

전로슬래그 및 페로니켈슬래그를 혼입한 모르타르의 기초물성 연구

A Study on the Fundamental Properties of Mortar Mixed with Converter Slag and Ferronickel Slag

김지석¹ · 박연상² · 안기용³ · 조원정^{4*}

Ji-Seok Kim¹ · Eon-Sang Park² · Ki-Yong Ann³ · Won-Jung Cho^{4*}

(Received March 9, 2021 / Revised April 30, 2021 / Accepted May 3, 2021)

Converter steel slag(BOF slag) is a vast amount of solid waste generated in the steelmaking process which has very low utilization rate in Korea. Due to the presence of free CaO which can derive bad volume stability in BOF slag, it usually land filled. For recycling BOF and identify its applicability as fine aggregate, this study investigates the fundamental characteristics of mortar with cement replaced ferronickel slag(FNS), which has the potential to be used as a binder. The results suggest that the mineral phases of BOF slag mainly include larnite(CaSiO_4), mayenite($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$) and wuestite(FeO) while olivine crystallines are shown in FNS. The results of flow and setting time reveals that the flowability and process of hardening increased when the amount of FNS and BOF slag incorporated was increased. The length change shows that the amount of change in the length of the mortar was almost constant regardless of mix proportion while compressive strength was reduced. Micro structure test results revealed that FNS or/and BOF slag mix took a long time to react in the cement matrix to form a complete hydration products. To achieve the efficient utilization of BOF slag as construction materials, proper replacement rate is necessary.

키워드 : 전로슬래그, 페로니켈슬래그, 재활용

Keywords : Converter slag, Ferronickel slag, Recycling

1. 서론

제철 산업은 대량의 원료와 에너지를 소비하며 철강을 생산하며 다양한 종류의 부산물과 폐기물을 다량 발생시키고 있다(Lim et al. 2019). 철강은 생산 시 용도에 맞는 강으로 가공하는 과정을 거치게 되는데, 선철을 만들어내는 고로와 제강을 만들어내는 전로 및 전기로로 나뉜다. 이 과정에서 철광석에 함유되어 있는 불순물을 제거하고 탄소의 양을 줄이는 과정에서 부산물이 발생하는데, 공정 이후 금속을 분리하고 남은 부산물을 슬래그라고 부른다. 이러한 슬래그는 Fig. 1과 같이 발생하는 공정에 따라 크게 고로슬래그와 제강슬래그로 분류할 수 있다. 이 중 고로슬래그는 자원의

유용성이 입증되어 콘크리트용 골재(KS F 2527, 2020), 시멘트(KS L 5210, 2017) 및 콘크리트 제조 시 결합재로 활발히 재활용되고 있는 실정이다(KS F 2563, 2020).

제강슬래그 중 전기로 슬래그는 자연사 보다 비중이 크고, 안정성이나 흡수율이 양호하여 콘크리트용 골재로(KS F 2527, 2020) 활용되고 있다. 이와 달리, 전로슬래그는 식 (1)과 같이 팽창성 문제를 야기할 수 있는 free CaO의 함량이 많아 재활용에 많은 제약을 받고 있다(Navarro et al. 2010; Tsakiridis et al. 2008; Dippenaar 2005).

* Corresponding author E-mail: nelly91@hanyang.ac.kr

¹한양대학교 건설환경시스템공학과 대학원생 (Dept. of Civil & Environmental System Eng., Hanyang University, Kyeonggi, 15588, Korea)

²숭실사이버대학교 건설시스템공학과 조교수 (Dept. of Construction System Eng., Soongsil Cyber University, Kyonggi, 15588, Korea)

³한양대학교 건설환경공학과 교수 (Dept. of Civil & Environmental System Eng., Hanyang University, Kyeonggi, 15588, Korea)

⁴한양대학교 건설환경시스템공학과 박사후연구원 (Dept. of Civil & Environmental System Eng., Hanyang University, Kyeonggi, 15588, Korea)

Copyright © 2021 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

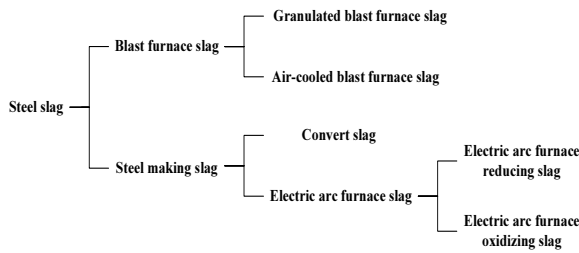
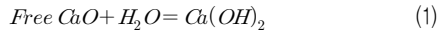


Fig. 1. Type of steel slag



이와 같은 문제점을 해결하기 위해 생산된 전로슬래그는 약 1개 월 내지 6개월 기간 동안 야적에 의한 에이징 처리를 한 후 사용되는 것이 일반적이다. 전로슬래그 활용을 위한 연구 결과를 보면 토질 안정재로서의 적응성(Karmacharya et al, 1979) 및 팽창 특성을 활용한 팽창재(Song et al, 2014) 등이 있다. 그러나, 이러한 공정은 장시간이 요구되며, 생산된 슬래그를 야적할 수 있는 너비의 야적장, 에이징 과정 중 발생한 침출수에 의한 환경오염 등의 또 다른 문제가 대두되었다. 이에 급냉을 통한 Free CaO의 생성량 감소, 신소재 제조를 통한 유용 자원 추출 등의 처리 방법이 고안되었지만 실용화는 미비한 실정이다.

