https://doi.org/10.14190/JRCR.2018.6.3.214

# 페로니켈슬래그 미분말 및 혼화재의 복합사용이 VR 하수관 강도발현에 미치는 영향분석

# Analysis of the influence of combined use of ferronickel slag fine powder and admixture on VR sewage pipe strength development

남상구<sup>1</sup> · 정태준<sup>1</sup> · 조설아<sup>1</sup> · 유정환<sup>1</sup> · 박상순<sup>2\*</sup> Sang-Koo Nam<sup>1</sup> · Tae-Jun Chung<sup>1</sup> · Seol-Ah Jo<sup>1</sup> · Jeong-Hwan Yoo<sup>1</sup> · Sang-Soon Park<sup>2\*</sup>

(Received September 13, 2018 / Revised September 28, 2018 / Accepted September 28, 2018)

In this paper, the effects of ferronickel slag powder and admixture on the strength of VR sewer pipe were analyzed. the substitution rate was tested as a variable, and the strength development was studied through the flexural strength, compressive strength and using SEM microscopic analysis. bending strength, compressive strength results and micro analysis using SEM showed the correlation in each case. the substitution rates were 20% and 30% relative to the mass of the OPC respectively, and were substituted according to a constant ratio of ferronickel slag fine powder and mixture, when the substitution ratio was 20%, the strength development was excellent. also, bending strength and compressive strength were the best when the ferronickel slag fine powder, quicklime, gypsum and calcium chloride were used as the admixture, dense microstructural patterns appeared. the possibility of progressive strength development is shown after 28 days.

키워드: 페로니켈슬래그미분말, 혼화재, 복합사용, 강도발현

Keywords : Ferronickel slag fine powder, Admixture, Composite use, Strength development

## 1. 서 론

2013년 기준으로 전국에 부설된 하수관은 126,646km이다. 이 중 원심력관(reinforced spun concrete pipe, 흄관)과 진동 및 전 압 철근콘크리트관(vibrated and rolled reinforced concrete pipe, VR관) 등 콘크리트 강성관은 46,030km로서 36,3%를 차지 하고 있다(Ministry of Environment 2014). 하수관로는 주로 도로 하부와 같은 지하에 매설되어있으며, 기존 지하매설물이 인접하게 위치하고 있다(Ehsani et al. 2015; Emilia and Maria 2013; Lee et al. 2002). 이에 지반의 부동침하나 차량 통행에 따른 진동 등으 로 인하여 이음부 또는 특정 부위에 이상이 생기는 경우가 있어서 이를 하수관 내부에서 보수해야 되는 상황이 발생하기도 한다 (Allouche et al. 2014; Duell et al. 2008; Davies et al. 2001). 이에 따라 콘크리트 강성관의 성능개선 및 수명 증대 방안에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다.

현재까지 습식배합을 기반으로 한 흄관에 비해 건식배합 기반 의 VR관에 대한 연구는 상대적으로 부족한 편이었는데, 건식배합 으로 시험편을 제조할 수 있는 별도의 진동전압 성형기가 필요했 기 때문이다(Park 2017).

고로 슬래그 및 플라이 애쉬를 분쇄 한 것은 일반적으로 내구성 개선에 효과적이었다(Yüksel et al. 2007; Li and Zhao 2003). 본 연구에서는 기존의 혼화재료 외에 새로운 재료인 페로니켈슬래그 (ferronickel slag) 미분말에 주목하게 되었다. 페로니켈 슬래그는 스테인리스 강 및 니켈 합금 제조 시 배출되는 산업 잔류물의 일종 이다(Maragkos et al. 2009).

페로니켈 슬래그는 물리적, 화학적 성질이 우수한 친환경적 자 원으로 국내에서는 주로 콘크리트용 잔골재 및 농업용 비료로도 재활용되고 있다. 그러나 약 10%에 달하는 분쇄 시 미분은 뚜렷한

\* Corresponding author E-mail: parkss87@smu.ac.kr

<sup>1</sup>상명대학교 건설시스템공학과 석사과정 (Department of Civil Engineering, Sangmyung University, Cheonan, 31066, Korea) <sup>2</sup>상명대학교 건설시스템공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Sangmyung University, Cheonan, 31066, Korea)

