J Rec Const Resources 10(3)269-275(2022)
https://doi.org/10.14190/JRCR.2022.10.3.269

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

포졸란 혼화재의 입자 크기 및 비표면적에 따른 응결시간 발현 및 압축강도 특성 평가

Experimental Study on the Setting Time and Compressive Strength of Nano-Micro Pozzolanic Binders as Cement Composites

김원우[1,2*] · 양근혁[3]
Won-Woo Kim[1,2*] · Keun-Hyeok Yang[3]

(Received September 2, 2022 / Revised September 19, 2022 / Accepted September 20, 2022)

In this study, the setting time and compressive strength of cement paste composites applied with nano-micro pozzolanic binders were experimental analyzed. The pozzolanic binder was reduced initial and final setting time and the compressive strength was increased. Micro silica was effective in decrease the initial setting and final setting time and impressing the compressive strength. When two or more cement binders were used, the using of silica fume and a small amount of nano silica at reduced the setting time to 62-64 % to OPC cement and the compressive strength was increased to 117 %. A small amount of mixing the nano silica was effect to pore filling and pozzolanic activation. However, the addition of a chemical admixture should be considered when mixing table design because pozzolanic binders high specific surface area causes a decrease in cement composites flow.

키워드 : 포졸란 혼화재, 나노 실리카, 마이크로 실리카, 응결시간
Keywords : Pozzolanic binder, Nano silica, Micro silica, Setting time

1. 서 론

다양한 소재의 개발과 신기술의 발전으로 콘크리트 재료로써 나노-마이크로 입자 크기의 소재를 적용한 건설재료 개발이 이루어지고 있다. 마이크로 크기의 입자는 대표적으로 초고강도 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, 이하 UHPC) 등 에 사용되고 있는 마이크로 실리카, 실리카 샌드 등의 포졸란 혼화재와 충진재가 있다(Richard and Cheyrezy 1995; Zanni et al. 1996). 반응성이 있는 실리카계 재료는 포졸란 반응을 일으켜 혼화재로써 강도 증진 효과를 기대할 수 있으며, 시멘트 대비 상대적으로 작은 크기의 입자가 시멘트 복합체 내 공극을 채워주는 내부충진 효과로 강도 상승의 역할을 한다(Goldman and Bentur 1993). UHPC는 이러한 재료의 반응성 및 입자 크기의 분포 최적화를 통해 개발된 재료이다. 하지만 UHPC에서 마이크로 크기의 소재 적용에 대한 연구와 탄소계 나노소재에 대한 연구가 주로 진행되고 있으며(Lee et al. 2017; Dong et al. 2020; Yu et al. 2022), 나노 입자 크기의 혼화재 적용에 대한 연구는 다양하게 이루어지고 있지 않다.

시멘트계 재료로써 나노소재의 사용은 입자 크기 및 수화반응에 대한 연구보다는 CNT 및 그래핀의 전기 전도도를 활용한 차폐 콘크리트 연구(Micheli et al. 2014) 또는 광촉매(TiO_2)의 질소산화물 제거효과를 활용한 친환경 콘크리트 개발 연구에 이용되고 있다(Karapati et al. 2014). 나노소재의 수화 반응성 및 기본특성에 대한 연구도 늘어나고 있으나 아직까진 부족한 상황이다(Poppe and De Schutter 2006; Kim et al. 2021). 특히, 나노-마이크로

* Corresponding author E-mail: kimwonwoo@kict.re.kr
[1]한국건설기술연구원 구조연구본부 전임연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)
[2]경기대학교 건축공학과 일반대학원 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do, 16227, Korea)
[3]경기대학교 스마트시티공학부 건축공학전공 교수 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do, 16227, Korea)

Copyright ⓒ 2022 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

입자 크기의 건설용 소재들에 대한 시멘트와의 수화발현 특성 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 나노 입자 크기의 혼화재 중 건설용으로 많이 사용되고 있는 포졸란 반응성이 있는 재료인 실리카계 혼화재에 대한 연구를 수행하고자 한다.

