

## 탄소나노튜브 적용 시멘트 페이스트의 역학적 성능 및 미세구조 평가

# Evaluation on the Mechanical Performance and Microstructure of Cement Pastes Using Carbon Nanotube

임채익<sup>1</sup> · 박세호<sup>2</sup> · 김원우<sup>3</sup> · 문재흠<sup>4</sup> · 이승태<sup>5\*</sup>

Chae-Ik Lim<sup>1</sup> · Se-Ho Park<sup>2</sup> · Won-Woo Kim<sup>3</sup> · Jae-Heum Moon<sup>4</sup> · Seung-Tae Lee<sup>5\*</sup>

(Received November 13, 2022 / Revised November 15, 2022 / Accepted November 17, 2022)

In this study, the fluidity, mechanical properties and microstructure of cement pastes with carbon nanotube (CNT) were experimentally investigated. The 6 types of cement paste mixes with different PCE:CNT and w/b had been manufactured, and several tests including flow, compressive strength, absorption and water porosity were performed on cement pastes with or without CNT. Additionally, microstructural observations such as x-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) were carried out to examine hydrates formed in cement paste with CNT. As a result, it was found that the performance of cement pastes with CNT was better compared to that of control cement paste (OPC) due to both of hydration acceleration effect and filling effect. Furthermore, the SEM images clearly showed that CNT can bridge cracks formed in cement matrix. Conclusively, it is believed that the CNT, if mixed appropriately, could be an option as nono-materials to improve performance of concrete structures.

**키워드** : 역학적 성능, 미세구조, 탄소나노튜브, 시멘트 페이스트

**Keywords** : Mechanical performance, Microstructure, Carbon nanotube, Cement paste

## 1. 서론

시멘트 기반 재료(cement based-materials)는 경제적이고, 내구성 및 역학적 성능이 우수한 건설재료로서 오래전부터 토목 및 건축 구조물에 널리 적용되어 오고 있다. 지난 수십년 동안 시멘트 기반 재료의 사용 목적이 구조물의 용도에 맞게 다양화되고, 이러한 목적에 대응하는 시멘트 복합체의 성능도 스마트화, 고성능 및 경제성을 요구하게 됨으로써 다기능성의 복합 건설 신소재 개발과 관련한 많은 연구가 수행되어 오고 있다. 특히 신소재로서 탄소계 나노소재(carbon based-nano materials)들은 높은 탄성, 피로 저항성, 강도, 열전도성, 등방성의 우수한 특징을 포함하고 있으며, 내구성도 우수한 것으로 보고되고 있기 때문에 시멘트 복합체에

폭넓게 적용될 것으로 예상된다. 이러한 탄소계 나노소재들은 나노미터 수준의 미세한 입자로 구성되어 있어 분말형태로 사용하기 어려울 뿐만 아니라, 응집체로 형성되어 있기 때문에 시멘트계 분체와 함께 혼입할 경우 van der waals력으로 인해 분산이 균질하게 되기 어려운 단점이 있다(Parveen et al, 2015; Zou et al, 2015).

탄소계 나노소재 중 역학적 성능 및 균열저항성이 우수한 것으로 보고되고 있는 탄소나노튜브(carbon nanotube, 이하 CNT)에 대해 건설 소재 연구자들의 관심이 집중되고 있으며, 최근 이를 콘크리트의 성능향상을 위한 최적 혼입량 및 분산기법에 대한 연구들이 많이 진행되고 있다(Stephens et al, 2016; Kim et al, 2022). CNT의 성능은 CNT의 구조 특성에 따라 크게 영향을 받게 되며, 일반적으로 단일벽 CNT(single-walled CNT) 및 이중벽

\* Corresponding author E-mail: stlee@kunsan.ac.kr

<sup>1</sup>군산대학교 토목공학과 석사과정 (Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk, 54150, Korea)

<sup>2</sup>군산대학교 토목공학과 연구교수 (Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk, 54150, Korea)

<sup>3</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 전임연구원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

<sup>4</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

<sup>5</sup>군산대학교 토목공학과 교수 (Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk, 54150, Korea)

Copyright © 2022 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

CNT(multi-walled CNT)로 구분할 수 있다(Shi et al. 2019). 또, 건설소재용으로 활용하기 위한 CNT는 나노미터 단위의 아주 작은 입자로 구성되어 있어 분말형태로 적용하는 데 어려움이 있을뿐만 아니라, 시멘트 분체와의 응집성이 과도하게 크기 때문에 시멘트 경화체 내부에서 균질한 분산성을 재현하는데도 문제점이 야기된다. 따라서, CNT 입자간의 강한 van der waals력을 효과적으로 분산시키기 위하여 배합수로 사용될 분산액에서 효과적인 분산에너지를 얻는 것이 가장 필수적인 기술로 인식되고 있다. 특히, 분산제 중 PC계 계면활성제는 carboxyl(COOH<sup>-</sup>)이 CNT의 표면에 흡착되어 hydroxy(OH<sup>-</sup>)가 물과 친화력을 갖게 되기 때문에 수계 분산액 사용에 효과적인 것으로 평가되고 있으며, 이러한 분산 메커니즘을 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다(Vesmawala et al. 2020).