콘크리트용 천연골재는 건설 산업의 기본이 되는 재료로 건축물의 안전성 및 준공 시 경비 절감에 기여하는 매우 중요한 요소이다. 이러한 골재는 주로 하천이나 바다 등에서 채취되고 있으나, 환경 오염 및 산업 발달로 인한 채취원의 감소 등으로 인해 천연골재 부족 현상은 심각한 수준에 이르고 있다. 이에 따라 부순 모래 및 순환골재 등의 사용이 증가하고 있으나, 처리 과정에서 환경오염 문제나 품질 저하 등의 문제를 유발하여 경제적이고 우수한 품질의 대체 골재 개발이 불가피한 실정이다. 따라서, 건설 산업의 중장기적인 발전과 구조물의 안전성을 위해 품질과 성질이 우수한 골재의 개발이 필요하다.

페로니켈 생산 시 발생하는 페로니켈슬래그는 물리화학적 성질이 우수하여 콘크리트용 골재, 주물사, 연마재 등 천연자원 대체재로 건설 산업에서 활용할 수 있는 가능성을 보여준 대표적인 제철 부산물이다(Cho et al, 2020b). 이러한 페로니켈슬래그는 작업성 향상(Katsiotis et al, 2015), 유동성 개선(Choi et al, 2010) 및 공극 충전효과(Choi et al, 2017) 등이 입증되었을 뿐만 아니라, 시멘트와 포졸란 반응을 일으킬 수 있는 대체재로서도 전망되어(Qi et al, 2020) 혼화재료로의 연구도 활발한 실정이다(Cho et al, 2020a; Cho et al, 2020b; Cho et al, 2020c). 특히, Rahman et al.(2017)

은 페로니켈슬래그 미분말의 치환률에 따른 압축강도와 건전성에 대한 연구를 진행하였으며, 그 결과 재령 90일에서 페로니켈슬래그 치환률 20%와 50%에 대하여 압축강도가 각각 93%와 67%라고 보고하였다. 그러나, Huang et al.(2017)은 비알칼리성 환경에서 페로니켈 슬래그 미분말의 활성도가 부족하다고 하였고, 페로니켈 슬래그를 산성 슬래그로 간주하여 이를 사용하기 위해서는 고로슬래그미분말 등 다른 물질과 함께 재조합하거나 알칼리 활성화가 필요하다고 하였다(Gao et al, 2017).

이에 제철 부산물의 활용 가능성 및 자원화를 모색하기 위하여 본 연구에서는 시멘트 결합재로서의 활용 가능성이 대두된 페로니켈슬래그와 반응성 CaO를 다량 함유한 전로슬래그를 잔골재 치환 배합한 모르타르의 기초 물성에 대하여 연구하고, 반응성을 바탕으로 자원화 가능성에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 물리 화학적 조성

본 연구에서는 선행연구 Kim et al.(2019) 및 Cho et al.(2020a)에서 제시한 바와 같이 페로니켈슬래그의 부정적 강도 발현을 최소화하기 위해 치환율 설계를 하여 20%까지 치환하였으며, 전로슬래그의 골재 활용 가능성을 위해 잔골재의 최대 50%까지 치환하여 물성 특성을 평가하였다. 각 재료의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of binder(%)

Type	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	P2O5
OPC	67.0	17.4	3.97	1.60	4.16	3.41	0.14
FNS	6.28	48.20	3.59	23.00	15.80	0.50	0.20
BOF	44.95	11.60	6.50	2.19	28.12	0.18	1.87

(1) 시멘트(OPC): 국내 S사의 분말도 3,112cm²/g, 비중 3.14인 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

(2) 페로니켈슬래그: 국내 S사에서 제조한 분말도 3,400cm²/g, 비중 3.12의 페로니켈슬래그 미분말을 사용하였다.

(3) 전로슬래그(BOF): 국내 H사의 비중 3.27 전로슬래그를 사용하였으며, 표면 및 체가름 형상은 Fig. 2와 같다.

전로슬래그를 4.75mm 체에 체가름을 하여 잔골재 대비 최대 50%까지 치환하였으며 본 연구에서 쓰인 표준사(Standard) 대비 입도 분포는 Fig. 3과 같다.

