

서냉 페로니켈 슬래그 잔골재를 이용한 콘크리트의 역학적 특성 및 동결 융해 저항성

Mechanical Properties and Resistance to Freezing and Thawing of Concrete Using Air-Cooled Ferronickel Slag Fine Aggregate

이흥직¹ · 배수호^{2*} · 이현진³ · 최연왕⁴ · 조봉석⁵

Hong-Gik Lee¹ · Su-Ho Bae^{2*} · Hyun-Jin Lee³ · Yun-Wang Choi⁴ · Bong-Suk Cho⁵

(Received November 2, 2018 / Revised December 5, 2018 / Accepted December 6, 2018)

Ferronickel slag is a by-product from the ferronickel smelting process and it is divided into air-cooled ferronickel slag and water granulated ferronickel slag according to cooling system. The purpose of this experimental reserch is to investigate the mechanical properties and resistance to freezing and thawing of concrete using air-cooled ferronickel slag(ACFNS) fine aggregate. For this purpose, the concrete specimens with water-cement ratio of 50% were made with ACFNS's replacement ratios of 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 70%, and 100% by volume of fine aggregate. It was observed from the test results that the compressive strength and static modulus of elasticity of ACFNS fine aggregate concrete were increased with increasing replacement ratio of ACFNS and the resistance to freezing and thawing of this was similar to reference concrete which had the relative dynamic modulus of elasticity of more than 90% during the freezing and thawing of 300 cycles.

키워드 : 서냉 페로니켈 슬래그, 혼입률, 압축강도, 정탄성계수, 동결융해 저항성

Keywords : Air-cooled ferronickel slag, Replacement ratio, Compressive strength, Static modulus of elasticity, Resistance to freezing and thawing

1. 서론

국내 건설공사의 지속적인 성장으로 천연골재 자원이 급감함에 따라 부순모래나 바다모래 또는 순환골재 등의 사용이 증가하고 있다. 그러나 부순모래는 입도 조정이 어려울 뿐만 아니라 생산과정에 파쇄 방식, 폐수 및 미분 처리 방법 등에 따라 환경문제를 유발할 수 있고, 바다모래는 환경오염 문제로 채취 금지 지역이 확대되고 있으며, 순환골재는 가공 처리 기술의 미흡으로 보통골재보다 품질이 저하되는 문제점이 있다. 따라서 부순모래나 순환골재 등의 문제점을 해결하고, 경제적 이고 우수한 품질의 대체골재 개발이 필요한 실정이다(Choi et

al. 2011; Park et al. 2011).

한편, 스테인리스강 및 특수강의 주원료인 니켈의 원재료인 페로니켈은 순니켈을 20% 함유한 것으로, 철과 니켈의 혼합물 형태이다(Park 2017). 국내에서는 페로니켈 생산 시 연간 100만톤 가량의 페로니켈 슬래그가 발생하며, 이것은 도로용 노반재나 콘크리트용 잔골재 및 농업용 비료 등으로 재활용되고 있다(KS F 2527, 2016). 유럽이나 일본의 경우에도 시멘트 대체 치환재보다는 골재 대체 측면에서 이미 광범위하게 노반재, 성토재, 잔골재 대체재 및 플렉스(flux)재 등으로의 활용이 보편화된 실정이다(Park 2017;

* Corresponding author E-mail: shbae@andong.ac.kr

¹덕산개발(주) 부장 (Duksan Development Co., Ltd, Yecheon, 36829, Korea)

²안동대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea)

³안동대학교 토목공학과 박사수료 (Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea)

⁴세명대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea)

⁵포항산업과학연구원 에너지연구그룹 전문연구원 (Energy Research Group, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang, 37673, Korea)

Lee 2017). 이에 따라 콘크리트용 골재 부족 해결을 위한 일환으로 콘크리트용 잔골재로서 페로니켈 슬래그를 보다 적극적으로 활용하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

