

나노 섬유를 혼합한 시멘트 페이스트의 미세구조와 강도에 대한 연구

응유엔 트리* · 김정중**

Nguyen, Tri N.M*, Kim, Jung Joong**

A Study about the Strength and Microstructure of Hardened Cement Pastes Including Nanofibers

ABSTRACT

In this study, the effect of nanofibers in cement pastes on the compressive and tensile strength of hardened cement pastes was studied. Two types of nanofibers, nylon 66 nanofibers and carbon nanotube-nylon 66 hybrid nanofibers, were manufactured by electrospinning methodology and mixed in cement powder respectively. The specimens for experiments were prepared by water to cement ratio of 0.5 and cured in water for 28 days. The effect of nanofibers on the increase of the compressive and tensile strength were confirmed by the experimental results. The well-linking effect of nanofibers in the microstructure of the hardened cement pastes has been found by scanning electron microscope (SEM) analysis and well-explained for the increase in mechanical strength. Besides, field emission transmission electron microscope (FE-TEM) analysis and thermal gravimetric analysis (TGA) have also been conducted to analyze the properties of nanofibers as well as the microstructure of the hardened modified cement pastes.

Key words : Nanofibers, Microstructure, Cement, Tensile strength, Compressive strength

초 록

본 연구에서는 시멘트 페이스트에 혼합된 나노 섬유가 경화된 시멘트 페이스트의 압축강도와 인장강도에 미치는 영향을 연구하였다. 2종류의 나노 섬유를 사용하였다. 나일론 66 나노 섬유와 카본 나노 튜브로 보강된 나일론 66 나노 섬유를 전기방사로 제작하여 시멘트 파우더에 각각 혼합하였다. 물-시멘트비 0.5의 시멘트 페이스트 시편을 제작하고 28일간 양생하였다. 실험 결과, 나노섬유의 혼합이 시멘트 페이스트 시편의 압축강도와 인장강도를 증가시킴을 확인하였다. 나노 섬유의 보강 메커니즘을 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM) 분석, 전계방사 투과전자 현미경(FE-TEM) 분석 및 열 중량 분석(TGA)을 수행하여 나노섬유를 포함한 시멘트 페이스트의 미세 구조를 분석하였다.

검색어 : 나노 섬유, 미세구조, 시멘트, 인장강도, 압축강도

1. 서론

섬유를 사용하여 시멘트의 강도를 증가시키려는 많은 연구가 수행되었다(Wang et al., 2016; Flores et al., 2017; Kochov et al., 2020). 최근 나노 크기의 섬유를 이용하여 시멘트의 강도를 높이는 연구도 수행되었다. Saleh et al.(2019)은 철 슬래그와 티타늄산 나노 섬유가 시멘트에 미치는 영향에 대해서 연구했다. Brown and Sanchez(2018)는 황산염 환경의 시멘트 페이스트에 있어서 탄소 나노 섬유가 시멘트 페이스트의 내구성 증진에 효과가 있음을 보였다. 탄소나노튜브(Carbon nanotubes, CNT)가 시멘트질 재료의 공학적 성능에 미치는 영향도 연구되었다(Rocha et al., 2019).

* 경남대학교 토목공학과 박사과정 (Kyungnam University · nguyennhatminhtri@gmail.com)

** 중신회원 · 교신저자 · 경남대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyungnam University · jungkim@kyungnam.ac.kr)

Received November 19, 2019/ revised December 2, 2019/ accepted December 12, 2019

일반적으로 CNT의 인장 강도와 탄성 변형은 강재의 각각 100배, 60배 이상이다(Treacy et al., 1996; Walters et al., 1999; Yu et al., 2000). 이러한 특성에 의해 CNT는 시멘트 기반 재료뿐만 아니라 다른 재료나 나노섬유에도 보강재료로 널리 사용된다(Naidu et al., 2014; Jafari, 2018; Han et al., 2019). CNT를 시멘트질 재료에 혼합 할 때의 문제는 CNT 응집체에 강한 Van der Waals 힘으로 인해 CNT의 분산이 어렵다. 수용액에 CNT를 분산시킬 때 초음파 처리와 계면 활성제의 효과를 나타내는 여러 연구가 있다(Mohsen et al., 2017).

