

MWCNT가 첨가된 시멘트복합체의 수화 및 전기저항 특성

Hydration and Electrical Resistance of Cement Composites Containing MWCNTs

이 건 철¹

김 영 민^{2*}

Lee, Gun-Cheol^{1*}

Kim, Young-Min^{2*}

Professor, Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, 27469, Korea¹

Research Professor, Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, 27469, Korea²

Abstract

Carbon nanotubes are used in various industries with their excellent mechanical properties and electrical conductivity. In the construction industry, research is being conducted to give self-sensing capabilities to structures, but the results of experiments vary among researchers, and the analysis is insufficient. Therefore, in this study, the hydration and electrical properties of MWCNT-added cement pastes were measured. The electrical resistance values of hydration heat, porosity, Rietveld quantitative analysis, compressive strength, and distance were measured. The heat resistance, porosity, Rietveld quantitative analysis, compressive strength and distance were measured according to electrical resistance. Experimental results showed that the heat of hydration decreased with increasing MWCNT. XRD Rietveld quantitative analysis showed that there was no significant difference in the amount of hydration products with increasing addition rate of MWCNT. As a result of SEM analysis, the MWCNT is agglomerated by van der Waals forces, and this area is considered to be caused by voids and weak areas. The electrical resistance value decreases as the addition rate is increased, and thus may play a role for magnetic sensing in the future.

Keywords : MWCNT, hydration heat, strength development, electrical resistance

1. 서 론

탄소나노튜브(Carbon Nano Tube, 이하 CNT)는 우수한 역학적 특성, 전기전도성, 열전도성, 낮은 단위질량, 부식에 대한 높은 저항성 등으로 인해 다양한 산업분야에 활용되어지고 있고 건설분야에서는 우수한 전기전도성을 활용한 콘크리트 구조물의 자기센싱 효과에 집중하여 연구가 진행되어지고 있다[1].

그러나 CNT는 입자간에 작용하는 반데르발스 힘으로 인한 매트릭스 내에서 효과적인 분산을 얻기 힘들며 CNT를 이용한 시멘트 복합체의 역학적 성능 향상을 제한하는 것으로 알려져 있다[2].

CNT는 강재보다 100배 이상의 인장강도와 1TPa의 탄성계수를 가지고 있으며, 파단변형률을 280%에 이룬다고 알려져 있다. 이러한 특성 때문에 CNT 혼입에 따른 시멘트 복합체의 역학적 성능에 대한 연구가 진행되고 있고, CNT 혼입시 강도발현이 우수하다고 알려져 있으며, 비표면적이 큰 CNT는 시멘트 수화생성을 촉진하고 C-S-H Gel의 비율을 증가시키는 역할을 한다고 알려져 있다[3].

그러나 연구자들에 따라 실험결과가 상이하게 나타나고 있는데 압축강도는 시멘트 질량대비 0.1%의 CNT 혼입에서

Received : November 25, 2019

Revision received : January 26, 2020

Accepted : February 7, 2020

* Corresponding author : Kim, Young-Min

[Tel: 82-43-844-2758, E-mail: imkym97@daum.net]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

15%, 0.5%의 혼입에서는 11%의 압축강도 증가를 보였으나, W/C 0.5 배합에서 시멘트 질량비 0.5%를 혼입할 경우 오히려 8%의 압축강도 저하가 보고되기도 하였다[4,5].

이처럼 CNT가 첨가된 시멘트 복합체의 물리역학적 성능은 연구자 마다 상이하게 나타나고 있고, 이 원인을 분석하고 있는 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 시멘트 복합체 내에서 CNT가 미치는 영향을 파악하기 위하여 MWCNT(Multi Walled Carbon Nano Tube, 이하 MWCNT라 한다.)와 SWCNT(Single Walled Carbon Nano Tube) 중 경제성에서 우수한[6] MWCNT를 시멘트페이스트에 첨가한 시험체를 제작한 후 MWCNT가 시멘트페이스트의 역학적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 수화열, 공극률, 압축강도를 측정하고 SEM, 리트벨트 분석법을 활용해 수화물의 생성 특성을 분석하였으며, 실험체 측정거리에 따른 전기저항값을 측정하여 자기센싱에 대한 가능성을 평가하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. CNT는 분말타입의 MWCNT를 사용하였고, 첨가율은 분체 질량 대비 1.0% 및 2.0% 의 2개 수준으로 설정하였다.

W/B(%)는 고강도 조건인 20% 와 일반강도 조건인 45%로 설정하였다. 실험사항으로는 소정의 재령에서 굳지않은 페이스트에서는 수화열을 측정하였고, 경화페이스트에서는 수은압입법에 의한 공극률 XRD, SEM, 압축강도 및 측정거리에 따른 전기저항값을 측정하였다.

