

페로니켈슬래그 미분말을 사용한 모르타르의 응결시간 및 압축강도특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Setting Time and Compressive strength of Mortar using Ferronickel Slag Powder

김 영 욱¹

김 도 빈¹

최 세 진^{2*}

Kim, Young-Uk¹

Kim, Do-Bin¹

Choi, Se-Jin^{2*}

Master's Course, Department of Architectural Engineering, Wonkwang University, Iksan, 54538, Korea ¹

Professor, Department of Architectural Engineering, Wonkwang University, Iksan, 54538, Korea ²

Abstract

This study evaluate the fluidity and hardening properties of mortar by replacement ratio of ferronickel slag powder to estimate the applicability of ferronickel slag powder for cement replacement materials. Ferronickel slag powder was replaced by 0, 5, 10, 15 and 20% of the cement weight. In addition, blast furnace slag powder and fly ash were also used for comparing with the mixtures using ferronickel slag powder. As the test results, the micro-hydration heat of the mixture containing the ferronickel slag powder was lower than that of the mixtures containing the same amount of blast furnace slag powder and fly ash. The flow of the sample with ferronickel slag powder was relatively higher than the other mixtures. In all ages, the compressive strength of the mixture with ferronickel slag powder and fly ash was similar to that of the mix containing only fly ash. In case of drying shrinkage, the mixture containing ferronickel slag powder exhibited lower drying shrinkage than the mixture using blast furnace slag powder, and similar to the mixture containing fly ash.

Keywords : ferronickel slag powder, microhydration heat, drying shrinkage, blast furnace slag powder, fly ash

1. 서 론

최근 국내에서도 스테인리스의 주원료인 니켈 확보를 위한 페로니켈 생산체제가 갖추어짐에 따라 연간 200만톤 이상의 페로니켈슬래그가 부산물로서 발생하고 있는 실정이다. 페로니켈슬래그는 페로니켈의 용해 및 제련 시에 발생하는 부산물로 니켈 1톤 생산 시 약 30톤의 페로니켈슬래그가 발생되고 있으며 니켈과 철의 비율이 약 2:8로 이루어져 있

다. 일반적으로 페로니켈슬래그는 냉각방식에 따라 공랭시켜 생산되는 괴재 페로니켈슬래그와 물을 분사하여 급랭시켜 생산되는 수쇄 페로니켈슬래그로 분류되어 콘크리트용 골재로서의 연구 및 활용이 진행되고 있다[1,2,3,4,5]. 페로니켈슬래그의 주성분은 SiO₂와 MgO 등으로 이루어져 있으며 이중 MgO의 경우 콘크리트의 팽창에 기여하지 않는 것으로 파악되고 있으며[6] 또한 기존 연구문헌에서도 페로니켈슬래그 혼입 콘크리트의 팽창성은 나타나지 않은 것으로 보고되고 있다[7].

일본의 경우 1992년 JIS A 5011 콘크리트용 슬래그 골재 표준에 페로니켈슬래그 잔골재가 추가되고 1994년 일본 토목학회 콘크리트 위원회에서 페로니켈슬래그 잔골재 콘크리트 시공지침이 제정되는 등 콘크리트용 및 노반재용 골재 등으로 활발히 활용되고 있으며 최근에는 발생되고 있는 페로니켈슬

Received : September 6, 2018

Revision received : October 4, 2018

Accepted : November 12, 2018

* Corresponding author : Choi, Se-Jin

[Tel: 82-63-850-6789, E-mail: csj2378@wku.ac.kr]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

래그의 전량이 재활용 되고 있는 것으로 보고되고 있다[9].

국내의 경우 2008년 페로니켈 제련소가 완공된 이후로 7년간 약 800만톤의 페로니켈슬래그가 발생하였고 이중 420만톤 정도가 성토재, 노반재 및 콘크리트용 골재로 활용 되었으며 나머지 380만톤의 페로니켈슬래그는 제철소 내 야적장에 매립 및 방치가 되고있는 실정으로 이로 인한 페로니켈슬래그의 비산먼지로 인해 지역단체와의 환경 및 건강 문제가 사회적으로 대두되는 등 페로니켈슬래그의 재활용을 증대시키기 위한 방안마련이 시급한 실정이다.

