



전기로 산화슬래그 혼입 고강도 콘크리트의 미세구조 및 자기센싱 특성 평가

Evaluating Microstructure and Self-Sensing Properties of High-Strength Concrete with Electric-Arc-Furnace Oxidizing Slag

홍세희* · 원천봉** · 최진석*** · 윤영수****

Hong, Sehee*, Yuan, Tianfeng**, Choi, Jinseok***, and Yoon, Youngsoo****

Abstract

This study analyzes the microstructure and strength properties of high-strength concrete containing electric-arc-furnace oxidizing slag (ES). Thus, three different water-to-binder ratios and four different ES-replacement ratios were considered while evaluating the hydration products of the specimens, their porosity, pore-size distribution, and compressive and splitting tensile strengths, depending on the curing age. According to the x-ray diffraction (XRD) patterns, the ES specimens of both portlandite and hatrurite exhibited higher peak intensities than those of the plain specimen (High-strength concrete, i.e., HSC). Further, from the results of the mercury intrusion porosimetry (MIP) test, it was observed that the cumulative pore volume of the ES specimens was higher than that of the HSC. Also, the porosity of the ES specimen, whose ES-replacement ratio was 20%, was approximately 37.9% higher than that of the HSC. The compressive strength and splitting tensile strength of the ES specimens significantly decreased when the ES-replacement ratio was 20%, while the best self-sensing properties were exhibited. From all the experiments, it was observed that an ES-replacement ratio of 15% exhibited similar microstructure and strength properties to those of the HSC.

Key words : Electric-Arc-Furnace Oxidizing Slag, Microstructure, Pore Size Distribution, Strength Property, Self-Sensing

요 지

본 연구에서는 전기로 산화슬래그를 혼입한 고강도 콘크리트의 미세구조와 강도 특성을 분석하였다. 3종의 물-결합재비(w/b) 및 4종의 전기로 산화슬래그 혼입률을 고려하여 재령에 따른 수화 생성물, 공극률, 공극 분포, 압축강도, 쪼갬인장강도를 평가하였다. XRD 분석결과, 전기로 산화슬래그가 혼입될 경우 플레인 변수(HSC)에 비해 높은 Portlandite, Hatrurite의 피크 강도가 나타났다. MIP 분석결과, 전기로 산화슬래그가 혼입되면 HSC보다 누적 공극률이 높았다. 그리고, 전기로 산화슬래그가 20% 혼입될 경우 공극률은 HSC보다 37.9% 증가하였다. 또한, 전기로 산화슬래그가 20% 혼입될 경우 압축강도 및 쪼갬인장강도는 현저히 감소하였지만, 자기센싱 특성은 가장 우수하였다. 모든 실험결과, 전기로 산화슬래그가 15% 혼입될 경우 HSC와 유사한 미세구조와 강도 특성이 나타났다.

핵심용어 : 전기로 산화슬래그, 미세구조, 공극 분포, 강도 특성, 자기센싱

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

Member, Master's course, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사 후 연구원(E-mail: yuantianfeng@korea.ac.kr)

Member, Postdoctoral Researcher, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정(E-mail: radianc@korea.ac.kr)

Master's course, 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

철강슬래그는 철강 생산 시 발생하는 산업부산물이다. 2016년, 2017년, 2018년의 조강 생산량은 각각 6,876만 톤, 7,103만 톤, 7,246만 톤이었으며, 철강의 생산량이 매년 증가함에 따라 철강슬래그의 발생량도 증가하는 추세이다. 철강슬래그는 고로, 제강슬래그로 구분되며, 제강슬래그는 전로, 전기로 슬래그로 분류된다. 전기로 슬래그는 전기로 내부의 분위기를 자유롭게 변화시킬 수 있으며, 전기로 내부의 상태에 따라 전기로 산화슬래그와 전기로 환원슬래그로 종류가 나뉜다. 국내 철강사들은 고로, 전로, 전기로 슬래그를 주로 발생시키는데, 철강슬래그의 처리 비용과 에이징 및 매립을 위한 부지 확보에 어려움을 겪고 있다(Choi, 2012). 따라서 철강슬래그의 새로운 활용처가 요구된다.

일반적으로 철강슬래그는 생석회(CaO) 및 실리카(SiO₂)를 함유하고 있다. 고로슬래그는 냉각방식에 따라 급냉슬래그와 서냉슬래그로 분류되는데, 급냉슬래그는 화학적 구성 성분이 시멘트와 유사하다(Choi et al., 2007). 고로슬래그는 물과 결합하면 칼슘이온(Ca²⁺)이 용출되며, 최종적으로는 생석회, 실리카 등의 용출이 촉진되면서 수화물을 생성하는 잠재수경성의 특성을 지니고 있다. 이러한 특성 때문에 고로슬래그 사용량의 약 70%는 시멘트 원료 및 콘크리트의 혼화재로 활용된다(Choi and Yang, 2012). 이에 반해, 제강슬래그는 주로 성토용 골재, 도로보조기층 및 기층용 골재 등으로 활용되고 있다(Choi, 2012). 이는 제강슬래그가 유리 석회(free CaO) 및 유리 마그네슘(free MgO)을 함유하고 있기 때문이다. 제강슬래그 내 유리 석회의 함량이 1% 이상일 경우, 유리 석회는 수분과 반응하여 체적이 약 2배로 증가하고, 이는 제강슬래그의 팽창 붕괴를 초래한다(Ryu, 2010). 또한, 염기도(CaO/SiO₂)가 2.0 이상일 경우, 제강슬래그의 팽창에 의한 사용성 및 내구성의 저하를 야기할 수 있다(Kim and Park, 2012; Liu and Wang, 2017). 제강슬래그의 품질 향상 및 안정화를 위해 최근에는 대기 중에 제강슬래그를 장기간 방치시키는 에이징 방법, 급냉 처리 방법, 개질 처리 방법 등을 사용하여 제강슬래그의 활용 가능성을 높이고 있다.

