

# 나노 실리카를 혼입한 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 수화도 및 역학적 특성

차수원<sup>1</sup>, 이진욱<sup>2</sup>, 최영철<sup>3\*</sup>

## Hydration and Mechanical Properties of High-volume Fly Ash Concrete with Nano-silica

Soo-Won Cha<sup>1</sup>, Geon-Wook Lee<sup>2</sup>, Young-Cheol Choi<sup>3\*</sup>

**Abstract:** Recently, as carbon neutrality has been important factor in the construction industry, many studies have been conducted on the high-volume fly ash concrete. High volume fly ash concrete(HVFC) is usually made by replacing more than 50% of cement with fly ash. However, HVFC has a disadvantage of low compressive strength in early age. To overcome this shortcoming of HVFC, improve this, interest in technology using nanomaterials is increasing. Nano silica is expected to improve the early age strength of HVFC as a pozzolanic material. This study investigated the effect of nano silica on the early hydration reaction and microstructure of HVFC. The early hydration reaction of HVFC was analyzed through setting time, isothermal calorimeter, compressive strength and thermal weight analysis. In addition, the microstructure of HVFC was measured by mercury intrusion porosimetry. From the test results, it was confirmed that nano silica increased the early age strength and improve the microstructure of HVFC.

**Keywords:** Nano silica, Fly ash, HVFC, Cement composite, Filler effect, Microstructure

### 1. 서론

지속적인 산업 발전과 석탄 소비로 인해 최근 건설 산업에서도 탄소 중립을 위한 연구가 중요시되고 있다. 이를 위해 다양한 건설재료에 대한 연구가 진행되고 있으며, 플라이애시(FA), 고로 슬래그 미분말(GGBS), 실리카 폼(SF) 등의 대체 시멘트 재료(SCMs)의 사용이 주목받고 있다. SCM은 일반적으로 시멘트와 함께 사용될 때, 포졸란 반응에 의해 시멘트 복합체의 공학적 특성에 기여하는 것으로 알려져 있다(Prakash et al., 2022; Sahoo et al., 2017(a); Bagheri et al., 2012; Sensale, 2006; Giner et al., 2011).

그중 플라이애시는 낮은 수화열, 수축 감소 및 우수한 내구성 성능으로 시멘트의 혼합재료로서 널리 사용되고 있다. 특히 플라이애시를 다량 치환한 하이 볼륨 플라이애시 콘크리트(high-volume fly ash concrete, HVFC)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하이볼륨 플라이애시는 시멘트의 사용량을 줄여 온실가스 배출을 감소시키며, 산업부산물의 재활용 측

면에서 큰 장점이 있다. 하지만 플라이애시는 초기 수화과정에서 비활성 상태를 유지하기 때문에 하이 볼륨 플라이애시는 초기 압축강도가 낮은 단점이 있다(Sahoo et al., 2017(b); Obla et al., 2003; Copeland et al., 2001; Das et al., 2012). 이러한 HVFC의 초기강도 지연의 단점을 보완하기 위해 플라이애시의 분쇄, 화학적 활성화, 기계화학적 처리 및 열수 처리 등의 많은 연구가 이루어지고 있다(Paya et al., 2000; Qian et al., 2001; Babaian et al., 2003; Goni et al., 2003; Wang et al., 2004). Yang et al.(2021) 은 실리카 폼을 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>가 활성화된 하이볼륨 플라이애시 콘크리트에 혼입할 경우 더 나은 저항성과 더 적은 강도 손실이 있다고 보고했다.

최근에는 하이 볼륨 플라이애시 콘크리트의 초기강도 개선 연구의 일환으로 나노 소재를 사용하여 시멘트 계 재료의 성능을 개선하는 연구에 대한 관심이 높아졌다. 일반적으로 나노 소재는 시멘트의 수화를 가속화하고, 미세구조를 개선하여 역학적 성능과 내구성능을 향상시킨다는 연구결과가 있다(Chuah et al., 2014; Du et al., 2015; Li et al., 2004). 최근 10년 동안 나노 소재는 다양한 분야에서 급격한 속도로 발전하고 있다. 특히 나노 실리카(NS), 이산화 타이타늄 등 콘크리트의 역학적 성능을 개선할 수 있는 나노 재료도 등장했다(Silvestre et al., 2016; Wang et al., 2019; Yesilmen et al., 2015; Senff et al., 2013).

그중 나노 실리카는 입자 크기가 상당히 미세하고 포졸란

<sup>1</sup>정회원, 울산대학교 토목공학과 교수

<sup>2</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수

\*Corresponding author: zerofe@gachon.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, 1342

Seongnamdaero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13120, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 1월 31일까지 학회로 보내주시면  
2023년 2월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

재료의 특성을 가지고 있는 재료로서, 용해된 실리카 성분이 시멘트 수화반응에서 생성되는 수산화칼슘과 반응하여 추가적인 칼슘 실리케이트 수화물(C-S-H)을 형성하여 강도 발현에 기여한다(Li, 2004(a); Kong et al., 2012(a); Kawashima et al., 2013(b); Ghafari et al., 2014). 따라서 나노 실리카를 활용하여 콘크리트에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

하지만 나노 실리카는 응집하는 특성이 있어 시멘트 매트릭스 내에서 취약 존을 형성할 가능성이 있기 때문에 나노 실리카의 분산성은 중요한 문제로 여겨진다(Liu et al., 2022). Wu et al.(2017)은 고성능 콘크리트에서 나노 실리카 분말을 1% 사용하면 시멘트 매트릭스 사이의 계면 결합을 향상시킬 수 있지만 더 높은 사용은 오히려 성능을 감소시킬 수 있다고 보고했다.