최근 들어 철강관련 기업과 일부 연구기관을 중심으로 페로니켈슬래그를 건설소재로서 재활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 일부 현장 적용 사례도 보고되고 있으나 주로 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 연구가 대부분이며[1,2,3,4,5] 페로니켈슬래그를 콘크리트용 결합재로서 활용하기 위한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구는 최근 발생량이 증가하고 있는 철강산업부산물인 페로니켈슬래그의 건설생산현장에서의 재활용율을 높이기 위한 연구의 일환으로 페로니켈슬래그 미분말의 시멘트 대체재로서의 가능성을 검토하기 위하여 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 모르타르의 미소수화열, 유동성, 응결시간, 압축강도 및 건조수축특성을 비교·분석하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 결합재는 시멘트의 경우 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 시멘트 대체재로서 페로니켈슬래그 미분말, 고로슬래그 미분말 3종 및 플라이애시 2종이 사용되었다. 페로니켈슬래그 미분말은 국내 P사에서 부산물



Figure 1. Ferronickel slag

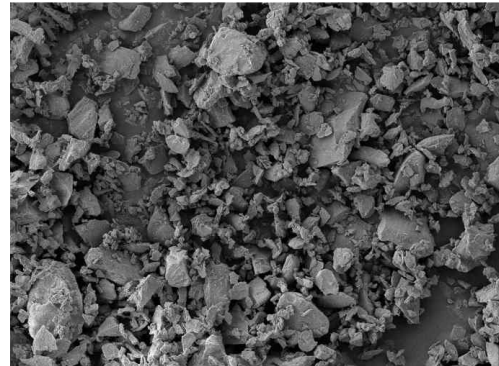


Figure 2. SEM image of ferronickel slag powder

로 발생된 페로니켈슬래그 잔골재를 ball-mill을 사용하여 분말도 3,500cm²/g 수준으로 자체 분쇄한 것을 사용하였으며 사용재료의 화학적 특성 및 페로니켈슬래그의 성상은 Table 1 및 Figure 1에 나타내었다. Figure 2는 페로니켈슬래그 미분말의 SEM성상을 나타낸 것으로 분쇄과정을 거쳐 불규칙한 입형을 나타내고 있다.

Table 1. Chemical composition of powders

Components	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Cement	17.43	6.50	3.57	64.40	2.55	1.17
Ferronickel slag powder	48.91	2.08	11.6	0.82	32.41	0.09
Blast furnace slag powder	30.61	13.98	0.32	40.71	6.43	0.60
Fly ash	64.88	20.56	6.06	2.58	0.80	1.45

Table 2. Mix proportions and Test plan

Series	Mix	W/B	S/a	Unit weight (kg/m ³)						Test item	
				W	C	FN	BS	FA	S		G
I	C100	50	49	170	340	-	-	-	882	918	• Mortar flow • Microhydration heat • Setting time • Compressive strength - 3, 7, 28days • Drying shrinkage
	FN5			170	323	14	-	-	881	917	
	FN10			170	305	34	-	-	880	916	
	FN15			170	289	51	-	-	880	916	
	FN20			170	272	68	-	-	879	915	
II	C100	50	49	170	340	-	-	-	882	918	• Mortar flow • Setting time • Compressive strength - 7, 28, 56days • Drying shrinkage
	FN15			170	289	51	-	-	880	916	
	BS15			170	289	-	51	-	880	916	
	FA15			170	289	-	-	51	880	916	
	FN-FA			170	289	25.5	-	25.5	880	916	

