

Research Paper

다중벽 탄소나노튜브의 분산방법에 따른 섬유보강 시멘트복합체의 역학적 특성

Mechanical Properties of Fiber-reinforced Cement Composites according to a Multi-walled Carbon Nanotube Dispersion Method

김문규¹ · 김규용² · 편수정³ · 최병철³ · 이에찬³ · 남정수^{2*}

Kim, Moon-Kyu¹ · Kim, Gyu-Yong² · Pyeon, Su-Jeong³ · Choi, Byung-Cheol³ · Lee, Yae-Chan³ · Nam, Jeong-Soo^{2*}

¹Master's Course Student, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

³Ph.D. Student, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

*Corresponding author

Nam, Jeong-Soo
Tel : 82-42-821-5629
E-mail : j.nam@cnu.ac.kr

Received : January 11, 2024

Revised : January 29, 2024

Accepted : January 31, 2024

ABSTRACT

This study delves into the mechanical properties of fiber-reinforced cement composites(FRCC) concerning the dispersion method of multi-walled carbon nanotubes(MWCNTs). MWCNTs find utility in industrial applications, particularly in magnetic sensing and crack detection, owing to their diverse properties including heat resistance and chemical stability. However, current research endeavors are increasingly directed towards leveraging the electrical properties of MWCNTs for self-sensing and smart sensor development. Notably, achieving uniform dispersion of MWCNTs poses a challenge due to variations in researchers' skills and equipment, with excessive dispersion potentially leading to deterioration in mechanical performance. To address these challenges, this study employs ultrasonic dispersion for a defined duration along with PCE surfactant, known for its efficacy in dispersion. Test specimens of FRCC are prepared and subjected to strength, drawing, and direct tensile tests to evaluate their mechanical properties. Additionally, the influence of MWCNT dispersion efficiency on the enhancement of FRCC mechanical performance is scrutinized across different dispersion methods.

Keywords : multi-walled carbon nanotube, fiber-reinforced cement composites, mechanical properties, dispersion method

1. 서론

시멘트계 재료는 과거 석조 및 조적식 재료에 비해 생산 및 가공이 용이하고 성형성이 우수하다. 내구성과 강도가 우수하고 사전설계를 통한 구조적 성능 및 기능적 조절이 가능하여 가장 널리 사용되고 있는 재료이다. 하지만 휨·인장강도가 낮아 취성파괴 가능성이 있고 구조체의 균열 발생 여부에 따라 구조체의 성능 감소 현상이 발생한다. 이를 보완하기 위해 최근 섬유보강 시멘트 복합체(Fiber-Reinforced Cement Composites, 이하 FRCC)를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. FRCC는 혼입된 섬유를 통해 다수의 미세균열(Micro crack)을 형성함으로써 응력 집중으로 인한 취성적 파괴를 방지하고 높은 인장강도 및 연성 능력을 부여한다[4]. 또한, FRCC에 역학적 성능 향상 및 균열 감지 등의 성능을 부여하기 위해 스마트 재료를 혼입한 FRCC의 연구가 진행되고 있다. 스마트 재료는 사회기반시설과 주거 건물의 노후화, 현장 시공기술의 발전과 구조물의 유지관리의 중요도가 높아짐에 따라 관심이 급격히 증대되고 있다. 기존 재료의 경우 주어진 환경의 변화를 수동



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적으로 반응하는 한계점을 가지는 것과 달리 스마트 재료는 외부 환경으로부터 자극을 감지 및 판단하고, 주어진 환경에 대해 지능적 거동을 나타내어 적응한다는 특징을 가지고 있다. 이러한 스마트 재료들은 급격한 산업 환경 변화에 따른 요구를 만족시켜 줄 뿐만 아니라 건물 및 시설물의 안정성 및 주도적 관리 시스템을 구축하고 있다. 특히 다중벽 탄소나노튜브 (Multi-walled Carbon Nanotube, 이하 MWCNT)는 자기감지 및 균열탐지를 이용한 관리체계를 구축함에 따라 관심도가 높아지고 있다[5-7].

MWCNT는 강철보다 높은 인장강도와 복원력이 우수하며 높은 전도성을 가지고 있어 구리의 약 1,000배 높은 전류를 견딜 수 있는 내성과 효율적인 전자전달이 가능하다. 또한 열전도성과 내열성이 우수하며 높은 화학 안정성을 가지고 있어 다양한 산업 분야에서 MWCNT를 활용하는 연구가 진행되고 있다. 최근 연구에 의하면 FRCC에 분산된 MWCNT 혼입 시 초기 인장 강성, 초기 균열 강도, 인장강도 및 변형능력 향상에 기여하는 것으로 나타났으며, 이는 MWCNT의 나노입자가 미세균열 생성에 관여하여 응력 재분배 역할을 하는 것으로 판단되었다[8]. Ga et al.[9]은 MWCNT의 적절한 혼입은 시멘트 복합체의 역학적 성능 향상을 일으키며 MWCNT 입자들이 시멘트 복합체 내부의 공극 사이에서 브릿지 역할 형태의 네트워크를 형성하고 있다고 나타냈다. 하지만 MWCNT는 입자간 발생하는 반데르발스 힘에 의해 응집현상이 일어나 적절한 분산을 하지 않을 경우 역학 성능이 감소하는 단점을 가지고 있다. Kang and Park[8]은 MWCNT를 사용한 시험체 제작 과정에서 초음파 분산을 진행하지 않은 시험체의 압축강도가 초음파 분산을 진행한 시험체의 압축강도 보다 낮게 나타났다. 이러한 결과는 반데르발스 힘으로 밀집되어 있는 MWCNT의 분산정도에 따라 강도에 영향을 줄 수 있을 것으로 보고되었다.