페로니켈 슬래그는 전기로에서 페로니켈과 동시에 생성되는 용융 슬래그를 공기 중에서 서냉하거나 물로 급냉한 것으로, 전자는 서냉 페로니켈 슬래그(air-cooled ferronickel slag), 후자는 수쇄 페로니켈 슬래그(water granulated ferronickel slag)라 부른다(KS F 2527, 2016). 본 연구에서는 서냉 페로니켈 슬래그를 콘크리트용 잔골재로서 활용하기 위한 일환으로 광양의 페로니켈 제련공장에서 서냉 페로니켈 슬래그를 채취하여 그것의 혼입률별로 콘크리트 공시체를 제작한 후 페로니켈 슬래그를 혼입한 콘크리트의 작업성, 역학적 특성 및 동결융해 저항성 등을 평가하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 H사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 물리적 성질은 Table 1과 같다. 잔골재는 낙동강산 하천사(경북 안동시)와 국내 P사에서 발생하는 서냉 페로니켈 슬래그(air-cooled ferronickel slag, ACFNS, Fig. 1)를, 굵은골재는 최대치수가 20mm 인 안동산 부순돌을 사용하였으며, 이들의 물리적 성질 및 ACFNS의 화학성분은 각각 Table 2 및 3과 같다. ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 유동성 및 공기량 조절을 위한 화학 혼화제는 고강도 및 유동화 콘크리트용으로 사용되고 있는 S사의 폴리카르본산계의 고성능 감수제(superplasticizer, SP로 약함)와 공기연행제(air entraining agent, AE로 약함)를 병용하였으며, 이들의 밀도는 각각 1.03g/cm³, 1.04g/cm³인 액상용액을 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 공시체 제작

ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 역학적 특성 및 동결융해 저항성을 평가하기 위하여 물-시멘트비 50%, 목표 슬럼프 및 목표 공기량은 각각 150±25mm, 4.5±0.5%로 설정하였다. ASFNS의 혼입률은 각 배합에 대해서 잔골재 용적비로 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 70% 및 100%로 변화시켜 KS F 2403(2014)에 따라 콘크리트 공시체를 제작하였다. 압축강도 및 정탄성계수 시험용 공시체는 원주형 공시체(Ø100×200mm)로, 동결융해 저항성 시험용 공시체는 각주형 공시체(76×101×412mm)로 제작하였다(Table 4). 제작된 공시체는 성형 후 24시간 경과하여 몰드를 제거한 후 시험

Table 1. Physical properties of cement

Type	Density (g/cm ³)	Setting time(min)		Fineness (cm ² /g)	Compressive strength(MPa)		
		Initial	Final		f3	f7	f28
Ordinary portland cement	3.14	225	340	3,410	25.1	40.8	57.4



Fig. 1. Air-cooled ferronickel slag

Table 2. Physical properties of aggregates

Type	G _{max} (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Unit mass (kg/m ³)	Amount of passing 0.08mm sieve(%)	Fineness modulus
River sand	-	2.61	1.47	1,597	2.20	2.43
Crushed stone	25	2.66	0.58	1,648	-	7.27
ACFNS	-	3.11	1.39	2,219	10.8	4.47

Table 3. Chemical composition of ACFNS

Type	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	FeO
ACFNS	57.6%	31.34%	0.34%	1.72%	4.85~5.55%

Table 4. Mix proportions of ACFNS fine aggregate concrete

G _{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Type	Unit mass(kg/m ³)					Chemical admixtures (C×%)	
				W	C	S	ACFNS	G	SP	AE
20	50	40	ACFNS-0%*	175	350	715	0	1041	0.98	0.0035
			ACFNS-20%			572	170			
			ACFNS-30%			501	256			
			ACFNS-40%*			429	341			
			ACFNS-50%			358	426			
			ACFNS-70%			215	597			
ACFNS-100%	0	852	1.70							

* Mix proportions to investigate resistance to freezing and thawing of ACFNS fine aggregate concrete

전까지 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 습윤양생하였다.

2.2.2 압축강도 시험

ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405(2010)에 따라 재령별(3, 7, 28일)로 수행하였다.

2.2.3 정탄성계수 시험

ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 정탄성계수를 구하기 위하여 KS F 2438(2017)에 따라 Table 4의 각 배합의 재령 28일 콘크리트 공시체에 대해서 시험을 수행하였다. 동일 배합의 콘크리트 공시체에 대해서 압축강도 시험을 통하여 파괴하중 및 파괴하중의 40~50% 하중을 미리 계산한 다음, 파괴하중의 70% 정도까지의 하중을 가하면서 종방향 변위를 측정 후 정탄성계수를 구하였다(Fig. 2).

