

나노 입자가 시멘트 모르타르의 파괴인성치에 미치는 영향

Effects of Nanoparticles on the Fracture Toughness of Cement Mortar

최승원¹ · 백초원¹ · 이선열² · 뉘엔 반 통^{2,3} · 김동주^{4*}

Seung Won Choi¹ · Cho Won Baek¹ · Seon Yeol Lee² · Van Thong Nguyen^{2,3} · Dong Joo Kim^{4*}

(Received October 6, 2023 / Revised December 18, 2023 / Accepted December 18, 2023)

This study investigated the effects of nanoparticles on the fracture toughness of cement mortar. Three-point bending tests, compressive tests, and slump tests were conducted on cement mortars reinforced with carbon nanotubes(CNTs), nanosilica(NS), and nano calcium carbonate(NC), respectively. Cement mortar with a water-to-cement ratio and a sand-to-cement ratio of 0.45 and 1.5, respectively, and reinforced with 0 and 2 vol.% of 19.5 mm steel fibers, respectively, was used. Reinforcement with nanoparticles partially improved the fracture toughness and compressive strength of the cement mortar. However, in the case of cement mortar reinforced with steel fibers, the reinforcement with nanoparticles was found to reduce the flowability of the mortar, adversely affecting the dispersion of steel fibers, and ultimately leading to a decrease in fracture toughness, contrary to the intended enhancement. Additional research is needed to improve the decrease in mortar fluidity caused by the reinforcement with nanoparticles.

키워드 : 나노 입자, 시멘트 모르타르, 파괴 인성치, 압축강도

Keywords: Nanoparticle, Cement mortar, Fracture toughness, Compressive strength

1. 서론

전세계적으로 고강도 시멘트 복합재료 개발에 대한 필요성은 갈수록 증가하고 있다. 많은 연구자들은 고강도 시멘트 복합재료 개발을 위해, 우수한 기계적, 화학적 특성을 갖는 나노 입자의 사용에 많은 관심을 가지고 있다. 많이 사용되고 있는 나노 입자로는 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 나노실리카(nanosilica, NS), 그리고 나노 탄산칼슘(nano calcium carbonate, NC) 등이 있으며, 이러한 나노 입자들의 혼입이 시멘트 복합재료에 미치는 영향에 대하여 조사한 연구논문들이 지속적으로 보고되고 있다. 나노 입자 중, 비반응성 입자로 알려진 CNT는 우수한 기계적, 전기적 특성으로 고강도 시멘트 복합재료 그리고 하중 및 손상 감지가 가능한 자기감지 콘크리트(self-sensing concrete)에 널리 활용되고 있다(Lee et al. 2019; Makar and Chan 2009; Adhikary et al. 2021; Wang et al. 2017). NS와 NC 같은 반응성 나노 입자들은

시멘트 수화반응에 관여하여, 역학적 특성을 향상시키는 것으로 보고되고 있다(Shakhmenko et al. 2013; Jalal et al. 2012; Jo et al. 2007; Supit and Shaikh 2014).

많은 연구자들은 나노 입자의 혼입을 통해 시멘트 복합재료의 역학적 성능을 개선하고자 하는 연구를 수행하고 있다. 비반응성 나노 입자인 CNT는 높은 표면적으로 시멘트 수화생성물의 핵형성 및 성장을 촉진하여, 수화를 촉진시킴과 동시에 매트릭스 내부의 미세 균열의 bridge effect를 발생시켜 미세구조의 인장저항 능력을 향상시킨다고 보고된 바 있다(Makar and Chan 2009; Adhikary et al. 2021). Wang et al.(2017)은 시멘트 모르타르 내 CNT 0.1, 0.3 % 혼입 시 압축강도가 각각 7.58 %, 14.46 % 증가하고, 휨강도는 각각 5.64 %, 15.39 % 증가하였다고 보고하였다. 마찬가지로 NS는 실리카와 수산화칼슘의 포졸란 반응을 야기하여, 조밀한 수화 생성물을 형성시킨다고 보고되고 있다. Shakhmenko et al.(2013) 그리고 Jalal et al.(2012)은 NS 혼입 시 콘크리트의

* Corresponding author E-mail: djkim75@sejong.ac.kr

¹세종대학교 건설환경공학과 학사과정 (Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, 209, Seoul, 05006, Korea)

²세종대학교 건설환경공학과 박사과정 (Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, 209, Seoul, 05006, Korea)

³Institute of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Transport, Ho Chi Minh, Vietnam

⁴세종대학교 건설환경공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, 209, Seoul, 05006, Korea)

압축 및 휨 강도가 최대 75 %까지 향상되었다고 보고하였다. 또한, Jo et al.(2007)은 시멘트 모르타르 내 NS가 3, 6, 10, 12 % 혼입 시 압축강도가 각각 112 %, 142 %, 166 %, 169 % 상승하였음을 보고하였다. Supit and Shaik(2014)는 콘크리트 내 NC를 1, 2 % 혼입 시 압축강도가 각각 62 %, 6.9 % 증가함을 보고하였다. 이는 NC 혼입이 콘크리트 내 미세구조 밀도를 향상시켰기 때문으로 보고하였다. 그러나 일부 연구자들은 나노 입자의 혼입이 오히려 시멘트 복합재료 역학적 성능을 저하시키는 부정적인 결과를 보고한 바 있다. Isfahani et al.(2016)은 CNT 혼입 시 시멘트 페이스트의 압축강도가 7.2 % 감소하였음을 보고하였다. Cosentino et al.(2020)은 시멘트 모르타르 내 NC 2 % 혼입 시 압축강도가 3.23 % 상승하였지만, 3 %, 7 % 사용 시 압축강도가 각각 2.8 %, 5.8 % 감소하였음을 보고하였다. 많은 연구자들은 나노 입자의 부정적인 효과의 원인이 나노 입자의 높은 응집력으로 인한 낮은 분산성에 있다고 보고하였다.