이 연구의 목적은 나노 실리카가 하이 볼륨 플라이애시 콘크리트의 수화반응에 미치는 영향에 대해 조사하는 것이다. 응집으로 인한 성능 감소를 방지하기 위해 나노 실리카 현탁액을 제조하여 하이 볼륨 플라이애시 페이스트에 적용하였다. 주요 변수는 나노 실리카의 혼입 유무이다. 수화반응 특성

은 응결, 수화열, 압축강도에 의해 평가하였다. 추가적으로, 수은 압입법을 통해 나노 실리카에 의한 공극 구조를 분석하였다. 또한, 열 중량 분석을 통해 수화 생성물을 측정하였다.

## 2. 재료 및 실험변수

### 2.1 재료

이 연구에서는 바인더로써 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 플라이애시, 나노 실리카를 사용하였다. 원재료의 화학적 조성은 X-선 형광분석법(XRF)에 의해 측정하였으며 Table 1에 나타내었다. 플라이애시의 주요 성분은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이며 각각 50.5%, 24.3%, 9.93%, 5.96%로 ASTM C 618 기준에 따르면 Class F급에 해당한다. 나노 실리카의 화학 성분은 SiO<sub>2</sub>가 99.9%이다. OPC, FA, 나노 실리카의 밀도는 각각 3.16 g/cm<sup>3</sup>, 2.32 g/cm<sup>3</sup>, 2.23 g/cm<sup>3</sup>이다.

Fig. 1은 FA, 나노 실리카의 XRD 패턴을 나타내고 있다. Fig. 1로부터 FA를 구성하는 주요 광물은 퀴즈와 멀라이트임을 알 수 있었으며, 나노 실리카의 경우는 대부분 비정질로 구

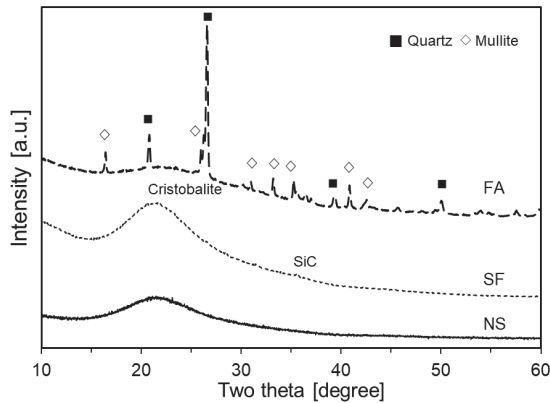


Fig. 1 X-ray diffraction patterns of OPC and FA

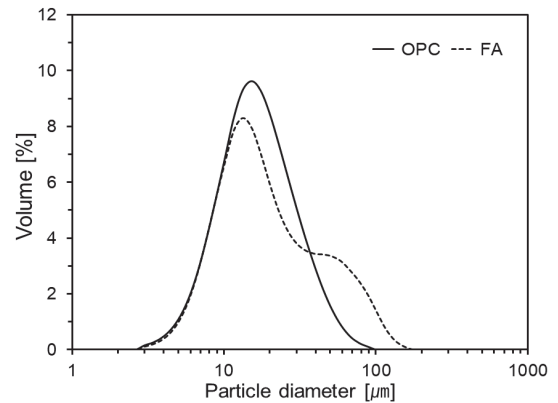


Fig. 2 Particle size distributions of OPC and FA

Table 1 Chemical compositions and physical properties

	Chemical Compositions (%)	
	OPC	FA
CaO	63.2	9.93
SiO <sub>2</sub>	20.2	50.5
MgO	2.7	1.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.1	24.3
SO <sub>3</sub>	1.4	2.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.6	3.6
Na <sub>2</sub> O	0.1	0.9
	Physical properties	
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.16	2.32

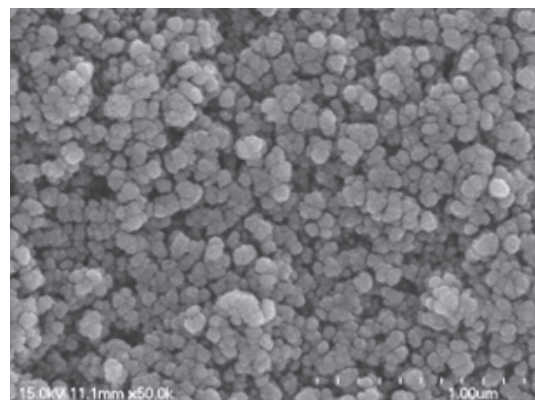


Fig. 3 SEM images of NS (× 50,000)

성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 나노 실리카는 크리스토팔라이트의 주요 라인에 해당하는 헤일로(halo)를 초래하는 무정형 구조를 가지고 있다.

Fig. 2는 OPC, FA의 입자 크기 분포를 보여주고 있다. OPC와 FA의 평균 직경은 각각 19.1  $\mu\text{m}$ , 26.7  $\mu\text{m}$ 이다. OPC는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 단봉 분포 형태를 보이고 있고, FA는 쌍봉 분포의 입도 형태를 보이고 있다.

또한 본 연구에서는 하이볼륨 플라이에시 콘크리트의 수화 촉진을 위해 고형분 함량 5%인 나노 실리카 현탁액(NS solution)을 제조하여 사용하였다. 사용된 나노 실리카는 국내 K사의 흙드 실리카를 현탁액 형태로 제조한 것이다. Fig. 3은 나노 실리카의 SEM 이미지를 나타내고 있다. 측정된 나노 실리카의 평균 입자 직경은 90 nm이다.