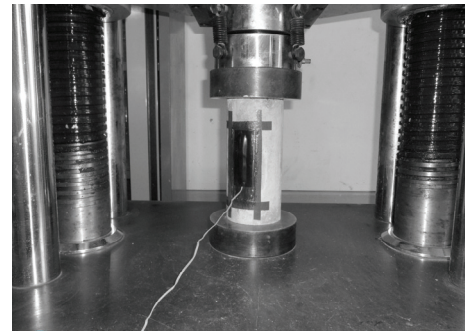


Fig. 2. Measurement of longitudinal displacement

2.2.4 동결융해 저항성 시험

ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 내동해성을 평가하기 위한 동결융해 저항성 시험은 재령 기준 콘크리트(ACFNS 0%)와 작업성 및 압축강도 특성이 모두 우수한 ACFNS 40%를 혼입한 콘크리트 공시체 각각에 대해서 재령 14일간 표준양생 후 KS F 2456(2013)의 시험 방법 B인 기중동결, 수중융해 방법에 따라 수행하였다. 동결융해 사이클은 공시체의 온도를 약 3시간에서 교대로 4°C 에서 -18°C 로 떨어뜨리고, 다음에 -18°C 에서 4°C 로 상승시키는 것을 1 사이클로 하여 300 사이클까지 동결융해 시험을 실시하였다(Fig. 3). 내동해성은 동결융해 300 사이클까지 가로 1차 진동 주파수를 측정 후 식 (1)과 같은 상대 동탄성계수로 평가하였다.

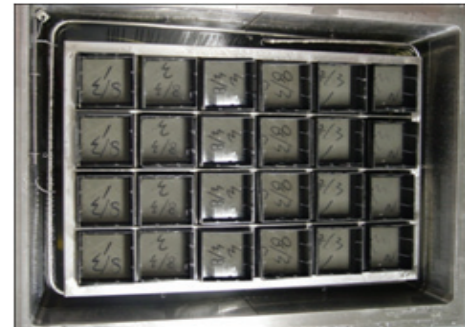


Fig. 3. Freezing and thawing test

$$P_c = (n_1^2 / n^2) \times 100 \quad (1)$$

여기서, P_c : 동결융해 C 사이클 후의 상대 동탄성계수 (%)
 n : 동결융해 0 사이클에서의 가로 1차 진동 주파수
 n_1 : 동결융해 C 사이클 후의 가로 1차 진동 주파수

3. 실험결과 및 고찰

3.1 작업성

Fig. 4는 ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 목표 슬럼프 ($150\pm 25\text{mm}$)를 얻기 위한 고성능 감수제 첨가량을 나타낸 것으로, 동일 물-시멘트비일 때 소요 슬럼프를 얻기 위한 고성능 감수제 첨가량이 증가할수록 작업성이 불리한 것을 나타낸다. ACFNS 혼

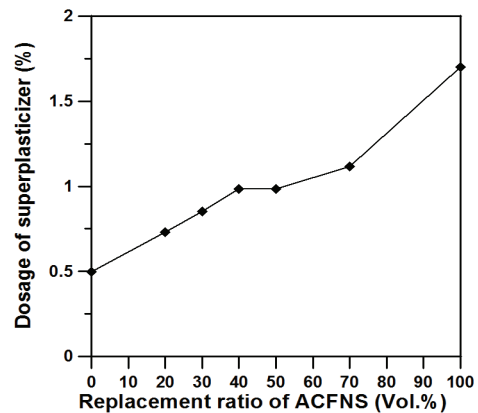


Fig. 4. Dosage of superplasticizer with replacement ratio of ACFNS

입률에 따른 콘크리트의 작업성은 대체적으로 혼입률이 증가할수록 저하되는데, 이는 ACFNS가 일반 잔골재에 비해 입형이 거칠고 0.08mm체 통과량이 다소 많기 때문인 것으로 판단된다. ACFNS 혼입률에 따른 콘크리트의 고성능 감수제 첨가량은 ACFNS 혼입률 50% 이하의 경우 기준 콘크리트의 2배 이하이나, ACFNS 혼입률 100%의 경우 기준 콘크리트의 3배를 초과하는 것으로 나타나, 경제성 측면에서 ACFNS의 혼입률은 50% 이하가 적절한 것으로 나타났다.