일반강도 시험체는 시멘트만 사용하였고, 고강도 시험체는 시멘트와 실리카흙을 사용하였으며, 실리카흙은 시멘트 중량대비 10%를 첨가하였다. 이는 고강도 발현과 CNT의 균질한 분산의 부수적인 효과를 얻기 위하여 기존의 연구사례를 참고하였다[7,8].

2.2 사용재료

본 연구에서 사용된 재료로써 먼저 시멘트는 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 실리카흙은 국내 E사의 제품을 사용하였으며, 화학적 조성 및 밀도는 Table 3과 같다. CNT는 국내 C사의 제품인 분말형 MWCNT를 사용하였고, 종류별 특성은 Table 4와 같다. 실험에 사용한 화학혼

화제는 KS F 2560(콘크리트용 화학혼화제)에서 제시한 PC계 고성능감수제를 사용하였다.

Table 1. Experimental plan

| Factor | | Levels |
|------------|----------------|--|
| Mixture | W/B (%) | 2 · 20, 45 |
| | CNT Type | 1 · MWCNT |
| | Flow (mm) | 1 · 150 ± 10 |
| | CNT/B (%) | 3 · 0, 1.0, 2.0 |
| Experiment | Fresh paste | 1 · Heat of hydration (72 hour) |
| | Hardened paste | 4 · Compressive strength (3, 7, 14, 28, 56 days) · MIP (28days) · XRD (3, 7, 14, 28days) · SEM (3, 28days) · Electrical resistance(28days) |

Table 2. Mixture proportions of cement paste

| W/B (%) | MWCNT (%) | Binder (%) | | Ad (%) |
|---------|-----------|------------|----|--------|
| | | C | SF | |
| 45 | 0.0 | | | 0 |
| | 1.0 | 100 | - | 4 |
| | 2.0 | | | 6 |
| 20 | 0.0 | | | 2 |
| | 1.0 | 90 | 10 | 7 |
| | 2.0 | | | 10 |

Table 3. Properties of binder

| Factor | Chemical Composition (%) | | | | | Density (g/cm ³) |
|--------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | |
| C | 22.23 | 5.21 | 3.38 | 64.58 | 2.3 | 3.15 |
| SF | 99.61 | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 2.12 |

Table 4. Properties of CNT

| Item | MWCNT | SWCNT |
|---|------------------------|-----------------------|
| diameter (nm) | 5~100 | 1.2~3.0 |
| length (μm) | 10 | 10 |
| tension (GPa) | <50 | ~45 |
| Electrical resistance (Ω·m ²) | 5.1 × 10 ⁻⁶ | 10 × 10 ⁻⁴ |
| Thermal conductivity (W/m·K) | max. 3,000 | max. 6,000 |
| Specific Surface Area(m ² /g) | 130~160 | 700~900 |
| Cost(\$/g) | 1~20 | 100~1,000 |

2.3 실험방법

시멘트 복합체의 배합은 결합재(일반강도 조건:시멘트, 고강도 조건:시멘트+실리카흙)와 MWCNT를 투입한 후 5L 강

제식 모르타르 믹서기를 이용하여 건비빔 60초 실시 후, 배합수와 화학혼화제를 혼입하여 90초간 습비빔을 실시하였다.

Figure 1은 수화열 측정방법과 측정장비, 화학분석 측정장비를 나타내었다. 수화열 측정은 시멘트 페이스트를 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 원주형 공시체로 제작하여 페이스트 타설 직후 열전대를 삽입한 뒤 $300 \times 300 \times 400\text{mm}$ 의 단열함에 보관하여 1분 간격으로 총 72시간 측정하였다.

수은압입법에 의한 시멘트페이스트의 공극률 측정(MIP)은 Autopore V 9600을 이용하여 재령 28일에 측정하였다. 분석을 위한 샘플은 $\phi 10\text{mm}$ 크기로 제작한 후 아세톤에 침지시켜 수화를 정지시키고 48시간 동안 건조 후 분석을 실시하였다.

압축강도는 50kN의 U.T.M장비를 이용하여 재령 3, 7, 14, 28, 56일에서 측정하였다.

XRD는 시료채취후 D8-Advance를 사용하여 리트벨트 정량분석법으로 재령 3, 7, 14, 28일의 시험체를 측정하였다.

SEM 분석은 재령 3, 28일에서 샘플을 채취하여 FE SEM(JSM-7610F) 장비로 촬영하여 분석하였다.

