

페로니켈슬래그 잔골재의 바닥용 건조모르타르 적용성 평가

Applicability of Ferro-nickel Slag Sand for Dry Mortar in Floor

조 봉 석¹

김 원 기²

황 인 성³

구 경 모^{4*}

Cho, Bong-Suk¹

Kim, Won-Ki²

Hwang, Yin-Seong³

Koo, Kyung-Mo^{4*}

Principal Researcher, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang-si, 37673, Korea ¹

R&D Director, Construction Material Research Center, Asiacement Corp., Yongin-si, 17118, Korea ²

Senior Research Engineer, Construction Material Research Center, Asiacement Corp., Yongin-si, 17118, Korea ³

Associate Research Engineer, Construction Material Research Center, Asiacement Corp., Yongin-si, 17118, Korea ⁴

Abstract

Fine aggregate made of ferronickel slag(FNS) is similar to natural fine aggregates and is used in concrete structures both domestically and abroad, but its applications and research areas are limited. In this research, in order to expand the availability of FNS and improve the performance of cement mortar products, the applicability of FNS on dry mortar for floor was examined. Experimental results show that FNS improves flow of cement mortar because it has low absorption rate, spherical shape, and glassy surface. Also, the high stiffness of the FNS aggregate itself is considered to contribute to the improvement of cement mortar quality such as crack reduction by improving the compressive strength and shrinkage reducing. In addition, when FNS fine aggregate is applied, it was possible to secure the impact sound insulation performance equal to or higher than that of mortar using natural fine aggregate.

Keywords : ferro-nickel slag sand, dry mortar in floor, mechanical properties, floor impact sound insulation

1. 서 론

건설공사의 증가로 천연골재 자원이 급감하고, 최근에는 섬진강 골재 채취 영구금지 및 EEZ·웅진군 골재 채취 논란 등 골재난이 심화됨에 따라 콘크리트용 대체골재 개발 요구가 증가하고 있다. 이에 천연자원의 효율적 활용, 산업부산물의 안정적 처리 및 재활용 방안 등의 연구가 진행되었고 이를 바탕으로 콘크리트용 골재는 KS F 2527 (2016)로 통합되어, 천연골재, 부순골재, 슬래그골재(동슬래그, 페로니켈슬래그, 연슬래그 등), 순환골재 및 경량골재에 대한 요구성능 기준을 제시하고 있다.

이 중 페로니켈슬래그(Ferro-nickel slag)는 철 80%와 니켈 20%가 함유되어 만들어지는 스테인레스강 원료를 생산할 때 발생하는 산업부산물로서, 생산공정 특성상 니켈의 생산량(약 6만톤/년) 대비 페로니켈슬래그의 발생률(180만톤/년)이 상대적으로 매우 높다. 페로니켈슬래그 발생량의 약 65%는 콘크리트용 잔골재로 활용되고 있으나 나머지는소내 토목 공사 등 저부가 가치로 활용 중이다.

이러한 페로니켈슬래그에 대한 잔골재로써의 연구는 다양하게 진행되어 왔다. 국외 연구에서는 일반적으로 페로니켈슬래그 잔골재를 약 50% 이하로 치환하는 범위에서 압축강도, 탄성계수 및 수밀성이 증가하고, 목표 플로에 요구되는 배합수량이 감소된다고 보고하였다[1,2]. 또한, Togawa et al.[3] 등은 페로니켈슬래그 잔골재의 혼입은 콘크리트의 블리딩을 증가시키는 요인이 되지만, 실리카흙 또는 석회석분말 등을 통해 저감이 가능하다고 제시한 바 있다. 내구성에 있어서는 페로니켈슬래그 잔골재를 50%

Received : August 22, 2018

Revision received : January 14, 2019

Accepted : January 23, 2019

* Corresponding author : Koo, Kyung-Mo

[Tel: 82-31-329-1939, E-mail: ghoul007@hanmail.net]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

사용한 콘크리트에서 동결융해 및 탄산화 저항성이 향상되고 수축이 저감되는 효과를 확인할 수 있으나[4] 알칼리 실리카반응에 의한 팽창가능성이 제기되었으며 이를 위해 저알칼리시멘트의 사용을 권장하였다[5]. 이외에도 Fidancevska et al.[6] 및 Katsiotis et al.[7]등은 페로니켈슬래그를 콘크리트에 적용시 화학적으로 안정하여 고정되기 때문에 독성원소 및 중금속 등의 침출이 없음을 확인하였다.

국내 연구의 전반적 실험 결과를 분석하면, 페로니켈슬래그 잔골재의 낮은 흡수율과 둥근 입형에 기인하여 플로가 증가하고, 치환율 약 50%이내 범위에서 압축강도 및 동결융해 저항성이 증가한다고 제시하고 있다[8,9,10,11,12]. 그러나 일부 연구에서는 페로니켈슬래그 잔골재의 치환율 40% 범위에서 점성 증가 및 작업성 저하 현상이 확인되며 치환율 60% 영역에서는 재료분리현상도 발생한다고 지적하여 적용시 유의점을 제시하였다[13].