본 연구에서는 CNT를 나일론 나노섬유에 혼합하여 합성 나노섬유를 만들고 이를 시멘트 페이스트에 섞어 시편을 제작하였다. 나일론 66 (Suzuki et al., 1998; Zussman et al., 2006) 및 CNT를 포함한 나일론 66 나노 섬유는 전기방사 방법으로 제작되었다(Thenmozhi et al., 2017; Xue et al., 2017; Arinstein, 2018). 생산된 나노섬유는 시멘트에 직접 혼합하는 방법을 사용하였다(Nguyen et al., 2020). 나노섬유를 포함한 시멘트 페이스트의 인장강도와 압축강도를 측정하였다. 또한, 나노섬유를 포함한 시멘트 페이스트의 미세구조를 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM), 전계 방출 투과 전자 현미경(field emission-transmission electron microscope, FE-TEM) 및 열중량분석(thermal gravimetric analysis, TGA)에 의해 분석하였다.

2. 재료 및 샘플 준비

2.1 재료

본 연구에서 사용된 시멘트의 구성성분과 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 탄소 나노 튜브 및 Nylon 66를 클로로포름과 포름산 용액에 용해시켜 전기 방사를 위한 폴리머 용액으로 사용한다.

Table 1. Chemical Composition and Physical Properties of Cement

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Ig. loss	Specific surface are (cm ² /g)	Compressive strength 28-day (MPa)
61.33	6.40	21.01	2.30	3.02	3.12	1.1	2800	42.5

Table 2. Mixture Designs of Samples (by % mass)

Samples	Binder (B)			Water/B
	OPC	N66	SWCNTs	
Control paste	100	0	0	0.5
N66 MCP	99.5	0.5	0	0.5
CNT-N66 MCP	99.5	0.485	0.015	0.5

“MCP” stands for “modified cement paste”

2.2 샘플 준비

Nylon 66 (N66) 나노 섬유 및 CNT-Nylon 66 나노 섬유는 전기방사 공정에 의해 제작하였다. 포름산과 클로로포름을 부피 비 4:1로 병합하면 질량비 9:1을 얻을 수 있다. N66 펠렛은 개미산 용매에서 완전히 용해할 수 있다(Zussman et al., 2006; Navarro-Pardo et al., 2013; An et al., 2017). 본 연구에서는 거친 표면의 나노 섬유를 제작하기 위하여 휘발성 용매를 첨가하였다(Katsogiannis et al., 2015). CNT-N66 폴리머 용액을 제조할 경우, CNT를 용매 중에 분산시키기 위해 초음파 처리 공정을 수행한 다음, N66 펠렛을 첨가하고 용액으로 교반 하였다.

전기방사 공정은 12 kV의 고전압에서 수행되었고 12 ml 주사기와 스테인리스 바늘을 사용하였다, 시멘트 분말 및 나노 섬유를 함유하는 복합 바인더를 얻기 위해서 방사된 상태의 나노 섬유는 Fig. 1에 보인 콜렉터에 의한 전기 방사 시스템을 이용하여 직접 시멘트에 혼합하였다(Nguyen et al., 2020).

경화된 시멘트 페이스트의 강도에 미치는 나노섬유의 영향을

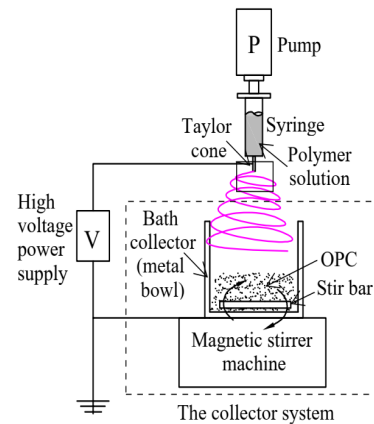


Fig. 1. Schematic of Electrospinning System with the Improved Collector

조사하기 위해 인장강도 시험 및 압축강도 시험을 하였다. 이 방법에서 시멘트 페이스트 경화 시료는 물/결합제 비 0.5로 제조하였다. 모든 경화 시멘트 페이스트 샘플의 혼합 설계를 Table 2에 나타냈다. 모든 샘플은 28일 경화 후에 시험했으며 ASTM C307-03(2012) 및 ASTM C109/C109M-16a에 지정된 샘플의 크기를 따랐다.