전기저항값은 시험체 제작시 동판을 20mm간격으로 삽입한 후 전기저항테스터기를 이용하여 측정거리에 따른 저항값을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 유동성

Table 5는 MWCNT가 첨가된 시멘트페이스트의 플로 $150\text{mm} \pm 10\text{mm}$ 를 확보하기 위해 투입된 유동화제의 양을 나타낸 것이다. 먼저 W/B 45%에서 MWCNT 0%에서는 별도의 유동화제 투입 없이 목표 플로를 확보하였지만 MWCNT의 첨가율이 증가할수록 목표 플로를 확보하기 위한 유동화제의 투입량도 증가되었다. 특히 W/B 20%는 MWCNT 1%에서는 유동화제 7%, MWCNT 2%에서는 10%로 과도한 양이 투입되어야 목표 플로를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 W/B20%가 W/B45%보다 비빔수의 부족과 MWCNT의 상당히 낮은 비중으로 인한 체적의 증가에 의한 것으로 판단된다.

Table 5. Admixture addition ratio

| W/B (%) | MWCNT (%) | Ad(%) |
|---------|-----------|-------|
| 45 | 0.0 | 0 |
| | 1.0 | 4 |
| | 2.0 | 6 |
| 20 | 0.0 | 2 |
| | 1.0 | 7 |
| | 2.0 | 10 |

3.2 수화열

Figure 2는 MWCNT가 첨가된 시멘트페이스트의 강도별 수화열 특성을 나타낸 것이다. 먼저 일반강도, 고강도에서는 MWCNT 첨가율이 증가할수록 수화열이 낮아지는 것으로 나타났다.

일반강도에서는 수화열은 MWCNT 0.0%보다 20~25℃ 가량 감소되었지만 발열속도에서는 12~14시간에서 Peak가 나타나 큰 차이는 나타나지 않았다. 하지만 고강도에서는 수화열도 12~14℃ 정도 감소하였고 발열속도에서도 MWCNT 0.0%에 비하여 1.0%에서는 12시간 2.0%에서는 30시간 정도가 지연되는 것으로 나타났다. 이렇게 발열속도가 차이가 나는 것은 MWCNT의 영향보다는 동일한 유동성을 확보하기 위하여 화학혼화제가 과잉 투입되었고, 시멘트의 입자와 물의 접촉을 방해하여 수화반응이 지연된 결과로 기존의 Han et al.[9]의 연구와 유사한 결과로 나타났다.

MWCNT가 첨가된 시멘트페이스트에서 수화열이 저감되는 결과는 CNT의 특성인 뛰어난 열전도성[10,11]에 의해 수화열이 외부로 방출되는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

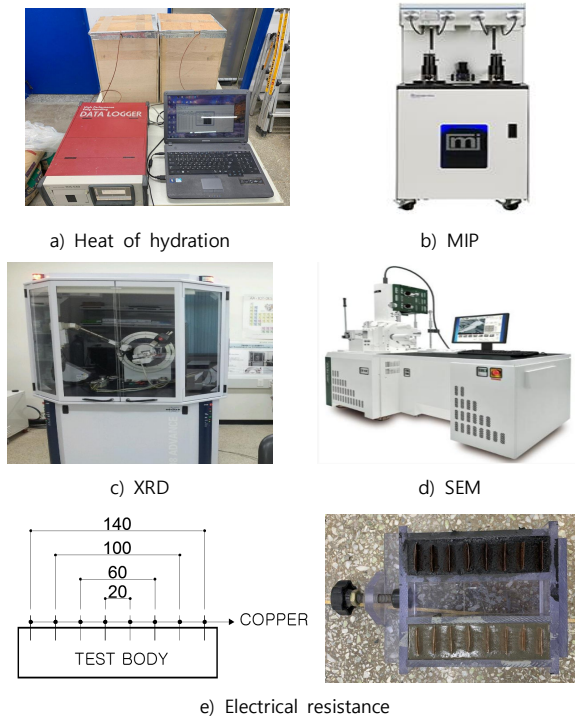
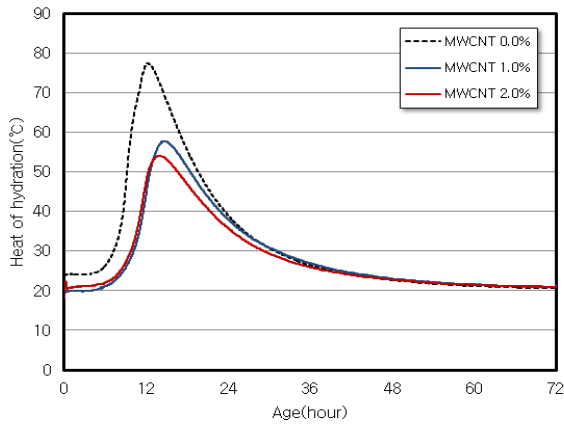
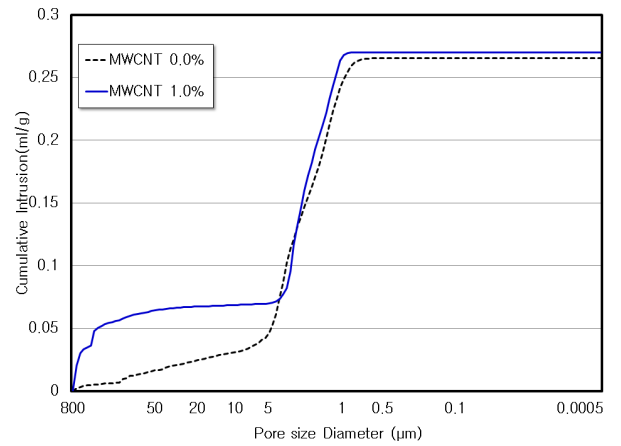