이상의 연구결과를 바탕으로, 일본의 경우는 1990년대 초부터 관련연구 및 시공지침개발 등을 통한 콘크리트용 골재 표준화 작업이 진행되어 페로니켈슬래그의 재활용률을 높이고 있으며, 우리나라에서도 잔골재로써 2009년 KS 제정 이후 콘크리트 시공지침(한국콘크리트학회)이 마련되는 등 시스템 확립을 도모하였다. 그러나 기존의 연구들은 콘크리트 또는 일반 모르타르 배합에 한하여 플로, 강도 및 내구성 검토 등에 머물러 있는 실정으로, 공동주택 등에서 일반적으로 적용되는 건조모르타르에 대한 적용 연구는 거의 없는 실정이다.

건조모르타르는 일반 모르타르(또는 습식 모르타르)와 달리 재료의 균질성 확보를 위해 잔골재를 건조한 후 입도별로 분급하고, 분체(시멘트, 혼화재 등)와 프리믹스하여 생산하는 방식으로, 현장에서 직접 배합수와 비빔하여 사용하는 재료이다. 이러한 건조모르타르는 바닥용, 미장용, 타일용, 조적용 등으로 다양하게 구분되며, 그 중에서도 바닥용 건조모르타르는 플로 및 압축강도 뿐만 아니라, 바닥균열에 주요 원인인 건조수축 저감능성이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 바닥용 건조모르타르에 대하여 페로니켈슬래그 잔골재의 혼입에 따른 기초·역학적 특성과 건조수축을 평가하여 현장적용 가능성에 대해 검토하고자 하였다.

또한 최근에는 층간소음에 대한 사회적 문제가 끊임없이 제기되고 있으며, 이에 국토교통부에서는 「공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준」을 제시하고 있다. 일

반적으로 슬래브의 강성이 향상되는 것은 충격점의 유효 질량을 높이는 것과 동일한 효과가 되어, 충격에 대하여 바닥은 진동하기 어렵게 되고 충격에 의한 발생음도 저하한다고 보고하고 있다[14]. 본 연구에서는 페로니켈슬래그 잔골재의 혼입이 건조모르타르의 강성을 향상시킬 것으로 예상되었으며 이에 바닥 충격음 차단성능을 Mock-up시험을 통해 검토하였다.

2. 페로니켈슬래그잔골재의 물리·화학적 특성

2.1 FNS의 화학적 특성

Table 1은 페로니켈슬래그 잔골재(이하, FNS)의 화학성분을 나타낸 것이다. 주성분은 MgO 및 SiO₂가 대부분으로 구성되어 있으며, MgO가 약 33%로 높게 함유되어 있다. XRD 분석결과 팽창가능성이 있는 free MgO는 존재하지 않았고, forsterite(2MgO.SiO₂) 및 enstatite(MgO.SiO₂) 등의 복합산화물형태로 고정화 되어 있어 화학적으로 안정화 되어 있는 형태이다.

또한 Figure 1은 2011~2017년간 KS F 2545의 화학법에 준하여 실시한 골재의 알칼리잠재 반응 시험결과이다. 모든 평가 결과에서 FNS의 알칼리 잠재반응성은 없는 것으로 나타나 콘크리트의 적용상에 문제가 없는 것으로 확인되었다[15].

Table 1. Chemical composition of FNS

Concontents	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	etc.
Composition(%)	52.50	2.18	9.47	0.35	33.10	2.40

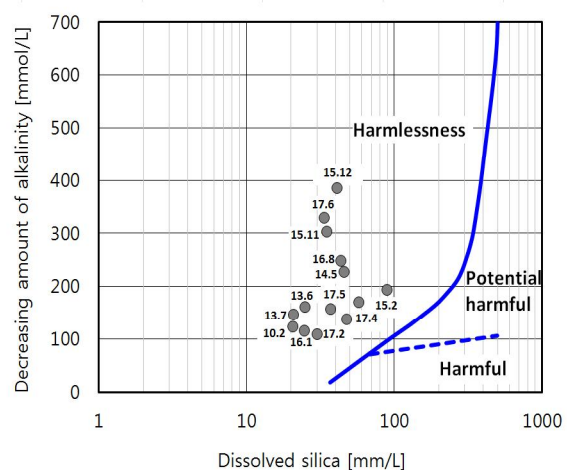


Figure 1. Potential reactivity of aggregates (Chemical Method)

Table 2. Physical properties of FNS

Density (g/cm ³)	Unit volume weight (kg/ℓ)	Absorption ratio (%)	fineness modulus
2.93 (Above 2.70)	1.78 (Above 1.50)	1.22 (Below 3.0)	3.80