## 2.2 배합변수

본 연구에서는 나노 실리카 현탁액을 이용하여 Table 2와 같이 시멘트 페이스트를 제작하였다. 모든 시험체의 물-바인더 비율은 0.3으로 고정하였고, FA를 OPC 부피의 50%로 치환한 시편을 Plain으로 하였다. 나노 실리카 현탁액은 나노 실리카 고형분이 OPC 부피 대비 0.5 %가 되도록 혼입하였다. 나노 실리카 현탁액은 자체 물 함량을 고려하여 배합수를 결정하였다.

배합은 강제식 믹서에 OPC와 FA를 투입하여 약 30초간 혼합한 후, 나노 실리카 현탁액을 투입하여 약 100 rpm의 속도로 약 60 초간 혼합하였다. 마지막으로 약 200 rpm의 속도로 5분간 혼합하였다. 배합이 완료된 후 페이스트 시험체를 40 mm  $\times$  40 mm  $\times$  160 mm 크기의 몰드에 타설하고, 초기 1일 동안 온도 20  $\pm$  1 $^{\circ}\text{C}$ , 90 % 이상의 상대습도 조건의 항온항습 챔버에서 양생하였다. 그 이후 몰드에서 탈형하여 시험 측정일까지 온도 20  $\pm$  1 $^{\circ}\text{C}$  조건으로 수중 양생하였다.

## 2.3 실험방법

페이스트 시험체의 압축강도는 ISO 679에 따라 재령 3, 7, 28일에 측정하였다. 시험체는 휨 강도 측정 시험에 준하여 시험체를 2개로 분리한 뒤 각각의 시험체에 대해 압축강도를 측정하였다. 각 변수에 대해 재령별 6개의 표본의 압축강도를 측정 후, 그 평균값을 결과 값으로 사용하였다.

응결시간은 ISO 9597에 따라 비카트 장치를 사용하여 측정

**Table 2** Mix proportions of tested pastes

Specimens	W/B	Binder(g)			SP (wt% of binder)
		OPC	FA	NS	
Plain	0.3	100	73.42	0	0.06
NS05		99	73.42	0.71	0.25

하였다. 응결시험을 위한 페이스트는 온도 23  $^{\circ}\text{C}$ , 습도 60 %의 항온 항습실에서 제작하였다. 초결과 종결은 ACMEI사 PA8 자동 응결 시험기를 사용하여 측정하였다. 변수에 따른 수화 열 측정을 위해 TAM Air 등은 열량계를 사용하였다. Table 2의 배합비에 따라 변수별 페이스트를 제작한 후 약 4 g의 페이스트를 유리 앰플에 넣고 등온열량계에 투입하였다. 등온열량계의 온도 조건은 23  $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하여 1분 측정 간격으로 48 시간 동안 연속적으로 측정하였다.

미세구조 분석은 수은압입법을 통해 시험체 내부의 공극 크기분포와 누적 공극률을 측정하였다. 각 측정 재령에서 시편 중앙부의 샘플을 채취하여 수화 정지하였다. 그리고 탄산화 등에 의한 오염을 방지하기 위해 진공 건조하여 보관하였다. 수은 침입의 압력은 0부터 30,000 psi까지 변화되었다.

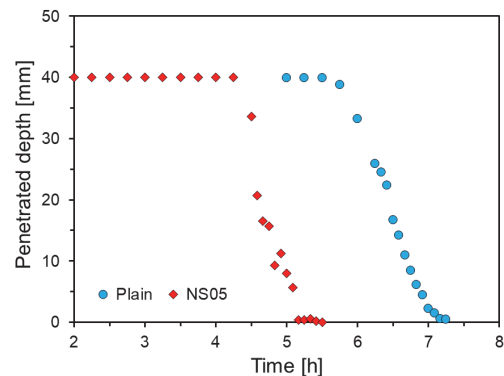
열 중량 분석을 위한 전처리로 페이스트 시험체는 건조실에서 40  $^{\circ}\text{C}$  온도로 24시간 건조한 후, 막자사발을 사용하여 분쇄하였다. 열 중량 분석기는 SDT Q600 V20.9 Build 20을 사용하였다. 승온 속도는 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로 하여 1000  $^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 수화특성

Fig. 4는 시간에 따른 비카침의 침투 깊이 결과를 나타내며, 이로부터 측정된 Plain, NS05의 초결 시간은 각각 5.92, 4.45 h이다. NS05의 초결 시간은 Plain과 비교하였을 때 24.8%가 단축되었다. Plain, NS05의 측정된 종결 시간은 각각 6.89, 5.09 h로 초결과 유사한 결과를 보였다. 이러한 결과는 나노 실리카가 시멘트의 수화반응을 가속화하여 시멘트 페이스트의 응결이 촉진되고, 수화 시 휴면기의 단축이 발생한다고 보고한 Chithra et al.(2016)의 연구 결과와 일치한다.