이와 같이, 나노 입자의 혼입이 시멘트 복합재료의 역학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 다수 진행되었으나 혼입 성능에 대해서는 아직까지 많은 논란이 있다. 또한 이러한 대부분의 연구는 나노 입자 혼입이 시멘트 복합재료의 압축, 인장강도에 미치는 영향에 초점을 맞추고 있으며, 나노 입자 혼입이 시멘트 복합재료 내 균열 발생과 밀접한 관련이 있는 파괴인성치(fracture toughness, K_{Ic})에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 일부 연구에서는 나노 입자 혼입이 초고강도 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향을 보고한바 있으나(Dang and Kim 2023; Yoo et al. 2022), 나노 입자가 시멘트 모르타르 및 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 역학적 성능에 미치는 영향을 동시에 비교한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 나노 입자 혼입이 시멘트 모르타르 및 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 K_{Ic} 에 미치는 영향을 분석하고, 최적의 나노 입자 및 혼입량을 제안하는 것을 목표로 하였다.

이 연구에서는 대표적인 나노 입자로 알려진 CNT, NS, 그리고 NC를 사용하여, 나노 입자 혼입이 시멘트 모르타르 및 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 K_{Ic} 에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 나노 입자 혼입에 따른 3점 재하 휨 인장강도 실험과 함께 분석을 위한 슬럼프 그리고 압축강도를 추가로 조사하였다. 이때 CNT 혼입량은 시멘트 중량대비 0.1, 0.5, 그리고 1.0 wt.%, NS는 1, 2, 그리고 3 wt.%, 그리고 NC는 시멘트 중량 대비 1, 2, 그리고 3 wt.%의 혼입량을 사용하였다.

2. 실험프로그램

나노 입자가 시멘트 모르타르의 파괴인성치에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험프로그램은 Fig. 1에 나타내었다. 실험은 3점 재하 휨 실험(three-point bending test), 압축강도 실험(compressive test), 그리고 슬럼프 실험(slump test)로 구성되었으며, 물시멘트비(w/c)가 0.45, 잔골재시멘트비(s/c)가 1.5, 그리고 감수제가 0.09 wt.% 혼입된 시멘트 모르타르를 사용하였다. 추가적으로 강섬유 보강을 실험 변수로 적용하였으며, 강섬유가 2 vol.% 보강된 경우와 그렇지 않은 경우의 시멘트 모르타르를 사용하였다. 실험에는 나노 입자 그리고 강섬유 혼입량이 각각 다른 20 시리즈의 시멘트 모르타르가 활용되었다.

이때 실험프로그램에 적용된 나노 입자의 혼입량은 문헌조사 결과를 기반으로 설정되었다. 일반적으로 CNT는 1 wt.% 미만, NC와 NS는 1~3 wt.%로 구간에서 최적의 혼입량을 갖는 것으로 보

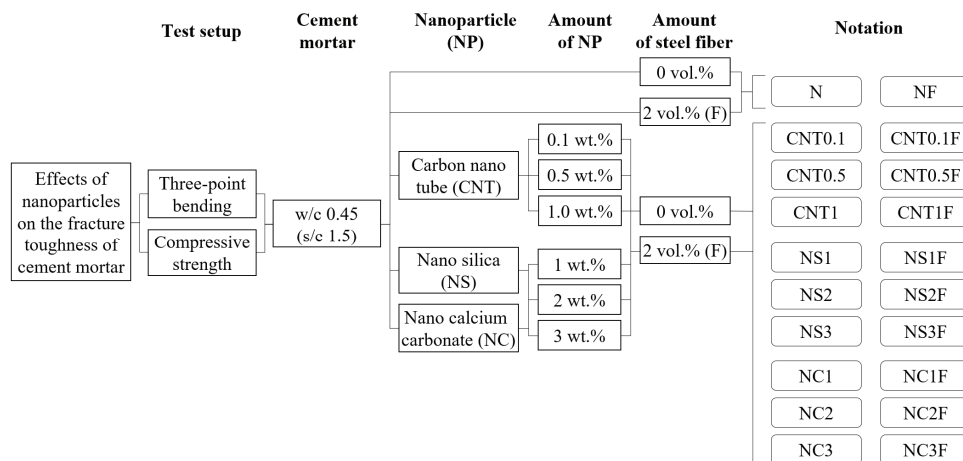


Fig. 1. Experimental program

고되고 있다(Assi et al. 2021; Yoo et al. 2022; Dang and Kim 2023).

2.1 재료

이 연구에서는 Park et al.(2020)가 사용한 시멘트 모르타르 배합이 사용되었다(Fig. 1). 배합에는 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 규사, 그리고 폴리카르보산계 고성능 AE 감수제가 사용되었다. 시멘트 모르타르에 보강된 나노 입자 그리고 강섬유의 재료 특성은 Table 1와 같으며, 이때 사용된 강섬유의 인장강도는 2,942 MPa 이다(Kim and Kim 2018).

Table 1. Material properties of nanoparticles and steel fiber

No.	Diameter	Length	Reference
Carbon nanotube	0.05-0.2 μm	10 μm	Lee et al. (2019)
Nanosilica	50 nm	-	Dang and Kim (2023)
Nano calcium carbonate	50 nm	-	
Smooth steel fiber	0.2 mm	19.5 mm	Kim and Kim (2018)

2.2 시험체 준비

시멘트 모르타르의 K_{IC} 측정을 위해 단일 측면 노치가 적용된 휨 시험체(Single edge notched bend specimen, SENB)가 사용되었으며, 여기서 SENB 시험체 크기는 50 × 50 × 200 mm, 노치 깊이는 20 mm, 노치 폭은 10 mm, 그리고 경간 길이는 150 mm 이다(Lee et al. 2020). 시멘트 모르타르의 압축강도는 50 × 50 × 50 mm의 큐빅 시험체, 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 압축강도는 Ø100 × 200 mm의 실린더 시험체를 사용하였다.

