



페로니켈 슬래그 잔골재가 혼입된 콘크리트의 강도 평가

Strength Evaluation of Concrete Containing Ferronickel Slag Aggregate

최민건^a · 손진수^a · 조봉석^b · 이진영^{c,†}

Choi, Min Guen · Son, Jin-Su · Cho, Bong suk · Lee, Jin-Young

ABSTRACT

For sustainable development in the construction industry, blast furnace slag has been used as a substitute for cement in concrete. In contrast, ferronickel slag, which is the by-product generated during smelting to ferronickel used in the manufacturing of stainless steel and nickel alloys, has a limitation to use as a binder and an aggregate due to its expansive characteristics. Recently, stabilization technology of ferronickel slag has been improved and studies have been carried out to utilize ferronickel slag as fine aggregate in concrete. Therefore, in this study, basic mechanical properties of concrete used in ferronickel slag aggregate was evaluated. The compressive strength (24, 30, 40 MPa) and replacement rate of ferronickel slag aggregate (0, 10, 25, 50%) were considered as experimental variables. As a result of test, concrete replaced fine aggregate with 25% ferronickel slag aggregate showed superior performance in the compressive strength and flexural strength.

Keywords: Ferronickel Slag aggregate; slag concrete; compressive strength; flexural strength

1. 서론

최근 대규모 아파트단지 개발, SOC 사업 등 대규모 건설공사가 증가하고 있는 추세에 따라서 건설재료의 안정성과 경제성이 확보된 콘크리트의 수요량 역시 급증하고 있다 (Baoyu et al., 2022; El-Mir et al., 2022; Xingbin et al., 2022; Kim, 2009; Lee et al., 2011; Lee et al., 2009; Kim et al., 2016; Lee et al., 2013). 그러나 콘크리트의 주요 구성분인 골재의 공급 문제로 인한 공사비 증가, 공사중단 등 현실적 어려운 문제가 발생하여 건설 산업이 해결해야 할 중요한 과제로 급부상하고 있다. ‘20년 기준 국내 골재채취 실적을 보면 모래 43,711천m³, 자갈 87,591천m³ 채취하고 있으나 건설시장에서 필요한 수요량에 비하여 매우 부족한 실정이다 (Kim et al., 2021; Lee and Park, 2010). 이러한 골재 부족 현상의 주요 원인은 자원의 고갈 등의 문제도 있으나 대표적으로 환경적 문

제로 인하여 공급에 제한을 받고 있기 때문이다(Lee and Park, 2017). Kim et al. (2009)은 천연골재 채취 시 발생하는 환경파괴, 하도 흐름변형 및 유속변화로 인한 영향이 하천, 바다 생태계에 미치는 물리적, 환경적 영향이 크다 하였다. 이로 인하여 골재 공급의 많은 부분을 차지하고 있는 바다모래(잔골재)는 채취 금지구역 설정, 채취 깊이를 제한하여 이러한 환경파괴를 줄이고자 하였다. 또한 2017년도 제22회 국정현안점검조정회의 중 국토교통부의 공고에 따르면 총 골재 대비 바닷골재 비중을 선진국 수준인 5% 이하로 감축할 계획을 발표하였다. 이러한 정부의 지침에 따라 바다골재 채취량은 줄어들고 있으나, 여전히 골재의 공급량은 부족한 것으로 보인다 (Hong and Lee, 2020) 따라서 천연골재 채취 시 발생하는 환경피해 최소화에 대한 사회적 요구는 지속적으로 증가될 것이며 골재의 부족 현상은 증가될 것이다. 이를 해결하기 위해 천연골재 대체재에 대한 다양한 연구와 개발이 진행되고 있다. 건설재료 분야에서는 고로슬래그, 제강슬래그와 같은 산업 부산물에 대한 안정성이 확보되어 콘크리트용 골재(KS F 2527)로 활용하고 있다. KS F 2790으로 콘크리트용 페로니켈 슬래그 잔골재 사용이 규정되었으나 이에 대하여 관련 연구 및 실적은 미비한 상황이다. Choi et al. (2011)은 수쇄 페로니켈 슬래그 잔골재를 이용하여 콘크리트의 최적 혼입률과 내구 특성을 평가하였다. 페로니켈 슬래그의 혼입율(0, 20, 30, 40, 50, 100%)에 따른 콘크리트의 강도를 측정하기위해 24 MPa의 설계강도를 가진 Ø100 × 200 mm의 시험체를 제작하

^a MS Student, Major in Agricultural Civil Engineering, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University

^b Principal Researcher, RIST Resources Recycling Cell

^c Associate Professor, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University