Fig. 5는 제작된 페이스트 시험체의 수화속도와 누적 발열량을 나타낸다. Fig. 5(a)로부터 측정된 Plain, NS05의 2차 피



**Fig. 4** Penetration results of specimens

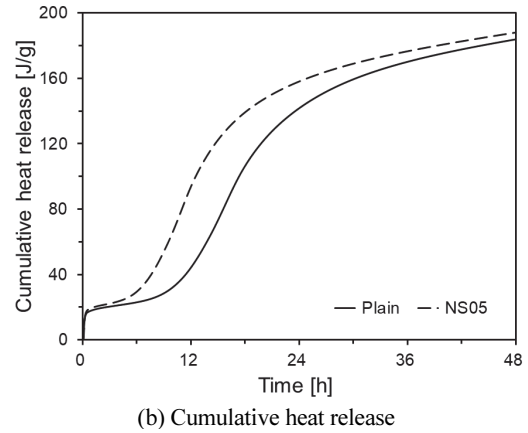
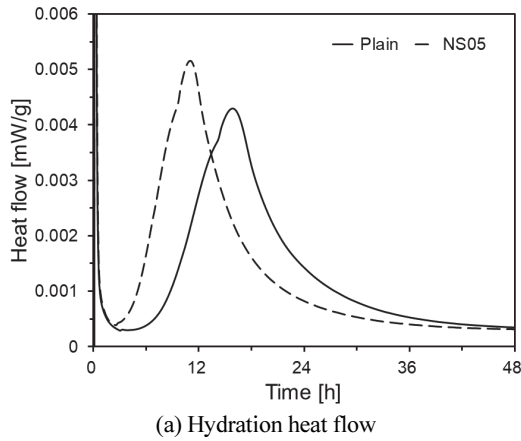


Fig. 5 Hydration heat flow and cumulative heat release

크 발생 시기는 각각 15.85, 11.03 h이다. 나노 실리카가 혼합된 시험체가 Plain에 비하여 피크 발생 시간이 감소하였고, 피크의 크기는 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 5(b)로부터 측정된 Plain, NS05의 누적 발열량 분석 결과, 수화 진행 48시간까지 NS05는 Plain보다 누적 발열량이 크게 증가하였다. 이는 나노 실리카 입자가 수화 초기에 시멘트 수화물의 추가적인 핵 생성처 역할을 하여 수화가 촉진된다고 보고한 Xi et al.(2020(a)) 연구진의 연구결과와 일치한다.

나노 크기의 입자를 가진 나노 실리카는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 초기 수화과정에서 시멘트 입자 사이에 공극을 메워 시멘트 내부의 구조적인 충전 효과를 나타낸다. 이는 모세 공극을 효과적으로 정제하여 매트릭스의 다공성을 감소시켜 매트릭스의 치밀성을 개선할 수 있다(Xi et al., 2020(b)). Pacheco-Torgal et al (2013) 연구진은 나노 실리카를 첨가하면 콘크리트 모르타르의 내부 구조가 더 치밀해진다고 보고했다.

또한, 나노 실리카 입자는 시멘트 초기 수화과정에서 수화 생성물의 침전을 위한 더 많은 핵 생성처를 제공함으로써 시멘트 수화반응을 촉진시킨다(Fig. 7). 나노 실리카 입자는 넓은 비표면적을 통해, 수화 시 생성된 C-S-H 겔을 나노 실리카 입자의 표면에 우선적으로 흡착시킨다. C-S-H 겔은 나노 실리카 입자 표면에 흡착된 상태로 시멘트 입자 사이로 전파되

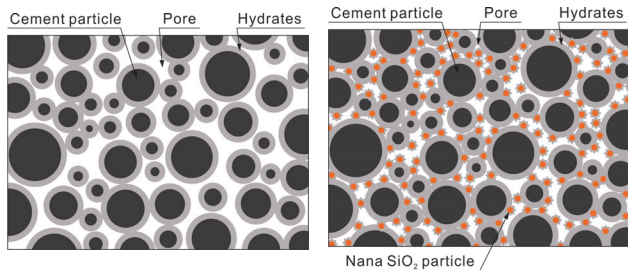


Fig. 6 Filler effect of NS particle (Xi et al., 2020)

어 결정핵으로서 작용된다(Xi et al., 2020(c)). 이는 시멘트의 수화반응을 더욱 가속화하고 더 많은 C-S-H 겔을 형성하여 강도 증진 및 응결 축진을 유발한다. Silvestre et al.(2016(b)) 연구진은 핵 생성처로 작용하는 나노 실리카 입자가 시멘트 시스템 내에서 C-S-H 네트워크와 연결되어 더 큰 네트워크를 형성하고 역학적 성능을 향상시킨다는 것을 발견했다.

### 3.2 압축강도

Fig. 8은 시험체의 재령에 따른 압축강도를 나타낸다. 압축강도는 각 변수에 대해 6번의 실험을 수행하였으며, 평균 값을 사용하였다. 표준편차는 2 MPa 이내이다. 재령 7일 압축강도를 제외한 NS05의 압축강도는 모든 재령에서 Plain보다 높게 나타났다. NS05의 재령 3일 압축강도는 Plain 대비 105 % 수준으로 높게 나타났다. 이는 수화 초기 나노 실리카가 핵 생성처를 제공함으로써 발생하는 강도 증진에 의한 것이다(Yu et al., 2014). 재령 28일에서는 NS05가 Plain에 비해 106 % 수