나노 입자 크기의 혼화재의 경우 단독적으로 사용 시 부피가 크기 때문에 혼입율에 대한 제약이 크다. 따라서 소량 단독 혼입하였을 경우와 마이크로 수준의 입자 크기를 갖고 있는 혼화재와 함께 사용하였을 때의 응결 및 압축 특성을 평가하였다. 배합변수는 포졸란 반응을 일으키는 실리카계 소재 중 혼화재로 사용 가능한 소재들에 대해 입자 크기 및 비표면적을 고려하여 결정하였다. 결정된 배합으로 부터 시멘트 수화반응에 미치는 효과를 평가하고자 시멘트 페이스트의 응결 시간 발현 특성을 분석하고 역학적 특성으로는 압축강도 증진효과에 대해 평가하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험재료 및 배합정보

본 연구에서 사용된 시멘트는 국내 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC, Ordinary Portland Cement)이며, 포졸란 혼화재(Pozzolanic binder)는 S사의 나노 실리카 15 nm, E사의 마이크로 실리카, 실리카 흄으로 결정 하였다. OPC 시멘트와 포졸란 혼화재의 화학적 조성과 물리적 특성에 대해서는 Tables 1과 2에 나타내었다. 시멘트의 주요 화학적 조성은 CaO와 SiO_2가 대부분을 이루고 있으며, 조성비는 각각 61.6 %와 20.7 %로 구성되어 있다. 포졸란 혼화재는 SiO_2의 화학적 조성비가 98.74~ 99.78 %로 거의 대부분을 차지하고 있으며, 입자의 크기는 시멘트 대비 약 0.75~0.07 % 수준의 미립분으로 구성되어 있다. 입자의 크기가 작아짐에 따라 비표면적은 시멘트 대비 약 47~612배 높은 수준이다. 시멘트 복합체의 배합표는 Table 3에 나타내었다. 물-바인더비는 0.3으로 고정 변수로 두었으며, 포졸란 혼화재 종류 및 혼입율을 변수로 결정하였다. 시멘트 복합체의 응결시간 특성에 영향을 줄 수 있으므로 고성능 감수제 등의 화학 혼화제는 배합에 사용하지 않았다.

나노 크기 수준의 재료는 일반적으로 사용하고 있는 건설용 혼화재보다 비중이 낮고 비표면적이 크기 때문에 중량배합설계로 사용하기에는 한계가 있다(Kim et al. 2021). 따라서 Kim et al.(2021)이 제시한 부피 배합 설계방법을 이용하여 Table 4와 같이 부피비로 환산하여 설계하였다. 부피환산을 위한 비중은 Table 2의 값을 이용하였다. 실리카 흄의 경우 고강도 콘크리트 배합에서 일반적으로 10 %를 시멘트 중량대비 치환하여 사용하는 연구가 많다(Lee et al. 2017; Dong et al. 2020; Yu et al. 2022). 따라서 본 연구에서도 시멘트 중량대비 10 % 수준의 혼입율을 변수로 설정하였으며, 부피비로 환산해본 결과 약 7.5 %로 계산되었다. 상대적으로 소재의 입자 크기와 비중 값이 작고 높은 비표면적을 갖고 있는 나노 실리카는 1 %를 혼입율로 결정하였다. 또한 실리카 흄, 마이크로 실리카와 나노 실리카를 동시에 혼입하였을 때의 응결시간 특성도 확인하기 위해 실리카 흄과 마이크로실리카 7.5 % 혼입배합에 나노 실리카 1 %를 추가 혼입한 실험도 수행하여 비교하였다.