[†] Corresponding author

Tel.: 053-950-5733

E-mail: jinyounglee@knu.ac.kr

Received: May 02, 2022

Revised: July 08, 2022

Accepted: July 12, 2022

여 재령 3, 7, 28일 의 강도를 측정하였다. 실험의 결과로 페로니켈 슬래그의 최적 혼입률은 약 40%로 나타났다. Kim et al.(2018)은 페로니켈 슬래그 미분말의 시멘트 대체재로서 사용을 평가하였다. 페로니켈 슬래그 미분말(3,500 cm²/g)과 기존의 시멘트 대체재인 고로슬래그, 플라이애쉬 비교 및 평가하기 위해 50 × 50 × 50 mm의 큐브형 시험체가 제작되었고 30 MPa의 시멘트와 시멘트 대체재 혼입율(0, 5, 10, 15, 20%)가 고려되어 시험을 수행하였다. 시험의 결과는 페로니켈 슬래그의 미분말을 시멘트 대체재로의 사용이 가능할 것으로 나타났으며, 페로니켈 슬래그 미분말과 플라이애쉬, 고로슬래그를 함께 사용할 경우 더 큰 강도와 내구성을 나타내었다.

그러나 이러한 선행연구들은 각 시험에서 한종류의 설계강도만이 고려되었으며, Kim et al. (2018)과 같이 페로니켈 슬래그를 미분말화 하는 것의 추가적인 비용이 고려되지 않았다. 또한 페로니켈 슬래그의 혼입율이 과도하거나 소량으로 혼입되어 시험이 수행되었다. 이러한 선행 연구들과는 달리 본 논문은 페로니켈 슬래그 잔골재 혼입율(0, 10, 25, 50%)과 콘크리트 설계강도(24, 30, 40 MPa)를 고려하여 페로니켈 슬래그의 혼입율에 따른 콘크리트 시험체의 강도 및 내구성 평가를 실시하였다.

II. 실험 및 재료

1. 실험개요

본 실험에서는 페로니켈 슬래그 잔골재 혼입률 증가에 따른 삼성분계 혼합콘크리트의 강도 특성에 대한 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 슬럼프, 염화물, 공기량 실험에 대해서는 굳지 않은 콘크리트를 사용하였으며, 페로니켈 슬래그 잔골재에 대해서는 알칼리 잠재반응 시험을 통하여 적합성을 확인하였다. 또한 페로니켈 슬래그 잔골재 혼입률에 따른 특

성을 확인하기 위해 페로니켈 슬래그가 혼입된 일반 콘크리트 시험체를 사용하여 실험을 수행하였다.

2. 실험재료

가. 페로니켈 슬래그

실험에 사용된 페로니켈 슬래그 잔골재는 수도시설을 통해서 급격하게 냉각된 수쇄 슬래그(프라임 샌드) 잔골재 (KS F 2573)이며 5 mm이하로 입도가 조정된 왕사 (2.5~5.0 mm) FNS5를 사용하였다. 입자의 형상은 Fig. 1, 물리적 특징은 Table 1, 화학적 특징은 Table 2에 나타내었다.

나. 페로니켈 슬래그 XRD 분석

본 실험에서 사용된 페로니켈 슬래그 잔골재의 XRD 패턴은 Fig. 2와 같이 나타났다. 주요 구성분은 2MgO · SiO₂ (97.4%), MgO · SiO₂ (2.6%) 화합물로 결합되어 있는 것을 확

Table 1 Physical properties of FNS

Contents	Composition
Density (g/cm ³)	2.96
Surface absorption rate (%)	0.94
FM (%)	3.39
Bulk density of aggregate (kg/L)	1,865
Fineness (cm ² /g)	3,398

Table 2 Chemical properties of FNS (%)

FNS	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	MnO
	32.9	2	51.8	0.982	1.10	0.399
	Fe ₂ O ₃	NiO	SO ₃			
	10.3	0.118	0.0511			

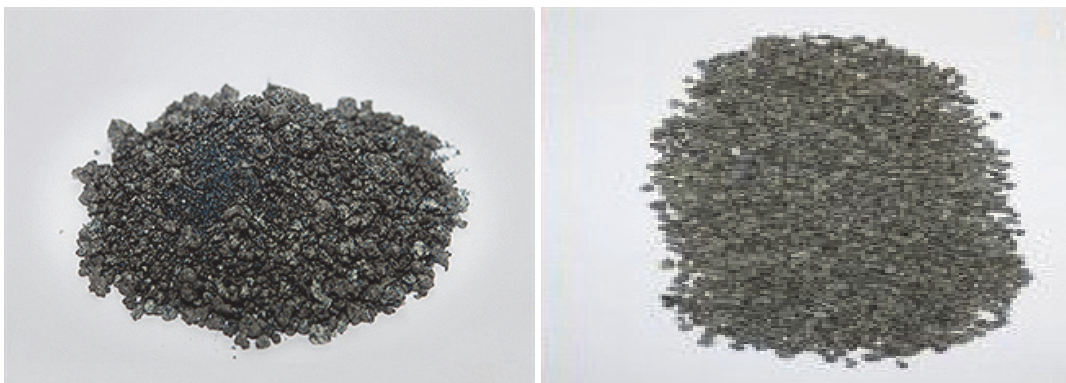


Fig. 1 Ferronickel slag aggregate (2,5~5.0 mm)