제강슬래그를 활용하기 위해 국내·외에서 다양한 연구들이 진행되고 있다. 이 중, 전기로 산화슬래그는 팽창 붕괴를 유발하는 유리 석회, 유리 마그네슘 성분을 전로슬래그보다 적게 함유하고 있어, 콘크리트용 골재로서 문제가 적다(Kim, 2010). 전기로 산화슬래그를 골재로 활용할 경우, 콘크리트의 재료특성을 향상시킬 수 있으며 철근콘크리트 구조부재에도 적용이 가능하다(Ryu, 2010). 이러한 연구결과를 기반으로 2011년 콘크리트용 전기로 산화슬래그 골재에 대한 기준(KS F 4571)이 제정되었으며, 현재는 콘크리트용 골재에 대한 기준(KS F 2527)으로 통합되었다.

최근 연구에 의하면, 전기로 산화슬래그 잔골재를 활용할

경우 시멘트 복합체가 전기 전도성을 띄어, 변형률 센서로서의 가능성이 확인되었다(Baeza et al., 2018). 전기로 산화슬래그 잔골재가 혼합된 시멘트 복합체의 전기 전도성은 구조 안전성 모니터링(Structural Health Monitoring, SHM)을 통해 초고층 건물, 장대 교량, 원전 플랜트 등의 내구성 평가와 안전 진단을 가능하게 한다(Lee et al., 2019). 또한, 프리스트레스트 철근의 릴랙세이션(Relaxation) 여부 및 정도도 모니터링이 가능하며, 이와 같이 전기로 산화슬래그 골재의 활용 분야가 점차 다양해지고 있는 추세이다(Kim et al., 2019).

그러나 시멘트의 일부를 제강슬래그로 치환하여 수행된 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 전기로 산화슬래그를 시멘트 대체재로 혼입하여, 물-결합재비(w/b) 및 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률에 따른 콘크리트의 미세구조 및 강도 특성을 평가하였다. 이후, 실험결과를 기반으로 본 연구에서 가장 우수한 w/b를 선정하여 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률에 따른 콘크리트의 자기센싱(Self-sensing) 특성을 평가하였다. 모든 평가결과는 전기로 산화슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 다양한 특성에 대한 기초 참고자료로 제공하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서 사용한 변수들의 배합상세는 Table 1과 같으며, w/b는 27.5%, 30.0%, 32.5%인 3종을 설정하였고, 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률은 0%, 10%, 15%, 20%인 4종으로 설정하여 총 12변수에 대한 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 재료의 미세구조 특성을 평가하기 위하여, 재료의 화학

Table 1. Mixture Proportions of Variables

Variables	w/b (%)	Unit weight (kg/m ³)				ES (%)
		W	C	S	G	
27.5-HSC	27.5	0.27	1.00	0.98	1.52	-
27.5-ES10		0.31		1.09	1.69	10
27.5-ES15		0.32		1.16	1.79	15
27.5-ES20		0.34		1.23	1.90	20
30.0-HSC	30.0	0.30	1.00	1.12	1.69	-
30.0-ES10		0.33		1.24	1.88	10
30.0-ES15		0.35		1.32	1.99	15
30.0-ES20		0.37		1.40	2.11	20
32.5-HSC	32.5	0.32	1.00	1.25	1.86	-
32.5-ES10		0.36		1.39	2.06	10
32.5-ES15		0.38		1.48	2.18	15
32.5-ES20		0.41		1.57	2.32	20

* w/b: water to binder ratio; W: water; C: cement; S: sand; G: gravel; ES: electric-arc-furnace oxidizing slag

적 구성 성분 및 결정상을 분석하는 X선 회절(X-Ray Diffraction, XRD) 분석과 콘크리트 내부의 공극 분포 상태, 공극률 등 기공의 특성을 파악하는 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP) 분석이 수행되었다. 슬럼프를 측정하여 재료의 유동성을 평가하였으며, 재령에 따른 압축 및 쪼갬인장강도를 측정하여 강도 특성을 평가하였다. 이후 우수한 미세구조 및 강도 특성이 나타난 wb를 선정한 후에 압축하중을 반복적으로 재하하여 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률에 따른 콘크리트의 자기센싱 특성을 평가하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서 사용된 재료의 특성은 다음과 같다. 시멘트는 국내에서 생산된 1종 보통 포틀랜드 시멘트(비표면적 3,413 cm²/g, 밀도 3.15 g/cm³)를 사용하였다. 골재는 국내 H사의 제품으로, 잔골재는 강사를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수 19 mm의 특성을 갖는다. 시멘트의 대체재로는 급냉(Rapidly-cooled) 처리한 제강슬래그의 한 종류인 전기로 산화슬래그 미분말을 사용하였고, 전기로 산화슬래그 미분말의 화학적 및 물리적 특성은 Table 2와 같다. 또한 각 배합의 유동성을 확보하기 위해 국내 D사에서 생산된 폴리카복산염(Polycarboxylate) 고성능 감수제(Superplasticizer, SP)를 사용하였다. 고성능 감수제는 갈색 액상으로, 밀도는 1.07 g/cm³이다.