Copyright © 2018 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

재활용처를 찾지 못하여 대부분 폐기되는 실정이다(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs 2011). 철강금속인 고로슬래 그가 물과 접할 경우 표면에 불투수층이 생성되어 더 이상의 반응 을 차단하는 역할을 한다. 비철금속인 페로니켈슬래그도 물과 반 응하지 않기 때문에 콘크리트용 혼화재료로는 적용에 한계가 있 다. 그러나 최근 분쇄밀의 기계적 연마 작용이 페로니켈 슬래그의 표면을 자극함으로써 물과의 반응성이 활성화되는 메카노케미 (mechano - chemical) 반응에 의해 페로니켈슬래그 미분말을 시 멘트의 치환재료로 사용할 수 있는 가능성이 보고되었다(Park et al. 2013; Sereenen 2013).

본 연구는 페로니켈슬래그 미분말 및 혼화재의 치환비율에 따 른 콘크리트 하수관의 강도발현 성능검토를 목표로 한다. 생석회, 석고 및 염화칼슘 등과 같은 혼화재 종류 및 치환율을 실험변수로 하여, 시험편의 압축 및 휨강도 평가를 통한 페로니켈슬래그 미분 말 및 혼화재의 복합사용 시 강도발현 효과를 실험하적으로 확인 하고, SEM분석 등 미시적 분석을 통해 근거를 분석하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험 재료

| Table | 1. | Chemical | compositions | for | OPC | and | FNS |
|-------|----|----------|--------------|-----|-----|-----|-----|
|-------|----|----------|--------------|-----|-----|-----|-----|

| Types | SiO <sub>2</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | CaO(%) | MgO(%) | Blaine(cm <sup>2</sup> /g) |
|-------|----------------------|------------------------------------|--------|--------|----------------------------|
| OPC   | 21.96                | 5.27                               | 63.41  | 3.01   | 3510                       |
| FNS   | 54.42                | 6.74                               | 3.36   | 31.14  | 3560                       |



Fig. 1. Experiment material : (a) OPC (b) FNS (c) G and (d) C&L

시멘트는 국내에서 제조한 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC)로 H사 제품을 사용하였고, 페로니켈슬래그 미분말(이하 FNS)은 H사 의 제품을 사용하였다. 페로니켈슬래그를 1차 분쇄한 FNS로 P사 에서 야적된 페로니켈 슬래그를 H 시멘트사의 분쇄밀로 분쇄한 재료로서 분말도는 3560cm<sup>2</sup>/g이다. OPC와 FNS의 화학적 구성 은 Table 1에 나타냈다.

기존의 선행된 많은 실험과 현재 많이 사용되는 페로니켈슬래 그를 잔골재로 사용하는 것 보다 FNS는 메카노케미컬 작용에 따 른 기계·화학적 활성화 작용에 따라 물과의 반응성이 확인되었으 며, 포졸란 반응을 일으킨다. SiO<sub>2</sub>와 MgO의 함유량이 높지만 CaO 의 함유량은 적게 나타난다. 본 연구에서는 위와같은 단점을 보완 하여 FNS로 치환하여도 강한 강도를 발휘하기 위하여 여러 혼화 재를 복합사용 하여 강도를 발현할 수 있는지에 대한 연구를 진행 하였다. FNS 이외의 혼화재로는 Fig. 1에서와 같이 분말 형태의 D사의 생석회, CaO (이하 C),염화칼슘, CaCl<sub>2</sub> • 2H<sub>2</sub>O(이하 L) 및 D사의 석고, CaSO<sub>4</sub>(이하 G)를 사용하였다.

잔골재는 충남 공주 강모래, A사의 부순 모래와 최대 입자 크기가 8mm정도의 석분을 잔골재를 40kg 기준 120(±5)℃에서 36시간 건 조시켜 사용하였으며, 혼화제는 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

