

알칼리 활성화제 종류별 페로니켈슬래그를 사용한 3성분계 시멘트 경화체의 내구특성

Durability Characteristics of Ternary Cement Matrix Using Ferronickel Slag According to the Alkali-Activators

조원정¹ · 박언상² · 정호섭³ · 안기용^{4*}

Won-Jung Cho¹ · Eon-Sang Park² · Ho-Seop Jung³ · Ki-Yong Ann^{4*}

(Received March 4, 2020 / Revised May 20, 2020 / Accepted May 21, 2020)

This paper evaluates the mechanical properties and durability of cement matrix blended with mineral admixtures and ferronickel slag(FNS) powder which is an industrial by-product during ferronickel smelting process. The hydration heat, pore structure, compressive strength, length change, rapid chloride penetration test(RCPT), and freezing and thawing resistance of ternary blended cement matrix were investigated and compared with ordinary portland cement matrix. The result showed that the compressive strength of ternary blended cement matrix using ferronickel slag powder and mineral mixture was low in strength compared to the reference concrete, but recovered to a certain extent by using alkali activator. Length change of cement mortar using FNS powder have shown less shrinkage occurs than the reference specimen. In addition, irrespective of using the alkali-activators, all ternary mix are indicative of the 'very low' range for chloride ion penetrability according to the ASTM C 1202, and the freeze-thaw resistance also showed excellent results.

키워드 : 페로니켈슬래그, 광물질혼화재, 길이변화, 알칼리 활성화제, 내구성

Keywords : Ferronickel Slag(FNS), Mineral admixture, Length change, Alkali-activator, Durability

1. 서론

토목·건축 구조물에서 빼놓을 수 없는 필수적으로 사용되는 시멘트는 전 세계적으로 널리 사용되고 있으나 제조과정에서 많은 에너지를 소비하고 지구온난화를 초래하는 다량의 온실가스를 대기 중으로 배출하는 것으로도 잘 알려져 있다(Choi et al. 2017; Kim and Hwang 2013; Mehta and Monteiro 2006). 건설산업에서 대기배출량 감소와 에너지 비용 절감은 시멘트 사용량을 줄이거나 이를 대체하기 위한 친환경적인 신재료 개발을 통하여 이루어져오고 있다(Katsiotis et al. 2015; Bohac et al. 2014). 뿐만 아니라 철강 산업의 발전으로 산업부산물이 많이 발생되고 있으며, 이러

한 산업부산물은 일부 재활용되고 있지만 대부분 매립되거나 버려지고 있는 실정이다(Saha et al. 2018; Qi et al. 2020).

페로니켈슬래그는 스테인리스의 주 원료로 가장 많이 사용되고 있는 페로니켈을 생산하기 위하여 니켈광석이나 유연탄 등이 고온에서 용융되어 페로니켈과 분리된 후 얻어진 유용한 부산물이다(Chen et al. 2020; Rahman et al. 2017; Saha and Sarker 2018). 주요 구성물은 SiO₂ 및 MgO가 풍부한 유리상으로서 니켈 1톤 생산시 6~16톤의 페로니켈슬래그가 생산되는 것으로 알려져 있으며(Peng et al. 2018; Nguyen et al. 2019), 이는 물리화학적 성질이 우수하여 콘크리트용 골재, 주물사, 연마재 등 천연자원 대체재로 활용되어 자원과 환경보전에 기여하고 있다. 이러한 페로니켈

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

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

²숭실사이버대학교 건설시스템공학과 조교수 (Dept. of Construction System Eng., Soongsil Cyber University, Seoul, 03132, Korea)

³한양대학교 건설환경공학과 연구교수 (Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Kyonggi, 15588, Korea)

⁴한양대학교 건설환경공학과 교수 (Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Kyonggi, 15588, Korea)

슬래그는 2009년 KS F 2790 콘크리트용 페로니켈 슬래그잔골재 (KS 2016) 규격이 제정되고, KS F 2527 콘크리트용 골재(KS 2018)에 반영되어 잔골재로서 성능을 인정받으며 천연자원 대체자원으로서 건설산업에서 활용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

Katsiotis et al.(2015)는 페로니켈 슬래그 잔골재를 콘크리트에 사용할 경우 반응성이 낮은 슬래그를 치환하면서 초기 수화단계에서 형성된 수화물이 감소하여 모르타르의 작업성이 높아진다고 하였다. 그리고 Choi et al.(2010)는 표면이 매끄럽고 흡수율이 낮아 단위수량을 저감하여 유동성을 향상에 기여한다고 하였다. 또한 페로니켈 슬래그미분말의 분말도가 높아질수록 미분말의 수화 반응보다 공극충전효과에 의하여 콘크리트의 압축강도는 높게 나타난다고 발표하였다(Choi et al. 2017).