Table 2. The Chemical and Physical Properties of Cement and Electric-Arc-Furnace Oxidizing Slag

Types	Cement (%)	ES (%)
SiO ₂	23.0	16.1
CaO	63.0	20.6
Al ₂ O ₃	6.5	12.0
T-Fe*	3.0	37.3
MgO	2.0	4.44
SO ₃	1.9	0.023
MnO	-	5.56
TiO ₂	-	0.722
Density (g/cm ³)	3.15	3.60
Blaine (cm ² /g)	3,413	5,000 - 5,100

* T-Fe: FeO, Fe₂O₃

2.3 실험방법

2.3.1 미세구조 특성 평가

XRD는 압축강도 실험 후 발생한 시료를 분쇄하여 분석하였다. 분석 전까지, 시료들의 수화 반응을 억제하기 위해 아세톤에 침지시켰다. 2θ = 5°-80°의 범위에서 0.01°의 단위로 측정하였고, CuKα선은 40 kV 및 200 mA의 특성을 가진다. MIP는 Micromeritics AutoPore 9520 장비를 사용하

여 분석하였고, 최대 30,000 psi의 압력이 적용되었다.

2.3.2 강도 특성 평가

슬럼프는 KS F 2402를 따라 수행하여 경화 전 콘크리트의 특성을 평가하였다. 압축강도 및 쪼갬인장강도 실험체는 KS F 2403에 따라 ø100 × 200 mm의 원기둥 실험체를 제작하였고, 온도 20 ± 1°C, 습도 60 ± 5%의 항온·항습실에서 양생을 수행하였다. KS F 2405에 따라 계획된 재령에서 압축강도를 측정하였고 쪼갬인장강도는 KS F 2423에 따라 측정하였다.

2.3.3 자기센싱 특성 평가

일반적으로 전기저항(Electrical resistance)을 측정하는 방법으로는 2프로브법(2-probe method)과 4프로브법(4-probe method)이 존재한다. 2프로브법은 4프로브법에 비해 회로가 단순하지만, 몇몇의 연구(Chiarello and Zinno, 2005; Han et al., 2007; Han et al., 2015)에 의하면 4프로브법은 2프로브법에 비해 접촉저항(Contact resistance) 제어에 용이하다고 보고되어 있다. 이에 따라 본 연구에서는 4프로브법의 전기저항 측정 방식을 채택하였다. 전류 방식 중 직류전류를 사용할 경우, 편극효과(Polarization effect)에 의해 시간의 경과에 따라 저항이 증가한다(Chen et al., 2004; You et al., 2017). 따라서, 편극효과에 의한 영향을 제어하기 위해 100kHz 대역의 교류전류를 사용하였다(Banthia et al., 1992; Yoo et al., 2018).

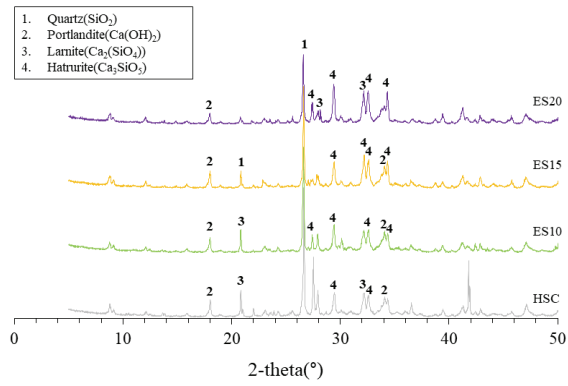
자기센싱을 수행하기 위해 정육면체 실험체를 제작하였으며, 실험체 크기 및 구리판(전극)의 매입 간격은 굵은골재의 최대치수를 고려하여 각각 150 mm, 20 mm로 설정하였다. 또한, 실험체 세팅 및 하중 재하 방식은 전도성 재료가 혼입된 콘크리트를 대상으로 수행된 기존의 연구(Choi et al., 2019)와 동일하게 적용되어, 반복압축하중에 따른 콘크리트의 전기저항을 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

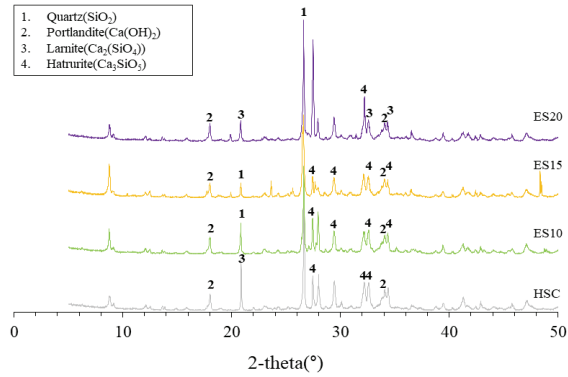
3.1 XRD 분석

콘크리트 매트릭스 내부에 생성된 결정상을 확인하기 위해 모든 변수들의 XRD 분석을 수행하였다. Fig. 1은 28일 재령에서, 동일한 wb를 가진 변수들의 XRD 결과를 나타낸 것이다.

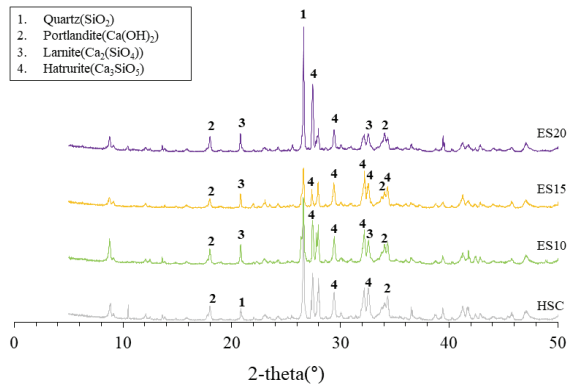
w/b가 27.5%인 경우, 모든 변수에서 Quartz, Portlandite, Hatrurite 등의 성분들이 주요 피크(Peak)로 나타났다. Quartz는 플레인 변수(High-strength concrete, HSC)를 포함한 모든 변수의 2θ = 26.61°에서 가장 높은 피크 강도(Peak intensity)를 가졌다. 또한, 모든 변수들은 유사한 Portlandite, Hatrurite의 피크 강도를 나타냈다. w/b가 30.0%인 경우에도 마찬가지로 Quartz, Portlandite, Hatrurite 등의 성분들이 발견되었다.