2.2 실험방법

Table 2는 본 연구의 실험계획을 나타낸 것으로 두 개의 Series로 구분하여 실험을 진행하였다. Series I은 페로니켈슬래그 미분말 대체율에 따른 특성을 비교·검토하기 위하여 페로니켈슬래그 미분말을 단위시멘트량에 대하여 0, 5, 10, 15, 20% 대체한 모르타르에 대하여 실험을 진행하였다. 또한 Series II에서는 현재 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트용 혼화제인 고로슬래그 미분말 및 플라이애시와의 비교·검토를 위하여 페로니켈슬래그 미분말, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 단위시멘트량에 대해 15% 대체한 모르타르 배합에 대하여 실험을 진행하였다. 또한 3성분계로서 플라이애시와의 혼용성을 검토하기 위하여 페로니켈슬래그 미분말과 플라이애시를 단위시멘트량에 대하여 각 7.5%씩 대체한 배합(FN-FA)에 대해서도 실험을 진행하였다. 각 배합은 콘크리트 배합을 기준으로 모르타르 실험을 위해 콘크리트 배합에서 굵은골재를 제외한 배합에 대하여 실험을 진행하였다. 시험체는 50×50×50mm 큐빅형몰드로 제작하여 24시간 후 탈형하여 이후 소요의 재령까지 20℃ 수중양생을 실시하였다.

2.3 측정항목

모르타르 플로우, 응결시간, 압축강도, 건조수축 등 각종 모르타르 시험은 KS 시험방법에 준하여 실시하였다.

미소수화열의 경우 Figure 3과 같은 미소수화열 측정장비(Multi micro calorimeter)를 사용하여 시험체를 제작한 후 72시간 동안 누적 수화열을 측정하였다. 모르타르 플로우



Figure 3. Multi micro calorimeter



Figure 4. Demec strain gauge

및 압축강도는 KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법에 준하여 측정하였으며 응결시간은 KS F 5102 수경성 시멘트의 표준 주도 시험방법에 준하여 비카침을 이용한 모르타르의 응결시간을 측정하였다. 건조수축은 KS F 2424[10] 모르타르 및 콘크리트의 길이변화 시험방법

Table 3. Test result

Series	Mix	Mortar flow (mm)	Setting time (min)		Compressive strength (MPa)			Drying shrinkage of 91 days (%)
			Initial setting time	Final setting time	3days	7days	28days	
I	C100	190	220	360	27.51	32.21	40.91	-0.121
	FN5	186	220	375	24.98	28.58	34.45	-0.122
	FN10	180	210	360	24.19	27.95	36.24	-0.120
	FN15	175	230	375	23.37	27.38	36.48	-0.114
	FN20	175	230	390	23.44	27.68	33.27	-0.118
II	C100	195	220	360	26.31	33.10	39.12	-0.200
	FN15	230	230	375	22.66	29.36	31.80	-0.183
	BS15	195	230	405	24.42	29.83	39.28	-0.208
	FA15	210	260	405	22.85	30.81	36.00	-0.186
	FN-FA	210	-	-	21.66	31.21	36.24	-

규정에 준하여 Figure 4와 같은 컨택트 게이지를 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 미소수화열

Table 3은 본 실험의 측정결과를 나타낸 것이다. 페로니켈슬래그 미분말, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 시험체의 미소수화열량을 나타낸 Figure 5에서 보는바와 같이 배합 후 12시간까지의 미소수화열량은 시멘트만 단독으로 사용시 약 14cal/g를 나타내고 있으며 페로니켈슬래그 미분말을 10% 사용한 FN10배합 및 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 20% 사용한 BS20, FA20배합에서는 약 12cal/g 로 유사한 미소수화열량값을 나타내고 있다. 페로니켈슬래그 미분말을 20% 사용한 FN20 배합의 경우 약 8cal/g로 상대적으로 가장 낮은 미소수화열 값을 나타내었다. 72시간 누적 미소수화열의 경우 시멘트만 단독 사용한 C100배합이 약 66.29cal/g로 가장 높게 나타났으며 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 20% 혼입한 BS20 및 FA20배합에서는 각각 55.30, 55.78cal/g로 유사한 미소수화열을 나타내고 있다. 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합의 경우에도 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 배합과 동일한 경향으로 시멘트 단독 사용 배합에 비해 낮은 미소수화열을 나타내었으며 페로니켈슬래그 미분말 대체율에 따른 변화를 살펴보면 페로니켈슬래그 미분말을 10, 20% 혼입한 FN10 및 FN20배합에서 각각 60.53, 53.51cal/g으로 나타나 페로니켈슬래그 미분말을 10% 대체 시 시멘트 단독배합에 비해 미소수화열량이 약 10% 씩 감소하는 것으로 나타났다. 대체적으로 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합에서 동일한 양의 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 배합에 비해 미소수화열이 낮게 나타나고 있는데 이는 페로니켈슬래그 미분말의 반응성이 고로슬래그 미분말 및 플라이애시보다 낮기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 모르타르 플로우

