제강슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 공극 구조 및 내구성 평가

Assessing the Effects of Steelmaking Slag Powder on the Pore Structure and Durability of Concrete

홍세희* · 원천봉** · 최진석*** · 윤영수****

Hong, Se-Hee*, Yuan, Tian-Feng**, Choi, Jin-Seok***, and Yoon, Young-Soo****

Abstract

This study analyzes the pore structure and durability of concrete according to four different ratios of steelmaking slag powder (SSP). Concrete containing SSP increased the formation of gel and capillary pores due to delayed hydration, and the largest cumulative pore volume was observed when the incorporation ratio was 20%. In terms of durability, the incorporation of SSP had decreased performance compared to concrete without SSP (NN), which was due to changes in the pore structure caused by incorporating SSP. In the case of the freezing and thawing resistance, concrete containing 10% SSP showed a remarkable relative dynamic elastic modulus of more than 80%, and a similar carbonation depth was predicted within 15% of SSP. In addition, the resistance performance of chloride ion migration in concrete with SSP was excellent. Accordingly, it can be utilized as a supplementary cementitious material if the freezing and thawing resistance of concrete containing 15% SSP is secured.

Key words : Steelmaking Slag, Pore Structure, Freezing and Thawing, Carbonation, Chloride Ion Migration

요 지

본 연구에서는 4종의 제강슬래그 미분말 치환율을 고려하여 콘크리트의 공극 구조 및 내구성을 분석하였다. 제강슬래그 미분말이 혼입된 콘크리트는 수화반응이 지연되어 콘크리트 내 겔 공극 및 모세관 공극의 형성을 증가시켰으며, 제강슬래그 미분말이 20% 치환되었을 때 가장 큰 누적 공극량이 나타났다. 제강슬래그 미분말의 혼입으로 인해 내구성능이 저하하였으며, 이는 제강슬래그 미분말의 혼입으로 인한 공극 구조의 변화에 기인한다. 동결융해 저항성능의 경우, 제강슬래그 미분말이 10% 치환된 변수는 80% 이상의 상대 동탄성 계수가 나타났으며, 제강슬래그 미분말의 치환율 15% 이내에서는 유사한 탄산화 깊이가 예측되었다. 또한, 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트는 염화물 이온 침투 저항성능이 우수하게 나타났다. 이에 따라, 추가적인 연구를 통해 제강슬래그 미분말을 15% 치환하여 동결융해 저항성능을 확보할 경우, 시멘트 대체재로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 제강슬래그, 공극 구조, 동결융해, 탄산화, 염화물 이온 확산

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정(E-mail: bestshhong@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**정회원, 고려대학교 미래건설환경융합연구소 연구교수(E-mail: yuantianfeng@korea.ac.kr)

Member, Research Professor, Future and Fusion Lab of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University

***정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정(E-mail: radiance@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel : +82-2-3290-3320, Fax : +82-2-3290-5999, E-mail: ysyoon@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

1. 서 론

건설 및 콘크리트 분야에서 산업부산물의 처리 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 산업부산물은 일반적으로 매립을 하여 처리하는데, 최근에는 매립지가 부족한 상황이며, 또한 매립으로 인한 환경 문제가 유발되고 있다. 이러한 측면에서, 산업부산물은 새로운 활용처가 요구되고 있는 실정이며, 이에 대한 해결 방안으로는 산업부산물을 콘크리트에 혼입함으로써 이를 고부가가치 재료로 활용하는 것이다. 실제 국내·외에서는 이를 실현하기 위해 산업부산물인 고로슬래그(Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS) 및 플라이애쉬(Fly Ash, FA)를 콘크리트에 혼입하여 적용하는 다양한 연구가 오랫동안 진행되었다(Kang, 2013). 산업부산물을 활용한 기술개발 사례를 살펴보면, 국내의 S사는 콘크리트 내 시멘트의 50%를 고로슬래그 미분말로 치환하여 프리캐스트 콘크리트 부재에 적용하는 기술을 확보하였으며, P사의 경우 슬래그의 혼입률을 60-80%까지 설정하여 슬래그시멘트와 유사하거나 그 이상의 성능이 나타나는 재료의 개발을 완료하였다(Kang, 2013; Kim and Yoo, 2015).

고로슬래그 및 플라이애쉬와 더불어 제강슬래그(Steelmaking slag)도 산업부산물의 한 종류이다. 보통, 철근 생산량의 15-20% 수준이 제강슬래그로 발생되는 것으로 알려져 있으며, 제강슬래그는 고강도 철근에 대한 연구 및 개발이 지속해서 진행됨에 따라 그 발생량이 증가하기 시작하였다(Han and Zhang, 2018). 실제로 2012년에는 약 1억 9천만 톤, 2018년에는 약 2억 4천만 톤의 제강슬래그가 전세계적으로 발생한 것으로 보고되고 있다(Rashad, 2019). 제강슬래그의 국가 별 발생량 및 재활용률을 살펴보면, 2012년 유럽에서는 약 2천만 톤의 제강슬래그가 발생하였으며, 특히 독일 및 프랑스에서의 제강슬래그 재활용률은 90% 이상이었다(Guo et al., 2018). 또한, 2013년 중국에서는 약 1억 톤의 제강슬래그가, 2016년 일본에서는 약 1천 4백만 톤의 제강슬래그가 발생하였으며, 일본은 약 98.4%의 높은 제강슬래그 재활용률을 보였다(Guo et al., 2018). 추가적으로, 제강슬래그의 활용 분야를 살펴보면, 미국, 유럽 및 일본은 제강슬래그를 주로 시멘트 원료, 도로 및 토목 구조물에 활용하고 있으며, 전체 사용량에 대한 활용비율은 각각 약

69%, 51%, 67%로 나타났다(Guo et al., 2018).

