

다중벽 탄소나노튜브가 시멘트 페이스트의 유변학적 물성 및 압축강도에 미치는 영향

Effect of Multi-Walled Carbon Nanotube on Rheological Behavior and Compressive Strength of Cement Paste

김지현¹ · 김원우² · 문재흠³ · 정철우^{4*}Ji-Hyun Kim¹ · Won-Woo Kim² · Jae-Heum Moon³ · Chul-Woo Chung^{4*}

(Received October 19, 2020 / Revised November 19, 2020 / Accepted November 24, 2020)

Carbon nanotube has excellent mechanical strength and functionality, so it has been utilized in various applications. In recent years, utilization of carbon nanotube in construction material has started to get interests from researchers in the area of construction materials. However, there is limited amount of work with respect to the rheological properties of cement paste using carbon nanotube. In this work, solution made of multi-walled carbon nanotube with dispersing agent of polyvinyl pyrrolidone was used to prepare cement paste specimens, and rheological properties and 28 day compressive strengths of cement paste using multi-walled carbon nanotube were measured. According to the experimental results, as the amount of multi-walled carbon nanotube increased, plastic viscosity and yield stress of cement paste specimens also increased. It was also found that such effect was higher with lower w/c cement paste specimens. With respect to the compressive strength, it was maximized at carbon nanotube content of 0.1wt.% for w/c 0.30 cement paste, whereas the maximum strength of w/c 0.40 cement paste was observed with carbon nanotube content of 0.2wt%.

키워드 : 다중벽 탄소나노튜브, 혼입량, 유변학, 압축강도**Keywords** : Multi-walled carbon nanotube, Amount of carbon nanotube, Rheology, Compressive strength

1. 서론

재료의 생산능력 및 신소재의 활용이 극대화되면서, 나노소재의 건설재료 활용에 대한 관심이 증대되고 있다. 나노소재 관련 산업은 다른 산업 기술 분야와 연계하여 개발되고 있는 대표적인 융복합 기술로서, 그 중 탄소(Carbon) 재료는 금속, 세라믹, 고분자 등과 함께 4대 재료로 각광받고 있다. 특히 탄소나노튜브(Ijima 1991) 및 그래핀은 대표적인 탄소나노재료인데, 탄소 6개로 이루어진 육각형의 구조체가 공유결합의 형태로 서로 연결되어 관 모양 혹은 시트 모양을 형성하고 있는 신소재로, 높은 역학적 특성을 가지며, 열전도율 및 전기전도율 상승 등의 가능성을 부여해줄 수

있어, 다양한 산업영역에서 활용되고 있다(Shi et al. 2003; Overney et al. 1993; Che et al. 1999; Dilon et al. 1997).

탄소나노튜브는 다양한 종류의 고분자 재료에 보강용 복합체로 사용되고 있으며(Hewitt et al. 2012; Wang et al. 2005; Park et al. 2008), 금속재료의 보강재료로서도 활용되고 있는데(Bakshi et al., 2013; Kwon et al. 2010), 탄소나노튜브를 혼입하여 복합체를 제조하는 경우, 재료의 탄성계수, 압축강도, 및 파괴 저항성에 현저한 상승효과를 가지고 있는 것으로 보고되었다. 그러나 합성 과정에서 발생하는 고가의 비용으로 인해, 주로 에너지 저장 소재(Lu et al. 2018; Xu et al., 2014), 고감도 센서(Song et al. 2017; Srivastava et al. 2010), 고강도 복합재료(Hwang et al. 2013) 등의

* Corresponding author E-mail: cwchung@pknu.ac.kr

¹부경대학교 융복합인프라기술연구소 연구교수 (Multidisciplinary Infrastructure Research Laboratory, Pukyong National University, Busan, 48513, Republic of Korea)²한국건설기술연구원 전임연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-Do, 10223, Republic of Korea)³한국건설기술연구원 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-Do, 10223, Republic of Korea)⁴부경대학교 건축·소방공학부 부교수 (Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Republic of Korea)

Copyright © 2020 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

고부가가치 영역에 치중되어 연구되었으며, 건설 재료 분야에 적용된 실례는 타 분야에 비해 상대적으로 미흡한 상황이나, 최근 건설재료에 대한 나노소재 혼입에 대한 관심이 증가하면서, 관련 연구(Chan and Andrawes 2010; Birenboim et al, 2019; Xu et al, 2015; Danoglidis et al, 2016; Kim et al, 2014) 또한 함께 증가한 것으로 조사되었다.