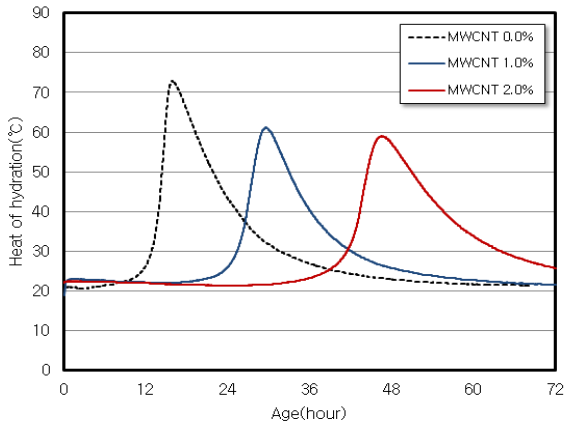
Figure 1. Experiment equipment



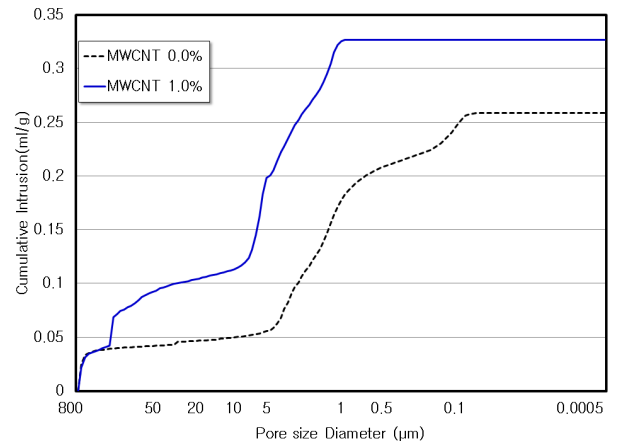
a) Normal Strength(W/B 45%)



a) Normal Strength(W/B 45%)



b) High Strength(W/B 20%)



b) High Strength(W/B 20%)

Figure 2. Heat of hydration

Figure 3. MIP

3.3 공극특성

Figure 3은 MWCNT 0.0%와 1.0%가 첨가된 시멘트페이스트의 공극특성을 나타낸 것이다. 보통강도와 고강도 범위에서 MWCNT가 첨가된 시험체에서 수은압입량이 높은 것으로 나타나 공극의 양이 MWCNT가 첨가되지 않은 시험체보다 큰 것으로 나타났다. 기존의 연구결과에서는 5~100nm입자의 CNT가 filler effect으로 시멘트의 공극구조를 개선시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있지만[12], 반데르발스 힘 생성에 따른 뭉침현상과 이로 인해 공극량이 증가[1]되는 것으로 판단된다.

3.4 압축강도

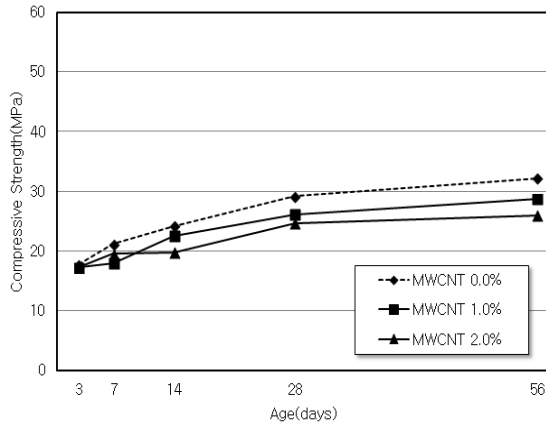
Table 6과 Figure 4는 MWCNT가 첨가된 시멘트페이스트의 압축강도 특성을 나타낸 것이다.