* () : KS 2527

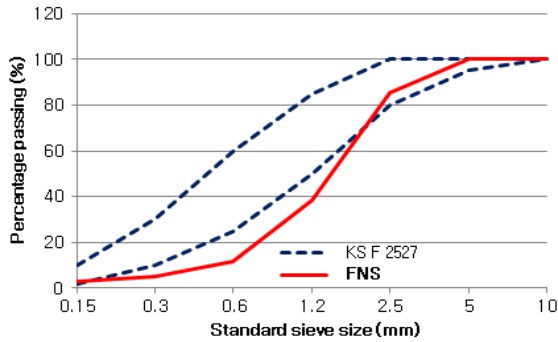


Figure 2. Particle size distributions of FNS and the upper and lower limits of KS F 2527

2.2 FNS의 물리적 특성

Table 2는 FNS잔골재의 흡수율, 단위용적질량 및 절건밀도를 나타낸 것으로, 『KS F 2527 콘크리트용 골재』의 기준을 만족하였다. 일반골재와 비교하여 FNS잔골재의 흡수율이 낮고 높은 단위용적질량 및 밀도의 특성을 보였다.

Figure 2는 FNS잔골재의 입도분포를 나타낸 것으로, 조립률은 3.23이며 일반잔골재(해사 약 1.80, 강사 약 2.50, 부순잔골재 약 3.00 범위임)에 비해 다소 높게 평가되었다. 이에 천연잔골재(해사 및 강사) 대비 약 30%, 부순잔골재 대비 약 10% 이하로 치환·혼합하여 사용하면 표준입도분포 범위를 만족할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 Figure 3과 같이 바닥용 건조모르타르에 대하여 FNS잔골재를 왕사(2.5~5.0mm), 중사(1.2~2.5mm) 및 미사(1.2mm 이하)로 입도를 조정하여 특성을 평가하고자 하였다. Figure 4는 SEM 촬영을 통해 FNS 단면을 나타낸 것이다. FNS 원석의 입형은 구형이며, 5mm이하로 입도조정을 위해 파쇄를 진행하여 약 30%의 부순 FNS가 존재하였다. 또한 FNS의 내부에는 0.1~1.0mm 범위의 공극이 있으며, 이는 냉각처리 과정에서 급격한 표면경화에 기인한 것으로 보고되고 있다.

3. FNS의 입도별 치환율에 따른 모르타르의 역학적 특성 평가

3.1 실험평가 개요

Table 3 및 Table 4는 바닥용 모르타르의 배합사항과

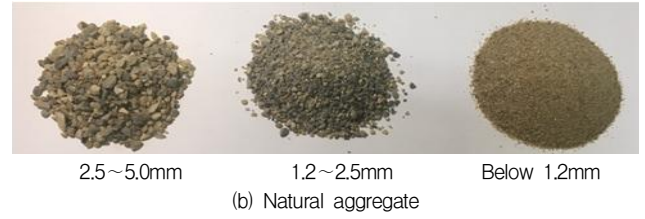
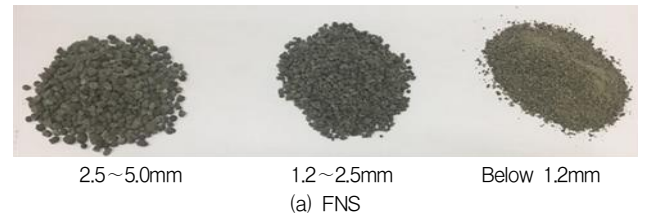


Figure 3. Grain refining of FNS

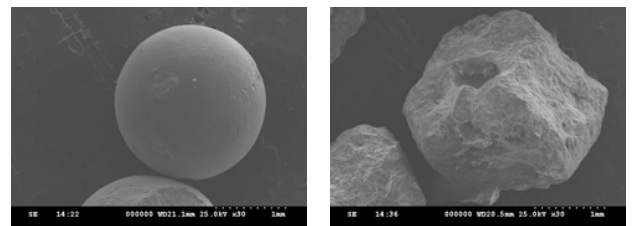


Figure 4. Grain shape of FNS (SEM image)

입도조정된 왕사, 중사, 미사별 FNS의 치환율에 따른 역학적 특성을 검토하기 위한 실험계획을 나타낸 것이다. W/DM(드라이 모르타르 총중량 대비 배합수의 비) 18%의 바닥용 모르타르를 대상으로 각 모래의 입도별 치환율을 0, 25, 50, 75 및 100%로 하여 플로, 단위용적질량, 압축강도, 수축변형량(KS F 2424) 및 알칼리 잠재 반응성(KS F 2546)을 평가하였다.