따라서 본 연구에서는 CNT의 혼입에 따른 시멘트 페이스트의 성능평가와 CNT의 분산성을 향상시키는 방법들 중 PC계 계면활성제(PCE)를 활용하여 CNT와 시멘트 매트릭스 사이의 친화력을 부여하는 방법을 통하여 CNT의 분산을 극대화시켰다. 또, PCE의 농도 및 물-결합재비(w/b)를 달리한 시멘트 페이스트를 제작하였으며, 플로우, 강도, 흡수율, 투수공극량을 소정의 재령에서 측정하여 CNT 혼입 배합의 역학적 성능을 실험적으로 고찰하였으며, XRD 및 SEM 분석을 통하여 CNT 배합의 미세구조에 대한 정성적 평가를 수행하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결과는 향후 CNT 적용 콘크리트의 최적설계를 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

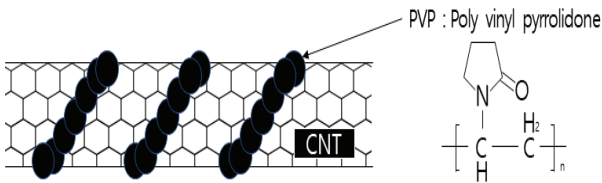


Fig. 1. Structure of PC-based surfactants binding to CNT (Vesmawala et al. 2020)

Table 2. Mix proportion of cement pastes

Mixes	w/b	C (g)	W (g)	CNT aqueous solution (g)	Additional quantity of water (g)	PCE (g)	CNT (g)
OPC-1	0.3	3000	900	-	-	-	-
OPC-2	0.4		1200	-	-	-	-
CNT-1	0.3		-	900	18	9	9
CNT-2	0.4		-	1200	24	12	12
CNT-3	0.3		-	900	13.5	4.5	9
CNT-4	0.4		-	1200	18	6	12

Table 1. Characteristics of CNT used in this study

Purity (%)	Diameter (nm)	Length (nm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
> 97.5	5-7	50-150	2.22

## 2. 실험개요

### 2.1 실험재료

CNT를 혼입한 시멘트 페이스트의 제조 시 사용 시멘트는 KS L 5201 기준을 만족하는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC : ordinary portland cement)를 사용하였다. CNT 수용액은 J사의 고형분을 사용하여 Polycarboxylate(이하 PCE)로 제조하였으며, PCE:CNT=1:1 및 PCE:CNT=0.5:1의 비율로 섞어 사용하였다. 이때 사용된 CNT의 직경은 5~7nm 정도의 다중벽 CNT를 사용하였다. 본 연구에 사용된 CNT의 특성은 Table 1과 같다.

### 2.2 배합

본 연구에서는 Table 2에서와 같이 분산제 농도별로 시멘트 페이스트 배합을 설정하였으며, w/b는 0.3 및 0.4의 두 종류로 분류하였다. 또, CNT 수용액(CNT+PCE)의 농도를 배합수 대비 1%로 고정하여 사용하였다. CNT를 혼입한 배합에서는 분산제인 PCE 양과 CNT 양의 비를 1:1 및 0.5:1로 분류하여 분산제 양에 따라 배합을 분류하였다. 시멘트 페이스트 배합 시 사용되는 CNT 수용액 내 수량을 배합수에서 제외시킨 뒤 w/b를 유지하였다. 그 후 CNT 수용액에 수량을 추가하여 충분히 섞은 뒤 투입하였다.

### 2.3 실험방법

#### 2.3.1 플로우 실험

시멘트 페이스트의 플로우 실험은 플로우 테이블을 이용하였으며 KS L 5111에 준하여 실시하였다. 플로우 값은 타격 전 상태(0회

충격) 및 타격 후 상태(25회 충격)에서 각각 측정하였다.

### 2.3.2 압축강도 실험

시멘트 페이스트의 압축강도 실험은 KS L 5105에 준하여 수행하였으며, 시험체 제작은 50 × 50 × 50 mm의 큐빅몰드를 각각 사용하여 제작하였다. 또한 시멘트 페이스트 제조 후 24h 경과 후 공시체를 탈형하여 20 ± 3 °C 조건에서 수증양생을 실시하였으며, 재령 3, 7 및 28일에서 공시체의 압축강도를 측정하였다.

### 2.3.3 흡수율 실험

흡수율 시험은 ASTM C 1585에 준하여 공시체 표면이 수분이 노출될 때, 시간의 증가와 더불어 수분 흡수에 따른 공시체의 질량 증가를 측정하였으며, 다음 식 (1)로 계산하였다.

$$I = \frac{M_t}{a/d} \quad (1)$$

여기서, I는 흡수율(mm),  $M_t$ 는 시간에 따른 공시체의 질량변화(g), a는 공시체의 노출면적(mm<sup>2</sup>), d는 물의 밀도(g/mm<sup>3</sup>)이다.

### 2.3.4 투수공극량 실험

투수공극량 실험은 ASTM C 642에서 정한 800g을 초과하지 않는 범위에서 공시체 두께 20 mm로 정하여 절단한 후, 투수공극량(water porosity)을 측정하였으며, 다음 식 (2)로 계산하였다.

$$\text{Water porosity (\%)} = \frac{W_{SSD} - W_{DRY}}{W_{SSD} - W_{SUSP}} \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $W_{SSD}$ 는 표면건조포화상태의 중량(g),  $W_{SUSP}$ 는 수중중량(g) 및  $W_{DRY}$ 는 노건조상태의 중량(g)이다.