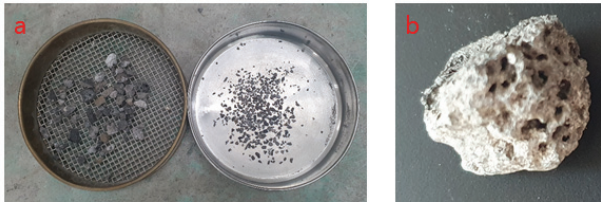


Fig. 2. (a) BOF sieve analysis before and after, (b) Surface of BOF

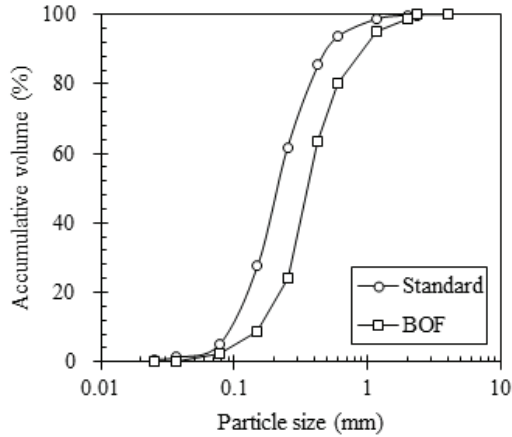


Fig. 3. Particle size distribution of sand and BOF

2.1.2 사용재료 XRD분석

본 연구에서 사용된 결합재 및 잔골재의 XRD 패턴을 Fig. 4-5에 나타내었으며 실험 방법은 2.2.5에 명시한 바와 같다. FNS의 경우 주 구성물은 forsterite($MgSiO_4$)과 fayalite(Fe_2SiO_4)이며, BOF의 경우 larnite($CaSiO_4$), mayenite($Ca_{12}Al_{14}O_{33}$), wuestite(FeO) 등이 주된 구성 성분임을 확인하였다.

2.2 실험 및 배합

FNS 및 BOF를 콘크리트 재료로서 활용성을 실험하기 위해 FNS 결합재 및 BOF잔골재를 혼합한 모르타르의 기초 물성에 대한 평가를 수행하고자 한다. 이를 위해 물성 변화를 확인하기 위한 유동성 평가(flow), 응결시간(settling time), 팽창길이변화율(length change), 압축강도(compressive strength)를 평가하였으며 최적 배합을 선정하였다. 선정된 모르타르의 산화물 조성 변화를 확인하기 위한 X-선 회절 분석(XRD, X-ray diffraction), 주사전자현미경 분석(SEM, Scanning electron microscope)를 시험하였으며, 배합표는 Table 2에 제시하였다. BOF를 표준사 대비 30% 치환한 모르타르 배합의 경우 재료 분리 현상(segregation)이 나타나 실험이 어려워 본 실험에서 배제하였다.

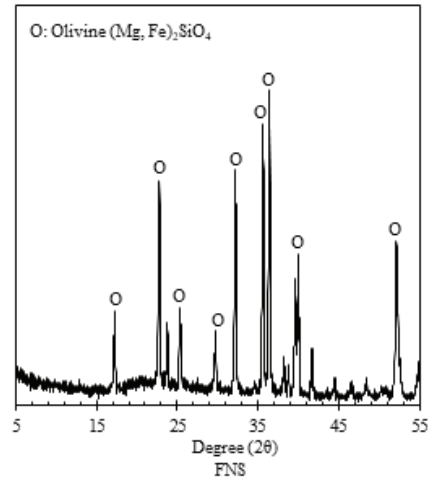


Fig. 4. XRD pattern of FNS powder

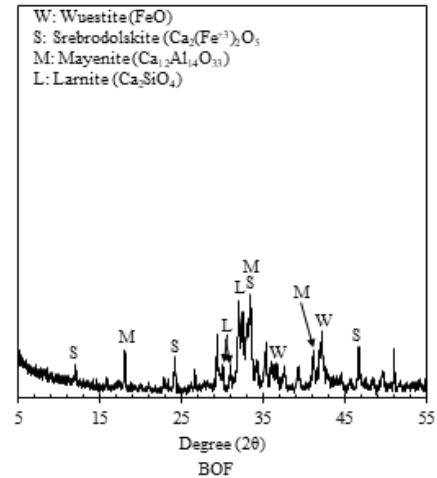


Fig. 5. XRD pattern of BOF aggregate

Table 2. Mix design of mortar(kg/m³)

Type	OPC	FNS	BOF	Sand	Water
B10F0	910	-	95	1349	410
B10F10	819	90	95	1349	410
B10F20	728	181	95	1349	410
B10F30	637	271	95	1349	410
B20F10	819	90	190	1278	410
B20F20	728	181	190	1278	410
B20F30	637	272	190	1278	410

2.2.1 플로(Flow)

모르타르 물성시험을 위해 플로 시험을 실시하였다. 실험 방법은 KS L 5111과 같으며, 규정하고 있는 흐름판을 이용하여 모르타르 비빔 직후 흐름성을 측정하였다. 결과 값은 3번 측정값의

평균으로 기재하였다.

2.2.2 응결시간 측정

배합별 모르타르의 응결시간을 측정하기 위해 KS F 2436 규정에 따라 실시하였다. 시험은 10분 간격으로 측정하여 초결과 종결을 확인하였으며 자동응결 시험기를 사용하였다.

2.2.3 길이변화율 시험

길이변화율 시험은 KS F 2586 규정에 따라 40mm×40mm×160mm 사각 물드로 제작하였다. 제작된 시편은 시료로부터 수분 증발을 막기 위해 타설 후 노출 표면을 폴리에스테르 필름으로 덮어 온도 20°C, 실내 습도 80%에서 양생하였고, 3, 7, 14, 28, 35일 양생 시점에 길이 변화를 측정하였다. 길이 변화 측정은 KS F 2424 시험방법에 따라 수행하였다.

2.2.4 압축강도

압축강도 시험은 50mm×50mm×50mm 큐빅 물드로 제작하였고, 탈형 후 온도 20±2°C의 항온수조에서 수증양생을 실시하였다. 압축강도 시험방법 KS L 5105 규정을 따랐으며 재령 1, 3, 7, 28 및 90일에 실시하였다.