Table 3. Mix design of mortar (Plain)

W/DM(%)	Composition of dry mortar (kg/ton)			
	Binder	Sand (Size)		
		2.5~5.0mm	1.2~2.5mm	Below 1.2mm
18	250	250	250	250

Table 4. Experimental plan

Contents	Replacement of FNS (%)			Test
	2.5~5.0mm	1.2~2.5mm	Below 1.2mm	
Plain	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> Flow Unit volume weight Compressive strength
	25, 50, 75, 100	-	-	
FNS	-	25, 50, 75, 100	-	<ul style="list-style-type: none"> Dry shrinkage Potential alkali reactivity
	-	-	25, 50, 75, 100	

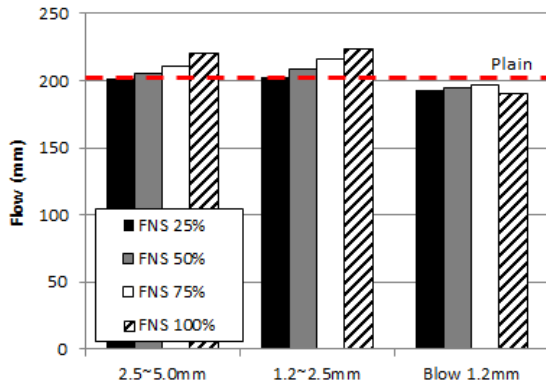


Figure 5. Flow of mortar with FNS

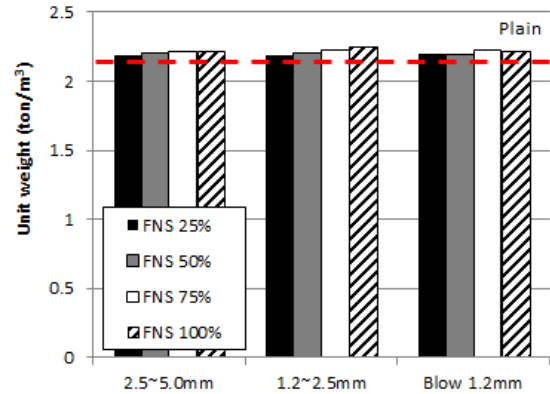


Figure 6. Unit weight of mortar with FNS

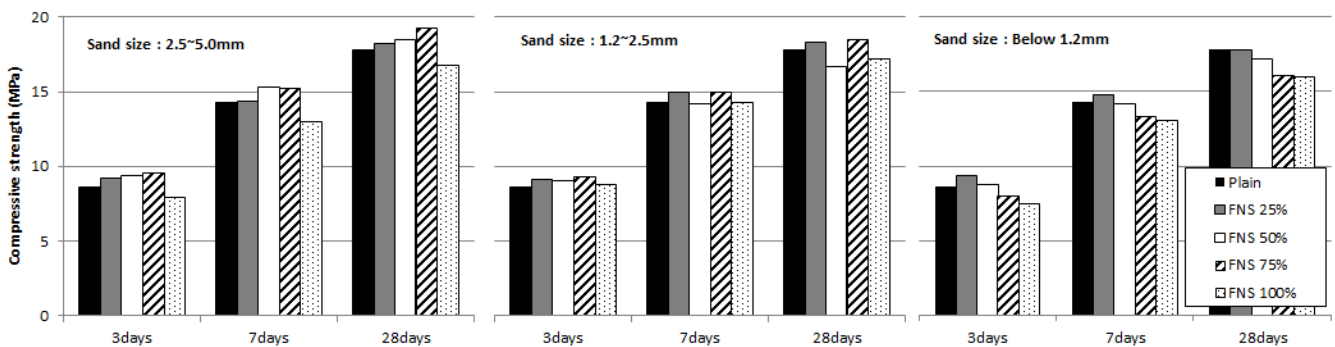


Figure 7. Compressive strength of mortar with FNS

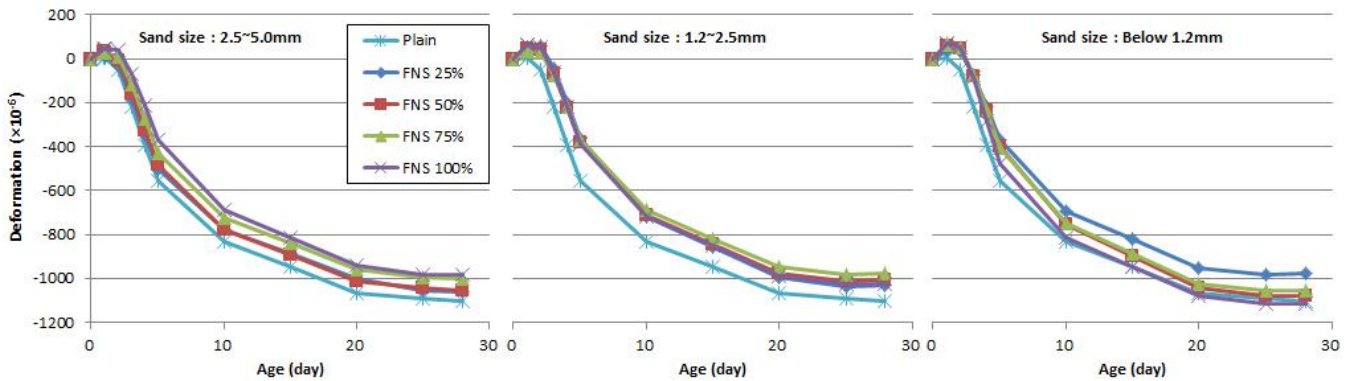


Figure 8. Drying shrinkage of mortar with FNS

본 연구에서는 여기서 도출된 결과를 바탕으로 FNS의 적정 치환율 범위를 선정하고, 현장의 타설조건 등을 고려하여 Mock-up 시험을 추가적으로 진행하였다.

3.2 FNS 치환율에 따른 특성 평가결과

Figure 5는 입도별 FNS 치환율에 따른 바닥용 모르타르의 플로를 나타낸 것이다. 왕사 및 중사의 치환율이 증

가할수록 모르타르의 플로가 증가하며 이는 FNS의 낮은 흡수율, 구형의 입형 및 골재표면의 유리질 피막에 기인하는 것으로 판단된다[8,9]. 그러나 미사(1.2mm 이하)를 치환하는 경우 골재의 흡수율 증가 등에 의해 Plain(FNS 치환율 0%) 대비 낮은 플로를 나타내었다.