### 2.3.5 X선 회절(XRD: x-ray diffraction) 분석

시멘트 페이스트를 제작하여 재령 28일 후 수화 및 반응생성물을 확인하기 위하여 XRD 분석을 실시하였다. XRD 분석조건은 Cuk(Ni, filter) 40 kV, 30 mA, 2θ: 5~60° 로 진행하였다.

### 2.3.6 주사전자현미경(SEM: scanning electron microscopy) 분석

시멘트 페이스트의 미세구조를 관찰하기 위하여 SEM 분석을 실시하였다. 시멘트 페이스트의 수화반응을 정지시키기 위하여 대

상 샘플을 아세톤(acetone)용액에 6시간 동안 침지한 후 24시간 동안 진공상태가 되도록 전처리 작업을 실시하였다. SEM holder에 알맞은 크기로 페이스트 시료를 파단시켜 carbon tape를 이용하여 holder에 부착시킨 후 다시 건조시켰다. 그 후 Platinum을 이용하여 페이스트 시료를 코팅한 후 시편 중 CNT의 형상 및 수화물질을 정성적으로 관찰하기 위하여 Ultra High FE-SEM(SU-8220)을 이용하여 미세구조 분석을 실시하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 플로우

6종류 시멘트 페이스트의 플로우 실험결과를 Fig. 2에 나타내었으며, 플로우 값은 타격 전(0회)과 타격 후(25회)로 구분하여 나타냈다. 이 그림에서 알 수 있듯이 시멘트 페이스트의 w/b가 증가함에 따라 플로우 값은 증가하는 경향을 나타내었으며, 분산제 농도에 따라 플로우 값이 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또, 타격 전 시멘트 페이스트의 플로우 값은 w/b가 0.3일 경우 배합에 관계없이 서로 유사하게 나타났으나, 타격 후의 플로우 값은 PCE의 사용량이 많은 CNT-1 배합이 가장 크게 나타나는 것으로 조사되었다. 한편, w/b가 0.4인 배합을 상호 비교해 보면, 타격 전 플로우 값은 OPC-2 및 CNT-2가 유사한 반면, CNT-4가 가장 낮은 값을 나타내었으며, 이러한 경향은 타격 후에도 유사하게 관찰되었다. 이러한 결과가 나타난 이유는 PCE가 시멘트 페이스트의 유동성을 향상시키는 분산제의 역할을 하기 때문에 동일 w/b에서 PCE 양이 많을수록 플로우 값이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 CNT가 혼입된 배합 중 CNT-3 및 CNT-4 배합이 CNT-1 및 CNT-2 배합보다 플로우 값이 작게 측정되는 이유는 PCE 사용량이 적어 CNT가 효과적으로 분산되지 못하여 van der waals력

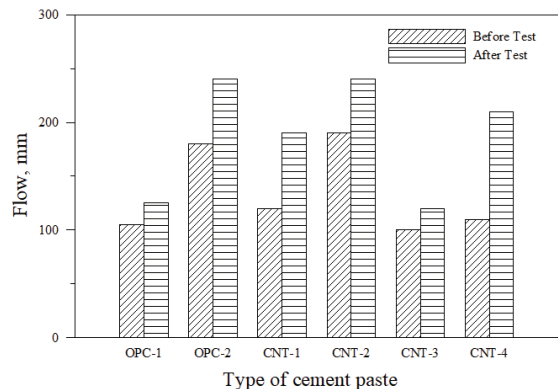


Fig. 2. Flow values of cement pastes

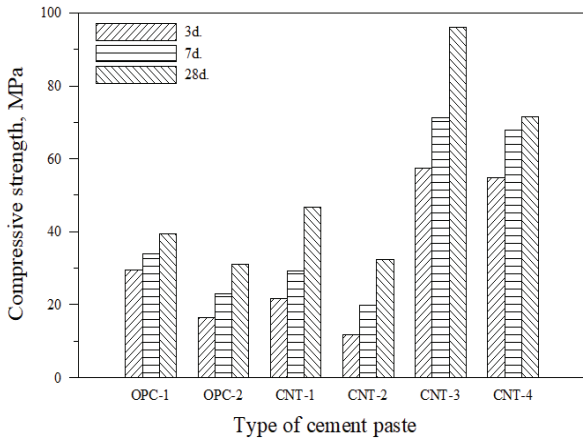


Fig. 3. Compressive strength development of cement pastes

에 의한 응집성이 강해진 것으로 판단된다(Li et al. 2022).

### 3.2 압축강도

시멘트 페이스트의 압축강도 측정 결과를 재령별로 도시하여 나타낸 것이 Fig. 3이다. 그림에서 알 수 있듯이 w/b가 0.3인 경우, PCE:CNT=1:1인 CNT-1 배합은 기준배합(OPC-1)과 압축강도 발현 차이가 그다지 크지 않은 것으로 측정되었으나, PCE:CNT=0.5:1인 CNT-3 배합은 초기재령에서부터 압축강도 발현이 상대적으로 매우 크게 나타나는 것으로 조사되었다. 예를 들면, 재령 3일에서 OPC-1, CNT-1 배합의 압축강도는 약 29.4 및 21.7 MPa로 나타난 반면, CNT-3은 약 57.4 MPa로 나타났으며, 재령 28일에서 OPC-1, CNT-1 배합의 압축강도는 약 39.4 및 46.7 MPa이며, CNT-3 배합은 약 96.1 MPa로 나타났다. 이러한 경향은 w/b가 0.4인 배합에서도 유사하게 관찰되었다. 따라서, 압축강도 측정결과를 종합해 보면 PCE 및 CNT의 사용비에 따라 시멘트 페이스트의 압축강도는 크게 영향을 받는 것임을 알 수 있다(Shi et al.

