

실리케이트계 반응성 나노소재의 시멘트 혼화재로서 적용 가능성에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Applicability of Reactivity SiO₂ Nano-Materials as Cement Composites

김원우^{1,2*} · 문재흠³ · 백철우⁴ · 양근혁⁵

Won-Woo Kim^{1,2*} · Jae-Heum Moon³ · Chul-Woo Baek⁴ · Keun-Hyeok Yang⁵

(Received October 27, 2021 / Revised November 11, 2021 / Accepted November 14, 2021)

In this study, nano-silica and nano-titanium were selected to determine the possibility of applying the binder to reactive nano materials. The basic characteristics of the nano material candidate group were reviewed. and the reactivity of nano materials was reviewed through K-value. The reactivity of the nano silicate materials was measured to be high. Therefore, as a final candidate group, nano silicate materials were selected. The finally selected reactive nano material was reviewed for its usability as a construction binder. The mechanical properties and unit weight of cement paste were reviewed using silica fume and blast furnace slag and nano materials. When cement composites with nano silicate materials, it was confirmed that it was effective in improving the mechanical performance and decrease the unit weight of cement composites.

키워드 : 나노소재, 반응성, 실리케이트, 혼화재

Keywords : Nano-materials, Reactivity, SiO₂, Binder

1. 서론

나노소재의 발전과 함께 콘크리트 재료도 건축물의 대형화 및 기술발전에 따라 나노소재를 적용한 콘크리트의 고기능화 연구가 가속화 되고 있다(Chan and Andrawes 2010; Kim et al. 2020).

나노소재는 콘크리트에 사용 시 충전제 역할로 수화생성물 간의 미세구조를 조밀하게 하여 강도증진에 효과가 있다는 연구결과가 도출되면서 나노 실리카, 나노 산화철 등의 나노소재를 혼입한 모르타르 및 콘크리트의 역학적 성능과 미세구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Heikal 2016; Nili et al. 2010). 하지만, 나노 소재에 대해 필러 역할이 주가 되는 단순히 충전제 역할로서 사용되는 실험과 배합 후 역학적 특성 및 미세구조에 대한 연구가 대부

분이다(Li et al. 2004; Li 2004).

또한 콘크리트의 고기능화를 위해 다양한 기능을 부여하는 방안도 다방면으로 시도 되고 있다. 대표적인 예로 광촉매는 물과 자외선이 있으면 질소산화물 제거, 항균 및 살균 효과를 일으킬 수 있어 자기 정화 콘크리트 연구에 사용되고 있다(Jimenez-Relinque et al. 2015; Karapati et al. 2014). 하지만, 기존 나노소재를 이용한 연구들에서는 나노소재에 대한 수화 반응성 및 기본특성에 대한 기초 연구 보단 배합 이후의 역학적 특성과 미세구조 분석에 치중되어 있다.

나노소재는 기존의 건설용 콘크리트 재료와 비교하여 상대적으로 매우 작으면서 비표면적은 매우 크다. 따라서, 배합설계 시 나노소재에 대해 혼화재로서 시멘트를 치환하여 사용할 것인지, 필

* Corresponding author E-mail: kimwonwoo@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 구조연구본부 전임연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

²경기대학교 건축공학과 일반대학원 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do, 16227, Korea)

³한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

⁴유진기업 기술연구소 차장 (R&D Center, EUGENE Corporation, Kyonggi-do, 10566, Korea)

⁵경기대학교 스마트시티공학부 건축공학전공 교수 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do, 16227, Korea)

Copyright © 2021 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

러로서 채움재 역할을 하는 것으로 계획할 것인지에 대해 충분한 고려가 되어야 한다고 판단된다. 본 연구에서는 나노소재 중 반응성이 있는 재료를 선택하여 혼화재로 시멘트를 치환하여 사용하고 자 한다.

나노소재의 콘크리트 혼화재로 사용하기 위한 적용 가능성을 확인 및 검토하기 위해 나노소재 중 후보군을 선정하고, 기본 특성을 분석하였다. 시멘트를 일부 치환하여 수화 반응성을 확인하기 위해 K-value 산정법을 이용하였으며, 최종 나노소재 후보군을 결정하고자 시멘트 페이스트 배합 설계 및 역학적 성능, 단위용적 질량 분석을 수행하여 적용 가능성을 검토하였다.

