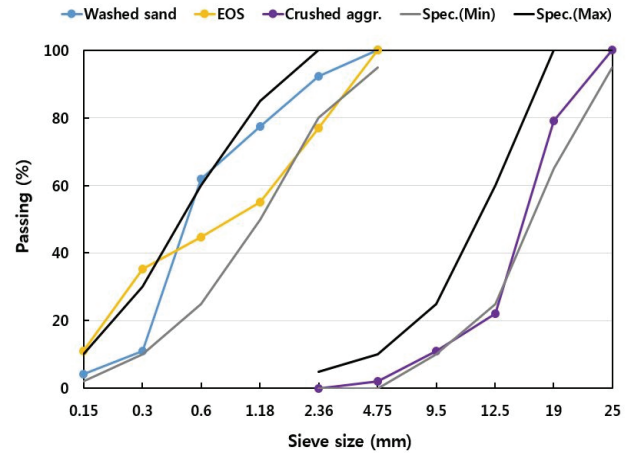


Fig. 1 Grading curves

Table 3 Physical properties of chemical admixture

Type	Main ingredient	pH	Solid	Color	Density (g/cm ²)
Liquid	Polycarbonate	6.7	25%	Dark brown	1.05

Table 4는 사용 재료의 화학적 조성을 나타낸 것이다. 전기로 산화슬래그 잔골재의 주성분은 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃로 나타났으며, Fe₂O₃의 함량이 약 35% 이상 나타남에 따라 골재 비중이 약 3.38 kg/cm³으로 높은 밀도로 나타내고 있다.

Table 4 Chemical composition of used materials (%)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	etc.
Cement	62.6	21.9	4.8	2.6	3.4	-	4.7
EOS	26.1	15.5	11.9	3.4	36.8	6.0	0.3
GGBFS	44.1	32.7	13.2	5.6	0.4	0.4	1.6
Sand	0.5	86.2	5.8	0.2	0.5	-	6.8
Crushed aggregate	4.5	72.1	15.7	1.5	3.3	-	2.9

2.2 콘크리트 배합

전기로 산화슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 물성 실험을

위하여 다음 Table 5와 같이 실험계획을 나타냈다. 실험은 물-결합재비 60%의 수준으로 GGBFS를 시멘트 대비 40% 치환하여 선정하였다. 전기로 산화슬래그(H사.당진) 잔골재를 대상으로 치환율(0%, 30%, 50%)에 따른 OPC 콘크리트 배합 및 GGBFS 콘크리트 배합의 기계적 성능을 검토하였다. 실험 방법은 굳지 않은 콘크리트에서 KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험방법)에 준하여 슬럼프 시험을 진행하였으며, KS F 2409(굳지 않은 콘크리트의 단위용적 질량 및 공기량 시험 방법)의 콘크리트의 단위용적 질량 및 공기량 시험을 진행하였다. 경화 콘크리트에서는 $\varnothing 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작하여 재령 3일, 7일, 28일에 수중 양생을 진행하여 각 재령별 공시체 3개씩 압축강도 시험을 진행하였다. 또한 촉진 염화물 확산 시험을 진행하기 위하여 $\varnothing 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작하여 재령 28일까지 수중 양생 후 커팅하여 3개씩 실험을 진행하였다. Table 6는 콘크리트 배합 사항을 나타낸 것이다.

Table 5 Experimental plan of concrete

Mix design	W/B (%)	60
	GGBFS replacement ratio (%)	0, 40
	Aggregate	Washed sand, Crushed coarse aggregate, EOS fine aggregate
	EOS replacement ratio (%)	0, 30, 50
Test item	Fresh concrete	Slump, Air content, Unit volume weight
	Hardened concrete	Compressive strength (3days, 7days, 28days), Rapid chloride penetration test (28 days)

EOS : Electric arc furnace Oxidizing Slag
GGBFS : Ground Granulated Blast Furnace Slag