최근 Qi et al.(2020)는 시멘트와 포졸란반응을 일으킬 수 있는 페로니켈 슬래그는 시멘트로 사용될 가능성이 있을 뿐만 아니라 미세한 페로니켈 슬래그 미분말을 시멘트로 부분적으로 대체하여 콘크리트를 생산할 때 산업부산물인 페로니켈 슬래그를 다량 소비할 수 있고 시멘트 및 콘크리트 생산에 상당한 원료를 공급원으로 제공할 수 있을 뿐만 아니라 온실가스 배출도 많이 줄여줄 것이라고 전망하였다. 한편 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). 페로니켈슬래그 미분말의 활성도 향상을 위하여 알칼리 활성화제를 사용하고 있으며, 콘크리트용 혼화재료로 사용할 경우 콘크리트의 수화발열속도 저감, 온도상승 억제 등에 의한 내구성향상과 염화물 이온 침투억제에 의한 철근부식억제 등 다양한 효과를 기대할 수 있다. Kim et al.(2014)은 다양한 알칼리 활성화제를 사용하여 고로슬래그 미분말 모르타르의 압축강도에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 Potassium hydroxide를 사용한 경우 압축강도가 가장 크게 나타난 반면, Sodium hydroxide를 사용한 경우 활성화제의 치환율이 증가할수록 압축강도가 낮아지는 것으로 발표하였다.

본 연구에서는 이미 활용성이 보편화된 페로니켈 슬래그를 골재 대체용이 아닌 시멘트 대체용으로 활용하기 위한 측면에서 페로니켈슬래그 미분말과 광물질혼화제를 혼합한 3성분계를 사용한 시멘트 경화체의 역학적 특성 및 내구특성에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

본 연구에서는 페로니켈슬래그 미분말을 20%와 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 실리카흄을 각각 30%, 20% 및 5% 혼합한 3성분계 시멘트 경화체의 역학적 특성과 내구성을 평가하고자 하였으며, 각 결합재의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

- (1) 시멘트 : 국내 S사의 분말도 3,112cm²/g, 비중 3.14인 보통포틀랜드시멘트(이하, OPC)를 사용하였다.
- (2) 페로니켈슬래그 : 국내 P사에서 제조한 분말도 3,400cm²/g, NiO함량 0.092%, 비중 3.12의 페로니켈슬래그 미분말(이하, FNS)을 사용하였다.
- (3) 광물질혼화제 : 고로슬래그(GGBS), 플라이애시(PFA) 및 실리카흄(SF) 3종류를 사용하였으며 각각의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다.
- (4) 알칼리 활성화제 : 알칼리 활성화제는 분말 형태인 Sodium (NaOH)와 Potassium (KOH) 2종류를 페로니켈슬래그를 분쇄할 때 분체량의 0.5% 투입하여 사용하였다.

Table 1. Chemical composition of binder(%)

Types	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O ₃	TiO ₂
OPC	67.0	17.4	3.97	1.60	4.16	3.41	1.23	0.33	0.27
FNS	6.28	48.2	3.59	23.0	15.8	0.50	0.09	-	0.11
GGBS	47.2	29.7	13.1	4.55	0.64	2.30	0.53	0.22	1.12
PFA	3.93	65.5	18.5	0.64	5.81	0.80	1.45	1.29	1.12
SF	1.01	91.3	0.34	0.75	1.67	1.21	2.62	0.35	-

2.2 실험방법

- (1) 압축강도 : 압축강도는 50 X 50 X 50mm 규격의 모르타르 시험체를 KS 규준에 따라 믹싱하여 제조한 후 20±2℃의 항온수조에서 수중양생을 실시하였으며, 재령 7, 28, 91, 180 일에 각각 측정하였다.
- (2) 길이변화율 : 길이변화율 시험체는 KS F 2586 규준에 따라 40 X 40 X 160mm 규격으로 제작하였으며, 제작 후 압축강도용 시험체와 동일한 방법으로 수중양생을 실시하였으며, KS F 2424 시험방법에 준하여 재령 3, 7, 14, 28, 35일에 측정하였다.
- (3) 미소수화열 : 각 배합별 미소수화열 분석은 KS L 5121규정에 준하여 25℃에서 72시간 동안 측정하였으며, 분석장비는

3-point Multi-purpose conduction calorimeter를 사용하였다.