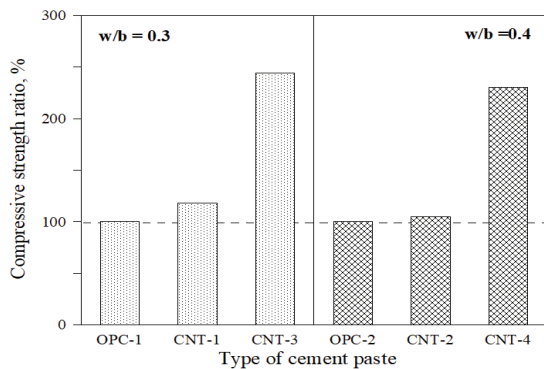


Fig. 4. Compressive strength ratio of cement pastes at 28 days

2019).

시멘트 페이스트의 압축강도 발현에 대한 CNT 첨가의 영향을 고찰하기 위하여 OPC 페이스트의 28일 압축강도에 대한 각 시멘트 페이스트의 동일 재령 압축강도 비를 백분율(%)로써 나타낸 것이 Fig. 4이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 PCE:CNT=1:1인 CNT-1 배합의 재령 28일 압축강도 비는 동일 w/b를 가진 OPC-1 페이스트보다 약간 크게 나타났으나, CNT-3 배합은 약 243%로 나타나 사용되는 분산제의 농도에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, w/b=0.4 배합에서도 유사한 경향이 관찰되었다.

### 3.3 흡수율

시멘트 경화체의 공극특성은 결합재의 종류, 수화물량 및 종류, 배합조건, 양생방법 뿐만 아니라, 시간 함수에 지배적인 영향을 받게 되며, 시멘트 경화체의 투수성에 결정적인 영향을 미치게 된다(Zain et al. 2000). 또, 시멘트 경화체의 투수성을 평가하기 위한 신뢰성 있는 실험기법으로써 초기흡수계수(S<sub>i</sub>)를 측정하는 연구가 수행되고 있다(Lee 2017).

ASTM C 1585에 준하여 6종류 시멘트 페이스트 시편의 흡수율 실험을 수행하였으며, 재령 28일 실험결과를 Fig. 5에 도시하였다. 이 그림에서 나타났듯이 w/b가 증가함에 따라 흡수율은 증가하는 경향으로 나타났으며, CNT가 혼입된 배합이 OPC계 배합보다 흡수율이 작게 나타나는 것으로 조사되었다. 한편, w/b가 0.3인 배합 중 PCE:CNT=0.5:1인 CNT-3 배합은 CNT-1 배합에 비하여 흡수율이 크게 나타나는 경향을 나타내었으며, 이는 Fig. 3에 제시된 압축강도 경향과는 다르게 나타나는 것으로 확인되었다. 따라서, CNT 적용 시멘트 페이스트의 표면 투수특성은 압축강도 특성과는 다른 거동을 하는 것으로 판단된다. 또, 이러한 결과는 w/b가 0.4인 배합에서도 동일하게 관찰되었다.

또, Fig. 6은 6종류 시멘트 페이스트 배합의 초기흡수계수(S<sub>i</sub>: initial absorption coefficient)를 상호 비교하여 나타낸 것이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 배합 종류에 따라 S<sub>i</sub> 값은 상이하였으며, 재령 28일에서 w/b가 0.3인 배합을 상호 비교해보면, OPC-1 배합의 S<sub>i</sub> 값은 약  $2.56 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$ 로 나타난 반면, CNT-1 및 CNT-3 배합의 S<sub>i</sub> 값은 약 1.59 및  $2.31 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{1/2}$ 로 측정되었다. 이러한 결과가 관찰된 이유는 배합 중 PCE의 첨가량이 많을수록 CNT의 분산이 용이하게 되기 때문에 시멘트 페이스트 표면부가 치밀하게 되어 투수능력이 감소한 탓으로 판단된다(Li et al. 2022; Alafogianni et al. 2019).