3. 실험 방법

인장강도 시험은 ASTM C307-03(2012)에 따라 5 kN 용량의 모르타르 인장 강도 시험 기구를 사용하였고, 압축강도 시험은 ASTM C109/C109M-16a(2016)에 따라 1,000 kN의 용량을 가진 만능 시험기를 사용하여 실시하였다. 28일 수중 경화 후 각각 3개의 시편을 준비하였다.

SEM 분석은 3 내지 5 kV의 가속 전압 및 7.1 내지 7.9 mm의 작동 거리에서 수행되었다. 나노 섬유를 포함하는 페이스트뿐만 아니라 나노 섬유의 형태학적 특성을 조사하였다. FE-TEM은 나일론 섬유 내에 CNT의 존재를 확인하기 위해 300 kV의 가속 전압으로 분석 하였다.

나노 섬유의 분해온도 및 시멘트 경화 페이스트 중의 나노 섬유의 존재는 TGA로 확인 하였다. TGA 과정은 주변 온도에서 1000°C의 가열 범위에서 하였고, 질소 대기 하에서는 유량 및 가열 속도는 각각 100 ml/min 및 10°C/min로 하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 기계적 특성

일반 시멘트 페이스트와 비교하여 나노 섬유에 의해 개질된 경화 시멘트 페이스트의 압축강도와 인장강도를 각각 Figs. 2 and 3에 나타냈다. Table 3에 평균값과 표준편차를 정리하였다. 전반적인 관점에서 나노 섬유를 혼합한 시멘트 페이스트의 압축강도와 인장강도는 증가한 것을 볼 수 있다. Fig. 2는 압축강도 시험의 결과를 나타내고 있으며, N66 및 CNT-N66 나노섬유로 보강된 시멘트 페이스트의 압축강도는 각각 약 8 %, 10 % 증가하였다. Table 3의 결과에서, CNT-N66 나노섬유에 의해 강화된 시멘트 페이스트의 인성(toughness)는 각각 30 %, 49 %로 크게 증가하였다. Fig. 3과 같이, CNT-N66 나노 섬유를 혼합한 시멘트 페이스트

Table 3. Mechanical Strength Results After 28 Days

	Compressive strength (MPa)	Toughness (J/m ³)	Tensile strength (MPa)
Control paste	35.17 (0.725)	62031 (5049.7)	1.14 (0.172)
N66 MCP	39.90 (2.376)	92179 (8229.3)	1.46 (0.348)
SWCNTs-N66 MCP	38.54 (3.077)	80882 (7196.5)	1.63 (0.080)

Table 4. Comparison of the Tensile Strength Results between the Work of Rocha et al.(2019) and the Present Work

CNTs	Rocha et al.' work		Present work
	MWCNTs		SWCNTs
CNTs Proportion (%)	0.05	0.1	0.015
Increase ratio (%)	40	45	43

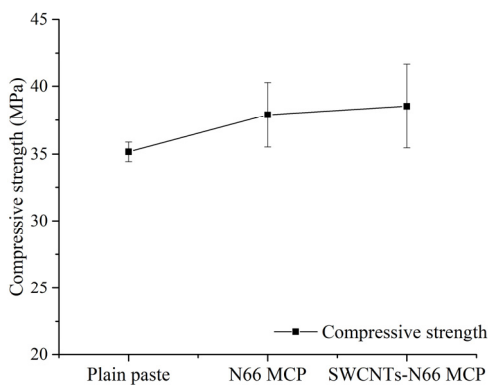


Fig. 2. Compressive Strength Results

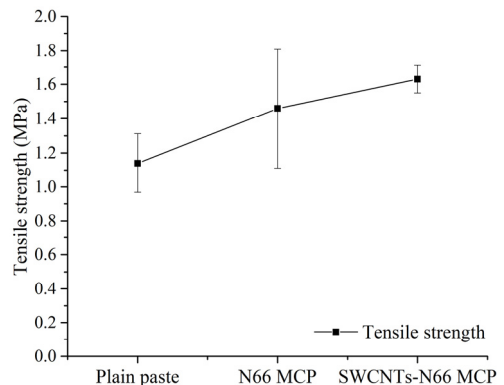


Fig. 3. Tensile Strength Results

의 인장 강도는 43 % 증가한 반면, N66 나노 섬유를 혼합한 시멘트 페이스트의 인장 강도는 28 % 증가하였다. Table 4는 직접 인장 강도 시험에 얻어진 결과를 기초하여 Rocha et al.(2019)에 의해 보고된 결과와 비교하였다. CNT를 0.05 % 및 0.1 % 첨가한 시멘트 페이스트의 인장 강도가 각각 40 % 및 45 % 증가한 기존의 연구에 비하여 본 연구 결과에서는 CNT를 0.015 % 혼합하여 인장 강도를 43 %까지 증가시켰다.