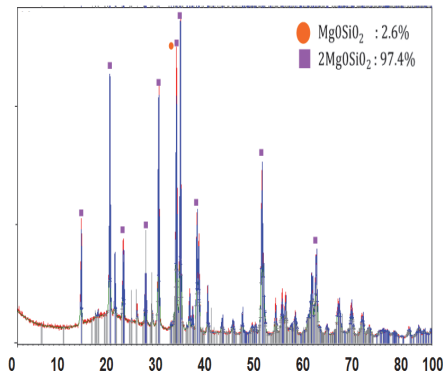


Fig. 2 XRD pattern 20~40° 2θ (a)

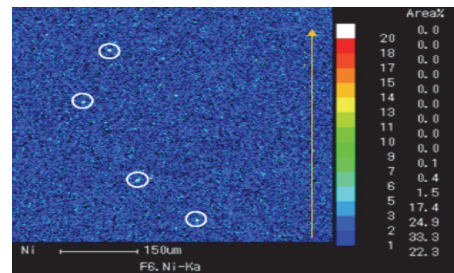
인할 수 있었다. 주요 피크점은 20~25 MPa, 30~35 MPa, 30 MPa, 50~55 MPa, 60 MPa으로 나타났다. 또한 슬래그의 팽창성에 대한 위험 요인으로는 Table 2에 나타났듯이 MgO, CaO가 각각 32.9, 0.982% 차지하고 있다. 이에 따라서 Free-MgO, Free-CaO 상태에서 H₂O에 반응할시 MgO · H₂, CaO · H₂로 화학적 결합을 하면 부피팽창이 2.2~2.5배로 알려져 있다, 그러나 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 독자적인 피크점은 나타나지 않았다. Lim et al. (2017)은 화학적 안정성이 확보되어서 부피팽창에 따른 균열이 발생할 경우가 낮다고 하였으며, 본 시험 결과도 선행 연구와 같은 화학적 안정성 확보에 따른 부피팽창에 안정적인 경향을 보인다.

다. 페로니켈 슬래그 SEM 이미지 분석

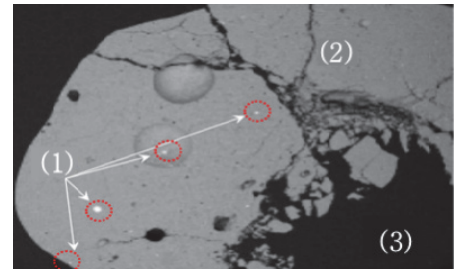
Fig. 3 (a), (b), (c)는 페로니켈 슬래그에 대한 SEM 이미지 상을 나타난 것이다. Fig. 3 (b)에 나타난 바와 같이, SEMEDS의 색상별 분포를 통해 니켈이 Fig. 3 (b) (1)점과 Fig. 3 (b) (2)점에 함침되어 있는 것을 발견할 수 있었다. 또한 Fig. 3 (b) (3)와 같이 슬래그 주변에 공극이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 물이 침투하여 포화될 경우 모세관 현상에 의해서 블리딩 현상을 유발하고, 균열을 발생시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이로 인하여 본 시험에서는 Fig. 3 (c)와 같은 공극을 파쇄하여 5 mm이하로 입도가 조정된 왕사(2.5~5.0 mm) FNS5를 사용하여 공극을 최소화 하였다. 또한 Fig. 3 (c)와 같이 흰색 부분인 Spectrum1에 대한 화학적 주요성분은 Fe (66.46%), Ni (32.9%)로 나타났으며 Spectrum2의 슬래그에 대한 주요 성분은 Si (36.72%), O (32.66%), Mg (22.8%), Fe (5.87%)로 나타났다.

라. 콘크리트 배합재료

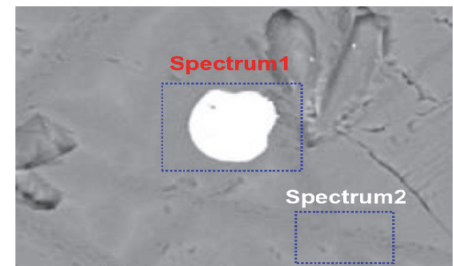
콘크리트 배합에 사용된 시멘트는 S사에서 생산된 1종 보통 포틀랜드(Ordinary portland cement, OPC)로서 밀도 3.09



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 SEM EDS image of FNS

Table 3 Chemical properties of OPC (%)

OPC	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃
	66.23	19.3	4.13	1.3	3.58
	K ₂ O	Na ₂ O	Mn ₂ O ₃	TiO ₃	
3.2	0.94	0.23	0.27		

Table 4 Compressive strength of OPC

OPC	MPa		
	3 Days	7 Days	28 Days
	35.7	48.7	60.8

g/cm³, 분말도 3,500 cm²/g, 강열감량이 2.4%이며, 화학적 성질 및 강도특성은 Table 3, Table 4 와 같다.