- (4) 염소이온 침투저항성 : 염해저항성은 ASTM C 1202 시험방법에 준하여 $\phi 100 \times 50\text{mm}$ 시험체를 대상으로 재령 28일에 수행하였다. 양극용액은 0.3N NaOH의 용액을 음극용액은 3% NaCl의 용액을 사용하여 전원공급장치를 통해 $60 \pm 0.1\text{V}$ 로 전압을 고정시킨 후 초기 전류값을 측정하고 30분 간격으로 6시간 동안 전류값을 측정하여 아래 식을 이용하여 총 통과전하량을 결정하였다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + I_{360})$$

여기서, Q : 통과전하량(coulomb)

I_0 : 전압 인가 직후 전류(amperes)

I_t : 전압을 가한 후 t분 경과 후의 전류(amperes)

- (5) 미세공극구조 : 3종류의 3성분계 시멘트 페이스트의 공극구조 분석은 ASTM D 4284에 준하여 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)으로 실시하였다.
- (6) 동결융해시험 : 동결융해 저항성은 KS F 2456(B방법)에 따라 기중동결, 수중융해 방법으로 시편을 제작하고 동결융해 촉진시험을 수행하였다. 각 배합별로 2개의 시험체에 대하여 상대동탄성계수를 최종 300사이클까지 매 30사이클마다 측정하고 내구성지수를 산출하였다.

2.3 배합설계

결합재는 페로니켈슬래그 미분말과 광물질혼화재를 혼합한 3성분계를 사용하여 시멘트 페이스트, 모르타르 및 콘크리트를 제조하였다. 수화열과 공극구조를 알아보기 위하여 페이스트 배합으로 실험하였고, 압축강도, 길이변화율 시험은 모르타르 배합으로 실험하였다.

Table 2. Mixture proportions of paste and mortar

Types	W/B	Binder					W	S	
		OPC	FNS	GGBS	PFA	SF			
Paste	0.5	PFG	0.5	0.2	0.3	-	-	0.5	-
		PFP	0.6	0.2	-	0.2	-		
		PFS	0.75	0.2	-	-	0.05		
Mortar	0.5	Control	1.0	-	-	-	-	0.5	3.0
		MFG	0.5	0.2	0.3	-	-		
		MFP	0.6	0.2	-	0.2	-		
		MFS	0.75	0.2	-	-	0.05		

Table 3. Mixture proportions of concrete

Types	W/B	Unit weight(kg/m ³)							
		W	Binder					S	G
			OPC	FNS	GGBS	PFA	SF		
Control	0.45	175	389	0	-	-	-	687	967
CFG		175	194	78	117	-	-	683	961
CFP		175	233	78	-	78	-	674	949
CFS		175	292	78	-	-	19	684	963

페이스트 및 모르타르의 물-결합재비는 50%이며 배합표는 Table 2와 같다. 그리고 물-결합재비는 45%, 목표 슬럼프 및 공기량은 150mm, 6±2%인 콘크리트를 제조하여 동결융해저항성 시험과 염소이온침투저항성 시험을 수행하였으며, 콘크리트 배합표는 Table 3과 같다. 모든 배합은 각각 동일한 배합으로 알칼리활성화제의 투입 유무에 따라 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도

페로니켈슬래그 미분말과 광물질혼화재를 사용하였을 때의 압축강도 특성을 살펴보기 위하여 페로니켈슬래그 미분말과 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 실리카흄을 각각 혼합한 3성분계 시멘트 모르타르의 재령별 압축강도를 측정하였다. Katsiotis et al.(2015)의 연구에 의하면 FNS를 사용한 시멘트경화체의 압축강도는 FNS의 혼입율이 증가할수록 저하되는데 시멘트 수화작용에 FNS의 기여도가 낮기 때문이라고 보고하였다. 한편 Saha and Sarker(2017)의 연구에서도 플라이애시를 30% 치환하여 사용한 압축강도는 감소하는 결과를 나타내었다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 기준 모르타르보다 모든 배합에서 압축강도가 낮게 발현된 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 FNS와 광물질 혼화재를 25~50% 치환하여 사용함으로써 단위시멘트량이 감소하여 초기에 강도발현이 다소 지연된 것으로 사료된다. 특히 플라이애시를 대체하여 사용한 3성분계 모르타르의 압축강도는 플라이애시는 페로니켈 슬래그와 함께 칼슘함유량이 매우 낮기 때문에 가장 낮게 발현된 것으로 판단된다.

Huang et al.(2017), Liu et al.(2016) 등은 비알칼리성 조건에서 FNS 분말의 활성도가 부족하여 FNS분말을 시멘트로 치환하는 비율이 증가함에 따라 콘크리트의 강도는 감소한다고 하였다. 따라서 초기재령에서의 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 시멘트모르타르의 역학적 성능을 증진시키기 위한 방안으로 분말형 알칼리

활성화제를 투입하여 강도특성을 고찰하였다. Fig. 2는 3종류의 광물질혼화제와 FNS를 사용한 3성분계 모르타르의 재령별 압축 강도를 측정하여 나타낸 것이다. Fig. 1과 비교할 때, 알칼리 활성화제를 투입하지 않은 경우에 비하여 알칼리 활성화제를 사용하였을 때 알칼리활성화제의 종류에 관계없이 모든 배합에서 압축강도가 증진한 것을 알 수 있다. 특히 플라이애시를 사용한 3성분계 배합의 경우 Sodium 및 Potassium계 알칼리 활성화제를 사용했을 때 초기재령에서 사용하지 않은 경우보다 다른 혼화재료에 비하여 높은 강도 증진효과를 나타내었으나 이후 재령에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

