

# 나노실리카 및 실리카흄 대체율에 따른 차수재의 특성

## Characteristics of Mine Liner According to the Replacement Ratio of Nano-Silica and Silica-Fume

강석표<sup>1</sup> · 이희라<sup>2\*</sup> · 강혜주<sup>3</sup> · 남성영<sup>4</sup> · 김춘식<sup>5</sup>  
 Suk-Pyo Kang<sup>1</sup> · Hee-Ra Lee<sup>2\*</sup> · Hye-Ju Kang<sup>3</sup> · Seong-Young Nam<sup>4</sup> · Chun-Sik Kim<sup>5</sup>

(Received February 25, 2019 / Revised March 12, 2019 / Accepted March 12, 2019)

Approximately 80% of the mines are vacated or abandoned mines and are mostly left without suitable environmental treatment facilities. In the area around the abandoned mine site, problems such as drainage of acidic city drainage and leakage of leachate occur, and ground subsidence caused by this can cause a safety accident due to sink hole occurrence. In this study, flow, compressive strength, water uptake, pore and hydration characteristics were investigated to investigate the basic properties of liner and cover material based on the replacement ratio of nano silica and silica fume in the existing blast - furnace slag fine powder. As a result, as the substitution ratio of nano silica and silica fume increased, the flow and compressive strength of nano silica specimens increased and the absorption rate decreased. In the case of pore characteristics, the amount of pores decreased as the substitution ratio of nano silica and silica fume increased. Especially, the capillary porosity of 10-1,000 nm diameter decreased. Ray diffraction analysis and SEM measurement showed that the peak positions of the hydration products were almost the same when compared with the 5% alternative test samples of Plain and silica fume.

**키워드** : 광산, 차수재, 나노실리카, 실리카흄

**Keywords** : Mine, Liner and cover material, Nano silica, Silica fume

### 1. 서론

국내에는 금속광산, 석탄광산 및 비금속광산을 포함하여 총 2,500여 개의 광산이 있으며 이 중 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산으로 대부분 적절한 환경처리시설 없이 방치되어 있다. 이러한 폐광산에서 발생된 광산폐기물은 집중강우나 강풍에 의해 이동 또는 분산되어 농경지나 수계의 환경오염 원인이 되고 있다(Choo et al. 2007). 폐 석탄광산 및 폐 금속광산의 갱내수를 조사하여 분석한 결과, 일부 폐 광산 갱내수는 산성수이며, 금속성분이 고농도로 함유된 폐수로 나타난다(Oh 2011). 많은 금속의 주요 구성 광물인 황화광물 특성에 따라 필연적으로 발생하는 산성 광산 배

수(AMD, Acid Mine Drainage)는 광산 주변의 하천 및 지하수에 유입됨으로써 철 수산화물의 침전에 따른 수중 생태계 파괴, 수질의 악화뿐만 아니라 그에 따른 지표수·지하수 이용의 제약과 같은 문제를 발생시켜 인간 생활에 악영향을 주고 있다. 또한 폐광산 주변 지역은 산성광산배수와 침출수 유출로 지반침하가능성이 크다(Lee 2013).

이러한 폐광산을 안정화시키기 위한 방법으로는 갱내충전법이 일반적으로 사용되고 있다. 갱내충전법으로는 단순하게 폐석을 단독으로 충전하는 방법과 폐석과 함께 시멘트, 플라이애쉬 등 첨가제를 혼합하여 충전하는 방법으로 구분되고 있으며, 현재 다양한 충전재에 관한 연구가 진행 중에 있다(Han et al. 2016). 그러나

\* Corresponding author E-mail: 96\_979449@daum.net

<sup>1</sup>우석대학교 건축학과 교수 (Department of Architecture, Woosuk University, Chungcheongbuk-do, 27841, Korea)

<sup>2</sup>우석대학교 건설공학과 석사과정 (Department of Construction Engineering, Woosuk University, Chungcheongbuk-do, 27841, Korea)

<sup>3</sup>우석대학교 건설공학과 박사과정 (Department of Construction Engineering, Woosuk University, Chungcheongbuk-do, 27841, Korea)

<sup>4</sup>한일시멘트 연구원 (Hanil Cement Co., Ltd., Chungcheongbuk-do, 27003, Korea)

<sup>5</sup>한일시멘트 선임연구원 (Hanil Cement Co., Ltd., Chungcheongbuk-do, 27003, Korea)

충전재의 경우 토양오염 등 2차적인 환경문제를 일으킬 가능성이 있으며 이러한 문제를 해결하기 위해 충전층에 차수층을 설치하여 유해물질이 주변 환경으로 이동하는 것을 막고 있다. 차수층은 차수층의 두께와 투수속도로 예측되는 기간 동안 유해물질의 이동을 지연시키는 역할을 하여 환경적인 문제를 해결하고 있다. 또한 차수층은 유출된 유해물질을 인위적으로 처리함으로써 주변 환경에 미치는 영향을 최소화하고 차수층 재료가 갖는 유해 금속 및 유기물질의 이동 억제기능을 이용하여 2차 방어 효과를 발현하는 역할을 한다(Chang et al. 2007; Cho et al. 2018).