제강슬래그를 건설 분야에 활용한 기존의 문헌들을 살펴보면, 제강슬래그는 주로 잔골재 및 굵은골재로 혼입한 연구가 다수였다(Maslehuddin et al., 2003; Arribas et al., 2014; Qasrawi, 2014). 하지만 최근에는 온실가스로 인한 피해를 줄이기 위해 제강슬래그를 분말화하여 제강슬래그 미분말(Steelmaking Slag Powder, SSP)을 시멘트의 대체재로 활용하여 다양한 연구가 진행되고 있다(Pan et al., 2019; Zhang et al., 2019; Roslan et al., 2020). 연구사례를 살펴보면, 국외의 한 문헌(Pan et al., 2019)에서는 제강슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 강도 및 내구성(탄산화 저항성, 염화물 이온 침투 저항성)을 평가하였으며, 28일 압축강도는 약 50 MPa 수준으로 측정되었다. 또한, 다른 문헌(Roslan et al., 2020)에서는 제강슬래그 미분말 혼입 40 MPa급 콘크리트의 흡수를 평가 및 수화생성물의 이미지 분석을 실시하였으며, 제강슬래그 미분말을 초고성능 콘크리트(Ultra-High-Performance Concrete, UHPC)의 결합재로 활용한 연구(Zhang et al., 2019)에서는 콘크리트의 수화, 강도 및 수축 특성에 대해 분석을 수행하였다. 하지만 이들은 주로 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 미세구조 및 강도 특성 분석에 대한 연구이며, 내구성에 대한 연구는 미비한 실정이다. 또한, 제강슬래그 미분말을 활용하기 위해서는 콘크리트에 직·간접적으로 영향을 미치는 내구성에 대한 평가의 필요성이 보고되고 있다(Hong et al., 2019). 이에 따라, 본 연구에서는 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트를 프리캐스트 콘크리트 부재에 적용하기 위한 기초 연구로써, 제강슬래그 미분말의 치환율을 4종(0%, 10%, 15%, 20%)으로 설정하여 콘크리트의 공극 구조 및 내구성 평가를 수행하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서 사용한 배합 변수 및 상세는 Table 1과 같다. 기존의 문헌(Hong et al., 2019)에서는 3종(0.275, 0.300, 0.325)의 물-바인더비(Water to binder ratio, w/b)에 따른 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 미세구조 및 강도를 평가하였다. 평가결과, 물-바인더비가 0.325인 경우에 가장

Table 1. Mix Designs of Concrete Containing Steelmaking Slag Powder

Mix	w/b (%)	Unit weight (kg/m ³)					AEA (%)	f _{c,28} (MPa)
		W	C	SSP	S	G		
NN	32.5	170	523	-	657	971	0.19	64.71
SSP-10			471	52				61.16
SSP-15			445	79				59.14
SSP-20			419	105				47.23

* w/b: water to binder ratio; W: water; C: cement; SSP: steelmaking slag powder; S: sand; G: gravel; AEA: high range air entraining water reducing agent; f_{c,28}: compressive strength at 28-days after casting

Table 2. List of Pore Structure and Durability Assessment Item and Standard Conducted

Evaluation criteria		Standard (year)
Pore structures		ASTM D4404 (2018)
Air contents		KS F 2421 (2016)
Durability	Freezing and thawing	KS F 2456 (2018)
	Carbonation	KS F 2584 (2010)
	Chloride ion migration	NT BUILD 492 (1999)

우수한 공극 및 강도특성이 나타났으며, 이에 따라 본 연구에서는 물-바인더비를 0.325로 고정한 후, 4종의 제강슬래그 미분말 치환율(0%, 10%, 15%, 20%)을 설정하였다. 제강슬래그 미분말의 치환율이 0%인 변수는 NN으로 명명하였으며, 제강슬래그 미분말이 혼입된 변수는 SSP 뒤에 치환율을 기입하였다. 작업성 및 유동성을 확보하기 위해 모든 변수에 동일한 양의 혼화제를 혼입하여 목표 슬럼프 (150 ± 30 mm)를 만족하였으며, Table 2는 본 연구에서 수행한 실험의 목록 및 규정을 나열한 것이다. 본 연구에서는 제강슬래그 미분말의 치환율에 따른 고강도 콘크리트의 내구성을 평가하기 위해 범용적으로 수행되는 동결융해, 탄산화 및 염화물 이온 침투 실험을 진행하였다. 추가적으로, 내구성에 영향을 미치는 인자를 콘크리트 내의 공극 및 공기량으로 설정하여, 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)을 통한 공극 구조 분석 및 공기량 실험을 내구성 평가에 앞서 수행하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서는 시멘트 및 제강슬래그 미분말을 결합재로 사용하였다. 시멘트는 일반적으로 사용되는 1종 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)를 사용하였으며, 분말도 $3,413 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 특징을 가진다. 제강슬래그는 국내 H사로부터 조크러셔(Jaw crusher)에 의한 1차 분쇄 및 에이징(야적 6개월) 작업을 거친 골재를 공급받았다. 이후, C사에서 볼밀(Ball mill)을 활용하여 분쇄작업을 거쳐, 최종적으로 약 $5,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 분말도를 가지는 제강슬래그 미분말을 확보하였다. 이후, 시멘트량의 10% (SSP-10), 15% (SSP-15), 20% (SSP-20)를 제강슬래그 미분말로 치환하여 콘크리트 배합을 진행하였다. 본 연구에서 활용한 각 결합재에 대해 X선 형광 분석기를 활용하여 X-Ray Fluorescence (XRF) 분석을 수행하였으며, 화학적 및 물리적 특성은 Table 3과 같다. 제강슬래그 미분말의 경우, Fe 성분을 약 40% 함유하고 있어, 시멘트의 밀도(3.15 g/cm^3)에 비해 약 26% 증가한 3.96 g/cm^3 로 측정되었다. 골재도 모두 국내에서 생산되는 제품을 사용하였으며, 잔골재 및 굵은골재(최대치수 19 mm)의 조립률은 각각 2.82, 6.73이다. 골재의 입도분포는 Fig. 1에