2. 나노소재 선정

나노소재의 혼화재로써 적용 가능성을 검토하기 위해 나노소재의 기본특성 및 반응성에 대한 검토를 수행하였다. 나노소재는 입자 크기가 작고 단위 무게 대비 비표면적이 크기 때문에 일반적인 혼화재와 같이 사용하기 어려운 특성이 있다. 따라서, 건설재료로써 적용 가능한 나노소재를 선정하기 위해 나노소재별 기본특성을 파악하고 K-value를 이용하여 반응성을 확인하였다.

2.1 나노소재 후보군 선정

나노소재 후보군으로 나노 실리카(SiO_2), 나노 티타늄(TiO_2)을 선택하였다. 건설재료로써 실리카계 재료는 실리카 흡이 초고강도 시멘트 복합재료(UHPC: Ultra High Performance Cementitious Composites) 배합에 혼화재 및 채움재로 많이 사용되고 있다. 실리카 흡은 높은 분말도를 갖는 구형입자로 고강도 콘크리트 제작에 필요한 미세공극 감소에 효과적이며, 부착강도를 증가시켜 재료 내 재료 분리 및 블리딩 발생저감에 효과적인 역할을 한다. 하지만 실리카 흡의 입자 크기는 Undensified 타입의 경우 $0.1\sim 0.25\mu\text{m}$, Densified 타입의 경우 $50\sim 80\mu\text{m}$ 의 범위로 마이크로 사이즈로 존재한다(ACI 234-R 2006; Silica Fume Association 2005).

본 연구에서는 마이크로단위의 실리카흡보다 작은 나노단위의 실리카 재료를 사용하여 시멘트 페이스트의 역학적 특성을 극대화하고자 한다. 혼화재로 사용하기 위해 실리카 흡의 주성분인 실리카 계열의 소재를 위주로 후보군을 선정하였다.

광촉매로 많이 알려져 있는 나노티타늄의 경우에도 질소 및 황 산화물 저감성을 활용하기 위해 건설용 재료로 자기정화 콘크리트의 재료로 사용되는 연구가 지속되고 있기 때문에 후보군으로 선정하였다(Jimenez-Relinque et al, 2015; Karapati et al, 2014).

따라서, 최종 후보군은 나노 실리카 5종(Elkem 마이크로화이트, SINOPRO 나노실리카 15nm와 30nm, OCI KONASIL (Fumed Silica) K150과 K200) 및 나노 티타늄(SINOPRO Nano Titanium Rutile)은 1종으로 총 6종(Fig. 1)을 선정하였다.

2.2 나노소재 기본특성

나노소재에 대한 기본특성을 분석하기 위해 XRF를 통한 원소 분석을 수행하였다. 나노 실리카계 재료의 경우 96%이상, 나노 티타늄의 경우 99.6% 이상의 순도를 갖고 있음을 확인하였다. 또한, 혼화재로 치환하여 사용하기 위해서는 배합설계를 위해 비중값을 알아야 하지만 기존에 사용하고 있는 장비 및 측정방법은 나노소재에 대해 검증되어 있지 않다. 따라서, 시멘트 비중 측정법으로 사용되고 있는 르 샤틀리에 비중 시험(KS L 5110)을 통해 나노소재 비중을 측정하였다.

르 샤틀리에 비중 시험은 광유를 이용하여 르 샤틀리에 비중병의 0~1사이까지 채워 준 후 시멘트 또는 나노소재 64g을 넣어 준 후 기포를 제거하여 최종 높이를 측정하였다. 최종 측정된 값에서 시험 시작 값을 빼준 후 나노소재 무게 64g으로 나누어 비중을 계산하였다. 이때, 실리카계 재료의 경우 광유와 반응하여 겔형태로 변하게 되어 64g을 전부 투입할 수 없어 마이크로 화이트를 제외한 나머지는 측정값을 신뢰할 수 없다고 판단되었다(Fig. 2). 따라서, Micromeritics장비를 이용한 결과를 통해 측정된 비중값을 사용하였다. 이때, 나노티타늄의 Micromeritics 장비 측정값과 르 샤틀리에 비중시험 결과는 근사한 값을 나타냈으므로, 실리카계를 제외한 타 나노소재의 혼화재 적용 시 비중 테스트에 르 샤틀리에 비중 시험법의 이용 가능성을 확인할 수 있었다. 원소분석 및 비중실험 결과는 Table 1에 나타내었다. 나노 실리카계 재료들