### 2.2 실험배합 및 제작

본 실험은 국내 VR하수관 제작 시 건식배합을 사용하기 때문에 물-결합재비를 최소화 하기 위해 선행 연구를 진행하였다. 또한 잔골재의 표면수량이 변수로 작용되지 않기 위하여 완전건조를 진행하였으며 이로 인하여 필요 수량이 선행연구의 물-결합재비 32% 보다 증가된 38%로 지정하였다. FNS와 혼화재의 복합사용으 로 강도발현의 정도를 알아보기 위하여 Table 2와 같이 OPC를 기준으로 FNS를 시멘트 중량비로 20% 치환한 배합을 F20로 지칭 하였고, 치환된 FNS 중 일부를 일정 비율에 따라 C, G, L의 혼화재

| Table | 2. | Mix | proportions | for | mortar | specimens | rep | lacement | rate | 20%) |
|-------|----|-----|-------------|-----|--------|-----------|-----|----------|------|------|
|-------|----|-----|-------------|-----|--------|-----------|-----|----------|------|------|

| Mirr     | W/B |     | LA  |    |    |    |   |     |  |
|----------|-----|-----|-----|----|----|----|---|-----|--|
| IVIIX.   | (%) | W   | OPC | FN | C  | G  | L | Au  |  |
| OPC      | 38  | 121 | 318 | -  | -  | -  | - | 5.9 |  |
| F20      | 38  | 121 | 254 | 64 | -  | -  | - | 5.9 |  |
| F15C5    | 38  | 121 | 254 | 48 | 16 | -  | - | 5.9 |  |
| F10C10   | 38  | 121 | 254 | 32 | 32 | -  | - | 5.9 |  |
| F10C5G5  | 38  | 121 | 254 | 32 | 16 | 16 | - | 5.9 |  |
| F10G10   | 38  | 121 | 254 | 32 | -  | 32 | - | 5.9 |  |
| F9C5G4L2 | 38  | 121 | 254 | 29 | 16 | 13 | 6 | 5.9 |  |

| Mix       | W/B |     | Ad  |    |    |    |    |     |
|-----------|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|
| IVIIX.    | (%) | W   | OPC | FN | C  | G  | L  | Au  |
| OPC       | 38  | 546 | 318 | -  | -  | -  | -  | 5.9 |
| F30       | 38  | 546 | 223 | 95 | -  | -  | -  | 5.9 |
| F22C8     | 38  | 546 | 223 | 70 | 25 | -  | -  | 5.9 |
| F15C7G5   | 38  | 546 | 223 | 48 | 22 | 25 | -  | 5.9 |
| F15G15    | 38  | 546 | 223 | 48 | -  | 47 | -  | 5.9 |
| F13C8G6L3 | 38  | 546 | 223 | 41 | 25 | 19 | 10 | 5.9 |

Table 3. Mix proportions for mortar specimens(replacement rate 30%)



Fig. 2. Vibrated and rolled manufacturing process : (a) mixing, (b) input, (c) vibrating and rolling, (d) demolding



humidity chamber, (b) cycle of curing time

를 혼합하여 복합사용 하였다.

또한 위와 같은 방법으로 OPC를 30% FNS로 치환한 Table 3과 의 치환율과 복합사용에 따른 상관관계를 분석했다.

본 연구의 사용된 배합은 현재 VR관 제작시 적용되고 있는 배 합을 기초로 하였으며, VR관 제작이 건식배합을 우선적으로 하기 때문에 물-결합재 비를 최소화 하여 배합을 선정하였다. 현재 국 내에서는 VR관 제작 시 슬럼프가 거의 발생하지 않는 건식배합을 적용하며 본 연구에서는 실제 VR관 제작방식과 동일하게 시편을 제작할 수 있도록 진동전압 성형기를 이용하여 시편을 제작하였 다. 사용된 진동전압 성형기는 국내 D사에서 제작한 장치를 이용 하였고, 이 장치는 초당진동수 60Hz 및 5.49~5.89MPa로 진동 및 전압을 가하여 빠른 시간 내에 동일크기의 시편을 일정한 조건 속에서 제작 할 수 있다. 시편의 제작방법은 첫 단계로 모르타르 믹서에 재료를 투입하고 2분간 건비빔 후 1분 30초간 배합표상의



Fig. 4. Experimental equipment of flexural strength test



Fig. 5. Experimental equipment of compressive strength test

물을 넣어 혼합한다. 다음 단계로 진동전압 성형기에 혼합한 시료 를 투입하고 1분 30초간 전압 후 진동다짐을 한다. 마지막으로 전 압을 제거하고 시험편을 탈형한다. 이러한 시편의 제작단계는 Fig. 2에 나타내었다.