Table 3. The Chemical and Physical Properties of Binder (Cement and Steelmaking Slag Powder)

Types		Cement (%)	SSP (%)
Chemical	SiO ₂	23.0	14.2
	CaO	63.0	22.1
	Al ₂ O ₃	6.5	11.1
	T-Fe*	3.0	39.9
	MgO	2.0	3.33
	SO ₃	1.9	0.02
	MnO	-	5.59
	TiO ₂	-	0.69
Physical	Density (g/cm ³)	3.15	3.96
	Blaine (cm ² /g)	3,413	4893

* T-Fe: FeO, Fe₂O₃

Fig. 1. Sieve Analysis of the Aggregates

나타나 있으며, 본 연구에서 사용한 잔골재 및 굵은골재는 모두 국가건설기준센터의 일반콘크리트(KCS 14 20 10, 2016)의 표준입도분포 범위를 만족한다. 추가적으로, 모든 배합의 작업성 및 유동성을 확보하기 위해 폴리카르복산계 (Polycarboxylate)를 주성분으로 하는 국내 D사의 고성능 AE 감수제(High range air entraining water reducing agent, AEA)를 혼입하였다. 28일 재령에서, NN, SSP-10 및 SSP-15는 약 60 MPa 수준의 압축강도가 발현하였고, SSP-20은 약 47 MPa로 나타났다.

2.3 공극 구조 및 내구성 평가 방법

2.3.1 공극 구조 특성 평가

콘크리트의 공극 구조는 ASTM D4404 (2018) 규정에 의거하여 공극 분포 및 공극률을 평가하였다. 계획된 재령에서 콘크리트를 파쇄하여 MIP 시료를 준비하였으며, 실험 시작 전까지 MIP 시료를 아세톤에 침지시켜 콘크리트의 수화반응을 억제하였다. 이후, 기공률 분석기를 사용하여 MIP 시료에 최대 30,000 psi의 압력을 적용시켰다. 이후, Eq. (1)에 나타나 있는 Washburn의 식을 이용하여 공극의 크기를 산정하였다.

$$D = -4\gamma\cos\theta/P \quad (1)$$

여기서, D 는 공극의 직경(μm), γ 는 수은의 표면장력(dyne/cm), θ 는 시료와 수은의 접촉각(degree), 그리고 P 는 수은 압입 압력(psia)이다.

2.3.2 공기량 평가

공기량 시험은 보일의 법칙을 기초로 한, 압력 감소에 의해 공기 함유량을 평가하는 KS F 2421 (2016) 규정에 따라 진행하였다. 배합 직후의 굳지 않은 콘크리트를 사용하였으며, 공기실의 압력과 용기 내의 압력이 평형을 유지하는 상태에서 압력을 가하여, 눈금에 적힌 공기량을 기록하였다.

2.3.3 동결융해 저항성능 평가

동결융해 저항성능을 평가하기 위해 KS F 2456 (2018) 내 수중 급속 동결 융해 시험방법(방법A)에 따라 실험을 진행하였다. 시험체는 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 의 각주형으로 제작하였으며, 콘크리트 타설 후 재령 28일에서부터 시험체의 공명진동수 및 질량을 매 30 사이클마다 측정하여 300 사이클에서 측정을 종료하였다. 동결융해 1 사이클은 규정에 따라 시험체의 중심부 온도를 기준으로 최소 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 최대 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였으며, 본 연구에서는 Eq. (2)를 활용하여 상대 동탄성 계수를 도출하였다.

$$P_c = (n_c^2/n_0^2) \times 100 \quad (2)$$

여기서, P_c 는 동결융해 C 사이클 후의 상대 동탄성 계수(%), n_c 는 동결융해 C 사이클 후의 공명진동수(Hz), 그리고 n_0 는 실험 전의 공명진동수(Hz)를 의미한다.

또한, 공명진동수와 동일하게, 시험체의 질량도 30 사이클마다 측정하였으며, Eq. (3)을 통해 질량 손실률을 산정하였다.

$$W = (W_0 - W_C)/W_0 \times 100 \quad (3)$$

여기서, W 는 동결융해 C 사이클 후의 질량 손실률(%), W_0 는 실험 전의 시험체의 질량(kg), 그리고 W_C 는 동결융해 C 사이클 후의 시험체의 질량(kg)을 의미한다.

2.3.4 탄산화 저항성능 평가

탄산화 촉진 실험은 KS F 2584 (2010) 규정에 의거하여 진행하였으며, $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 크기를 갖는 각주형 시험체를 제작하여 콘크리트의 탄산화 저항성능을 평가하였다. 콘크리트는 타설 후 표준양생을 실시하였으며, 표준양생 이후에는 규정에 따라 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 의 온도 및 $(60 \pm 5)\%$ 의 습도로 양생을 지속하였다. 모든 양생 이후에는 CO_2 의 일차원 침투(One-dimensional penetration)를 유도

