

전도성 시멘트 기반 자가 발열 복합재료 시스템의 설계 및 성능 평가

방진호* · 양범주**

Design and performance evaluation of self-heating cementitious composites system

Bang, Jinho* · Yang, Beomjoo**

ABSTRACT : This study focuses on the design and performance evaluation of electrically conductive cement-based heating composites system. Conductive fillers, specifically multi-walled carbon nanotube (MWCNT) and carbon fiber (CF), were incorporated to achieve high electrical conductivity. The study demonstrated that localized heating is more economical and efficient than heating entire structures. Experimental results showed stable electrical conductivity and effective heating performance, with localized heating achieving significant temperature increases. The findings suggest that localized heating systems can reduce material costs and energy requirements, highlighting their potential for smart road and de-icing applications. Future research should address long-term performance and economic feasibility.

키 워 드: 전도성 복합재료, 다중벽 탄소나노튜브, 탄소 섬유, 발열 특성

Keywords: Electrically conductive composite, Multi-walled carbon nanotube, Carbon fiber, Heat generation characteristic

1. 서론

건설 분야에서 전도성 복합재료에 대한 연구는 시멘트 기반 센서, 에너지 하베스팅, 전자파 차폐 시스템, 발열 시스템 등 다양한 기능에 관하여 진행되어왔다 (Seo et al., 2022; Jang et al., 2023 a; Barri et al., 2023; Wang et al., 2021; Li et al., 2023; Ma et al., 2023; Wang et al., 2023). 특히 최근 지구온난화가 일으킨 이상기후로 인해 겨울철 폭설과 결빙 현상이 빈번하게 발생하고 있으며, 이로 인해 도로의 제빙과 제설을 할 수 있는 스마트 도로 또는 이와 같은 시스템에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이러한 이유에서 많은 연구자들은 전도성 필러를 시멘트계 재료에 혼합한 복합재료를 제작하여 주열 발열 기반의

발열 시스템을 만드는 데에 집중해왔다. 그 중 다중벽 탄소 나노튜브 (Multi walled carbon nanotube, MWCNT)와 탄소 섬유 (Carbon fiber, CF)는 선호되는 전도성 필러 중 하나로, 높은 전기 전도도를 달성하기 위해 많은 양이 필요한 강섬유, 그래파이트, 카본 블랙에 비해 적은 양으로 높은 전기 전도도를 달성할 수 있으며 상대적으로 뛰어난 전기적, 기계적 성능을 보인다 (Takikawa et al., 2002; Jang et al., 2021; Lee et al., 2021).

초기 발열 복합재료의 연구는 재료 자체의 발열 성능을 향상시키는 데 중점을 두어 진행되었다. MWCNT 혼입 시멘트계 복합재료의 반복 발열 성능을 확인하였으며, CF 혼입 시멘트계 복합재료 또한 모재 및 주변공간을 효율적으로 난방할 수 있다는 결과를 확인하였다 (Kim et al., 2016). 최근에는 다양한 조건에 노출된 발열 복합재료의 풍화 및 열화 조건에서의 발열 성능을 높이기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 대부분의 연구에서 발열 복합재료 전체를 발열 시스템으로 활용하는 연구에 대한 내용이 주로 수행되고 있다

* 충북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

** 충북대학교 공과대학 토목공학과 부교수. 교신저자 (byang@chungbuk.ac.kr)

(Hambach et al., 2016).

그러나 구조물 전체를 발열 시스템으로 활용하는 것은 경제성과 구조물 수명 측면에서 좋지 않은 단점이 있다. 구조물 내부에서 발생한 열을 외부로 전달하려면 많은 전력이 필요하며, 구조물 전체에 고가의 전도성 필러를 적용하면 재료비의 증가가 불가피하다. 또한 열 전달 과정에서 모재의 팽창으로 인해 구조물에 균열이 발생할 수 있으며, 제빙과 제설이 필요한 부분까지 열 전달이 어렵게 된다.