Table 6 Mixing design of concrete

Type of Con'c	EOS rep.(%)		W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)					S.P (%)	
				W	C	GGBFS	Fine aggregate			Coarse aggregate
							Sand	EOS		
OPC Con'c	0	O	60	180	300	-	732	-	1,056	0.8
	30	O-E30					512	287	1,056	0.8
	50	O-E50					366	478	1,056	0.8
GGBFS Con'c	0	G40	60	180	180	120	732	-	1,056	0.8
	30	G40-E30					512	287	1,056	0.8
	50	G40-E50					366	478	1,056	0.8

O : Ordinary portland cement concrete
O-E30 : OPC concrete using 30% EOS fine aggregate
O-E50 : OPC concrete using 50% EOS fine aggregate
G40 : 40% GGBFS mixed concrete
G-E30 : GGBFS concrete using 30% EOS fine aggregate
G-E50 : GGBFS concrete using 50% EOS fine aggregate

2.3 촉진 염화물 확산시험

EOS 잔골재 및 GGBFS 치환율에 따른 염화물 확산계수를 도출하기 위해서 NT BUILD 492에 의거하여 실험을 진행하였다. 촉진 염화물 확산시험을 진행하기 위하여 염화물 확산 Cell을 Fig 2와 같이 구성하였으며, NT BUILD 492의 실험조건은 다음 Table 7에 나타냈다. 시험편은 각 배합에 $\varnothing 100 \times 50$ mm의 크기의 디스크 시편을 3개씩 제조한 후, 음극액 저장소에 10% 염화나트륨(NaCl) 수용액, 양극용액에는 0.3 Mol 수산화나트륨(NaOH) 수용액을 채운 후 8시간동안 30V의 전압을 인가하여 실험을 진행한다. 전압을 인가한 후 시편을 쪼개고, 쪼개진 부분에 0.1 M 질산은(AgNO₃)용액을 분무한다. 음극측 표면에서부터 은색으로 변한 지점까지의 깊이를 염소이온의 침투깊이로 측정하였다. 염소이온 침투깊이로부터 염화물 확산계수는 식 (1), 식 (2), 식(3), 식(4)를 이용하여 식(5)에 의해 도출하였다(Song, et al., 2005; Yoon, et al., 2018; NT Build 492, 1999).

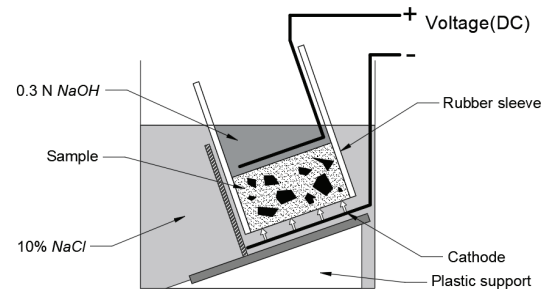


Fig. 2 NT BUILD 492

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{X_d - \alpha \sqrt{X_d}}{t} \quad (1)$$

$$E = \frac{U-2}{L} \quad (2)$$

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \cdot \left(1 - \frac{2C_d}{C_0}\right) \quad (3)$$

$$\text{erf}^{-1} \cdot \left(1 - \frac{2 \times 0.07}{2}\right) = 1.28 \quad (4)$$

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)L \times X_d}{U-2}}\right) \quad (5)$$

여기서,

D_{nssm} = 비정상상태의 촉진 염소이온 확산계수 (m²/sec)

z = 염분에 대한 이온 균형의 절대치(1.0)

F = 패러데이상수 (96,500 J/V·mol)

U = 적용 전압 (30 V)

R = 기체 상수 (8.314 J/mol·K)

T = 양극용액의 초기온도 및 최종온도의 평균온도 (295 K)

L = 공시체 두께 (0.05 m)

x_d = 비색법에 의한 침투깊이 평균값 (m)

t = 시험시간 (28,800 sec)

C_d = 비색법에 의한 염분농도 (mol/l)

C_0 = 음극 용액의 염분농도 (mol/l)

Table 7 Conditions for rapid chloride penetration test

Condition		Levels
Electrolyte	Cathode	10% NaCl
	Anode	0.3Mol NaOH
Applied voltage (V)		30
Thickness (mm)		50

3. EOS를 혼입한 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 실험 결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트

Fig. 3은 OPC 및 GGBFS 콘크리트에 EOS 잔골재 치환량에 따른 슬럼프 시험결과를 나타낸 것이다. EOS 잔골재 치환량이 증가함에 따라 슬럼프가 전체적으로 감소하는 경향으로 나타났다. 또한, GGBFS 혼입 콘크리트 배합에서는 OPC 콘크리트와 비교하여 슬럼프가 높게 나타났다. 이는 GGBFS의 입자 표면이 시멘트 입자 표면에 비해 치밀하여 슬럼프가 높게 나타난 것으로 판단된다(Lee, et al., 2000).