잔골재의 경우 천연 잔골재와 부순 잔골재를 혼입하였으며, 천연 잔골재(남원사)는 밀도 2.56 g/cm³이며, 부순 잔골재는 밀도 2.62 g/cm³, 조립율 2.96, 미립분량 1.7%이었다. 굵은

골재의 경우는 밀도는 2.67 g/cm³, 조립율 6.86, 흡수율 0.83%, 단위 용적 질량이 1,585 kg/L이며, 혼화제의 경우 고성능 AE 감수제 폴리카르복실산계의 비중 1.17의 암갈색 액상형을 사용하였다.

마. 콘크리트 배합설계

페로니켈 슬래그 잔골재 혼합 콘크리트 배합에 있어서 시멘트 사용량은 설계 배합강도 24, 30, 40 MPa 대해서 13.6, 16.1, 18.1%로 하였으며, 물시멘트비는 51.5, 43.5, 38.5 %로 하였다. 또한 전체 골재대비 잔골재율은 58.5, 57.5, 56.5%로 기본 배합 비로하여 0, 10, 25, 50%의 비율로 변화시키면서 페로니켈 슬래그 잔골재 혼입률 변화에 따른 압축강도를 측정하였다. 본 실험에 사용한 배합설계비는 Table 5에 나타내었다.

3. 시험방법

본 실험에서는 페로니켈 슬래그 잔골재 첨가량을 0%, 15%, 25%, 50% 치환 배합된 콘크리트를 각 시험 규정에 맞게 시험체를 제작하였다. 탈형 이후 항온수조(20 ± 2°C)에 수중양생을 하여 보관하였으며 이후 압축강도시험(KS F 2405)을 통해서 재령별(7, 14, 28일) 강도 변화를 비교하였고, 휨강도 시험(KS F 2408)에 대해서는 재령 28일에 대한 결과 값을 평가하였다.

가. 염화물 시험

KS F 4009에 규정에 따라 페로니켈 슬래그 잔골재 첨가량에 따른 염화물 함량이 측정되었다. 시험에는 염화물 분석 장

비 New Dy-2501a(대운계기산업, 서울, 대한민국)가 사용되었다. 시험에 사용된 장비는 Fig. 4에 나타내었다.

나. 알칼리 잠재반응 시험

페로니켈 슬래그 잔골재 알칼리 잠재반응 시험은 KS F 2545에 규정에 따라서 실시하였다. KS F 2545에 따라 페로니켈 슬래그 잔골재는 0.15 mm 이상 0.3 mm 이하 크기로 파쇄한 뒤 노르말농도 1의 수산화나트륨(NaOH)용액과 혼합되어 80°C의 항온수조에서 24시간 보관되었다.

다. 압축강도 시험

압축강도 시험은 페로니켈 슬래그 잔골재 첨가한 시험체를 제작하였고, 치수는 L : 100 x H : 200 mm 원형으로 제작되었다. 시험방법은 KS F 2405에 규정에 따라서 실시하였다.



Fig. 4 Set-up of chloride meter

Table 5 Concrete mix proportion

Content	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight (kg/m ³)						
			*C	*W	*S _n	*S _c	*FNS	*G	*AE
FNC_24	51.5	58.5	320	165	550	550	(0%)	775	2.5
			320	165	495	495	110 (10%)	775	2.5
			320	165	412.5	412.5	275 (25%)	775	2.5
			320	165	275	275	550 (50%)	775	2.5
FNC_30	43.5	57.5	380	165	515	515	(0%)	775	3.20
			380	165	463.5	463.5	103 (10%)	775	3.20
			380	165	386.5	386.5	257 (25%)	775	3.20
			380	165	257.5	257.5	515 (50%)	775	3.20
FNC_40	38.5	56.5	430	165	500	500	(0%)	775	3.85
			430	165	450	450	100 (10%)	775	3.85
			430	165	375	375	250 (25%)	775	3.85
			430	165	250	250	500 (50%)	775	3.85

*C = cement, *W = water, *S_n = natural sand, *S_c = crushed sand, *FNS = ferronickel slag, *G = coarse aggregate, *AE = air entraining and water reducing agent

라. 휨강도 시험

휨강도 시험은 페로니켈 슬래그 잔골재 첨가량에 따라서 제작하였고, 시험체는 1,00 × 1,00 × 400 mm 사각기둥으로 제작하여 KS F 2408에 규정에 따라서 실시하였다. 결과 값의 계산은 식 (1)에 나타내었다.

$$f_b = \frac{Pl}{bd^2} \tag{1}$$

여기에서

f_b : 휨강도 (MPa)

P : 최대하중 (N)

l : 지간 (mm)

b : 시험체의 폭 (mm)

d : 시험체의 깊이 (mm)

III. 시험 결과 및 분석

1. 염화물 시험

콘크리트 설계배합 강도에 대해서 페로니켈 슬래그 잔골재 혼입률에 따른 염화물 시험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 시험 결과를 통해 페로니켈 슬래그 잔골재를 혼입한 모든 시험체는 염화물 함유량이 기준값인 0.3 kg/m³ 초과하지 않았지만, Fig. 5에 나타난 바와같이, 페로니켈 슬래그 잔골재를 혼입한 시험체는 페로니켈 슬래그를 혼입하지 않은 시험체보다 큰 염화물 함유량을 나타내고 있다. 이는 페로니켈 슬래그 잔골재의 염화물 함유량이 일반 잔골재에 비하여 많은 것을 나타낸다.