Table 1. Chemical composition of OPC

	Chemical composition (%)							
	LOI	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O
OPC	3.2	20.7	5.2	3.4	61.6	2.1	2.6	0.9

LOI: Loss on ignition

Table 2. Physical properties of OPC and Binder

Materials	Ingredients		Particle size (nm)	Specific surface area (m^2/g)	Specific gravity
OPC	CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, etc		20,000	0.38	3.14
Silica fume	SiO_2	99.6	150	15~30	2.22
Micro silica		96.1	22.65	20.8	2.106
Nano silica		99.8	14.05	203.8	1.401

시멘트 복합체의 제조는 ASTM C 305, KS L 5109 기준에 따라 패들믹서를 사용하여 배합하였으며, 포졸란 혼화재는 시멘트와 충분히 혼합 후 수행하였다.

2.2 흐름성(Flow table) 측정

포졸란 혼화재를 혼입한 시멘트 페이스트 배합에 대한 흐름성 테스트는 플로우 테이블을 이용하였다(KS L 5111). 시험 측정은 25회 타격 시 흐름 정도를 플로우 테이블에서 버니어켈리퍼스로 측정하였으며, 동일 배합에서 2번씩 측정하여 평균값을 사용하였다.

Table 3. Cement paste mixing table of proportion

Specimens	W/B (%)	Binder (%)			
		Cement	SF	MW	NS
OPC	0.30	100	-	-	-
SF		92.5	7.5	-	-
MS		92.5	-	7.5	-
NS		99.9	-	-	1
SFNS		92.4	-	7.5	1
MSNS		92.4	-	7.5	1

OPC: Ordinary Portland Cement, SF: Silica Fume, MS: Micro Silica, NS: Nano silica 15 nm

Table 4. Cement paste mixing table by volume conversion

Specimens	W/B (%)	Water (g)	Binder (g)	Binder (g)			
				Cement	SF	MW	NS
OPC	0.3	485.1	1617	1617	-	-	-
SF		477.3	1591	1471.7	119.3	-	-
MS		473.1	1587	1468.0	-	119.0	-
NS		482.1	1607	1590.9	-	16.1	
SFNS		474.3	1581	1446.6	118.6	-	15.8
MSNS		473.1	1577	1443.0	-	118.2	15.8

2.3 응결시간(Vicat) 측정

응결시간 측정은 시멘트 페이스트 상태에서 비카 침 실험 방법에 의해 수행하였으며, ASTM C 191 기준에 따라 CONTROLS사의 Vicamatic2 자동 측정 장비를 사용하였다(Fig. 1). 시멘트 배합별 응결시간(초결 및 종결)을 측정하기 위해 시험 시작 후 관입깊이는 30분 간격으로 측정하다가 초결 시간에 근접 할수록 관입깊이가 급격히 감소하기 때문에 30 mm 이하가 될 경우 5분 간격으로 관입 침이 자동낙하 하도록 설정하였다. 관입깊이의 시작은 38 mm 부터 시작하였으며, 장비의 특성상 0 mm까지 측정이 어려워 종결시간은 2 mm관입시점으로 결정하였다. 시험 측정 조건은 항온항습 챔버를 활용하여 온도 20 ℃, 습도 85 % 조건에서 측정하였다.

Fig. 1. Vicat test setup of cement paste (Vicatmatic2)

2.4 압축강도 측정

포졸란 혼화재 혼입에 따른 역학적 특성 검증을 위해 시멘트 페이스트의 압축강도를 측정하였다. 시멘트 복합체의 압축강도를 측정하기 위해 응결시간 측정 시 동일한 혼입율로 50x50x50 mm의 큐빅 시험체를 제작하였으며, 80 ℃의 고온에서 수중 양생하여 재령 7일 후 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정은 300 kN 만능재료시험기를 이용하여 ASTM C 109의 규정에 맞게 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 흐름성

시멘트 페이스트의 흐름성은 Fig. 2에 나타내었다. 포졸란 혼화재의 혼입량에 따라 실리카 흄 혼입배합을 제외한 나머지 배합의 흐름성은 감소하는 경향성을 나타냈다. OPC가 약 190 mm 수준으

