



탄소계 재료 혼입 전도성 시멘트 복합체

Electrically Conductive Cement Composites Incorporating Carbon Materials

남일우 Il-Woo Nam
KAIST 건설 및 환경공학과 박사후연구원

김형기 Hyeong-Ki Kim
조선대학교 건축학부 조교수

1. 머리말

콘크리트는 대표적인 시멘트 기반 복합재료로 천년이 넘는 시간 동안 인류의 활동에 필요한 건축물 또는 사회기반시설물에 사용된 주요 건설재료 중 하나이다. 콘크리트는 높은 기계적, 내구적, 경제적 특성으로 해당 성능이 요구되는 건축물, 사회기반시설물에 널리 사용되고 있으며, 앞으로도 그 활용성의 정도와 다양성은 증대될 것으로 전망된다.

콘크리트는 오래전부터 높은 기계적 특성을 강조하며 사용되었지만 20세기 후반부터는 콘크리트 또는 시멘트기반 재료에 전도성을 부여하여 다목적성의 특성을 강조하며 활용하고자 하는 노력이 시작되었다¹⁾. 전도성 시멘트 복합체를 접지재료, 전자파 차폐재료, 정전지 방지재료 등으로 사용코자 했던 것이 그 대표적 예이다^{1,5)}.

콘크리트를 포함한 시멘트 기반 복합체에 전도성을 부여하는 방법은 주로 전도성 충전재를 혼입하는 방식이며, 전도성 충전재에는 크게 금속재료와 탄소재료가 있다. 대표적인 금속계 충전재에는 철, 니켈, 알루미늄 등이 있으며, 분말형태, 섬유형태, 알갱이 형태 등으로 혼입된다. 탄소계 충전재에는 흑연분말, 카본블랙, 탄소섬유, 박리흑연, 탄소나노튜브 등이 있으며, 각 재료별로 입경(또는 직경), 길이가 다양하다.

본 기사에서는 이 두 가지 전도성 충전재 중 탄소계 충전재를 사용한 전도성 시멘트 복합체에 대해 소개하고자 한다. 금속계 재료 못지 않은 전도성을 지니는 탄소계 충전재는 시중에 유통되는 전도성 시멘트 복합체 제품에도 활용될 정도로 실용성이 높을 뿐만 아니라 금속계 충전재 혼입시 우려될 수 있는 중량성, 부식성의 문제가 없고 상대적으로 복합체 혼입에 유리하다는 이점으로 시멘트 복합체로 사용되기에 적합하다. 따라서 본 기사에서는 시멘트 기반 복합체에 사용될 수 있는 탄소계 충전재의 종류와 특성을 알아보고 탄소계 재료가 혼입된 시멘트 복합체의 전기적 특성, 기계적 특성, 그리고 복합체의 활용처에 대해 논하고자 한다.

2. 탄소계 전도성 충전재의 종류와 특성

복합체의 충전재로 사용하는 탄소재료에는 흑연분말, 카본블랙, 탄소섬유, 카본필라멘트, 탄소나노튜브 등<그림 1>이 있으며, 이 탄소재료들을 제조하는데 사용되는 흑연은 <그림 2>와 같이 탄소 육각면체가 적층체 결정자로 이루어져 있다²⁾. 흑연의 기본결정인 육각면체는 층과 층 사이에 반데르발스(van der Waals) 인력과 같은 약한 물리적 힘이 작용하지만 층 내의 탄소원자 사이에는 강한 탄소-탄소 공유결합을 형성한다²⁾. 층 사이에 존재하는 약한 반데르발스 인력은