MWCNT의 분산방법은 크게 물리적 분산 방법과 화학적 분산 방법이 있다. 이 중에서 물리적 분산 방법인 초음파 분산 방법과 계면활성제를 활용한 분산방법이 가장 많이 사용되고 있으나 초음파 분산 방법의 경우 분산 과정에서 연구자에 숙련도와 장비의 차이 등으로 인한 정량적인 분산이 어려울 뿐만 아니라 과도한 초음파 분산 시 장비의 과열로 인한 CNT의 손상이 발생할 수 있다. 또한 계면활성제의 경우 DOC(Sodium Deoxycholate), SDS(Sodium dodecyl sulfate)등이 주로 사용되고 있지만 건설용 재료로 활용이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 건설용 재료로 활용되고 있는 PC(Polycarboxylate)계열의 계면활성제를 혼입하여 초음파 분산 방법과 계면활성제를 활용한 분산방법을 동시에 적용하는 연구도 진행되고 있다. 하지만 이를 FRCC에 적용하여 역학적 성능 평가를 위한 연구는 미흡한 실정이며 MWCNT의 전기적 특성을 활용한 자기 감지 및 균열 감지가 가능한 셀프센싱 및 스마트 센서 분야에 집중되어 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 일정 시간동안 초음파 분산을 진행한 MWCNT와 초음파 분산을 진행하지 않은 MWCNT에 액상 분산제를 혼입하여 분산을 시행하였다. 분산제 Type은 총 2가지로 기존 연구에서 분산효과가 알려진 PCE(Polycarboxylate ether)계열의 계면활성제 분산용액을 선정하였다.

이후 후크형 강섬유(Hooked steel fiber, 이하 HSF)로 보강된 FRCC에 분산된 MWCNT를 혼입하여 시험체를 제작하였다. 이후 각 시험체 별 강도 시험 및 인발 시험, 직접 인장시험을 진행하여 역학적 특성 평가를 진행하였으며 혼입된 MWCNT의 분산 효율에 따라 FRCC의 역학적 성능 향상에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

초음파 분산 유·무와 분산제 Type에 따라 선정된 MWCNT를 혼입한 FRCC의 역학적 특성을 검토하고자 설정한 실험요인 및 수준을 Table 1에 나타냈다. MWCNT는 기존 문헌에서 범용적으로 사용된 혼입량의 범위 조사하였으며 분산 방법에 따른 차이를 분석하기 위해 혼입량은 동일하게 설정하였다[10,11]. W/B는 32%로 진행하였으며 MWCNT의 초음파 분산은

30분간 Amplitude(AMPL) 65%의 세기로 분산을 진행하였다. 초음파 분산에 대한 기준은 초음파 분산 기계 제작 업체의 자문을 받아 설정하였으며 과한 분산으로 인한 MWCNT의 손상을 최소화하는 세기 및 시간을 설정하였다. 여기서 AMPL이란 초음파 진폭 세기를 나타내는 것으로 최대 100%까지 조절 가능하다. 분산 효율을 검토하기 위해 사용된 분산제는 국내 A사의 액상형 제품을 사용하였으며 분산제 A와 분산제 B를 선정하였다. 액상형 분산제 선정의 경우 기존 액상형 MWCNT와의 원활한 혼합효과를 위해 선정하였다. 분산제는 MWCNT 중량대비 0.5%와 1.0%로 선정하였고, 첨유는 HSF를 사용하였다. 양생조건은 항온항습(20±2°C, 60±5%)이며 제작된 시험체에 혼입된 MWCNT에 대한 미세단층촬영(Micro-computed tomography, 이하 Micro CT)을 진행하였으며 이를 통해 시험체 내부에 분산된 MWCNT 입자를 스캔한 뒤, 각 분산 방법에 따른 MWCNT 입자의 분산율과 분산 방법에 따른 분산 효율성을 검토하였다. 역학적 성능 평가를 위한 시험 항목으로는 휨강도, 압축강도, 첨유인발, 직접인장 강도를 검토하였다.

Table 1. Experimental factors and levels

Experimental factors	Experimental levels	
	Ultrasonic dispersion	Not ultrasonic dispersion
W/B(%)	32	32
Mixing ratio of MWCNT(%)	0.03	0.03
Dispersant type	A, B	A, B
MWCNT : Dispersant	1:1, 1:0.50	1:1, 1:0.50
Mixing ratio of HSF ^{a)} (%)	1.50	1.50
Curing condition	Constant temperature and humidity curing (20±2°C, 60±5%)	Constant temperature and humidity curing (20±2°C, 60±5%)
Experimental items	Micro CT, Flexural strength, Compressive strength, Fiber pull-out, Tensile strength	Micro CT, Flexural strength, Compressive strength, Fiber pull-out, Tensile strength

a) Hooked steel fiber

2.2 사용재료 및 시험체 제작

Table 2에 본 시험에서 사용된 MWCNT의 물성을 나타내었다. 시험체 제작에 사용된 MWCNT는 국외 T사에서 구매된 액상형 제품을 사용하였다. 액상형 제품을 사용한 이유는 분말 형태 자체로 현장 등의 사용 환경에서 적용하기에 여러 제약이 따르며 반드시 다른 복합소재와 같이 사용해야 하는 단점을 가지고 있다는 기존 문헌을 참고하여 사용 형태를 결정하였다[12]. 시멘트는 KS L 5201에 따르는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 혼화제의 경우 PC 고성능 감수제를 사용하였다. 플라이애쉬는 C Type을 사용하였으며 잔골재는 규사 7호사를 혼입하였다. 첨유는 HSF를 사용하였으며 Table 3에 첨유의 역학적 특성과 형상을 제시하였다[13]. 제작된 시험체 개요 및 사용 배합은 Table 4, Table 5에 나타내었다. 각 시험체에 혼입된 MWCNT는 초음파 분산 유무와 분산제 Type 및 혼입량에 따라 분류하였다.