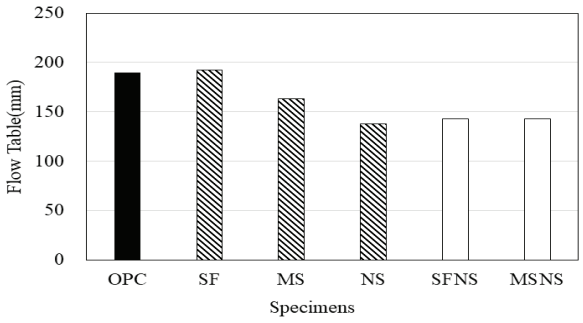

Fig. 2. Flow table of pozzolanic binder

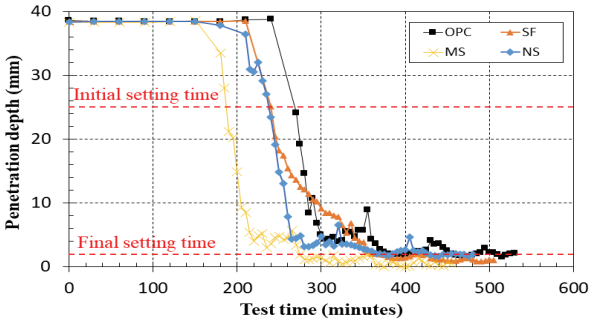

Fig. 3. Vicat test result of pozzolanic binder

로 측정되었으며, 순차적으로 실리카 흄 배합이 192 mm, 마이크로 실리카 배합이 163 mm, 나노 실리카 배합이 138 mm로 측정되었다. 나노 실리카의 경우 타 포졸란 혼화재와 비교하였을 때 혼입율이 1/7 수준임에도 불구하고 밀도가 낮고 비표면적이 크기 때문에 흐름성이 급격히 감소하였다고 판단된다.

실리카 흄과 마이크로 실리카를 함께 혼입한 배합에서도 나노 실리카를 혼입하였을 때와 비슷한 수준의 흐름성이 측정 되었으나 추가적인 흐름성 감소는 나타나지 않았다. 이는 실리카 흄과 마이크로 실리카가 상대적으로 비표면적이 작아 흐름성에 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 따라서 나노 실리카를 혼화재로 혼입할 경우 흐름성 저하를 방지하기 위해 혼화제의 사용을 고려해야 할 것이다.

3.2 응결시간 측정결과

포졸란 혼화재의 혼입에 따른 응결시험 결과는 시간에 따른 관입깊이로 Fig. 3에 나타내었다. OPC 배합의 초결 및 종결시간은 각각 268분과 380분으로 측정되었다. 포졸란 혼화재 종류에 따라 초결 및 종결시간은 OPC 대비 빨라지는 경향을 나타냈으며, 실리카 흄 혼입 배합의 경우 초결 및 종결시간은 240분과 360분으로 측정되었다. 마이크로 실리카 배합의 경우 초결 및 종결시간은 187분과 275분으로 측정되었으며, 나노 실리카 배합은 초결과 종결시간이 238분과 365분으로 측정되었다. 나노 실리카의 경우 상대적으로 적은 혼입율로도 실리카 흄과 비슷한 응결촉진 효과가 나타났다. 이 결과는 나노 실리카가 상대적으로 적은 혼입량에 비해 입자 크기가 작고 비표면적이 크기 때문에 포졸란 반응이 촉진됨으로 초기 수화가 빠르게 진행 되는 것으로 예상된다. 마찬가지로 마이크로 실리카 또한 실리카 흄과 비교하였을 때 입자의 크기가 작기 때문에 상대적으로 포졸란 반응 촉진효과가 크며 동시에 복합체 내 기공을 충진하는 필러 효과를 일으키는 것으로 판단된다.