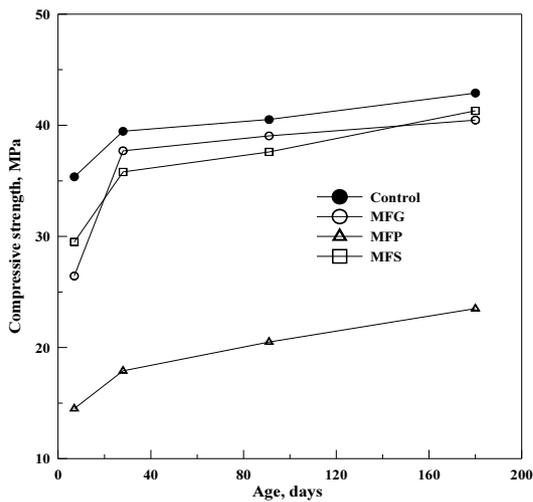


Fig. 1. Compressive strength of cement mortar

3.2 모르타르 길이변화

알칼리 활성화제를 사용하지 않은 3성분계 시멘트 모르타르의 재령 35일까지의 길이변화 시험결과를 Fig. 3에 나타내었다. 재령 35일에 광물질혼화제를 사용하여 제조한 모르타르의 경우가 보통 포틀랜드 시멘트만을 사용한 기준모르타르에 비하여 수축이 적게 발생한 것을 알 수 있다. 특히 고로슬래그미분말을 사용한 경우가 가장 낮았으며, 플라이애시, 실리카흄 순으로 각각 0.140%, 0.145%, 0.150%를 나타내었다. 페로니켈슬래그를 사용한 콘크리트에서 포졸란 반응에 의한 portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 소비는 팽창을 감소의 주요 원인이라고 한다(Saha and Sarker 2019).

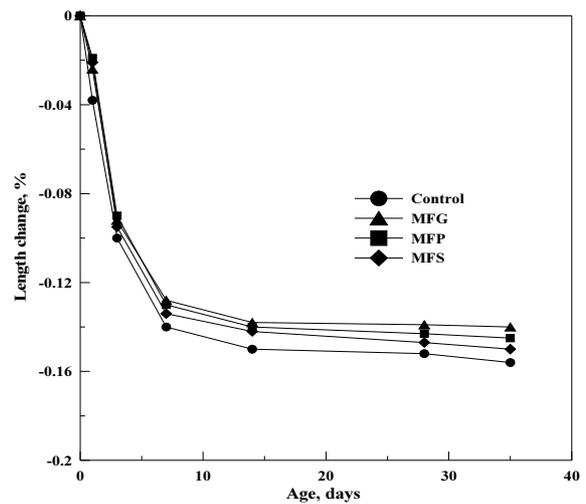


Fig. 3. Length change of mortar without alkali activator

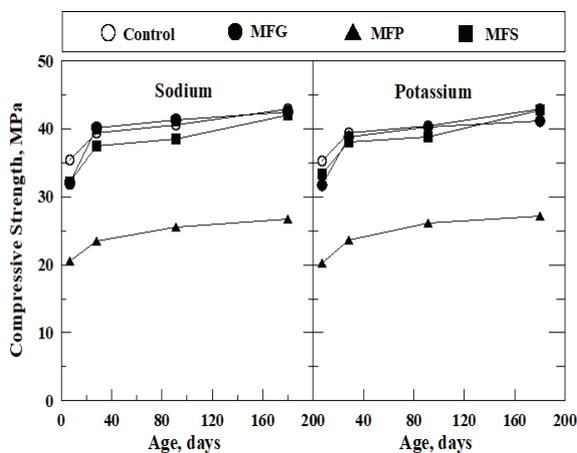


Fig. 2. Compressive strength of ternary cement mortar

3종류의 페로니켈슬래그, 즉 알칼리활성화제를 사용하지 않은 것과 2종류의 알칼리활성화제를 사용한 3성분계 시멘트모르타르의 길이변화를 기준 모르타르와 비교하여 나타낸 것이 Fig. 4이다. 이 그림에서 알칼리활성화제의 종류 및 사용유무에 관계없이 페로니켈슬래그를 사용한 모르타르는 모든 재령에서 기준 모르타르의 길이변화를 0.156% 보다 적게 발생하였다. Sodium hydroxide 및 Potassium hydroxide계 활성화제를 사용한 경우 재령 35일에서 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카흄 순으로 적은 길이변화를 나타내었다. 그러나 실리카흄을 사용한 3성분계 모르타르의 경우 알칼리활성화제의 사용유무에 관계없이 0.140%~0.145%로서 OPC에 비하여 낮은 값을 보였으나 그 차이는 크지 않았다.