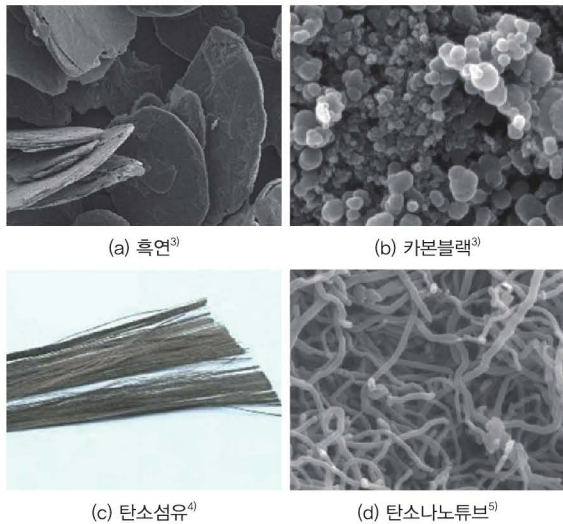


그림 1. 여러 종류의 탄소재료

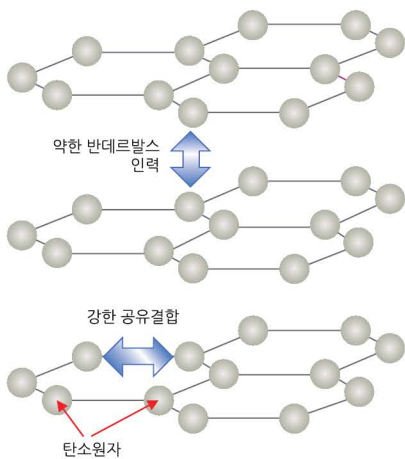


그림 2. 탄소재료의 원재료인 흑연의 적층체 결정자²⁾

탄소재료가 유연한 특성을 갖도록 하며, 탄소원자 사이에 존재하는 강한 공유결합은 육각면체의 2차원적 평면 방향으로 높은 기계적 특성을 갖도록 한다²⁾. 또한 탄소원자 내 체외각 전자의 이동 특성으로 인해 높은 전기적 특성을 보이게 된다.

〈표 1〉에는 건설재료의 충전재로 사용할 수 있는 탄소 재료를 나열하였으며, 이 탄소재료의 형태, 크기 그리고 시멘트재료에 혼입되어 복합체를 이루는 경우의 전기전도도를 비교하였다^{6~15)}. 전도성 시멘트 복합체 또는 콘크리트를 제조하기 위해서 전통적으로 흑연분말이나 카본블랙을 자주 혼입하였으나 근래 다양한 형태의 탄소재료가 개발됨에 따라 탄소필라멘트, 박리흑연, 탄소나노튜브, 그래핀 등이 혼입재료로 사용되고 있다.

흑연분말과 카본블랙은 0.1~1S/m의 전기전도도를 달성하기 위해 10~50 Vol.%까지 시멘트 복합체에 다량 혼입되었던 것에 반해 높은 형상비(aspect ratio)로 인해 고전기전도도를 가지는 탄소섬유나 탄소나노튜브는 1Vol.% 내외의 적은 혼입량에서도 1S/m 정도의 전기전도도를 달성할 수 있었다⁷⁾.

3. 탄소계 전도성 충전재를 혼입한 시멘트 복합체의 기계적 특성

탄소 재료는 미립자형태 또는 섬유형태, 미세한 섬유 다발의 형태로 존재하며, 이러한 탄소재료의 물리적 특성을 효과적으로 발현하기 위해서는 시멘트 모재 내 균

표 1. 여러 종류의 탄소재료와 시멘트 복합체에 혼입되는 경우의 전기전도도

재료	형태	크기	전기적 특성 (전기적 특성 및 혼입 부피비)
흑연분말	육각면체가 겹겹이 쌓여있는 구조이며, 덩어리 형태	직경 수 μm ~ 수십 μm 까지 가공	0.21 S/m ⁶⁾ 37 Vol.%
카본블랙	구상입자가 뭉쳐진 형태	10 ~ 500 μm 다양함 ⁷⁾	0.91 S/m 11.39 Vol.% ⁸⁾
탄소섬유	단면이 원형인 가는 실	직경 5 ~ 7 μm ²⁾ 길이 5 mm 이상	0.56 S/m 1 Vol.%(길이 10mm) ⁹⁾
탄소필라멘트	단면이 원형인 가는 실	직경 0.1 μm , 길이 100 μm 이상 ¹⁰⁾	8.26×10^{-3} S/m 1 Vol.% ¹⁰⁾
박리흑연 (Exfoliated Graphite)	수겹의 얇은 평판이 적층된 형태	두께 약 20 nm, 직경 수 μm ~ 수백 μm ¹¹⁾	0.01 S/m 3.6 Vol.% ¹²⁾
탄소나노튜브	단면이 원형인 가는 실	직경 1 ~ 수십 nm 길이 100 nm 이상 ¹³⁾	0.77 S/m 0.53 Vol.% ¹⁴⁾
산화그래핀	얇은 판상	두께 0.34 nm ¹⁵⁾	2.94 S/m 6.5 Vol.% ¹⁵⁾