Fig. 4는 OPC 및 GGBFS 콘크리트에 EOS 잔골재 치환량에 따른 공기량 시험결과를 나타낸 것이다. 슬럼프 시험결과

와 비슷한 경향이 나타남을 확인 할 수 있었다. EOS 잔골재의 치환량이 증가함에 따라 공기량이 감소하고 있으며, OPC 콘크리트와 비교하여 GGBFS 콘크리트의 공기량이 높게 나타났다. EOS 잔골재는 입자 표면이 거칠고, 세척사에 비해 미립 자율이 높아 슬럼프와 공기량 모두 감소한 것으로 사료된다. 일반적으로 미립분은 공기량을 흡착하여 콘크리트의 공기량을 감소시키게 된다(Lee, et al., 2005).

Fig 5는 단위용적질량을 비교한 결과를 나타냈다. EOS 잔골재의 치환량이 증가함에 따라 단위용적질량은 최대 2,440 kg/m³로 나타났다. GGBFS 콘크리트에서 전체적으로 단위용

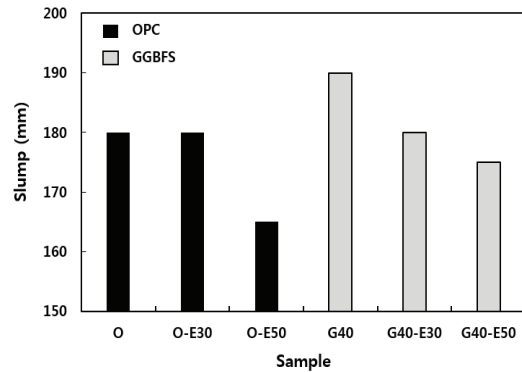


Fig. 3 Test result of slump

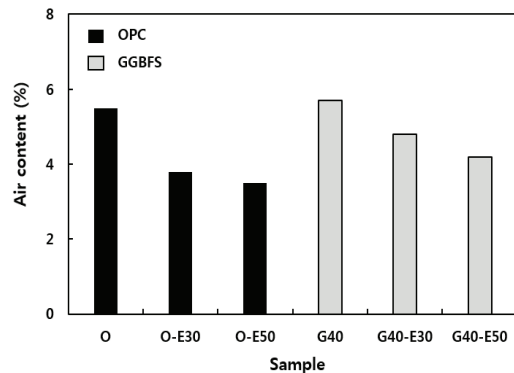


Fig. 4 Test result of air content

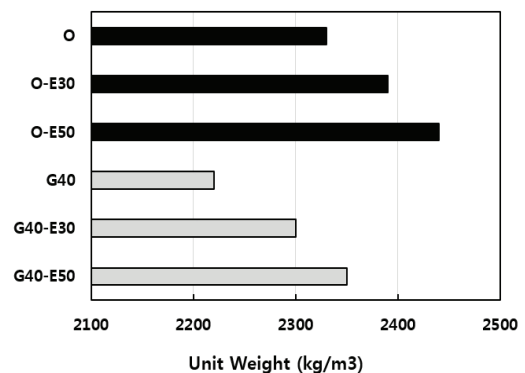


Fig. 5 Test result of unit volume weight

적질량이 감소하였으며, G40-E50에서 2,350 kg/m³으로 OPC 콘크리트와 비교하여 큰 차이를 나타내지 않았다.