3.2 압축강도

Fig. 5는 ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 재령별 압축강도를 나타낸 것으로, 잔골재 전량을 ACFNS로 치환한 경우의 압축강도는 재령에 관계 없이 기준 콘크리트보다 1.28배 이상 크게 증가하는 것으로 나타났으나, 그 이외의 경우는 ACFNS 70% 혼입한 재령 28일의 경우를 제외하면, 기준 콘크리트보다 다소 감소하는 것으로 나타났다. 한편, ACFNS 혼입률에 따른 콘크리트의 압축강

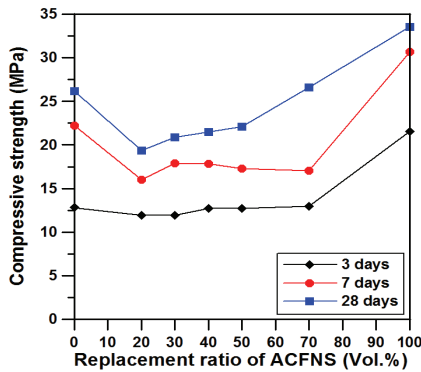


Fig. 5. Compressive strength with replacement ratio of ACFNS

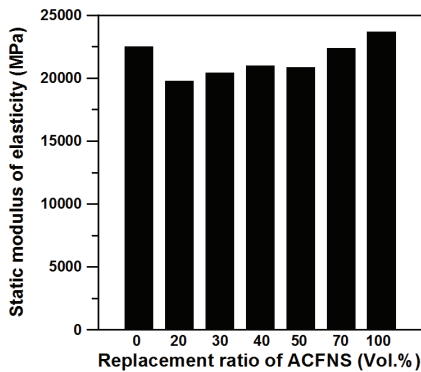


Fig. 6. Static modulus of elasticity with replacement ratio of ACFNS

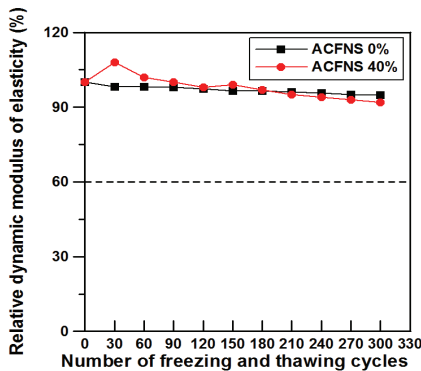


Fig. 7. Resistance to freezing and thawing of ACFNS fine aggregate concrete

도는 혼입률이 증가할수록 커지는 것으로 나타났는데, 이는 ACFNS의 화학 성분 중 SiO₂가 50% 이상으로 포졸란 반응을 활성화시키기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 재령 28일의 경우 ACFNS를 30% 이상 혼입한 콘크리트의 압축강도는 기준 콘크리트의 80% 이상 발휘한 것으로 나타나, 압축강도 측면에서 ACFNS의 혼입률은 30% 이상이 적절한 것으로 나타났다.

3.3 정탄성계수

콘크리트의 탄성적 성질 중에서 가장 중요한 것 중의 하나가 정탄성계수이고, 실제 콘크리트 구조물의 설계자료로 정탄성계수가 사용되므로, 본 연구에서는 ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 정탄성계수를 평가하였다. ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트의 정탄성계수는 ACFNS 혼입률 100%인 경우를 제외하면, 대체적으로 기준 콘크리트보다 저하되는 것으로 나타났다. ACFNS 혼입률에 따른 콘크리트의 정탄성계수는 혼입률이 증가할수록 커져서 압축강도 증가와 함께 강성도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 정탄성계수가 단위질량과 압축강도의 함수이므로 압축강도가 증가함에 따라 정탄성계수도 증가하는 것으로 나타났다. ACFNS 혼입률 30% 이상인 콘크리트의 정탄성계수는 기준 콘크리트의 90% 이상으로, 탄성적 성질이 비교적 우수한 것으로 나타났다(Fig. 6).

3.4 동결융해 저항성

Fig. 7은 콘크리트의 공기량이 4.5±0.5%로 일정할 때 기준 콘크리트 및 ACFNS 40% 혼입한 콘크리트의 동결융해 300 사이클까지의 상대 동탄성계수를 나타낸 것이다. ACFNS 잔골재 혼입 콘크리트의 300 사이클까지의 상대 동탄성계수는 90% 이상으로 매우 우수하고, 기준 콘크리트의 상대 동탄성계수와 거의 동등한 것으로 나타났는데, 이는 콘크리트의 동결융해 저항성은 소요 공기량(3~6%)에 의존하므로 본 연구에 사용된 2종류 콘크리트 모두 콘크리트 배합 시 4.5±0.5%의 공기량을 연행시켰기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트의 동결융해 저항성은 콘크리트 종류보다 소요 공기량에 지배되는 것으로 나타났다.