4.2 나노 섬유의 형태적 특징

Fig. 4는 각각 N66 나노 섬유와 CNT-N66 나노 섬유의 미세구조 특징을 보여준다. 전체적인 관점에서 보면 모든 나노 섬유는 그물

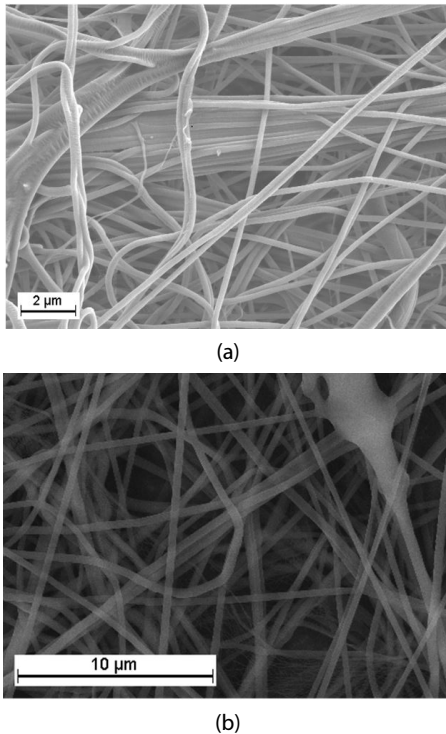


Fig. 4. Morphological Characteristics of Nanofibers, (a) N66 Nanofibers, (b) CNT-N66 Nanofibers

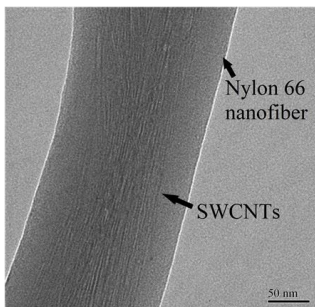
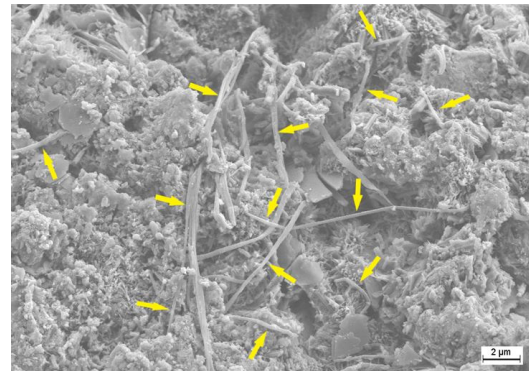


Fig. 5. FE-TEM Images of the Hybrid Nanofibers

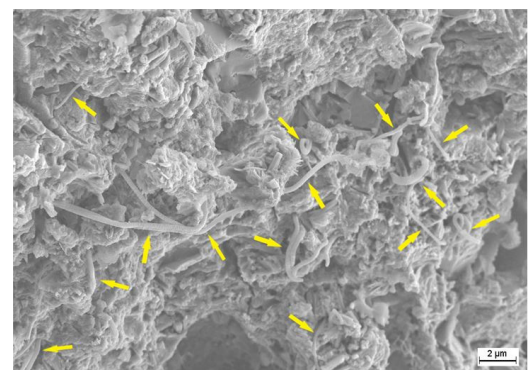
모양으로 나타났다. 나노 섬유의 축을 따라 균일 한 직경을 가지는 나노 섬유를 SEM 이미지에서 관찰 할 수 있다(Fig. 4(b)). 나노 섬유 사이에 간간히 얇은 층과 펠렛이 보인다. 대조적으로 N66 나노 섬유의 SEM영상에서는 거친 표면 나노 섬유뿐만 아니라 나노 섬유 사이에 연결된 층과 펠렛이 안 보인다(Fig. 4(a)). 이러한 현상은 전기방사 과정에서 용매 증 클로로포름의 증발때문인 것으로 알려져 있다(Katsogiannis et al., 2015). N66 나노섬유 및 CNT-N66 나노섬유의 평균 직경은 각각 267 nm 및 264 nm이다. N66-CNT 나노 섬유의 FE-TEM 분석 결과는 Fig. 5에서 볼 수 있다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 직경 약 200 nm의 N66 나노 섬유의 축을 따라 직경 약 1~2 nm의 CNT가 무리로 모여 있다. 이러한 결과는 Baji et al.(2010)이 연구한 결과와 일치한다. CNT의 존재에 의해 나노 섬유의 강도가 높아진다(Treacy et al., 1996; Walters et al., 1999; Yu et al., 2000).