탈형한 시편은 관 제작시 사용하는 양생과 흡사하도록 1차 실내 양생을 500℃를 표준으로 하여 항온 항습기에 넣어 2시간 동안 25℃에서 65℃로 완만하게 온도를 상승한 후 6시간 동안 65℃로 유지한 후 2시간 동안 25℃로 온도를 하강하는 사이클로 증기양생 을 실시하였다. 이러한 사이클의 증기양생은 KS F 4402에서 규정 한 기준을 따른 것이며 Fig. 3에 나타냈다.

#### 2.3 실험방법

### 2.3.1 휨 강도

휨 강도 평가는 재령 1, 3, 7, 28일에 시편을 KS F 2476과 KS F 4042에서 규정한 기준을 따라 수행하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 40mm x 40mm x 160mm의 모르타르용 각주형 휨강도 시편 을 이용하여 지간거리 100mm인 시험용 지그(Jig)를 사용하여 중 앙점 재하시험을 진행하였다. 각 3개의 시편을 H사의 UTM기기를 사용하여 시험하였고, 결과 값을 평균하여 분석하였다.

#### 2.3.2 압축 강도

압축 강도 평가는 휨 강도와 마찬가지로 재령 1, 3, 7, 28 일의 KS F 2476과 KS F 4042에 따라 수행하였다.

Fig. 5와 같이 각주형 시편으로 휨 강도시험 후 쪼개진 시편으로 시험을 진행하였고, 총 6개의 시편의 압축강도를 평균하여 분석을



Fig. 6. SEM(Scanning Electron Microscope)

진행하였다.

#### 2.3.3 SEM(Scanning Electron Microscope)분석

SEM분석에 사용된 시편은 압축강도 시험 후 파편으로 진행하였다. 10mm 정도의 시편의 파편 중 평편하게 파괴되어있는 파편을 골라, 표면을 Air gun으로 부순물을 제거한 후 초기에 전처리 장치로 시편 표면에 도금처리 후 SEM으로 분석하였다. 시험장비는 Fig. 6의 같이 국내 S사에서 제조한 SNE-3200M 장치를 사용하여 1000~2000배의 배율에서 시편의 여러 구간과 각도에서 미세구조를 면밀히 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 휨강도 발현성상

휨강도 시험은 재령 1,3,7,28일의 각 경우 별 3개의 시편으로 시험을 진행하였고, Fig. 7 부터 Fig. 10에 휨강도 시험 결과를 도식 화 하여 나타내었다. Fig. 7 및 Fig. 8은 OPC기준으로 FNS 및 혼화 재를 20% 치환한 시편의 휨강도를 나타낸 것이며, Fig. 9 및 Fig. 10 은 OPC기준 30%를 혼화재로 치환한 시편의 휨강도를 나타내 었다. 각 경우 별 3개의 시편으로 시험을 진행하였으며 평균값으 로 휨강도를 측정하였다.

Fig. 7은 OPC 기준 FNS 및 혼화재를 20% 치환하여 제작한 시 편의 휨 강도 결과를 보여준다. 물-결합제비 38%의 OPC의 모르 타르 시편은 재령 28일이 지난 후 에도 3MPa의 낮은 휨 강도를 나타냈다. OPC 휨강도 결과와 FNS 및 C, 소량의 G를 혼합한 시편 은 비슷한 경향을 보이며, 재령 28일의 휨 강도 결과가 크게 차이 나지 않는다. 반면 FN20 결과를 보면 초기의 휨강도에서 차이가 나지 않지만 재령 28일이 지난 후에 OPC보다 높은 휨 강도를 나타 냈다. 또한 FNS와 G의 함유비율을 동등하게 배합한 시편은 OPC에 비해 2.7배가량 높은 휨강도가 나타났다. 또한 FNS와 C, G, L를 복합적으로 배합한 시편 또한 OPC보다 높은 강도를 나타냈다. Fig. 8은 상기 경우를 재령 1일의 OPC의 휨 강도를 기준한 휨





Fig. 8. Flexural strength ratio(replacement rate 20%)







강도비로 나타냈다. OPC는 재령 3일에서 점차 증진 될 것으로 보 였으나 재령 7일부터 재령 28일까지 큰 변화가 없는 결과가 나타 났다. FN20은 초기 OPC보다 작은 휨 강도를 나타내었지만 양생기 간이 지날수록 거의 일정한 기울기를 가지며 꾸준히 증가하는 것 을 보인다. FNS와 G의 함유비율을 동등하게 배합한 F10G10은 초 기부터 OPC보다 높은 휨강도를 보였으며 큰 기울기로 가장 높은 강도 증진율을 보여줬다. 또한 FNS, C, G, L를 모두 혼합한 시편은 초기부터 높은 휨강도를 나타냈으며, 기울기는 가장 기울기가 큰 F10G10보다 완만하지만 OPC에 대비하여 강도 증진율이 높은 것 으로 나타났다.