이러한 차수재(liner and cover material)는 차수기능 및 구조적 안정성이 매우 중요한 요소로 작용되고 있으며 특히 그중에서 차수재의 수밀성은 가장 중요한 성능으로 인식되고 있다. 수밀성을 향상시키는 방안으로는 잠수수경성 반응이 일어나는 고로슬래그 미분말 등을 혼합하는 방법이 제시되고 있지만 무기물질만으로는 수밀성 향상에 한계가 있는 것으로 보고되고 있다. 수밀성을 향상시키는 방안으로서 실리카흙은 공극충전효과에 따른 강도증진과 투기, 투수성을 감소시키므로 콘크리트의 각종 물리적, 역학적 성질을 개선하는데 유효한 것으로 알려져 있다. 실리카흙의 입자크기는 시멘트 입자의 1/25 정도로 미세하기 때문에 시멘트 입자의 공극을 충전하는 마이크로 필러 효과가 있으며, 입자모양이 구형으로 볼 베어링(ballbearing) 작용에 의한 유동성 개선을 기대할 수 있다. 실리카흙은 매우 미세한 비정질의 실리카로 되어 있어 수화 초기부터 수산화칼슘과 결합하는 포졸란 반응을 한다. 포졸란 반응으로 인한 미세한 공극의 감소는 시멘트 경화체의 공극을 보다 치밀하게 하여 강도의 증진을 기대할 수 있으며, 투수성, 투기성을 감소시킨다(Seo 2005).

건설분야에서 사용되는 나노분말은 다른 기술분야에 비하여 낮은 순도를 요구하며, 이에 따라 저가 생산이 가능한바 적용분야가 넓을 것으로 기대된다(Lee 2013). 특히 나노 실리카는 큰 비표면적으로 콘크리트용 혼화재료 적용 시 모세관 효과가 나타난다. 따라

서 본 논문에서는 기존 고로슬래그 미분말 기반 광산 차수재의 수밀성 향상을 위하여 나노 실리카 및 실리카흙 대체율 변화에 따른 차수재의 기초 특성을 검토하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험계획

나노 실리카 및 실리카흙 대체율 변화에 따른 차수재의 특성을 검토하고자 하는 실험계획을 Table 1에 나타내었으며 KS L ISO 679에 준하여 실험을 실시하였다. 이를 위하여 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 물비율은 전체 배합에 대해 14%로 하였다. 이는 KS L ISO 679에서 모르타르 제조 시 제시되어 있는 물비율이 50%이나 제조된 차수재를 뽕칠재로 사용하기 위해 플로우의 값 200±20mm로 측정되는 물비율 및 OPC, 유동화제 첨가량을 Plain으로 설정하였다. 나노실리카와 실리카흙의 배합은 기초 실험결과를 바탕으로 시멘트의 중량에 대하여 내할로 5%, 10%로 각각 대체하여 사용하였다. 실험항목으로는 플로우, 압축강도, 흡수율, 기공특성, 수화특성을 실시하였다.

### 2.2 사용재료

#### 2.2.1 시멘트 및 고로슬래그 미분말

나노 실리카 및 실리카흙 대체율 변화에 따른 차수재의 결합재에 사용된 시멘트 및 고로슬래그 미분말의 물리·화학적 성질을

Table 2. Physical properties and chemical composition of cement, Blast furnace slag

| Type of binder    | Specific surface area(cm <sup>2</sup> /g) | Density (g/mm <sup>3</sup> ) | Ig. loss | Chemical composition(%) |                                |                                |       |      |                 |
|-------------------|---|------------------------------|----------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|
|                   |   |                              |          | SiO <sub>2</sub>        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> |
| OPC <sup>1)</sup> | 3,144                                     | 3.15                         | 1.32     | 21.7                    | 5.7                            | 3.2                            | 63.1  | 2.8  | 2.2             |
| BFS <sup>2)</sup> | 4,159                                     | 2.90                         | 0.03     | 33.33                   | 15.34                          | 0.44                           | 42.12 | 5.70 | 2.08            |

Table 1. Experimental plan and mix design

| Type of binder | Mix design(%) |     |             |             |           | Superplasticizer (%) | W/B (%) | Test items  |
|----------------|---------------|-----|-------------|-------------|-----------|----------------------|---------|---|
|                | OPC           | BFS | Silica fume | Nano-silica | Aggregate |                      |         |   |
| Plain          | 25            | 15  | -           | -           | 60        | 0.1                  | 14      | -Flow<br>-Compressive strength (3days, 7days, 28days)<br>-Absorption ratio<br>-Pore distribution<br>-hydration property |
| Nano-5         | 23.75         |     | -           | 1.25        |           |                      |         |   |
| Nano-10        | 22.5          |     | -           | 2.5         |           |                      |         |   |
| Fume-5         | 23.75         |     | 1.25        | -           |           |                      |         |   |
| Fume-10        | 22.5          |     | 2.5         | -           |           |                      |         |   |

1) OPC : Ordinary portland cement 2) BFS : Blast furnace slag

Table 2에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 결합재는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 비표면적은  $3,144\text{cm}^2/\text{g}$ , 밀도는  $3,15\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. 고로슬래그는 전체 중량에서 15%를 첨가하였다(Ryu 2009).