페로니켈슬래그 미분말 대체율에 따른 모르타르의 플로우 변화를 나타낸 Figure 6에서 볼 수 있는바와 같이 페로니켈슬래그 미분말을 대체한 경우 시멘트만 단독으로 사용한 C100배합에 비해 상대적으로 높은 플로우값을 나타내고 있는데 이는 페로니켈슬래그 입자의 유리질 특성에 기인한 것

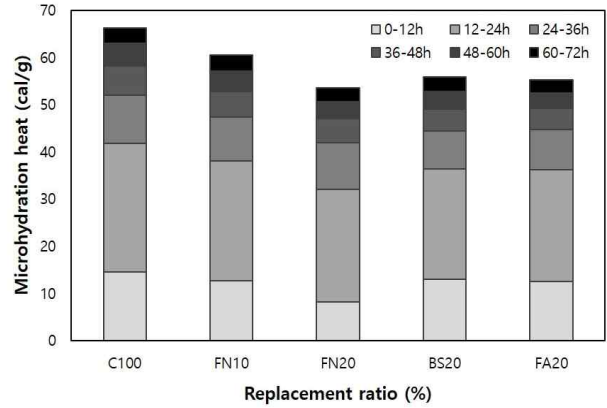


Figure 5. 72 hours maximum microhydration heat

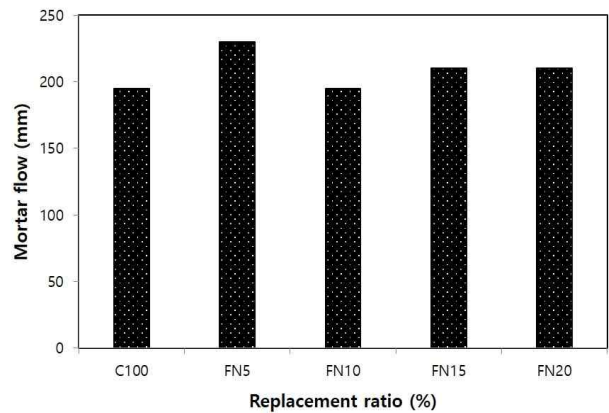


Figure 6. Mortar flow (Series I)

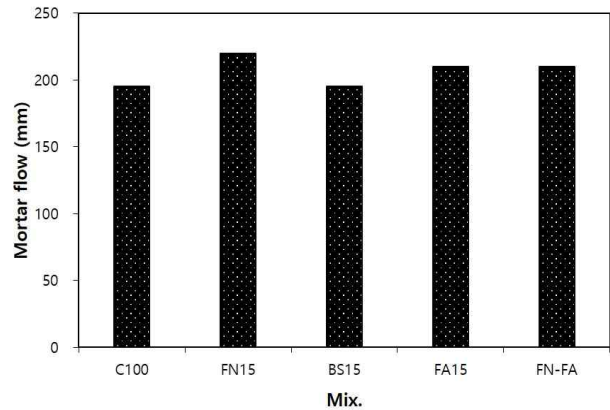


Figure 7. Mortar flow (Series II)

으로 페로니켈슬래그를 잔골재로서 사용한 기존연구 결과 [1,5]와도 유사한 경향임을 알 수 있다.