강도 위주의 내구성 평가가 주를 이루던 과거와는 달리 구조물이 노출되는 환경에 따른 내구성 확보, 부재의 대형화, 고성능 광물질 혼화제, 및 화학 혼화제의 기술발전에 따라 시멘트 콘크리트의 성능 다양화가 가속화되고 있는 현 상황에서, 구조물의 내구성을 보다 더 향상시키고 이에 새로운 성능을 부여하기 위해서는 높은 역학적 성능을 가진 탄소나노튜브와 같은 나노소재 혼입 요소기술의 개발이 필요하다. 나노단위 입자인 탄소나노튜브를 시멘트 재료에 적용한다면, 시멘트 입자 사이에 균등하게 분포되어 수화생성물간의 거리(미세공극률에 영향을 미침), 밀도 차이, 및 미세균열의 존재에 의해 발생하는 역학적 특성 변화를 제어하여, 보다 우수한 강도 및 내구성을 가지는 고성능 콘크리트의 개발이 가능하다. 또한 특유의 열전도성 및 기능성으로 인하여, 전도성 콘크리트(heat conductive concrete)의 제조 및 에너지 수확(energy harvesting)이 가능하도록 콘크리트의 설계가 가능하고, 균열의 자기진단 등의 목적으로도 활용이 가능하며, 구조체에 다양한 형태의 기능성을 부여할 수 있어, 현재 요구되는 고기능성 재료의 개발에도 큰 역할을 담당할 수 있다. 탄소나노튜브를 혼입한 시멘트/콘크리트 복합체를 활용하는 경우, 열원으로부터의 빠른 반응이 가능하므로, 건물 냉난방 시스템의 유지에 소모되는 에너지 부하를 절감할 수 있는 등 다양한 장점을 가질 것으로 예상된다.

하지만 현재까지 건설 재료 분야에 있어 탄소나노재료의 이용에 관한 연구는 다소 미흡한 실정이며, 대부분의 경우 역학적 성능이나 기능성의 향상에 초점을 맞추어 연구를 진행한 것으로 조사되었다(Li et al, 2007). 탄소나노튜브는 미세한 입자로서, 이의 혼입시 발생할 수 있는 유변학적 물성의 변화가 반드시 발생한다. 소수성의 탄소나노튜브를 물에 분산시키기 위해 사용된 계면활성제가 시멘트 페이스트의 유변학적 물성에 미치는 영향 또한 중요한 요소일 수 있으나 이에 대한 연구가 상대적으로 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 물시멘트비 환경 하에서, 탄소나노튜브의 혼입률이 시멘트 페이스트의 압축강도 및 유변학적 물성에 미치는 영향을 검증하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험재료

탄소나노튜브를 혼입한 시멘트 페이스트의 제조에 사용된 시멘트는 KS L 5201 규준을 따르는 국내 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며 화학적 조성은 Table 1과 같다. 다중벽 탄소나노튜브는 (주) 제이오의 Jenotube 10A이며, 기초물성은 아래의 Table 2에 정리하여 나타내었다. 다중벽 탄소나노튜브의 분산에 사용된 계면활성제는 Polyvinyl Pyrrolidone(PVP)이며, 다중벽 나노튜브의 수용액 분산을 위해, PVP의 혼입률을 나노튜브 중량대비 50% 수준에 맞추어 수용액을 제조한 후, 수용액내의 탄소나노튜브의 농도를 3%로 맞추고 Bead Mill을 활용한 1단계 분산과정을 진행하였다. 1단계 분산과정이 종료된 수용액은, Nano Disperser을 활용한 고압분산과정을 활용하여, 2단계의 분산과정을 진행하였다. 2단계의 고압분산과정은 3차에 걸쳐 진행되었으며, 이를 통해 최종적으로 실험에 활용될 탄소나노튜브의 수용액의 제조를 완료하였다.

Table 1. Chemical compositions of type I ordinary portland cement (%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO
61.64	20.74	5.24	2.56	2.07
Fe ₂ O ₃	K ₂ O	LOI	Na ₂ O	-
3.38	0.94	3.29	0.15	-

Table 2. Physical properties of multi-walled carbon nanotube

Diameter(nm)	8~13
Length(μm)	50~150
Purity(wt.%)	Minimum 96.5
Bulk density(g/ml)	0.07~0.09
Surface area(BET; m ² /g)	250~350

2.2 배합

다중벽 탄소나노튜브를 활용한 시멘트 페이스트의 제조에 사용된 배합표는 Table 3에 나타내었다. 물시멘트비는 0.25, 0.30, 및 0.40의 3종류의 변수를 두었으며, 탄소나노튜브의 혼입량은 시멘트 중량대비 0.05%, 0.1%, 0.2%로 두었다. 시멘트 페이스트의 배합시 물시멘트비의 유지를 위하여, 탄소나노튜브 수용액 내부의 물의 량을 계산한 후, 이를 배합수량에서 제하여 시멘트 페이스트 시편체 제작에 필요한 추가 배합수량을 산출하였다. CNT 혼입률이 시멘트 페이스트의 flow 및 rheology에 미치는 영향을 확인하