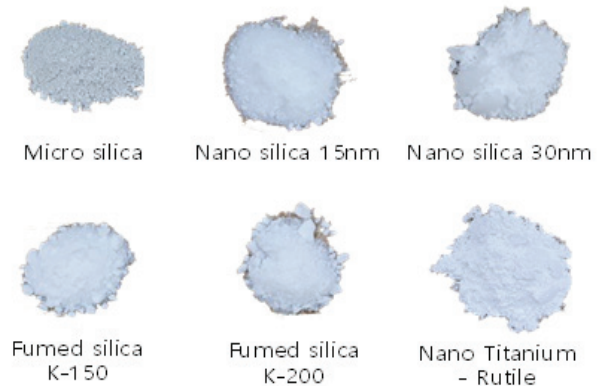


Fig. 1. Nano-material candidates

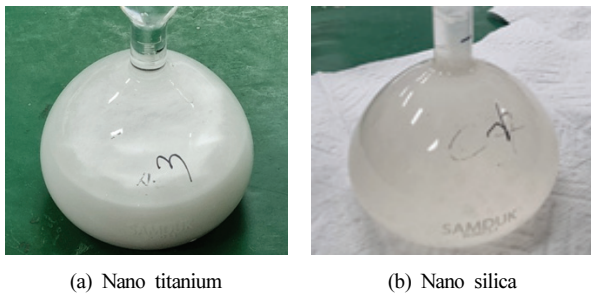


Fig. 2. Le chatelier specific gravity test

의 경우 시멘트보다 낮은 비중값으로 측정되었으며, 나노 티타늄의 경우 시멘트보다 상대적으로 높은 비중 값으로 측정되었다.

2.3 나노소재 반응성 검토(K-value)

건설재료 중 혼화제로 사용 가능성을 확인하기 위해 나노소재의 반응성을 검토하였다. 나노소재의 반응성은 플라이애시 반응성을 확인하기 위한 방법으로 사용하고 있는 BS EN 196-1(2016)의 K-value를 이용하였다. K-value는 시멘트 모르타르에서 반응성을 검토하는 계산식으로, 압축강도 및 사용재료의 부피에 따라 결정된다. 본 연구에서는 시멘트 페이스트에서의 반응성을 검토하기 위해 모래의 부피는 제외하여 다음 식으로 산정하였다.

$$S = K \left(\frac{C+f}{C+f+w} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, S 는 시멘트 페이스트의 압축강도, C 는 시멘트의 부피, f 는 혼화제로 사용될 나노소재의 부피, w 는 물의 부피이다.

시멘트 페이스트의 압축강도는 물시멘트비 30%로 고정시키고 나노소재 첨가율을 1, 3% 시멘트 중량 대비 치환하여 배합을 수행하였다. 압축강도 측정 시편은 50x50x50mm의 정육면체로 제작하였으며, 1일 기건양생 후 20°C에서 수중 양생하여 재령 7일 및 28일에 압축강도를 측정하여 산정식에 대입하였다(Table 2). K-value 산정 결과는 혼화제로써 나노소재 1% 치환 된 결과를 Fig. 3에 나타내었으며, 3% 치환 된 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

Table 2. Result of compressive strength of nano-material cement composite

Specimens	W/C ratio (%)	Binder (%)		Compressive strength (MPa)	
		Cement	Nano materials	7 days	28 days
OPC	30	100	-	61.41	71.12
MW 1%		99	1	69.21	55.52
NS-15 1%				67.93	76.14
NS-30 1%				64.11	77.73
K-150 1%				63.86	73.80
K-200 1%				68.28	73.07
NT 1%				62.52	73.96
MW 3%		97	3	66.24	79.84
NS-15 3%				62.92	75.76
NS-30 3%				68.73	74.48
K-150 3%				74.56	76.20
K-200 3%				70.09	75.75
NT 3%				61.26	73.09

OPC: Ordinary Portland Cement, MW: Micro White, NS-15: Nano silica 15nm, NS-30: Nano silica 30nm, K-150: KONASIL K150(Fumed silica), K-200: KONASIL K200(Fumed silica), NT: Nano Titanium Rutile

Table 1. Construction binder materials and nano-materials

Material	Product name	Ingredients		Size (nm)	Specific surface area (m ² /g)	Specific gravity		
						Micromeritics	Le chatelier	Provided by supplier
Binder	OPC	CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ 외		20,000	0.38	-	-	3.10
	GGBS grade 100			25,000~30,000	0.72	-	-	2.90
	GGBS grade 80				0.42	-	-	2.90
	Silica fume	SiO ₂	99.6	100~150	18~20	-	-	2.22
Nano silica	Micro white	SiO ₂	96.08	22.65	20.8	2.11	2.56	-
	15nm		99.78	14.05	203.8	1.40	-	-
	30nm		98.74	26.24	232.7	1.87	-	-
	KONASIL K150		99.75	13.60	144.0	1.51	-	-
	KONASIL K200		99.90	13.62	257.2	1.43	-	-
Nano titanium	Rutile	TiO ₂	99.66	31.41	25.9	3.77	3.94	-