Figure 7은 페로니켈슬래그 미분말, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 모르타르의 플로우 변화를 나타낸 것으로 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 경우 플라이애시를 사용한 배합과 유사한 플로우값을 보이고 있으며 동일한 양

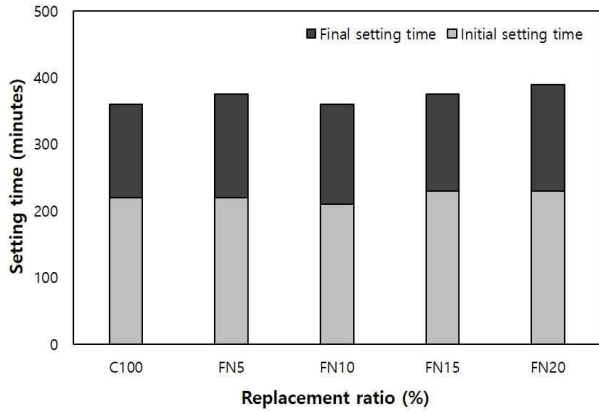


Figure 8. Setting time (Series I)

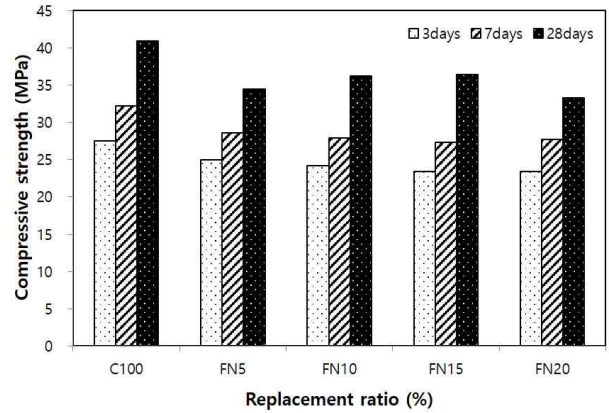


Figure 10. Compressive strength (Series I)

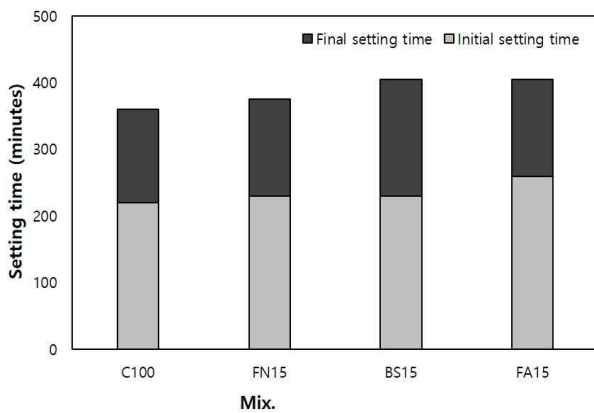


Figure 9. Setting time (Series II)

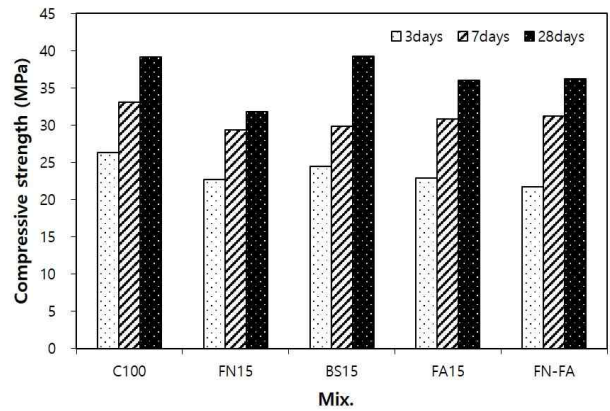


Figure 11. Compressive strength (Series II)

의 고로슬래그 미분말을 사용한 배합에 비해서는 다소 높은 플로우값을 나타내고 있다. 또한 페로니켈슬래그 미분말과 플라이애시를 동시에 사용한 FN-FA배합의 경우 플라이애시만을 사용한 FA15배합과 유사한 플로우값을 나타내고 있다.

3.3 응결시간

페로니켈슬래그 미분말 대체율에 따른 모르타르 응결시간의 변화를 나타낸 Figure 8에서 볼 수 있듯이 초결시간의 경우 페로니켈슬래그 미분말 대체율에 관계없이 약 220~230분 수준으로 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 종결시간의 경우 시멘트만 단독 사용한 C100배합과 페로니켈슬래그 미분말을 5~15% 대체한 FN5, FN10, FN15배합의 종결시간이 약 360~375분 수준으로 유사하게 나타나고 있다. 또한 페로니켈슬래그 미분말을 20% 혼입한 FN20배합의 경우에는 종결시간이 약 390분으로 시멘트만 사용한

C100배합에 비해 약 30분정도 종결시간이 느린 것으로 나타났다.