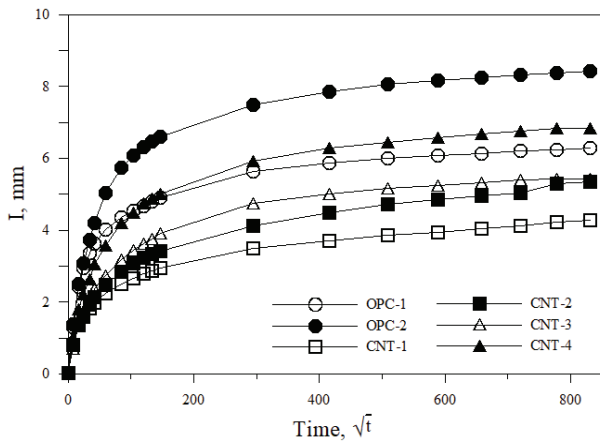


Fig. 5. Results of absorption of cement pastes

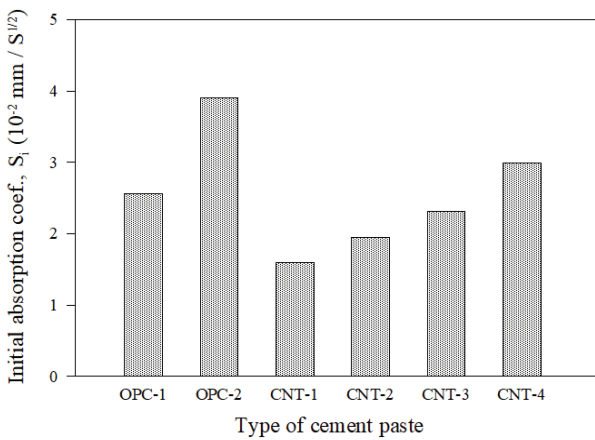


Fig. 6. Initial absorption coefficient of cement pastes

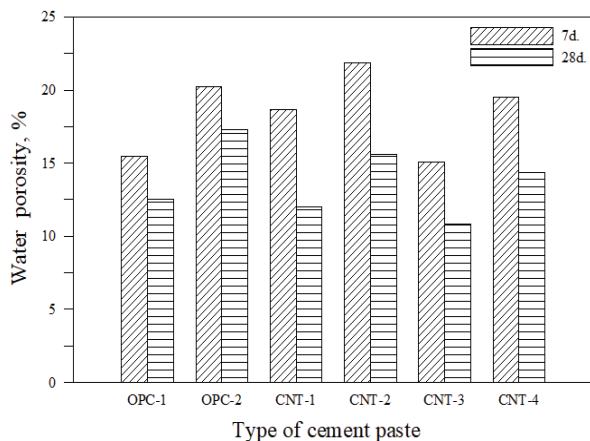


Fig. 7. Results of water porosity of cement pastes

### 3.4 투수공극량

Fig. 7은 6종류 시멘트 페이스트의 재령 7 및 28일에서 측정한 투수공극량 실험결과를 나타낸 것이다.  $w/b=0.3$ 인 OPC-1, CNT-1 및 CNT-3을 상호 비교해 보면, 재령 7일에서는 CNT-1 배합의 투수공극량이 가장 크게 나타났으나, 재령이 증가함에 따라 OPC-1 > CNT-1 > CNT-3의 순으로 투수공극량이 작게 나타나는 경향을 보였으며,  $w/b=0.4$ 인 3종류 배합에서도 동일한 경향으로 관찰되었다. 예를 들면, 재령 7일에서 OPC-2, CNT-2 및 CNT-4의 투수공극량은 각각 20.2 %, 21.8 % 및 19.5 %로 나타난 반면, 재령 28일에서는 각각 17.2 %, 15.6 % 및 14.3 %의 투수공극량 값을 나타내었다. 이러한 현상이 나타나 이유는 초기재령에서는 시멘트의 수화에 의한 공극의 치밀화가 지배적 요인인 반면, 재령의 증가와 더불어 CNT에 의한 수화촉진효과(acceleration effect) 및 채움효과(filling effect)가 지배적으로 작용한 탓으로 판단된다(Shi et al, 2019; Li et al, 2022).

### 3.5 X선 회절(XRD: x-ray diffraction) 분석

Fig. 8 및 9는  $w/b$ 가 상이한 재령 28일 시멘트 페이스트의 XRD 분석결과를 각각 나타낸 것으로서, 배합 종류에 관계없이 portlandite(CH), ettringite(E), calcite(C) 등의 수화생성물이 검출되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은  $w/b = 0.3$ 인 배합의 XRD 패턴을 나타낸 것으로서, CNT 사용 유무 및 PCE 사용량에 따라 수화물질의 피크강도는 다소 다르게 나타났다. 즉, PCE:CNT=1:1인 CNT-1 배합의 portlandite(CH) 피크는 OPC-1 샘플에 비하여 피크강도가 작게 나타났으나, PCE:CNT=0.5:1인 CNT-3 샘플보다 다소 크게 나타나는 것으로 조사되었다. 또, CNT-3 샘플에 대한 XRD 분석결과, ettringite(E)의 피크강도가 OPC-1 샘플의 동일 피크강도보다 매우 크게 나타났으며, 이는 CNT 첨가에 따른 시멘트의 수화반응 촉진에서 기인한 것으로 판단된다. 이러한 CNT 첨가에 따른 수화촉진 효과는 Fig. 3에 나타난 CNT 첨가배합의 강도증진 결과를 도모한 것으로 판단된다. 또, 이상의 결과는 CNT 첨가에 따른 수화생성물의 상변화에 대해 발표한 Li et al.(2022)의 연구내용과도 비교적 잘 일치하였다. 한편,  $w/b = 0.4$ 인 3종류 샘플의 XRD 분석결과를 나타낸 것이 Fig. 9로써,  $w/b = 0.3$ 인 시멘트 페이스트의 XRD 분석결과를 나타낸 Fig. 8과 유사한 경향이 나타나는 것으로 관찰되었다.