Table 2. Properties of multi-walled carbon nanotubes(MWCNTs)

Parameters	Length(μm)	OD ^{a)} (nm)	Purity(wt.%)	SSA ^{b)} (m ² /g)	ASH(wt.%)	EC ^{c)} (s/cm)
Values	<10	30~80	>98	>60	<1.50	1.00

a) outer diameter, b) specific surface area, c) electrical conductivity

Table 3. Mechanical properties and high-speed film(HSF) image

Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cm ³)	Specific surface area (m ² /kg)	Tensile strength (MPa)	Aspect ratio (L/D)	Image of HSF	
30	0.50	7.85	1.00	1,140	60		

Table 4. Mix proportion of FRCC with MWCNT

W/B (%)	Cement	Water	Superplasticizer	Sand	Fly Ash	Fiber (vol. %)	MWCNT (wt %)	Dispersant (Table 5)
32	0.85	0.32	0.40	0.35	0.15	1.50	0.03	0.50 1.00

Table 5. Classification of test specimens according to dispersion method

Notation	Ultrasonic dispersion	Dispersant type	PCE Dispersant(%)
U-P	○	-	-
N-P	-	-	-
U-A0.5		A	0.5
U-A1.0	○		1.0
U-B0.5		B	0.5
U-B1.0			1.0
N-A0.5		A	0.5
N-A1.0			1.0
N-B0.5	-	B	0.5
N-B1.0			1.0

U: Ultrasonic dispersion, N: Not Ultrasonic dispersion, P: Plain

2.3 실험방법

2.3.1 Micro CT를 활용한 분산도 평가

시험체에 첨가한 MWCNT의 분산 효율성을 분석하기 위해 Micro CT를 실시하였으며 분석 장비 및 방법은 Figure 1에 나타내었다. Micro CT의 경우 비파괴 검사를 통한 스캔 방법과 영상화된 이미지를 통한 시험체 내부 구조 및 내부 공극의 정량적 분석이 가능하다. 또한 시험체 내부의 단면 이미지를 3차원으로 적층하여 세분화 과정을 거치는 방법을 통해 원하는 성분의 분포 형태를 효과적으로 분석이 가능하다. Micro CT 촬영을 위한 시험체는 15×15×15mm의 크기로 제작하였다.

2.3.2 휨강도 및 압축강도

휨 및 압축강도 시험은 KS L ISO 679(시멘트의 강도 시험방법)에 준하여 40×40×160mm 시험체를 제작하였으며, 강도를 측정하였다. 굳지 않은 상태에서 몰드에 타설하고 24시간 후에 탈형을 실시하였으며 시험체는 강도 측정 일자까지 항온습습(20±2°C, 60±5%) 양생을 실시하였다. 휨 및 압축강도 시험은 재령 3, 7, 14, 28일에 측정하였다.

2.3.3 섬유인발

Figure 2에 섬유인발 시험기기 및 섬유인발 시험체의 형상을 나타내었다. 섬유인발 시험은 MWCNT의 분산 방법에 따른 분산 효율을 검토하기 위해 정적 인발 성능을 비교하였으며 시험은 제작 및 탈형 후 28일차에 실시하였다. 시험체 제작의 경우 HSF의 절반 길이에 해당하는 15mm를 단면 25.4×25mm(가로×세로) 시험체의 중앙에 매립하여 인발시험을 실시하였으며, 하중 재하 속도는 약 1mm/min으로 진행하였다.

2.3.4 직접 인장강도

Figure 3에 직접인장 시험기기 및 인장강도 시험체의 형상을 나타내었다. Youn et al.[14]에 의하면, 섬유로 보강된 시멘트 복합체에 MWCNT 혼입 시 인장강도 및 변형능력 향상이 이루어진다는 연구결과가 보고되었다. 따라서 본 시험에서 직접 인장 시험체에 MWCNT를 혼입하여 분산방법에 따른 인장강도 평가를 진행하였다. 시험체는 도그본 형태로 제작하였으며 시험체의 크기는 400×100×25mm(길이×너비×두께), 중앙부 부분은 시험 진행시 목균열을 방지하기 위해 양 끝 10mm의 단면은 25×30mm(가로×세로)이다. 직접인장 시험 250kN 급의 직접인장 시험기기를 사용하여 진행하였으며, 하중 재하 속도는 약 1mm/min으로 설정하였다.