2.2.5 X선 회절분석(X-ray diffraction, XRD)

본 실험을 위한 배합에서 사용된 결합 재료 및 모르타르 미분말을 사용하여 XRD 분석을 진행하였으며, Cu-Kα, 2θ = 5-65°, 2°/min의 조건으로 측정하였다.

2.2.6 SEM(Scanning electron microscopy)

재령 90일 절단된 모르타르 시편을 이용하여 SEM 이미지 분석을 실시하였다. 시험체는 해당 재령 일에 아세톤에 침지시켜 수화 반응을 정지시킨 후 고온건조소에서 24시간 동안 건조시킨 다음 측정하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 플로(Flow)

Fig. 6은 BOF 잔골재와 FNS를 일반건조사 및 시멘트 치환율에 따른 모르타르의 플로 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 BOF와 FNS의 혼입이 많아질수록 플로우가 증가하는 경향을 나타내었으며, BOF의 치환율이 20%가 되면서 골재와 시멘트를 치환하지 않은

BOF0와 플로 차이가 커지는 것으로 나타났다. 이는 물의 흡수율이 낮은 BOF와 표면이 매끄러운 성질을 가진 FNS를 첨가함으로써 자유수를 많이 내포하게 되어 플로 값이 증가한 것이라고 판단된다. BOF를 표준사 대비 20% 치환한 모르타르의 경우 유동성이 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며, FNS 혼입율이 높아질수록 재료 분리 현상(segregation)이 발생하여 측정이 어려웠다. 따라서, 추후 진행될 실험에서는 BOF를 표준사 대비 10% 치환한 모르타르에 대해서만 진행하였다.

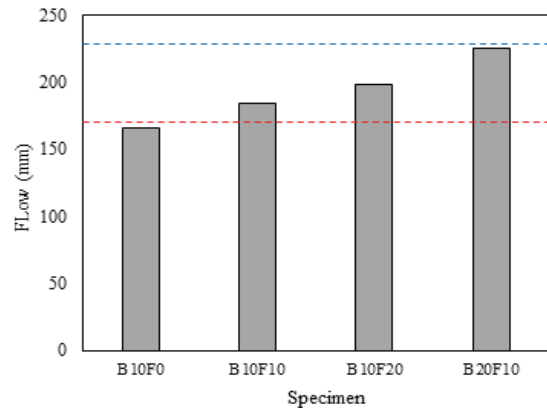


Fig. 6. Test results of mortar flow test

3.2 응결시간 측정

Table 3은 BOF 잔골재와 FNS를 일반건조사 및 시멘트에 혼입한 모르타르의 응결시간 변화를 나타낸 것이다. B10F10의 경우 control 시편인 B10F0와 비교하여 응결시간이 보다 높게 측정되었지만, 변동 값이 크지 않음을 확인할 수 있었다. 하지만 FNS의 혼입률이 증가할 경우 응결 시간이 늘어나는 것을 알 수 있었다. 이는 시멘트의 일정 부분을 화학 반응이 늦은 FNS 결합재로 치환하면서 발생하는 희석효과(dilution effect) 때문인 것으로 판단된다(Cho et al. 2020b).

Table 3. Setting time of FNS cement with BOF aggregate

Type	Setting times(min)	
	Initial	Final
B10F0	150	195
B10F10	160	200
B10F20	175	210
B10F30	183	225

3.3 길이변화율 시험

Fig. 7은 BOF 잔골재와 FNS를 표준사 및 시멘트에 혼입한 모르타르의 종결이 완료된 시점부터 길이변화가 멈추었을 때까지의 변화량을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 대부분의 배합은 종결이 완료된 후 20일 전후에서 길이변화가 발생하지 않았으며 특히 B10F20과 B10F30의 경우 각각 -0.118, -0.116으로 유사한 길이 변화율을 나타내었다. 또한, B10F0와 B10F10보다 길이변화량이 적어 수축량이 적음을 확인할 수 있었다. 이는 수화초기 장시간의 응결이 지연됨에 따라 수화 반응이 서서히 진행되며 수축에 영향을 미칠 수 있는 자유수를 많이 내포하게 되어 상대적으로 치밀한 내부조직이 만들어졌기 때문으로 판단된다.