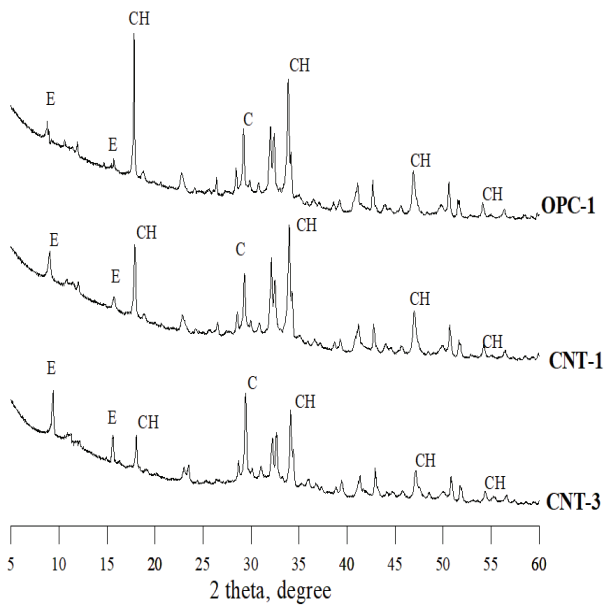


Fig. 8. XRD patterns of cement pastes with 0.3 w/b

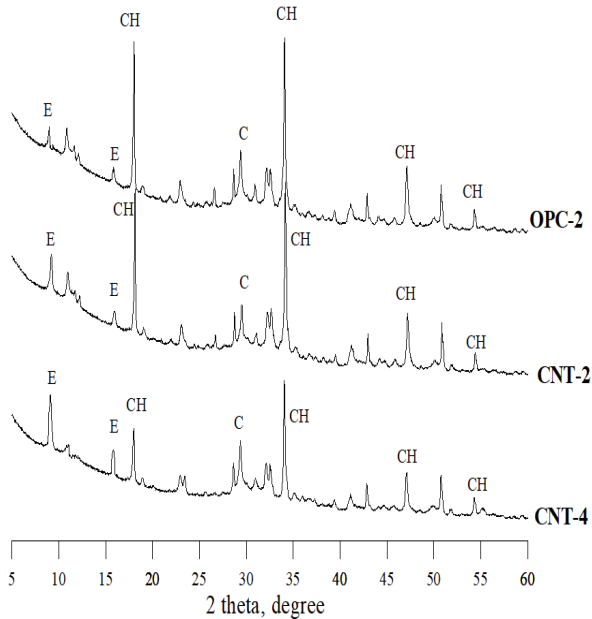


Fig. 9. XRD patterns of cement pastes with 0.4 w/b

### 3.6 주사전자현미경(SEM: scanning electron microscopy) 분석

CNT를 혼입한 시멘트 페이스트의 미세조직을 관찰하기 위하여 28일 동안 양생된 시멘트 페이스트를 대상으로 SEM 분석을 실시하였다.

Fig. 10은 CNT가 혼입되지 않은 w/b=0.3 시멘트 페이스트(OPC-1)에 대한 SEM 분석결과를 나타낸 것이다. 이 그림에 따르면, 시멘트의 주요 수화생성물인 portlandite 및 C-S-H가 다량으로 생성됨을 확인할 수 있으며, 공극 부근에 침상의 ettringite가 관찰되는 등 전형적인 OPC 사용 배합의 미세조직구조에서 관찰되는 수화물질이 생성되는 것을 확인할 수 있다. 또, OPC-1 페이스트 조직 중 폭이 최대 5-10 μm에 이르는 다량의 균열이 관찰되었으며, 균열 내부에는 portlandite 및 ettringite로 추정되는 판상 및 침상의 수화물질이 생성된 것을 확인할 수 있다.

또, Fig. 11은 CNT가 혼입되지 않은 w/b가 0.4인 OPC-2 시멘트 페이스트의 미세조직구조를 분석한 것으로서, 생성된 수화물질은 OPC-1 배합과 유사하였으나, 균열폭도 OPC-1 배합에서 관찰된 것과 유사한 것으로 관찰되었다.

한편, 분산제 농도 및 w/b가 상이한 CNT 혼입 시멘트 페이스트의 SEM 사진을 Fig. 12 - 14에 각각 나타내었다.