### 2.2.2 실리카흙 및 Sodium Silicate계 나노실리카

#### (1) 실리카흙

나노 실리카 및 실리카흙 대체율 변화에 따른 차수재의 기초 특성을 검토하기 위해 사용한 실리카흙의 물리적 특성을 Table 3에 나타내었다.

#### (2) Sodium Silicate계 나노실리카

규산나트륨 또는 물유리라 불리는 Sodium Silicate는 이산화규소와 알칼리를 용해하여 얻은 규산알칼리염을 진한 수용액으로 제조한 것으로 물성을 Table 4에 나타내었으며 이의 제조과정을 Fig. 1과 같이 나타내었다. Sodium Silicate는 무색에서 백색이나 회백색에 이르는 다양한 색을 가지며 유리와 비슷하지만 물에 용해되어

Table 3. Properties of silica fume

| Density( $\text{g}/\text{mm}^3$ ) | Fineness( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | loss ignition(%) | SiO <sub>2</sub> (%) |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------|----------------------|
| 2.2                               | 180,000~200,000                    | 2.8              | 94.0                 |

Table 4. Properties of nano silica(Sodium Silicate)

| Density( $\text{g}/\text{mm}^3$ ) | Diameter(nm) | Viscosity(cp) | Solid Contents(%) |
|-----------------------------------|--------------|---------------|-------------------|
| 1.21                              | 10~100       | 7             | 30                |

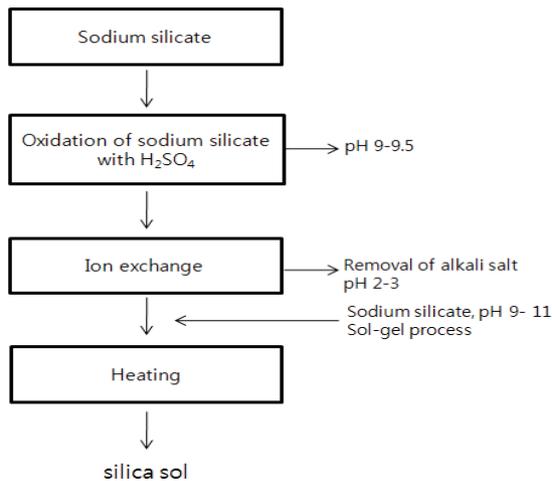
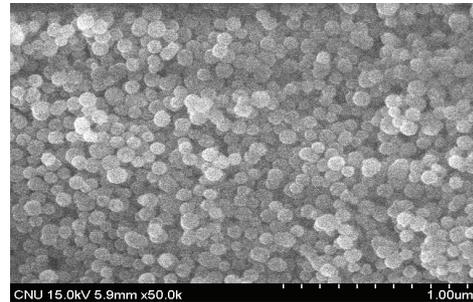


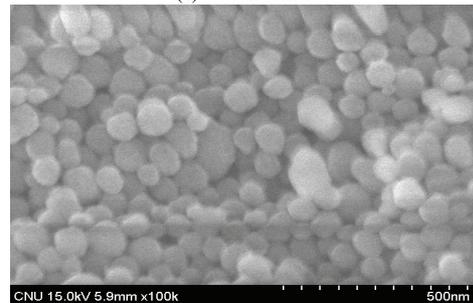
Fig. 1. Manufacture process of nano-silica using sodium silicate

시럽 상태의 수정 같은 고점도 액체이다. 이와 같은 Sodium Silicate의 알칼리 성분은 대체로 Na<sub>2</sub>O이고, 조성은 Na<sub>2</sub>O · nSiO<sub>2</sub> (n=2~4) 외에 미량의 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 되어 있으며, 수분은 10~30% 정도이다. 일반적인 분자식은 M<sub>2</sub>O · nSiO<sub>2</sub> · xH<sub>2</sub>O이며, 수용성 규산염 중 가장 널리 사용되고 있는 무기화합물이다(Kang 2015).