따라서 본 연구에서는 구조물 전체를 발열하는 시스템이 아닌, 특정 핵심 부분의 발열이 가능한 발열 복합재료의 형상을 디자인하고, 이에 따른 발열성능을 파악하고자 하였다. 3D 프린터를 활용해 그리드 형태로 디자인된 복합재료 몰드를 제작하였고, 해당 복합재료에 단조 발열 실험을 진행하였다. 또한 복합재료의 전기 저항을 측정하기 위해 ASTM 규격을 충족하는 시편을 제작해 2-프로브 휴대용 디지털 멀티미터를 사용하였다. 발열 실험에서는 파워 서플라이어를 사용해 시편에 정적 전압을 인가하였으며 동시에 데이터 로거와 k-type thermocouple을 활용해 MWCNT/CF 혼입 발열 복합재료 시스템의 발열 성능을 확인하였다.

2. 실험계획

2.1 재료 및 시편 제작

본 연구에서 발열 복합재료를 제조하기 위해 사용된 재료와 배합비는 Table 1과 같다. 1종 보통 포틀랜드 시멘트 (SsangYong Cement Co. Ltd., Republic of Korea)와 주문진 표준사 (Jumunsin standard sand, Republic of Korea), 물을 각각 2:3:1 비율로 믹싱하여 제조되었다. 또한, 발열 복합재료는 전도성 필러인 CF (Ace C & Tech Co., Ltd., Republic of Korea)와 MWCNT (Kumho Chemical Inc., Republic of Korea)를 각각 바인더의 0.5 wt.%와 1.0 wt.%의 비율로 혼입하여 안정적인 전기 전도성 경로를 확보하고자 하였으며, 이는 하나의 필러만을 사용할 때에 비하여 더 낮은 전기적 저항을 가질 수 있는 복합재료의 제작을 위함이었다 (Park et al., 2019; Tafesse et al., 2023; Yoon et al., 2024). 또한 전도성 필러의 모재 내 고른 분산을 위한 분산재로서 실리카 폼 (Elkem Inc., Republic of Korea)과 폴리카르본산계 감수제 (Superplasticizer, SP; Dongnam Co. Ltd, R

epublic of Korea)를 각각 10 wt.%와 1.0 wt.%로 혼입하였다 (Jang et al., 2022).

Table 1. Mix proportion of normal mortar and heating composite (wt.%)

재료	시편	구성비율
시멘트		100
잔골재		150
실리카 폼		10
MWCNT		1.0
CF (10 mm)		0.5
물		50
SP		1.0

시멘트와 잔골재, 전도성 필러인 MWCNT와 CF를 넣어 1분간 건비빔을 실시한 후에 물과 SP를 추가하여 5분 동안 추가로 비빔을 진행하였다. 전기적 저항을 측정하기 위해 ASTM C 109 규격에 따른 50 x 50 x 50 mm 몰드에 복합재료를 타설한 후 밀봉하여 상온 24시간 경화 후, 상온에서 밀봉하여 13일간 경화하였다 (Ki, et al., 2019). 발열에 사용한 시편은 상온에서 밀봉하여 24시간 경화 후, 40° C 온도로 대기노출 상태로 13일간 경화하였다. 50 x 50 x 50 mm³ 시편도 이와 동일한 조건으로 양생하였다. 전기 저항을 측정하기 위한 시편에서, 전극과 복합재료 사이의 접촉저항과 전극의 산화를 최소화하기 위해 실버 페이스트를 길이 70 mm, 폭 20 mm의 구리 전극에 도포하였으며, 실버 페이스트가 도포된 구리 전극은 깊이 50 mm, 전극 간격 20 mm로 시편에 각각 두 개씩 삽입되었다 (Jang et al., 2023b). 또한, 발열을 위한 시편에서도 동일하게 구리 전극에 실버 페이스트를 도포하여 시편에 삽입하였으며, 깊이 20mm로 시편에 여덟 개가 삽입되었다. 발열 실험에 사용한 시편의 디자인 및 규격은 Fig. 1에 나타내었다. 시편 제작을 위한 몰드는 3D 프린터 (3dWoX 2X; Sindoh, Republic of Korea)를 활용하여 출력하였으며, 몰드 주원료는 폴리락타이드 (Polylactic acid)로 제작하였다.