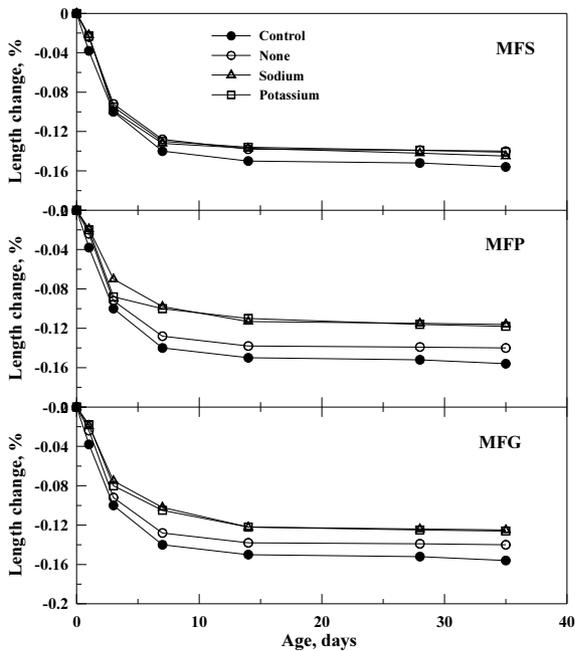


Fig. 4. Length change of mortar with alkali activator

3.3 수화열

Fig. 5는 페로니켈슬래그 미분말과 광물질혼화재를 혼합한 3성분계 시멘트 페이스트에 대하여 72시간 동안 발열량과 누적 발열량을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 누적 수화발열량은 기준시편의 경우 258.4J/g으로 가장 높게 나타났으며, 고로슬래그미분말, 플라이애시, 실리카흄 등 광물질 혼화재와 FNS를 혼합한 3성분계의 경우 각각 173.2J/g, 180.6J/g, 158.8J/g로서 OPC보다 훨씬 낮게 나타났다.

OPC를 사용한 페이스트의 경우 누적수화열이 50시간 이내에 지속적으로 증가한 반면 광물질 혼화제를 치환한 페이스트의 경우 누적 수화열 20시간 이내에 현저하게 증가하고 그 이후는 서서히 증가하는 것을 보아 초기에 신속한 화학반응이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 앞에서 언급한바와 같이 페로니켈슬래그와 플라이애시의 칼슘함유량이 각각 6.28% 및 3.93%로 낮기 때문에 OPC에 페로니켈슬래그 및 광물질 혼화재를 치환하면 누적수화열은 감소하는 것으로 판단된다.

3종류의 광물질혼화재를 혼합한 결합재의 수화과정은 일반 포틀랜드시멘트와 유사하지만 두 번째 발열피크는 CaO와 Al₂O₃ 함량이 적은 플라이애시를 혼합한 3성분계가 가장 낮은 피크를 나타냈으며, 수화 30시간 이후의 발열율은 비슷하게 나타났다.

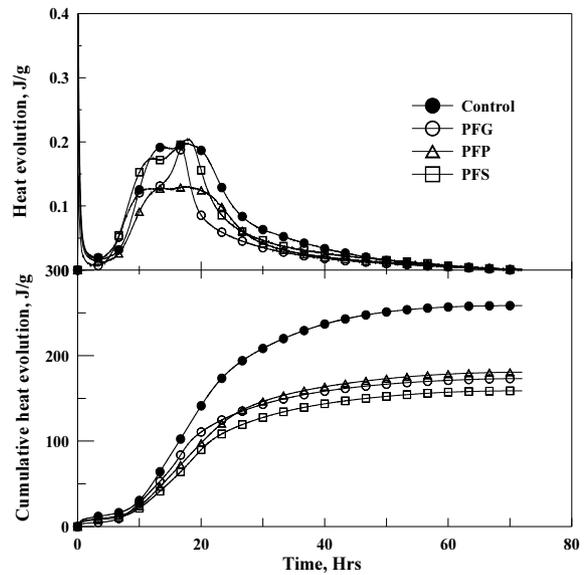


Fig. 5. Heat evolution of cement paste

3.4 염소이온침투저항성

염소이온 침투성은 콘크리트의 내구성을 결정짓는 중요한 지표라 할 수 있다. 밀도가 높은 미세구조와 불연속 공극구조는 콘크리트 내 염소이온 침투저항성을 높여주는 경향이 있다. 고로슬래그미분말, 플라이애시 및 실리카흄과 같은 광물질혼화재는 포졸란반응을 통하여 수산화칼슘을 소비하고 공극을 메워 불연속 공극구조를 형성함으로써 콘크리트를 통과하는 총 염화물량의 저감시켰다.