Table 3. Mix proportions of cement paste

	w/c (%)	CNT (%)	Amount of materials(g)					
			C	W ¹⁾	CNT solution ²⁾	Amount of water in CNT solution ³⁾	Amount of water used for mixing ⁴⁾	Amount of CNT
Plain	25	-	1500	375	-	-	-	-
	30	-	1500	450	-	-	-	-
	40	-	1200	480	-	-	-	-
3wt% CNT solution	25	0.2	1500	375	100	97.00	278.00	3
		0.1	1500	375	50	48.50	326.50	1.5
		0.05	1500	375	25	24.25	350.75	0.75
	30	0.2	1500	450	100	97.00	353.00	3
		0.1	1500	450	50	48.50	401.50	1.5
		0.05	1200	360	20	19.40	340.60	0.6
	40	0.2	1200	480	80	77.60	402.40	2.4
		0.1	1200	480	40	38.80	441.20	1.2
		0.05	1200	480	20	19.40	460.60	0.6

- 1) W = total amount of water in the mix; 3)+4)
- 2) CNT solution = 3% CNT solution(3% CNT + 97% water)
- 4) amount of water added to the mix to maintain target w/c

기 위하여, 시멘트 페이스트의 배합시, 분산을 위한 고성능 감수제는 사용하지 않았다.

시멘트 페이스트의 배합은 Planetary Paddle Mixer를 활용하여 ASTM C 305 “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency” 규준에 따라 진행하였다. 배합에 앞서 시멘트의 건비율을 15초동안 진행한 후, CNT 수용액이 포함된 배합수를 첨가하여 30초간 저속(140±5r/min)에서 배합을 진행하였다. 이후 30초 정도 배합의 휴지기를 거친 후 1분간 중속(285±10r/min)에서 1분간 배합을 진행하였다.

2.3 레올로지 특성

배합이 완료된 시멘트 페이스트의 유동성은 Brookfield사의 DV-III programmable rheometer를 활용하여 측정하였다. 시멘트 페이스트를 Fig. 10에 나타난 바와 같이, 20°C의 물의 순환하는 630ml 크기의 용기에 담은 후, 온도를 유지시키면서 크기 50mm의 실린더형 spindle을 시멘트 페이스트에 넣고 측정을 진행하였다. 본 실험에서 사용된 Spindle은 21번 spindle과 정확하게 같은 형상이지만, 630ml 용기에서 측정이 가능하도록 연결부를 길게 자체제작한 모형을 사용하였다.

레올로지는 10초 동안 5rpm씩 증가시키며, 최대 55rpm까지 상

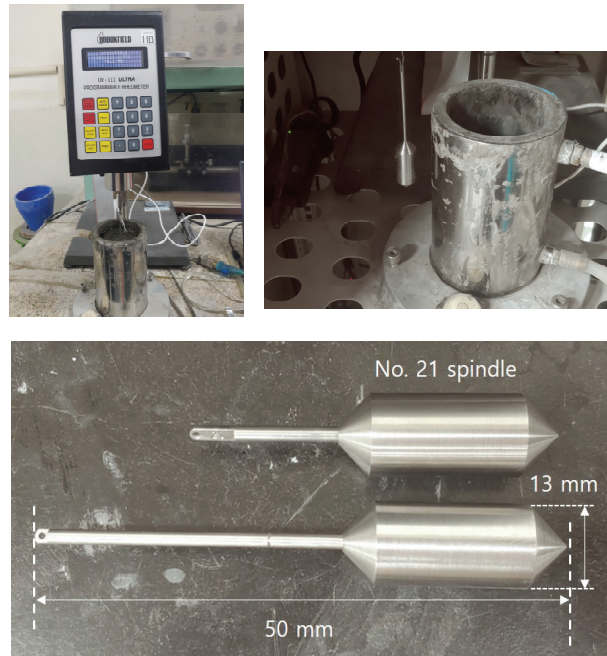


Fig. 1. Rheology test setup for cement paste samples

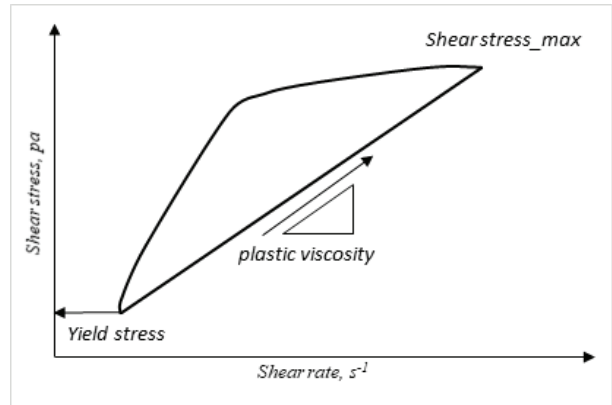


Fig. 2. Typical example of up-down curve obtained from cement paste with multi-walled carbon nanotube

승시킬 때 까지 torque 값을 측정하여 상승곡선의 거동을 측정하였다. 이후 최대 55rpm에서 5rpm씩 감소시키면서 최종적으로 0rpm가 될 때까지 torque 값을 측정하여 하강곡선에서의 거동 또한 측정하였다. 상승곡선의 데이터는 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 전형적인 shear thinning 거동을 나타냈으며, 이러한 이유로 시멘트 페이스트의 소성점도 및 소성항복응력은 하강곡선 중 선형의 구간의 데이터를 활용하여 산정하였다.