2. 알칼리 잠재반응 시험

알칼리 잠재반응 시험 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 용해 실리카량(SC)의 경우 41.1 mmol/L 이였고, 알칼리 농도 감소량(RC)는 173.4 mmol/L로서 잔골재로서 적합한 것으로 나타났다. 이는 선행 연구와 일치하는 것으로 판단된다(Kim et al., 2013).

3. 압축강도 시험

페로니켈 슬래그 잔골재 혼입률에 따른 압축강도 시험 결과를 Fig. 7 (a), (b), (c)에 나타내었다. 페로니켈 슬래그 잔골재의 혼입율이 증가할수록 시험체의 압축강도가 증가하는 경향이 나타났으나 이러한 경향은 혼입율 25%까지만 관찰되었다. 혼입율 50%의 시험체는 오히려 압축강도가 감소하는 것

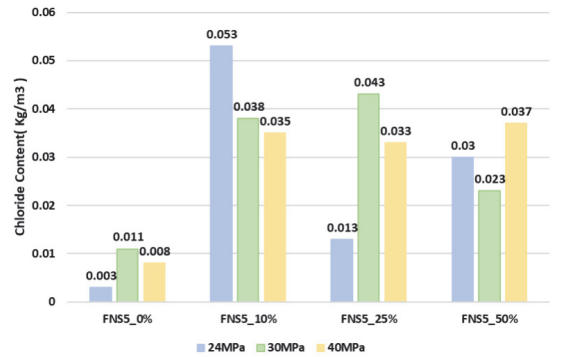


Fig. 5 Test results of chloride meter

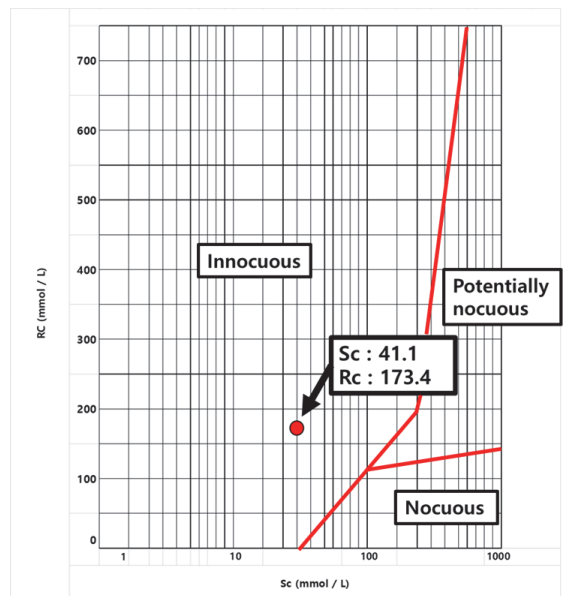
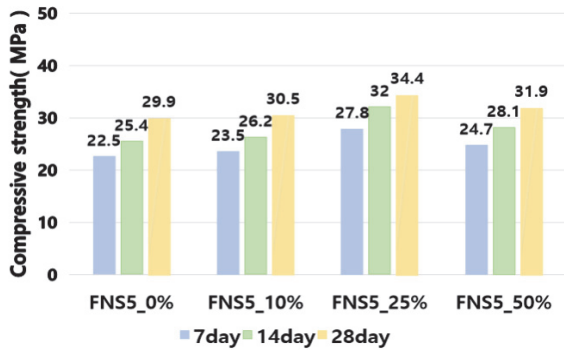
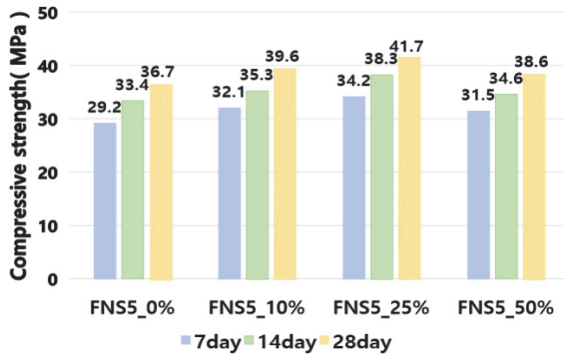