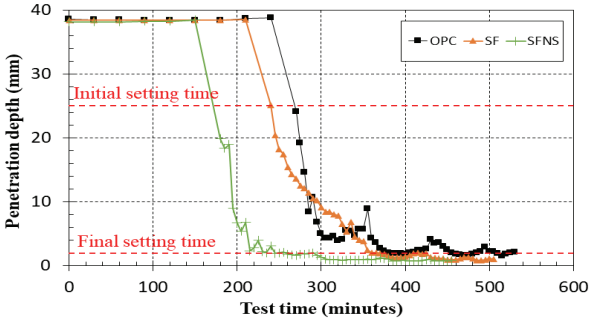

Fig. 4. Vicat test result of silicafume and nanosilica

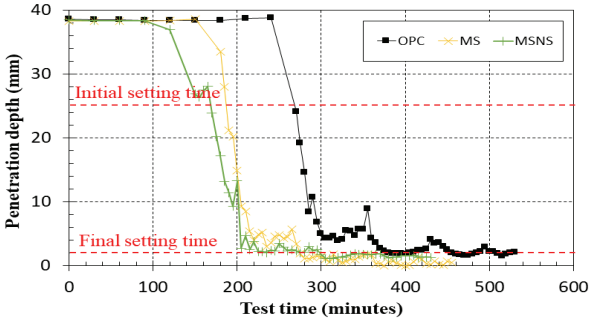

Fig. 5. Vicat test result of micro and nano-silica

입자의 크기에 따른 효과를 분석하기 위해 실리카 흄과 마이크로 실리카 대비 약 1/10 수준의 비표면적을 갖고 있는 나노 실리카를 함께 첨가한 배합을 수행하여 비교하였다. 실리카 흄과 마이크로 실리카를 7.5 % 혼입한 배합에 1 %씩 혼입하여 응결시간 발현을 분석하여 Fig. 4와 5에 나타내었다. 나노 실리카를 1 % 혼입함으로써 초결과 종결시간 모두 감소함을 확인할 수 있었다. 실리카 흄 배합의 경우 초결과 종결시간이 각각 약 68분와 125분이 단축되었으며, 마이크로 실리카 혼입 배합의 경우 약 18분와 40분이 단축되었다. 소량의 나노 실리카 혼입에 의해 응결시간이 급격히

감소함을 확인할 수 있었으나 마이크로 실리카 배합의 경우 실리카 흄 대비 응결시간 감소가 미미한 수준으로 측정되었다.

실리카 흄과 나노 실리카를 함께 혼입한 배합에서는 14.05 nm 수준의 입자 크기로 구성되어 있는 나노 실리카가 포졸란 반응성을 촉진시키고 150 nm 수준의 실리카 흄과 20,000 nm 수준의 시멘트 입자 사이에 고르게 분산되고 내부 공극이 충진 되어 응결시간을 단축시킨 것으로 판단된다. 반면 마이크로 실리카는 22.65 nm 수준의 입자크기로 나노 실리카와 입자 크기에서 차이가 크지 않기 때문에 내부 공극 충진에 큰 영향성을 주지 못한 것으로 판단된다. 이는 UHPC 배합에서 나타나는 입자 크기 분포에 따른 실험결과와 비슷한 결과이다(Richard and Cheyrezy 1995).

3.3 압축강도 측정결과

압축강도 실험 결과는 포졸란 혼화재의 혼입량에 따른 증진결과를 Fig. 6에 나타내었으며, OPC 대비 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 실리카 흄의 경우 OPC 대비 약 1.07배 증진하였으며, 마이크로 실리카, 나노 실리카를 혼입하였을 때 각각 약 1.11배와 1.02배 증가하는 결과를 얻었다.