3.2 경화 콘크리트

3.2.1 재령별 압축강도 시험결과

Fig. 6은 재령별 압축강도 비교 결과를 나타낸 것이다. OPC 콘크리트 배합에서는 재령 3일, 7일에서 EOS 잔골재 치환량이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 하지만, 재령 28일에서 OPC 기준 콘크리트에서 26.4 MPa로 가장 높게 나타났으며, O-E50에서 23.8 MPa로 가장 낮게 나타났다. 전기로 산화슬래그 치환량이 증가함에 따라 압축강도가 소량 감소한 것으로 나타났다.

GGBFS 콘크리트 배합에서는 재령 3일에서 OPC 콘크리트 배합과 같이 압축강도가 증가하였다. 하지만, 재령 7일에서 G40-E30에서 강도가 16.4 MPa로 소량 감소하였고, G40-E50은 17.5MPa, G40은 17.8 MPa로 비슷한 강도가 나타났다. 재령 28일에서는 G40-E30이 24.5 MPa로 강도가 크게 증가하여 G40과 비슷한 강도가 나타난 반면, G40-E50에서 22.5 MPa로 강도가 소량 감소하였다. G40-E30 배합에서는 OPC 기준 콘크리트 및 GGBFS 기준 콘크리트 배합과 비교하여 큰 차이가 나타나지 않았다. GGBFS 혼입 콘크리트는 일반적으로 초기 재령에서 강도 발현이 낮은 단점이 있다(Lee, et al., 2000). 본 연구에서는 재령 3일까지는 EOS 잔골재 혼입으로 인하여 강도 발현이 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 일반적으로 EOS 골재가 혼입 된 콘크리트는 강도 증진효과가 나타났다(Lim, et al., 2017). 본 연구에서는 재령 28일에서 EOS 잔골재 혼입량이 증가함에 따라 강도가 감소하는 것으로 나타나지만, 약 2 MPa 차이로 큰 차이가 나타나지 않는다고 판단된다.

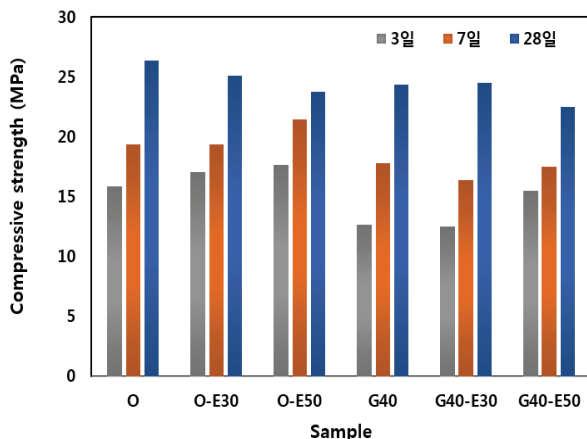


Fig. 6 Test result of compressive strength

3.2.2 촉진 염화물 확산시험

촉진 염화물 확산시험은 NT BUILD 492에 따른 실험을 진행하였다. 각 시험체에 AgNO₃ 용액을 분무하여 염화물 이온 침투깊이를 측정하여 Fig 7에 나타냈다. 왼쪽 그림은 OPC 콘크리트 배합을 나타냈으며, 오른쪽 그림은 GGBFS 콘크리트 배합 시편을 나타낸 것이다. OPC 콘크리트 배합에 비해 GGBFS 콘크리트 배합에서 염화물 이온 침투깊이가 확연히 적음을 확인 할 수 있다.