이 연구에서는 나노 입자 분산을 확보하기 위해, 초음파 분산을 적용하였다. 초음파 분산을 위해 배합수 내 나노 입자 그리고 감수제를 혼입하고 10분간 분산시켰다. 이때 초음파 분산은 VCX-500을 사용하여, Amplitude 50 % 조건에서 15초간 초음파 주입 및 15초간의 휴식이 반복되도록 설정하였다.

배합은 20 L 호바트 믹서를 사용하여 시멘트, 규사를 혼입 후 10 분간 건배합을 진행하였다. 이후 나노 입자 및 감수제가 분산된 배합수를 2분 간격으로 4회에 걸쳐 나누어 투입하였다. 강섬유가 사용된 배합의 경우, 섬유간 뭉침이 발생하지 않도록 강섬유를 소분하여 투입하였다. 배합이 끝난 시멘트 모르타르는 준비된 아크릴 몰드에 타설하였으며, 공극 발생을 최소화하기 위해 진동테이블이 사용되었다. 타설이 끝난 시험체는 상온에서 24시간 경화시킨 후 탈형하였다. 이후 시험체는 20 °C 온도에서 28일 수중양생 후 실험을 진행하였다.

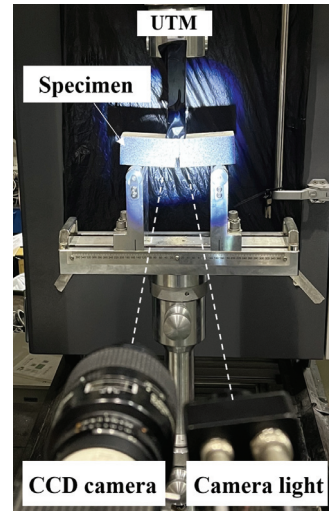


Fig. 2. Test set-up for three-point bending test

2.3 실험 방법

강섬유 보강 시멘트 모르타르의 K_{IC} 측정을 위한 3점 재하 휨 실험 전경을 Fig. 2에 나타내었다. 3점 재하 휨 실험에는 294 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하였으며, 이때 하중속도는 1 mm/min을 적용하였다. 또한 2336 × 1752 pixels를 가지는 Charge-coupled device(CCD) 카메라를 사용하여, 휨 거동을 촬영하였다. 이후 Images systems의 Tracking Eye Motion Analysis(TEMA)를 기반으로 촬영된 영상에 대한 Digital image correlation(DIC) 분석 후 시간에 따른 시험체별 Crack Mouth Opening Displacement(CMOD)를 얻었다.

강섬유가 보강되지 않은 시멘트 모르타르의 3점 재하 휨 실험 그리고 압축강도 실험에는 각각 4.9 kN, 2,940 kN 용량 만능재료 시험기를 사용하였다. 이때 하중속도는 1 mm/min을 적용하였다.

시멘트 모르타르의 K_{IC} 는 3점 재하 휨 실험 결과를 기반으로 다음과 같이 계산되었다(Lee et al. 2020).

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

여기서 K_{IC} 는 시멘트 모르타르의 파괴인성치 ($MPa \cdot mm^{1/2}$); P_{max} 는 3점 휨 재하 실험을 통해 도출된 최대 하중 (N); B는 시험체의 폭(mm); W는 시험체의 높이(mm); $f(a/w)$ 는 식 (2)에 제시된 무차원 함수; a는 노치 깊이(mm); S는 시험체의 지간거리(mm)를 나타낸다.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2\left(1 + 2\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \times \left[\left(1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \times \left(2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right) \right] \quad (2)$$

3. 결과 및 분석

실험을 통해 도출된 나노 입자 및 강섬유 보강에 따른 시멘트 모르타르의 재료적 특성을 Table 2에 나타내었다. σ_c 는 압축강도; P_{max} 는 3점 휨 재하 실험 기준 최대 하중; K_{IC} 는 파괴인성치; $CMOD_{max}$ 는 최대 하중 지점에서의 CMOD; Slump는 슬럼프 높이, 그리고 $T_{L/600}$, $T_{L/300}$, $T_{L/150}$ 는 CMOD가 각각 L/600, L/300, 그리고 L/150인 위치에서의 에너지 흡수 능력.

나노 입자 혼입량에 따른 시멘트 모르타르의 σ_c 그리고 K_{IC} 는 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 강섬유가 보강되지 않은 시멘트 모르타르의 σ_c 의 경우 NS3가 62.3 MPa로 N 대비 7.00 %의 가장 높은 압축강도 증진을 나타내었다. 반면에 강섬유가 보강된 시멘트 모르타르의 σ_c 의 경우 CNT0.5F가 59.8 MPa로 NF 대비 17.4 % 증가를 나타내었다. 그러나 NC가 혼입된 시멘트 모르타르(NC1, NC2, NC3, NC1F, NC2F, 그리고 NC3F)의 경우, 강섬유 보강에 상관없이 N 그리고 NF 보다 낮은 σ_c 를 나타내었다. 이때 NC1F는 NF 대비 9.34 %의 압축강도 저하를 나타내었으나, NC 시리즈 중 가장 높은 압축강도를 나타내었다.