각 rpm에서 측정된 torque를 기준으로 spindle의 geometric dimension과 용기의 형상 및 크기에 의해 주어진 관계식을 이용하면 전단응력-전단변형을 곡선으로 표현할 수 있다. 이 중 선형구

간의 데이터에 대하여, Bingham 모델의 관계식을 이용하면, 탄소 나노튜브를 혼입한 시멘트 페이스트의 소성점도 및 소성항복응력을 도출할 수 있다.

2.4 압축강도

다중벽 탄소나노튜브를 혼입한 시멘트 페이스트의 압축강도를 확인하기 위하여, 50mm × 50mm × 50mm 큐브 몰드에 시멘트 페이스트를 타설하였다. 타설이 완료된 후, 1일간 실험실 환경에서 기건 양생을 진행하였으며, 경화가 완료된 후 탈형된 모르타르 시험체를 23±2°C의 물에 침지시켜 28일 재령이 될 때 까지 수중양생을 진행하였다.

압축강도 측정은 재령 28일에 ASTM C 109 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens” 규정에 따라, 전동식 압축강도 시험기(Form Test, Germany, ALPHA 3-3000 S(3000kN))를 사용하여 진행되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레올로지 특성

CNT를 혼입한 시멘트 페이스트의 전단응력 및 전단변형률간의 관계를 Fig. 3, 4, 및 5에 나타내었다. Fig. 3에 나타난 물시멘트비 0.40인 시멘트 페이스트의 경우 상승곡선은 낮은 변형률 영역에서 높은 점도를 보이고, 높은 전단변형률 영역으로 접어들수록 점도가 감소하는 전형적인 shear thinning 거동을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 3의 데이터에 따르면, 탄소나노튜브의 혼입량이 증가할수록 상승곡선 및 하강곡선에서의 전단응력 값이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 소성점도로 해석될 수 있는 상승곡선 및 하강곡선의 기울기 또한 탄소나노튜브의 혼입량 증가로 인해 점차 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 봉상형의 나노튜브가 시멘트 페이스트의 유변학적 물성에 상당한 영향을 미치는 것을 의미한다. 봉상형의 물질이 시멘트 페이스트와 같은 재료에 혼입되게 되면, 입자 사이에 위치하여, 입자간의 이동이나 미끄러짐 등을 제어할 수 있고, 이로 인해 시멘트 페이스트의 점도 및 항복응력을 감소시키게 된다.

Fig. 4에 나타난 물시멘트비 0.30인 시멘트 페이스트의 경우는 물시멘트비 0.40인 시멘트 페이스트보다 상대적으로 높은 전단응력의 영역대에서 상승 및 하강곡선이 형성됨을 확인할 수 있다.

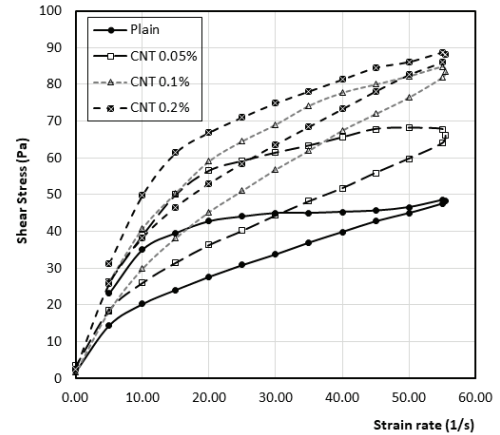


Fig. 3. Shear stress vs. shear strain rate relationship of w/c 0.40 cement paste with and without multi-walled carbon nanotube

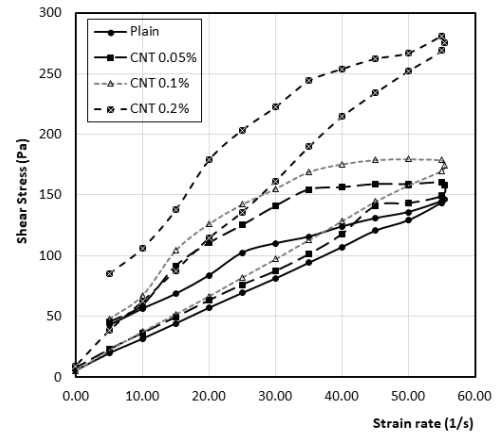


Fig. 4. Shear stress vs. shear strain relationship of w/c 0.30 cement paste with and without multi-walled carbon nanotube