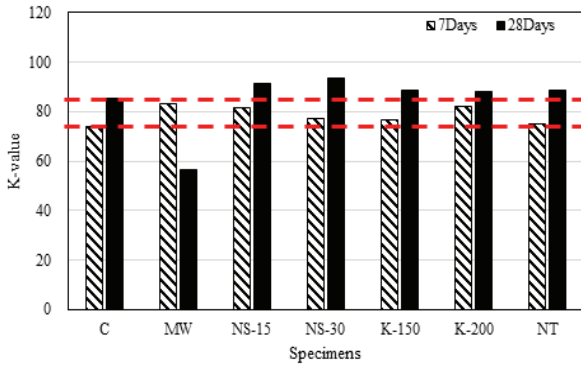


Fig. 3. K-value calculation result of 1% nanomaterials substitution

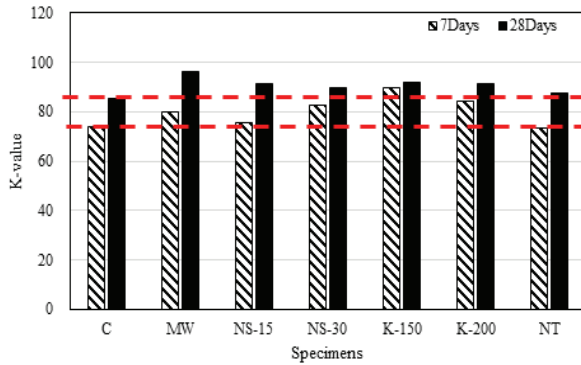


Fig. 4. K-value calculation result of 3% nanomaterials substitution

나노소재 1%를 치환하였을 때 7일 재령의 경우 마이크로 화이트가 가장 높은 반응성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 하지만 28일 재령 마이크로 화이트 배합만 OPC 대비 상대적으로 낮은 반응성을 보였다. 이는 배합상의 문제로 인한 문제로 판단되어 후 보균 검토 시 데이터에서 제외 후 고려하였으며, 나노 소재 3% 치환의 결과에서는 우수한 반응성을 확인할 수 있었다. 나머지 실리카계 재료의 경우 7일 재령의 경우비슷한 반응성을 갖고 있으며, 28일 재령의 경우 나노 실리카 15nm와 30nm가 KONASIL이 치환된 배합이 나노티타늄 치환 배합보다 상대적으로 높은 반응성을 나타냈다.

반면, 시멘트를 나노소재로 3% 치환한 시험의 결과에서는 28일 재령일에 마이크로 화이트의 반응성이 가장 높았으며 7일 재령일에서도 OPC보다 높은 값을 나타냈다. KONASIL 치환 배합은 7일 재령일 에서는 나노 실리카 보다 상대적으로 높은 반응성을 갖고 28일 재령에서는 비슷한 수준의 반응성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 특히 K-150의 경우 나노소재 3% 혼입 시 초기 반응성이 높게 측정되었다. 나노 티타늄 치환 배합의 경우 OPC와 비슷한

수준의 반응성으로 상대적으로 큰 차이가 발생하지 않았다.

전체적으로 실리카 계열의 소재로 치환된 배합의 반응성이 높게 나온 반면, 나노 티타늄의 경우 OPC와 비슷한 수준의 반응성을 나타냈다. 따라서, 혼화재로 사용 가능성은 마이크로화이트와 나노 실리카 15nm, 30nm, KONASIL K150, K2000이 가장 적합할 것으로 사료된다. 하지만, 나노 실리카 15nm, 30nm의 경우 반응성은 높지만 타 실리카계 재료 대비 가격이 높기 때문에 건설재료로서 사용하기는 어렵다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 마이크로화이트와 KONASIL 중 K150을 이용하여 혼화재로서의 사용성을 검토하고자 하였다. 또한 기존에 건설용 혼화재로 사용하고 있는 실리카흄 및 고로슬래그를 추가로 시멘트와 치환하여 역학적 특성과 단위용적중량을 검토하였다.