Figure 9는 페로니켈슬래그 미분말, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 모르타르의 응결시간을 나타낸 것으로 초결시간을 살펴보면 페로니켈슬래그 미분말과 고로슬래그 미분말을 사용한 FN15 및 BS15배합의 경우 초결시간이 약 230분으로 유사하게 나타났으며 플라이애시를 혼입한 FA15배합에서는 초결시간이 상대적으로 느린 것으로 나타났다. 종결시간의 경우에는 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 FN15배합의 종결시간이 BS15 및 FA15배합에 비해 상대적으로 빠른 것으로 나타났다. 대체적으로 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합의 경우 시멘트 단독사용 배합보다는 응결시간이 상대적으로 느린 것으로 나타났으며 동일한 양의 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 경우에 비해서는 빠른 응결시간을 나타내고 있다.

3.4 압축강도

Figure 10은 페로니켈슬래그 미분말 대체율에 따른 모르타르의 압축강도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 페로니켈슬래그 미분말을 사용할 경우 시멘트만 단독으로 사용한 C100 배합에 비해 압축강도가 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 재령별로 살펴보면 재령 3일의 경우 페로니켈슬래그 미분말을 대체한 모든 배합에서 약 23~24MPa 수준으로 유사한 압축강도를 발현하고 있으며 재령 7일의 경우 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합의 압축강도값이 시멘트만 단독으로 사용한 C100배합에 비해 약 12~15% 가량 낮게 나타났다. 재령 28일의 경우 C100배합의 압축강도가 약 41MPa로 가장 높은 압축강도를 발현하였으며 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합에서 약 33~36MPa의 압축강도를 발현함으로써 C100배합에 비해 약 10~20% 낮은 수준의 압축강도값을 보이고 있다. 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합의 경우 페로니켈슬래그 미분말을 10, 15% 대체한 FN10 및 FN15배합에서 압축강도가 약 36MPa로 상대적으로 높은 압축강도를 발현하고 있다.

Figure 11은 페로니켈슬래그 미분말, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 모르타르의 압축강도를 나타낸 것으로 재령 3일의 경우 고로슬래그 미분말을 사용한 BS15배합에서 C100배합과 유사한 압축강도를 발현하고 있으며 페로니켈슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 FN15 및 FA15배합에서는 약 22MPa 수준의 압축강도를 발현하였다. 재령 7일의 경우 FN15, BS15, FA15 배합 모두 약 30MPa 수준의 유사한 압축강도를 발현하고 있으며 C100 배합에 비해 약 10% 정도 낮은 압축강도를 발현하였다. 재령 28일의 경우 시멘트만 단독 사용한 C100배합과 고로슬래그 미분말을 사용한 BS15배합에서 약 39MPa로서 가장 높은 압축강도를 발현하였으며 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 FN15배합의 경우 C100배합에 비해 약 20% 낮은 압축강도를 발현하고 있다. 또한 페로니켈슬래그 미분말과 플라이애시를 각각 7.5%씩 혼입한 FN-FA배합의 경우 모든 재령에서 플라이애시를 15% 혼입한 FA15배합과 유사한 압축강도를 발현하고 있으며, 특히 재령 28일 압축강도의 경우 페로니켈슬래그 미분말을 단독으로 사용한 FN15배합보다 약 15% 높은 압축강도를 나타내고 있어 압축강도 발현 측면에서 페로니켈슬래그 미분말을 단독으로 사용하는 것 보다 플라이애시와 함께 3성분계 배합으로 사용하는 것이 상대적으로 유리할 것으로 판단된다.