포졸란 혼화재를 단독으로 사용하였을 때는 마이크로 실리카를 혼입한 배합이 가장 높은 강도 증진을 얻을 수 있었으며, 나노 실리카 혼입 배합의 경우가 가장 낮은 강도 증진효과가 나타났다. 이는 앞서 응결실험 결과에서 나타난 결과와 마찬가지로 시멘트 대비 작은 입자를 구성하고 있는 포졸란 반응을 일으키는 혼화재의 혼입으로 인해 수화반응이 촉진되며 강도증진 효과가 있음을 의미한다. 나노 실리카의 경우 응결시간 측정결과에서는 실리카 흄과 비슷한 응결 시간 단축에 효과가 있었으나, 강도 증진 율이 낮게 측정되었다. 이 결과는 상대적으로 포졸란 혼화재 중 입자의 크기가 작고 비표면적이 크기 때문에 건비빔시 발생한 뭉침 현상으로 인한 것이라고 판단된다. 시멘트의 입자 크기와 나노 실리카의 입자 크기 차가 크기 때문에 입도분포 부조화 효과도 영향을 미쳤을 것이며, 흐름성 저하로 인한 압축강도 시험체 제작이 어려웠던 점도 고려하여야 할 것이라 사료된다.

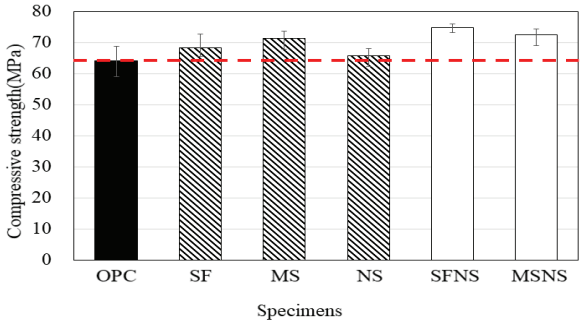

Fig. 6. Compressive strength of pozzolanic binder

입자 크기 분포에 따른 영향성은 실리카 흄과 마이크로 실리카에 소량의 나노 실리카를 혼입한 배합의 결과를 통해 확인할 수 있었다. 실리카 흄과 나노 실리카를 함께 혼입한 배합의 경우 실리카 흄을 단독으로 사용했을 배합 보다 약 1.09배의 강도 상승을 보인 반면 마이크로 실리카와 나노 실리카를 함께 혼입한 배합은 약 1.01배로 마이크로 실리카만 사용한 배합과 비슷한 수준이었다. 실리카 흄은 평균 입경이 약 150 nm 수준으로 14 nm 수준인 나노 실리카의 필링효과가 극대화 된 반면, 22 nm수준의 비슷한 평균 입경을 갖고 있는 나노 실리카의 경우 강도증진 효과가 미미한 것으로 판단된다. 실험결과 포졸란 혼화재를 사용할 경우 단독적으로 사용할 때는 마이크로 실리카를 사용하는 것이 강도증진에 효과적 이였으며, 입자 크기 분포를 고려하여 사용할 경우 실리카 흄과 나노 실리카를 함께 혼입하는 것이 공극 채움 효과로 강도증진이 극대화됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 포졸란 혼화재의 입자크기와 비표면적에 따라 초기 시멘트 수화반응에 미치는 영향을 검토하기 위해 실리카 흄, 마이크로 실리카, 나노 실리카를 사용하여 응결 시간과 역학적 특성을 평가하였다. 응결시간은 포졸란 혼화재를 단독으로 사용했을 때의 효과를 검토한 후 입자 크기가 작고 비표면적이 큰 나노 실리카를 함께 사용하였을 때의 특성을 추가적으로 검토하였다. 그리고 초기 수화반응 촉진에 따라 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하고자 시멘트 복합체의 압축강도를 평가하여 다음과 같이 결론을 내렸다.