3. 배합설계 및 실험

3.1 나노소재 혼입 페이스트 배합설계 및 방법

나노소재의 경우 일반적인 건설재료 보다 상대적으로 비중이 낮고 비표면적이 크기 때문에 기존 건설배합에 사용하고 있는 중량배합설계로 사용하기에는 제한이 있다. 따라서, 본 연구에서는 각각의 재료들을 부피비로 환산하여 배합설계를 진행하였다. 이때 사용한 나노소재는 재료적 특성 및 반응성 시험을 통해 선택한 마이크로화이트 및 KONASIL K150을 혼화재로 사용하였으며, 시멘트 페이스트 전체 부피가 10이 되도록 배합 설계하였다. Tables 3와 4, 5에 나타난 바와 같이 혼화재의 치환비가 동일하더라도 나노소재의 밀도에 따라 부피비가 달라지기 때문에 혼화재의 부피비는 달라질 수 있다. 따라서, 나노소재를 혼화재로 다량 치환하여 사용할 경우 실제 체적을 고려하여 나노소재의 양을 산정하는 방법에 대해서는 추가적인 고려가 필요할 것으로 판단된다.

배합 시 사용되는 나노소재는 비표면적이 크기 때문에 흐름성 저하에 미치는 영향성이 높다. 따라서 본 연구에서는 감수제의 영향성을 최소화하며 흐름성을 확보하기 위해 나노소재 혼입율은 1%로 결정하였다. 혼화제는 플로우 200mm 수준을 목표로 폴리카르복실(PC)계 감수제를 사용하였으며, 페이스트 부피에서는 제외하였다. 또한, 건설재료로 사용되고 있는 혼화재와 반응성을 확인하기 위해 실리카흄과 GGBS 2종, 3종을 시멘트와 치환하여 사용하였다. 강도 발현을 촉진시키기 위한 활성화제는 무수석고를 사용하였다.

시멘트 페이스트 배합은 KS L 5109에 따라 배합을 진행하였으며, 나노소재와 결합제는 건배합을 통하여 충분히 혼합하였다. 건

Table 3. Mixing proportions of nano-materials and binders

Specimens	Binder	Cement	MW	SF	GGBS	AG
OPC	100	100	-	-	-	-
MW or K150		99	1	-	-	-
SF		89	1	10	-	-
GG3		64	1	10	25	-
GG2		64	1	10	25	-
GG3+AG		61	1	10	25	3
GG2+AG		61	1	10	25	3

OPC: Ordinary Portland Cement, MW: Micro White, K150: KONASIL K150(Fumed silica), SF: Silica Fumed, GG3: GGBS(Ground Granulated Blast-fumace Slag) Grade 80, GG2: GGBS Grade 100, AG: Anhydrous Gypsum

Table 4. Mixing volume proportions of nano-mortar(microwhite)

Specimens	W/C	Water	Cement	MW	SF	GGBS	AG	A.D
	%							%
OPC	25	0.430	0.548	-	-	-	-	0.60
MW			0.542	0.008	-	-	-	0.80
SF			0.488	0.008	0.066	-	-	0.80
GG3			0.351	0.008	0.066	0.148	-	0.80
GG2			0.351	0.008	0.066	0.148	-	0.80
GG3+AG			0.334	0.008	0.066	0.148	0.024	0.90
GG2+AG			0.334	0.008	0.066	0.148	0.024	1.00

Table 5. Mixing volume proportions of nano-mortar(KONASIL K150)

Specimens	W/C	Water	Cement	K150	SF	GGBS	AG	A.D
	%							%
OPC	25	0.430	0.548	-	-	-	-	0.60
K150			0.542	0.008	-	-	-	0.80
SF			0.488	0.008	0.065	-	-	0.80
GG3			0.351	0.008	0.065	0.146	-	0.80
GG2			0.351	0.008	0.065	0.146	-	0.80
GG3+AG			0.334	0.008	0.065	0.146	0.023	0.90
GG2+AG			0.334	0.008	0.065	0.146	0.023	1.00

배합 후 1분 믹싱(저속, 30초 동안 배합수 첨가), 30초 휴식, 2분 믹싱(고속) 순서대로 배합실험을 진행하였다. 압축강도 측정 시편은 K-value 측정 시 사용한 50x50x50mm의 정육면체로 동일하게 제작하였으며, 양생 조건도 동일하게 1일 기건양생 후 20°C에서 수중 양생하여 재령 7일 및 28일에 압축강도를 측정하였다. 단위용적 질량은 압축강도용 시험체를 표면 물기를 제거하여 무게 측정 후 부피로 나눠 계산하였으며, 3개의 평균값으로 나타냈다.