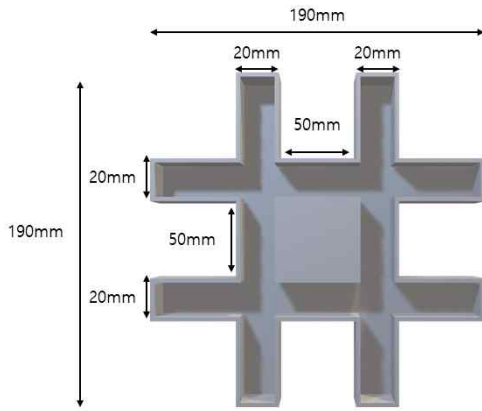


Figure 1. Specimen design and specifications used in heat generation test

2.2 실험방법

2-프로브 디지털 멀티미터 (FLUKE-116, Fluke Co., USA)를 이용하여 제조된 시편의 전기적 저항을 측정하였으며, 측정된 저항을 통해 시편의 비저항을 도출할 수 있었다 (Bang et al., 2021).

발열 복합재료의 발열 성능을 평가하기 위해 k-type thermocouple과 데이터 로거 (34972A, Agilent Technologies, USA)를 사용하여 시편의 발열 성능을 확인했다 (Yoon et al., 2024). 발열 실험은 파워 서플라이어 (PL-3005S, Agilent Technologies, USA)를 이용해 25V의 DC 전압을 50분 동안 시편에 정적으로 인가하여 온도 증가를 확인하는 방식으로 진행되었다. 전압을 한 쌍의 +극과 -극으로 인가한 1 way 발열 실험과 두 쌍의 +극과 -극으로 인가한 2 way 발열 실험으로 나누어 발열 실험을 진행하였으며, 실험 중 시편의 전류와 시편의 표면 온도를 0.2 Hz로 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 전기 저항

전도성 복합재료의 양생 기간에 따른 전기적 비저항 측정결과는 Fig. 2에 나타내었다. 상온 양생과 40° C 온도에서 양생이 진행되는 모든 기간에서 시편의 전기적 비저항은 약 $140 \pm 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 로 안정적으로 유지되는 것으로 확인되었다. 시편의 전기적 저항을 측정하는 과정에서 발생하는 노이즈로 인한 오차 발생을 막기 위하여, 총 6개의 시편을 제작하여 평균과

분산을 확인하였다.

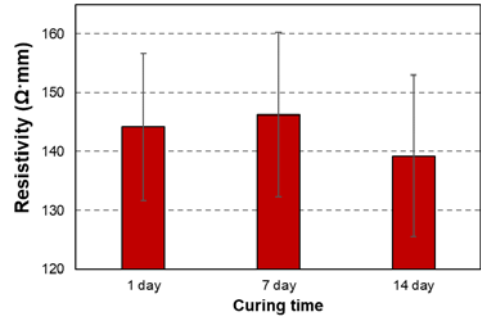


Figure 2. Electrical resistivity results of heating composite according to the curing days

3.2 발열 실험 결과

전도성 필러가 혼입된 발열 복합재료의 전극 위치와 발열 중 온도를 측정하기 위한 k-type thermocouple이 부착된 위치는 Fig. 3에 나타내었다. 시편에는 총 8개의 전극이 시편의 가장 바깥 부분에 삽입되었으며, k-type thermocouple은 그리드 형태의 복합재료가 교차하는 부분에 총 4개가 부착되었다.

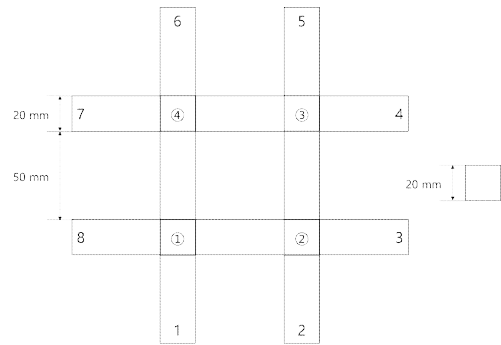
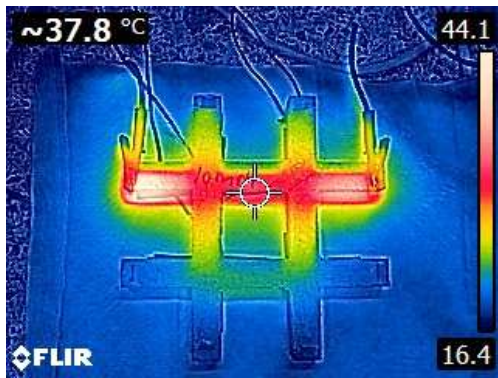