Fig. 6 Test result of alkali potential reaction

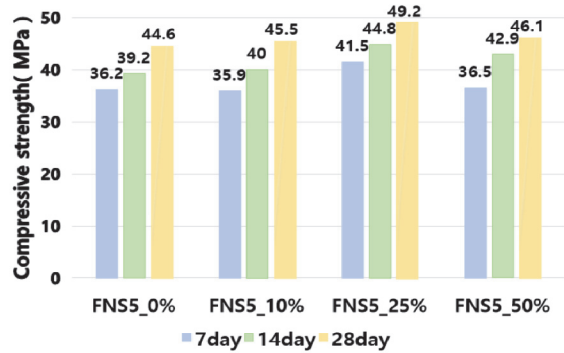
이 나타났다. 이러한 강도 증가는 페로니켈 슬래그 25% 혼입 시험체에서 가장 크게 나타났다. 페로니켈슬래그 0% 혼입 시험체와 페로니켈 슬래그 25% 혼입 시험체의 28일 재령 압축 강도는 다음과 같다. 24 MPa 시험체는 29.3 MPa에서 34.4 MPa으로 약 11.8% 증가하였고, 30 MPa 시험체의 압축강도는 36.7 MPa에서 41.7 MPa으로 11.3% 증가하였으며, 40 MPa 시험체는 압축강도가 44.6 MPa에서 49.2 MPa으로 11% 증가하였다. 특히 페로니켈 슬래그 잔골재 혼입률 25%의 경우 초기강도가 높게 나타났다. 설계강도 24 MPa의 경우 27.8 MPa로서 15.8% 증가하였으며, 30 MPa는 34.2 MPa로서 14%증가하였고, 40 MPa는 41.5 MPa로서 약 3.8% 증가하였다. 하지만 잔골재 혼입률 50%의 시험체의 강도 결과는 미 혼입된 시험체에 비해서 압축강도(31.9, 38.6, 46.1 MPa)가 다소 높게 나왔지만 강도 발현이 가장 우수한 혼입률 25%의 시험체과 비교



(a) 24MPa



(b) 30MPa



(c) 40MPa

Fig. 7 Compressive strength of specimens

했을 때 다소 감소되는 것을 보였다. 또한 설계강도 30 MPa에 대한 재령 28일 기준 50% 페로니켈 슬래그 잔골재가 약 10% 정도 강도 증진 효과가 있다는 선행된 연구와 다르게 본 시험에서는 24, 30, 40 MPa에 대한 압축강도 증진은 각각 6, 5, 3%로서 강도가 발현되는 것으로 나타났다 (Koo et al., 2020). 본 논문은 Koo et al. (2020)과 달리 시멘트와 유사한 분말도를 가진 페로니켈슬래그를 사용하였다. 시험에 사용된 페로니켈 슬래그의 분말도 차이로 선행연구와 다른 압축강도 시험 결과가 나타났다. 결과에 나타난 바와 같이, 높은 설계강도를 가진 시험체에 비해 비교적 낮은 설계강도를 가진 시험체에

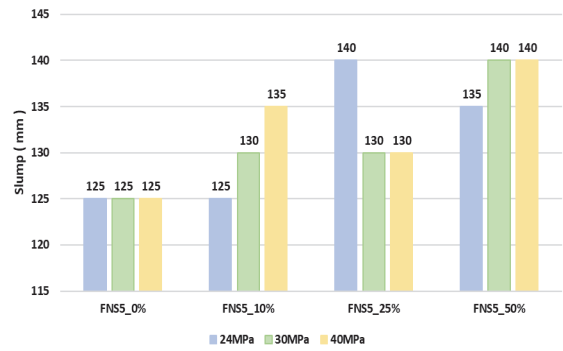


Fig. 8 Test results of slump test

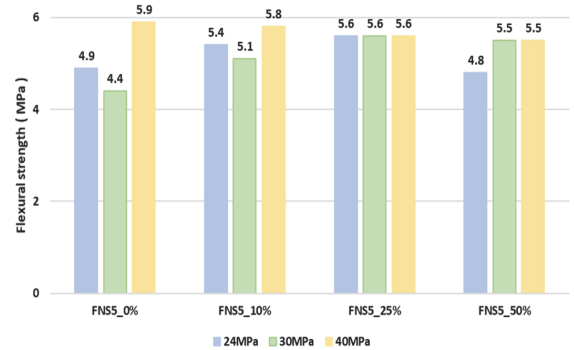


Fig. 9 Flexural strength of specimens

서 더 큰 강도발현이 나타났다. Kim et al. (2013)은 페로니켈 슬래그 잔골재 혼입에 따른 강도 증진은 골재의 강도 효과에 의해서 영향을 받은 것이라고 하였으며, 이는 시험 결과와 일치하며 일반 잔골재(2.56 g/cm³)에 비해 페로니켈 슬래그 잔골재는 밀도(2.96 g/cm³)가 높으며 이러한 특성에 따라 흡수율이 낮고 입형과 골재 표면의 유리질 피막 특성의 영향에 따라서 유동성 증가로 인한 영향을 받은 것으로 보고한 선행 연구된 결과와 일치하는 경향을 나타내었다 (Jo et al., 2014). 이러한 특성의 영향으로 증가한 유동성을 나타내기위해 슬럼프 시험 값을 Fig. 8을 통해 나타내었다.