4.3 경화 시멘트 페이스트의 미세 구조 특성

시료의 인장 과단면에서 SEM 촬영한 결과는 Fig. 6에 나타났다. 예상대로, 시멘트 수화물 사이에 200 nm이상의 직경을 가진 나노 섬유가 다수 남아 있었다. 시멘트의 수화 생성물은 그 형태에 따라



(a) The Hardened Cement Paste Containing N66 NFs



(b) The Hardened Cement Paste Containing SWCNTs-N66 NFs

Fig. 6. Microstructure of the Hardened Cement Paste Containing Nanofibers

결정될 수 있다. 수산화칼슘(Calcium Hydroxide, CH)은 밝고 선명하게 나타나며 섬유형태는 칼슘실리케이트수화물(Calcium Silicate Hydrates, CSH)이다. 이들 CSH의 지름은 약 50 nm이다 (Mehta and Monteiro., 2006). 따라서 강화된 시멘트 페이스트의 미세구조에서의 CSH와 첨가된 나노 섬유와의 구별이 용이하다. Figs. 6(a) and 6(b)에 나타내는 SEM의 이미지를 보아, 이러한 나노 섬유는 수화 생성물 사이의 연결과, 시멘트 매트릭스 안에 형성된 기공의 가교 역할을 한다. 또한, 시멘트 수화물 부착에 의해 나노 섬유의 표면은 모두 변형되어 Fig. 4와 같이 나노 섬유의 표면이 원래 형태에 비해 울퉁불퉁하다. 그 결과, 나노 섬유가 시멘트 수화물에 잘 부착되어 있음을 확인하였다. 시멘트 페이스트의 미세 구조에서 표면이 변형된 나노 섬유가 수화 생성물 사이의 연결에 좋은 효과를 나타냈다. 그 결과, 높은 인장 강도가 형성되었다.

4.4 열분석

열분석 결과 N66 나노섬유의 중량 감소의 시작 온도는 300°C에서 결정되며, 410°C에서 끝났다(Kroschwitz, 1998; Liu et al., 2010). CNT-N66 나노 섬유의 중량 감소 시작은 350°C에서 결정되었고 460°C에서 끝났다(Baji et al., 2010). 분해 온도가 500°C이상의 CNT를 첨가함으로써, CNT의 유무에 의한 N66 나노 섬유의 열분석 결과의 범위를 설명할 수 있다(Hsieh et al., 2010). 또한, 나노 섬유의 분해 온도의 증가는 CNT-N66 나노 섬유의 조합을 보여준다. 따라서 CNT 혼합 나노 섬유는 보다 높은 열안정성을 가짐을 알 수 있다.

경화 시멘트 페이스트의 TGA-DTG결과도 기존의 연구와 유사하였다(Foley et al., 2012; Kim et al., 2013). CSH는 145~200°C의 온도 범위가 물의 탈수 범위로 간주된다. CH는 400~500°C의 온도 범위가 물의 탈수 범위로 간주된다. 550~900°C의 온도 범위를 탄산칼슘(CaCO₃)에서 이산화탄소가 분해되어 증발한다고 간주한다. 질소(N₂) 및 이산화 탄소(CO₂) 환경(Taylor, 1997)에서 시멘트 페이스트 내의 임의의 수분은 145°C에서 증발한다. 시멘트 페이스트 중 N66 나노 섬유의 중량 손실은 300~410°C에 간주 될 수 있다. 시멘트 페이스트에서 N66 나노섬유의 비율을 추정하기 위해, 시멘트 페이스트의 TGA 결과와 N66나노 섬유를 함유한 시멘트 페이스트의 TGA 결과를 300°C에서 초기 중량으로 비교 하였다.