(a) w/b = 27.5%



(b) w/b = 30.0%



(c) w/b = 32.5%

Fig. 1. XRD Patterns

Portlandite의 경우, $2\theta = 18.00^\circ$ 에서 전기로 산화슬래그 미분말이 혼입된 변수(ES10, ES15, ES20)는 HSC에 비해 피크 강도가 높게 나타났다. 일반적으로 수화 반응이 진행될 때, Portlandite의 소모가 발생하는데, Portlandite의 피크 강도가 높다는 것은 재료의 포졸란 활성도(Pozzolanic activity)가 낮아 수화 반응이 지연되었음을 의미한다(Lee et al., 2018). 따라서, 전기로 산화슬래그 미분말이 혼입될 경우, HSC에 비해 강도의 저하가 나타날 것으로 예상된다. 다른 성분인 Hatrurite는 $2\theta = 25^\circ\text{-}35^\circ$ 의 확산대(Diffuse band)에 다양하게 나타났으며 HSC에서 피크 강도가 가장 낮았다.

w/b가 32.5%인 경우, ES10, ES15, ES20은 HSC보다 Lamite의 피크 강도가 높게 나타났다. Lamite의 소모는 콘크리트 강도에 긍정적인 영향을 미치는 C-S-H 겔 같은 수화 생성물이 형성되는 명백한 증거이며, 이를 통해 ES10, ES15, ES20은 HSC에 비해 강도의 저하가 나타날 것으로 판단된다(Shaikh and Supit, 2014).

3.2 MIP 분석

Fig. 2는 28일 재령에서의 변수 별 공극 분포를 나타낸 것이다. w/b가 증가할수록 누적 공극량(Cumulative pore volume)이 전반적으로 감소하였다. 시멘트 기반 재료 내부의 공극은 크기에 따라 2종으로 분류된다. 공극의 크기가

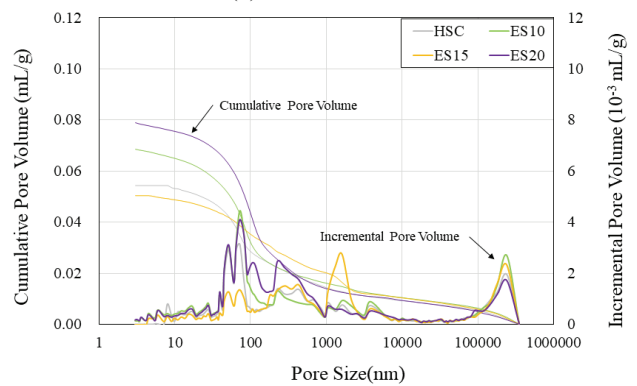
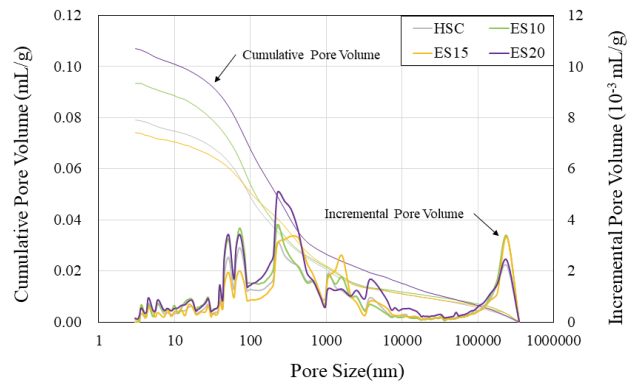
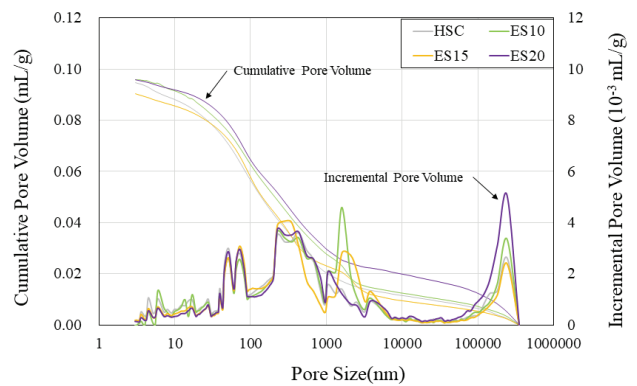


Fig. 2. Pore Structures

50 nm 미만일 경우 마이크로 공극(Micropore), 50 nm 이상일 경우 매크로 공극(Macropore)으로 분류된다. 마이크로 공극의 경우, 건조 수축(Dry shrinkage), 크리프(Creep)를 야기하며, 매크로 공극의 경우 강도 발현에 영향을 미친다(Metha and Monteiro, 2006). 50 nm보다 크기가 작은 마이크로 공극들의 분포를 살펴보면, 모든 w/b에서, 전기로 산화슬래그 미분말이 혼입된 변수들의 대부분은 HSC에 비해 누적 공극량이 높게 측정되었다. 특히, ES20은 HSC에 비해 누적 공극량이 높게 나타나, 강도에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 하지만, ES15는 HSC와 유사한 누적 공극량이 측정되었다.

매크로 공극 역시 마이크로 공극과 유사하게 동일한 w/b에서 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 HSC에 비해 누적 공극량이 증가하였다. ES10과 ES15는 w/b에 관계없이 HSC와 유사한 누적 공극 분포를 나타냈다.