3.2 역학적 특성 분석

건설용 혼화제로써 사용하기 위한 역학적 성능 검증을 위해 나노소재 마이크로 화이트 및 KONASIL K150의 재령 7일, 28일 압축강도를 측정하여 Figs. 5와 6에 나타내었다. 혼화제는 실리카 흙, 고로슬래그 미분말 2종과 3종 그리고 활성화재로 무수석고를 활용하여 실험을 수행하였다. 이때 혼화재의 시멘트 치환 비율은 Table 2에 나타내었다.

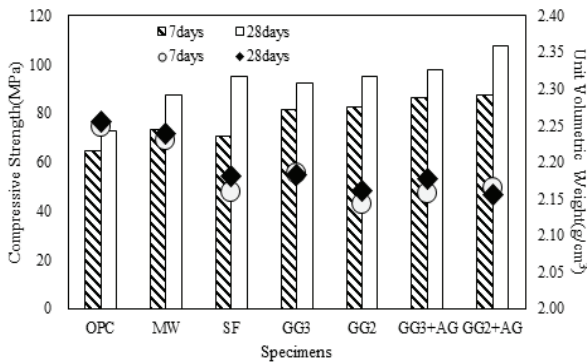


Fig. 5. Effect of Microwhite on strength development and unit volumetric weight in nano-mortar

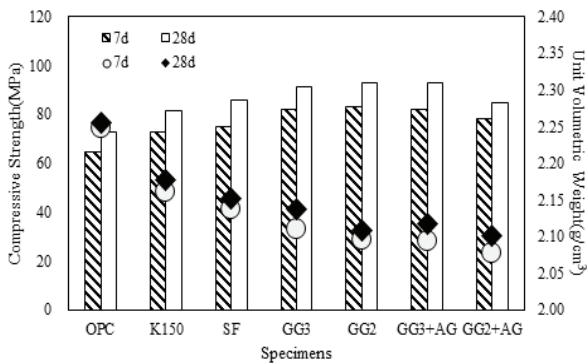


Fig. 6. Effect of KONASIL K150 on strength development and unit volumetric weight in nano-mortar

시멘트를 마이크로 화이트로 치환한 모든 배합에서 7일 및 28일 강도 모두 OPC 대비 높은 압축강도를 발현하는 것을 확인하였다. 특히, 시멘트를 마이크로 화이트로 1% 치환한 배합의 경우 7일 재령과 28일 재령 모두 OPC 대비 약 13~20%의 증가율을 확인할 수 있었다. 이때 시멘트를 실리카 흙으로 10% 추가 치환한 경우 최대 30% 향상, 시멘트를 고로슬래그 2종 25%, 무수석고 3%를 추가로 치환한 경우 OPC 대비 약 47.5% 향상되어 강도증진 효과에 우수한 것을 확인할 수 있었다. 마이크로화이트와 실리카흙을 치환하였을 때 시멘트를 고로슬래그로 25% 추가 치환하여도 동일한 강도 수준을 유지 할 수 있었으며, 이때 무수 석고를 사용할 경우 강도향상에 더 큰 영향을 나타냈다.

시멘트를 KONASIL K150로 치환한 배합의 경우에도 7일 및 28일 모두 OPC 대비 높은 압축강도를 발현하는 것을 확인할 수 있었다. 마이크로화이트와 마찬가지로 실리카흙 및 고로슬래그를 시멘트와 추가 치환할 경우 압축강도 증진 효과는 확인할 수 있었다. 하지만, 시멘트를 무수석고로 추가 치환한 경우 압축강도가

오히려 감소하는 경향이 나타났다. 시멘트를 KONASIL K150으로 1% 치환할 경우 7일 재령의 경우 OPC 대비 15.5%, 28일의 경우 11.6% 증가하였다. 시멘트를 실리카 흙으로 10% 추가 치환한 경우 11.8~13.2%, 고로슬래그를 25% 추가 치환한 경우 25.6~28.9% 상승하였다. 무수석고로 3% 추가 치환한 경우 OPC 대비 16.1~27.5% 상승으로 오히려 무수석고를 사용하지 않은 배합보다 낮은 압축강도 상승률을 보였다.