4. 휨강도 시험

페로니켈 슬래그 잔골재를 혼입한 삼성분계 혼합콘크리트의 휨강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 24, 30, 40 MPa 시험체에 0, 10, 25, 50%의 잔골재 혼입률로 설계 배합하여 재령 28일 기준 휨강도 실험을 수행하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 40 MPa의 시험체의 경우 페로니켈 슬래그 잔골재를 혼입하지 않은 시험체의 경우가 가장 높은 휨강도 결과 (5.92 MPa)를 나타내었으며, 혼입률이 증가될수록 강도가 약 2.7, 5, 7% 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 페로니켈 슬래

그 잔골재의 혼입량 증가에 따른 표면의 유리질 피막 특성에 의해 페이스트간의 부착력이 낮아지는 영향에 따라 강도가 저하된다는 선행 연구와 경향과 일치하는 것을 알 수 있다 (Kim et al., 2015). 24, 30 MPa의 시험체에서 혼입률 25%의 시험체에서 가장 높은 휨강도가 나타났다. 각각 4.9 MPa, 4.4 MPa에서 5.6 MPa로 약 14.3%, 27.3% 증가하였고, 혼입률 50%의 시험체는 혼입률 25%의 시험체에 비해 휨강도가 저하되는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 40 MPa 시험체의 페로니켈 슬래그 혼입율에 따른 강도저하를 뒷받침하는 선행연구와 달리 본 시험에서 사용된 페로니켈 슬래그의 분말도에 영향을 받은 것으로 보인다. 페로니켈 슬래그를 미분말로 파쇄할 경우 표면의 유리질 피막 특성이 적게 나타나 휨강도 24, 30 MPa의 시험체에서 압축강도와 유사하게 페로니켈 슬래그 혼입율이 증가할수록 강도가 증가하였으나 50%의 혼입율에서는 강도저하가 나타났다. 그러나 휨강도의 경우 40 MPa 시험체에서 이러한 경향이 나타나지 않고 페로니켈 슬래그 혼입율이 증가할수록 강도가 저하되는 경향을 보였다. 이러한 특성은 본 논문의 주요변수로 사용된 페로니켈 슬래그의 분말도와 선행연구 Kim et al.(2015)에서 사용된 페로니켈 슬래그의 분말도의 차이 때문에 발생한 것으로 보인다.

IV. 결론

본 실험에서는 페로니켈 슬래그 잔골재를 활용한 최적의 설계배합 강도에 대한 연구를 통하여 현장 적용성에 대한 평가를 하기 위해 각기 다른 설계강도에 대한 페로니켈 슬래그 잔골재를 혼입하여 비교하였고, 이를 위하여 염화물 시험, 압축강도 시험, 휨강도 시험을 통하여 비교, 분석하였다. 또한 사용된 재료에 대한 물리적 화학적 특징을 비교하여 재료의 특성 및 안정성에 대한 특성을 연구한 결과는 다음과 같다.

- 1) 페로니켈 슬래그 잔골재를 혼입한 콘크리트의 압축강도 발현은 혼입하지 않은 시험체에 비해서 상대적으로 높은 강도를 나타내었다. 특히 페로니켈 슬래그 잔골재 25%를 혼입한 시험체의 경우 재령 7일에서 설계강도보다 약 3~15 % 높은 압축강도가 발현되었으며 재령 28일 기준으로 압축강도를 측정할 결과 가장 높은 강도가 발현되는 것으로 나타났다.
- 2) 휨강도 시험결과 페로니켈 슬래그 잔골재를 혼입한 24 MPa, 30 MPa에 대해서 25%를 혼입한 시험체의 경우 압축강도 시험과 같이 상대적으로 높은 강도를 나타내었다. 하지만 40 MPa의 경우 페로니켈 슬래그 잔골재를 혼입하지 않은 시험체가 혼입한 시험체들에 비해서 휨강도가 높게 나오는 것으로 나타났다.