Fig. 3은 변수들의 총공극률을 나타낸 것이다. w/b가 증가할수록 총공극률이 전반적으로 감소하였다. w/b가 27.5%인 ES15의 총공극률은 19.45%로 나타났으며, w/b가 30.0%, 32.5%인 경우에는 총공극률이 w/b가 27.5%인 경우에 비해 각각 14.04%, 38.43% 감소하였다. 또한 모든 w/b에서, ES15는 HSC와 유사한 총공극률 값을 나타냈다. 하지만, ES20은 w/b가 27.5%인 경우, HSC와 유사한 값이 나타났지만, w/b가 30.0%, 32.5%인 경우, HSC에 비해 총공극률이 각각 27.92%, 37.97% 증가하였다.

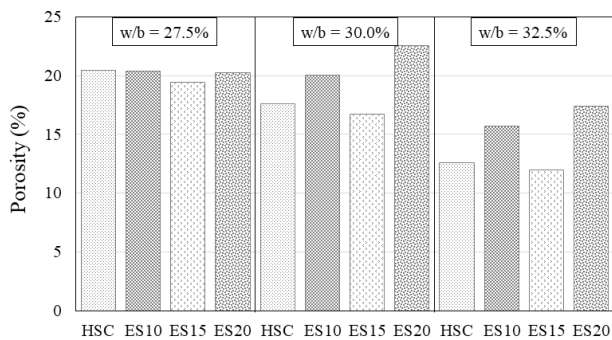


Fig. 3. Porosity

3.3 유동성 평가

본 연구에서는 유동성을 확보하기 위해 목표 슬럼프를 150 mm로 설정하였으며, 변수 별 슬럼프 및 감수제의 사용량은 Table 3에 나타내었다. w/b가 27.5%인 경우, 전기로 산화슬래그 미분말이 혼입된 변수들은 슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 슬럼프는 감소하였다. 이는 전기로 산화슬래그 미분말이 높은 분말도를 가져, 수분을 흡착하는 성질이 상대적으로 커서 점성이 증대되어 유동성을 저하시키기 때문인 것으로 판단된다. 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 슬럼프가 감소하는 경향은 기존의 연구(Roslan et al., 2016) 결과와 동일하다. w/b가 30.0%인 경우

역시 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 슬럼프가 감소하였지만, w/b가 32.5%인 경우에는 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률에 관계없이 슬럼프 값이 유사하였다.

Table 3. Test Results of Slump

Types	Slump (mm)	SP (%)
27.5-HSC	160	0.81
27.5-ES10	210	0.81
27.5-ES15	190	0.73
27.5-ES20	185	0.61
30.0-HSC	185	0.79
30.0-ES10	175	0.77
30.0-ES15	170	0.79
30.0-ES20	172	0.79
32.5-HSC	172	0.72
32.5-ES10	180	0.72
32.5-ES15	170	0.62
32.5-ES20	170	0.62

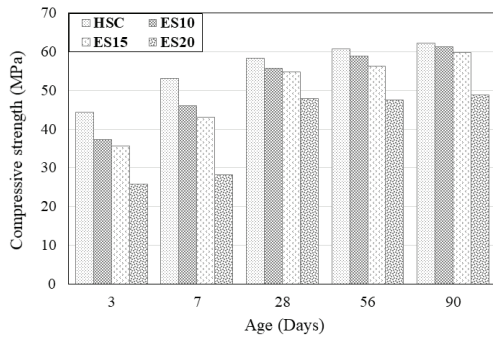
* SP: superplasticizer

동일한 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률에서, w/b가 증가할수록 슬럼프가 전반적으로 감소하였다. ES10의 경우, w/b가 27.5%, 30.0%, 32.5%일 때, 슬럼프는 각각 210 mm, 175 mm, 180 mm로 나타났다. 이는 w/b가 증가하면서 고성능 감수제의 사용량이 감소하였기 때문으로 판단된다.

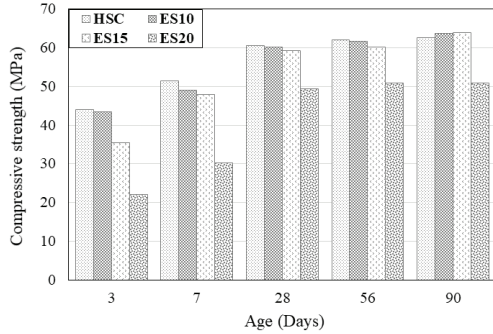
3.4 압축강도 평가

Fig. 4는 재령에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 동일한 w/b에서, 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 HSC에 비해 압축강도가 감소하는 경향이 나타났다. 이는 시멘트의 일부가 전기로 산화슬래그 미분말로 치환되었고, 시멘트의 사용량이 줄어 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 응결이 지연되어 압축강도의 저하가 발생한 것으로 판단된다(Roslan et al., 2016). 또한, 전기로 산화슬래그 미분말의 포졸란 반응도(Pozzolanic reactivity)가 낮은 것도 압축강도 저하의 또다른 원인으로 판단되며, 이는 앞서 언급한 XRD 및 MIP의 결과와 유사하다(Hekal et al., 2013).