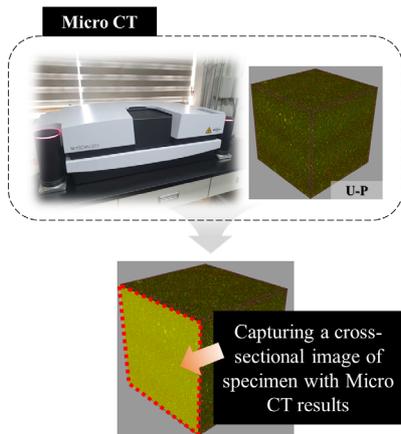


Figure 1. Micro CT scan and cross-sectional analysis

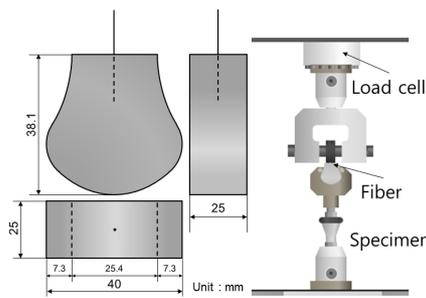


Figure 2. Set-up for pull-out test

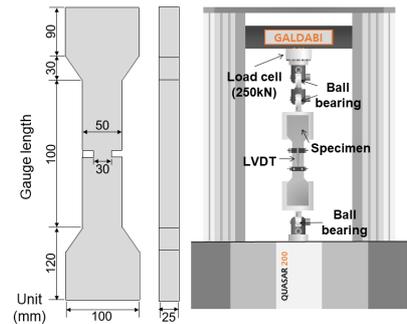


Figure 3. Set-up for tensile test

3. 실험결과 및 분석

3.1 Micro CT

시험체에 첨가한 MWCNT의 분산 효율성을 분석하기 위해 Micro CT 촬영을 실시하였다. Micro CT의 경우 비파괴 검사를 통한 스캔 방법과 영상화된 이미지를 통한 시험체 내부 구조 및 내부 공극의 정량적 분석이 가능하다. 또한 시험체 내부의 단면 이미지를 3차원으로 적층하여 세분화 과정을 거치는 방법을 통해 원하는 성분의 분포 형태를 효과적으로 분석이 가능하다. Micro CT 촬영을 위한 시험체는 15×15×15mm(가로×세로×높이)의 크기로 제작하였으며 촬영에 용이하도록 표면 마감처리를 진행하였다. 이후 시험체 내부에 분포된 MWCNT 입자의 형상을 스캔하여 3차원 이미지를 형성하였다. 이미지 형성 당시 MWCNT의 밀도 값을 적용하여 스캔을 진행하였으며, 스캔된 MWCNT의 입자의 색깔을 노란색으로 설정하여 각 시험체의 형성된 이미지 단면 모습을 Figure 4에 나타내었다. 전체 Pixel(121×121) 중 MWCNT 입자의 뭉침현상으로 판단

되는 노란색 계열의 Pixel을 VBA(Visual Basic for Applications)를 통해 분류 및 색상분석을 실시하여 각 분산 방법에 따른 MWCNT 입자의 분포도 및 분산 효율성을 검토하였다.

단면 이미지 분석 결과는 Figure 5에 나타내었다. 이미지 형성 당시 가장 많은 뭉침현상이 일어난 것으로 판단되었던 U-A1.0의 경우 모든 시험체 중 가장 많은 노란색 Pixel인 9340 ea가 검출되었으며, 이는 전체 단면 Pixel 중 63.8%에 해당되었다. 이와 같은 결과는 MWCNT가 과도한 분산작용으로 인해 오히려 뭉침현상이 심화되었을 것으로 판단되었다. 또한 초음파 분산을 진행한 U-P와 달리 어떠한 분산도 진행하지 않은 N-P의 경우 U-P대비 약 8배 많은 노란색 Pixel이 검출되었다. 반면 초음파 분산 및 분산제 0.5wt%를 활용한 U-A0.5와 분산제만을 1.0wt% 활용한 N-A1.0를 비교하였을 때 U-A0.5에 비해 노란색 Pixel 검출량이 약 30% 감소하였는데 이를 통해 분산제 A 1.0wt%가 초음파 분산 및 분산제를 활용한 분산방법과 거의 동일한 효과를 보이는 것으로 판단되었다.

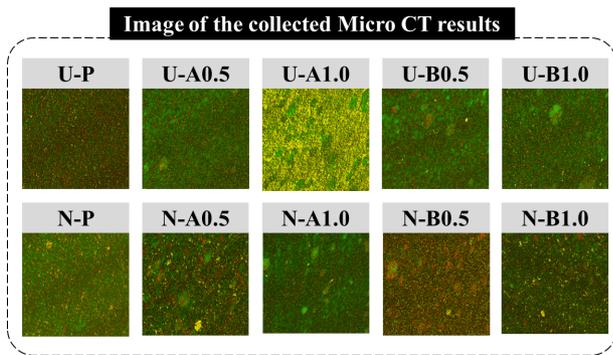


Figure 4. Cross-sectional micro CT image

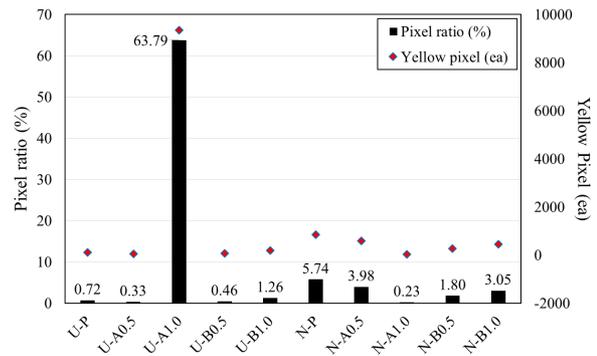


Figure 5. Analysis results of cross-sectional micro CT images

3.2 휨강도

MWCNT의 초음파 분산 유무와 분산제 종류와 혼입률에 따른 시험체의 재령별 휨강도 시험 결과는 Figure 6(a)에 나타내었다. 초음파 분산만을 진행한 U-P의 경우 28일차 25.8MPa를 보였으며 초음파 분산과 분산제를 활용한 분산을 진행한 U-A1.0, U-B0.5, U-B1.0에 비해 높은 값을 보였다. U-A0.5의 경우 초음파 분산한 CNT와 분산제 A 0.5 wt.%를 혼입하였으며 28일 기준 28.4MPa로 U-P보다 약 10% 높은 강도를 보였다. 이는 분산제 A 0.5wt%를 혼입함으로 인해 초음파 분산만으로는 분산되지 못했던 MWCNT 입자들이 더 적절하게 분산작용이 일어나 역학적 성능 향상이 일어난 것으로 사료되었다. 하지만 U-A1.0과 U-B0.5, U-B1.0의 경우 U-P에 비해 28일 기준 U-A1.0은 약 24% 감소하였고, U-B0.5의 경우 약 3.5%, U-B1.0의 경우 약 7.4% 감소하였다. 또한 분산제 A와 분산제 B 모두 1.0wt%를 혼입한 시험체가 0.5wt%를 혼입한 시험체보다 강도가 떨어지는 경향을 보였는데, 초음파 분산된 MWCNT가 분산제를 통해 과도한 분산작용으로 인해 오히려 역학적 성능이 감소한 것으로 판단되었다.