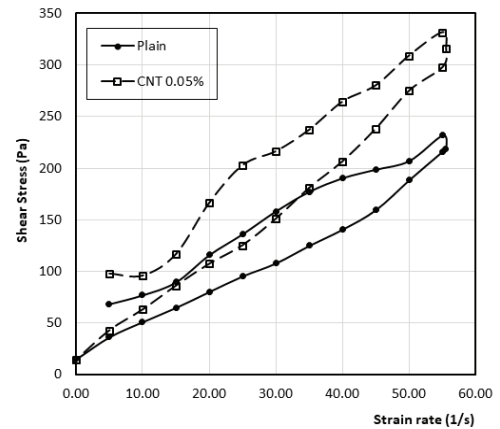


Fig. 5. Shear stress vs. shear strain relationship of w/c 0.25 cement paste with and without multi-walled carbon nanotube

이는 물시멘트비 감소에 의한 영향으로 볼 수 있다. 또한 물시멘트비 0.40인 시멘트 페이스트와 마찬가지로 탄소나노튜브의 혼입률이 증가할수록 상승곡선 및 하강곡선에서의 전단응력 값이 상승하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에 나타난 물시멘트비 0.25인 시멘트 페이스트의 경우는 고성능감수제를 활용하지 않아 탄소나노튜브의 함유량이 시멘트량 대비 0.05% 수준까지만 혼입이 가능하였다. 물시멘트비 0.20인 경우에도 탄소나노튜브를 혼입하면 재료의 유동성을 저하시킬 수 있다.

Fig. 3~5의 데이터에 따르면, 상대적으로 상승곡선에 비해 하강곡선에서 선형의 구간이 명확하게 확인되는 것을 알 수 있다. 이때 하강곡선의 데이터를 이용하여 시멘트 페이스트의 데이터에 대해 선형분석을 진행하면, 직접적으로 Bingham 모델에서 제시하는 소성점도 및 소성항복응력을 도출할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 20~40 (1/s)의 전단변형률 구간의 데이터를 활용하여 소성항복응력 및 소성점도를 도출하였다.

시멘트 페이스트의 전단응력/전단변형률 곡선에서, 20~40 (1/s) 영역의 하강곡선 데이터를 활용하여 선형회귀분석을 진행하고, 이를 통해 도출한 소성점도 및 소성항복응력을 Fig. 6 및 7에 나타내었다. Fig. 6에 나타난 소성점도는 물시멘트비가 낮을수록 높은 값을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 물시멘트비의 변화와 관계없이, 탄소나노튜브의 혼입률이 증가할수록 소성점도가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 효과는 물시멘트비가 낮을수록 크게 나타나며, 물시멘트비가 상대적으로 높은 w/c 0.40인 경우에는 탄소나노튜브의 혼입량 증가로 인한 차이가 상대적으로 적게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7에 나타난 소성항복응력의 경우 또한 마찬가지로, 물시멘트비가 낮은 경우에 높은 항복응력값을 보였으며, 물시멘트비와 관계없이 시멘트 페이스트 내부에 CNT의 혼입률이 증가할수록 소성항복응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 소성점도에서의 경우와 유사하게 물시멘트비가 낮을수록 탄소나노튜브의 혼입에 의한 소성항복응력의 증가현상이 적게 나타났다.

본 연구에서는 탄소나노튜브를 혼입한 시멘트 페이스트의 경우 소성점도 및 항복응력이 증가하는 것으로 나타났다. Leonavičius et al.(2018)의 연구에 따르면, w/c 0.3의 시멘트 페이스트에서 탄소나노튜브의 혼입률이 낮은 경우(0.00005%~0.005%)에는 오히려 시멘트 페이스트의 점도를 떨어뜨리며, 다량의 CNT가 함유된 경우(0.05%~0.5%)에만 시멘트 페이스트의 점도를 상승시키는 것으로 보고되었다. 본 연구에서 사용된 탄소나노튜브의 함유량은 (0.05%~0.2%)는 높은 경우에 속하며, 따라서 본 연구에서 관찰된

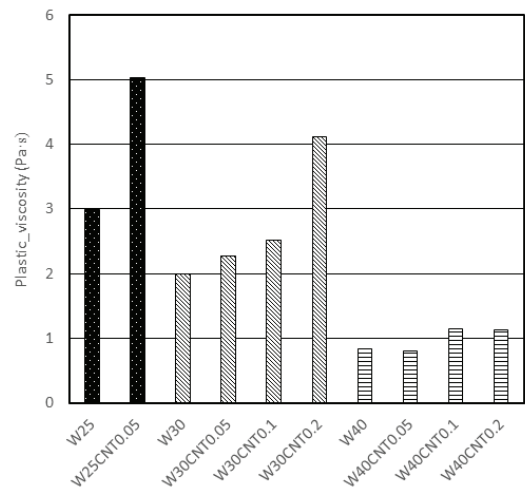


Fig. 6. Plastic viscosity of cement paste incorporating multi-walled carbon nanotube