마이크로화이트와 KONASIL K150 1% 치환 배합을 비교하였을 때, 7일강도는 전체적으로 비슷한 수준으로 나타났다. 하지만, 무수석고의 영향성은 마이크로화이트를 사용하였을 때 효과적인 반면 KONASIL K150을 사용한 배합에서는 오히려 강도가 감소하는 경향성을 나타냈다. 28일 강도의 경우 시멘트 1%를 마이크로 화이트로 치환하였을 때 전체적으로 높은 강도증진을 보였으며, 특히 나노소재 1%와 실리카흙10%을 시멘트와 치환한 경우 각각 8.3, 12.6% 높은 강도증진을 확인할 수 있었다. 반면 고로슬래그 2종과 3종을 시멘트와 추가 치환하여도 강도증진은 1.5~2.6% 수준으로 증가는 있었지만 그 영향은 미미하였다고 판단된다.

마이크로화이트의 경우 상대적으로 실리카 흙과 활성화제로 사용한 무수석고와의 반응성이 좋았으며, KONASIL K150의 경우 고로슬래그와의 반응성이 좋은 것으로 판단되었다. 따라서, 마이크로 화이트 및 KONASIL의 고성능 건설재료로서 사용 가능성을 확인할 수 있었다.

특히, 마이크로 화이트의 경우 소량 치환으로 고강도화에 효과적임을 알 수 있었으며, KONASIL K150 배합의 경우 상대적으로 다량 치환이 가능하며 저렴한 고로슬래그를 사용하여 높은 효율성을 보여주고 있다고 판단된다. 따라서 반응성을 갖는 나노소재를 혼화제로 사용할 경우 건설용 재료와의 반응성에 대해 평가하여 사용목적에 맞도록 배합 설계를 하는 것이 중요할 것으로 판단 된다.

3.3 단위용적 질량 분석

시멘트는 비중이 3.14로 실리카 흙 및 고로슬래그 미분말 보다 상대적으로 높은 비중 값을 가지고 있다. 나노소재로 사용하고자 하는 마이크로 화이트의 비중은 2.11, KONASIL K150 비중은 1.51로 OPC의 48~67% 수준이다(Table 1). 따라서 시멘트를 반응성 나노소재로 치환 할 경우 단위용적 질량은 감소하게 된다. 본 연구에서는 시멘트페이스트 압축강도용 시험체 3개의 평균 단위용적 질량을 계산해서 Figs. 5와 6에 나타냈다. 단위용적 질량의 전체적인 경향은 혼화제 치환량이 증가하고 시멘트 양이 감소함에 따라

감소하는 것으로 나타났다. 마이크로화이트 1% 치환한 경우 0.7~0.9% 수준의 감소가 발생하였으며, 실리카흙 10%, 고로슬래그 25% 치환으로 최대 4.7% 감소 시킬 수 있었다.

시멘트를 KONASIL K150로 치환한 경우 1% 치환으로 약 3.2~4.0% 수준의 단위용적 질량을 감소시킬 수 있었다. KONASIL K150을 치환할 경우 마이크로화이트와 비교하여 상대적으로 단위용적 질량 감소가 크게 나타났다. 실리카 흙 및 고로슬래그로 추가 치환한 경우 최대 7.7%까지 감소시킬 수 있었다. 따라서, KONASIL K150는 건설용 혼화재로써 단위용적 질량 감소에 효과적임을 확인할 수 있었다. 따라서, KONASIL K150은 반응성 나노소재로 추가적인 연구를 통해 고강도 경량 콘크리트 개발을 위한 혼화재로써 사용성은 충분하다고 사료 된다.

4. 결론

본 연구에서는 건설재료인 혼화재로써 나노소재의 적용 가능성을 검토하기 위해 나노소재의 기본특성 및 반응성(K-value)을 검토하여 후보군을 선정하였다. 선정된 나노소재 혼합 시멘트 페이스트에 대한 역학적 특성 및 단위용적 중량을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 나노소재를 혼화재로써 사용하기 위해 반응성 검토 방법으로 K-value를 이용하여 검토한 결과, 나노 실리카 재료인 나노실리카 15nm, 30nm, 마이크로화이트와 KONASIL K150, K300이 높은 반응성을 나타냈다. 반면, 나노 티타늄 Rutile의 경우 OPC와 비슷한 수준으로 상대적으로 반응성이 낮게 측정되어 후보군에서 제외하였다.
2. 나노 소재의 기본특성을 분석한 결과 일반적으로 시멘트 보다 낮은 비중 값을 갖고 있으며 비표면적이 크다. 따라서, 시멘트 페이스트 배합시 반응성에 따라 혼화재 또는 필러로써 선택하여 배합설계를 수행할 필요가 있다. 특히, 혼화재로 사용시 나노 소재의 부피가 소량으로도 전체 시멘트 풀의 부피 중 대부분을 차지할 수 있기 때문에 그에 따른 영향성을 고려하여 배합설계를 진행 하여야 할 것이라 판단된다.
3. 압축강도 특성은 시멘트를 마이크로 화이트와 KONASIL K150로 1% 치환한 경우 상승되는 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실리카 흙과 고로슬래그를 시멘트와 추가 치환하여도 압축강도 증진에 효과가 확인됨을 검토하였다. 활성화제로 무수석고를 사용하였을 때 마이크로 화이트를 치환한 경우 강도 향상이 우수하였으나, KONASIL K150의 경우에는 오히려 강도

가 미세하게 감소함을 확인할 수 있었다.