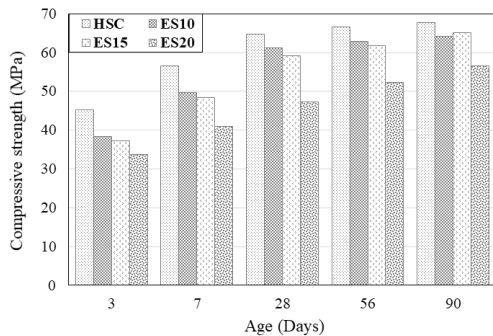
본 연구에서는 w/b가 증가할수록 압축강도가 증가하였다. 28일 재령에서, w/b가 30.0%, 32.5%인 HSC는 w/b가 27.5%인 HSC에 비해 압축강도가 각각 3.93%, 11.01% 증가하였다. 또한 56일 재령에서, w/b의 증가에 따라, 압축강도는 각각 1.89%, 9.57% 증가하였다. 이는 w/b가 증가할수록 고성능 감수제의 사용량이 전반적으로 감소하였기 때문이다. 사용한 고성능 감수제는 폴리에틸렌 옥사이드(Polyethylene oxide, PEO) 사슬로 이루어져 있으며, 이는 시멘트 입자 표면



(a) w/b = 27.5%



(b) w/b = 30.0%



(c) w/b = 32.5%

Fig. 4. Test Results of Compressive Strength with Ages

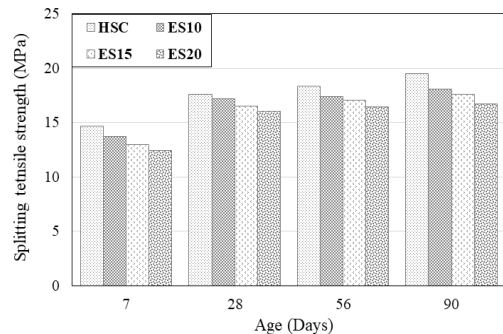
과 공극수(Pore solution) 사이에 분포하여, 이들이 입체장해 (Steric hindrance)를 일으켜 시멘트의 응집을 방해한다(Guo et al., 2012; Li et al., 2014; Kong et al., 2016). 이로 인해 w/b가 증가하면서 압축강도의 저하 현상이 발생한 것으로 판단된다.

모든 w/b에서, 전기로 산화슬래그 미분말이 혼입된 변수들은 초기재령(3일, 7일)에서 HSC에 비해 강도가 감소하였다. 3일 재령의 경우, w/b가 27.5%로 동일한 상태에서 ES10, ES15, ES20의 압축강도는 HSC에 비해 각각 16.05%, 19.58%, 42.12% 저하하였다. 7일 재령의 경우, 압축강도는 HSC에 비해 각각 13.03%, 18.78%, 46.72% 감소한 강도를 발현하였다. 이는 재가슬래그가 시멘트에 비해 초기에 발생하는 수화의 속도가 느리기 때문이다(Wang et al., 2011). 하지만 장기재령(90일)이 될수록 ES10과 ES15는 HSC와 약 60MPa의 유사한 압축강도 거동을 보였다. 한편, ES20은 90일 재령에서

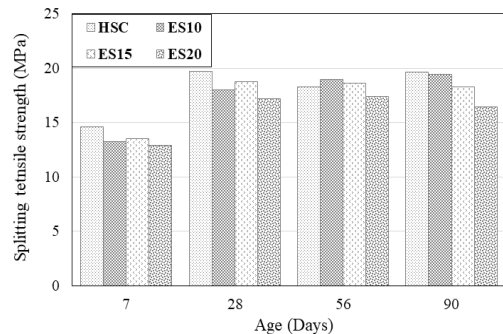
HSC에 비해 약 21.47% 저하된 48.80MPa의 압축강도를 발현하였다. w/b가 30.0%인 경우, w/b가 27.5%인 경우와 유사한 거동을 보였다. 7일 재령에서 ES10, ES15, ES20은 HSC에 비해 각각 4.78%, 7.13%, 41.18% 저하된 압축강도를 발현하였다. 90일 재령에서, ES10과 ES15는 HSC와 유사한 압축강도가 나타났지만, ES20은 HSC에 비해 압축강도가 18.52% 감소하였다. w/b가 32.5%인 경우에도 초기재령에서 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 압축강도 감소율이 증가하였으며, 90일 재령에서, ES20은 HSC에 비해 압축강도가 16.31% 감소하였다.

3.5 쪼갬인장강도 평가

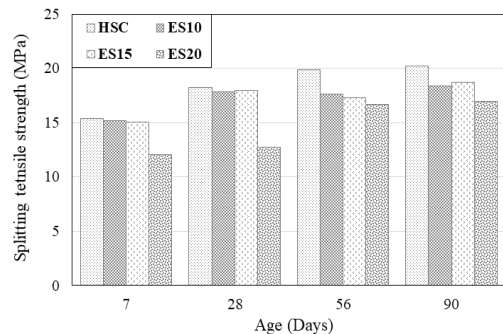
Fig 5는 재령에 따른 쪼갬인장강도를 나타낸 것이다. 동일한 w/b에서, 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 HSC에 비해 쪼갬인장강도가 저하하였다. 이는 압축강도



(a) w/b = 27.5%



(b) w/b = 30.0%



(c) w/b = 32.5%

Fig. 5. Test Results of Splitting Tensile Strength with Ages

특성과 유사하게 시멘트의 사용량이 줄어들어 응결이 지연되었고, 이 영향으로 인해 쪼갬인장강도의 저하가 발생한 것으로 판단된다. 28일 재령에서, w/b가 27.5%인 경우, ES10, ES15, ES20은 HSC에 비해 쪼갬인장강도가 각각 1.99%, 5.98%, 8.71% 감소하였다. w/b가 30.0%인 경우, 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 HSC에 비해 각각 8.49%, 4.73%, 12.73%의 저하가 발생하였으며, w/b가 32.5%인 경우에는 쪼갬인장강도가 각각 2.30%, 1.37%, 30.21% 감소하였다. 90일 재령에서, w/b가 27.5%, 30.0%, 32.5%이면서 ES10과 ES15는 HSC에 비해 10% 미만의 쪼갬인장강도 저하가 발생했지만, ES20은 HSC에 비해 쪼갬인장강도가 각각 14.07%, 16.02%, 15.90% 감소하였다.