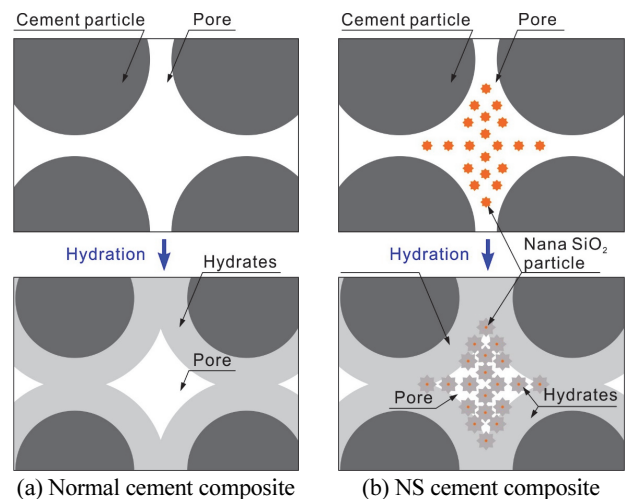


Fig. 7 Nucleating effect created by the NS particles (Xi et al., 2020)

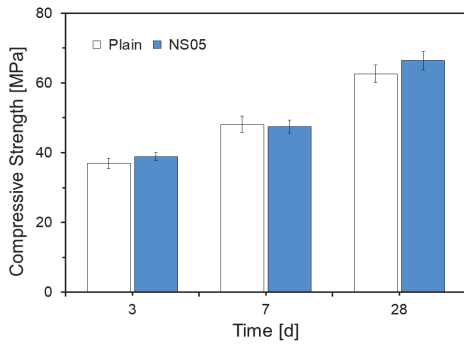


Fig. 8 Compressive strength results of specimens

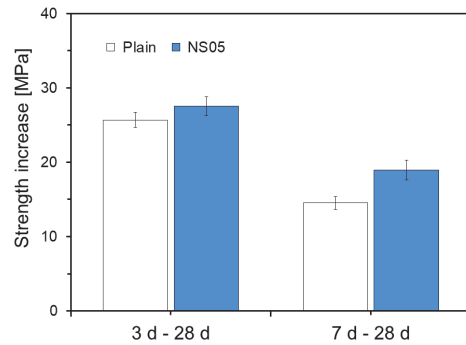


Fig. 10 Strength increase of specimens

준으로 높게 나타났다. 이는 수화 중기 나노 실리카 입자의 추가적인 포졸란 반응에 따른 수화반응 촉진으로 인해 강도가 증진된 결과로 보인다.

나노 실리카 입자는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 포졸란 반응으로 인해 수산화칼슘과 빠르게 반응하여 C-S-H 겔을 생성할 수 있다(Xi et al., 2020(d)). 시멘트 입자 사이에 침투한 나노 실리카 입자는 수화반응이 진행됨에 따라  $\text{SiO}_4^{4-}$ ,  $\text{AlO}_2^-$  이온을 용출한다. 이때  $\text{C}_3\text{S}$  입자에서 용출된  $\text{Ca}^{2+}$  이온과 반응하여 포졸란 입자 주위에 C-S-H 겔을 형성한다(Lee, 2003). 나노 실리카는 이러한 포졸란 반응을 통해 시멘트 수화과정에서 장기강도 증진을 촉진한다(Moon et al., 2016). Hanif et al. (2017) 연구진은 나노 실리카 입자를 플라이애시 콘크리트 복합체에 혼입하면 포졸란 활성의 진행을 상당히 가속화할 수 있다고 보고하였다.

Fig. 10은 재령에 따른 시험체의 압축강도 증가량을 나타낸다. 일반적으로 포졸란 반응으로 만들어지는 C-S-H 겔의 강도 증진 효과는 재령 3일 또는 7일 이후에 나타난다. 따라서 3일 또는 7일 이후 압축강도 증가량의 추이를 통해 수화 중기

에서 나노 실리카 입자의 추가적인 포졸란 반응이 압축강도에 미치는 영향을 확인할 수 있다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 재령이 3일에서 28일로 증가할 때 Plain, NS05의 압축강도는 각각 25.69, 27.54 MPa 증가하였다. 재령이 7일에서 28일로 증가할 때 Plain, NS05의 압축강도는 약 14.52, 18.96 MPa 증가하였다. 재령 7일 이후 NS05의 압축강도 증가량이 Plain에 비해 높게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 결과는 수화과정에서 시멘트 입자 사이로 침투한 나노 실리카 입자로 인해 포졸란 반응이 가속화되어 나타난 효과로 볼 수 있다.

### 3.3 기공특성

Fig. 11과 12는 시험체의 재령별 기공 크기 분포와 공극률을 나타낸다. Fig. 11과 12에서 보는 바와 같이 모든 시험체는 재령에 따라 기공 크기가 감소하는 경향을 보였다. 재령 3일에서 Plain은 주요 공극의 크기가 350~450 nm 범위에 있다. 그에 반해 나노 실리카 입자가 혼입된 NS05 시험체의 경우 대략적으로 250~350 nm 범위에서 기공의 피크가 나타났다. 이는 나노 실리카 미세입자의 충전 효과에 의한 것으로 보인다. 재령 7일 이후부터 NS05의 피크에 해당하는 기공 직경이 Plain에 비해 감소하였다. 특히 재령 28일에는 NS05의 기공 피크와 직경 모두 크게 감소하였다. 이러한 결과는 나노 실리카에 의한 공극 구조 개선 효과로 보인다.

### 3.4 열중량 분석

Fig. 12는 각 시험체의 재령별 TG와 DTG 곡선을 나타내고 있다. 열 중량계 질량 손실은 시멘트 페이스트 시험체가 고온에 노출될 때 특정 온도 구간에서 발생하는데, 이는 수화 생성물의 자유수 손실 및 탈수, 탈 탄소로 인한 것이다. 따라서 각 온도 범위에서의 질량 손실량을 통해 수화 생성물의 증가량을 알 수 있다.