초음파 분산을 진행하지 않은 MWCNT만을 혼입한 N-P의 경우 양생 28일차 19.45MPa를 보였으며 초음파 분산만을 진행한 U-P와 비교해 약 24.6%가 감소한 것으로 나타났는데, 어떠한 분산도 하지 않은 MWCNT 입자가 반데르 발스 힘으로 인한 뭉침현상으로 인해 역학적 성능이 저하된 것으로 판단되었다. 분산제 A와 분산제 B를 혼입한 시험체 모두 N-P에 비해 높은 강도를 보였다. 특히 N-A1.0에 경우 28일 기준 26.89MPa로 U-P와 비교하여 약 4%, N-P와 비교하여 38.25%가 증가하였다. 또한 분산제 A와 분산제 B 모두 1.0wt%를 혼입한 시험체가 0.5wt%를 혼입한 시험체에 비해 높은 강도를 보였으며 분산제 A가 분산제 B보다 28일 기준 약 7% 높은 것으로 나타났는데 분산제 1.0wt% 혼입 시 초음파 분산을 진행하지 않아도 적절한 분산 효율이 나타나는 것으로 사료되었다. 반면 초음파 분산을 진행하지 않을 경우 분산제 0.5wt% 혼입 시 분산효율이 감소하여 역학적 성능이 떨어지는 것으로 판단되었다.

3.3 압축강도

Figure 6(b)에 MWCNT의 초음파 분산 유무와 분산제 종류와 혼입률에 따른 시험체의 재령별 압축강도를 나타내었다. 초음파 분산만을 진행한 U-P는 양생 28일차 50.1MPa로 U-A0.5를 제외한 다른 시험체에 비해 높은 강도를 보였다. 특히 U-A0.5의 경우 28일 기준 52.4MPa로 U-P보다 높은 강도 향상을 보였다. 이는 혼입된 MWCNT가 초음파 분산만을 진행한 MWCNT에 비해 더 적절한 분산이 이루어져 역학적 성능 향상이 이루어졌을 것으로 판단되었다. U-A1.0과 U-B0.5, U-B1.0의 경우 U-P에 비해 낮은 강도를 보였으며 U-A1.0에 경우 다른 시험체들과 비교하여 강도가 매우 낮아지는 경향을 보였는데, 혼입된 MWCNT가 과도한 분산작용으로 인해 오히려 역학적 성능이 떨어지며 내부 균열이 증가하여 강도 저하가 일어났을 것으로 판단되었다.

초음파 분산을 진행하지 않은 N-P의 경우 양생 28일차 41.0MPa를 보였는데, 초음파 분산을 진행한 U-P와 비교하였을 때 강도가 감소한 경향을 나타냈다. 이는 초음파 분산을 진행하지 않은 MWCNT가 시험체 내부에서 반데르발스 힘으로 인해 뭉침현상이 일어나 적절한 분산이 이루어지지 않아 역학적 성능이 떨어져 내부균열 및 공극이 증가하여 강도가 낮아지는 것으로 판단되었다. 하지만 분산제를 혼입한 다른 시험체의 경우 모두 28일 기준 4개 시험체 모두 N-P와 비교하여 높은 강도 향상을 보여주었다. 특히 N-A1.0은 28일 기준 50.1MPa로 N-P에 비해 약 22.2% 증가한 것으로 나타났는데, 분산제 A 1.0wt% 혼입 시 적절한 분산효과를 볼 수 있으며 초음파 분산과 분산제를 모두 사용한 U-A0.5와 비슷한 강도 향상을 보인 것으로 판단되었다.

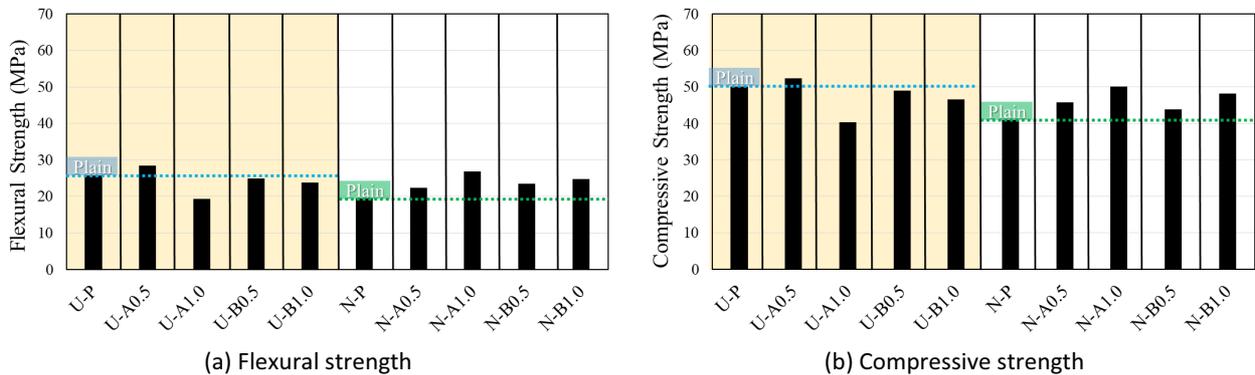


Figure 6. Flexural and compressive strength of FRCC incorporating MWCNTs

3.4 섬유인발

MWCNT의 분산방법에 따른 FRCC의 인발 하중-변위 곡선은 Figure 7에 나타내었다. 시험체는 최대 하중에 도달함에 따라 HSF에 의한 인발거동을 보였으며 최대 하중 이후 HSF의 끝단 모양이 직선형으로 변형되며 인발하중이 단계적으로 감소하는 경향을 보였다[15,16].