4. 나노소재를 혼화재로 치환한 경우 OPC 대비 단위용적 질량이 감소함을 확인할 수 있으며, KONASIL K150의 경우 1.51의 낮은 비중값으로 혼화재로 사용 시 고강도 시멘트 복합체의 경량화에 효과적일 것으로 판단된다.
5. 나노소재 마이크로 화이트와 KONASIL K150을 건설재료용 혼화재로써 적용 가능성을 검토한 결과 강도 증진효과는 물론 OPC 대비 경량화에 긍정적인 효과를 가지고 있음을 확인하였다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 21NANO-B156177-02)으로 수행되었습니다.

References

- ACI 234-R, (2006). Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, BS EN 196-1, (2016). Methods of Testing Cement Determination of Strength, EUROPEAN STANDARDS.
- Chan, L.Y., Andrawes, B. (2010). Finite element analysis of carbon nanotube/cement composite with degraded bond strength, *Computational Materials Science*, **47(4)**, 994-100.
- Feynman, R. (1960). There's plenty of room at the bottom(reprint from speech given at annual meeting of the west coast section of the american physical society), *Engineering and Science*, **23**, 22-36.
- Heikal, M. (2016). Characteristics, textural properties and fire resistance of cement pastes containing Fe₂O₃ nano-particles, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **126(3)**, 1077-1087.
- 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). TiO₂ functionalization for efficient NOx removal in photoactive cement, *Applied Surface Science*,

- 319(15)**, 29–36.
- Kim, J.H., Kim, W.W., Moon, J.H., Chung, C.W. (2020). Effect of multi-walled carbon nanotube on rheological behavior and compressive strength of cement paste, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(4)**, 467–474.
- KS L 5109. (2017). Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, Korean Standard Association, Korea [in Korean].
- KS L 5110. (2016). Testing Method for Specific Gravity of Hydraulic Cement, Korean Standard Association, Korea [in Korean].
- Li, G. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂, *Cement and Concrete Research*, **34(6)**, 1043–1049.
- Li, H., Xiao, H.G., Yuan, J., Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles, *Composites Part B: Engineering*, **35(2)**, 185–189.
- Nili, M., Ehsani, A., Shabani, K. (2010). Influence of Nano-SiO₂ and microsilica on concrete performance, *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 1–5.
- 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**, 105–107.

실리케이트계 반응성 나노소재의 시멘트 혼화재로서 적용 가능성에 대한 실험적 연구

본 연구에서는 나노소재를 콘크리트용 혼화재로 사용 시 압축강도 증진효과를 실험적으로 분석하였다. 콘크리트용 배합설계를 위해 시멘트 비중 시험(KS L 5110) 방법을 이용하여 5종의 실리케이트계와 1종의 티타늄계 나노소재의 비중을 측정하였다. 그리고 BS EN 196-1의 시멘트 페이스트의 강도측정을 통해 K-value 산정하여 나노소재의 반응성을 검토하였다. 실리케이트계 나노소재 2종의 압축강도 증진효과 분석을 위해 건설용 혼화재 및 활성화재를 함께 사용하여 압축강도를 비교분석하였다.

본 연구에 사용한 실리케이트계 나노소재의 비중은 1.40 - 2.11 수준으로 OPC 대비 비중이 낮게 측정되었으며 나노소재의 반응성은 OPC 대비 7일차에 최대 1.22배, 28일차에 최대 1.12배 높게 분석됐다. 나노소재의 비중이 낮아 나노소재를 사용한 콘크리트의 단위중량은 2.08 - 2.24 수준으로 OPC 배합 2.26과 비교해 상대적으로 낮게 나타났다. 나노소재를 사용한 배합의 압축강도는 재령 28일 기준 81.47-101.34MPa로 건설용 혼화재 및 활성화재를 사용 시 OPC 배합과 비교해서 압축강도가 최대 47.5% 증가했다.