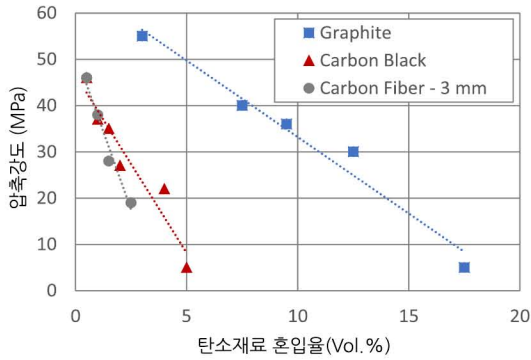


그림 3. 흑연분말, 카본블랙, 탄소섬유를 시멘트에 단순혼입하여 제조한 복합체의 압축강도 비교¹⁶⁾

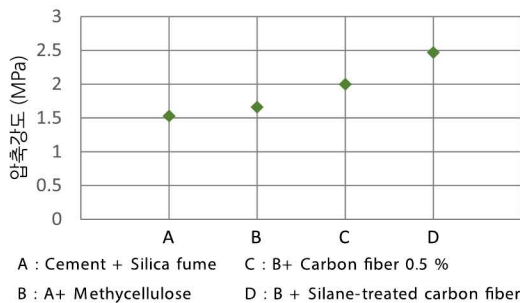


그림 4. 일반 시멘트 모재와 화학첨가제 또는 표면이 개질된 섬유를 혼입한 시멘트 복합체의 인장강도 비교¹⁷⁾

일한 분산이 중요하다. 탄소섬유의 경우 분산성을 향상시키기 위해 Methycellulose와 같은 화학첨가제를 혼입하거나 실리카 폼을 혼입하여 분산성을 높이기도 하였다. 또한 근래에 혼입재료로 자주 사용되는 마이크로 또는 나노 재료들은 특유의 뭉침현상을 방지하기 위해 별도의 분산과정을 거치기도 한다. 탄소나노튜브나 그래핀과 같은 나노재료들은 적절한 분산과정을 거치지 않을 경우 모재내에 과도하게 탄소나노재료가 뭉쳐져 전기적 또는 기계적 특성을 효과적으로 발현하지 못하게 된다. 이 분산의 문제를 해결하기 위해 흔히 탄소나노재료를 물에 혼입한 뒤 계면활성제(분산제)와 함께 초음파소니



사진 1. 전도성 접지봉의 대지내 시공¹⁸⁾

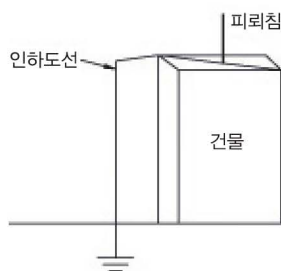


그림 5. 건물을 낙뢰로부터 보호하기 위한 피뢰침의 접지¹⁸⁾

케이션 과정을 1~2시간 거치는 것이 일반적이다^{12~14)}.

탄소재료를 혼입하여 제조한 시멘트 복합체의 기계적 특성을 탄소재료의 혼입량에 따라 <그림 3>에 도시하였다¹⁶⁾. 흑연분말, 카본블랙, 탄소섬유가 각각 혼입된 시멘트 복합체에서 모두 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 것을 알 수 있었다¹⁶⁾. 그러나 <그림 4>에서는 탄소섬유가 화학첨가제나 표면개질을 통하여 시멘트 복합체 내에서 보강섬유 역할을 하는 것을 알 수 있다. <그림 3>의 탄소재료 혼입 복합체에서는 탄소재료가 특유의 소수성(hydrophobic nature)으로 인해 시멘트 페이스트 모재와 쉽게 접촉될 수 없었던 반면 <그림 4>의 탄소섬유들은 화학첨가제와 섬유의 표면개질을 통하여 친수성(hydrophilic nature)을 확보함으로써 섬유와 모재 간의 접촉이 가능했던 것으로 분석된다¹⁷⁾.