하기 위해 시험체의 두 옆면을 제외하고 총 네 면(타설면, 바닥면, 양단면)을 폴리우레탄으로 코팅하였다. 시험체의 탄산화 촉진 조건으로써, 항온-항습 챔버 내 온도, 상대습도, 및 이산화탄소의 농도는 각각 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, $(60 \pm 5)\%$, $(5 \pm 0.2)\%$ 로 설정하였다. 탄산화 깊이는 탄산화 촉진 후 재령 2주, 4주, 6주, 8주에서 측정하였다. 탄산화 깊이 측정에 앞서, 시험체를 60 mm 길이로 절단하였으며, 절단면에 1% 페놀프탈레인 용액을 분무하였다. 페놀프탈레인 용액은 pH 값에 따라 색이 변화한다. 콘크리트는 일반적으로 약 pH 13의 강알칼리성 재료이며, 페놀프탈레인 용액을 절단면에 분무하였을 때 단면의 색이 붉은 보라색으로 변한다면, 이는 콘크리트의 pH가 9.5보다 높아 탄산화가 일어나지 않은 것이다. 또한, 콘크리트의 pH가 8-9.5 범위에 존재한다면, 페놀프탈레인 용액은 연분홍색으로 나타나며, 콘크리트의 pH가 8 이하일 경우, 페놀프탈레인 용액은 무색으로 존재한다. 탄산화 깊이는 총 10개의 지점에서 측정하여 0.5 mm 단위로 반올림하였으며, 측정 위치는 Fig. 2에 나타나 있다.

Fig. 2. Preparation and Measurement Points of Accelerated Carbonation Test Specimen

2.3.5 염화물 이온 침투 저항성능 평가

NT BUILD 492 (1999)는 비정상 상태(Non-steady state)에서의 촉진 실험법에 대한 기준으로, 본 연구에서는 염화물 침투 깊이를 측정하여 염화물 확산계수를 산정하였다. 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성능을 평가하기 위해 $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 크기의 원주형 공시체를 제작하였다. 이후 공시체의 중앙부에서 $\phi 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 크기의 시편을 절단하였으며, 규정에 따라 전처리 과정을 진행하였다. 전처리 과정 후에 Fig. 3(a)와 같이 시험체를 세팅하였으며, 시험조 내의 양극액(Anolyte)과 음극액(Catholyte)로써 각각 0.3M NaOH 용액과 10% NaCl 용액을 사용하였다. 실험 초기에 30 V의 전압을 가하였으며, 실험 종료 후에는 시험체를 할렬(Split) 파괴하였다. 염화물 침투 깊이를 측정하기 위해 할렬면에 0.1M AgNO_3 용액을 분무하여 색상의 변화를 육안으로 관찰하였다. 염화물 이온의 침투가 발생하지 않았다면 할렬면은 어두운 색상으로 나타나며, 이와 반대로 염화물 이온이 콘크리트 내부로 침투했다면 할렬면의 색상은 밝게 나타난다. 염화물 침투 깊이는 Fig. 3(b)와 같이 측정하였다.

(a) Test setup

(b) Measurement points of chloride penetration depth of concrete

Fig. 3. Evaluating Resistance of Chloride Penetration of Concrete

3. 실험결과 및 분석

3.1 공극 구조 분석

콘크리트 내 공극은 존재 형태에 따라 내구성에 영향을 미치며, 일반적으로 공극은 겔 공극(Gel pore), 모세관 공극(Capillary pore), 연행 공기(Entrained air) 및 갇힌 공기(Entrapped air)로 분류된다. Table 4는 공극의 크기에 따른 겔 공극 및 모세관 공극을 나타낸 것이다(Zeng et al., 2012). 겔 공극은 Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) 같은 수화물(Hydration product)의 생성과 관련이 있으며, 모세관 공극은 콘크리트 외부의 유해한 이온, 물, 산소, 이산화탄소 등의 침투 경로가 되어 내구성을 저하시킬 수 있다(Lee et al., 2012).

Fig. 4는 제강슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트 내 공극 분포를 나타낸 것이다. NN, SSP-10 및 SSP-15는 유사한 누적 공극량(Cumulative pore volume) 거동을 보였지만, SSP-20은 나머지 변수에 비해 누적 공극량이 높게

Table 4. Classification of Pore by Size

Classification	Pore size (nm)
Gel pore (micro)	≤ 4.5
Meso pore	4.5-50
Middle capillary pore (macro)	50-100
Large capillary pore (macro)	100-10,000

Fig. 4. Pore Size Distribution of Concrete

나타난 것을 확인할 수 있다. SSP-20의 누적 공극량은 NN에 비해 약 67% 증가하였으며, 이는 제강슬래그 미분말의 혼입에 의한 수화반응의 지연이 원인으로 판단된다. 일반적으로 제강슬래그 미분말은 시멘트에 비해 반응성이 낮은 것으로 알려져 있으며, 수화반응의 지연은 콘크리트 내 수화물의 생성에 영향을 미친다. 콘크리트 내부는 수화물이 생성되면서 채워지는데, 수화반응의 지연은 충전 효과(Filling effect)를 억제한다(Zhang et al., 2019). 한편, 기존의 문헌들은 X-Ray Diffraction (XRD) 분석 및 응결 시험을 통해 제강슬래그 미분말의 혼입은 콘크리트의 수화반응 지연을 유발하는 것으로 보고하고 있다(Hong et al., 2019, 2020).

공극의 크기에 따른 분포를 살펴보면, 겔 공극은 제강슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 높게 측정되었다. SSP-10, SSP-15 및 SSP-20의 겔 공극량은 NN에 비해 각각 3.00×10^{-3} ml/g, 4.46×10^{-3} ml/g, 5.87×10^{-3} ml/g 높게 나타났으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이, 제강슬래그 미분말의 혼입에 의해 수화 반응이 지연되어 겔 공극이 높게 측정된 것으로 판단된다. 또한, 모세관 공극의 경우, SSP-20은 SSP-10 및 SSP-15에 비해 각각 약 101%, 55% 증가하며 나머지 변수에 비해 공극량의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 이를 통해 SSP-20은 본 연구에서 고려한 변수들 중 가장 낮은 내구성능을 보일 것으로 예상되었다. Fig. 5는 콘크리트 내 공극들의 분포 비율을 나타낸 것이다.