일반적으로 50 ~ 200 °C 사이에서의 질량 손실은 주로 C-S-H 겔과 에트링자이트의 분해로 인해 증발된 층간 물의 지표라고 알려져 있다. 열 중량 분석 결과, 재령 3일에 50 ~

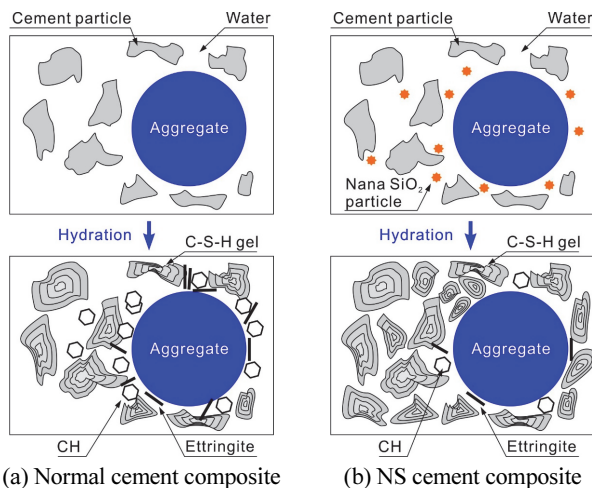


Fig. 9 Pozzolanic reaction by NS particles (Xi et al., 2020)

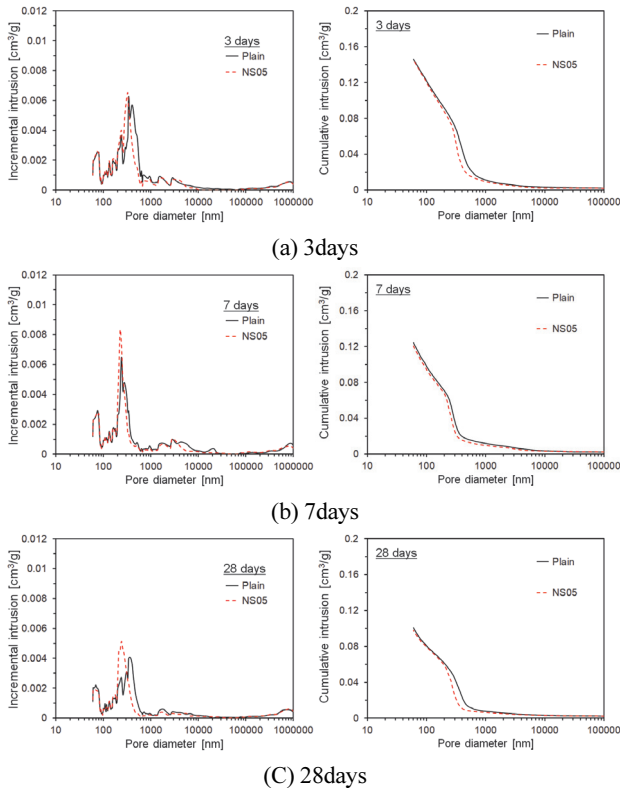


Fig. 11 Mercury intrusion curves of specimens

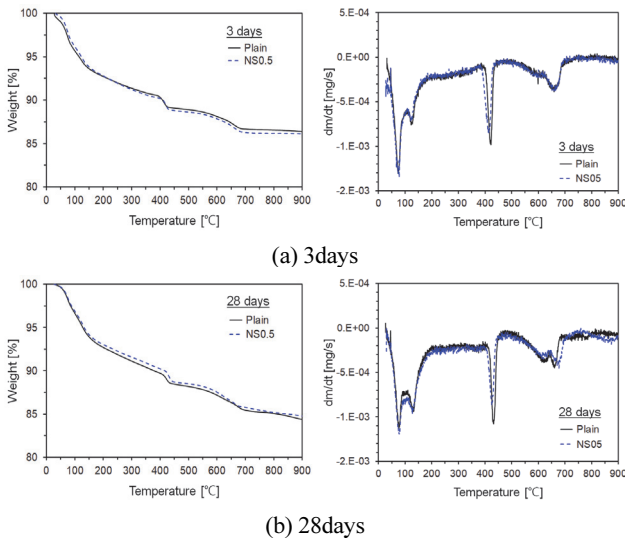


Fig. 12 TG and DTG curves of specimens

200 °C 사이에서의 발생한 Plain, NS05의 질량 손실은 6.29, 6.77 %이다. 또한, 재령 28일에 이 범위에서 발생한 Plain, NS05의 질량 손실은 5.63, 6.65 %로 큰 차이를 보였다. 이를 통해 나노 실리카를 하이 볼륨 플라이애시 콘크리트에 혼입할 경우, 나노 실리카 입자가 시멘트 혼합체 내부에서 추가적인 포졸란 반응을 유발하여 에트린자이트의 함량이 점차 증

가함을 알 수 있다.

Fig. 12에서 보는 바와 같이 약 400 ~ 470 °C의 온도 범위에서 모든 시험체의 흡열 피크가 발생하였다. 이 범위에서의 질량 손실은 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)의 분해에 의한 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2013). 재령 3일에 이 범위에서 Plain, NS05의 질량 손실은 각각 5.42, 6.04 %로 나타났다. 하지만 재령 28일에서의 질량 손실은 각각 6.63, 6.94 %로 NS05가 Plain보다 피크가 크게 감소하는 경향을 보였다.