3.6 자기센싱 평가

앞서 XRD, MIP 및 강도 특성(압축강도, 쪼갬인장강도)을 평가한 결과, 3종의 w/b 중 32.5%에서 가장 우수한 특성이 나타났다. 따라서 본 연구에서는 w/b 32.5%에 대해 자기센싱을 수행하여 저항 변화율(Fractional Change in Resistivity, FCR)을 평가하였다.

일반적으로 시멘트기반 복합재료에 전도성 재료를 혼입하여 센서로서의 실현 가능성을 판단하기 위한 지표로 FCR을 사용한다(Yoo et al., 2018; Choi et al., 2019).

$$FCR = \Delta R / R_0 = (R_x - R_0) / R_0 \quad (1)$$

여기서, R_0 와 R_x 는 각각 실험 시작 시점의 저항과 하중이 가해진 시점의 저항을 의미한다.

Fig. 6은 시간의 경과에 따른 압축하중과 FCR의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 실험체에 압축하중이 가해지면 실험체 내의 전기저항은 감소하여 FCR은 음의 값이 나타나는데, 본 연구에서는 압축하중과 FCR의 관계를 원활하게 비교하기 위해 FCR에 음수(-)를 곱하여 양의 값이 나타나도록 하였다.

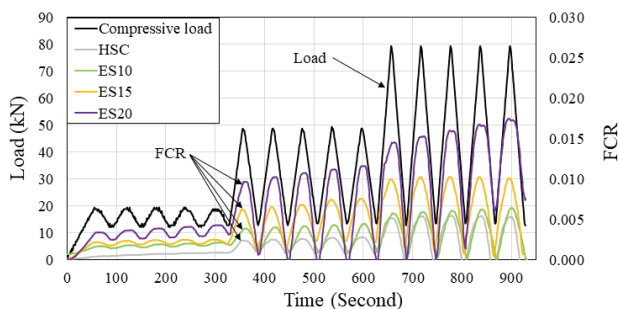


Fig. 6. Sensing Capacity

단계1(하중범위: 10-20kN)에서 하중의 변화에 따라 HSC는 FCR이 직선으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만,

ES10, ES15, ES20은 HSC와 다르게 하중의 변화에 따라 FCR이 유연하게 변동하였다. 이는 본 연구에서 사용한 전기로 산화슬래그 미분말이 다량의 산화철(Fe_2O_3)을 함유하여 콘크리트 매트릭스 내부에 전도성 경로를 형성했기 때문으로 판단된다. 한편, ES10과 ES15는 유사한 FCR 거동을 보였다.

단계2(하중범위: 10-50kN)에서는 모든 변수에서 하중의 변화에 따라 FCR이 유사하게 변동하였다. 이는 단계1에 비해 하중이 증가함에 따라 콘크리트 매트릭스 내부에 분포되어 있는 전기로 산화슬래그 미분말끼리 서로 가까워지면서 전도성 경로의 형성이 증대되었기 때문이다. 이로 인해 전자의 이동이 원활해져 콘크리트 내 전기저항의 변화폭이 증가한 것으로 판단된다(Yoo et al., 2018). 단계2에서의 최대 FCR을 살펴보면, HSC는 약 0.0027이었으며, ES10, ES15, ES20은 HSC에 비해 각각 38.47%, 63.82%, 76.42%가 증가한 값이 나타났다.

단계3(하중범위: 10-80kN)에서도 단계2와 유사한 거동이 나타났다. 하중의 변화에 따라 FCR이 유사하게 변동하였으며, 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 더 높은 FCR이 도출되었다. 단계3에서 ES10은 HSC와 유사한 FCR 거동이 나타났다. ES15, ES20의 최대 FCR은 HSC에 비해 각각 47.31%, 68.93% 증가하였으며, ES20에서 가장 우수한 자기센싱 특성이 나타났다. 한편, ES20의 경우, 각 단계에서 실험체가 동일한 값의 하중을 받지만, 하중이 반복될수록 FCR 값이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 기존에 전도성 경로를 형성한 전기로 산화슬래그 미분말의 분포 위치가 하중의 증가에 의해 영향을 받았기 때문이다(Yoo et al., 2018; Choi et al., 2019).

4. 결론

본 연구에서는 시멘트 대체재로써 활용 가능성이 존재하는 전기로 산화슬래그 미분말을 사용하여 다양한 w/b 및 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률에 따른 콘크리트의 미세구조 및 강도 특성을 평가하였다. 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) XRD 분석결과, 모든 변수에서 Quartz, Portlandite, Larnite 등의 성분이 나타났다. ES10, ES15, ES20 변수들은 HSC 변수에 비해 Portlandite, Larnite의 피크 강도가 높았다.
- (2) MIP 분석결과, 전기로 산화슬래그 미분말이 혼입될 경우, 누적 공극률이 HSC 변수에 비해 증가하였다. ES15 변수는 HSC 변수와 유사한 공극률이 나타났지만, ES20 변수는 HSC 변수에 비해 총공극률이 최대 37.97% 증가하였다.
- (3) 유동성 실험결과, 동일한 w/b에서 전기로 산화슬래그

미분말의 혼입률이 증가할수록 슬럼프는 유사하거나 감소하는 경향이 나타났다.

- (4) ES10, ES15, ES20은 초기재령에서 HSC 변수에 비해 강도가 감소하였다. 하지만, 재령의 경과에 따라 일부 변수들은 HSC 변수와 유사한 압축강도를 발현하였다. 한편, 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 압축강도가 저하하였으며, 쪼갬인장강도에서도 유사한 경향이 나타났다.
- (5) 산화철의 영향으로 ES10, ES15, ES20에는 전도성 경로가 형성되어 HSC에 비해 FCR의 변동이 유연하였으며, 더 높은 FCR 값이 도출되었다.