Fig. 5. Pore Volume Distribution of Concrete

3.2 공기량 분석

Table 5는 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트 내 공기 함유량을 평가한 것이다. 제강슬래그 미분말의 치환율에 관계없이 콘크리트의 공기량은 1.0~1.2% 수준으로 측정되어 유사한 값이 나타났다. 일반적으로, 제강슬래그는 수분을 흡착하는 성질이 강하여, 혼입률이 증가할수록 워커빌리티가 감소하는 것으로 보고되고 있다(Hong et al., 2019; Roslan et al., 2020). 작업성의 향상을 위해 제강슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 고성능감수제의 혼입량이 증가하게 되는데, 이를 통해 공기량도 동시에 향상된다(Coppola et al., 2016). 하지만, 본 연구에서는 동일한 고성능 AE 감수제 혼입률로 목표 슬럼프 범위를 만족하여 모든 변수에서 유사한 공기량 측정값이 나타난 것으로 판단된다.

한편, KCS 14 20 10에 의하면 일반강도 콘크리트 및 고강도 콘크리트의 공기량 범위는 각각 $(4.5 \pm 1.5)\%$, $(3.5 \pm 1.5)\%$ 로 설정되어 있다. 본 연구의 배합 변수들은 압축강도 40 MPa 이상이 나타나 고강도 콘크리트의 범위에 속하며, 이에 따라 모든 변수들은 최소 2% 이상의 공기량을 확보해야 한다. 하지만, 배합 변수들의 공기량은 1~2% 범위로 나타나며 기준을 충족시키지 못하였고, 추가적인 공기연행제의 혼입이 필요하다.

Table 5. Air Contents in Concrete

	NN	SSP-10	SSP-15	SSP-20
Air contents	1.1%	1.3%	1.1%	1.2%

3.3 동결융해 저항성능 분석

Fig. 6(a)는 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 사이클별 동결융해 저항성능을 나타낸 것이다. 모든 변수는 동결융해 300 사이클까지 지속시킨 후 시험을 종료하였다. NN과 SSP-10은 동결융해 300 사이클에서 상대 동탄성 계수가 각각 85.8%, 81.4%로 측정되어 80% 이상의 우수한 상대 동탄성 계수를 보였지만, 제강슬래그 미분말의 혼입은 콘크리트의 동결융해 저항성능을 감소시키는 것으로 나타났다(Ryu et al., 2012). SSP-15 및 SSP-20은 NN에 비해 상대 동탄성 계수가 각각 7.60%, 11.9% 저하하였으며, 이는 제강슬래그 미분말의 혼입으로 인해 발생한 공극 구조의 변화가 원인으로 판단된다. 모세관 공극은 결합재 입자가 수화반응을 하지 않아 형성되는 공극이다. 모세관 공극 내에는 동결될 수 있는 수분이 존재하는데, 동결융해 작용이 반복될 경우, 수분에 의한 팽창압이 생성되어 콘크리트의 내부 균열 및 표면 박리를 유발한다(Kim et al., 2015). 제강슬래그 미분말이 혼입된 콘크리트는 치환율이 증가함에 따라 모세관 공극량이 증가하였으며, 이에 따라 본 연구에서는 제강슬래그 미분말의 치환율이 가장 높은 SSP-20에서 가장 낮은 상대 동탄성 계수가 나타났다.

(a) Relative dynamic elastic modulus

(b) Ratio of mass change

Fig. 6. Freezing and Thawing Resistance of Concrete

압축강도 및 공기량은 콘크리트의 동결융해 저항성능에 영향을 미치는 인자로 고려될 수 있다. 압축강도의 경우, 강도가 증가할수록 콘크리트가 내부에서 발생하는 팽창압 및 응축력에 대한 저항성능이 향상된다(Ryu et al., 2012). 본 연구 및 기존의 문헌에서는 제강슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 콘크리트의 동결융해 저항성능 역시 저하되었다(Hong et al., 2019, 2020). 또한, 콘크리트 내 공기량은 모세관 공극 내 수분에 의한 팽창압을 완화시켜 콘크리트의 동결융해 저항성능을 향상시킬 수 있다(Park, 2008; Kim et al., 2015). 본 연구에서 SSP-15 및 SSP-20의 공기 함유량은 각각 1.1%, 1.2%가 나타났는데, 동결융해 저항성능의 개선 가능성을 평가하기 위해서는 공기연행제의 혼입을 통한 추가적인 연구가 필요하다.

동결융해 작용의 반복에 의한 콘크리트 시험체의 질량 변화는 Fig. 6(b)에 나타나 있다. 질량 변화는 상대 동탄성 계수의 거동과 유사하게 나타났으며, 동결융해 사이클이 증가할수록 모든 변수에서 시험체의 질량이 감소하였다. 동결융해 시험 후의 질량을 살펴보면, NN은 시험 전에 비해 무게가 약 0.83% 감소하였으며, SSP-10, SSP-15, SSP-20은 각각 1.66%, 3.22%, 5.13% 낮게 측정되었다. 제강슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 질량 변화의 폭이 크게 나타났으며, 이는 제강슬래그 미분말의 혼입에 의한 모세관 공극량의 증가 및 압축강도의 저하가 원인으로 판단된다. Fig. 7은 동결융해 시험 전후의 콘크리트 표면의

(a) 0 Cycle

(b) 300 Cycles

Fig. 7. Change of Surface Conditions before and after Freezing and Thawing Test

변화를 나타낸 것이다.

3.4 탄산화 저항성능 분석

Fig. 8은 탄산화 촉진 이후 계획된 재령에서 변수들의 탄산화 깊이를 측정한 결과이다. 모든 변수에서 촉진 재령의 경과에 따라 탄산화 깊이가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 콘크리트 내 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 시험체 외부의 이산화탄소와 반응하여 콘크리트 내부가 알칼리성에서 중성으로 변화하기 때문이다. 이에 대한 화학반응식은 Eq. (4)와 같다.