1. 포졸란 혼화재를 혼입할 경우 흐름성이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 나노 실리카와 같이 비표면적이 크고 입자가 작은 소재를 첨가할 경우 급격한 저하가 나타났다.
2. 응결시간을 측정한 결과 포졸란 혼화재를 혼입하였을 때 초결 및 종결시간이 OPC 대비 단축되는 효과를 확인하였으며, 특히 마이크로 실리카를 사용하였을 때 초결 및 종결강도가 발현되는데 약 70 % 수준으로 단축되어 초기 수화 발현에 효과적임을 확인할 수 있었으며, 나노 실리카의 경우 작은 입자크기와 높은 비표면적으로 실리카 흄 대비 소량으로도 비슷한 응결 촉진 효과를 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 포졸란 혼화재의 입자 크기를 고려하여 실리카 흄과 마이크로 실리카 배합에 나노 실리카를 추가로 혼입하여 실험한 결과 초결 및 종결 시간이 추가적으로 단축됨을 확인할 수 있었다. 특히 실리카 흄 배합에서 응결 시간이 단축되는 효과가 급격하게 나타났는데, 이는 마이크로 크기 수준의 입자를 갖고 있는 실리카 흄 내 공극을 나노 크기 수준의 나노 실리카가 채워줌으로써 필링효과를 나타낸 것으로 판단된다.
4. 마이크로 실리카와 나노 실리카를 함께 혼입한 배합의 경우 상대적으로 응결시간에 미치는 효과가 미미하였다. 이는 마이크로 실리카와 나노 실리카의 입자 크기 차이가 크지 않아 오히려 복합체 내 입도분포의 부조화로 내부 공극 채움효과가 미미한 것으로 판단된다.
5. 압축강도 실험결과에서도 응결시간 발현 효과와 비슷한 결과를 얻을 수 있었으며, 특히 실리카 흄과 나노 실리카를 함께 혼입한 배합에서 소량의 나노 실리카로 각각 117 %와 113 % 수준으로 강도 증진효과가 크게 나타났다. 이는 포졸란 혼화재 사용 시 입자 분포에 대한 고려가 반드시 필요한 것으로 판단된다.
6. 포졸란 혼화재는 초기 수화에 영향을 주는 효과가 있음과 동시에 재료 크기 차이에 의한 내부 공극 채움효과로 응결강도 발현을 단축시킴과 동시에 압축강도 증진 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 22NANO-C156177-03)으로 수행되었습니다.

References

ACI 234-R. (2006). Guide for the Use of Silica Fume in Concrete.

American Society for Testing and Materials C 109. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), West Conshohocken: ASTM International.

American Society for Testing and Materials C 305. (2020). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, West Conshohocken: ASTM International.

Dong, S., Wang, Y., Ashour, A., Han, B., Ou, J. (2020). Nano/micro-structures and mechanical properties of ultra-high performance concrete incorporating graphene with different lateral sizes, Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, **137**, 106011.

Goldman, A. Bentur, A. (1993). The influence of micro-fillers on enhancement of concrete strength, Cement and Concrete Research, **23**, 962-972.

Jimenez-Relinque, E., Rodriguez-Garcia, J.R., Castillo, A., Castellote, M. (2015). Characteristics and efficiency of photocatalytic cementitious materials: type of binder, roughness and microstructure, Cement and Concrete Research, **71**, 124-131.

Karapati, S., Giannakopoulou, T., Todorova, N., Boukos, N., Antiohos, S., Papageorgiou, D., Chaniotakis, E., Dimotikali, D., Trapalis, C. (2014). TiO_2 functionalization for efficient NOx removal in photoactive cement, Applied Surface Science, **319(15)**, 29-36.

Kim, W.W., Moon, J.H., Baek, C.W., Yang, K.H. (2021). Experimental study on the applicability of reactivity SiO_2 nano-materials as cement composites, Korean Recycled Construction Resources Institute, **9(4)**, 529-536 [in Korean].

Korean Standard L 5109. (2017). Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, Korean Standards Association.