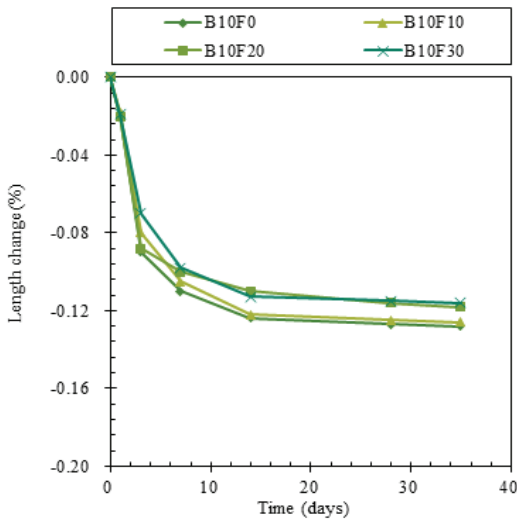


Fig. 7. Test result of length change

3.4 압축강도

BOF 잔골재 치환 및 FNS 혼입율이 모르타르 압축강도에 미치는 영향을 검토하기 위해 양생 일 변화에 따른 압축강도의 변화 상태를 조사하였는데 그 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 BOF와 FNS를 혼입한 모르타르의 압축강도는 표준사와 시멘트만을 혼입한 모르타르 강도 보다 감소되는 양상을 보여주고 있다. FNS 혼입율이 10%, 20% 30%인 모르타르 압축강도는 B10F0 모르타르 압축강도의 약 27.36%, 15.40%, 6.98% 증가하였다. 또한, 치환 모르타르의 경우 양생 일이 증가함에 따라 압축강도도 증가함을 보였으며, 재령 90일 B10F10, B10F20, B10F30의 강도 발현은 각각 40.99, 40.19 및 35.52MPa로 나타났다. 이러한 장기 강도 증가 경향은 FNS가 포졸란 반응을 하여 초기 수화를

지연하고 장기 강도 증가에 기여한다는 선행 연구 결과와 일치한다(Lemonis et al. 2015). 특히, B10F20 모르타르는 재령 일 증가에 따른 높은 강도 증가 경향을 보였는데, 치환으로 인해 시멘트 함량이 작아져 강도 발현은 더디지만, FNS 첨가로 인한 높은 실리카 성분 (SiO₂)과 BOF 잔골재 혼입으로 인한 반응성 CaO의 2차 반응이 일어났기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로, 시멘트의 단위 수량을 감소시키며, 유동성과 강도 발현 확보가 가능한 B10F20 배합이 최적 배합으로 바람직하다고 판단하였으며, 해당 배합과 B10F0의 반응성 규명을 위해 XRD 및 SEM 분석을 진행하였다.

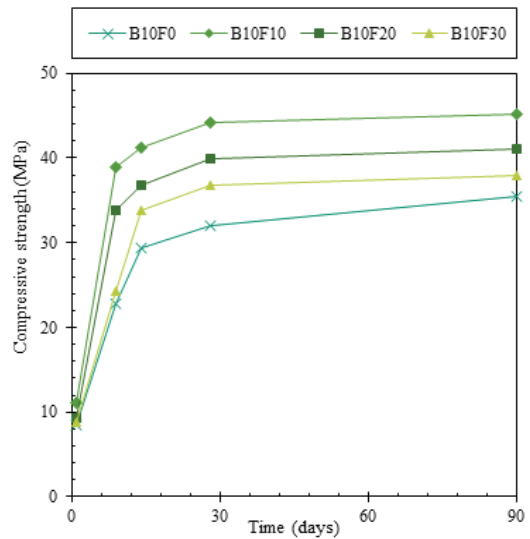


Fig. 8. Compressive strength of mortars

3.5 XRD 분석

Fig. 9는 본 재령 90일 모르타르의 수화생성물을 평가하기 위한 XRD 패턴 분석 결과를 나타낸 그림이다. 모르타르의 반응성에 대한 비교 분석을 위해 사용 원재료 및 BOF 잔골재만 10% 치환 배합한 B10F0 모르타르 XRD 결과를 같이 삽입하였다. Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 BOF 잔골재를 혼입한 B10F0 및 B10F20 모르타르에서는 BOF 원재료 XRD에서 관찰할 수 있었던 larnite, mayenite, wuestite는 거의 관찰되지 않았는데, 이는 수화가 진행되면서 수화 반응에 기여하여 피크가 감소한 것으로 보인다. 또한, 표준사와 시멘트만을 배합한 B0F0 모르타르와 비교 시 B10F0와 B10F20 XRD pattern에서 새로운 수화 생성물은 관찰되지 않았으나, portlandite의 intensity 피크는 B10F20시편에서 더 강하게 나타남을 확인하였다. 특히, 45~55° 2θ 부근에서 나타나는 portlandite

의 피크는 B10F20에서 제일 강하게 관찰되었는데, 이는 수화되지 않은 FNS의 클링커와 portlandite의 피크가 중첩되었기 때문이다.

Fig. 9(b)는 25~35° 2θ 사이에서 측정되는 portlandite의 피크를 확대해놓은 그림이며, 30° 2θ 부근에서 배합 별 portlandite의 피크 변화도 크게 나타남을 확인할 수 있었다. BOF 잔골재를 치환한 B10F0와 B10F20 시편은 길이변화율 시험을 통해 확인하였듯 팽창 변화는 관찰되지 않았으며, portlandite과 calcite 생성이 증가한 것으로 보인다. 이는 BOF 잔골재의 XRD pattern에서 관찰되는 클링커의 경우 시멘트 클링커와 비슷하여, 잔골재로 혼입 시 자유수와 반응하면서 Ca²⁺가 용출되고 과포화상태에 도달하면서 Ca(OH)₂ 및 CaCO₃를 결정화한 것으로 보인다.