페로니켈슬래그 미분말과 3종류의 광물질 혼화재를 혼합하여 제조한 3성분계 시멘트 경화체의 재령 28일에서의 총통과전하량을 측정하여 Fig. 6에 나타내었으며, 염소이온 침투저항 특성을 ASTM C 1202에서 등급화하여 제시한 값과 비교평가하였다. 이 그림에서와 같이 FNS와 광물질혼화재를 사용한 시멘트 경화체의 염소이온 투과성시험결과 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 크게 감소된 것을 알 수 있다. OPC를 사용한 콘크리트의 경우 총통과전하량이 2,942 coulomb으로 나타난 반면, 고로슬래그미분말을 사용한 경우에 알칼리 활성화제 사용유무에 관계없이 모두 741~956 coulomb으로 ASTM C 1202에서 제시한 Very Low 영역의 우수한 결과를 나타내었다. Kim et al.(2019)과 Huang et al.(2017) 등은 콘크리트에 FNS를 첨가하여 사용하면 콘크리트 계면구조 개선과 콘크리트내 공극구조가 개선되어 염화물 침투저항성이 더 좋아진다고 보고하였는데 이들의 결과와도 유사하게 나타났다.

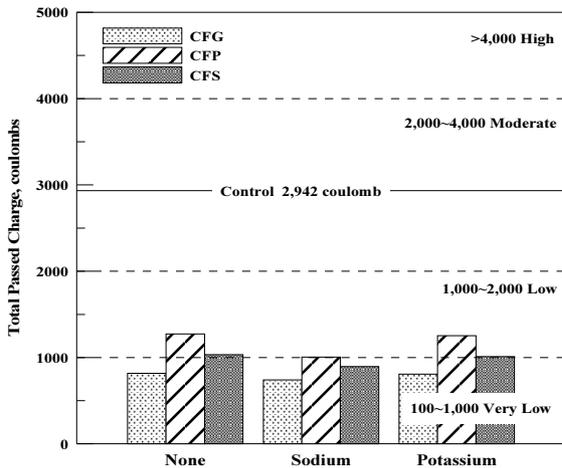


Fig. 6. Total passed charge by alkali-activators type

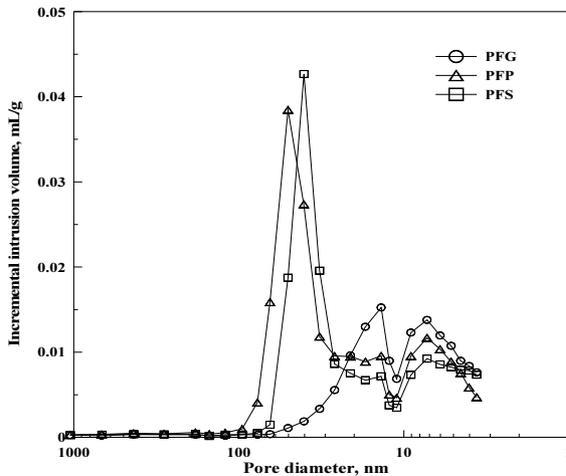


Fig. 7. Incremental intrusion volume of cement paste

한편, Sodium hydroxide계 알칼리 활성화제를 사용하고, FNS와 고로슬래그 미분말을 사용한 시멘트 경화체의 경우 최대 74.8%의 낮은 투과성 수준으로 떨어졌다. 그리고 플라이애시와 실리카흄을 사용한 시멘트 경화체의 경우 통과된 전하량은 각각 65.8%, 69.6% 수준으로 낮아졌다. Mindess et al.(1981)에 의하면 시멘트 경화체의 투과성과 확산성은 공극구조와 높은 연관성을 가지는 것으로 보고하였다. 페로니켈슬래그와 광물질혼화제의 종류에 따른 공극 구조를 나타낸 것이 Fig. 7이다. 이 그림에서 나타낸 바와 같이 광물질혼화제에 따른 입계공극크기는 명백한 차이를 보여주고 있다. Potassium hydroxide계 알칼리 활성화제를 사용한 경우는 알칼리 활성화제를 사용하지 않은 경우와 유사한 경향을 보여주었으며, 고로슬래그미분말, 실리카흄, 플라이애시 순으로 낮은 통과전하량을 나타내었다.

3.5 내동해성

Saha and Sarker(2019), Kim et al.(2019) 등은 내구성 측면에서 FNS를 사용한 콘크리트가 안정적이고 내염성, 내황산성이 우수하다고 발표하였다.

Fig. 8은 알칼리 활성화제를 FNS분쇄시 투입하고 공기량 6±2%로 제조한 시험체를 300사이클까지 동결융해를 반복하여 측정한 상대동탄성계수와 기준콘크리트에 대한 상대동탄성계수를 나타낸 것이다. 이 그림에서 기준콘크리트의 경우 약 200사이클에서 상대동탄성계수가 60% 이하로 떨어진 반면 고로슬래그 미분말과 실리카흄을 사용한 3성분계 시멘트 콘크리트의 경우 알칼리 활성화제의 사용유무에 관계없이 최종 사이클이 300사이클에서도 60% 이상을 나타냄으로서 내동해성에 우수한 결과를 나타내었다. 특히 Sodium hydroxide 알칼리 활성화제를 사용한 경우 300 사이클에서 플라이애시를 제외한 고로슬래그미분말 및 실리카흄의 상대동탄성계수가 우수한 결과를 나타내었다.