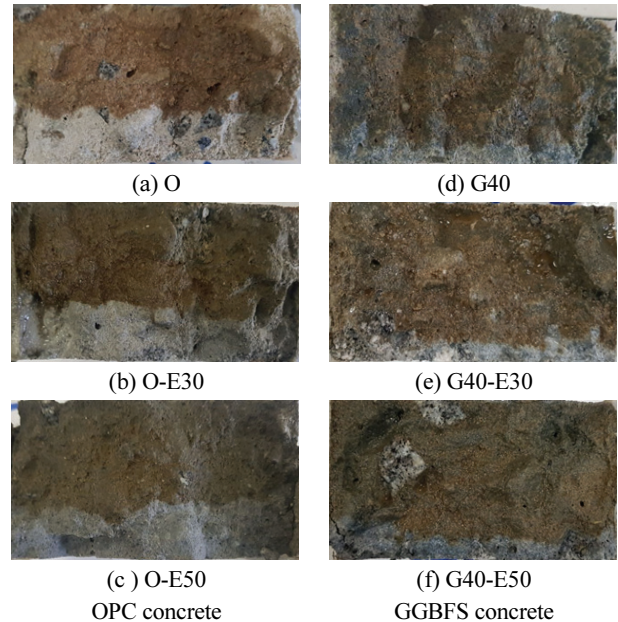


Fig. 7 Chloride penetration depth measurement

Table 8은 각 배합의 염화물 침투깊이를 평균값으로 측정하여 염화물 확산계수를 산정하였다. OPC 콘크리트 배합에서는 O-E30에서 염화물 침투깊이가 18.71 mm로 가장 많은 침투를 나타냈으며, O-E50에서 16.04 mm로 가장 적은 침투깊이를 나타냈다. GGBFS 콘크리트 배합에서도 G40-E30에서 7.29 mm로 가장 깊은 침투깊이를 나타냈으며, G40-E50에서 6.65 mm로 가장 적은 침투깊이를 나타냈다.

Table 8. Test result of chloride diffusion

	Chloride penetration depth (mm)	Chloride diffusion coefficient (10 ⁻¹² m ² /sec)
O	18.15	20.8
O-E30	18.71	21.6
O-E50	16.04	20.3
G40	6.73	7.33
G40-E30	7.29	8.63
G40-E50	6.65	6.65

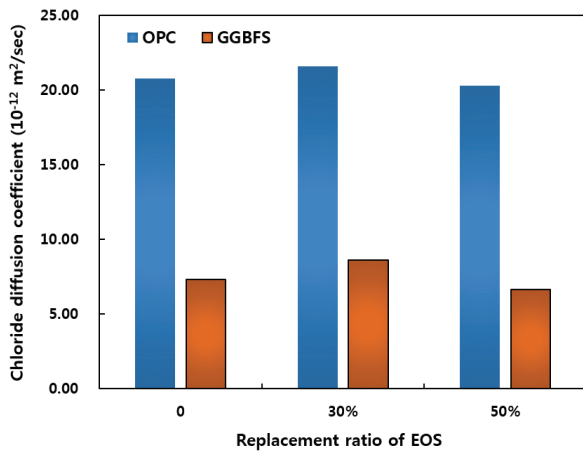


Fig. 8 Test result of chloride diffusion coefficient

Fig. 8은 각 배합의 염화물 확산계수를 나타낸 것이다. OPC 콘크리트 배합에서 EOS 잔골재 30% 치환 배합에서 가장 높은 염화물 확산계수 $21.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 평가되었으며, EOS 잔골재 50% 치환 배합에서 OPC 기준 배합 대비 소량 감소하여, $20.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가장 낮게 평가되었다.

GGBFS 콘크리트 배합에서도 EOS 잔골재 30% 치환 배합에서 가장 높은 염화물 확산계수 $8.63 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타났으며, EOS 잔골재 50% 치환 배합에서 $6.65 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가장 낮은 확산계수를 나타냈다. OPC 콘크리트 배합과 비교하여 GGBFS 콘크리트 배합의 염화물 확산계수가 저감되었으며, 약 2.7배 차이를 나타내고 있다. 이는 GGBFS의 혼입으로 인하여 염화물 이온의 침투 저항성이 향상 된 것으로 판단된다(Song, et al., 2003). 또한 EOS 잔골재가 혼입 된 콘크리트는 일반 골재 활용시와 비교하여 동등이상의 내구성능을 발현하는 것으로 평가되었다(Cho, et al., 2009). 본 연구에서는 EOS 잔골재를 30% 혼입 배합에서 염화물 이온 침투에 대한 확산계수가 소량 증가하였지만, 각 기준 콘크리트 배합과 비교하여 큰 차이는 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 EOS 잔골재 및 GGBFS를 혼입한 초기 재령 콘크리트의 공학적 특성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. OPC 콘크리트 배합 및 GGBFS 콘크리트 배합 모두에서 EOS 잔골재의 혼입량이 증가함에 따라 슬럼프와 공기량이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 EOS 잔골재가 세척사에 비해 골재 표면이 거칠고 미립분이 많아 영향을 준 것으로 사료된다.