동일한 탄산화 촉진 재령에서, 제강슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 탄산화 깊이가 증가하였다. 이는 제강슬래그 내 MgO 함량이 영향을 미친 것으로 판단된다. MgO 는 이산화탄소와 빠르게 반응하여 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 중성화를 촉진하는 것으로 알려져 있다(Gao et al., 2013; Mo et al., 2017). 본 연구에서 사용한 제강슬래그 미분말은 시멘트에 비해 약 1.33% 더 많은 MgO 를 함유하고 있으며, 이에

Fig. 8. Measurement of Carbonation Depth

따라 제강슬래그 미분말의 혼입은 탄산화 반응을 가속화하여 콘크리트 내 탄산화 깊이가 더 크게 측정된 것으로 판단된다. 또한, 제강슬래그 미분말의 혼입으로 인한 콘크리트 내 공극 구조의 변화도 탄산화 반응에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이는 콘크리트 내부로 향하는 이산화탄소의 침투는 콘크리트의 공극 구조와 밀접한 관련이 있으며, 제강슬래그 미분말의 혼입은 콘크리트 내부를 밀실하게 채우지 못했기 때문이다(Ortega-López et al., 2018). 탄산화 깊이 측정 후에는 Eq. (5)에 따라 탄산화 속도 계수를 산정하였으며, 이에 대한 결과는 Table 6과 같다.

$$\alpha = d / \sqrt{t} \quad (5)$$

여기서, α 는 탄산화 속도 계수, d 는 탄산화 깊이(mm), 그리고 t 는 탄산화 촉진 재령(week)을 의미한다.

Table 6. Carbonation Rate Coefficient of Concrete Containing Steelmaking Slag Powder

Mix	Carbonation rate coefficient			
	2 week	4 week	6 week	8 week
NN	1.8	1.5	1.6	1.6
SSP-10	2.1	1.8	2.0	1.9
SSP-15	2.5	2.0	2.0	2.1
SSP-20	3.2	2.3	2.2	2.5

한편, 다수의 연구자들은 장기재령에서의 거동을 평가하기 위해 Eq. (6)에 따라 탄산화 깊이를 예측하였다(Shin et al., 2016; Yuan et al., 2018).

$$C_{acc} / C_{air} = \sqrt{(CO_2)_{acc} / (CO_2)_{air}} \quad (6)$$

여기서, C_{acc} 및 C_{air} 는 각각 탄산화 촉진 시험에서의 탄산화 속도 계수, 대기중에서의 탄산화 속도 계수를 의미하며, $(CO_2)_{acc}$ 및 $(CO_2)_{air}$ 는 각각 탄산화 촉진 시험에서의 CO_2 농도(%) 및 대기중에서의 CO_2 농도(%)를 의미한다.

Fig. 9는 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 탄산화

Fig. 9. Prediction of Carbonation Depth

깊이를 예측한 결과이다. 탄산화 깊이 측정 결과와 유사하게 제강슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 탄산화 깊이가 더 크게 예측되었다. 국가건설기준센터에서 제안하는 콘크리트구조 철근상세 설계기준(KDS 14 20 50, 2016)에 의하면 직경 35 mm 이하의 철근을 사용할 경우, 프리캐스트 콘크리트의 슬래브 및 벽체의 최소 피복두께를 모두 20 mm로 규정하고 있다. NN은 최소 피복두께인 20 mm에 도달하는데 약 48년이 걸릴 것으로 예측되었으며, 제강슬래그 미분말이 혼입될 경우, 콘크리트의 탄산화 저항 성능이 저하되어, SSP-10, SSP-15 및 SSP-20이 20 mm에 도달하는데 걸리는 기간은 각각 약 33년, 27년, 20년이 걸릴 것으로 예측되었다. 또한, SSP-20은 40 mm에 도달하는데 약 80년이 예측된 반면에, NN, SSP-10 및 SSP-15는 모두 100년이후에 40 mm에 도달할 것으로 예측되어 탄산화 저항 성능에 우수한 것으로 보인다. 추가적으로, 콘크리트 구조물의 목표내구수명에 따른 내구등급은 Table 7에 나타난 바와 같이 분류된다(Lee and Shin, 2017). 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트 구조물의 내구등급을 Grade 2로 설정한다면, 65년 후에 나타날 NN, SSP-10, SSP-15 및 SSP-20의 탄산화 깊이는 각각 약 24 mm, 29 mm, 31 mm, 37 mm로 예측되었다.

Table 7. Durability Grade of Concrete Structure

Durability rating	Requiring durability specification	Service life (years)
Grade 1	Specially high	100
Grade 2	High	65
Grade 3	Low	30

3.5 염화물 이온 침투 저항성능 분석

콘크리트는 고내구성이 요구되는 건설재료이지만, 염화물 이온이 존재하는 환경에서는 콘크리트 성능의 저하가 우려된다. 이러한 환경에서, 염화물 이온은 콘크리트 내부로 침투하며, 염화물 함유량이 철근 콘크리트의 허용치를 초과할 경우, 철근의 부식 및 팽창이 순차적으로 발생하여 콘크리트 내부 균열을 유발한다. 균열의 발생은 염화물 이온의

침투를 더 쉽게 하여 콘크리트를 열화시켜 구조물의 내구성 및 안전성에 영향을 미친다. 이러한 측면에서, 염화물 이온 환경에 노출된 콘크리트의 저항성능을 평가 및 확보하는 것이 요구되며, 본 연구에서는 Fick의 제 2법칙을 기반으로 한 비정상 상태에서의 염화물 확산계수를 평가하였다. 염화물 확산 계수는 염화물 침투 깊이를 측정한 후 Eqs. (7)-(9)에 따라 도출하였다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \times \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (7)$$

$$E = (U - 2)/L \quad (8)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE} \times \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right)} \quad (9)$$

여기서, D_{nssm} 은 비정상 상태에서의 염화물 확산 계수 (m^2/s), R 은 기체 상수($8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$), T 는 절대 온도(K), z 는 이온 전자가(염화물이온: 1), F 는 패러데이 상수($9.648 \times 10^4 \text{ J/V}\cdot\text{mol}$), x_d 는 평균 염화물 침투 깊이(m), t 는 적용 시간(s), U 는 전위차(V), L 은 시험체의 두께(m), erf^{-1} 은 오차함수의 역함수, c_d 는 비색법에 의한 반응농도(mol/L), c_0 는 음극셀의 염소이온농도(mol/L)를 의미한다.