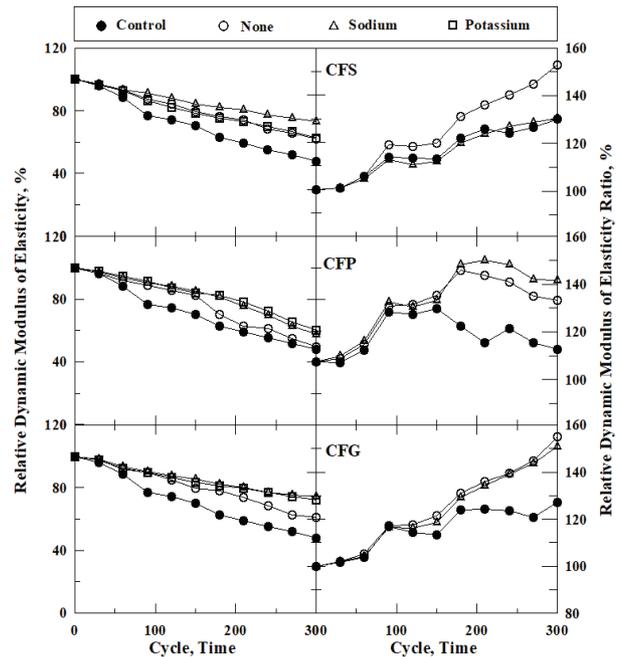


Fig. 8. Relative dynamic modulus of elasticity and ratio

Fig. 9는 3성분계 콘크리트의 동결융해시험에 의한 상대동탄성계수를 이용하여 KS F 2456에 따라 계산한 내구성지수(DF)를 나타낸 것이다. 기준콘크리트의 내구성지수가 41.4%인데 비하여 고로슬래그미분말과 실리카흄을 사용한 경우 각각 60.8%, 62.2%로 높은 내구성 지수를 나타내었다. 또한 알칼리 활성화제를 사용한 경우 사용하지 않은 경우보다 내구성지수가 높게 나타났다.

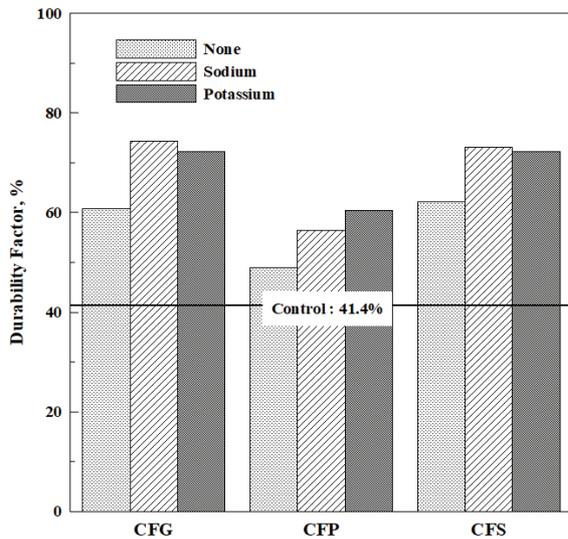


Fig. 9. Durability factor of ternary blended cement concrete

4. 결론

본 연구에서는 2종류의 알칼리 활성화제에 따른 3성분계 시멘트 경화체의 역학적 특성 및 내구특성에 대하여 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 페로니켈슬래그 미분말과 광물질혼화제를 혼입한 3성분계 시멘트 경화체의 압축강도를 재령별로 측정된 결과 플라이애시를 사용한 경우를 제외한 고로슬래그 및 실리카흄을 혼입한 3성분계의 모르타르의 강도가 재령 28일 이후 기준콘크리트와 유사한 결과를 나타내었다.
2. 알칼리활성화제를 사용한 모르타르의 압축강도비는 활성화제의 종류에 관계없이 플라이애시를 사용한 3성분계 모르타르의 경우가 가장 큰 폭으로 증가하였으며, 재령이 증가할수록 활성화제의 의한 영향은 점점 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다.
3. 3성분계 시멘트 경화체의 길이변화를 측정된 결과 OPC만 사용한 경우보다 우수한 결과를 나타내었으며, FNS를 사용한 경우 수화열저감에도 효과적임을 확인하였다.
4. RCPT결과 OPC를 사용한 경우 2,942 coulomb이었으나 FNS를 사용한 3성분계 시멘트 경화체에서는 817~1,273 coulomb을 나타낸 반면 알칼리 활성화제를 사용한 경우 808~1,194coulomb를 나타내어 FNS를 혼입하여 사용함에 따라 염소이온 침투저항성이 우수한 것으로 나타났다.
5. 3성분계 시멘트 경화체의 동결융해 저항성 시험 결과 기준콘크리트(DF 41.4%)보다 내구성 지수가 49~62% 범위로 내동해성

이 우수한 것으로 나타났다. 특히 Sodium 알칼리 활성화제를 사용하고 FNS 20% 및 고로슬래그 미분말 30%를 혼입한 배합이 74.3%로서 가장 우수한 결과를 나타내었다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20193210100050, 표충처 분시설의 건설 구조체 및 장기 성능 감시 기술 개발).