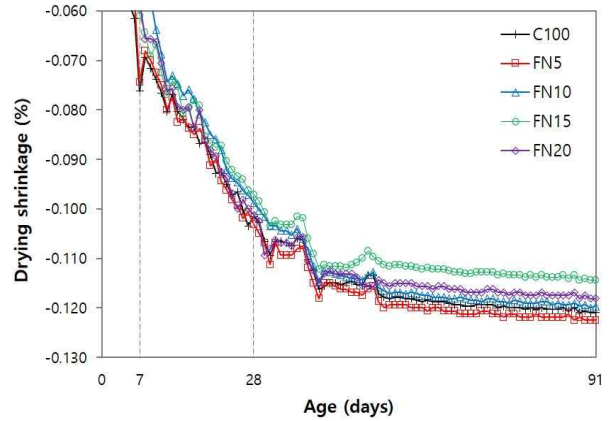


Figure 12. Drying shrinkage (Series I)

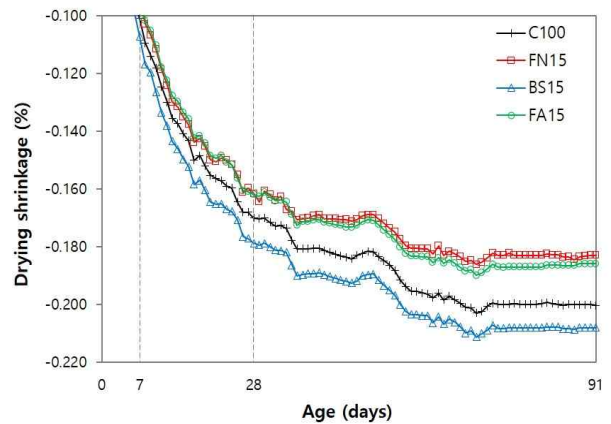


Figure 13. Drying shrinkage (Series II)

3.5 건조수축

Figure 12는 페로니켈슬래그 미분말 대체율에 따른 모르타르의 건조수축 변화를 나타낸 것으로, 그림에서 볼 수 있듯이 페로니켈슬래그 미분말을 사용하지 않은 C100배합과 페로니켈슬래그 미분말을 5% 및 10% 대체한 FN5, FN10배합의 경우 재령 91일 기준으로 약 0.120~0.122%의 유사한 건조수축값을 나타내고 있으며 페로니켈슬래그 미분말을 15% 혼입한 FN15배합에서 약 0.114%로 상대적으로 가장 낮은 건조수축을 보이고 있다. Figure 13은 페로니켈슬래그 미분말, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 혼입한 모르타르의 건조수축을 나타낸 것으로 고로슬래그 미분말을 사용한 BS15배합의 경우 C100배합에 비해 상대적으로 높은 건조수축값을 보이고 있으며 페로니켈슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 FN15 및 FA15배합에서는 약 0.190%로 상대적으로 낮은 건조수축값을 나타내고 있다. 따라서 페로니켈슬래그 미분말을 시멘트에 대체하여 적절히 사용할 경우 모르타르 및 콘크리트의 건조수축저감에 유효할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 페로니켈슬래그의 재활용율을 높이기 위한 연구의 일환으로 페로니켈슬래그 미분말의 시멘트 대체 가능성을 평가하기 위해 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 모르타르의 미소수화열, 유동성, 응결시간, 압축강도 및 건조수축특성을 비교·분석한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 페로니켈슬래그 미분말을 10% 사용시 미소수화열량이 약 10% 감소하는 것으로 나타났으며 동일한 양의 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 혼입한 배합에 비해 낮게 나타났다.
- 2) 모르타르 플로우의 경우 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합에서 상대적으로 높은 플로우값을 나타내었으며 응결시간은 대체적으로 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합의 경우 동일한 양의 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 경우에 비하여 빠른 응결시간을 나타내었다.
- 3) 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 모르타르의 초기 강도발현은 고로슬래그 미분말 및 플라이애시와 유사하게 나타났다. 특히 페로니켈슬래그 미분말과 플라이애시를 함께 사용한 배합의 재령 28일 압축강도가 페로니켈슬래그 미분말을 단독으로 사용한 배합에 비해 상대적으로 높게 발현함으로써 압축강도 발현 측면에서 페로니켈슬래그 미분말을 단독으로 사용하는 것 보다 플라이애시와 함께 3성분계 배합으로 사용하는 것이 상대적으로 유리한 것으로 나타났다.
- 4) 페로니켈슬래그 미분말 대체율에 따른 건조수축량은 페로니켈슬래그 미분말을 15% 혼입한 FN15배합에서 상대적으로 가장 낮게 나타났으며, 고로슬래그 미분말을 사용한 배합에 비해 페로니켈슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 배합에서 상대적으로 낮은 건조수축량을 나타냈다.
- 5) 본 연구 결과 페로니켈슬래그 미분말을 시멘트 대체재로서 사용할 경우 시멘트 경화체의 수화열 저감 및 건조수축 저감에 효과가 있는 것으로 나타났으며 강도발현 및 건조수축특성을 고려할 경우 페로니켈슬래그 미분말을 단독으로 사용하는 것 보다는 플라이애시와 혼합사용하는 것이 상대적으로 유리한 것으로 나타났다. 향후 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 2·3성분계 시