Table 6. Compressive strength(MPa)

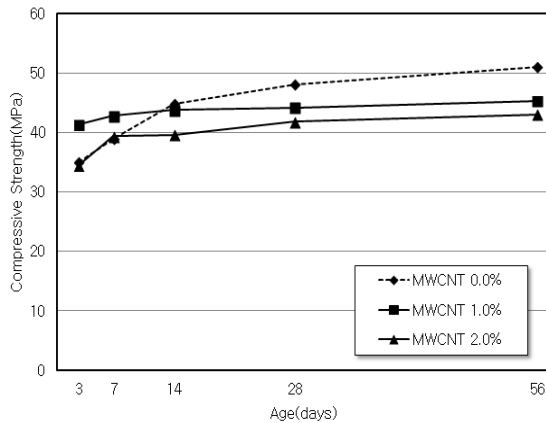
| Item | | days | | | | |
|-----------------|------------|------|------|------|------|------|
| | | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 |
| Normal strength | MWCNT 0.0% | 17.7 | 21.2 | 24.2 | 29.2 | 32.2 |
| | MWCNT 1.0% | 17.2 | 18.0 | 22.5 | 26.1 | 28.7 |
| | MWCNT 2.0% | 17.2 | 19.5 | 19.7 | 24.7 | 25.9 |
| High strength | MWCNT 0.0% | 35.0 | 39.0 | 44.8 | 48.1 | 51.0 |
| | MWCNT 1.0% | 41.3 | 42.8 | 43.8 | 44.2 | 45.3 |
| | MWCNT 2.0% | 34.5 | 39.4 | 39.6 | 41.8 | 43.0 |

일반강도 조건의 시험체는 재령 3일에서 첨가량 1.0%, 2.0%는 MWCNT 0.0%과 유사하지만 재령이 증가될수록 강도의 차이의 폭은 커지는 것으로 나타났다.

고강도 조건의 시험체는 전반적인 강도 증진율이 크지 않은 경향을 나타내었다. MWCNT가 첨가된 모든 시험체에서 증진율은 MWCNT 0.0%보다 13~36% 저하되는 것으로 나타났다, 이는 MWCNT가 시멘트 복합체 내에서 강도증진



a) Normal Strength(W/B45%)



b) Ultra High Strength(W/B 20%)

Figure 4. Compressive strength

에 저해요인으로 작용하고 있을 것으로 판단되며, 이는 공극률 분석에서 언급한 바와 같이 MWCNT가 시멘트 페이스트 내에서 공극량을 증가시킨 것에 기인한 결과로 사료된다.

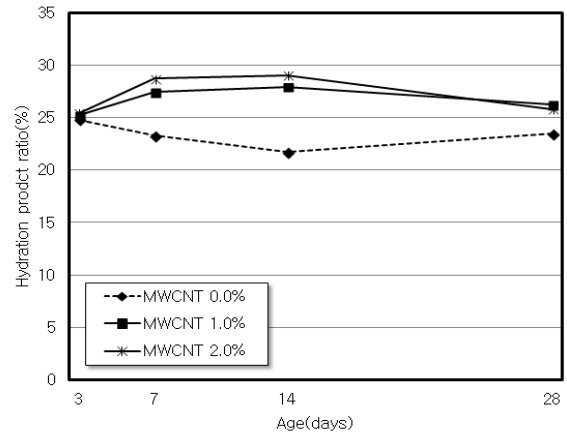
3.5 XRD 리트벨트 정량분석법

Table 7과 Figure 5는 MWCNT가 첨가된 시멘트페이스트의 수화생성물을 리트벨트 정량 분석법에 따라 표기한 결과이다.

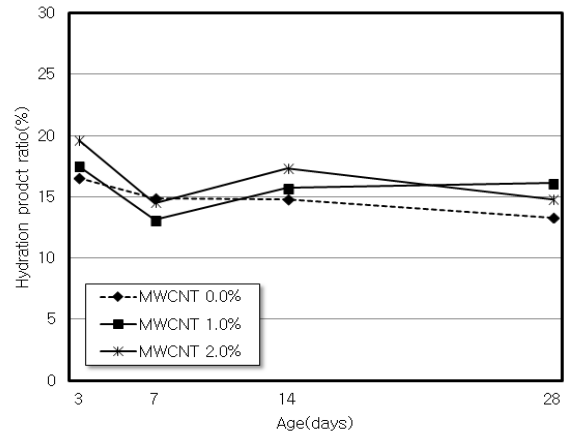
실험결과 MWCNT의 첨가에 따른 수화생성물의 정량차이는 전반적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 초기 수화생성물인 에트링가이트와 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 전 재령에 걸쳐 MWCNT를 첨가한 시험체가 MWCNT 0.0%에 비해 다소 높게 측정되었다. MWCNT가 시멘트 페이스트 내에서 수화물 생성에 미치는 영향이 없으며, MWCNT를 첨가한 실험체의 압축강도가 저하되는 원인은 수화물 생성량에 의한 것은 아닌 것으로 판단된다.