FNS 결합재를 혼입한 B10F20 모르타르 XRD pattern 에서는

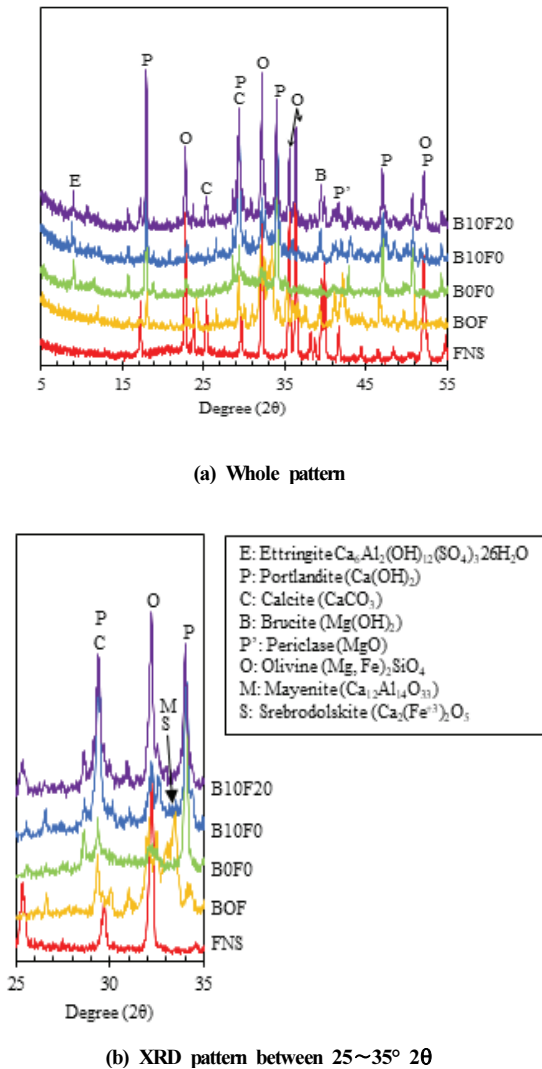


Fig. 9. XRD pattern of mortars

가장 강한 portlandite과 FNS 클링커 또한 확인할 수 있었다. 이는 반응성이 낮고 표면이 매끄러운 FNS를 혼입함으로써 BOF 잔골재 클링커가 반응할 수 있는 자유수를 많이 내포하게 되어 수화물 형성에 영향을 끼친 것으로 판단된다.

3.6 SEM image 분석

Fig. 10은 본 재령 90일 모르타르 시편으로부터 채취한 시편의 수화생성물을 SEM image상에 나타낸 결과이다. Fig. 10(a)에서 FNS는 수화결정체로 존재하지 않고 수화가 진행 중인 것을 알 수 있다. 이는 FNS의 장기 재령까지 수화 반응을 하는 잠재수경성 때문인 것으로 판단된다(Kim et al, 2019). 한편, Fig. 10(b)에 나타난 FNS를 첨가하지 않은 시편의 경우 BOF 골재가 겔이나 침상결정이 아닌 전체가 과상으로 존재하는 것을 알 수 있었는데, 이는 전로슬래그 골재가 수화 반응에 기여하기 때문이다. 또한, 기둥 모양의 인산화칼슘(calcium phosphate) 형성을 확인할 수 있었는데, 이

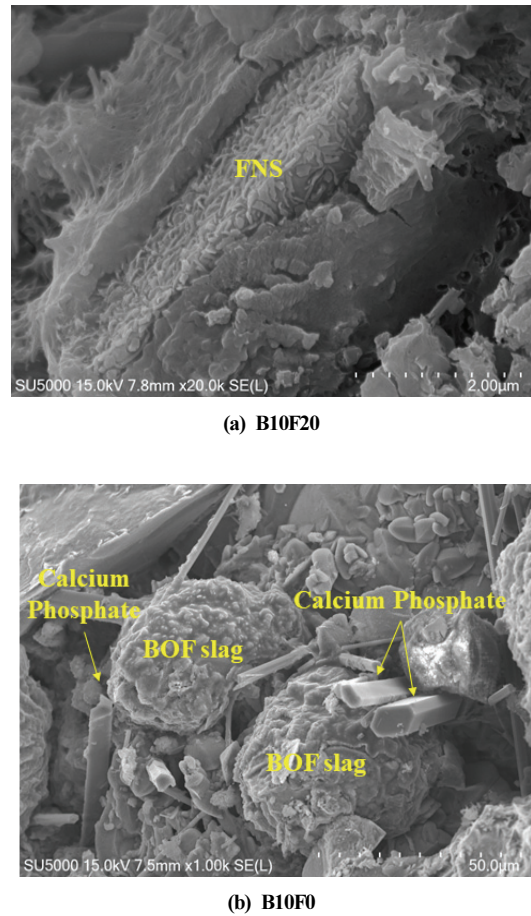


Fig. 10. SEM image of mortars

는 앞선 XRF 시험 결과에서 나타난 것처럼 BOF골재에 포함되어 있는 인성분과 CaO성분이 수화한 것으로 보인다. Fig. 10(a) 와 Fig. 10(b)에 나타난 바와 같이, 전로슬래그를 혼입할 경우 내부 공극은 밀실하지 않았으며, 내부 수화 생성물 또한 결정상 또는 과상으로 존재하였다. 뿐만 아니라, 활용의 제약이 된 팽창 반응물은 확인되지 않았다. 이러한 현상은 전로슬래그가 시멘트처럼 물과 혼입 시 직접적인 수화 반응에 기여하지 않는 것을 보여주며, 시멘트 배합에 다량의 BOF 골재 치환은 밀실한 시멘트 매트릭스 생성에 악영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 이는 B0F0, B10F20 및 B10F30 모르타르에 비해 B10F0 모르타르의 크게 저하된 압축 강도 결과와도 일치한다. 다만, FNS를 혼입한 Fig. 10(a)의 경우 과상 형태의 수화물이 Fig. 10(b)에 비해 적게 나타났으며, 이는 BOF골재보다 큰 비표면을 가진 FNS 혼입으로 인한 희석 효과로 물-결합재 비율이 상대적으로 높아짐에 따라 B10F0보다 밀실한 시멘트 구조를 형성한 것으로 보인다.