Sodium Silicate계 Nano-Silica를 제조하기 위하여 유도물질로 사용한 Sodium Silicate 수용액은 현재 KS에서 규정하고 있는 2종의 물유리로 규산소다-2호를 사용하였다. 산화반응제로 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(95%)을

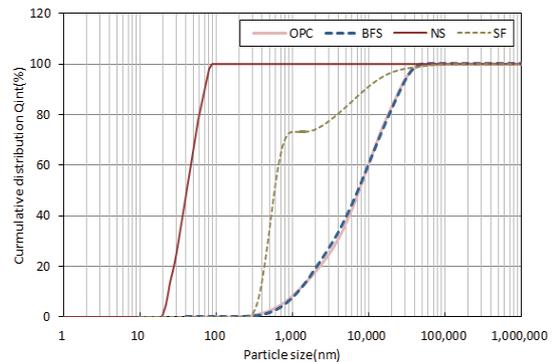


(a) × 50k SEM



(b) × 100k SEM

Fig. 2. SEM of nano-silica manufactured from sodium silicate



- \* OPC: Ordinary portland cement
- \* BFS : Blast Furnace Slag
- \* NS: Nano Silica
- \* SF: Silica Fume

Fig. 3. Cumulative distribution of binder

사용하였으며 강산성 양이온 교환수지로는 SCR-B를 사용하였다.

본 논문에서 사용한 나노실리카의 SEM 측정결과를 Fig. 2에 나타내었다. 나노실리카는 모든 입자가 구형인 것으로 관찰되었으며, Sodium Silicate Nano-Silica 입도는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 10~100nm의 분포를 나타내었다.

**2.2.3 골재**

본 논문에서 사용한 골재는 KS L ISO 679에 의거한 표준사를 사용하였다.

**2.2.4 유동화제**

차수재의 작업성 및 유동성을 증가시키기 위해 사용된 polycarbonate (PC계) 유동화제는 C사의 것을 사용하였으며 황백색 분말을 띠며 1% 수용액의 pH는 4.2±1을 나타내었다.

**2.3 실험방법**

**2.3.1 플로우**

본 논문에서 나노 실리카 및 실리카흙 대체율 변화에 따른 시멘트 모르타르의 플로우 측정은 KS F 2476 폴리머 시멘트 모르타르의 시험방법에 의거하여 측정하였다.

**2.3.2 압축강도**

나노 실리카 및 실리카흙 대체율 변화에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도를 측정하기 위하여 KS L ISO 679에 의거하여 시험체를 제작하였으며 양생온도 20±2℃ 및 상대습도 70%의 항온항습기에서 양생하였다. 3일, 7일, 28일 재령에 경과 한 후 압축강도를 측정하였다.

**2.3.3 흡수율**

흡수율은 KS F 2476에 의거하여 실시하였다. 제작된 공시체를 28일 동안 양생온도 20±2℃ 및 상대습도 70%의 항온항습기에서 양생한 후 24시간 건조기에서 건조 후 건조기에서 꺼낸 공시체의 최소 중량을 측정하고 20℃에서 24시간 동안 침지한 후 중량을 측정하여 다음 식(1)로 계산하였다.

$$\text{흡수율} = \frac{W_b - W_a}{W_a} \times 100 \quad (1)$$

여기서  $W_a$  : 수중침지 전의 공시체의 중량(g)

$W_b$  : 각 수중침지 시간의 공시체의 중량(g)

**2.3.4 기공특성**

기공 측정 방법은 변화되는 압력에서 수은(Hg)이 시료에 침투되는 수은압입법을 통해 Pore Size를 분석하는 Pore Size Analyzer(Porosimeter)장비를 통하여 분석하였다.

**2.3.5 수화특성**

XRD(X-ray diffractiuon) 분석을 위하여 시험체 제작 시 페이스트를 제작한 후 재령 28일에 시료를 약 10μm 이하로 분쇄 후 시료 용기에 올려 Rigaku사의 Smart Lab을 이용하여 분석 전기적으로 X선을 발생시켜 시료로부터 반사되어 나오는 X-선 회절을 이용하여 물질을 분석하였다.

SEM(Scanning Electron Microscopy) 측정은 Malvern Instrument사의 Mastersizer 3000-Maz6140 현미경으로 배율 3500배율로 측정하였다.

**3. 실험결과 및 분석**

**3.1 플로우 특성**

나노실리카 및 실리카흙의 대체율 변화에 따른 차수재의 플로우 측정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 본 논문에서는 뽕칠용 광산 차수재를 고려하여 압송하기 위한 유동성을 확보하고자 목표 플로우를 200±20mm로 설정하였다. 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 Plain에서는 목표 플로우를 만족하는 214mm를 나타내었다. 나노실리카는 대체율에 따라서 플로우에 큰 차이를 나타내고 있지 않지만 실리카흙은 대체율이 증가할수록 플로우가 급격하게 감소하

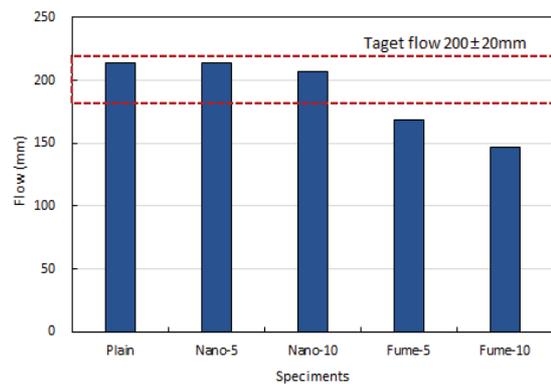


Fig. 4. Table flow

는 것으로 나타났다.