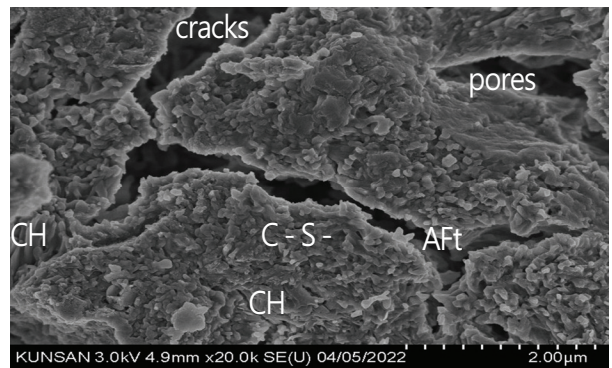


Fig. 10. SEM image of OPC-1 mix

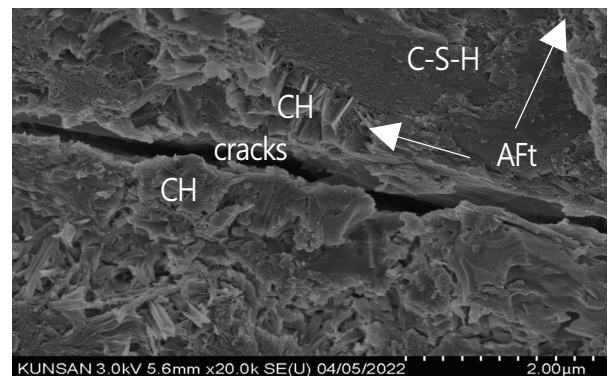


Fig. 11. SEM image of OPC-2 mix

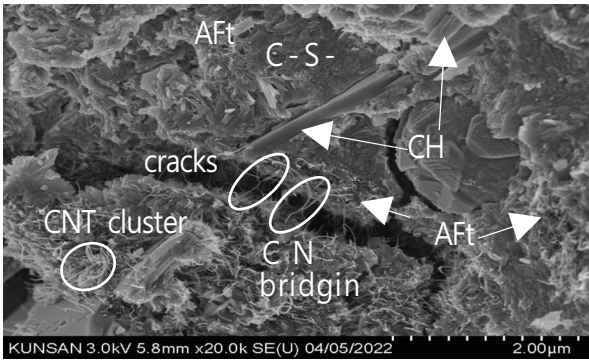


Fig. 12. SEM image of CNT-1 mix

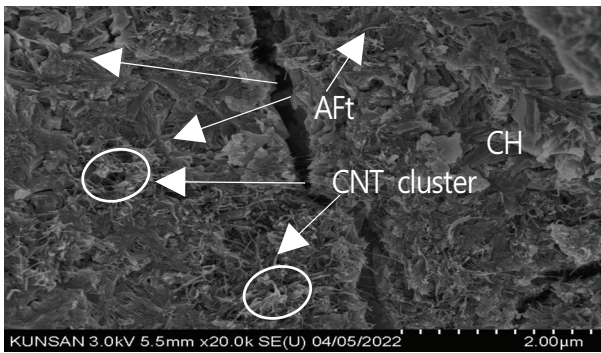


Fig. 13. SEM image of CNT-2 mix

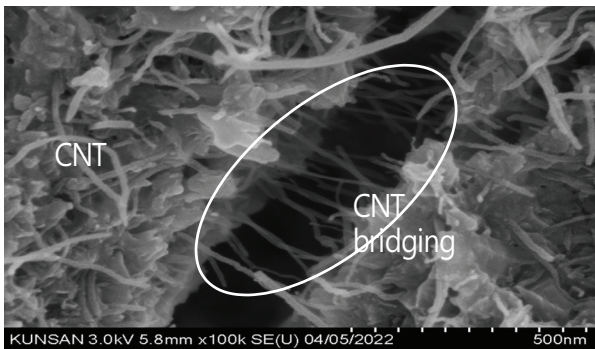


Fig. 14. SEM image of CNT-3 mix

Fig. 12는  $w/b=0.3$  및  $PCE:CNT=1:1$ 인 CNT-1 배합의 미세 조직구조를 나타낸 것으로서, Fig. 10 및 11과 유사한 수화생성물이 관찰되었으나, 조직구조 중 클러스터(cluster) 형태의 미분산 CNT가 SEM 분석을 통하여 관찰되었다. 이러한 현상은 Shi et al.(2019) 및 Konsta-Gdoutos et al.(2010)의 연구결과와도 유사하게 나타났으며, CNT 분산에 따른 시멘트 페이스트의 성능에 대하여 고찰한 Xu et al.(2015)의 연구내용과도 비

교적 잘 일치하였다. 특히, 시멘트 페이스트 조직중에 발생한 균열을 연결하는 CNT의 효과가 시각적으로 관찰되었으며, 이러한 CNT의 가교효과(bridging effect)가 CNT 배합의 역학적 성능향상에 기여한 것으로 판단된다. 한편,  $w/b=0.4$  및  $PCE:CNT=1:1$ 인 CNT-2 배합의 SEM 사진을 나타낸 것이 Fig. 13으로써, CNT-1 배합과 마찬가지로 cluster 형태의 CNT를 확인할 수 있으며, 망상 형태의 C-S-H, portlandite 및 ettringite의 수화생성물을 쉽게 관찰할 수 있었다.

또,  $w/b=0.3$  및  $PCE:CNT=0.5:1$ 인 CNT-3 배합의 미세조직 구조를 확대( $\times 10,000$ 배)하여 나타낸 것이 Fig. 14로써, 균열 중에 다량의 CNT가 균열을 연결하는 것을 명확하게 관찰할 수 있다.

이상과 같이 미세구조분석을 통하여 시멘트 페이스트의 역학적 성능에 대한 CNT의 정(+) 효과를 관찰할 수 있었으며, 향후 CNT의 혼입으로 인하여 벌크(bulk) 시멘트 페이스트 내에 발생한 균열을 연결하는 가교효과로 인하여 콘크리트 구조물의 성능향상을 가능하게 하는 나노소재로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는  $PCE:CNT$  및  $w/b$ 를 달리한 시멘트 페이스트의 역학적 성능 및 미세구조를 실험적으로 평가하였으며, 본 연구를 통하여 도출한 결과는 다음과 같다.