2. EOS 잔골재 치환량이 증가함에 따라 재령 3일, 7일에서 압축강도가 OPC 콘크리트 배합 및 GGBFS 콘크리트 배합에서 높은 강도 발현을 확인하였다. 재령 28일에서는 각 기준 배합 콘크리트에 비해 약 2 MPa 차이로 강도가 소량 감소하게 나타났지만, GGBFS 콘크리트의 전기로 산화슬래그 잔골재 30% 치환 배합에서 높은 강도 발현을 보여 OPC 콘크리트 배합과 비슷한 강도 발현이 나타났다.
3. 촉진 염화물 확산시험을 평가한 결과 GGBFS 혼입 콘크리트 배합에서 OPC 콘크리트 배합과 비교하여 EOS 잔골재 0% 치환 배합에서 약 65% 감소하였으며, EOS 잔골재 30% 치환배합에서 약 60% 감소, EOS 잔골재 치환 배합에서 약 67% 수준으로 감소하였다. EOS 잔골재 50% 치환 배합에서 OPC 콘크리트 배합 및 GGBFS 콘크리트 배합 모두에서 가장 낮은 염화물 확산계수가 나타났다.
4. 물-결합재비 60%의 OPC 콘크리트에 EOS 잔골재를 활용시 콘크리트의 단위용적질량 및 역학적 특성을 고려하여 EOS 잔골재를 30%까지 활용 가능할 것으로 사료되며, GGBFS 콘크리트에서는 EOS 잔골재를 50%까지 활용 가능할 것으로 판단된다.
5. EOS 잔골재를 활용하면 GGBFS 혼입 콘크리트의 초기 재령에서의 강도 발현에 효과가 있는 것으로 판단되며, EOS 잔골재가 콘크리트 골재 대체 재료로서의 가능성을 확인 할 수 있었다. 추후 장기재령에서의 압축강도 및 내구성능에 대한 추가연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단 기초연구지원사업(NRF-2015R1A5A1037548) 및 기초연구사업(학문후속세대양성 NRF-2018R1A6A3A01010614) 지원을 받아 수행되었으며, 저자는 이에 감사드립니다.

References

1. Kim, J. M., and Park, H. I. (2012), Evaluation on Volume Stability of the Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Aggregate by Hydro Thermal Condition, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 29, 551-560.
2. Tam, V. W. Y., Gao, X. F., and Tam, C. M. (2005), Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research*, 35 1195-1203.
3. Kwon, S.J., Lim, H.S., and Lee, H.S. (2018), Quantitative