FNS를 치환 혼입한 모르타르의 단위용적질량은 Figure 6에 나타난 바와 같이 약 2.19~2.22ton/m³로 FNS잔골

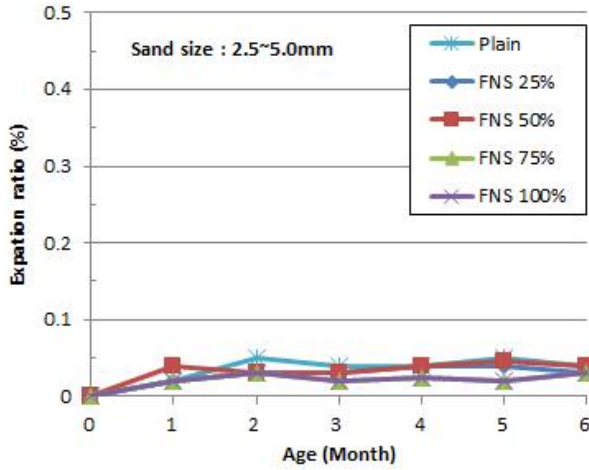


Figure 9. Expansion of mortar with FNS

재의 높은 비중에 의해 Plain(2.15ton/m^3) 대비 약 2~4% 증가하지만, 시공성 등에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Figure 7은 입도별 FNS 치환율에 따른 바닥용 건조모르타르의 압축강도를 나타낸 것이다. FNS의 왕사 치환율 75%까지는 치환율이 증가함에 따라 압축강도가 증가하였으나 왕사 치환율 100%에서는 Plain보다 낮은 압축강도 발현율을 보였다. 또한 FNS잔골재의 중사는 치환율에 관계없이 Plain과 유사한 압축강도 발현율을 보였으며 치환율 75%에서 최대 강도를 나타내었다. 반면 미사를 혼입하는 경우 치환율이 증가함에 따라 강도가 감소하였으며 치환율 50%이상의 조건에서는 Plain보다 낮은 압축강도를 보였다.

한편, Figure 8은 입도별 FNS 치환율에 따른 모르타르의 수축변형량을 나타낸 것이다. FNS잔골재의 미사 치환율 100%를 제외하고 모든 조건에서 Plain대비 약 10%의 수축저감효과를 확인하였다. 이는 FNS잔골재가 혼입되어 몰탈의 압축강도 및 강성이 향상되기 때문으로 판단된다. 또한 Figure 9는 모르타르봉 방법(KS F 2546)을 이용한 ASR 평가 결과로써, 최종 팽창율이 0.1% 이하로 나타나 FNS의 ASR 반응성은 없는 것으로 확인되었으며, 골재의 크기(왕사, 중사, 미사)별 차이는 나타나지 않았다.

본 연구에서는 FNS를 혼입한 모르타르의 최종 배합에 대해 플로, 압축강도 및 변형특성 등을 고려하여 왕사 75%, 중사 75% 및 미사 미혼입의 조건이 최적의 혼입조건으로 선정하였다.

4. FNS를 혼입한 모르타르의 Mock-up 시험평가

4.1 Mock-up 부재 제작 및 평가방법

Table 5와 같이 앞서 도출된 FNS 최적 조합(왕사 75%, 중사 75% 및 미사 미혼입)을 대상으로, 모의부재의 역학적 특성 및 충격음 차단성능을 검토하였다.