초음파 분산 및 분산제를 활용한 시험체의 경우 U-A1.0을 제외하고 모두 U-P보다 높은 인발성능을 보였다. 또한 압축강도에서 가장 높은 강도를 보인 U-A0.5의 경우 가장 높은 인장성능을 보였으며 가장 낮은 압축강도를 보인 U-A1.0의 경우 모든 시험체 중 가장 낮은 인발성능을 측정된 것으로 보아, 과도하게 분산된 MWCNT가 전체적인 기계적 성능에 영향을 미치는 것으로 보인다.

N 시험군의 경우 모든 시험체가 N-P에 비해 높은 인발 성능을 보였다. N-P의 경우 어떠한 분산도 진행하지 않았기 때문에 시험체 내부에 MWCNT가 반데르발스 힘으로 인한 뭉침현상이 일어나 기계적 성능 저하로 이어졌을 것으로 사료된다.

모든 시험체가 분산제 0.5wt%를 혼입하였을 때보다 1.0wt%를 혼입하였을 때 높은 기계적 성능을 보였는데, 초음파 분산을 진행하지 않고 분산제만을 혼입하였을 때 1.0wt%가 적절한 혼입량으로 판단되었다. 또한, N-A1.0의 경우 압축강도 시험과 유사하게 시험 초기 인발성능이 가장 높게 측정되었지만 인발 시험이 진행되며 N-B1.0이 변형량이 높은 것으로 나타났다. 이는 적절히 분산된 MWCNT가 시험체 내부 공극을 채워줌으로써 성능 향상이 일어난 것으로 판단된다.

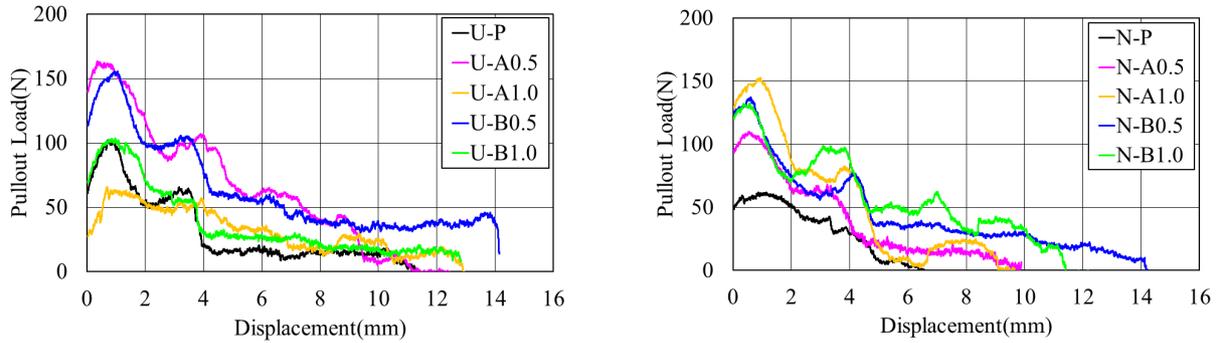


Figure 7. Fiber pull-out load-displacement curve of FRCC with varying MWCNT incorporation rates

3.5 직접 인장강도

Figure 8에 MWCNT를 혼입한 FRCC의 인장응력-변형곡선을 나타내었다. 대부분의 시험체는 인발 경향과 유사한 결과를 보였으며 U-A0.5와 N-A1.0의 경우 가장 높은 측정값을 보였다. 이는 압축강도 및 휨강도의 시험결과와도 유사한 경향으로 나타났다.

초음파 분산 및 분산제를 활용하여 제작한 시험체의 경우 U-A0.5 및 U-B1.0의 경우 U-P보다 높은 인장강도를 보였으며 U-B0.5의 경우 기존 압축강도 시험에서 가장 낮은 강도를 보인 U-A1.0보다 더 낮은 인장강도를 보였다. 이러한 강도 저하의 원인으로는, 섬유 분리 및 섬유 배양으로 예측할 수 있다. Şanal and Zihnioglu[17]에 의하면 시험체 제작 중 정적 및 동적 분리 저하가 일어날 수 있으며 기계적 성능에 영향을 미칠 수 있다고 보고되었다. 또한 Maya and Graybeal[18]에 의하면 섬유 배향 분포에 따라 균열 응력, 변형 능력 등 성능 저하가 발생할 수 있다고 보고되었다.

분산제만을 활용하여 제작한 시험체의 경우 모든 시험체가 어떠한 분산도 진행하지 않은 N-P보다 높은 인장강도를 보였으며, 분산을 진행하지 않은 MWCNT가 시험체 내부에서 반데르발스 힘으로 인한 뭉침현상이 일어나 전반적인 성능 저하가 일어난 것으로 판단된다. 이에 따라, N-A1.0 및 N-B1.0의 경우 기존 초음파 분산 및 분산제를 활용하여 제작한 시험체와 비슷한 인장강도 성능을 보였으며 N-B0.5의 경우 N-A0.5와 비교하였을 때 높은 인장강도를 보였다.