Fig. 9.는 FNS 및 혼화재 30%치환한 모르타르시편의 결과 값을 나타낸 것이다. 앞서 언급한 FNS 및 혼화재를 20%치환한 모르타 르에 비해 휨 강도 발현이 저하 된 것을 볼 수 있다.전반적으로 비슷한 경향으로 낮은 휨 강도보이며 휨 강도의 큰 차이를 발견할 수 없었다. 그 중에서 OPC기준으로 20% 치환한 모르타르와 30% 치환한 모르타르 모두 FNS과 G의 치환률의 같은 비율로 절반씩 혼입한 시편이 가장 휨 강도가 우수한 경향을 보였다. 반면 FNS 및 혼화재의 치환율이 높아질수록 휨 강도가 낮아짐을 확일 할 수 있다.

Fig. 10은 재령 1일의 OPC의 휨 강도를 기준으로 FNS 및 혼화 재를 30% 치환하여 혼합한 시편의 휨 강도비로 나타내었다. F15G15 및 F13C8G6L3는 비슷한 기울기로 강도비가 증가하는 것 을 볼 수 있다. F13C8G6L3은 초기부터 우수한 강도를 나타내었고 재령 28일까지 큰 폭의 변화 없이 유지 되었다. 이는 속경성이 우 수하며 강도증진에도 높게 작용하는 결과로 볼 수 있다. 반면 이를 제외한 다른 시편은 OPC와 비슷한 경향의 곡선을 확인할 수 있었 고, 휨 강도 발현에 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

위의 두 가지 경우의 휨강도 시험 결과로 보았을 때 FNS의 혼입 한 시편은 초기에는 오히려 OPC보다 낮은 휨강도를 보였지만 전 체 재령에서 보편적으로 휨 강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 G를 혼화재로 사용하였을 경우 강도증진에 우수한 결과를 나타냈 다. 하지만 치환율이 높을수록 휨 강도 발현이 더디고 낮은 결과를 보아 OPC기준 30%이상의 치환은 부적절하다고 사료된다.

### 3.2 압축강도 발현성상

압축강도 시험은 앞서 진행한 휨강도와 같이 2가지(치환율 20%, 30%)로 제작된 시편으로 재령 1, 3, 7, 28일에 진행하였으며 그 결과는 Fig. 11 부터 Fig. 14와 같다.

Fig. 11의 결과를 보면 재령 28일에서 OPC와 비교해 보았을 때 F10G10과 F9C5G4L2의 압축강도가 높게 나타났다. G를 포함한 시편은 재령 28일의 압축강도에서 OPC와 비슷한 강도이거나 높은 강도를 나타냈다. G의 양이 많이 포함되어야만 높은 압축강도가 나오는 것은 아니다. 적절한 비율의 C, G와 L을 포함한 F9C5G4L2





Fig. 12. Compressive strength ratio(replacement rate 20%)



Fig. 13. Compressive strength(replacement rate 30%)



Fig. 14. Compressive strength ratio(replacement rate 30%)

은 재령 28일에서 27.43MPa의 가장 강한 압축강도를 나타냈다. 반면 G를 포함하지 않은 시편은 모두 재령 28일에서 OPC보다 낮 은 압축강도를 나타냈다. 오히려 C를 포함한 시편의 압축강도는 FNS만 혼입한 시편보다 낮은 압축강도발현을 볼 수 있다. Fig. 12는 재령 1일의 OPC의 압축강도를 기준으로 20%를 FNS 및 혼화재로 치환한 시편의 압축강도 비를 볼 수 있다. 재령 1일에 서 OPC와 비슷한 압축강도 결과를 보인시편들의 재령 28일에서 의 강도는 OPC보다 낮은 압축강도를 나타냈다. 또한 이 결과로 보았을 때 치환율이 커질수록 재령 28일까지의 압축강도 발현은 저조한 것으로 사료된다. F10C10은 가장 기울기가 작은 강도로 C의 함유량이 커질수록 강도에 부정적인 결과를 초래한 것으로 보인다. G를 혼화재로 사용한 시편은 압축강도비는 초기부터 강한 압축강도를 보였으며 F10C5G5의 결과를 보면 재령 3일까지는 급 격히 증가하지만 그 이후부터는 강도의 증진이 감소하는 기울기를 나타낸다. G의 사용양이 많은 F10G10시편을 보면 거의 직선의 형 태로 초기부터 재령 28일까지 일정하게 압축강도가 증가하는 것 을 볼 수 있으며, L의 혼화재를 복합적으로 사용한 F9C5G4L2의 경우도 초기부터 재령 28일까지 큰 폭의 압축강도비 상승의 결과 를 볼 수 있다.