멘트 경화체의 강도발현과 관련한 수화특성 및 미세구조 특성 분석 등의 추가연구가 필요할 것으로 사료된다.

요 약

본 연구에서는 페로니켈슬래그 미분말의 시멘트 대체재로서의 가능성을 평가하기 위하여 페로니켈슬래그 미분말 사용 모르타르의 압축강도 및 건조수축특성을 비교·분석하였다. 연구결과 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합의 경우 동일한 양의 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 배합에 비해 미소수화열량이 낮게 나타났으며 모르타르 플로우는 상대적으로 다소 높은 것으로 나타났다. 또한 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 모르타르의 압축강도의 경우 초기 강도발현은 고로슬래그 미분말 및 플라이애시와 유사하게 나타났으나 재령 28일에서는 상대적으로 낮은 압축강도를 발현하였다. 건조수축의 경우 페로니켈슬래그 미분말을 사용한 배합에서 고로슬래그 미분말을 사용한 배합에 비해 낮은 건조수축값을 나타내었으며 플라이애시를 혼입한 배합의 건조수축과 유사하게 나타났다.

키워드 : 페로니켈슬래그 미분말, 미소수화열, 건조수축, 고로슬래그 미분말, 플라이애시

Acknowledgement

This paper was supported by Wonkwang University in 2017.

References

1. Park MS. The study on quality properties of concrete using water granulated ferro-nickel slag for fine aggregate [master's thesis]. [Jecheon (Korea)]: Semyung University; 2011. 72 p.
2. Choi YC, Choi SC. Alkali-silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions. *Construction and Building Materials*. 2015 Nov;99: 279-87.
3. Saha AK, Sarker PK. Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete mechanical properties and leaching study. *Journal of Cleaner Production*. 2017 Sep;162:438-48.

4. Choi YW, Park MS, Bae SH, Lee HH, Jo BS. Properties of water granulated ferro-nickel slag as fine aggregate for concrete. Proceedings of Korean Society of Civil Engineers; 2010 Sep 20–22; Incheon, Korea, Seoul (Korea): Korean Society of Civil Engineers; 2010. p. 1462–5.
5. Choi YW, Park MS, Oh SR, Lee GM, Kim JS, Cho BS. Evaluation of field applicability of concrete using water granulated ferro-nickel slag for fine aggregate. Proceeding of Korea Concrete Institute, 2010 Nov 5–6; Gangchon, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2010. p. 217–8.
6. KS F 2527. Concrete aggregate. Seoul(Korea): Korean Agency for Technology and Standards; 2016. 108 p.
7. Saha AK, Sarker PK. Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars. Construction and Building Materials. 2016 Oct;123:135–42.
8. Rahman HM, Sarker PK, Shaikh FUA, Saha AK. Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag. Construction and Building Materials. 2017 Jun;140:194–202.
9. Lee CH. The status of construction recycling resources in global ferronickel slag market. Magazine of Korean Recycled Construction Resources Institute. 2017 Sep;12(3):54–8.
10. KS F 2424. Standard test method length change of mortar and concrete. Seoul(Korea); 2015. 10 p.