Table 7. Hydration products by reidveld method(%)

| Item | days | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|
| | 3 | 7 | 14 | 28 |
| MWCNT 0.0% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 24.8 | 23.3 | 21.7 | 23.5 |
| MWCNT 0.0% Ettringite | 16.5 | 14.9 | 14.8 | 13.3 |
| MWCNT 1.0% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 25.2 | 27.4 | 27.9 | 26.2 |
| MWCNT 1.0% Ettringite | 17.5 | 13.1 | 15.7 | 16.1 |
| MWCNT 2.0% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 25.4 | 28.7 | 29.0 | 25.8 |
| MWCNT 2.0% Ettringite | 19.6 | 14.5 | 17.3 | 14.8 |



a) $\text{Ca}(\text{OH})_2$



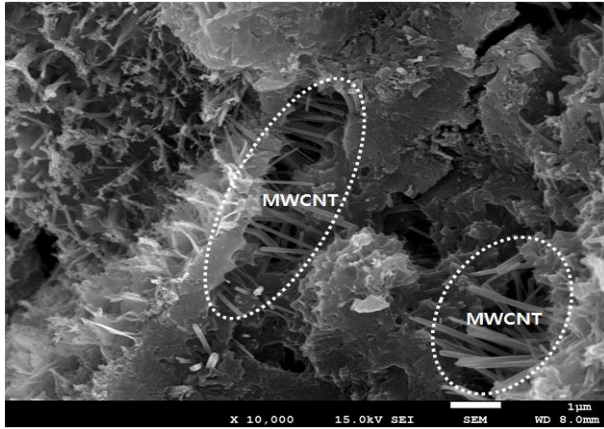
b) Ettringite

Figure 5. Hydration products by reidveld method

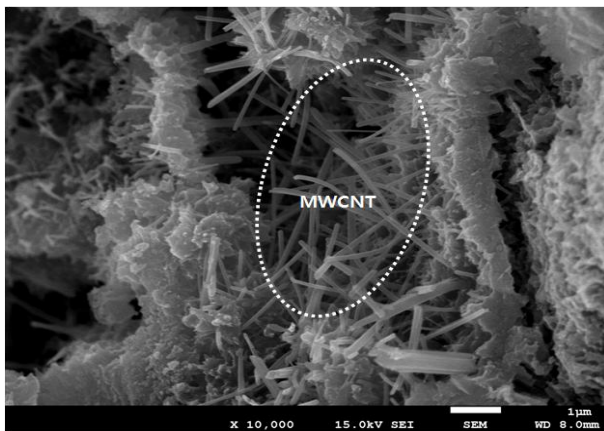
3.6 SEM 분석

Figure 6은 MWCNT가 첨가된 시멘트페이스트의 SEM 촬영 결과이다.

그림과 같이 시멘트 페이스트내에서 MWCNT는 반데르발스 힘에 의해 실타래처럼 서로 응집되어 존재하는 것으로 나타났다. 이 응집부에선 수화생성물이 존재하지 않고 조직 내 공극으로 존재하는 것으로 판단되며, 이로 인하여 압축강도가 저하로 이어지는 것으로 사료된다.



a) MWCNT 1.0%



b) MWCNT 2.0%

Figure 6. SEM analysis

따라서 시멘트복합체 내에서 MWCNT의 균질한 분산성 확보가 압축강도 특성에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

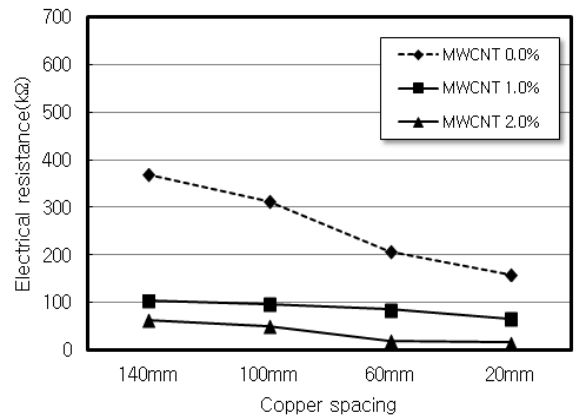
3.7 측정거리에 따른 전기저항

Table 8와 Figure 7은 측정거리에 따른 전기저항값에 대한 결과이다.