Figure 3. Schematic of electrode placement and k-type thermocouple positions

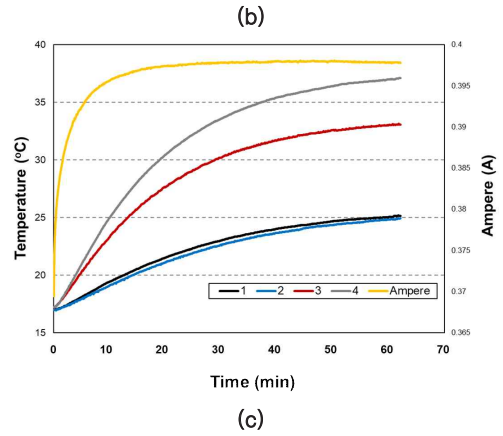
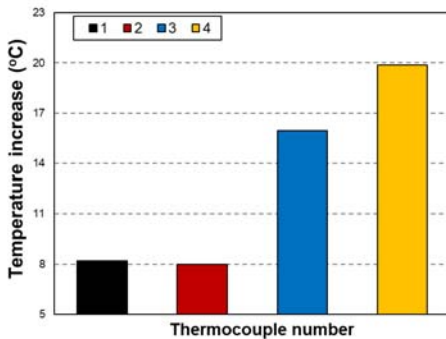
Fig. 4 (a)에서는 각각 +극과 -극 한 쌍을 7번과 4번 전극에 인가한 1 way 발열 실험의 종료 이후 열 분포를 열화상 카메라를 사용하여 확인하였다. 발열 실험 중 각 thermocouple이 부착된 지점의 온도 증가량은 Fig. 4 (b)와 같았다. 실험이 진행되는 동안의 전류와 온도의 변화는 Fig. 4 (c)에 그래프를 통해 확인할 수 있다. 발열 지점인 7번과 4번 전극 사이의 ③, ④번 thermocouple에서는 최대 약 20° C, 최소 약 15° C의 온도를

확인할 수 있었으나, 발열 지점에서 멀리 떨어진 ①, ②번 thermocouple에서는 약 8°C의 온도 증가만을 확인할 수 있었다. 또한, 시편에 정적 전압 25 V를 인가하는 동안 전류가 비선형적으로 증가한 후에 안정적으로 전달되는 결과를 관찰할 수 있었는데 이는 시편의 전기적 저항이 시편의 발열로 인한 팽창을 통해 감소하는 경향을 보인 것으로 사료된다 (Kim et al., 2016).

한편, Fig. 5 (a)에서는 두 쌍의 +극을 7번과 8번 전극에, -극을 3번과 4번 전극의 인가한 발열 실험 종료 이후 열 분포를 열화상 카메라를 사용하여 확인하였다. +극과 -극을 한 쌍 사용한 1 way 발열 실험과 비교하여 상대적으로 시편 전체에 고른 발열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 교차지점의 온도 증가량을 확인한 결과는 오히려 1 way 실험에 비해 2 way 실험에서 온도 증가량이 감소하는 결과를 확인하였다 (Fig. 5 (b)). 또한 Fig. 5 (c)의 결과에서는 8번 전극과 3번 전극 사이에 흐르는 전류 값이 거의 확인되지 않았다. 이러한 결과는 전도성 필러의 불균일한 분포로 인해 저항의 차이가 발생하였고, Ohm's law에 의해 저항이 상대적으로 낮은 부분으로 다량의 전류가 흘렀기 때문으로 예상된다 (Kim et al., 2016).



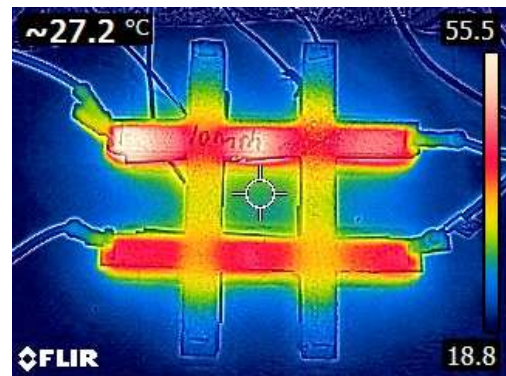
(a)



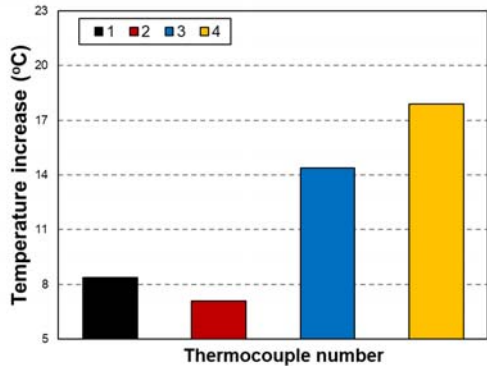
(c)