Korean Standard L 5201. (2021). Portland Cement, Korean Standards Association.

Lee, N.K., Koh, K.T., Kim, M.O., Ryu, G.S. (2017). Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete(UHPC), Cement and Concrete Research, **104**, 68-79 [in Korean].

Liu, M., Tan, H., He, X. (2018). Effects of nano-SiO_2 on early strength and microstructure of steam-cured high volume fly ash cement system, Construction and Building Materials, **194(10)**, 350-359.

Li, H., Xiao, HG., Yuan, J., Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano particles, Composites: Part B, **35**, 185-189.

Mohamed, H. (2016). Characteristics, textural properties and fire resistance of cement pastes containing Fe_2O_3 nano-particles, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, **126**, 1077-1087.

Micheli, D., Pastore, R., Vricela, A., Morles, R.B., Marchetl, M., Delfini, A., Moglie, F., Mariani Primiani, V. (2014). Electromagnetic characterization and shielding effectiveness of concrete

composite reinforced with carbon nanotubes in the mobile phones frequency band, Materials Science and Engineering: B, **188**, 119–129.

Nili, M., Ehsani, A., Shabani, K. (2010). Influence of Nano–SiO_2 and microsilica on concrete performance, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 1–5.

Poppe, A.M. De Schutter, G. (2006). Analytical hydration model for filler rich binders in self–compacting concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, **4(2)**, 259–266.

Richad, P., Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concrete, Cement and Concrete Research, **25(7)**, 1501–1511.

Silica Fume Association. (2005). Silica Fume User's Manual. USA.

Whatmore, R.W., Corbett, J. (1995). Nanotechnology in the marketplace, Computing and Control Journal, **6(3)**, 105–107.

Ye, Q., Zhang, Z., Kong, D., Chen, R. (2005). Influence of nano–SiO_2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume, Construction and Building Materials, **21(3)**, 539–545.

Yu, R., Zhang, X., Hu, Y., Li, J., Zhou, F., Liu, K., Zhang, J., Wang, J., Shui, Z. (2022). Development of a rapid hardening ultra–high performance concrete(R–UHPC): from macro properties to micro structure, Construction and Building Materials, **329**, 127188.

Zanni, H., Cheyrezy, M., Maret, V., Philippot, S., Nieto, P. (1996). Investigation of hydration and pozzolanic reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) using ^{29}Si NMR, Cement and Concrete Research, **26(1)**, 93–100.

포졸란 혼화재의 입자 크기 및 비표면적에 따른 응결시간 발현 및 압축강도 특성 평가

본 연구에서는 포졸란 혼화재 혼입에 따라 응결시간과 역학적 특성을 평가하였다. 응결시간 발현 특성은 포졸란 혼화재를 사용하였을 때 감소되는 효과와 압축강도가 증가되는 특성을 평가하였다. 포졸란 혼화재의 경우 단독으로 사용할 경우 마이크로 실리카가 초결 및 종결시간 단축 및 압축강도 발현에 효과적이였다. 두가지 이상의 혼화재를 사용하였을 때는 실리카 흄을 사용하면서 동시에 소량의 나노 실리카를 사용하는 것이 OPC 대비 응결시간이 62~64 %수준으로 감소하였으며, 강도 수준이 약 1.17배 증가로 성능증진에 효과적이었다. 나노 실리카가 소량의 혼입량으로 응결시간 감소 및 압축강도를 증진시킬 수 있는 것은 포졸란 반응을 일으킴과 동시에 작은 입자크기로 상대적으로 큰 입자로 구성되어있는 실리카 흄과 시멘트 사이의 공극채움 효과가 있는 것으로 판단된다. 하지만 나노 소재의 경우 높은 비표면적으로 흐름성 저하의 원인이 되기 때문에 배합 설계 시 화학혼화제의 첨가가 고려되어야 할 것으로 판단된다.