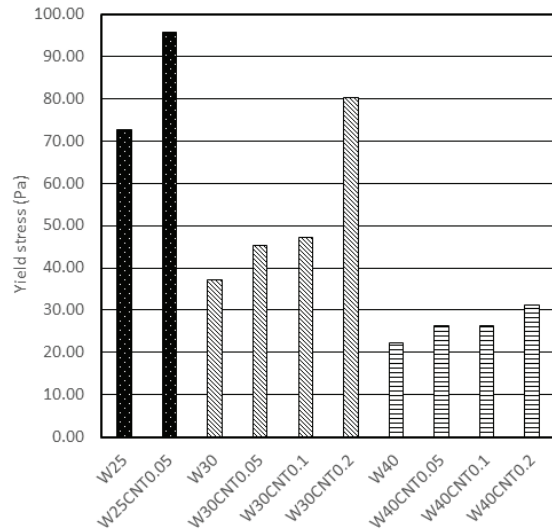


Fig. 7. Yield stress of cement paste incorporating multi-walled carbon nanotube

결과는 Leonavičius et al.(2018)의 연구결과와 매우 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

추가적으로, Leonavičius et al.(2018)의 연구결과에서는 탄소나노튜브의 함유량이 적은 경우에는 유변학적 물성에 미치는 영향이 상대적으로 적은 이유에 대해, 해당 연구에서는 탄소나노튜브의 분산을 위해 별도의 분산제를 사용하지 않은 관계로, 탄소나노튜브 펠렛의 제조에 활용된 carboxymethyl cellulose에 의한 영향으로 추정하였는데, 본 연구에 사용된 탄소나노튜브 수용액의 경우 PVP라는 분산제를 포함하고 있어, 이에 의한 영향(미끄러짐 등)도 복합적으로 발생할 수 있음에 유의해야 한다.

고농도의 탄소나노튜브가 혼입되면, 물시멘트비가 낮은 경우에는 시멘트 입자 사이의 공간이 적어, 나노튜브가 입자 사이에 위치하는 경우 나노튜브에 의한 유동성 저하가 상대적으로 크게 발생하는 것으로 판단되며, 물시멘트비가 높은 경우 상대적으로 입자간 간격이 넓어 봉상형의 탄소나노튜브에 의한 입자간 bridging 효과가 극대화되지 못하고, 나노튜브의 분산 등에 활용된 분산제의 영향을 복합적으로 받게 되어, 상대적으로 유동성 저하가 적게 발생한 것으로 판단된다. 탄소나노튜브의 농도가 줄어들게 되면, 나노튜브의 형상에 의한 유연학적 물성 변화 보다는 나노튜브의 분산에 사용된 분산제 등에 의한 영향을 더욱 크게 받을 수 있어, 향후 CNT 수용액을 활용할 때, CNT의 분산에 활용된 분산제에 의한 유연학적 물성 변화에 대한 대비가 되어 있어야 할 것으로 사료된다.

3.2 압축강도

CNT 수용액을 혼입한 시멘트 페이스트의 28일 재령 압축강도는 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 따르면, CNT함유량이 시멘트 중량대비 0.05%인 경우(W25-CNT-0.05, W30-CNT-0.05, 및 W40-CNT-0.05) CNT를 혼입하지 않은 플레인 시멘트 페이스트에 비해 낮은 압축강도값을 보였다. 물시멘트비 0.25인 경우 탄소나노튜브 혼입량이 시멘트 중량대비 0.1% 이상을 혼입하는 경우 고성능 감수제 없이 시편제작이 불가능하여, 탄소나노튜브의 혼입량 증가에 따른 강도변화를 명확하게 추적할 수 없었으나, 물시멘트비 0.30 및 0.40인 경우 모두 탄소나노튜브의 혼입량이 0.1%로 상승하는 경우 압축강도가 상승하기 시작하는 것으로 나타났다.

특히 물시멘트비 0.30인 경우에는 시멘트 중량대비 탄소나노튜브가 0.1% 함유된 경우에 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 물시멘트비 0.40인 경우 탄소나노튜브 함유량이 0.2%인 경우에 최대강도를 보이는 것으로 나타났다. 물시멘트비 0.30 및 0.40인 경우를 비교해 볼 때, 탄소나노튜브에 의한 미세구조 보강 효과는 물시멘트비가 낮은 경우 더욱 크게 나타나는 것으로 나타났다. 물시멘트비 0.25의 시멘트 페이스트의 강도가 물시멘트비 0.3인 시멘트 페이스트의 강도보다 낮은 이유는 다짐불량 등에 의한 공극량 증가 등의 요인에 의한 것으로 사료된다.