- 3) 페로니켈 슬래그 잔골재를 콘크리트에 혼입하는 방안은 콘크리트의 압축강도, 휨강도를 증가시키기 위한 방안으로 사용될 수 있으며, 또한 페로니켈 슬래그 잔골재를 혼입함에 따라 천연골재 부족도 완화 시킬 수 있을 것으로 보인다. 본 논문에서 제시하는 최적의 페로니켈 슬래그 잔골재 혼입율은 25%이다. 페로니켈 슬래그의 보편적인 사용과 천연골재 부족 완화를 위해 최적 분말도 및 혼입율은 추후 연구가 더 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 연구비 지원(NRF-2020R1F1A1050623)과 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(No. 321070-04-2-HD050)

REFERENCES

1. Choi, Y. W., M. S. Park, K. M. Lee, S. H. Bae and J. S. Kim, 2011. Evaluation of optimum mixing rate and durability of concrete using water granulated slag fine aggregate. *Journal of the Korea Recycled Construction Resources Institute* (13) 120-127. (in Korean).
2. Cho, B. S., H. H. Ha, Y. W. Choi, D. C. Park, and Y. C. Choi, 2014. A study on performance of concrete using FeNi slag aggregate. *Proceedings of Korea Concrete Institute Fall Conference* 26(2): 583-584. (in Korean).
3. Lim, B. G., 2017. A Study on the Mechanical Properties and Durability for the Mortar Using Modified Ferronickel Slag fines. MS thesis, Seoul: Sangmyung University. (in Korean).
4. Kim, J. S., E. S. Park, K. Y. Ann, and W. J. Cho, 2021. A study on the fundamental properties of mortar mixed with converter slag and ferronickel slag. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute* 9(2): 152-160. (in Korean).
5. Lee, J., and C. Park, 2010. Effect of blast furnace slag, hwang-toh and reinforcing fibers on the physical and mechanical properties of porous concrete using blast furnace slag coarse aggregate. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 52(5): 53-60. (in Korean).
6. Kim, K. H., and H. R. Jung, 2009. An Physical Disturbance on Sand Mining in Sandy River. *Journal of Civil and*

- Environmental Engineering Research* (4): 2470-2473. (in Korean).
7. Kim, P. S., 2013. The Study on Performance Evaluation of Eco-Friendly Concrete Using Ferro-Nickel Slag for Fine Aggregate. MS thesis, Seoul: Han Yang University. (in Korean).
 8. Kim, W. J., S. B. Hong, P. S. Kim, and B. S. Cho, 2012. Research on the concrete using ferro-nickel slag for fine aggregate. *Proceedings of Korea Concrete Institute Spring Conference* 24(1): 49-51. (in Korean).
 9. Kim, H. S., 2015. Characteristics of Eco-Friendly Concrete Using Ferronickel slag Fine Aggregates. MS thesis, Suwon: Sungkyunkwan University. (in Korean).
 10. Koo, J. W., 2020. A Study on the Properties of Concrete by the Replacement Rate of Ferro-nickel Slag. MS thesis, Seosan: HanSeo University. (in Korean).
 11. Baoyu, L., L. Guoxing, W. Guiyu, Z. Guofeng, and Y. Man, 2022. Research on CART model of mass concrete temperature prediction based on big data processing technology. *IEEE Access* 10: 32845-32854.
 12. El-Mir, A., J. J. Assaad, S. G. Nehme, and H. El-Hassan, 2022. Correlating strength and durability to time-temperature profiles of high-performance mass concrete. *Case Studies in Construction Materials* 16: e01055.
 13. Xingbin, Z., R. Hua, Z. Zhong, F. Sha, and G. Yan, 2022. Cracking control of mass concrete slab in nuclear power plant with dynamic curing. *ACI Materials Journal*, 119(3).
 14. Lee, H. C., and J. W. Park, 2017. Extraction of marine aggregate and issues of marine environmental protection. *Chungnam Law Review* 28: 145-177. (in Korean).
 15. Hong, S. S., and J. Y. Lee, 2020. Analysis of 2019 domestic aggregate production in Korea (I). *The Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 53(6): 755-769. 10.9719/EEG.2020.53.6.755 (in Korean.)
 16. Kim, Y. U., D. B. Kim, and S. J. Choi, 2018. An experimental study on the setting time and compressive strength of mortar using ferronickel slag powder. *Journal of the Korea Institute of Building Construction* 18(6): 551-558. (in Korean.)
 17. Kim, W. Y., 2009. The study on site application of concrete for underwater repair of dam. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* (0): 92-92. (in Korean).
 18. Lee, J., M. Kim, K. Kim, J. Cho, and T. Shin, 2011. Development of maintenance simulation system and prediction model of chloride ion permeation for marine concrete structures. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* (0): 101-101. (in Korean).
 19. Lee, J., M. Kim, J. Cho, and H. Kim, 2011. Development of maintenance simulation system and prediction model of chloride ion permeation for marine concrete structures. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* (0): 95-95. (in Korean).
 20. Kim, H. H., C. S. Kim, Y. J. Kim, J. C. Jeon, S. M. Jeon, H. D. Kim, and C. G. Park, 2016. A study of CO2 reduction effect of modified porous vegetation concret blocks using blast furnace slag. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* (0): 127-127. (in Korean).
 21. Lee, S. Y., Y. J. Bae, T. Kim, and H. J. Kim, 2013. Simulation system of deterioration of reinforced concrete structure in the marine environment. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* (0): 94-94. (in Korean).