References

Bohac, M., Palou, M., Novotny, R., Masilko, J., Vsiansky, D., Stanek, T. (2014). Investigation on early hydration of ternary Portland cement–blast–furnace slag–meta kaolin blends, *Construction and Building Materials*, **64**, 333–341.

Chen, Y., Ji, T., Yang, Z., Zhan, W., Zhang, Y. (2020). Sustainable use of ferronickel slag in cementitious composites and the effect on chloride penetration resistance, *Construction and Building Materials*, **240**, Article number 117969.

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].

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.

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, R.H., Kim, G.Y., Kim, J.H., Lee, B.K., Cho, B.S. (2014). Effect of types and replacement ratio of alkali activator on compressive strength of ground granulated blast furnace slag mortar, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **2(4)**, 360–366 [in Korean].
- Kim, S.H., Hwang, J.P. (2013). The CO₂ emission in the process of cement manufacture depending on CaO content, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **25(4)**, 365–370 [in Korean].
- KS F 2790 (2016). Ferronickel Slag Fine Aggregate for Concrete, Korea Standard Association [in Korean].
- KS F 2790 (2018). Concrete Aggregate, Korea Standard Association [in Korean].
- Liu, L.Y., Liu, Y., Zhang, K., Song, N.J., Zhao, H.Y., Liu, F.T. (2016). Influence of ferronickel slag used as admixture on cement properties, *Bull. Chin. Ceram. Soc.*, **35(06)**, 1705–1715.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete Micro-Structure, Properties, and Materials*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (1981). *Concrete*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 481.
- Ngruyen, Q.D., Khan, M.S.H., Castel, A., Kim, T. (2019). Durability and microstructure properties of low-carbon concrete incorporating ferronickel slag sand and fly ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **31(8)**.
- Peng, Z., Gu, F., Zhang, Y., Tang, H., Ye, L., Tian, W., Liang, G., Rao, M., Li, G., Jiang, T. (2018). Chromium: a double-edged sword in preparation of refractory materials from ferronickel slag, *ACS Sustainable Chem. Eng.* **6(8)**, 10536–10544.
- 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**, Article number 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.
- Saha, A.K., Khan, M.N.N., Sarker, P.K. (2018). Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: a review, *Resources, Conservation and Recycling*, **134**, 10–24.
- Saha, A.K., Sarker, P.K. (2017). Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: Mechanical properties and leaching study, *Journal of Cleaner Production*, **162**, 438–448.
- Saha, A.K., Sarker, P.K. (2018). Durability characteristics of concrete using ferronickel slag fine aggregate and fly ash, *Magazine of Concrete Research*, **70(17)**, 865–874.
- Saha, A.K., Sarker, P.K. (2019). Mitigation of the potential alkali-silica reaction of ferronickel slag(FNS) aggregate by using ground FNS as a supplementary cementitious material, *Advances in Cement Research*, 1–27.

알칼리 활성화제 종류별 페로니켈슬래그를 사용한 3성분계 시멘트 경화체의 내구특성

본 연구에서는 페로니켈의 제련과정에서 발생하는 산업부산물인 페로니켈슬래그 미분말과 광물질혼화재료를 사용한 시멘트 경화체의 역학적 특성 및 내구성을 평가하였다. 3성분계 시멘트 경화체의 수화열, 공극구조, 압축강도, 길이변화, 급속염화물 침투시험(RCPT), 동결융해 저항성을 평가하여 보통포틀랜드 시멘트와 비교하였다. 그 결과 페로니켈 슬래그 미분말 및 광물질 혼화재료를 사용한 3성분계 시멘트 경화체의 압축강도는 기준콘크리트에 비하여 낮은 강도발현을 하였으나, 알칼리 활성화제를 사용함에 따라 어느 정도 회복되는 것을 알 수 있었다. 페로니켈 슬래그를 사용한 시멘트 모르타르의 길이변화는 기준 시편보다 수축이 덜 발생하는 것으로 나타났다. 또한 페로니켈 슬래그 미분말을 사용한 경우 알칼리활성화제 사용유무에 관계없이 모두 ASTM C 1202에서 제시한 ‘매우 낮은’ 영역의 값을 나타내었으며, 동결융해저항성 평가에서도 기준콘크리트에 비하여 아주 우수한 결과를 나타내었다.