강섬유가 보강된 시멘트 모르타르에서 나노 입자 혼입에 따른 압축강도 변화가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 3). CNT가 혼입된 CNT0.1F, CNT0.5F, 그리고 CNT1F의 σ_c 는 각각 56.6, 59.8, 그리고

51.3 MPa로, CNT가 0.5 wt.% 혼입되었을 때 가장 높은 압축강도를 나타내었다. NS가 혼입된 NS1F, NS2F, 그리고 NS3F의 σ_c 는 각각 51.4, 51.9, 그리고 54.5 MPa로, NS가 3 wt.% 혼입되었을 때 가장 높은 압축강도를 나타내었다. NC가 혼입된 NC1F, NC2F, 그리고 NC3F의 σ_c 는 각각 46.2, 43.0, 그리고 37.1 MPa로, NC가 1 wt.% 혼입되었을 때 가장 높은 압축강도를 나타내었다. 따라서 압축강도 증진을 위한 최적의 나노 입자 혼입량은 CNT 그리고 NS가 각각 0.5, 3 wt.%로 조사되었다.

그러나 NC 혼입은 오히려 압축강도 저하를 야기하는 것으로 조사되었으며, 이는 NC의 낮은 분산성 및 이로운 유동성 저하로 발생한 것으로 판단된다. 일부 연구자들은 NC 혼입량 증가에 따른 점도 증가, 유동성 감소, 그리고 불균일한 분산이 계면전이영역(interfacial transition zone, ITZ) 내 균열과 기공을 발생시킨다고 보고한바 있다(Yoo et al. 2022). 그러나 이 연구에서는 나노 입자의 특성에 상관없이 동일한 분산 방법을 적용하였기 때문에 구체적인 압축강도 저하 원인 분석을 위해서는 나노 입자에 대한 분산의 영향을 고려 할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3점 재하 휨 실험 결과로, 강섬유가 보강되지 않은 시멘트 모르타르의 K_{IC} 의 경우 NS1이 21 MPa·mm^{1/2}으로 N 대비 9.72 %의 가장 높은 증가를 나타내었다. 그 다음으로 CNT0.5의 K_{IC} 가 21 MPa·mm^{1/2}으로 N 대비 9.55 %의 증가를 나타내었다. 반면에 강섬유가 보강된 시멘트 모르타르의 K_{IC} 의 경우 모든 시리즈가 NF 보다 낮게 나타났다. CNT0.1F의 경우 K_{IC} 가 79.1 MPa·mm^{1/2}으로 NF 대비 3.02 % 감소하였으나, 나노 입자가 혼입된 강섬유 보강 시멘트 모르타르 중에서 가장 높은 K_{IC} 를 나타내었다.

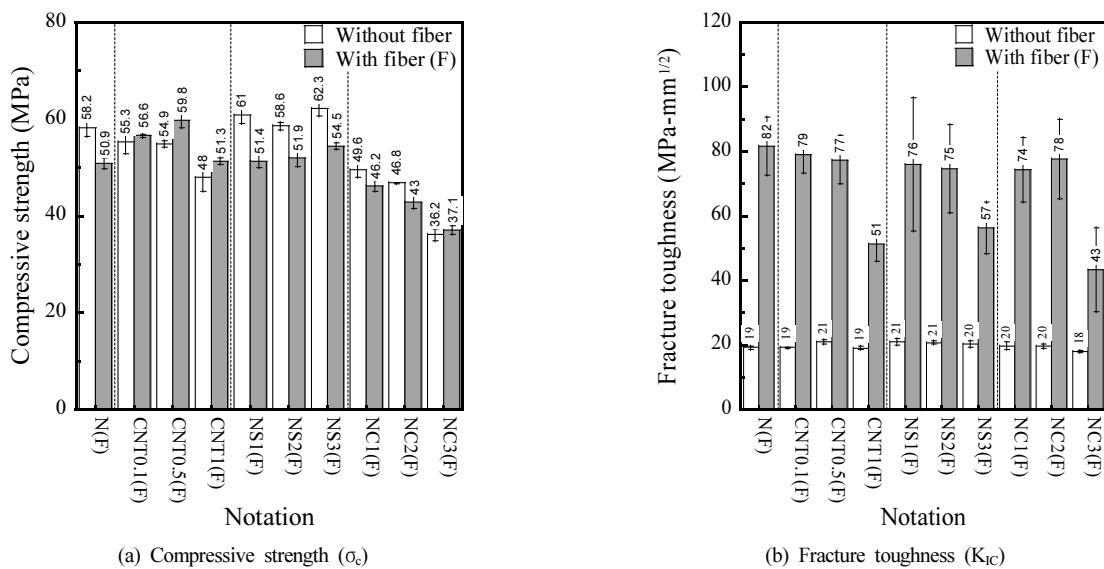


Fig. 3. Compressive strength and fracture toughness of cement mortar

Table 2. Material properties of cement mortar according to incorporation of nanoparticles and steel fibers