나노실리카의 대체율 변화에 따른 플로우 측정 결과 Nano-5에서는 214mm, Nano-10에서는 207mm로서 나노실리카 대체율이 증가할수록 플로우는 감소하고 있으나 나노실리카 대체율 10%까지는 목표 플로우를 만족하고 있는 것으로 나타났다. 나노실리카 대체율 5%에서는 Plain과 비교하여 동등한 플로우를 나타내고 있다.

실리카흙의 대체율 변화에 따른 플로우 측정 결과는 Fume-5에서는 168mm, Fume-10에서는 147mm로 실리카흙 대체율이 증가할수록 플로우는 나노실리카와 비교하여 상대적으로 급격하게 감소하였고 실리카흙 대체율 10%까지는 목표 플로우를 만족하지 못하였다. 이는 실리카흙이 큰 비표면적으로 수산화칼슘과 매우 짧은 시간에 반응하고 겔상의 물질을 생성하여 점성이 커져 슬럼프가 저하되며 시간에 따른 슬럼프 손실이 나타난 것으로 사료된다(Seo 2005). 특히 나노실리카 대체율 5%에서는 Plain과 비교하여 동등한 플로우를 나타내었지만 실리카흙 대체율 5%에서는 Plain과 비교하여 22% 감소하였고 목표 플로우를 만족하지 못하였다.

### 3.2 압축강도

나노실리카 및 실리카흙의 대체율 변화에 따른 차수재의 압축강도를 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 Plain의 압축강도는 재령 3일에서 24.8MPa를 나타내었으며 7일에서 40.5MPa, 28일에서 45.6MPa의 측정결과를 나타내었다.

나노실리카의 대체율 변화에 따른 압축강도 측정 결과 Nano-5는 재령 3일에서 26.5MPa를 나타내었으며 7일에서 41.9MPa, 28일에서 47.0MPa의 측정결과를 나타내었다. Nano-10에서는 3일 압축강도가 28.4MPa, 7일 압축강도가 43.8MPa의 결과가 나타났으며 28일의 압축강도는 49.5MPa의 결과를 나타내었다. 나노실리카의 대체율이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었

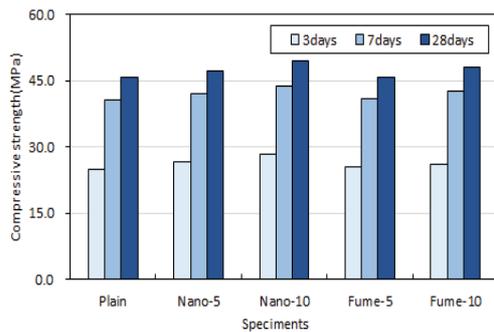


Fig. 5. Compressive strength

다. 보통 포틀랜드 시멘트만을 사용한 Plain의 압축강도와 비교하여 시멘트에 나노실리카를 10% 대체할 경우 약 107%의 압축강도 비를 나타내며 더 높은 강도발현을 하는 것으로 나타났다. 이는 시멘트 입자의 크기에 비하여 상대적으로 매우 작은 나노실리카가 시멘트 복합재료 내에서 발생한 공극을 채워 압축강도를 증가하는 결과를 나타낸 것으로 사료된다.

실리카흙의 대체율 변화에 따른 압축강도 측정결과와 Fume-5에서 3일 압축강도는 25.5MPa를 나타내었고 7일 압축강도는 40.9MPa, 28일의 압축강도는 45.8MPa의 결과를 나타내었다. 한편, Fume-10의 3일 압축강도 결과는 26.1MPa를 나타내었고, 7일 압축강도 측정결과 42.4MPa, 28일 압축강도 측정결과 48.1MPa를 나타내었다. 실리카흙 대체율이 증가함에 따라 압축강도는 증가하는 것으로 나타내었다.

또한, 나노실리카와 실리카흙의 압축강도 비교결과 실리카흙의 압축강도에 비해 나노실리카의 압축강도가 더 증가하는 것으로 나타났다. 이는 실리카흙과 비교하여 나노소재가 비표면적이 더 크기 때문에 빠른 반응을 일으킴으로 많은 수화생성물을 형성하여 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다. 또한 나노실리카는 초미립 나노소재로서 콘크리트 내의 공극을 채워주는 Filler 역할을 하여 압축강도가 증가되는 것으로 판단된다(Gwak 2004).