4. 활용처

4.1 전도성 접지봉

탄소계 재료 혼입 전도성 시멘트 복합체는 산업과 생활에 밀접한 여러 가지 용도로 사용될 수 있으며, 그 대표적인 것 중의 하나가 전도성 접지재료이다. 접지(Grounding)라 함은 전기/전자 설비에 유해한 이상 전류가 흐르는 것을 방지하기 위하여 유입전류가 대지를 통하여 방전될 수 있도록 해당 전기/전자 설비와 대지를 전기적으로 접속하는 과정을 말한다<사진 1>¹⁾.

전도성 접지재료는 발전소 및 송·변전소 내 접지, 송전 철탑 및 배전 전주의 접지, 이동통신 중계소 등의 건물 기초 통신접지, 전력기기 고·전압기기, 피뢰침 접지<그림 5>, 해중방식(海中防蝕) 전극 접지 등으로 사용된다¹⁸⁾. 과거에는 전도성 접지재료에 염분이나 숯을 혼입하여 저항을 감소시켰으나 접지전극 부식 및 낮은 접지저항 감소정도 등의 문제점이 존재하였다. 이에 따라 전도성과 내후성이 좋은 탄소섬유, 흑연 등이 혼입된 전도성 시멘트 복합체 접지 재료가 개발되었으며, 개발된 복합체는 접지를 위해 매립되어지는 대지(토양)와 용화가 쉽고 부식의 우려가 없어 반영구적인 접지효과로 붕괴 판 형태로 제작되어 시중에 유통되고 있다¹⁸⁾.

4.2 전자파 차폐재료

다양한 종류의 전기·전자 기기가 산업과 일반 사무·가정 생활 전반의 영역에서 빈번히 사용되고 있으며, 전기·전자 기기에서 발생하는 전자파는 전자파 간섭과 인체 유해성의 문제로 사회적 논란과 피해를 야기하고 있다¹⁹⁾. 전자파로 인한 인체 유해성의 문제는 현재까지도 과학적 근거가 부족하여 논란의 여지가 다분히 존재하지만 국민적 우려로 인한 사회적 갈등을 불러일으키는 요인이 되고 있음에는 논란의 여지가 없다. 외부로부터 유입되는 전자파의 차폐는 전도성 전자파 차폐재료로 전자파의 유입을 밀실하게 차폐함으로써 가능하다. 지금까지 전자파 차폐재료는 뛰어난 전기 전도성을 띠는 금속재료를 기반으로 패널형태, 직물형태, 개스킷 구조 등으로 제조되었으나 두꺼운 금속 패널의 경우 과도한 중량, 부식의 우려, 고비용 등의 문제가 존재하였다. 그러나 탄소재료를 기반으로 제조한 전도성 시멘트 복합체를 활용하여 전자파 차폐재료를 제조할 시 금속재료 기반 전자파 차폐재료보다 내식성, 내후성, 경제성의 확보가 가능하다.

현재 주요 전기·전자 설비의 전자파 간섭으로부터의 보호를 위한 목적으로 전자파 차폐재 사용의 규제화가 진행되고 있는 상황임을 고려할 때, 전도성 시멘트 복합체 기반 전자파 차폐재를 비롯한 전자파 차폐재료의 사용이 증가할 것으로 전망된다.

4.3 압력/손상 센서

2000년대부터 구조물 내의 재료가 주변의 환경변화를 스스로 감지하여 사용자에게 위험성을 사전에 인지시키는 센싱재료에 대한 관심이 증대되기 시작하였다. 이는 간헐적으로 구조물 평가장비(초음파, 음파, 비전 기반)를 이용하여 구조재료의 건전성을 평가하던 방식과는 달리 센서가 구조물 내에 정착 또는 매립되어 재료 자체가 구조재료의 상태를 평가(Self-sensing)한다는 측면에서 차이점이 있다. 이러한 자기센싱(Self-sensing) 재료는 센서 재료 내 전도성 네트워크가 구조물 내의 응력 변화 및 손상으로 인해 변화하는 특성을 이용하여 구조재료의 변화를 감지한다. 즉, 콘크리트보다도 전기전도도가 수십배 이상 큰 탄소계 재료 혼입 전도성 시멘트 복합체를 센서형태로 제작하여 콘크리트 모체에 삽입하게 되면 구

조물에 응력변화 또는 균열이 발생 시 복합체의 전기적 특성 변화를 가져와 이를 감지하여 보수의 필요여부를 판단할 수 있다(그림 6).