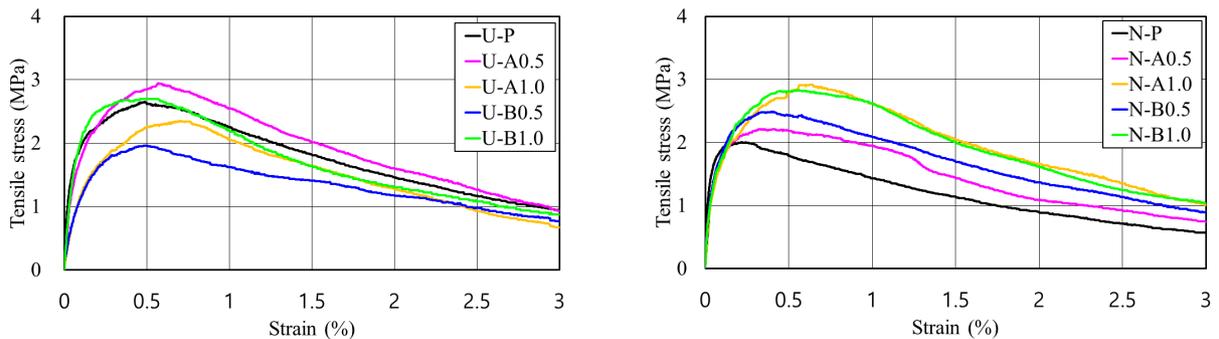


Figure 8. Direct tensile stress strain curve of FRCC with MWCNT incorporation

4. 결론

본 연구는 기존 연구에서 MWNT에 적용 시 분산효과가 알려진 초음파 분산 방법과, PCE 계열의 계면활성제 분산용액을 활용하여 분산방법을 분류하고, 분산방법에 따른 기계적 성능 평가를 진행하기 위해 Micro CT 스캔 및 단면 측정, 압축 및 휨강도 측정, 정적 인발성능 평가, 직접 인장강도 평가를 진행하였으며 결과는 다음과 같다.

- 1) Micro CT 결과에 따르면 U-A1.0 시료에서 MWNT의 뭉침이 가장 많이 발생한 것으로 나타났으며, 과도한 분산 작용이 오히려 뭉침을 증가시켰다고 해석된다. 또한, 분산제 1.0wt%를 혼입한 경우가 효과적인 분산을 보여주었다.
- 2) 기계적 성능 시험에서는 휨강도, 압축 강도 등에서 분산을 진행한 경우가 강도가 향상되었으며, 특히 U-A0.5에서는 분산제를 혼입하지 않은 경우에 비해 향상된 결과를 나타냈다. U-A1.0에 경우 다른 시험체들과 비교하여 강도가 매우 낮아지는 경향을 보였는데 이는 혼입된 MWNT가 과도한 분산작용으로 인해 오히려 역학적 성능이 떨어지며 내부 균열이 증가하여 강도 저하가 일어났을 것으로 판단되었다. N-A1.0의 경우 N-P에 비해 강도가 증가한 것으로 나타났는데 이는 분산제 A 1.0wt% 혼입 시 적절한 분산효과를 볼 수 있으며 초음파 분산과 분산제를 모두 사용한 U-A0.5와 비슷한 강도 향상을 보인 것으로 판단되었다.
- 3) 섬유 인발 시험의 경우 초음파 분산 및 분산제를 활용한 시험체의 경우 U-A1.0을 제외하고 모두 U-P보다 높은 인발성능을 보였다. 또한 압축강도에서 가장 높은 강도를 보인 U-A0.5의 경우 가장 높은 인장성능을 보였으며 가장 낮은 압축 강도를 보인 U-A1.0의 경우 모든 시험체 중 가장 낮은 인발성능을 측정된 것으로 보아, 과도하게 분산된 MWNT가 전체적인 기계적 성능에 영향을 미치는 것으로 보인다. N 시험군의 경우 모든 시험체가 분산제 0.5wt%를 혼입하였을 때 보다 1.0wt%를 혼입하였을 때 높은 기계적 성능을 보였는데, 초음파 분산을 진행하지 않고 분산제만을 혼입하였을 때 1.0wt%가 적절한 혼입량으로 판단되었다.
- 4) 직접 인장강도 시험의 경우 대부분의 시험체는 인발경향과 유사한 결과를 보였으며 U-A0.5와 N-A1.0의 경우 가장 높은 측정값을 보였다. 이는 압축강도 및 휨강도의 시험결과와도 유사한 경향으로 나타났다. N-A1.0 및 N-B1.0의 경우 기존 초음파 분산 및 분산제를 활용하여 제작한 시험체와 비슷한 인장강도 성능을 보였으며 N-B0.5의 경우 N-A0.5와 비교하였을 때 높은 인장강도를 보였다.

본 연구에서의 결과를 바탕으로, 향후 MWNT의 다양한 분산방법과, 이에 따라 종류가 다른 섬유를 혼입한 시멘트 복합체의 역학적 성능에 미치는 영향 및 향상된 분산효과를 추가적으로 검토해야 한다. 이와 함께 MWNT의 혼입량을 높이는 연구가 진행되어야 하며, MWNT의 입자가 섬유 표면 및 시험체 미세 균열 내부에 미치는 영향에 대한 분석이 이루어져야 한다.

요약

본 연구에서는 내열성, 화학적 안정성 등 다양한 특성으로 인해 산업 분야에서 자기감지, 균열 감지 등의 용도로 활용되고 있는 MWNT를 활용하여 진행하였다. 하지만 MWNT는 전기적 특성을 활용한 자기감지 및 스마트 센서에 대한 연구에 집중되어 있다. 또한, 연구자의 기술 및 장비의 차이로 인해 정량적 분산이 어렵고, 과도한 분산은 기계적 성능 저하로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일정 시간 초음파 분산과 분산 효과가 입증된 PCE 계면활성제를 활용하여 섬유보강 시멘트 복합체 시험편을 제조하고, 각 시험편에 대해 강도 시험, 인발 시험, 직접 인장 시험을 수행하여 기계적 물성을 평가하였다. Micro-CT 촬영과 압축, 휨, 인장 강도 시험 결과 초음파 분산과 분산제를 사용한 시험체인 U-A0.5와 분산제만을 사용한 N-A0.5가 다른 시험체에 비해 높은 강도를 보이는 것을 확인하였으며 분산 방법에 따라 MWNT의 분산 효율이 섬유보강 시멘트 복합체의 기계적 성능 향상에 미치는 영향을 조사하였다.