4. 결론

건설 산업의 고도화에 따라 대량 발생하는 철강 슬래그는 재활용이 거의 이루어지지 않는 실정이며, 대부분이 매립 또는 아적되어 환경적 문제를 야기하고 있다. 이는 시멘트와 비슷한 산화물 조성을 지닌 자원 중 하나인 전로슬래그에 대한 안전성 우려 및 경제적이고 효과적인 재활용 방안이 확립되어 있지 않기 때문이며, 이를 극복하기 위한 건설재료로서의 실험적 연구를 본 연구에서 진행하였다.

1. 물의 흡수율이 낮은 BOF와 표면이 매끄러운 성질을 가진 FNS를 시멘트에 치환하면 희석효과(dilution effect) 작용이 원활히 이루어져 플로 값과 응결시간이 증가한다. 다만, BOF를 표준사 대비 10% 초과하여 혼입할 경우 재료 분리 현상(segregation)이 발생하기 때문에 다량의 혼입 활용은 어렵다고 판단된다.
2. BOF 잔골재와 FNS를 표준사 및 시멘트에 혼입한 모르타르는 종결이 완료된 후 길이변화가 발생하지 않았다. 이는 수화초기 장시간의 응결이 지연됨에 따라 수화 반응이 서서히 진행되며 수축에 영향을 미칠 수 있는 자유수를 많이 내포하게 되어 상대적으로 수화열이 낮아졌기 때문으로 판단된다.
3. BOF와 FNS를 혼입한 모르타르의 압축강도는 표준사와 시멘트만을 혼입한 모르타르 강도 보다 감소되었지만 FNS를 혼입한 배합의 경우 양생 일이 증가함에 따라 압축강도도

증가하였다. 이러한 장기 강도 증가 경향은 FNS가 포졸란 반응을 하여 초기 수화를 지연하고 장기 강도 증가에 기여하였기 때문이다.

4. BOF 잔골재를 혼입한 B10F0 및 B10F20 모르타르에서는 수화가 진행되어 BOF 원재료 XRD에서 관찰할 수 있었던 larnite, mayenite, wuestite 클링커는 거의 관찰되지 않았지만, FNS의 낮은 수화 반응성으로 FNS의 클링커는 관찰되었다.
5. 주사전자현미경 분석 결과 수화결정체로 존재하지 않고 수화가 진행 중인 FNS를 확인할 수 있었으며 이를 통해 FNS의 잠재수경성을 확인하였다. FNS를 첨가하지 않은 시편의 경우 BOF 골재가 겔이나 침상결정이 아닌 전체가 과상으로 존재하였으며, 전로슬래그의 반응성 또한 확인하였다. 또한, 기둥 모양의 인산화칼슘(calcium phosphate) 형성을 통해 BOF골재에 포함되어 있는 인(phosphate) 성분과 시멘트 매트릭스 내 성분이 수화 반응에 기여하는 것도 확인하였다.
6. 전로슬래그를 혼입할 경우 내부 공극은 밀실함이 다소 저하되었으며, 추후 BOF를 잔골재로 활용할 경우 적정 배합비 선정이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 페로니켈슬래그와 같이 시멘트 복합 재료로서 활용성 검토를 위해 분말화를 시켜 혼화재료로서도 사용성 평가도 필요하다고 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20193210100050, 표층처분시설의 건설 구조체 및 장기 성능 감시 기술개발).

References

- Cho, W.J., Ann, K.Y. (2020a). A study on the Hydration characteristics and fundamental properties of ternary blended cement using ferronickel slag and fly ash, *Journal of the Korea Concrete Insitutue*, **32(1)**, 27–35 [in Korean].
- Cho, W.J., Kim, H.S., Ann, K.Y. (2020b). A study on the hydration characteristics and fundamental properties of ternary blended