Fig. 13은 FNS 및 혼화재를 OPC대비 30%치환한 시편의 압축 강도 결과로 상기 다뤘던 20%를 치환한 시편과 흡사한 결과를 보 인다. OPC를 20%치환한 결과보다 낮은 압축강도로 분석되지만 OPC 보다 압축강도가 증가된 것으로 나타났다. 초기 재령 1일에서 우수한 압축강도를 보인 F13C8G6L3은 OPC의 초기강도에 비해 4.2배가량 높게 나타났지만, 재령 28일에서 1.1배의 극소의 차이만 을 보였다. 이 배합에서도 C 혼화재의 복합사용은 FNS만의 함유 한 것 보다 낮은 압축강도 결과를 나타냈지만, G 혼화재를 소량 섞어줌에 따라 거의 흡사한 압축강도가 나타났다.

Fig 14.는 Fig 12.보다 확연한 결과를 보여준다. OPC를 기준으 로 위쪽에 자리한 시편은 G 혼화재를 혼합한 시편이며그 중 가장 압축강도비가 높은 것은 L 혼화재를 포함한 여러혼화재가 복합사 용 된 F13C8G6L3이다. 초기부터 월등히 높은 압축강도를 나타낸 두 경우는 일정하게 재령 28일까지 압축강도가 증가했다. 반면 FNS만 함유한 F30과 C 혼화재를 혼입한 경우는 OPC 압축강도비 의 아래쪽에 자리했다. F30은 초기에 낮은 압축강도비를 가졌지만 재령 3일 이후 기울기가 커진 압축강도비를 볼 수 있다. 이후 완만 한 기울기를 가졌지만 초기에 포졸란 반응이 일어나지 않고 최소 3일 이후에 반응을 일으켜 압축강도 증진이 된다는 것을 알 수 있다.

#### 3.3 SEM 분석

SEM(Scanning Electron Microscope)분석은 배율은 1000배 및 2000배로 미세구조를 분석하였으며, 시편의 재령 1일 및 28일



Fig. 15. The microstructure of OPC : (a) 1 day microstructure of OPC (b) 28 day microstructure of OPC

(a) (b)



Fig. 16. The microstructure of FN20 & FN30 : (a) 1 day microstructure of FN20, (b) 28 day microstructure of FN20, (c) 1 day microstructure of FN30, (d) 28 day microstructure of FN30

의 시편을 분석하였다.

Fig. 15는 OPC의 미세구조를 나타낸 것이다. Fig. 15.(a)를 보면 재령 1일의 OPC는 실리카겔로 수화반응이 아직 끝나지 않은 구조 를 띄고 있다. 공극과 기공이 커서 조밀한 구조체로 보이지 않는다. 이로 인하여 휨 및 압축강도의 발현이 되지 않은 상태가 설명된다.

Fig. 15.(b)의 보면 에트링자이트 (ettringite)와 모노설페이트 (monosulfate)를 확인할 수 있다. 모노설페이트(mono- sulfate) 의 생성으로 보았을 때 수화도는 감속기에 들어간 것으로 생각된다.

Fig. 16은 FNS만 혼입한 시편의 미세구조를 분석한 사진이다. 초기 반응은 두 경우 모두 비슷했다. 에트링자이트(ettringite)는 보 이지 않았고, C-S-H수화물이 응집된 듯한 형태를 나타내고 있으 며 다수의 공극이 관찰되었다. Fig. 15(b).와 다른 점은 재령 28일 에 에트링자이트(ettringite)가 관찰되지 않았고, 넓은 판의 형태에 작은 구형 및 판형 입자가 붙어있는 형태만 관찰되었다.