키워드 : 다중벽 탄소나노튜브, 섬유보강 시멘트복합체, 역학적 특성, 분산 방법

Funding

Not applicable

Acknowledgement

This study was supported by the National Research Foundation of Korea, funded by the Ministry of Science and ICT of Korea in 2020(No. 2020R1C1C101403812).

ORCID

Moon-Kyu Kim,  <https://orcid.org/0009-0009-9734-8321>

Gyu-Yong Kim,  <https://orcid.org/0000-0002-8662-8899>

Su-Jeong Pyeon,  <https://orcid.org/0000-0001-7768-5958>

Byung-Cheol Choi,  <https://orcid.org/0000-0001-6668-5741>

Yae-Chan Lee,  <https://orcid.org/0000-0002-5643-9771>

Jeong-Soo Nam,  <https://orcid.org/0000-0002-9723-5994>

References

1. Cho BH, Jeong SK. Flexural behavior of PVA fiber reinforced cement composites modified by graphene oxide nanoflake by DIC technique. Korean Society of Road Engineers. 2023 Jun;25(3):55-64. <https://doi.org/10.7855/IJHE.2023.25.3.055>
2. Seo DJ, Lee YJ, Choi BG, Park JG, Heo GH. Analysis of microstructure, electrical and resistance heating properties of cement composites incorporating conductive fibers. Journal of the Korea Concrete Institute. 2023 Oct;35(5):543-52. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2023.35.5.543>
3. Suh JW, Han TS. Phase segmentation of PVA fiber-reinforced cementitious composites using u-net deep learning approach. Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea. 2023 Oct;36(5):323-30. <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2023.36.5.323>
4. Yoon HD, Yang IS, Han BC, Kim SW, Choi CS. Characteristics of high performance hybrid fiber reinforced cement-based composites using twisted five steel fibers. Journal of the Korean Institute of Architects-Structural Systems. 2005 Sep; 21(9):3-10.
5. Jang JH, Wang ZJ, Kouong J, Gu GY, Park JM, Lee WI, Park JK. Single carbon fiber/acid-treated CNT-epoxy composites by electro-micromechanical technique and wettability test for dispersion and self-sensing. Journal of Adhesion and Interface. 2009 Jun;10(2):90-7.
6. Kang IS. Development of Dual Antibody-Based Biosensor Using Carbon Nanotube Materials [master's thesis]. [Jeju (Korea)]: Jeju National University. 2023. p. 1-33.
7. Lee SH, Han SJ, Jang BS, Kim KS, Seo SY. Evaluation of self-sensing performance of UHPC with carbon nanotube. Journal of the Korea Concrete Institute. 2020 Dec;32(6):505-12. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2020.32.6.505>
8. Kang ST, Park SH. Experimental study on improving compressive strength of MWCNT reinforced cementitious composites. Journal of the Korea Concrete Institute. 2014 Feb;26(1):63-70. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.1.063>
9. Ga SJ, Yoo SW, Choi YC. Heating and mechanical properties of MWCNT reinforced cement composites. Journal of the Korea

- Concrete Institute. 2021 Feb;33(1):49-56. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2021.33.1.049>
10. Zhou C, Li F, Hu J, Ren M, Wei J, Yu Q. Enhanced mechanical properties of cement paste by hybrid graphene oxide/carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*. 2017 Mar;134:336-45. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.147>
 11. Liew KM, Kai MF, Zhang, LW. Mechanical and damping properties of CNT-reinforced cementitious composites. *Composite Structures*. 2017 Jan;160:81-8. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.043>
 12. Yun CH, Lee HS. Carbon Nanotube Composite. *The Polymer Society of Korea*. 2007 Feb;18(1):4-7.
 13. Kim HS, Kim GY, Lee SK, Choe GC, Nam JS. Direct tensile properties of fiber-reinforced cement based composites according to the length and volume fraction of amorphous metallic fiber. *Journal of Korea Institute of Building Construction*. 2019 Jun;19(3):201-7. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2019.19.3.201>
 14. Youn DA, Kim JH, Lee GC, Seo SY, Yun HD. Tensile and strain-sensing properties of hybrid fibers reinforced strain-hardening cement composite (Hy-SHCC) with different carbon nanotube (CNT) dosages. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2020 Jun;32(3):285-93. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2020.32.3.285>
 15. Kim MH, Kim JH, Kim YR, Kim YD. An experimental study on the mechanical properties of HPRCCs reinforced with the micro and macro fibers. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2005 Apr;17(2):263-71. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2005.17.2.263>
 16. Lee YC, Kim GY, Nam JS, Kim HS, Lee SK. The effect of fiber on the pull-out behavior and tensile performance of FRCC. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2021 Aug;33(4):411-20. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2021.33.4.411>
 17. Şanal I, Zihnioglu NO. To what extent does the fiber orientation affect mechanical performance?. *Construction and Building Materials*. 2013 Jul;44:671-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.079>
 18. Maya DLF, Graybeal B. Fiber orientation distribution and tensile mechanical response in UHPFRC. *Materials and Structures*. 2016 Aug;50:1-17. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0914-5>