#### 4. 결론

이 연구는 나노 실리카가 하이 볼륨 플라이애시 시멘트의 수화반응에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 나노 실리카 현탁액을 제조하여, FA를 시멘트 부피의 50%로 치환한 하이 볼륨 플라이애시 페이스트에 적용하였다. 나노 실리카 현탁액은 나노 실리카 고형분이 OPC 부피 대비 0.5%가 되도록 혼입하였다. 각 시험체에 대해 응결시험, 미소 수화열 및 압축강도 측정 결과를 이용하여 수화 정도를 평가하였다. 또한, 나노 실리카 혼입에 따른 기공 구조는 재령 3, 7, 28일에 MIP를 통해 측정하였다. 재령별 열 중량 분석을 통해 수화 생성물을 분석하였다. 이 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 나노 실리카를 혼입한 시험체의 초결 및 종결 시간이 Plain에 비해 단축되었다. 특히 초결 시간은 24.8%가량 감소하는 결과를 나타냈다. 이는 시멘트 복합체 내부로 침투한 나노 실리카 입자에 의한 충전효과의 결과로 보인다. 또한, 나노 실리카가 혼입된 시험체의 수화속도가 Plain에 비해 증가하였고, 누적 발열량 또한 증가하는 경향을 보였다. 이는 나노 실리카 입자가 수화 초기에 시멘트 수화물의 추가적인 핵 생성처 역할을 한 것으로 보인다.
- 2) 압축강도 측정 결과, NS05의 재령 7일을 제외한 모든 재령의 압축강도는 Plain보다 증가하였다. 또한, 재령에 따른 압축강도 증가량 분석 결과, 재령 7일 이후 NS05의 압축강도 증가량이 Plain에 비해 높게 나타났다. 특히 재령이 7일에서 28일로 증가할 때 가장 큰 증가 추이를 보였다. 이는 나노 실리카 입자로 인해 포졸란 반응이 가속화되어 나타난 효과로 보인다.
- 4) MIP 분석을 통한 미세구조 분석 결과, 시험체의 기공 크기는 나노 실리카가 혼입됨에 따라 감소하였다. 특히 재령 28일에 NS05의 피크에 해당하는 기공 직경은 Plain에 비해 두드러지게 감소하는 경향을 보였다. 이는 수화 초기에 나노 실리카 입자의 포졸란 활성으로 인한 기공 구조 개선 효과로 보인다.
- 5) 열 중량 분석을 통한 수화 생성물 측정 결과, 시멘트 복합체 내부에 혼입된 나노 실리카는 수화 생성물을 증가시

키는 경향을 나타냈다. 이는 포졸란 재료인 NS가 시멘트 복합체 내부에서 수화를 촉진하고, 추가적인 포졸란 반응을 발생시킨 결과로 보인다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020R1A2C2008926).