Notation	Cement mortar				Steel fiber reinforced cement mortar (F)						
	σ_c (MPa)	P_{max} (N)	K_{IC} (MPa·mm ^{1/2})	σ_c (MPa)	CMOD _{max} (mm)	P_{max} (N)	K_{IC} (MPa·mm ^{1/2})	Slump (mm)	$T_{L,600}$ (N·mm)	$T_{L,300}$ (N·mm)	$T_{L,150}$ (N·mm)
N(F)	Avg	58.2	1139.9	19.2	0.59	4853	81.6	166	753	1895	4261
	SD	1.7	25.4	0.4	0.21	535	9.0	-	49	126	403
CNT0.1(F)	Avg	55.3	1148.4	19.3	0.54	4707	79.1	107	753	1879	4206
	SD	2.4	9.5	0.2	0.07	351	5.9	-	58	169	301
CNT0.5(F)	Avg	54.9	1248.8	21.0	0.46	4603	77.4	60	762	1885	4058
	SD	0.7	34.2	0.6	0.02	443	7.5	-	39	140	324
CNT1(F)	Avg	48.0	1137.0	19.1	0.34	3053	51.3	61	561	1319	2668
	SD	2.9	30.1	0.5	0.09	321	5.4	-	94	180	309
NS1(F)	Avg	61.0	1250.7	21.0	0.61	4525	76.1	112	770	1888	4110
	SD	1.8	53.3	0.9	0.18	1227	20.6	-	187	494	1084
NS2(F)	Avg	58.6	1236.9	20.8	0.63	4445	74.7	100	784	1861	4047
	SD	0.8	33.5	0.6	0.11	806	13.6	-	169	376	766
NS3(F)	Avg	62.3	1208.1	20.3	0.58	3360	56.5	98	572	1387	3032
	SD	1.6	55.3	0.9	0.24	478	8.0	-	56	171	393
NC1(F)	Avg	49.6	1178.9	19.8	0.56	4422	74.4	150	803	1861	4000
	SD	0.4	66.4	1.1	0.29	593	10.0	-	45	60	425
NC2(F)	Avg	46.8	1179.5	19.8	0.36	4612	77.6	127	777	1912	4086
	SD	0.9	41.4	0.7	0.03	730	12.3	-	78	270	602
NC3(F)	Avg	36.2	1063.8	17.9	0.29	2567	43.2	88	512	1142	2324
	SD	2.0	17.5	0.3	0.14	773	13.0	-	135	319	647

$T_{L,600}$ = Energy absorption capacity of steel fiber reinforced cement mortar at a CMOD of L/600 (0.25 mm), L = 150 mm

$T_{L,300}$ = Energy absorption capacity of steel fiber reinforced cement mortar at a CMOD of L/300 (0.5 mm)

$T_{L,150}$ = Energy absorption capacity of steel fiber reinforced cement mortar at a CMOD of L/150 (1 mm)

Avg = Average, SD = Standard deviation.

강섬유가 보강된 시멘트 모르타르에서 나노 입자 혼입에 따른 K_{IC} 변화가 뚜렷하게 나타났다. CNT가 혼입된 CNT0.1F, CNT0.5F, 그리고 CNT1F의 K_{IC} 는 각각 79.1, 77.4 그리고 51.3 $MPa \cdot mm^{1/2}$ 으로, CNT가 0.1 wt.% 혼입되었을 때 가장 높은 K_{IC} 를 나타내었다. NS가 혼입된 NS1F, NS2F, 그리고 NS3F의 K_{IC} 는 각각 76.1, 74.7, 그리고 56.5 $MPa \cdot mm^{1/2}$ 으로, NS가 1 wt.% 혼입되었을 때 가장 높은 K_{IC} 를 나타내었다. NC가 혼입된 NC1F, NC2F, 그리고 NC3F의 K_{IC} 는 각각 74.4, 77.6, 그리고 43.2 $MPa \cdot mm^{1/2}$ 으로, NC가 2 wt.% 혼입되었을 때 가장 높은 K_{IC} 를 나타내었다. 모든 실험 결과에서 나노 입자가 과도하게 혼입된 경우 K_{IC} 가 급격히 감소하는 거동을 나타내었다.

강섬유가 보강되지 않은 시멘트 모르타르에 대한 K_{IC} 의 경우 Table 2 그리고 Fig. 3(b)에 제시된바 같이 NC3과 CNT1을 제외하고 모두 N 보다 같거나 높게 나타났다. 그러나 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 경우, 모든 시리즈에서 NF 보다 낮은 K_{IC} 를 나타내었다. 이 연구에서는 강섬유 보강 시 K_{IC} 의 강도 저하 원인이 나노 입자 혼입에 따른 시멘트 모르타르의 유동성 저하로 발생한 것으로 분석되었다.

강섬유 보강 시멘트 모르타르의 슬럼프 콘 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 연구에서는 배합 시 나노 입자 그리고 강섬유 보강에 상관없이 동일한 감수제량을 사용하였다. Fig. 4에 제시된바 같이 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 슬럼프는 나노 입자의 혼입량이 증가함에 따라 감소하는 거동을 나타내었다. 이때 슬럼프는 CNT가 혼입된 경우 가장 낮게 나타났으며, NC가 혼입된 경우의 슬럼프는 CNT와 NS가 각각 혼입된 경우의 슬럼프보다 비교적 높게 나타났다.

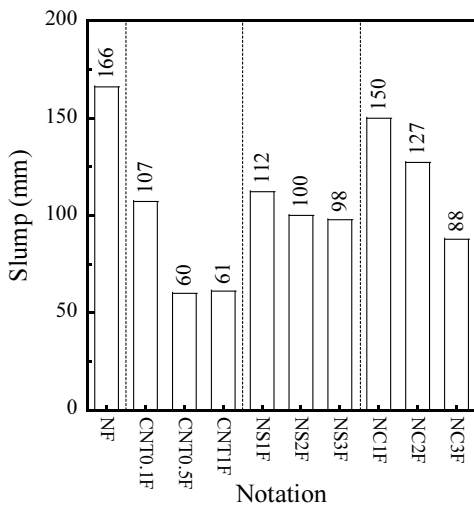


Fig. 4. Slump of steel fiber reinforced cement mortar

CNT0.1F, CNT0.5F, 그리고 CNT1F의 슬럼프는 각각 NF 대비 35.5, 63.9, 그리고 63.3 % 감소하였다. NS1F, NS2F, 그리고 NS3F의 슬럼프는 NF 대비 32.5, 39.8, 그리고 41.0 % 감소하였다. 그리고 NC1F, NC2F, 그리고 NC3F의 슬럼프는 NF 대비 9.6, 23.5, 그리고 47 % 감소하였다. 이러한 결과는 나노 입자 혼입 시 유동성이 감소한다는 기존 문헌 결과와 일치한다(Adhikary et al. 2020).