Fig. 10은 재령 14일 및 28일에서의 염화물 확산 계수를 나타낸 것이다. 14일 재령에서, 모든 변수들의 염화물 확산 계수는 모두 $20 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 이상으로 도출되었으며, 제강슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 염화물 확산 계수가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 제강슬래그 미분말의 혼입이 콘크리트의 공극 구조를 변화시켜 나타난 결과로 판단된다. 염화물은 콘크리트 내 공극을 통해 이동하며, 공극 중 모세관 공극과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2009). 본 연구에서는 제강슬래그 미분말의 혼입이 콘크리트 내 모세관 공극을 증가시키는 것을 확인하였으며, 이를 통해 제강슬래그 미분말이 다량 혼입될수록 염화물의 이동이 더 활발히 진행되어 염화물 확산계수가 증가한 것으로 보인다. 또한, 제강슬래그 내 철 성분은 염화물 이온 침투 저항 성능을 악화시키는 또다른 원인으로 판단된다(Pan et al., 2019; Han et al., 2020). 본 연구에서 사용한 제강슬래그 미분말은 시멘트와 달리 약 40%의 철 성분을 함유하고 있으며, 제강슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 철 성분 함유량이 많아져, 결과적으로 염화물 확산계수를 증가시킨 것으로 판단된다. NN의 염화물 확산 계수는 $20.74 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타났으며, SSP-10, SSP-15 및 SSP-20은 NN에 비해 염화물 확산 계수가 각각 21.22%, 35.17%, 51.92% 증가하였다.

28일 재령에서의 염화물 이온 침투 저항성능을 살펴

Fig. 10. Chloride Ion Diffusion Coefficient of Concrete

Table 8. Grade of Migration Coefficient of Concrete

Criteria	Range of D_{nssm}
Very good	$D_{nssm} < 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Good	$2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{nssm} < 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Acceptable	$8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{nssm} < 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Unacceptable	$D_{nssm} > 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

면, 염화물 확산 계수의 범위는 $3.51 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ - $5.32 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타나며 14일 재령에서의 염화물 확산 계수에 비해 평균적으로 80% 감소하였다. 이는 재령의 경과에 따라 콘크리트 내부 구조가 치밀해져 나타난 결과로 판단된다. 또한, 28일 재령에서도 제강슬래그 미분말의 혼입은 콘크리트의 염화물 이온 확산 계수를 증가시켰다. 한편, 다수의 문헌에서는 Table 8에 나타난 바와 같이 염화물 확산 계수의 범위에 따라 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성능을 평가하였다(Tang, 1996; Shin et al., 2016). 본 연구에서 평가된 모든 변수들의 염화물 확산계수는 모두 “Good”의 범위를 만족하여, 염화물 이온 침투 저항성능이 우수한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 혼화재 및 시멘트의 대체재로써 제강슬래그 미분말을 사용하여 콘크리트의 공극 구조 및 내구 특성을 평가하였다. 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MIP 분석 결과, 겔 공극 및 모세관 공극은 제강슬래그 미분말의 치환율이 증가함에 따라 더 많이 형성되었으며, SSP-20에서 누적 공극량의 증가가 가장 두드러지게 나타났다.
- (2) 제강슬래그 미분말의 혼입에 의한 모세관 공극량의 증가는 콘크리트의 동결융해 저항성능을 저하시켰지

만, SSP-10은 80% 이상의 상대 동탄성 계수가 나타나며 우수한 동결융해 저항성능을 보였다.

- (3) 탄산화 시험 결과, 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트 내 공극은 이산화탄소의 침투경로가 되어 치환율이 증가할수록 탄산화 깊이가 더 크게 측정되었다.
- (4) 28일 재령에서, 제강슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 염화물 확산 계수는 14일 재령에 비해 약 80% 감소하였으며, 제강슬래그 미분말을 혼입한 모든 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성능은 우수한 것으로 평가되었다.

이상을 종합하여 볼 때, 제강슬래그 미분말을 일정한 수준까지 시멘트 대체재로 활용할 경우, NN 변수와 유사하거나 허용범위 내의 내구 특성이 나타났다. 이에 따라, 추가적인 연구를 통해 SSP-15의 상대 동탄성 계수를 80% 이상으로 만족시켜 우수한 동결융해 저항성능을 확보한다면, 제강슬래그 미분말의 치환율을 15%까지 치환하여 적용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다. 하지만, SSP-20은 NN 변수에 비해 내구성능이 저하하였는데, 이는 압축강도의 급격한 감소에 기인하며, 이를 통해 제강슬래그 미분말을 본 연구와 달리 일반강도 콘크리트에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 선행되어야 한다. 또한, 제강슬래그 혼입 콘크리트의 수축 및 구조적 거동에 대한 다양한 연구가 지속적으로 수행된다면, 우수한 품질관리가 이루어지는 프리캐스트 콘크리트에 적용이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) (10063488)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Arribas, I., Vegas, I., San-Jose, J.T., and Manso, J.M. (2014). Durability studies on steelmaking slag concretes. *Materials & Design*, Vol. 63, pp. 168-176.
- ASTM D4404. (2018). *Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry*. ASTM International.
- Coppola, L., Buoso, A., Coffetti, D., Kara, P., and Lorenzi, S. (2016). Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 123, pp. 115-119.
- Gao, Y., Cheng, L., Gao, Z., and Guo, S. (2013). Effects of different mineral admixtures on carbonation