### 3.3 흡수율

나노실리카 및 실리카흙의 대체율 변화에 따른 차수재의 흡수율 측정결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Plain의 흡수율 측정결과는 4.2%까지 증가하는 결과를 나타내었다. 나노실리카의 대체율에 따른 흡수율 측정결과 Nano-5은 3.2%까지 증가하였으며, Nano-10은 2.7%까지 증가하는 것으로 나타났다. 나노실리카의 대체율이 증가할수록 흡수율이 감소하는

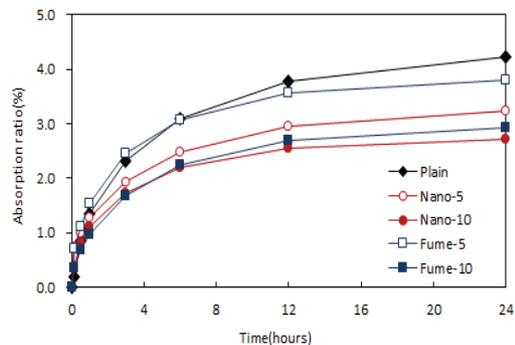


Fig. 6. Absorption ratio

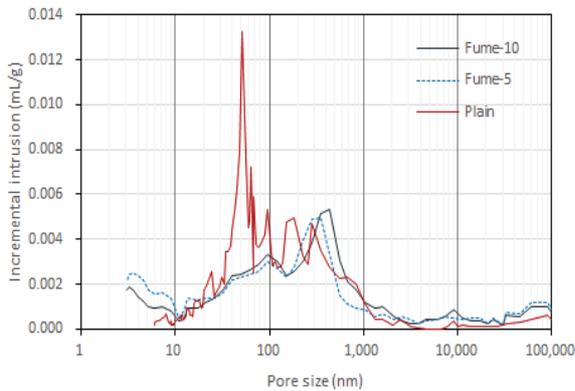


Fig. 7. Incremental intrusion fume

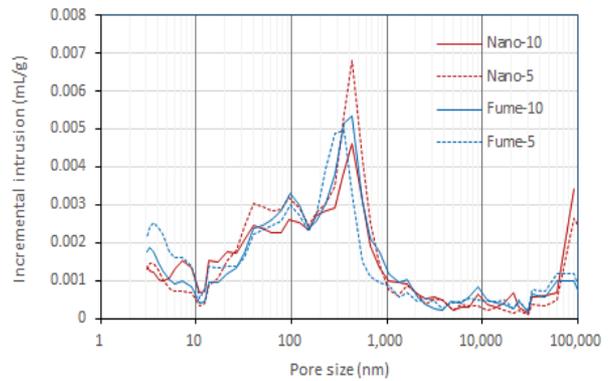


Fig. 9. Incremental intrusion nano and fume

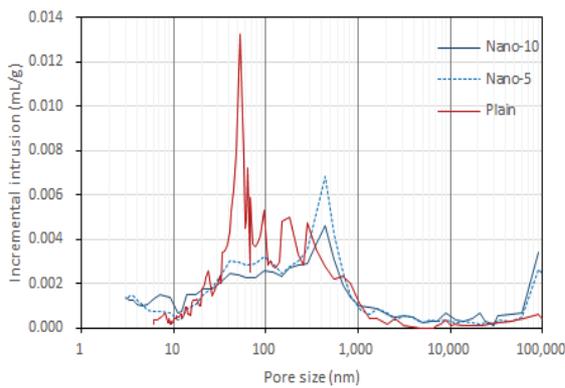


Fig. 8. Incremental intrusion pore distribution nano

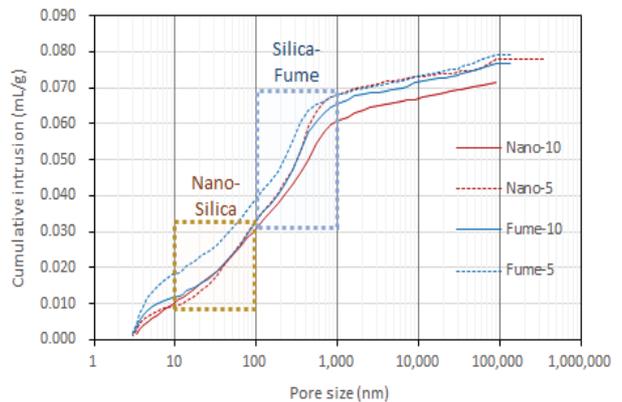


Fig. 10. Cumulative intrusion nano and fume

것으로 나타내었다. 또한, 실리카흙의 대체율에 따른 흡수율 측정 결과에서 Fume-5은 3.8%까지 증가하는 것으로 나타났으며, Fume-10은 2.9%까지 증가하는 것으로 나타났다. 실리카흙의 대체율이 증가할수록 흡수율이 감소하는 것으로 나타났으며 나노실리카와 실리카흙의 대체율이 증가할수록 모두 흡수율이 감소하지만 실리카흙에 비해 나노실리카의 흡수율이 더 낮은 결과를 나타내었다.