휨 강도 및 압축강도에서 가장 작은 강도결과를 나타낸 Fig. 17 의 F10C10이다. 재령 1일의 미세구조를 살펴보면, 수화생성물이 생 성되는 듯하나 오히려 결합되지 않고 불안한 형태의 입자들을 관찰 할 수 있었다. 공극 또한 타 배합에 비해 차지하는 면적이 가장



Fig. 17. The microstructure of FN20 : (a) 1 day microstructure of F10C10 (b) 28 day microstructure of F10C10



(c) (d) Fig. 18. The microstructure of F10G10 & F9C5G4L2 : (a) 1 day microstructure of F10G10, (b) 28 day microstructure of F10G10, (c) 1 day microstructure of F9C5G4L2, (d) 28 day microstructure of F9C5G4L2

넓었다. 또한 재령 28일에는 작은 판 모양들이 얽히고 설켜 있는 형태였다. CaO를 첨가함에 따른Ca(OH)2 수화물로 보였으며, 공극 은 재령 1일과 비교하여 오히려 작은 공극이 더욱 많이 생성되었다.

Fig. 18은 휨강도 및 압축강도에서 재령 1일부터 우수한 강도를 나타낸 F10G10와 F9C5G4L2의 미세구조 이다. 재령 1일의 미세구 조는 두 시편 모두가 조밀한 구조를 하고 있으며, 공극 또한 적게 나타났다. C-S-H수화물로 가득 차 있는 모습이며, 특히 F9C5G4L2에서는 에트링자이트(ettringite)가 관찰되었다. 이는 속 경성이 우수하여 초기부터 반응을 시작하였다고 사료되며, F10G10는 에트링자이트(ettringite)가 간혹 관찰되었다. 재령 28일 에서는 두 경우 모두 공극이 거의 없는 판형태의 모습을 띄고 있었 으며, 특히, F9C5G4L2의 판 표면에서 극도로 작은 가시형태의에 트링자이트(ettringite)가 융털처럼 분포되어 있는 것을 관찰했다. 이로 차후로 수화반응이 더 일어날 수 있고, 압축 및 휨강도가 증가 할 수 있다고 사료된다.

### 3.4 혼화재의 복합사용에 따른 영향 분석

위 시험들을 통하여 종합적으로 검토해보았을 때, FNS와 혼화 재를 복합 사용할수록 강도증진에 효과가 있다. 이 메카니즘의 핵 심은 CaSO₄을 혼화재를 사용했을 때 충분한 수화반응이 일어났다 고 사료된다. CaSO4에 포함된 SO4<sup>2-</sup>가 용출 후 사용되어 초기 Ettringite 생성과 파괴를 반복시켜 C3A의 매우 빠른 수화반응 속 도를 늦추게 된다. 이로 인해 시멘트의 반응속도는 비교적 느려지 게 되므로 FNS의 포졸란 반응을 일으킬 수 있는데 충분한 시간을 가지게 되며, 분리된 Ca<sup>2-</sup> 가 FNS에 부족한 CaO성분으로 대체되 어 OPC 보다 우수한 휨 및 압축강도를 발현한다. 여기에 CaCl2・ 2H2O 혼화재의 성분 중 2H2O가 분리되어 FNS가 양생 중 포졸란 반응을 할 수 있는 충분한 수분을 공급해주는 역할을 하여, 치밀한 구조를 이루게 한다. FNS와 혼화재를 복합 사용하는 경우를 SEM 분석결과로 보았을 때, 재령 28일 이후에도 계속 강도발현이 진행 될 것으로 사료되며, 초기에는 다소 가파른 기울기의 강도변화비 가 나타났다면, 점차 완만한 곡선을 나타내며 반응을 끝낼 것으로 생각된다.