시멘트 페이스트 중의 N66 나노섬유의 비율을 고려하면 410°C에서 0.62 %의 중량 차이를 나타냈다. 350~500°C 사이의 중량 감소는 CH 내의 물의 증발과 CNT-N66 나노섬유의 분해로 간주할 수 있다. CNT-N66 나노 섬유를 포함한 시멘트 경화물의 TGA결과와 일반 시멘트 경화물의 TGA결과를 초기 중량 350°C에서 비교하였다. 460°C에서 중량의 차이로 CNT-N66 나노섬유의 비율은

0.55 %로 결정되었다. TGA에 의해 분석된 시멘트 페이스트 중 나노 섬유의 비율은 전기 방식에서 투입된 비율과 유사하게 나타났다.

5. 결론

N66나노 섬유와 CNT-N66 나노 섬유가 시멘트 페이스트의 압축강도, 인장강도, 인성, 미세 구조에 미치는 영향을 연구하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) N66 나노섬유와 CNT-N66 나노섬유를 시멘트 페이스트에 혼합하여 압축강도(각각 8 %, 10 %), 인장 강도(각각 28 % 및 43 %), 인성(각각 49 % 및 30 %)이 증가하였다.
- (2) 시멘트 페이스트의 미세구조에서 수화물(CSH, CH) 간의 연결을 나노섬유가 보강함으로써 인해 인장강도가 증가하였다.
- (3) 시멘트 페이스트의 나노 섬유 비율은 TGA분석을 통해 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2017R1A2B4010594)입니다. 이에 감사드립니다.

본 논문은 2019 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

An, T., Pant, B., Kim, S. Y., Park, M., Park, S. J. and Kim, H. Y. (2017). "Mechanical and optical properties of electrospun nylon-6,6 nanofiber reinforced cyclic butylene terephthalate composites." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 55, pp. 35-39.

Arinstein, A. (2018). *Electrospun Polymer Nanofibers, chapter 1*. USA, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., pp. 1-4.

ASTM C109/C109M-16a (2016), Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

ASTM C307-03 (2012). *Standard test method for tensile strength of chemical-resistant mortar, grouts, and monolithic surfacings*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

Baji, A., Mai, Y. W., Wong, S. C., Abtahi, M. and Du, X. (2010). "Mechanical behavior of self-assembled carbon nanotube reinforced nylon 6,6 fibers." *Composites Science and Technology*, Vol. 70, pp. 1401-1409.

Brown, L. and Sanchez, F. (2018). "Influence of carbon nanofiber clustering in cement pastes exposed to sulfate attack." *Construction*