Fig. 4에 제시된바 같이, CNT는 NS 그리고 NC 보다 낮은 혼입량 사용되었음에도 가장 낮은 슬럼프를 나타내었다. 또한 동일한 혼입량이 적용된 NS 그리고 NC의 경우, 일반적으로 NS가 혼입되었을 때 NC 보다 낮은 슬럼프를 나타내었다. 이러한 차이는 나노 입자 별 상이한 입자 크기, 표면적, 반데르발스 힘, 분산 상태, 그리고 반응성으로부터 나타날 수 있다. 특히 이 연구에서 사용된 CNT의 표면적은 평균 $145 m^2/g$ 으로 평균 $60 m^2/g$ 의 표면적을 갖는 NC 보다 높은 표면적을 갖기 때문에 적은 혼입량에도 불구하고 높은 슬럼프 감소가 나타난 것으로 판단된다. 또한 동일한 혼입량 조건에서 NC는 NS보다 높은 유동성을 나타내며, 이는 반응성의 차이로 발생한다고 보고된바 있다(AI Ghabban et al. 2018). 그러나 이 연구에서는 나노 입자의 혼입량 및 반응성에 대한 구체적인 조사 및 분석이 수행되지 않은 한계점이 있기 때문에, 이에 대한 영향은 추후 연구에서 고려하고자 한다.

슬럼프와 K_{IC} 사이 관계를 Fig. 5에 나타내었으며, 슬럼프는 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 K_{IC} 와 비례 관계에 있는 것으로 확인되었다. Fig. 5에서 슬럼프가 감소할수록 K_{IC} 가 감소하는 거동을 나타내었다. 또한 나노 입자 혼입량이 증가함에 따라 유동성과 K_{IC} 가 일부 감소하는 거동을 나타내었다.

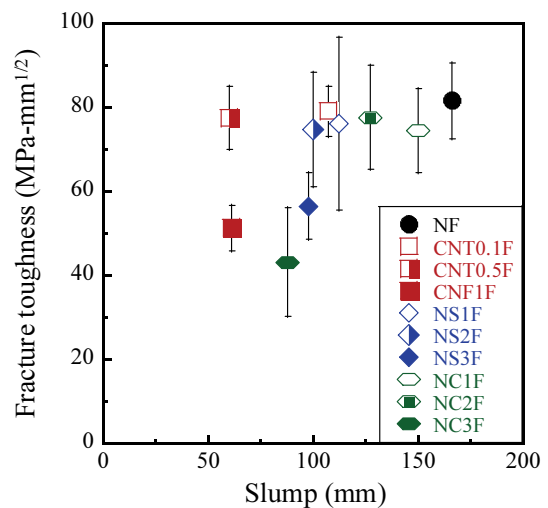
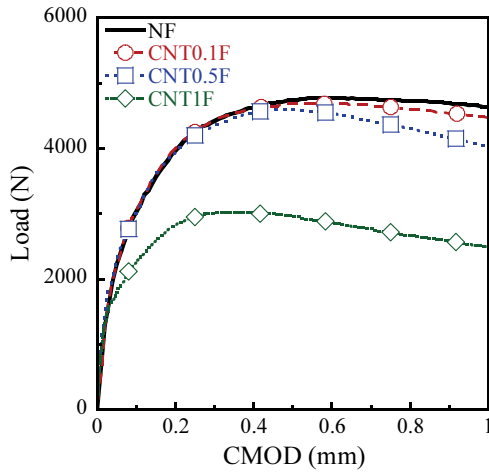
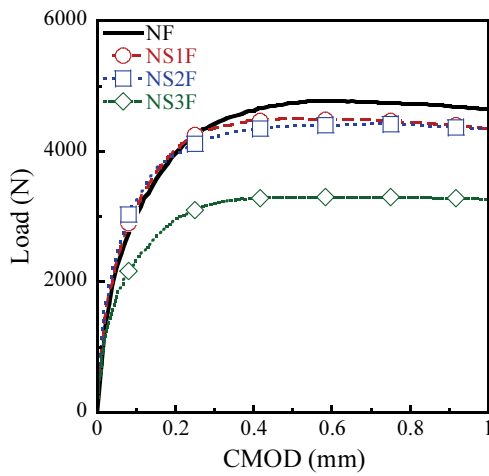


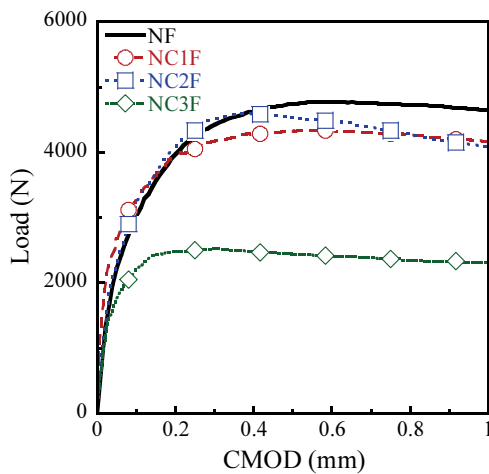
Fig. 5. Relationship between slump and fracture toughness