- cement using ferronickel slag, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **8(1)**, 39–48 [in Korean].
- Cho, W.J., Park, E.S., Jung, H.S., Ann, K.Y. (2020c). Durability characteristics of ternary cement matrix using ferronickel slag according to the alkali-activators, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **8(2)**, 24–34 [in Korean].
- Choi, H.K., Lee, J.M., Hong, J.H., Seo, K.H., Park, M.Y. (2017). “Fundamental properties of concrete according to the fineness of ferronickel slag,” Proceedings of Korea Concrete Institute, **29(1)**, 491–492 [in Korean].
- Choi, Y.W., Park, M.S., Bae, S.H., Lee, H.H., Cho, B.S. (2010). “Properties of water granulated ferro-nickel slag as fine aggregate for concrete,” Proceedings of Korea Society of Civil Engineering, 1462–1465 [in Korean].
- Dippenaar, R. (2005). Industrial uses of slag(the use and re-use of iron and steelmaking slags), Ironmaking & Steelmaking, **32(1)**, 35–46.
- Gao, X.F., Zhang, H.Y., Yang, X.Y., Li, K.Z. (2017). The application of ferronickel compound admixture in concrete, China J. Build. Mater. Tech., **26(01)**, 23–26.
- Huang, Y., Wang, Q., Shi, M. (2017). Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder, Construction and Building Materials, **156**, 773–789.
- Karmacharya, M.R., Uchida, I., Idemitsu, T. Takayama, S.I. (1979). On the studies of utilisation of converter furnace slag in road bases, In Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, **1979(282)**, 101–113.
- Katsiotis, N.S., Tsakiridis, P.E., Velissariou, D., Katsiotis, M.S., Alhassan, S.M., Beazi, M. (2015). Utilization of ferronickel slag as additive in portland cement: a hydration leaching study, Waste and Biomass Valorization, **6(2)**, 177–189.
- Kim, H., Lee, C.H., Ann, K.Y. (2019). Feasibility of ferronickel slag powder for cementitious binder in concrete mix, Construction and Building Materials, **207**, 693–705.
- Kim, H.S., Ann, K.Y. (2018). A study on the hydration behavior and porosimetry of ferronickel slag powder in cement paste, Journal of the Korea Concrete Institute, **31(2)**, 181–189 [In Korean].
- KS F 2527. (2020). Concrete Aggregate, Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KS F 2563. (2020). Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete, Korean Standard Association, Seoul, Korea.
- KS L 5111. (2017). Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, Korean Standard Association, Seoul, Korea.
- KS L 5210. (2017). Portland Blast-Furnace Slag Cement, Korean Standard Association, Seoul, Korea.
- Lemonis, N., Tsakiridis, P.E., Katsiotis, N.S., Antiohos, S., Papageorgiou, D., Katsiotis, M.S., Beazi-Katsioti, M. (2015). Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan, Construction and Building Materials, **81**, 130–139.
- Lim, H.S., Min, T.B., Kim, H.Y. (2019). Characteristics of electric arc furnace oxidized slag and domestic and international research terend, Magazine of Recycled Construction Resources, **14(2)**, 40–47 [in Korean].
- Navarro, C., Díaz, M., Villa-García, M.A. (2010). Physico-chemical characterization of steel slag, study of its behavior under simulated environmental conditions, Environmental Science & Technology, **44(14)**, 5383–5388.
- Qi, A., Liu, X., Wang, Z., Chen, Z. (2020). Mechanical properties of the concrete containing ferronickel slag and blast furnace slag powder, Construction and Building Materials, **231**, 117120.
- Rahman, M.A., Sarker, P.K., Shaikh, F.U.A., Saha, A.K. (2017). Soundness and compressive strength of portland cement blended with ground granulated ferronickel slag, Construction and Building Materials, **140**, 194–202.
- Song, Y.L., Park, J.H., Jung, S.W., Lee, M.H., Han, M.C. Han, C.G. (2014). “Expanding properties of the mortar with high-volume steel slag aggregate,” Proceedings of Architectural Institute of Korea, **34(2)**, 583–584 [In Korean].
- Tsakiridis, P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S., Koroneos, C. (2008). Utilization of steel slag for portland cement clinker production, Journal of Hazardous Materials, **152(2)**, 805–811.

전로슬래그 및 페로니켈슬래그를 혼입한 모르타르의 기초물성 연구

본 연구에서는 건설 산업의 고도화에 따라 대량 발생하는 철강 슬래그 및 페로니켈슬래그의 활용을 위해 모르타르 배합에 혼입하여 실험적 연구를 진행하였다. 물의 흡수율이 낮은 BOF와 표면이 매끄러운 성질을 가진 FNS를 시멘트에 치환하면, 희석효과(dilution effect) 작용으로 플로 값과 응결시간이 증가하였다. 다만, BOF를 표준사 대비 10% 초과하여 혼입할 경우 재료 분리 현상(segregation)이 발생하였고, 이에 다량의 혼입 배합은 실험에서 제외하였다. BOF 잔골재와 FNS 혼입 모르타르는 응결 지연으로 인한 수화열 감소로 종결이 완료된 후 길이변화가 발생하지 않았다.

BOF 잔골재를 혼입한 모르타르의 압축강도는 표준사와 시멘트만을 혼입한 모르타르 강도 보다 감소되었지만 FNS와 함께 혼입한 배합의 경우 양생 일이 증가함에 따라 압축강도도 증가하였다. BOF 잔골재를 혼입한 B10F0 및 B10F20 모르타르에서는 수화가 진행되어 BOF 원재료 XRD에서 관찰할 수 있었던 larnite, mayenite, wuestite 클링커는 거의 관찰되지 않았지만, FNS의 낮은 수화 반응성으로 FNS의 클링커는 관찰되었다. 주사전자현미경 분석 결과 수화결정체로 존재하지 않고 수화가 진행 중인 FNS를 확인할 수 있었으며 이를 통해 FNS의 잠재수경성을 확인하였다. FNS를 첨가하지 않은 시편의 경우 BOF 골재가 겹이나 침상결정이 아닌 전체가 과상으로 존재하였으며, 인산화칼슘(calcium phosphate) 형성을 확인하였다. 다만, 전로슬래그를 혼입할 경우 내부 공극은 밀실함이 다소 저하되었으며, 추후 BOF를 잔골재 또는 건설 재료로 활용할 경우 적정 배합비 선정이 필요할 것으로 판단된다.