대표적인 구조물 건전성 평가 기법에는 광섬유 센서, 초음파 및 음파 측정 등의 방식이 있는데, 이 중 많은 연구가 진행된 광섬유 센서는 콘크리트 모체와의 일체가 어렵고 센서 매립을 위해 콘크리트에 손상을 야기할 수 있는 문제가 있었다. 또한, 초음파 및 음파 측정기법은 넓은 면적의 건전성을 모니터링하기에 어렵다는 문제가 있었다. 그러나 자기센싱 기법은 대면적의 건전성 평가가 가능하고 센서 매립에 따른 손상발생도 최소화할 수 있어 앞서 열거한 건전성 평가 기법들의 단점들을 해결할 수 있을 것으로 전망되고 있다.

이 외에도 탄소계 재료 혼입 전도성 시멘트 복합체는 용설 등의 목적을 위한 발열체, 철근부식 방지 목적의 전기전해질 재료, 정전기 방지 재료 등으로 활용이 가능하다.

5. 맺음말

최근의 토목 및 건축구조물은 고유의 구조적 성능뿐만 아니라 여러 목적으로 인한 다기능성이 요구되고 있으며, 이를 위한 특수 건설재료의 필요성은 점차 확대되고 있다. 특히, 탄소 혼입 시멘트 복합체는 금속과 전도성 폴리머에 비해 높은 내구성을 갖는 전도성 재료로서 활용이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 최근 개발 중인 스마트 하이웨이, 스마트 빌딩 등의 첨단 구조물에 적용이 가능할 것으로 예상된다. 새로운 소재는 항상 필요에 의해서만 개발되지는 않는다. 신소재가 개발된 후 이에 대한 활용처가 추후에 발견되는 예도 공학의 역사에서는

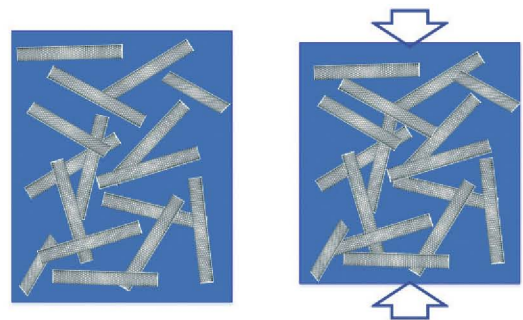



그림 6. 응력/손상 감지 센서의 기본 원리

적지 않다. 3M의 포스트잇이 바로 대표적인 예이다²⁰⁾. 그런 의미에서 아직 활용처가 다양하지 않은 탄소계 재료 혼입 전도성 시멘트 복합체 역시 무한한 가능성을 가진 재료라고 할 수 있다. 본 기사가 전도성 시멘트 복합체 소재기술 자체의 발전뿐만 아니라 새로운 기술 활용 분야를 모색할 수 있는 하나의 계기가 되기를 바란다.

한편, 탄소나노튜브 및 그래핀 등과 같은 탄소나노계 물질을 혼입한 시멘트 복합체의 경우 소재기술의 개발로 인해 생산단가가 떨어져 빠른 시일 내에 경제성 있는 제품의 생산이 가능할 것으로 예측되나 아직 인체유해성 등에 대한 문제가 해결되지 않았기 때문에 대량 활용에 관해서 추가적인 연구결과가 뒷받침 되어야 한다²¹⁾. 