Table 5. Experimental plan and mix design of mortar (Mock-up)

Contents	W/D M (%)	Binder in dry mortar (kg/ton)	Replacement of FNS (%)		
			2.5~5.0 mm	1.2~2.5 mm	Below 1.2mm
Plain	21	250	-	-	-
FNS	18	250	75	75	-

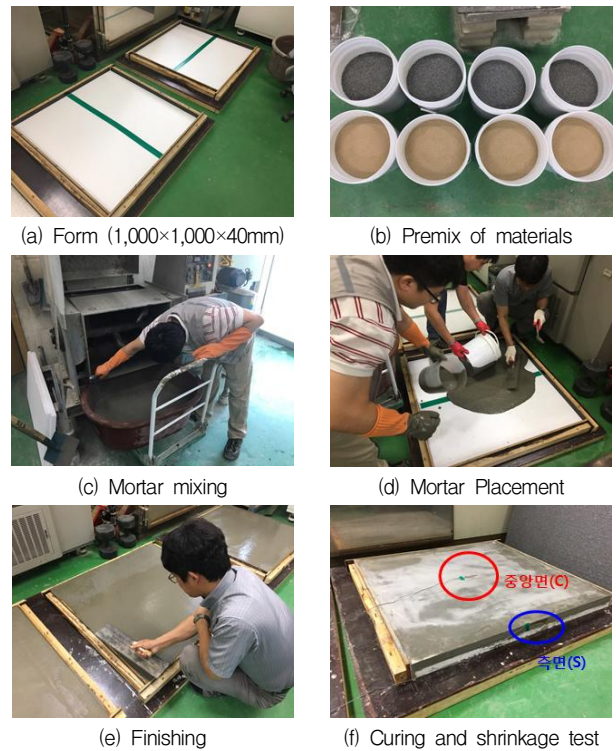


Figure 10. Production process of mock-up members

Figure 10은 Mock-up시험체의 제작과정을 나타낸 것으로, 시험체의 치수는 $1,000 \times 1,000 \times 40\text{mm}$ 로 설정하였다. 모르타르의 생산시 목표플로($240 \pm 10\text{mm}$)를 고려한 FNS 혼입 시험체의 W/DM은 18%(플로 239mm)로, Plain(W/DM 21%, 플로 238mm)과 비교하여 감소하는 효과를 확인할 수 있었다.