이상을 종합하여 볼 때, 전기로 산화슬래그 미분말을 시멘트 대체제로 15%까지 혼입할 경우, HSC 변수와 유사한 미세구조 및 강도 특성이 나타났다. 또한 전기로 산화슬래그 미분말의 혼입률이 증가할수록 우수한 자기센싱 특성이 나타났으며, 이를 통해 전기로 산화슬래그 미분말의 활용 가능성을 확인하였다. 하지만, 전기로 산화슬래그 미분말을 활용하기 위해서는 콘크리트의 수축, 내구성 등 콘크리트에 직·간접적으로 영향을 미치는 인자를 설정하여 성능을 평가할 수 있는 다양한 연구가 수행되어야 한다.

감사의 글

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

References

- Baeza, F.J., Galao, O., Vegas, I.J., Cano, M., and Garcés, P. (2018). Influence of recycled slag aggregates on the conductivity and strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement mortars. *Construction and Building Materials*, Vol. 184, pp. 311-319.
- Banthia, N., Djeridane, S., and Pigeon, M. (1992). Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 804-814.
- Chen, B., Wu, K., and Yao, W. (2004). Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 4, pp. 291-297.
- Chiarello, M., and Zinno, R. (2005). Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 4, pp. 463-469.
- Choi, E.K., Yuan, T.F., Lee, J.Y., and Yoon, Y.S. (2019). Self-sensing properties of concrete with electric arc furnace slag and steel fiber. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 1, pp. 265-274.
- Choi, J.S. (2012). The status and utilization prospect of steel making slag. *Review of Architecture and Building Science*, Vol. 56, No. 8, pp. 18-21.
- Choi, S.J., and Yang, K.H. (2012). State-of-the-art technology of concrete using slag. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 6, pp. 39-43.
- Choi, S.W., Kim, V., Chang, W.S., and Kim, E.Y. (2007). The present situation of production and utilization of steel slag in Korea and other countries. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 6, pp. 28-33.
- Guo, W., Sun, N., Qin, J., Zhang, J., Pei, M., Wang, Y., et al. (2012). Synthesis and properties of an amphoteric polycarboxylic acid-based superplasticizer used in sulfoaluminate cement. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 125, No. 1, pp. 283-290.
- Han, B., Ding, S., and Yu, X. (2015). Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement*, Vol. 59, pp. 110-128.
- Han, B., Guan, X., and Ou, J. (2007). Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 135, No. 2, pp. 360-369.
- Hekal, E.E., Abo-El-Enein, S.A., El-Korashy, S.A., Megahed, G.M., and El-Sayed, T.M. (2013). Hydration characteristics of portland cement-electric arc furnace slag blends. *HBRC Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 118-124.
- Kim, D.J., Noh, H.W., Choi, S.I., Hwang, R.H., and Lee, S.Y. (2019). *Smart concrete composition and smart concrete anchorage system for monitoring pre-stressing loss*. Korea Patent No. 10-2019-0027130.
- Kim, J.M. (2010). Utilization for concrete of steel industry by-products. *Review of Architecture and Building Science*, Vol. 54, No. 2, pp. 40-45.
- Kim, J.M., and Park, H.I. (2012). Properties of steel slag aggregate for concrete. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 6, pp. 35-38.
- Kong, F.R., Pan, L.S., Wang, C.M., Zhang, D.L., and Xu, N. (2016). Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. *Construction and Building Materials*, Vol. 105, pp. 545-553.

- Lee, N.K., Koh, K.T., Kim, M.O., and Ryu, G.S. (2018). Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*, Vol. 104, pp. 68-79.
- Lee, S.Y., Le, H.V., and Kim, D.J. (2019). Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress. *Construction and Building Materials*, Vol. 220, pp. 149-160.
- Li, Y., Yang, C., Zhang, Y., Zheng, J., Guo, H., and Lu, M. (2014). Study on dispersion, adsorption and flow retaining behaviors of cement mortars with TPEG-type polyether kind polycarboxylate superplasticizers. *Construction and Building Materials*, Vol. 64, pp. 324-332.
- Liu, J., and Wang, D. (2017). Influence of steel slag-silica fume composite mineral admixture on the properties of concrete. *Powder Technology*, Vol. 320, pp. 230-238.
- Metha, P.K., and Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (3rd ed., pp. 26-32). McGraw-Hill.
- 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*, Vol. 104, pp. 16-24.
- Ryu, D.H. (2010). *Material and structural performance of concrete using electric arc furnace oxidizing slag aggregates*. Ph.D. dissertation, Kongju National University.
- Shaikh, F.U.A., and Supit, S.W.M. (2014). Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) nanoparticles. *Construction and Building Materials*, Vol. 70, pp. 309-321.
- Wang, Q., Yan, P.Y., and Han, S. (2011). The influence of steel slag on the hydration of cement during the hydration process of complex binder. *Science China Technological Sciences*, Vol. 54, No. 2, pp. 388-394.
- Yoo, D.Y., You, I.H., Youn, H.C., and Lee, S.J. (2018). Electrical and piezoresistive properties of cement composites with carbon nanomaterials. *Journal of Composite Materials*, Vol. 52, No. 24, pp. 3325-3340.
- You, I.H., Yoo, D.Y., Kim, S.H., Kim, M.J., and Zi, G.S. (2017). Electrical and self-sensing properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with carbon nanotubes. *Sensors*, Vol. 17, No. 11, pp. 2481-2499.

Received	■ August 22, 2019
Revised	■ August 26, 2019
Accepted	■ September 4, 2019