Figure 4. 1-Way heating results: (a) thermal Image, (b) temperature Increase, and (c) temperature and current changes during the heating test

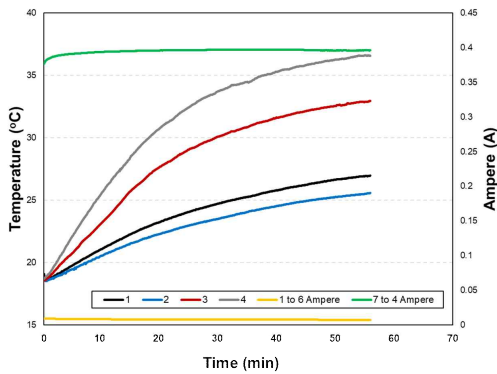
본 연구에선 결과적으로 하나의 시스템을 연속적인 발열 복합재료로 구성하여 더 많은 전력원을 투입하여 발열을 진행하더라도 더 많은 열량을 얻기에는 요원하다는 사실을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한 두 발열 실험 모두에서 상대적으로 전자가 많이 물리는 전극의 근처에서 발열이 집중적으로 발생하는 현상을 관찰할 수 있었으며, 전력원이 상대적으로 많은 2 way 발열 실험에서 전극 근처에서의 최고 온도가 더 높다는 결과를 확인하여 전력과 발열의 비례 관계를 실험적으로 확인하였다.



(a)



(b)



(c)

Figure 5. 2-Way heating results: (a) thermal Image, (b) temperature Increase, and (c) temperature and current changes during the heating test

4. 결론

본 연구에서는 전도성 필러를 혼입한 시멘트 기반 발열 복합재료의 전기적 및 발열 성능을 평가하였다. 양생 기간에 따른 전기적 저항을 디지털 멀티미터를 활용해 2-프로브 방식으로 측정하였으며, 그리드 형태의 발열 복합재료의 발열 성능을 데이터 로거와 k-type thermocouple, 파워 서플라이어를 활용해 조사하였다. 본 연구에서 확인한 주된 내용은 다음과 같다.

1) MWCNT와 CF를 혼입한 발열 복합재료는 양생 기간 동안에 비저항 변화가 안정적이었으며, 실험동안 안정적인 전기 전도성을 유지하였다.

2) 1 way 발열 실험에서 발열 지점에 가까운 곳에서는 최대 20° C의 온도 상승이 관찰되었으나, 거리가 멀어질수록 온도 상승 폭이 감소하는 경향이 있었다. 또한, 2 way 발열 실험에서는 전체적으로 균일한 발열이 관찰되었으나, 교차 지점의 온도 상승이 상대적으로 감소하였다.

3) 두 발열 실험 모두에서 전력의 집중에 따라 특정 전극 근처에서 발열이 집중되는 현상이 나타났다으며, 전력과 발열의 비례 관계를 실험적으로 확인하였다.

본 연구는 스마트 도로 및 제설 시스템의 발열 복합재료 설계에 있어 새로운 접근 방식을 제안하며, 전도성 필러의 적절한 활용을 통해 효율적인 발열 시스템을 구현할 수 있는 가능성을 확인하였다. 향후 연구에서는 다양한 조건에서의 장기적인 성능 평가와 더불어, 실제 적용을 위한 경제성 분석이 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (2020R1C1C1005063).

REFERENCES

Seo, J., Jang, D., Yang, B., Yoon, H. N., Jang, J. G., Park, S., & Lee, H. K. (2022). Material characterization and piezoresistive sensing capability assessment of thin-walled CNT-embedded ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 134, 104808.

Jang, D., Bang, J., & Jeon, H. (2023). Impact of silica aerogel addition on the electrical and piezo-resistive sensing stability of CNT-embedded cement-based sensors exposed to varied environments. *Journal of Building Engineering*, 78, 107700.

Barri, K., Zhang, Q., Kline, J., Lu, W., Luo, J., Sun, Z., ... & Alavi, A. H. (2023). Multifunctional Nanogenerator-Integrated Metamaterial Concrete Systems for Smart Civil Infrastructure. *Advanced Materials*, 35(14), 2211027.