Chan and Andrawes(2010)의 연구결과에 따르면, CNT 순도 90%인 경우, 물시멘트비 0.4에서 시멘트 중량대비 CNT 혼입률이 0.1%일 때 강도가 최대값을 보이는 것으로 나타났다. Birenboim et al.(2019)의 연구결과에서도 마찬가지로 CNT의 혼입량이 시멘트 중량대비 0.1wt%에서 압축강도의 최대치를 보이는 것으로 보

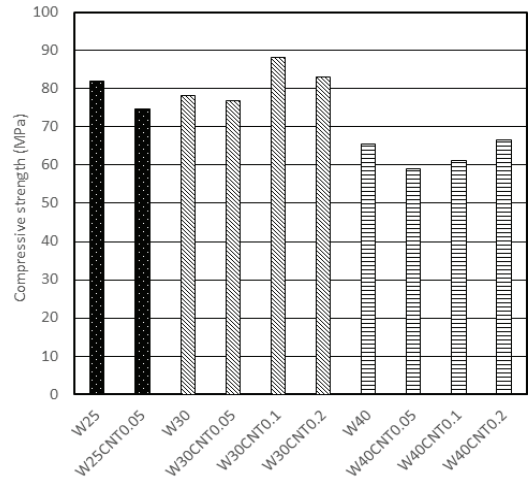


Fig. 8. The 28 day compressive strength of cement paste incorporating multi-walled carbon nanotube

고되었다. Xu et al.(2015)의 연구논문에서도 탄소나노튜브를 시멘트 중량대비 0.1wt% 치환시 압축강도가 약 20% 상승. 휨강도는 0.2wt% 수준까지 상승하여도 증가하는 것으로 보고되었다. Danoglidis et al.(2016)의 연구 또한 탄소나노튜브를 시멘트 중량대비 0.1wt%에서 최대 휨강도를 보여준다고 보고하였으며, Kim et al.(2014)의 연구결과는 시멘트 중량대비 0.15%에서 최대의 강도효율을 보이는 것으로 보고되었다. 본 연구에서 관찰된 압축강도 경향도 기존의 연구결과와 유사하게 탄소나노튜브 혼입량 0.1~0.2wt% 영역에서 최대값을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 사실들을 종합해서 고려하면 CNT의 혼입량이 시멘트 중량대비 0.1~0.2% 일 때 역학적 거동이 최대화되는 시점에 도달하며, 그 이상의 혼입률을 가지면, 나노튜브간의 엉킴이 발생하여 오히려 역학적 성능의 감소를 동반하는 것으로 추측된다.

4. 결론

본 논문에서는 다중벽 탄소나노튜브의 혼입이 시멘트 페이스트의 유연학적 물성 및 압축강도에 미치는 영향에 대한 실험을 진행하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탄소나노튜브의 함유량이 시멘트 중량대비 0.05wt% 이상인 경우, 탄소나노튜브의 함유량이 증가할수록 소성점도 및 소성항복응력이 증가하였다.
- 2) 탄소나노튜브 혼입량 증가에 따른 소성점도 및 소성항복응력의 증가는 물시멘트비가 낮을수록 더욱 큰 것으로 나타났다.

3) 탄소나노튜브는 시멘트 페이스트의 압축강도 상승에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 물시멘트비 0.30인 경우 혼입량 0.1%에서, 물시멘트비 0.40인 경우 혼입량 0.2%인 경우 최대강도를 보였다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20NANO-B156177-01).