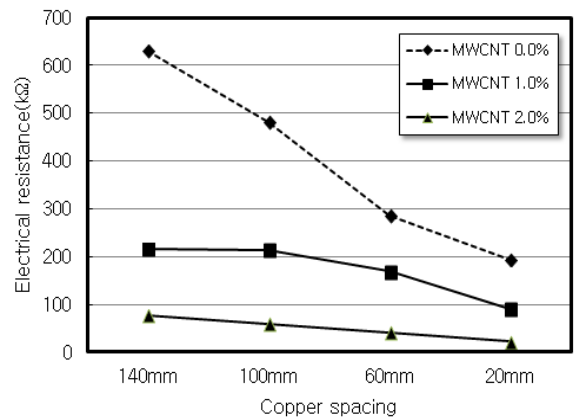
먼저 전반적으로 MWCNT 첨가율이 증가될수록 전기저항값은 감소되며, 측정거리 간격이 작을수록 전기저항값은 감소되는 것으로 나타났다. 이는 MWCNT의 뛰어난 전기전도도 때문인 것으로 판단된다. 또한 고강도가 보통강도보다 전기저항값이 50% 이상 작아지는 것으로 나타나는데 고강도시험체에서는 W/B 20%로 보통강도보다 배합수가 현저히 낮고 이에 따라 내부 공극량이 상대적으로 적은 결과로 Yoon[13]이 제안한 특성과 유사하게 나타났다.

Table 8. Electrical resistance(Ω)

| | Item | 140mm | 100mm | 60mm | 20mm |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|-------|
| Normal strength | MWCNT 0.0% | 630.0 | 482.0 | 287.0 | 194.0 |
| | MWCNT 1.0% | 216.0 | 214.0 | 169.0 | 91.0 |
| | MWCNT 2.0% | 76.3 | 58.3 | 40.4 | 22.0 |
| High strength | MWCNT 0.0% | 368.0 | 312.0 | 207.0 | 159.0 |
| | MWCNT 1.0% | 105.0 | 98.3 | 86.5 | 67.1 |
| | MWCNT 2.0% | 63.20 | 50.4 | 19.9 | 16.5 |



a) Normal Strength(W/B45%)



b) Ultra High Strength(W/B 20%)

Figure 7. Electrical resistance

4. 결론

시멘트페이스 내에서 MWCNT가 수화열 및 강도발현에 미치는 영향으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수화열은 MWCNT 첨가율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 일반강도 조건의 경우는 수화열이 20~25°C 감소되었지만, 발열속도에서는 큰 차이가

나타나지 않았고 고강도 조건에서는 수화열도 12~14 °C 정도 감소하였고, 또한 발열속도도 12~30 시간이 나 늦어지는 경향을 보였다. 수화열 저감은 MWCNT의 열도 특성으로 인한 것으로 판단되며, 수화발열속도가 늦어지는 것은 유동성을 위한 혼화제 투입 과잉으로 인한 응결 지연 영향으로 판단된다.

- 2) 수은압입법에 의한 공극률은 일반강도와 고강도 조건에서 전반적으로 MWCNT가 첨가될수록 증가하는 것으로 나타났다. CNT의 나노입자가 시멘트페이스트내에서 filler 효과를 이어지지 못하고 반데르발스 힘에 의한 뭉침이 발생하고 이로 인해 공극의 양이 증가되는 것으로 판단된다.
- 3) 압축강도는 MWCNT가 첨가될수록 저하되는 경향을 나타내었다. 일반강도 조건에서는 초기강도는 유사한 값을 나타냈지만, 재령이 증가할수록 강도 차의 폭은 4~7MPa 정도로 크게 나타났다. 고강도 조건에서는 MWCNT가 첨가된 시험체에서 증진율이 13~36% 저하되는 것으로 나타났다. 이는 MWCNT가 반데르발스 힘에 의한 뭉침현상으로 시멘트페이스트내에서 공극의 양을 증가시켰기 때문으로 판단된다.
- 4) XRD 리트벨트 정량분석에서 MWCNT 0.0%과 비교하여 MWCNT 첨가에 따른 수화생성물의 정량차이는 크지 않는 것으로 나타났다. 따라서 MWCNT가 시멘트페이스트내에서 수화물 생성에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.
- 5) SEM 관찰 결과 MWCNT가 시험체 내에서 실타래처럼 응집되는 것을 확인하였으며, 이렇게 응집된 곳에 수화생성물이 존재하지 않고, 일종의 공극의 형태로 취약부로 이어져 강도 저하가 되는 것으로 판단된다.
- 6) 전기저항값은 MWCNT 첨가율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 일반강도조건보다는 고강도 조건에서 전기저항값이 낮게 측정되었는데, 이는 내부 수분이 일반강도조건보다 상대적으로 적고, 이로 인해 공극량이 적어 나타난 결과로 판단되며, 추후 자기센싱의 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 결과 MWCNT가 첨가된 시멘트 복합체의 강도저하 원인은 MWCNT가 수화에 미치는 영향보다는 시멘트복합체내에서의 분산성이 불량하여 나타나는 현상으로 판단된다. 즉, 반데르발스 힘에 의한 응집을 방지하여 균질한 분산성을 확보하고 취약부를 최소화하는 것이 강도저하 현