- and *Building Materials*, Vol. 166, pp. 181-187.
- Flores, Y. C., Cordeiro, G. C., Filho, R. D. T and Tavares, L. M. (2017). "Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica." *Construction and Building Materials*, Vol. 146, pp. 524-530.
- Foley, E. M., Kim, J. J. and Taha, M. M. R. (2012). "Synthesis and nano-mechanical characterization of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) made with 1.5 CaO/SiO₂ mixture." *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, pp. 1225-1232.
- Han, T., Nag, A., Mulkhopadhyay, S. C. and Xu, Y. (2019). "Carbon nanotubes and its gas-sensing applications: A review." *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 291, pp. 107-143.
- Hsieh, Y. C., Chou, Y. C., Lin, C. P., Hsieh, T. F. and Shu, C. M. (2010). "Thermal analysis of multi-walled carbon nanotubes by Kissinger's corrected kinetic equation." *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 10, No. 3, pp. 212-218.
- Jafari, S. (2018). "Engineering applications of carbon nanotubes." *Carbon Nanotube-Reinforced Polymers*, pp. 25-40.
- Katsogiannis, K. A. G., Vladislavljević, G. T. and Georgiadou, S. (2015). "Porous electrospun polycaprolactone (PCL) fibres by phase separation." *European Polymer Journal*, Vol. 69, pp. 284-295.
- Kim, J. J., Foley, E. M. and Taha, M. M. R. (2013). "Nano-mechanical characterization of synthetic calcium-silicate-hydrate (C-S-H) with varying CaO/SiO₂ mixture ratios." *Cement & Concrete Composites*, Vol. 36, pp. 65-70.
- Kochov, K., Gauvin, F., Schollbach, K. and Brouwers, H. J. H. (2020). "Using alternative waste coir fibres as a reinforcement in cement-fibre composites." *Construction and Building Materials*, Vol. 231.
- Kroschwitz, J. I. (1998). *Encyclopedia of polymer science and engineering*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Liu, W., Zhang, S., Chen, X., Yu, L., Zhu, X. and Feng, Q. (2010). "Thermal behavior and fire performance of nylon-6,6 fabric modified with acrylamide by photografting." *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 95, No. 9, pp. 1842-1848.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: micro-structure, properties, and materials - Chapter 6. United States of America*, The McGraw-Hill Companies, Inc: 203-252, New York, NY.
- Mohsen, M. O., Taha, R., Taqa, A. A. and Shaat, A. (2017). "Optimum carbon nanotubes' content for improving flexural and compressive strength of cement paste." *Construction and Building Materials*, Vol. 150, pp. 395-403.
- Naidu, P. K., Pulagara, N. V. and Dondapati, R. S. (2014). "Carbon nanotubes in engineering applications: A review." *Progress in Nanotechnology and Nanomaterials*, Vol. 3, No. 4, pp. 79-82.
- Navarro-Pardo, F., Martínez-Barrera, G., Martínez-Hernández, A. L., Castaño, V. M., Rivera-Armenta, J. L., Medellín-Rodríguez, F. and Velasco-Santos, C. (2013). "Effects on the thermo-mechanical and crystallinity properties of nylon 6,6 electrospun fibres reinforced with one dimensional (1D) and two dimensional (2D) carbon." *Materials*, Vol. 6, No. 8, pp. 3494-3513.
- Nguyen, T. N. M., Moon, J. and Kim, J. J. (2020). "Microstructure and mechanical properties of hardened cement paste including Nylon 66 nanofibers." *Construction and Building Materials*, Vol. 23.
- Rocha, V. V., Ludvig, P., Trindade, A. C. C. and Silva, F. dA. (2019). "The influence of carbon nanotubes on the fracture energy, flexural and tensile behavior of cement based composites." *Construction and Building Materials*, Vol. 209, pp. 1-8.
- Saleh, H. M., El-Sheikh, S. M., Elshereafy, E. E. and Essa, A. K. (2019). "Mechanical and physical characterization of cement reinforced by iron slag and titanate nanofibers to produce advanced containment for radioactive waste." *Construction and Building Materials*, Vol. 200, pp. 135-145.
- Suzuki, A., Chen, Y. and Kunugi, T. (1998). "Application of a continuous zone-drawing method to nylon 66 fibres." *Polymer*, Vol. 39, No. 22, pp. 5335-5341.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry, Chapter 5*. USA, Thomas Telford.
- Thenmozhi, S., Dharmaraj, N., Kadirvelu, K. and Kim, H. Y. (2017). "Electrospun nanofibers: New generation materials for advanced applications." *Materials Science and Engineering B*, Vol. 217, pp. 36-48.
- Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W. and Gibson, J. M. (1996). "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes." *Nature*, Vol. 381, pp. 678-680.
- Walters, D. A., Ericson, L. M., Casavant, M. J., Liu, J., Colbert, D. T., Smith, K. A. and Smalley, R. E. (1999). "Elastic strain of freely suspended single-wall carbon nanotube ropes." *Applied Physics Letters*, Vol. 74, No. 25, pp. 3803-3805.
- Wang, M., Wang, R., Yao, H., Farhan, S., Zheng, S., Wang, Z., Du, C. and Jiang, H. (2016). "Research on the mechanism of polymer latex modified cement." *Construction and Building Materials*, Vol. 111, pp. 710-718.
- Xue, J., Xie, J., Liu, W. and Xia, Y. (2017). "Electrospun nanofibers: New concepts, materials, and applications." *Accounts of Chemical Research*, Vol. 50, No. 8, pp. 1976-1987.
- Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F. and Ruoff, R. S. (2000). "Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load." *Science*, Vol. 287, No. 5453, pp. 637-640.
- Zussman, E., Burman, M., Yarin, A. L., Khalfin, R. and Cohen, Y. (2006). "Tensile deformation of electrospun nylon-6,6 nanofibers." *Journal of Polymer Science, Part B, Polymer Physics*, Vol. 44, No. 10, pp. 1482-1489.