- evaluation of Free CaO in electric arc furnace reduction slag using the ethylene glycol method, *Journal of Korea Institute of Building Construction*, 18(4), 321-327.
4. Song, H. W., Kwon, S. J., Lee, S. W., and Byun, K. J. (2003), A study on resistance of chloride ion penetration in ground granulated blast-furnace slag concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(3), 400-408.
 5. Song, H. W., and Kwon, S. J. (2009), Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure. *Cement and Concrete Research*, 39, 814-824.
 6. Kwon, S. J., and Park, S. G. (2013), Analysis technique for chloride penetration in high performance concrete behavior considering time-dependent accelerated chloride diffusivity, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(2), 145-153.
 7. Oh, K. S., Mun, J. M., and Kwon, S. J. (2016), Chloride diffusion coefficients in cold joint concrete with GGBFS, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(5), 44-49.
 8. Faraone, N., Tonello, G., and Maschio, S. (2009), Steelmaking Slag as Aggregate for Mortars: Effects of Particle Dimension on Compression Strength, *Chemopere*, 77, 1152-1156.
 9. Lim, H. S., and Lee, H. S. (2011), Experimental Study on the Development of X-ray Shielding Concrete Utilizing Electronic Arc Furnace Oxidizing Slag, *Architectural Institute of Korea*, 27, 125-132.
 10. Cho, B. S., Lee, H. H., Yang, S. K., Lee, W. J., and Um, T. S. (2009), Appraisal of Concrete Performance and Plan for Stable Use of EAF Oxidizing Slag as Fine Aggregate of Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21, 367-375.
 11. Lee, S. H., Lim, D. S., Lee, S. H., and Lee, J. H. (2013), Mechanism of Strength Development in Ultra High Strength Concrete Using the Electric Arc Furnace Oxidizing Slag as Fine Aggregate, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(1), 3-9.
 12. Roslan, N. H., Ismail, M., Abdul-Majid, Z., Ghoreishiamiri, S., and Muhammad, B. (2016). Performance of steel slag and steel sludge in concrete. *Construction and Building Materials*, 104, 16-24.
 13. Sheen, Y.D., Le, D. H., and Sun, T.H. (2015), Innovative Usages of Stainless Steel Slags in Developing Self-compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, 101, 268-276.
 14. Lim, H. S., and Lee, H. S. (2017), Study on performance evaluation of concrete using electric arc furnace oxidizing slag aggregate, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(4), 97-103.
 15. Chun, J. H., Ryu, H. S., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2017), Crack and time effect on chloride diffusion coefficient in nuclear power plant concrete with 1 year curing period, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(6), 83-90.
 16. Yoo, J. G. (2010), Durability Design of Concrete and Evaluation of Field Application on Reinforced Concrete Structure Exposed to Marine Environment, Ph.D. dissertation, Daejeon, Chungnam University, Department of Architectural Engineering.
 17. Tang, L., and Nilsson, L.O. (1992), Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, *ACI Materials Journal*, 89(1), 49-53.
 18. Tang, L. (1996), Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete-Current Development, *Magazine of Concrete Research*, 48(176), 173-179.
 19. NT BUILD 492. (1999) Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, Denmark, Slettetofte: NORDTEST. 1-11.
 20. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K. (2005), A Study on Analytical Technique of Chloride Diffusion Considering Characteristics of Mixture Design for High Performance Concrete using Mineral Admixture, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 25(1A), 213-223.
 21. Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018), Evaluation of time-dependent chloride resistance in HPC containing fly ash cured for 1 year, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(4), 52-59.
 22. Lee, S. S., Won, C., Kim, D.S., and Park, S. J. (2000), A study on the engineering properties of concrete using blast-furnace slag powder, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 12(4), 49-58.
 23. Lee, M. H., Lee, S. H., and Shim, J. W. (2005), A study on the properties of recycled concrete using recycled fine aggregates with different removal formulas of powder in aggregate, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 17(1), 95-104.

Received : 03/21/2019

Revised : 04/01/2019

Accepted : 04/10/2019

요 지 : 매립지 감소 및 천연 잔골재의 부족으로 인해 산업부산물물 콘크리트의 골재로 사용하려는 연구가 최근 들어 빠르게 진행되고 있다. 본 연구에서는 EOS 잔골재를 치환하여, OPC 콘크리트 배합과 GGBFS 배합을 대상으로 초기재령에서의 공학적 특성을 평가하였다. 실험은 EOS 잔골재를 0%, 30%, 50%로 치환, GGBFS를 0%, 40% 치환하여 물-결합재비 60% 콘크리트로 실험을 진행하였다. 굳지 않은 콘크리트에서 슬럼프, 공기량, 단위용적질량을 평가하였으며, 경화 콘크리트에서 압축강도와 NT BUILD 492 방법을 이용한 염화물 확산계수를 도출하고 EOS 골재 치환에 따른 내구성능을 평가하였다. 본 연구의 실험결과 EOS 잔골재를 치환함에 따라 재령 3일, 7일까지는 압축강도 발현이 각 기준 배합에 비해 증가함을 확인하였지만, 재령 28일에서는 일부 감소하는 것을 확인하였다. 또한 촉진 염화물 침투 실험결과, GGBFS 콘크리트 배합에서 OPC 콘크리트 배합과 비교하여 약 60~67% 감소하였으며, EOS 잔골재 50% 치환 배합에서 가장 낮은 염화물 확산계수가 나타남에 따라 EOS 잔골재가 OPC 및 GGBFS 콘크리트에 사용될 수 있는 공학적 가능성을 제시하였다.

핵심용어 : EOS, GGBFS, 콘크리트, 촉진 염화물 확산계수