4. 결론

서빙 페로니켈 슬래그 잔골재를 이용한 콘크리트의 역학적 특성 및 동결융해 저항성에 관한 실험연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ACFNS 혼입률에 따른 압축강도는 혼입률이 증가할수록 압축강도가 커지는 것으로 나타났는데, 이는 ACFNS의 화학 성분 중 SiO₂가 50% 이상으로 포졸란 반응을 활성화시키기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 재령 28일의 경우 ACFNS를 30% 이상 치환한 콘크리트의 압축강도는 기준 콘크리트의 80% 이상 발휘한 것으로 나타나, 압축강도 측면에서 ACFNS의 혼입률은 30% 이상이 적절한 것으로 나타났다.
- 2) ACFNS 혼입률에 따른 정탄성계수는 혼입률이 증가할수록 커져서 강도 증가와 함께 강성도 증가하는 것으로 나타났고, ACFNS 혼입률 30% 이상인 콘크리트의 정탄성계수는 기준 콘크리트의 90% 이상으로, 탄성적 성질이 비교적 우수한 것으로 나타났다.
- 3) ACFNS 잔골재 혼입 콘크리트의 300 사이클까지의 상대 동탄성계수는 90% 이상으로 매우 우수하고, 기준 콘크리트의 상대 동탄성계수와 거의 동등한 것으로 나타났는데, 이는 본 연구에 사용된 2종류 콘크리트 모두 콘크리트 배합 시 4.5±0.5%의 공기량을 연행시켰기 때문이고, 콘크리트의 동결융해 저항성은 콘크리트 종류보다 소요 공기량에 지배되는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Choi, Y.W., Park, M.S., Lee, K.M., Bae, S.H., Kim, J.S. (2011). Evaluation of optimum mixing rate and durability of concrete using water granulated slag fine aggregate, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, **6(1)**, 120–127 [in Korean].
- KS F 2403. (2014). Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens, KS Standard, Korea [in Korean].
- KS F 2405. (2010). Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KS Standard, Korea [in Korean].
- KS F 2438. (2017). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio in compression of cylindrical concrete specimens, KS Standard, Korea [in Korean].
- KS F 2456. (2013). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, KS Standard, Korea [in Korean].
- KS F 2527. (2016). Concrete Aggregate, KS Standard, Korea [in Korean].
- Lee, C.H. (2017). The status of construction recycling resources in global ferronickel slag market, Magazine of Korean Recycled Construction Resource Institute, **12(3)**, 54–58 [in Korean].
- Park, J.I., Bae, S.H., Choi, Y.W., Lee, G.M., Cho, B.S. (2011). “Mechanical properties and durability of concrete using ferronickel air cooled slag aggregate,” Proceedings of the Korea Concrete institute, 471–472 [in Korean].
- Park, S.S. (2017). Strength and resistance to chloride penetration in mortar containing ferronickel slag powder by vibrated and rolled manufacturing method, Journal of the Korea Concrete Institute, **29(6)**, 633–640 [in Korean].

서냉 페로니켈 슬래그 잔골재를 이용한 콘크리트의 역학적 특성 및 동결 융해 저항성

페로니켈 슬래그는 페로니켈의 제련과정에서 발생하는 산업부산물로, 냉각 방법에 따라 서냉 페로니켈 슬래그와 수쇄 페로니켈 슬래그로 구분된다. 본 연구의 목적은 서냉 페로니켈 슬래그(air-cooled ferronickel slag, ACFNS) 잔골재를 이용한 콘크리트의 역학적 특성 및 동결융해 저항성을 평가하는 것이다. 이를 위하여 물-시멘트비 50%에 대해서 ACFNS 혼입률을 잔골재 용적비로 7가지 수준(0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 70%, 100%)으로 변화시켜 ACFNS 잔골재를 이용한 콘크리트를 제작하였다. 실험결과로부터, ACFNS 잔골재 콘크리트의 압축강도 및 정탄성계수는 ACFNS의 혼입률이 증가할수록 커지고, 동결융해 저항성은 동결융해 300 사이클 동안 상대동탄성계수가 90% 이상으로 나타난 기준 콘크리트와 유사한 것으로 나타났다.