담당 편집위원 : 강석표(우석대학교) ksp0404@empal.com



남일우 박사후연구원은 KAIST 건설 및 환경공학과에서 학부를 마친 후 동 대학교 대학원에서 '탄소나노튜브를 혼입한 시멘트 복합체의 전자파 차폐/흡수 특성'에 관한 연구로 박사 학위를 취득하였고, 현재 KAIST 건설 및 환경공학과에서 박사후연구원으로 재직 중이다. 주 관심 분야는 탄소재료 활용 가능성 시멘트(또는 고분자) 복합체이다.
namiru@kaist.ac.kr



김형기 조교수는 KAIST에서 '석탄 바닥재를 활용한 고성능 콘크리트의 내부양생(internal curing)과 염소침투 저항성 개선'에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 현재 조선대학교 건축학부(건축공학전공) 조교수로 재직 중이다. 주 관심 분야는 부산물 골재 대량 활용기술, 탄소나노튜브(CNT)/시멘트 복합재료 등이다.
hyeongki@chosun.ac.kr

참고문헌

1. 강석화, 전기전도성 콘크리트, 한국콘크리트 학회지, Vol. 10, No. 6, 1998, pp. 34 ~ 40.
2. 서민강, 박수진, 탄소섬유 제조방법 및 응용분야, Polymer Science and Technology, Vol. 21, No. 2, 2010, pp. 130 ~ 140.
3. [http://www.eaglegraphite.com/operations/photo-](http://www.eaglegraphite.com/operations/photo-gallery/)

- gallery/
4. <http://www.microflight.com/Carbon-Tow-6K-6000-strand>
5. <http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-polymer-nanocomposites/the-application-of-carbon-nanotube-to-bone-cement>
6. Wen, S and Chung, D.D.L., "Thermoelectric behavior of carbon-cement Composites", Carbon, Vol. 40, No. 13, 2002, pp. 2,495 ~ 2,497.
7. International Carbon Black Association, Particle properties of carbon black, 2013.
8. Li, H., Xiao, H. and Ou, J., "Effect of Compressive Strain on Electrical Resistivity of Carbon Black-filled Cement-based Composites", Cement and Concrete Composites, Vol. 28, No. 9, 2006, pp. 824 ~ 828.
9. Wen, S. and Chung, D.D.L., "Double Percolation in the Electrical Conduction in Carbon Fiber Reinforced Cement-based Materials", Carbon, Vol. 45, No. 2, 2007, pp. 263 ~ 267.
10. Fu, X. and Chung, D.D.L., "Submicron-diameter-carbon-filament Cement-matrix Composites", Carbon, Vol. 36, No. 4, 1998, pp. 459 ~ 462.
11. Chen, P. H. and Chung, D.D.L., "Thermal and Electrical Conduction in the Compaction Direction of Exfoliated Graphite and their Relation to the Structure", Carbon, Vol. 77, 2014, pp. 538 ~ 550.
12. Chen, P. H. and Chung, D.D.L., "Comparative Evaluation of Cement-matrix Composites with Distributed Versus Networked Exfoliated Graphite", Carbon, Vol. 63, 2013, pp. 446 ~ 453.
13. Lee, S. H., Lee, D. H., Lee, W. J., Kim, S. O., "Tailored Assembly of Carbon Nanotubes and Graphene", Advanced Functional Materials, Vol. 21, No. 8, 2011, pp. 1,338 ~ 1,354.
14. Li, G. Y., Wang, P. M., Zhao, X., "Pressure-sensitive Properties and Microstructure of Carbon Nanotube Reinforced Cement Composites", Cement and Concrete Composites, Vol. 29, No. 5, 2007, pp. 377 ~ 382.
15. Singh, A. P., Mishra, M., Chandra, A., Dhawan, S. K., "Graphene oxide/ferrofluid/cement Composites for Electromagnetic Interference Shielding Application", Nanotechnology, Vol. 22, No. 46, 2011, pp. 465 ~ 701.
16. 최길섭, 소양섭, '전기전도성 재료를 혼입한 시멘트 모르타르의 전기적 특성에 관한 연구', 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집(II), Vol. 12, No. 2, 2000, pp. 933 ~ 938.
17. Xu, Y. and Chung, D.D.L., "Carbon Fiber Reinforced Cement Improved by Using Silane-treated Carbon Fibers", Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 5, 1999, pp. 773 ~ 776.
18. 동양산전(주), <http://www.dymagic.com/index.html>
19. 김형기, 이행기, 전자파 차폐 건설 재료의 개발, 한국콘크리트 학회지, Vol. 20, No. 6, 2008, pp. 70 ~ 74.
20. https://en.wikipedia.org/wiki/Post-it_note
21. Dagani, R., "Nanomaterials: safe or unsafe?", Chemical & Engineering News, Vol. 81, No. 17, 2003, pp. 30 ~ 33.