1. CNT 적용 시멘트 페이스트의 플로우 값을 측정한 결과, PCE의 분산효과로 인하여 PCE 양이 많을수록 플로우 값이 크게 나타났으며, PCE 양이 적은 배합은 van der waals력에 의한 응집성으로 인하여 플로우 값이 작게 나타났다.
2. 압축강도 측정 결과,  $PCE:CNT=1:1$ 인 배합은 OPC 배합과 압축강도 발현이 유사하게 나타났으나,  $PCE:CNT=0.5:1$ 인 배합은 강도발현이 상대적으로 우수한 것으로 조사되었다. 따라서, PCE 및 CNT의 사용비는 시멘트 페이스트의 압축강도에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.
3.  $PCE:CNT=0.5:1$ 인 배합은  $PCE:CNT=1:1$ 인 배합에 비하여 흡수율이 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 PCE의 첨가량이 많을수록 CNT의 분산이 용이하게 되어 시멘트 페이스트 표면부가 치밀하게 되었기 때문으로 판단된다. 또, 시멘트 페이스트의 투수공극량을 측정한 결과, 재령이 증가함에 따라 CNT의 수화촉진 및 채움효과로 인하여  $w/b=0.30$ 에서

OPC-1 > CNT-1 > CNT-3의 순으로 시멘트 페이스트의 투수공극량이 작게 나타났다.

4. XRD 분석결과, CNT 첨가량에 따른 시멘트 페이스트의 수화촉진 효과를 확인할 수 있으며, 이러한 수화촉진으로 인하여 PCE:CNT=0.5:1인 배합의 우수한 강도발현 현상이 나타난 것으로 판단된다.
5. CNT 혼입 샘플에 대한 SEM 분석을 실시한 결과, 조직구조 중 균열을 연결하는 CNT의 가교효과(bridging effect)를 관찰할 수 있으며, PCE:CNT=0.5:1인 배합에서 이러한 현상은 더욱 두드러지게 관찰되었다.
6. 실험결과를 종합적으로 판단해 볼 때, 콘크리트 중 CNT를 적절하게 혼입할 경우, CNT는 수화촉진 및 가교효과로 인하여 콘크리트의 성능을 향상시킬 수 있는 나노소재로서 적용가능할 것으로 판단된다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 22NANO-C156177-03)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

- Alafogianni, P., Daaaios, K., Tsakiroglou, C.D, Matikas, T.E., Barkoula, N.M. (2019). Effect of CNT addition and dispersive agents on the transport properties and microstructure of cement mortars, *Construction and Building Materials*, **197**, 251–261.
- Kim, W.W., Moon, J.H., Yang, K.H. (2022). Experimental study on the reological properties of carbon nano materials as cement composites, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **10(3)**, 227–234 [in Korean].
- Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S., Shah, S.P. (2010). Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nano composites, *Cement and Concrete Composites*, **32(2)**, 110–115.
- Lee, S.T. (2017). Application of nylon fiber for performance improvement of recycled coarse aggregate concrete, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **18(12)**, 785–792 [in Korean].
- Li, G., Wang, L., Yu, J., Yi, B., He, C., Wang, Z., Leung, C.K.Y. (2022). Mechanical properties and material characterization of cement mortar incorporating CNT-engineered polyvinyl alcohol latex, *Construction and Building Materials*, **345**, 128320.
- Parveen, S., Rana, S., Fanguero, R., Paiva, M.C. (2015). Microstructure and mechanical properties of carbon nanotube reinforced cementitious composites developed using a novel dispersion technique, *Cement and Concrete Research*, **73**, 215–227.
- Shi, T., Li, Z., Guo, J., Gong, H., Gu, C. (2019). Research progress on CNTs/CNFs-modified cement-based composites –a review, *Construction and Building Materials*, **202**, 290–307.
- Stephns, C., Brown, L., Sanchez, F. (2016). Quantification of the re-agglomeration of carbon nanofiber aqueous dispersion in cement pastes and effect on the early age flexural response, *Carbon*, **107**, 482–500.
- Vesmawala, G.R., Vaghela, A.R., Yadav, K.D., Patil, Y. (2020). Effectiveness of polycarboxylate as a dispersant of carbon nanotubes in concrete, *Materials Today: Proceedings*, **28**, 1170–1174.
- 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.
- Zain, M.F.M., Safiuddin, M., Mahmud, H. (2000). Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder ratios, *Cement and Concrete Research*, **30(9)**, 1501–1505.
- Zou, B., Chen, S.J., Korayem, A.H., Collins, F., Wang, C.M., Duan, W.H. (2015). Effect of ultrasonication energy on engineering properties of carbon nanotube reinforced cement pastes, *Carbon*, **85**, 212–220.



### 탄소나노튜브 적용 시멘트 페이스트의 역학적 성능 및 미세구조 평가

본 연구에서는 CNT를 적용한 시멘트 페이스트의 유동성, 역학적 성능 및 미세구조를 실험적으로 평가하였다. PCE:CNT 및 w/b를 달리한 6종류 시멘트 페이스트를 제조하였으며, 플로우, 압축강도, 흡수율 및 투수공극량을 측정하여 CNT 혼입 페이스트의 성능을 측정하였다. 또, XRD 및 SEM 분석을 통하여 시멘트 페이스트의 미세조직구조 변화를 평가하였다. 실험결과에 따르면, CNT는 시멘트 페이스트의 수화촉진효과 및 채움효과로 인하여 OPC 배합에 비하여 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있으며, 시멘트 페이스트 중 균열을 연결하는 CNT의 가교효과를 확인할 수 있었다. 결론적으로, CNT를 적절하게 혼입할 경우, CNT는 수화촉진 및 가교효과로 인하여 콘크리트의 성능을 향상시킬 수 있는 나노소재로써 적용가능할 것으로 판단된다.