### 3.4 기공특성

나노실리카 및 실리카흙의 대체율 변화에 따른 차수재의 기공 분포 측정결과는 Plain과 비교하여 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. 나노실리카 및 실리카흙 대체율이 증가할수록 Plain과 비교하여 기공량이 감소하는 것으로 나타났으며 특히 직경 10~1,000nm의 모세관 기공량이 감소하는 것으로 나타났다.

나노실리카 및 실리카흙 대체율 변화에 따른 기공분포 및 누적 기공량 측정결과를 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다. Nano 시험체

는 Plain과 비교 하여 직경 10~100nm의 기공량이 줄어들었고, Fume 시험체는 직경 100~1,000nm의 기공량이 줄어든 것으로 나타났다. 이는 Sodium Silicate로부터 제조된 나노실리카의 경우 직경이 10~100nm이고 실리카흙의 직경이 100~1,000nm인 것을 고려하여 볼 때 Nano 시험체가 Fume 시험체와 비교하여 상대적으로 직경이 작은 기공에서의 기공량이 줄어든 것으로 판단되며, 모두 모세관 공극의 충전이 양호하게 이루어진 것으로 사료된다. 이로 인하여 직경 50~2,000nm의 기공량이 강도와 밀접한 상관 관계가 있다는 기존 논문을 바탕으로 Nano 및 Fume 시험체의 압축강도가 Plain과 비교하여 증진되었던 것으로 판단된다.

### 3.5 수화특성

나노실리카 및 실리카흙 대체율 변화에 따른 나노실리카 혼입 시멘트 페이스트의 28일 재령의 X선 회절분석 및 SEM 측정결과를 실리카흙 혼입 시험체와 비교하여 Fig. 11, 및 Fig. 12에 나타내었다.

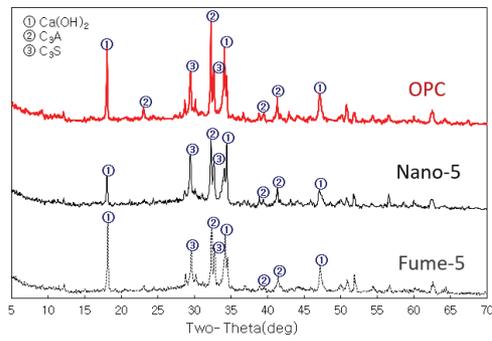
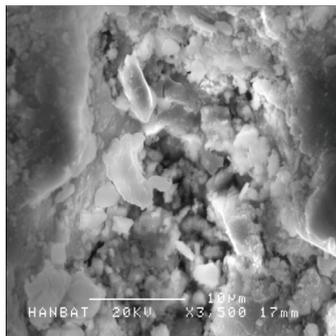
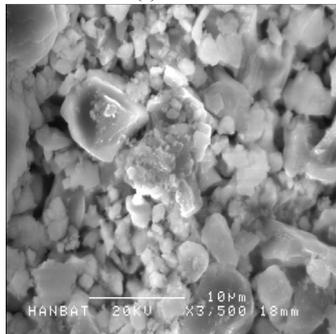


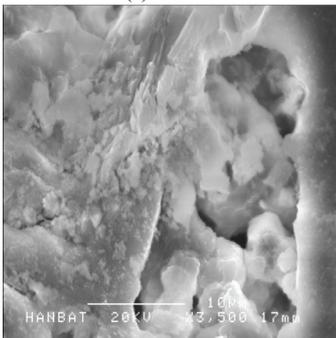
Fig. 11. Result analysis of X-ray diffraction



(a) Plain



(b) Nano-5



(c) Fume-5

Fig. 12. SEM images of cement paste

이를 고찰하여 보면 Nano-Silica를 혼입한 시멘트 복합체는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 피크 강도가 강하게 나타나고  $\text{C}_3\text{A}$  및  $\text{C}_3\text{S}$  등의 수화생성물이 강하게 나타나므로 수화반응이 원활히 진행되고 있는 것으로 확인되었다.