## References

- Prakash, R., Raman, S. N., Subramanian, C., and Divyah, N. (2022), 6 - Eco-friendly fiber-reinforced concretes, *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management*, 109-145.
- Sahoo, S., Das, B. B., and Mustakim, S. (2017), Acid, alkali, and chloride resistance of concrete composed of low-carbonated fly ash. *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(3), 1-12.
- Bagheri, A. R., Zanganeh, H., and Moalemi, M. M. (2012), Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag, *Cem. Concr. Compos.*, 34(5), 663-670.
- de Sensale, G. R., (2006), Strength development of concrete with rice husk ash. *Cem. Concr. Compos.*, 28(2), 158-160.
- Giner, V.T., Ivorra, S., Baeza, F. J., Zornoza, E., and Ferrer, B. (2011), Silica fume admixture effect on the dynamic properties of concrete. *Constr. Build. Mater.*, 25(8), 3272-3277.
- Obla, K. H., Hill, R.L., Thomas, M. D. A., Shashiprakash, S. G., and Perebatova, O. (2003), Properties of concrete containing ultra-fine fly ash, *ACI Mater. J.*, 100(5), 426-433.
- Copeland, K. D., Obla, K. H., Hill, R. L., and Thomas, M. D. (2001), A. Ultra Fine Fly Ash for High Performance Concrete. In Construction Institute Sessions at ASCE Civil Engineering Conference, Houston, Texas, USA, 166-175.
- Das, B. B., Singh, D. N., and Pandey, S. P. (2012), Rapid chloride ion permeability of OPC- and PPC-based carbonated concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 24(5), 606-611.
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Peris-Mora, E., and Amahjour, F. (2000), Mechanical treatment of fly ashes: Part IV. Strength development of ground fly ash-cement mortars cured at different temperatures. *Cem. Concr. Res.*, 30(4), 543-551.
- Qian, J., Shi, C., and Wang, Z. (2001) Activation of blended cements containing fly ash. *Cem. Concr. Res.*, 31(8), 1121-1127.
- Babaian, P. M., Wang, K., Mishulovich, A., Bhattacharja, S., and Shah, S.P. (2003), Effect of mechanochemical activation on reactivity of cement kiln dust-fly ash systems. *ACI Mater. J.*, 100(1), 55-62.
- Goñi, S., Guerrero, A., Luxán, M.P., and Macías, A. (2003), Activation of the fly ash pozzolanic reaction by hydrothermal conditions. *Cem. Concr. Res.*, 33(9), 1399-1405.
- Wang, K., Shah, S.P., and Mishulovich, A. (2004), Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders. *Cem. Concr. Res.*, 34(2), 299-309.
- Yang, G., Wu, T., Fu, C., and Ye, H. (2021), Effects of activator dosage and silica fume on the properties of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-activated high-volume fly ash. *Constr. Build. Mater.*, 278, 1-9.
- Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J.G., Wang, C.M., and Duan, W.H. (2014), Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide. *Constr. Build. Mater.*, 73, 113-124.
- Du, H., and Pang, S.D. (2015), Enhancement of barrier properties of cement mortar with graphene nanoplatelet. *Cem. Concr. Res.*, 76, 10-19.
- Li, H., Xiao, H., and Ou, J. (2004), A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cem. Concr. Res.*, 34(3), 435-438.
- Silvestre, J., Silvestre, N., and de Brito, J.(2016), Review on concrete nanotechnology. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 20(4), 455-485.
- Wang, Y., Hughes, P., Niu, H., and Fan, Y.(2019), A new method to improve the properties of recycled aggregate concrete: Composite addition of basalt fiber and nano silica. *J. Clean.*, 236, 1-12.
- Yeşilmen, S., Al-Najjar, Y., Balav, M.H., Şahmaran, M., Yıldırım, G., and Lachemi, M. (2015), Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites. *Cem. Concr. Res.*, 76, 170-179.
- Senff, L., Tobaldi, D.M., Lucas, S., Hotza, D., Ferreira, V.M., and Labrincha, J.A. (2013), Formulation of mortars with nano-SiO<sub>2</sub> and nano-TiO<sub>2</sub> for degradation of pollutants in buildings, *Compos. B. Eng.*, 44(1), 40-47.
- Li, G. (2004), Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. *Cem. Concr. Res.*, 34(6), 1043-1049.
- Kong, D., Du, X., Wei, S., Zhang, H., Yang, Y., and Shah, S.P. (2012), Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials, *Constr. Build. Mater.*, 37, 707-715.
- Kawashima, S., Hou, P., Corr, D.J., and Shah, S.P. (2013), Modification of cement-based materials with nanoparticles, *Cem. Concr. Compos.*, 36, 8-15.
- Ghafari, E., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., and Durães, L. (2014), The effect of nano silica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete, *Mater. Des.*, 59, 1-9.
- Liu, H., Li, Q., Ni, S., Wang, L., Yue, G., and Guo, Y. (2022), Effect of nano-silica dispersed at different temperatures on the properties of cement-based materials. *J. Build. Eng.* 46, 103750.
- Wu, Z., Khayat, K.H., and Shi, C. (2017), Effect of nano-SiO<sub>2</sub> particles and curing time on development of fiber-matrix bond properties and microstructure of ultra-high strength concrete. *Cem. Concr. Res.* 95, 247-256.
- Chithra, S., Senthil Kumar, S.R.R., and Chinnaraju, K. (2016), The effect of colloidal nano-silica on workability, mechanical and durability properties of high-performance concrete with copper slag as partial fine aggregate. *Constr. Build. Mater.* 113, 794-804.
- Xi, B., Zhou, Y., Yu, K., Hu, B., Huang, X., Sui, L., and Xing, F. (2020), Use of nano-SiO<sub>2</sub> to develop a high performance green lightweight engineered cementitious composites containing fly

- ash cenospheres. *J. Clean.* 262, 1-14.
30. Pacheco-Torgal, F., Miraldo, S., Ding, Y., and Labrincha, J.A. (2013), Targeting HPC with the help of nanoparticles: An overview. *Constr. Build. Mater.* 38, 365-370.
  31. Yu. R., Spiesz. P., and Brouwers. H.J.H. (2014), Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of ultra-high- performance concrete (UHPC) with a low binder amount, *Constr. Build. Mater.* 65, 140-150.
  32. Lee. S.H. (2003) About the pozzolanic reaction. *Cement*, 158, 40-44.
  33. Moon, G.D., Oh, S., and Choi, Y.C.(2016), Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar. *Constr. Build. Mater.* 124, 1072-1080.
  34. Hanif, A., Parthasarathy, P., Ma, H., Fan, T., and Li, Z. (2017), Properties improvement of fly ash cenosphere modified cement pastes using nano silica. *Cem. Concr. Compos.* 81, 35-48.
  35. Kim. M.S., Jun. Y.b., Lee. C.H., and Oh. J.E. (2013), Use of CaO as an activator for producing a pricecompetitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag. *Cem Concr Res.* 54, 208-214.

Received : 10/07/2022

Revised : 11/09/2022

Accepted : 11/10/2022

---

**요 지 :** 최근 탄소중립에 관한 관심이 높아지면서 건설 산업에서 하이블룸 플라이애시 콘크리트를 사용하는 연구가 다양하게 수행되고 있다. 하지만 HVFC는 초기 압축강도가 낮은 단점이 있어, 이를 개선하기 위해 나노 소재를 활용한 연구에 대한 관심이 높아지고 있다. 나노 실리카는 포졸란 재료로서 이러한 조기 강도 지연을 보완할 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 나노 실리카를 HVFC에 혼입하여 초기 수화반응에 미치는 영향과 이에 따른 미세구조의 개선에 대해 조사하였다. 초기 수화반응은 응결실험과 미소수화열을 통해 분석하였고, 재령에 따른 압축강도와 열중량 분석을 진행하였다. 미세구조 개선의 효과는 수은압입법을 통해 평가하였다. 실험결과 나노실리카를 혼입하였을 때, 초기 강도가 증가하였고 미세구조가 개선되는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 나노 실리카, 플라이애시, HVFC, 시멘트복합체, 충전효과, 미세구조

---