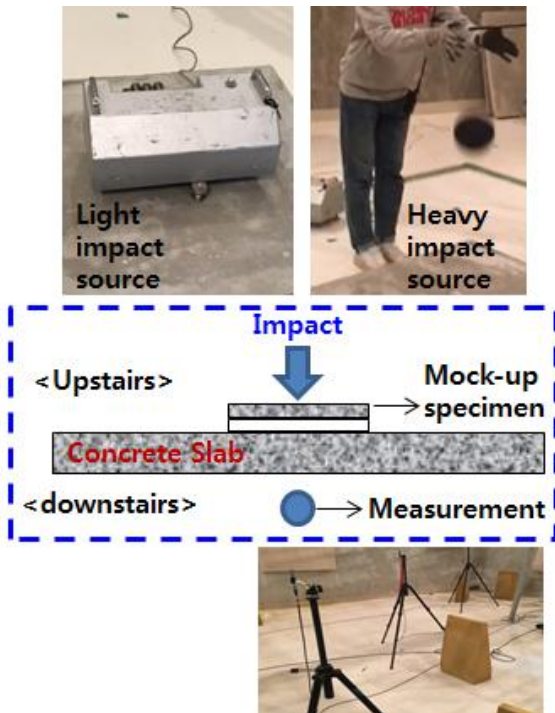


Figure 11. Standard impact sound insulation of floors

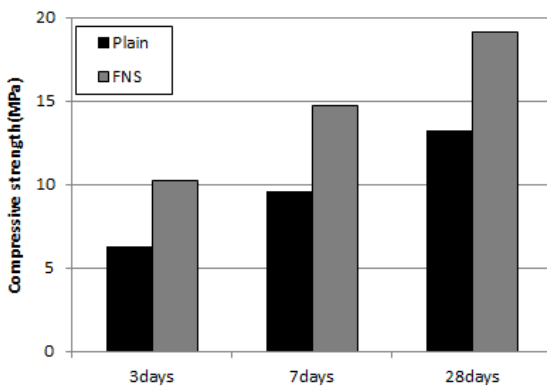
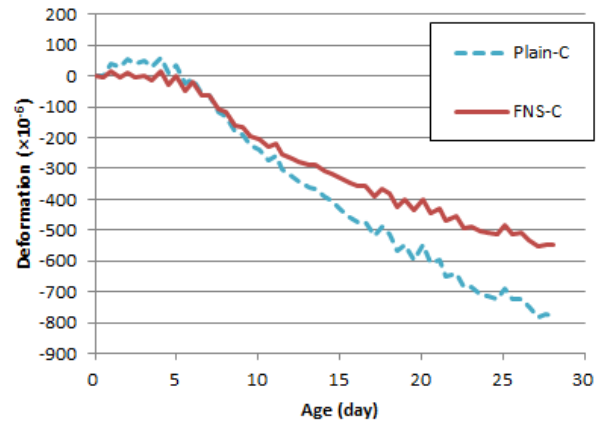
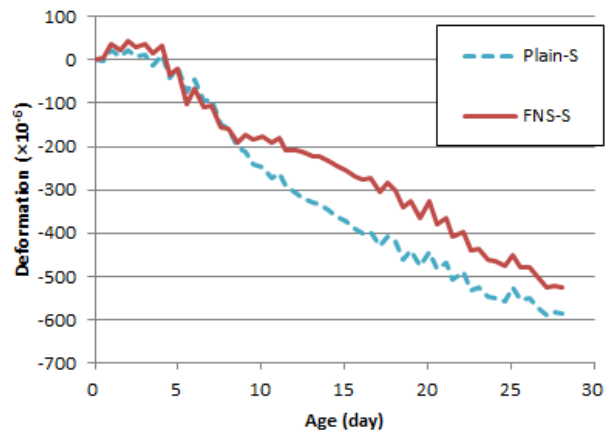


Figure 12. Compressive strength of mortar (Plain and FNS)

또한, 시험체의 성능평가에 있어 모르타르의 압축강도는 재령 3, 7 및 28일에 측정하였고, Mock-up 시험체의 건조수축은 타설 후 재령 1일에 시험체의 중앙부 및 측면에 변형게이지를 부착하여 재령 28일까지 평가를 진행하였다. 수축 평가 후 부재를 탈형하여 Figure 11과 같이 충격음 차단성능을 KS F 2810-1, 2에 준하여 실시하였다. 경량 충격원 및 중량충격원은 Tapping Machine 및 Rubber Ball을 이용하여 발생시키고, 전달된 음은 아래 층의 마이크로폰을 통해 평가·분석하였다.



(a) Center



(b) Side

Figure 13. Drying shrinkage of mock-up member

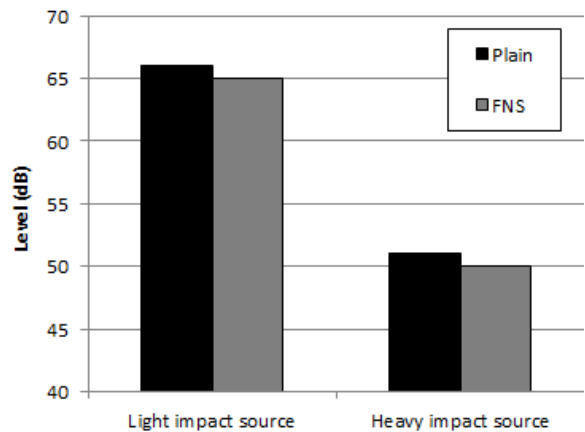


Figure 14. Impact sound of mock-up member

4.2 Mock-up 부재 평가결과

Figure 12는 Mock-up 시험체 제작용 모르타르의 압축강도를 나타낸 것으로, FNS잔골재를 혼입한 모르타르가 골재 자체의 특성 및 단위수량의 저감효과에 기인하여

Plain대비 45~60% 높은 압축강도를 발현하였다.

Mock-up시험체의 수축변형량에 있어서도 모르타르의 단위수량이 저감되고 강도가 증가되어 Figure 13과 같이 약 10~30% 수축이 저감되는 효과를 확인할 수 있었으며, 이를 통해 FNS를 적용함으로써 균열이 저감될 것으로 기대된다.

Figure 14는 FNS 혼입유무에 따른 충격음 측정결과로써, FNS를 혼입한 모르타르 부재가 일반잔골재를 혼입한 부재에 비해 1dB 감소하였다. 큰 차이를 나타내고 있지 않으나 일부 저감효과를 나타낸 것은 FNS잔골재 혼입에 따른 몰탈의 강성향상 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

- 1) FNS는 흡수율이 낮고 구형의 입형이며 표면이 유리질 피막의 특성이 있어 모르타르의 플로(시공성)를 향상시켰다.
- 2) FNS의 플로 개선효과와 골재 자체의 높은 강성은 몰탈 압축강도의 향상 및 수축저감 효과를 나타내어 균열저감 등의 품질향상에 기여할 것으로 판단된다.
- 3) FNS를 적용하는 경우, Plain 대비 동등수준 이상의 충격음 차단성능을 확보 할 수 있었다.
- 4) 향후 FNS를 활용한 산업부산물을 활용한 콘크리트용 골재는 골재부족문제에 대응하기 위한 하나의 방안이며, 이에 산업부산물 활용기술과 수급네트워크를 지속적으로 확보할 필요가 있다고 판단된다.