또한 Plain과 실리카흙 5% 대체 시험체와 비교할 경우 수화생성물의 피크 위치가 거의 동일하게 나타났으며,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 피크 강도는 SF5%, OPC, NS5%의 순으로 큰 것으로 나타났으나 그 차이는 미미한 수준이었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존 고로슬래그 미분말 기반 광산 차수재의 수밀성 향상을 위하여 실리카흙 및 나노 실리카 대체율에 따른 차수재의 기초 특성을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 나노실리카 및 실리카흙의 대체율에 따른 차수재의 플로우를 측정된 결과 나노실리카 대체율 5%에서는 Plain과 비교하여 동등한 플로우를 나타내고 있으며 실리카흙의 플로우는 목표 플로우를 만족하지 못하였다.
- 2) 나노실리카와 실리카흙의 대체율에 대한 압축강도 비교결과 실리카흙을 첨가한 시험체의 압축강도에 비해 나노실리카를 첨가한 시험체의 압축강도가 더 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 흡수율 측정결과 실리카흙의 대체율이 증가할수록 흡수율이 감소하는 것으로 나타났으며 나노실리카와 실리카흙의 대체율이 증가할수록 모두 흡수율이 감소하지만 실리카흙을 첨가한 시험체에 비해 나노실리카를 첨가한 시험체의 흡수율이 더 낮은 결과를 나타내었다.
- 4) 나노실리카 및 실리카흙의 대체율 변화에 따른 차수재의 기공분포 측정결과 나노실리카 및 실리카흙 대체율이 증가할수록 Plain과 비교하여 기공량이 감소하는 것으로 나타났으며 특히 직경 10~1,000nm의 모세관 기공량이 감소하는 것으로 나타났다.
- 5) 나노실리카 및 실리카흙 대체율 변화에 따른 나노실리카 혼입 시멘트 페이스트의 X선 회절분석 및 SEM 측정은 Plain과 실리카흙 5% 대체 시험체와 비교할 경우 수화생성물의 피크 위치가 거의 동일하게 나타났다.

#### Conflict of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 산업통상자원부)의 재원으로 한국연구재단-탄소자원화 국가전략프로젝트사업의 지원을 받아 수행되었습니다(2017M3D8A2086037).

## References

Choo, C.O., Kyung, G.C., Lee, J.G. (2007). Characteristics of the dalseong acid mine drainage and the role of schwertmannite, *Journal of Engineering Geology*, **17(2)**, 187–196.

Oh, S.G. (2011). A Study on the Development of an Additive Material for Briquette and a Barrier Liner using Sludges of Coal Mine Drainages, Ph.D Thesis, University of Seoul, Korea [in Korean].

Lee, D.Y. (2010). A Study on the Development of Barrier Liner Material with Sludge in Coal Mine Drainage, Master's Thesis, University of Seoul, Korea [in Korean].

Chang, Y.C., Kim, J.C., Jeong, O.K. (2007). Experimental study on engineering characteristic of the waste landfill soil admixed linear, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, **8(1)**,

13–20.

Cho, Y.K., Nam, S.Y., Lee, Y.M., Kim, C.S., Seo, S.S., Jo, S.H., Lee, H.W., Ahn, J.W. (2018). Study on the characteristic of liner and cover material by accelerating agent type, *Journal of Environmental Science International*, **27(2)**, 75–81.

Seo, J.M. (2005). Optimization of Mix Proportions of High-Performance Concrete for Bridge Deck Overlay, Master's Thesis, Konkuk University, Korea [in Korean].

Lee, J.G. (2013). Effect of Nano Silica and Silica Fume Content on the Bond Performance of Macro Synthetic Fiber in Concrete, Master's Thesis, Kongju National University, Korea [in Korean].

Ryu, G.S., Koh, K.T., Lee, J.H. (2013). Strength development and durability of geopolymers mortar using the combined fly ash and blast-furnace slag, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **1(1)**, 35–41.

Kang, S.P. (2015). Rebar corrosion evaluation of cement mixed nano-silica based sodium silicate, *Journal of Construction and Environment Research, Chungwoon University*, **10(1)**, 177–184.

Gwak, G.D. (2004). A Study on Fire-Resistant Performance of Concrete using Nano-Silica Particles, Master's Thesis, Hanyang University, Korea [in Korean].

### 나노실리카 및 실리카흄 대체율에 따른 차수재의 특성

광산의 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산으로 대부분 적절한 환경처리시설 없이 방치되어 있다. 폐광산 주변 지역은 산성광산 배수와 침출수 유출 등의 문제가 발생되고 있으며, 이로 인한 지반 침하의 싱크홀 발생으로 안전사고를 유발시킬 수 있다. 본 연구에서는 기존 고로슬래그 미분말 기반 광산 차수재의 나노 실리카 및 실리카흄 대체율 변화에 따른 차수재의 기초 특성을 검토하기 위해 플로우, 압축강도, 흡수율, 기공특성, 수화특성을 실시하였다. 그 결과 나노실리카 및 실리카흄의 대체율이 증가할수록 나노실리카의 시험체는 실리카흄의 시험체보다 플로우, 압축강도가 증가하고 흡수율은 감소하였다. 기공특성의 경우 나노실리카 및 실리카흄 대체율이 증가할수록 기공량이 감소하는 것으로 나타났으며 특히 직경 10~1,000nm의 모세관 기공량이 감소하는 것으로 나타났다. 선 회절분석 및 SEM 측정은 Plain과 실리카흄 5% 대체 시험체와 비교할 경우 수화생성물의 피크 위치가 거의 동일하게 나타났다. 나노실리카 및 실리카흄의 사용은 광산 차수재의 수밀성 향상이 가능할 것으로 판단되며 경제성을 고려하여 적절히 사용한다면 광산 차수재의 재료로서 활용 가능할 것으로 판단된다.