(a) CNT series



(b) NS series



(c) NC series

Fig. 6. Load-CMOD curves

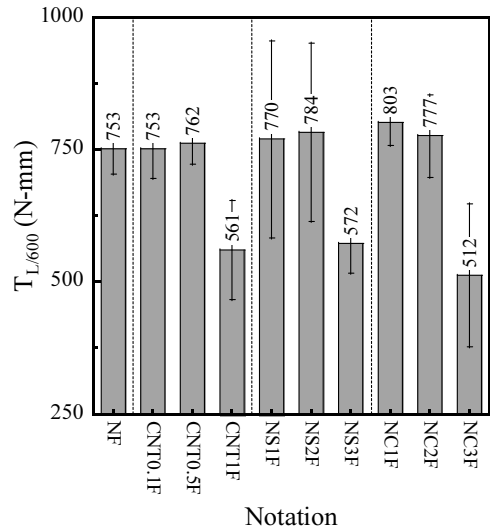


Fig. 7. Energy absorption capacity ($T_{L/600}$)

강섬유 보강 시멘트 복합재료의 유동성은 역학적 성능을 결정하는 주요 원인중 하나이다. 낮은 유동성은 강섬유의 뭉침을 야기하여 강섬유의 보강 효과를 낮추는 부정적인 영향을 초래한다. 이 연구에서는 낮은 유동성으로 인한 K_{IC} 저하가 나노 입자 혼입에 따른 보강효과를 상쇄시킨 것으로 판단된다. 따라서 나노 입자를 활용하기 위해서는 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 유동성을 개선할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

Fig. 6은 나노 입자 혼입에 따른 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 Load-CMOD 곡선을 보여준다. 모든 시험체는 강섬유 보강으로 인해 CMOD에 대한 경화(harding) 및 연화(softening) 거동을 나타내었다. 그러나 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 P_{max} 는 Table 2에 제시된바 같이, 나노 입자가 혼입되지 않은 NF가 나노 입자가 혼입된 경우보다 높은 P_{max} 를 나타낸 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 나노 입자 혼입에 따른 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 $T_{L/600}$ 를 나타내었다. NC1F의 경우 NF 대비 6.7%의 가장 높은 $T_{L/600}$ 증가를 보였으며, 이때 NC1F의 $T_{L/600}$ 는 803 N-mm이다. 또한 Table 2에 제시된바 같이, NC2F의 경우 NF 대비 0.9%의 가장 높은 $T_{L/300}$ 증가를 나타내었다. 그러나 $T_{L/150}$ 의 경우 나노 입자의 종류에 상관없이 나노 입자가 혼입되지 않은 NF가 가장 높게 나타났다. 따라서 NC의 혼입은 P_{max} 도달 전 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 초기 에너지 흡수능력($T_{L/600}$, $T_{L/300}$)을 향상시키는 것으로 조사되었다.

시멘트 모르타르 내 NC의 혼입은 CNT 그리고 NS 혼입 보다 낮은 압축강도 증진 효과를 나타내었다(Table 2, Fig. 3). 또한 강섬유가 보강되지 않은 시멘트 모르타르 내 NC가 혼입되었을 때

CNT 그리고 NS 혼입 시 보다 낮은 P_{max} 를 나타내었다(Table 2). 그러나 강섬유가 보강된 시멘트 모르타르 내 NC가 혼입되었을 때 P_{max} 도달 전 가장 높은 에너지 흡수능력($T_{L/600}$, $T_{L/300}$)을 나타내었다. Dang and Kim(2023)은 나노 입자가 초고강도 콘크리트에 매립된 강섬유의 인발 저항성에 미치는 영향을 조사하였으며, NC 혼입은 강섬유의 인발 저항성과 속도 민감성을 향상시킨다고 보고하였다. 이는 NC와 C_3A 가 반응하여 생성되는 mono-carbonate 그리고 hemi-carbonate로 인해, 강섬유 표면에 거칠기가 개선되었기 때문으로 보고하였다.

따라서 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 파괴인성치 및 초기 휨 거동 개선을 위한 최적의 나노 입자는 NC로 조사되었으며, 이때 최적 혼입량은 2 wt.%로 도출되었다. 반면 시멘트 모르타르의 압축강도 개선을 위한 최적의 나노 입자는 CNT와 NC로 조사되었으며, 이때 최적 혼입량은 각각 0.5, 3 wt.%로 조사되었다.

4. 결론

이 연구에서는 나노 입자 혼입이 시멘트 모르타르 및 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 파괴인성치에 미치는 영향을 분석하고, 이에 따른 최적의 나노 입자 및 혼입량을 조사하였다. 실험에는 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 나노실리카(nanosilica, NS), 그리고 나노 탄산칼슘(nano calcium carbonate, NC)을 사용하였다. 이때 탄소나노튜브 혼입량은 시멘트 중량대비 0.1, 0.5, 그리고 1.0 wt.%를 사용하였으며, 나노실리카는 1, 2, 그리고 3 wt.%를 사용하였다. 그리고 나노 탄산칼슘은 시멘트 중량 대비 1, 2, 그리고 3 wt.%의 혼입량을 사용하였다. 나노 입자의 영향을 조사하기 위해 3점 재하 휨 인장강도 실험, 압축강도 실험, 그리고 슬럼프 실험이 수행되었으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1 wt.%의 나노실리카 혼입은 시멘트 모르타르의 파괴인성치를 최대 9.72 % 향상시켰으나, 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 경우 나노 입자 혼입은 오히려 파괴인성치를 저하시켰다.
- 나노 입자 혼입 시 강섬유 보강 시멘트 모르타르에서 나타난 파괴인성치 저하는 나노 입자 혼입에 따른 시멘트 모르타르의 유동성 저하 때문에 나타난 것으로 분석되었다.
- 2 wt.%의 나노 탄산칼슘 혼입은 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 최대하중 도달 전 초기 에너지 흡수능력($T_{L/600}$)을 6.7 % 증가시켰다.
- 3 wt.%의 나노실리카 혼입은 시멘트 모르타르의 압축강도를 7 % 증가시켰으며, 0.5 wt.%의 탄소나노튜브 혼입은 강섬유

보강 시멘트 모르타르의 압축강도를 17.4 % 증가시켰다.