요 약

페로니켈슬래그 잔골재는 천연 잔골재와 유사한 특성이 있어 국내·외적으로 콘크리트 구조물에 사용되고 있으나 그 용도와 연구의 영역이 한정적이다. 이에 본 연구에서는 FNS의 활용성 확대와 모르타르제품의 성능개선을 목적으로 바닥용 건조모르타르에 대한 FNS의 적용성을 검토하고자 하였다. 실험 결과, FNS는 흡수율이 낮고 구형의 입형이며 표면이 유리질 피막의 특성이 있어 모르타르의 플로를 향상시켰다. 또한 골재 자체의 높은 강성은 몰탈 압축강도의 향상 및 수축저감 효과를 나타내어 균열저감 등의 품질향상에 기여할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 천연 잔골재를 사용한 모르타르와 비교하여 FNS를 적용하는 경우

동등수준 이상의 충격음 차단성능을 확보할 수 있었다.

키워드 : 페로니켈슬래그 잔골재, 바닥용 모르타르, 역학적 성능, 충격음 차단성능

References

1. Saha AK, Sarker PK, Compressive strength of mortar containing ferronickel slag as replacement of natural sand, *Procedia Engineering*, 2017 Feb;171:689-94.
2. 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 Jun;162:438-48.
3. Togawa K, Shoya M, Kokubu K, Characteristics of bleeding, freeze-thaw resistance and watertightness of concrete with ferro-nickel slag fine aggregate, *Journal of the Society of Materials Science*, 1996 Jan;45(1):101-9.
4. Shoya M, Aba M, Tsukinaga Y, Tokuhashi K, Frost resistance and air void system of self-compacting concrete incorporating slag as a fine aggregate, *ACI Special Publication*, 2003 Jun;212:1093-108.
5. Saha AK, Sarker PK, Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortar, *Construction and Building Materials*, 2016 Jul;123:135-42.
6. Fidancevska E, Vassilev V, Milosevski M, Parvanov S, Milosevski D, Aljihmani L, Composites based on industrial wastes III: Production of composites of Fe-Ni slag and waste glass, *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 2007 Jul;42(3):285-90.
7. Katsiotis NS, Tsakiridis PE, Velissariou D, Katsiotis MS, Alhassan SM, Beazi M, Utilization of ferronickel slag as additive in portland cement: A hydration leaching study, *Waste and Biomass Valorization*, 2015 Apr;6(2):177-89.
8. Seo DM, Kim YU, Kim TS, Kim DB, Choi JH, Choi SJ, Evaluation of the flowability and strength of mortar by replacement ratio of ferro-nickel slag sand, *Proceeding of Korea Concrete Institute*; 2013 May 16; Yeosu, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2016, p. 591-2.
9. Kim HS, Choi SW, Lee KM, Choi SJ, Compressive strength properties of steam-cured concrete using ferronickel slag fine aggregate, *Proceeding of Korea Concrete Institute*; 2015 May 14; Gwangju, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2015, p. 541-2.

10. Cho BS, Lee HH, Choi YW, Park DC, Choi YC. A study on performance of concrete using feni slag aggregate. Proceeding of Korea Concrete Institute; 2014 Oct 16; Muchangpo, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2014, p. 583–4.
11. Kim DB, Min SH, Kim JH, Ban JM, Choi SJ. Evaluation of fluidity and compressive strength of mortar bt grading variation of ferro–nickel slag sand. Proceeding of Korea Institute of Building Construction; 2017 May 11; Gyeongju, Korea, Seoul (Korea): Korea Institute of Building Construction; 2017, p. 206–7.
12. Kim YU, Kim TS, Seo DM, Kim SJ, Han JM, Choi SJ. Fluidity and strength property of mortar using ferro–nickel salg sand by mineral admixtrue replacement ratio. Proceeding of Korea Concrete Institute; 2016 May 12; Yeosu, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2016, p. 217–8.
13. Kim WJ, Hong SB, Kim PS, Cho BS. Research on the concrete using ferro–nickel slag for fine aggregate. Proceeding of Korea Concrete Institute; 2012 May 3; Gyeongju, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2012, p. 49–50.
14. Kim HS, Lee SH, Sun JS, Kim JM. A physical properties of lightweight foamed concrete according to lightweight aggregate types and foaming agent types. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2016 Aug;28(4):435–44.
15. Cho BS, Lee HS, Koo KM, Hwang YS, Seo SS, Choi YC. A study on the chemical properties of feni slag fine aggregat. Proceeding of Korea Concrete Institute; 2017 Nov 2; Andong, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2017, p. 465–6.