- Wang, X., Dong, S., Ashour, A., & Han, B. (2021). Energy-harvesting concrete for smart and sustainable infrastructures. *Journal of Materials Science*, 56, 16243-16277.
- Li, Y., Liu, Y., Jin, C., Mu, J., & Liu, J. (2023). Research on mechanical and electromagnetic shielding properties of cement paste with different contents of fly ash and slag. *NDT & E International*, 133, 102736.
- Ma, C., Xie, S., Wu, Z., Si, T., Wu, J., Ji, Z., & Wang, J. (2023). Research and simulation of three-layered lightweight cement-based electromagnetic wave absorbing composite containing expanded polystyrene and carbon black. *Construction and Building Materials*, 393, 132047.
- Wang, X., Wu, Y., Zhu, P., & Ning, T. (2021). Snow melting performance of graphene composite conductive concrete in severe cold environment. *Materials*, 14(21), 6715.
- Takikawa, H., Ikeda, M., Hirahara, K., Hibi, Y., Terao, Y., Ruiz Jr, P. A., ... & Iijima, S. (2002). Fabrication of single-walled carbon nanotubes and nanohorns by means of a torch arc in open air. *Physica B: Condensed Matter*, 323(1-4), 277-279.
- Jang, D., Yoon, H. N., Farooq, S. Z., Lee, H. K., & Nam, I. W. (2021). Influence of water ingress on the electrical properties and electromagnetic sensing capabilities of CNT/cement composites. *Journal of Building Engineering*, 42, 103065.
- Lee, G. C., Kim, Y., Seo, S. Y., Yun, H. D., & Hong, S. (2021). Influence of CNT Incorporation on the Carbonation of Conductive Cement Mortar. *Materials*, 14(21), 6721.
- Kim, G. M., Naeem, F., Kim, H. K., & Lee, H. K. (2016). Heating and heat-dependent mechanical characteristics of CNT-embedded cementitious composites. *Composite Structures*, 136, 162-170.
- Hambach, M., Möller, H., Neumann, T., & Volkmann, D. (2016). Carbon fibre reinforced cement-based composites as smart floor heating materials. *Composites Part B: Engineering*, 90, 465-470.
- Jang, D., Bang, J., Yoon, H. N., Seo, J., Jung, J., Jang, J. G., & Yang, B. (2022). Deep learning-based LSTM model for prediction of long-term piezoresistive sensing performance of cement-based sensors incorporating multi-walled carbon nanotube. *Computers and Concrete*, 30(5), 301.
- Park, H. M., Park, S. M., Lee, S. M., Shon, I. J., Jeon, H., & Yang, B. J. (2019). Automated generation of carbon nanotube morphology in cement composite via data-driven approaches. *Composites Part B: Engineering*, 167, 51-62.
- Tafesse, M., Alemu, A. S., Yang, B., Park, S., & Kim, H. K. (2023). Crack monitoring strategy for concrete structures in various service conditions via multiple CNT-CF/cement composite sensors: Experiment and simulation approaches. *Cement and Concrete Composites*, 143, 105249.
- Yoon, H. N., Jang, D., & Yang, B. (2024). Experimental investigations on self-heating capability of cement composites incorporating CNT and CF: Impact of sample size and electrode spacing. *Case Studies in Construction Materials*, e03414.
- Kim, G. M., Nam, I. W., Yang, B., Yoon, H. N., Lee, H. K., & Park, S. (2019). Carbon nanotube (CNT) incorporated cementitious composites for functional construction materials: The state of the art. *Composite Structures*, 227, 11244.
- Jang, D., Yoon, H. N., Seo, J., Yang, B., Jang, J. G., & Park, S. (2023). Effect of carbonation curing regime on electric heating performance of CNT/cement composites. *Journal of Building Engineering*, 73, 106815.
- Bang, J., Park, H. M., & Yang, B. (2021). Repetitive heating performance of MgO-activated ground granulated blast furnace slag composites containing MWCNTs. *Functional Composites and Structures*, 3(1), 015003.
- Yoon, H. N., Bang, J., Jang, D., & Yang, B. (2024). Investigation on NTC/PTC effects of cement-based self-heating composites with varied conductive filler contents. *Developments in the Built Environment*, 18, 100416.
- ASTM C 109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), 2009 Annual Book of ASTM Standards, ASTM,