### 4. 결 론

페로니켈슬래그 미분말 및 혼화재의 복합사용이 VR 하수관 강 도발현에 미치는 영향분석을 알아보기 위해 강도시험 및 미시 분 석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 페로니켈슬래그 미분말과 혼화재를 복합사용은 치환율 20%
  일 때, 강도발현 성능이 우수하다.
- 휨 강도와 압축강도 결과를 종합적으로 보면, 혼화재로 석고 를 사용하였을 때 강도발현 성능이 발휘하지만, 페로니켈슬래 그 미분말, 생석회, 석고, 염화칼슘을 혼화재로 복합사용 하였 을 때 강도발현 성능효과가 극대화 되었고, 석고와 페로니켈 슬래그 미분말을 혼화재로 사용하였을 때 보다 우수하다.
- 미시분석 결과 페로니켈슬래그 미분말 과 혼화재를 복합사 용 할 경우 조밀한 미세구조 형태를 나타냈고, 재령 28일이 후에도 강도발현 가능성이 보인다.
- 4) 페로니켈슬래그 미분말 의 메카노케미컬의 작용에 따른 기계 화학적 작용으로 생성되는 반응 형성물의 종류와 강도 발현의 연관성, 장기강도증진의 관련성은 차후 XRD 분석과 SEM 분 석을 병행하여 분석하는 방향으로 연구를 진행할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술 국토교통 기술지역특성화 사업의 연구비지원(과제번호 18RDRP-B103026-06)에 의해 수행 되었습니다.

### References

- Allouche, E., Alam, S., Simicevic, J., Sterling, R., Condit, W., Matthews, J., Selvakumar, A (2014). A pilot study for retrospective evaluation of cured-in-place pipe(CIPP) rehabilitation of municipal gravity sewers, Tunnelling and Underground Space Technology, **39**, 82–93.
- Davies, J.P., Clarke, B.A., Whiter, J.T., Cunningham, R.J. (2001). Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes, Urban Water, **3(1–2)**, 73–89.
- Duell, J.M., Wilson, J.M., Kessler, M.R. (2008). Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 85(11), 782–788.
- Ehsani, M. (2015). Repair of corroded/damaged metallic pipelines using fiber-reinforced polymer composites, Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer(FRP) Composites, 39–59
- Emilia, K., Maria, G. (2013). Buckling failure numerical analysis of HDPE pipes used for the trenchless rehabilitation of a reinforced concrete sewer, Engineering Failure Analysis, **32**, 106–112.

Lee, D.G., Chin, W.S., Kwon, J.W., Yoo, A.K. (2002). Repair of

underground buried pipes with resin transfer molding, Composite Structure, 57(1-4), 67-77.

- Li, G., Zhao, X. (2003). Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag, Cement and Concrete Composites, **25(3)**, 293–299.
- Maragkos, I., Giannopoulou, I.P., Panias, D. (2009). Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers, Minerals Engineering, **22(2)**, 196–203.

Ministry of Environment. (2014). Sewer Statistics.

- Park, S.H., Chu, Y.S., Song, H., Lee, J.K., Seo, S.K. (2013). Fabrication of Mg(OH)<sub>2</sub> from ferro-nickel slag, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, **22(1)**, 42-47 [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 Institute for Structural Maintenance and Inspection, **29(6)**, 633–640 [in Korean].
- Sereenen, O. (2013). A Study on the Utilization of Mechanically Activated Ferro-nickel Slag, Ph.D Thesis, Suncheon National University.
- The Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. (2011). Technical Development and Products for Agricultural Utilization from Ferro–Nickel Slag, Technical Report of MIFAFF, 3–6 [in Korean].
- Yüksel, İ., Bilir, T., Özkan, Ö. (2007). Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate, Building and Environment, 42(7), 2651–2659.

### 페로니켈슬래그 미분말 및 혼화재의 복합사용이 VR 하수관 강도발현에 미치는 영향분석

본 논문에서는 페로니켈슬래그 미분말 및 혼화재의 복합사용이 VR 하수관 강도발현에 미치는 영향분석에 관한연구를 실시하였다. 치환율을 변수로 시험을 실시하였으며, 휨강도 및 압축강도의 결과분석과 SEM 분석을 통한 강도발현 성능연구를 실시하였다. 회장도 및 압축강도, SEM을 통한 미시적 분석을 통해, 각 경우 별 상관관계를 도출 할 수 있었다. 치환율은 OPC 질량대비 20%, 30%를 구분하여 페로니켈 슬래그 미분말 및 혼화재를 일정 비율로 치환하여 실시하였다. 치환율 20%일 경우 강도발현 성능이 우수한 것으로 나타났으며, 휨 강도와 압축강도는 페로니켈 슬래그 미분말, 생석회, 석고, 염화칼슘을 혼화재로 복합사용 하였을 때 강도발현 성능이 가장 우수하였으며, 조밀한 미세구조 형태를 나타냈고, 재령 28일 이후에도 점진적 강도발현 가능성이 보인다.