References

- American Society for Testing and Materials C 109. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50mm] 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.
- Bakshi, S.R., Lahiri, D., Agarwal, A. (2013). Carbon nanotube reinforced metal matrix composites – a review, *International Materials Reviews*, **55(1)**, 41–64.
- Birenboim, M., Nadiv, R., Alatawna, A., Buzaglo, M., Schahar, G., Lee, J., Kim, G., Peled, A., Regev, O. (2019). Reinforcement and workability aspects of graphene-oxide-reinforced cement nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, **161**, 68–76.
- Chan, L.Y., Andrawes, B. (2010). Finite element analysis of carbon nanotube/cement composite with degraded bond strength, *Computational Materials Science*, **47(4)**, 994–1004.
- Che, G., Lakshimi, B.B., Martin, C.R., Fisher, E.R. (1999). Metal-nanocluster-filled carbon nanotubes: catalytic properties and possible applications in electrochemical energy storage and production, *American Chemical Society*, **15(3)**, 750–758.
- Danoglidis, P.A., Konsta-Gdoutos, M.S., Gdoutos, E.E., Shah, S.P. (2016). Strength, energy absorption capability and self-sensing properties of multifunctional carbon nanotube reinforced mortars, *Construction and Building Materials*, **120**, 265–274.
- Dillon, A.C., Jones, K.M., Bekkedahl, T.A., Kiang, C.H., Bethune, D.S., Heben, M.J. (1997). Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes, *Nature*, **386**, 377–379.
- Hewitt, C.A., Kaiser, A.B., Roth, S., Craps, M., Czerw, R., Carrol, D.L. (2012). Multilayered carbon nanotube/polymer composite based thermoelectric fabrics, *Nano Letters*, **12(3)**, 1307–1310.
- Hwang, J.Y., Lim, B.K., Tiley, J., Banerjee, R., Hong, S.H. (2013). Interface analysis of ultra-high strength carbon nanotube/nickel composites processed by molecular level mixing, *Carbon*, **57**, 282–287.
- Iijima, S. (1991). Helical microtubes of graphitic carbon, *Nature*, **354(6348)**, 56–58.
- Kwon, H., Park, D.H., Silvain, J.F., Kawasaki, A. (2010). Investigation of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite materials, *Composites Science and Technology*, **70(3)**, 546–550.
- Leonavičius, D., Pundienė, I., Girska, G., Pranckevičienė, J., Kligys, M., Kairytė, A. (2018). The effect of multi-walled carbon nanotubes on the rheological properties and hydration process of cement pastes, *Construction and Building Materials*, **189**, 947–954.
- Li, G.Y., Wang, P.M., Zhao, X. (2007). Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*, **29(5)**, 377–382.
- Lim, M.J., Lee, H.K., Nam, I.W., Kim, H.K. (2007). Carbon nanotube/cement composites for crack monitoring of concrete structures, *Composite Structures*, **180**, 741–750.
- Lu, Z., Foroughi, J., Wang, C., Long, H., Wallace, G.G. (2018). Superelastic hybrid CNT/graphene fibers for wearable energy storage, *Advanced Energy Materials*, **8**, 1702047.
- Overney, G., Zhong, W., Tomanek, D. (1993). Structural rigidity and low frequency vibrational modes of long carbon tubules, *Molecules and Clusters*, **27(1)**, 93–96.
- Park, M., Kim, H., Youngblood, J.P. (2008). Strain-dependent electrical resistance of multi-walled carbon nanotube/polymer composite films, *Nanotechnology*, **19(5)**, 055705.
- Shi, Y.S., Zhu, C.C., Qikun, W., Xin, L. (2003). Large area screen-printing cathode of CNT for FED, *Diamond and Related Materials*, **12(9)**, 1149–1452.
- Song, Y., Chen, H., Su, Z., Chen, X., Miao, L., Zhang, J., Cheng, X., Zhang, H. (2017). Highly compressible integrated supercapacitor-piezoresistance-sensor system with CNT-PDMS sponge for health monitoring, *Small*, **13**, 1702091.

Srivastava, S., Sharma, S.S., Agrawal, S., Kumar, S., Singh, M., Vijay, Y.K. (2010). Study of chemiresistor type CNT doped polyaniline gas sensor, *Synthetic Metals*, **160(5-6)**, 529-534.

Wang, J., Dia, J., Yarlagadda, T. (2005). Carbon nanotube-conducting-polymer composite nanowires, *langmiur*, **21(1)**, 9-12.

Xu, D., Li, B., Wei, C., He, Y.B., Du, H., Chu, X., Qin, X., Yang,

Q.H., Kang, F. (2014). Preparation and characterization of MnO_2 /acid-treated CNT nanocomposites for energy storage with zinc ions, *Electrochimica Acta*, **133**, 254-261.

Xu, S., Liu, J., Li, Q. (2015). Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste, *Construction and Building Materials*, **76**, 16-23.

다중벽 탄소나노튜브가 시멘트 페이스트의 유변학적 물성 및 압축강도에 미치는 영향

탄소나노튜브는 뛰어난 역학적 성능 및 기능성으로 다양한 분야에서 활용되고 있는 나노소재이다. 탄소나노튜브를 건설재료 분야에 활용하는 연구는 현재의 화두 중 하나로, 예전에 비해 점차 많은 연구가 진행되고 있으나, 탄소나노튜브의 혼입률이 시멘트 페이스트의 압축강도 및 유변학적 물성에 미치는 영향을 검증한 문헌은 상대적으로 부족한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Polyvinyl Pyrrolidone을 사용하여 수용액 분산된 다중벽 탄소나노튜브를 이용하여 시멘트 페이스트를 제조하고, 이의 유변학적 물성 및 압축강도 특성을 확인하고자 하였다. 본 연구의 결과에 따르면, 탄소나노튜브의 혼입률이 증가할수록 소성점도 및 소성항복응력의 증가가 발생하였으며, 물시멘트비가 낮은 경우에 이러한 경향이 더욱 뚜렷하게 드러나는 것이 확인되었다. 탄소나노튜브 혼입 시멘트 페이스트의 압축강도는 물시멘트비가 0.30인 경우 탄소나노튜브 혼입률 0.1wt%에서, 물시멘트비가 0.40인 경우에는 혼입률 0.2wt%에서 최대가 되는 것으로 나타났다.