상을 방지하는 방법으로 판단되며, 추후 시멘트복합체내에서 MWCNT 분산정도와 공극량의 상관관계에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

요 약

탄소나노튜브는 우수한 역학적, 전기전도성 등으로 다양한 산업에 이용되고 있다. 건설산업에서는 구조체에 자기센싱 기능을 부여하는 연구가 진행되고 있지만, 연구자들마다 실험결과가 상이하게 나타나고 이에 대한 분석은 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 MWCNT가 첨가된 시멘트페이스트의 수화열, 공극률, 리트벨트 정량분석법, 압축강도, 거리에 따른 전기저항값을 측정하여 수화와 강도특성 및 전기특성을 분석하였다. 실험결과 수화열은 MWCNT가 증가할수록 감소되는 것으로 나타났다. 또한 XRD 리트벨트 정량분석법 결과 MWCNT 첨가율 증가에 따른 수화생성물의 양은 큰 차이가 없는 것으로 나타났고, 압축강도 저하의 원인은 공극률 분석결과 MWCNT가 시멘트페이스트내에서 공극의 양을 증가시켰기 때문으로 판단되며 SEM분석결과 MWCNT가 반데르발스 힘에 의해 뭉쳐져 있어서 이 부위가 공극 및 취약부로 발생 것으로 판단된다. 전기저항값은 첨가율이 증가될수록 감소하여 추후 자기센싱에 대한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 다중벽탄소나노튜브, 수화열, 강도발현, 전기저항

Funding

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (No. 2018R1A4A1025953).

ORCID

Gun-Cheol Lee, <http://orcid.org/0000-0003-4743-6373>

Young-Min Kim, <https://orcid.org/0000-0001-5096-8309>

References

1. Oh SW, Oh KS, Jung SH, Chung WS. Effects of CNT additions on mechanical properties and microstructures of cement, Journal

- of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2017 Nov;21(6):162–8. <http://doi.org/10.11112/jksmi.2017.21.6.162>
2. Ha SJ, Kang ST, Lee JH. Strength of CNT cement composites with different types of surfactants and doses. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 2015 Mar;19(2):99–107. <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.2.099>
 3. Wong, EW, Sheehan, PE, Lieber CM. Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. *Science*, 1997 Sep;277(5334):1971–5. <http://doi.org/10.1126/science.277.5334.1971>
 4. Li H, Xiao, Hui GX, Yuaon J, Ou J. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Science Direct Composites Part B: Engineering*. 2004 Mar;35(2):185–9. [http://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00052-0](http://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0)
 5. Ha SJ, Kang ST, Lee JH. Strength of CNT cement composites with different types of surfactants and doses. *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 2015 Mar;19(2):99–107. <http://doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.2.099>
 6. Lee GW, Joong TH. Dispersion of carbon nanotubes (CNTs) and CNT-based transparent conductive films. *Korea Industrial Chemistry News*. 2007 Aug;10(4):8–19.
 7. Collins F, John L, Duan WH. The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube–op c paste mixture. *Cement & Concrete Composites*, 2012 Feb;34(2):201–7. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.013>
 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. <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.1.063>
 9. Han CG, Han MC, Lee DG. Influence of over-added ae water reducing agent on physical properties of the concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2008 Feb;27(8):91–6. <http://dx.doi.org/10.5345/JKIC.2008.8.1.091>
 10. Park SS, Han SP, Jeon YH, Kim JY, Kim NJ. A comparative study on the characteristics of nanofluids to the shape of graphene and carbon nanotube. *Journal of the Korean Solar Energy Society*. 2013 Jun;33(3):99–106. <http://dx.doi.org/10.7836/kses.2013.33.3.099>
 11. Lee HY, Kang DH, Song YM, Chung WS. Heating experiment of CNT cementitious composites with single-walled and multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Nanomaterials*, 2017 May;2017 (Article ID 3691509):1–12. <http://doi.org/10.1155/2017/3691509>
 12. Li GY, Wang PM, Zhao X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 2005 May;43(6):1239–45. <http://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.017>
 13. Yoon IS. Influence of micro-structural characteristics of concrete on electrical resistivity. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 2013 Nov;17(6):122–9. <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2013.17.6.122>