이 연구에서는 나노 입자의 혼입이 시멘트 모르타르 및 강섬유 보강 시멘트 모르타르의 파괴인성치에 미치는 영향을 조사하였다. 그러나 역학적 성능과 밀접한 관련이 있는 나노 입자의 분산 및 시멘트 모르타르의 유동성을 실험 변수로 고려하지 않은 한계점이 있다. 또한 나노 입자별 상이한 혼입량, 입자크기, 표면적, 분산성, 그리고 반응성에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문에 나노 입자별 영향을 정량적으로 비교 할 수 없는 한계점이 있다. 따라서 향후 연구로서 이러한 한계점을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 23NANO-C156177-04).

References

- Adhikary, S.K., Rudžionis, Ž., Rajapriya, R. (2020). The effect of carbon nanotubes on the flowability, mechanical, microstructural and durability properties of cementitious composite: an overview, *Sustainability*, **12**(20), 8362.
- Adhikary, S.K., Rudžionis, Ž., Tučkutė, S., Ashish, D.K. (2021). Effects of carbon nanotubes on expanded glass and silica aerogel based lightweight concrete, *Scientific Reports*, **11**(1), 2104.
- Al Ghabban, A., Al Zubaidi, A.B., Jafar, M., Fakhri, Z. (2018). Effect of nano SiO_2 and nano $CaCO_3$ on the mechanical properties, durability and flowability of concrete, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **454**, 0-10.
- Assi, L., Alsalman, A., Bianco, D., Ziehl, P., El-Khatib, J., Bayat, M., Hussein, F.H. (2021). Multiwall carbon nanotubes(MWCNTs) dispersion & mechanical effects in OPC mortar & paste: a review, *Journal of Building Engineering*, **43**, 102512.
- Cosentino, I., Liendo, F., Arduino, M., Restuccia, L., Bensaid, S., Deorsola, F., Ferro, G.A. (2020). Nano $CaCO_3$ particles in cement

- mortars towards developing a circular economy in the cement industry, *Procedia Structural Integrity*, **26**, 155–165.
- Dang, V.P., Kim, D.J. (2023). Effects of nanoparticles on the tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates, *Journal of Building Engineering*, **63**, 105513.
- Isfahani, F.T., Li, W., Redaelli, E. (2016). Dispersion of multi-walled carbon nanotubes and its effects on the properties of cement composites, *Cement and Concrete Composites*, **74**, 154–163.
- Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., Pouladkhan, A.R. (2012). Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles, *Materials and Design*, **34**, 389–400.
- Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G.H., Park, J.B. (2007). Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles, *Construction and Building Materials*, **21(6)**, 1351–1355.
- Kim, M.K., Kim, D.J. (2018). Electromechanical response of high-performance fiber-reinforced cementitious composites containing milled glass fibers under tension, *Materials*, **11(7)**, 1115.
- Lee, I.W., Hwang, R.H., Kim, D.J., Pyo, S.H. (2020). Interfacial fracture toughness between aggregates and injected quick-hardening mortar, *Cement and Concrete Composites*, **106**, 103485.
- Lee, S.Y., Le, H.V., Kim, D.J. (2019). Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress, *Construction and Building Materials*, **220**, 149–160.
- Makar, J.M., Chan, G.W. (2009). Growth of cement hydration products on single-walled carbon nanotubes, *Journal of the American Ceramic Society*, **92(6)**, 1303–1310.
- Park, J.K., Kim, M.O., Kim, D.J. (2020). Pullout behavior of recycled waste fishing net fibers embedded in cement mortar, *Materials*, **13(18)**, 4195.
- Shakhmenko, G., Juhneviča, I., Korjakins, A. (2013). Influence of sol-gel nanosilica on hardening processes and physically-mechanical properties of cement paste, *Procedia Engineering*, **57**, 1013–1021.
- Supit, S.W., Shaikh, F.U. (2014). Effect of nano-CaCO₃ on compressive strength development of high volume fly ash mortars and concretes, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **12(6)**, 178–186.
- Wang, Y.F., Hu, H., Rong, C.Q. (2017). The effect of the diameter of carbon nanotube on the mechanical and electrical properties of cement mortar, *Key Engineering Materials*, **730**, 479–485.
- Yoo, D.Y., Oh, T., Banthia, N. (2022). Nanomaterials in ultra-high-performance concrete(UHPC) – a review, *Cement and Concrete Composites*, **134**, 104730.

나노 입자가 시멘트 모르타르의 파괴인성치에 미치는 영향

이 연구는 나노 입자의 혼입이 시멘트 모르타르의 파괴인성치에 미치는 영향을 조사하였다. 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 나노실리카(nanosilica, NS), 그리고 나노 탄산칼슘(nano calcium carbonate, NC)가 각각 혼입된 시멘트 모르타르의 3점 재하 휨강도, 압축강도, 슬럼프 실험을 수행하였다. 물시멘트비, 잔골재시멘트비가 각각 0.45, 1.5인 모르타르에 19.5 mm 강섬유가 0, 2 vol.% 혼입된 시멘트 모르타르를 사용하였다. 나노 입자 혼입은 시멘트 모르타르의 파괴인성치와 압축강도를 일부 향상시켰다. 그러나 강섬유가 보강된 시멘트 모르타르의 경우 나노 입자 혼입은 모르타르 유동성을 저하하여 강섬유의 분산도에 부정적 영향을 초래하여 오히려 파괴인성치를 감소시키는 결과를 확인할 수 있었다. 나노 입자의 혼입으로 인한 모르타르의 유동성 저하를 개선할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.