- resistance of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 43, pp. 506-510.
- Guo, J., Bao, Y., and Wang, M. (2018). Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Management*, Vol. 78, pp. 318-330.
- Han, F., and Zhang, Z. (2018). Properties of 5-year-old concrete containing steel slag powder. *Powder Technology*, Vol. 334, pp. 27-35.
- Han, X., Feng, J., Shao, Y., and Hong, R. (2020). Influence of a steel slag powder-ground fly ash composite supplementary cementitious material on the chloride and sulphate resistance of mass concrete. *Powder Technology*, Vol. 370, pp. 176-183.
- Hong, S., Yuan, T., Choi, J., and Yoon, Y. (2019). Evaluating microstructure and self-sensing properties of high-strength concrete with electric-arc-furnace oxidizing slag. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 189-197.
- Hong, S.H., Yuan, T.F., Choi, J.S., and Yoon, Y.S. (2020). Effects of steelmaking slag and moisture on electrical properties of concrete, *Materials*, Vol. 13, No. 12, 2675. doi:10.3390/ma13122675
- Kang, T.S. (2013). Precast concrete construction of SAMPYO Engineering & Construction LTD., R&D Institute. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 4, pp. 46-49.
- KCS 14 20 10. (2016). *Concrete*. Korean Construction Specification, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- KDS 14 20 50. (2016). *Design specifications of steel reinforcement details for concrete structure*. Korean Construction Specification, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Kim, R.H., Kim, G.Y., Lee, B.K., Shin, K.S., and Song, G.Y. (2015). Effects of micropores on the freezing-thawing resistance of high volume slag concrete. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 19, No. 4, pp. 67-74.
- Kim, T.S., Jung, S.H., Choi, Y.C., and Song, H.W. (2009). An experimental study on relation between chloride diffusivity and microstructural characteristics for GGBS concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 5, pp. 639-647.
- Kim, W.J., and Yoo, J.H. (2015). Commercializing technology development of PosMent. *Magazine of RCR*, Vol. 10, No. 1, pp. 17-20.
- KS F 2421. (2016). *Standard test method for air content of fresh concrete by the pressure method (air receiver method)*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2456. (2018). *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2584. (2010). *Standard test method for accelerated carbonation of concrete*. Korean Agency for Technology and Standards.
- Lee, C.L., Huang, R., Lin, W.T., and Weng, T.L. (2012). Establishment of the durability indices for cement-based composite containing supplementary cementitious materials. *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 28-39.
- Lee, D.K., and Shin, K.J. (2017). Durability design chart for concrete exposed to chloride environment according to KCI Concrete Standard Specification. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 29, No. 6, pp. 649-656.
- Maslehuddin, M., Sharif, A.M., Shameem, M., Ibrahim, M., and Barry, M.S. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, Vol. 17, No. 2, pp. 105-112.
- Mo, L., Zhang, F., Deng, M., Jin, F., Al-Tabbaa, A., and Wang, A. (2017). Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 83, pp. 138-145.
- NT BUILD 492. (1999). *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*. NORDTEST.
- Ortega-López, V., Fuente-Alonso, J.A., Santamaría, A., San-José, J.T., and Aragón, Á. (2018). Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements. *Construction and Building Materials*, Vol. 163, pp. 471-481.
- Pan, Z., Zhou, J., Jiang, X., Xu, Y., Jin, R., Ma, J., et al. (2019). Investigating the effects of steel slag powder on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol. 200, pp. 570-577.
- Park, S.J. (2008). The effect of entrained air contents on the properties of freeze-thaw deterioration and chloride migration in marine concrete. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and*

- Inspection*, Vol. 12, No. 5, pp. 161-168.
- Qasrawi, H. (2014). The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment. *Construction and Building Materials*, Vol. 54, pp. 298-304.
- Rashad, A.M. (2019). A synopsis manual about recycling steel slag as a cementitious material. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, No. 5, pp. 4940-4955.
- Roslan, N.H., Ismail, M., Khalid, N.H.A., and Muhammad, B. (2020). Properties of concrete containing electric arc furnace steel slag and steel sludge. *Journal of Building Engineering*, Vol. 28, 101060. doi:10.1016/j.jobe.2019.101060
- Ryu, D.W., Kim, W.J., Yang, W.H., You, J.H., and Ko, J.W. (2012). An experimental study on the freezing-thawing and chloride resistance of concrete using high volumes of GGBS. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 12, Iss. 3, pp. 315-322.
- Shin, H.O., Yang, J.M., Yoon, Y.S., and Mitchell, D. (2016). Mix design of concrete for prestressed concrete sleepers using blast furnace slag and steel fibers. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 74, pp. 39-53.
- Tang, L. (1996). *Chloride transport in concrete-measurement and prediction*. Ph.D. dissertation, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Yuan, T., Yang, J.M., Kim, K.D., and Yoon, Y.S. (2018). Evaluating strength development and durability of high-strength concrete with 60% of ground-granulated blast furnace slag. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 7, pp. 307-314.
- Zeng, Q., Li, K., Fen-Chong, T., and Dangla, P. (2012). Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, No. 1, pp. 194-204.
- Zhang, X., Zhao, S., Liu, Z., and Wang, F. (2019). Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness. *Construction and Building Materials*, Vol. 214, pp. 28-36.

Received	December 29, 2020
Revised	December 29, 2020
Accepted	January 11, 2021