

겨울철 블랙아이스 및 도로 결빙 대응을 위한 탄소나노튜브 기반 발열 코팅제 및 자동화 시스템 개발

Black ice free transport road coating system

장승환 | Sung-Hwan Jang | 한양대학교 건설환경공학과 조교수
정유진 | Yu-Jin Jung | 한양대학교 스마트시티공학과 석·박사통합과정
이승준 | Seung-Jun Lee | 한양대학교 건설환경공학과 석·박사통합과정
남상혁 | Sang-Hyeok Nam | ㈜이엔지소프트 대표(CTO)

1. 서론

국내외적으로 겨울철 눈, 비 등에 의한 도로 결빙으로 인해 많은 교통사고가 발생하고 있고, 그 중에서도 차량 운전자가 식별하기가 어려운 블랙아이스로 인한 차량사고의 위험성이 크게 대두되고 있다. 블랙아이스는 눈이나 비가 아스팔트 또는 콘크리트 도로 틈새로 스며들었다가 먼지 등과 섞여 도로 위에 얇게 얼어붙는 현상으로 이렇게 생성된 얼음은 주행 중인 운전자의 눈으로 발견하기 힘들다. 블랙아이스는 '조용한 암살자'라고 불리는 겨울철 운전자에게 주요 위협요인으로 인식되고 있으며, 최근 국내에서 벌어진 상주-영천 고속도로의 사례를 보면 겨울철 블랙아이스 및 도로 결빙에 대한 사고는 결코 무시할 수 없는 중요한 일이 되었음을 알 수 있다.

현재까지 국내외 정부 및 지자체 기관에서 겨울철 도로 결빙 방지를 위한 노력은 다소 수동적인 측면이 있다. 예를들면, 다양한 캠페인 등을 통해 운전자들의 차량 감속 운행을 유도하거나 차량 바퀴의 체인보강을 요청한다. 또는, 결빙이 예상되는 구간에 '결빙주의' 등의 표지판을 통해 운전자들에게 경고를 주기도 한다. 이러한 것들은 오직 운전자에게만 책임과 부담을 안겨 주고 있는 실정이라 이는 국가적으로 해결해야 하는 이슈라고 생각한다.

오늘날 대한민국은 '스마트 시티'로의 방향을 재설정하고 도시 인프라를 서로 잇고자 하는 큰 계획을 가지고 있다. 이러한 계획을 위해 첨단소재와 사물인터넷 등의 다양한 최신 기술들이 도시 인프라 내 다양한 요소에 적용되어야 하며, 뿐만 아니라 수십 년의 겨울철 유지관리 기술에 대해서도 역시 같은 노력이 필요할 것이다.



그림 1. 겨울철 도로 결빙에 따른 피해 사례

기계적 장비를 활용한 눈 제거	염화칼슘 등의 제설제 분산	열선 또는 열관 매입
		
장 점		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 많은 양의 눈을 제설 가능 ▪ 도로 상태에 따른 장비 적용가능 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 넓은 효과범위 ▪ 안정적 제설시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 안정적인 열전달 ▪ 도로 빙결에 신속한 대응
단 점		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 도로 훼손 ▪ 도로 결빙에 대한 대응이 느림 ▪ 비싼 초기 장비 비용 ▪ 과도한 운용인력 소요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 도로 및 주변 구조물 훼손 ▪ 환경 오염 유발 ▪ 과도한 운용인력 소요 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 낮은 에너지효율 ▪ 비싼 설치비 ▪ 고장에 따른 유지관리비용 증가 ▪ 기존 도로 훼손

그림 2. 다양한 결빙 제거 시스템 비교

2. 기존 도로 결빙 대응 방법의 특징

겨울철 블랙아이스 및 도로 결빙 방지를 위해 가장 보편적으로 사용되고 있는 방법은 기계적 장비를 활용한 물리적 제거 방법과 고체 혹은 액체로 구성된 염화칼슘(CaCl₂), 염화칼륨(KCl), 염화마그네슘(MgCl₂) 등을 도로에 뿌리는 화학적 제거 방법이다. 국내에는 주로 염화칼슘을 이용하여 어는점을 더욱 낮춰 블랙아이스를 지연시키는 방향으로 진행되고 있다. 하지만, 매년 필요한 염화칼슘의 양을 예측하고 구매하여 외부 창고에 보관하고, 트럭에 싣고 이동하는 등 수많은 운전기사와 인력들이 동원되는 등 상당한 사회적 비용이 요구되고 있다. 또한, 겨울철 도로 부근의 많은 양의 염화칼슘으로 인해 자연환경 훼손이 불가피한 상황이 나타나고 있고, 특히 차량 부식 등의 국민들의 사유재산에 직·간접적 피해 문제를 발생 시킨다.

근래에 들어 열선 또는 열관을 도로에 매설하는 방식의 연구 및 사업들을 볼 수 있지만, 이러한 방식은 지하에 매설되어 발생하는 뜨거운 열원을 이용하여 도로 상부까지 열이 전달이 되게 하는 방식으로 아스팔트 또는 콘크리트의 매우 낮은 열전도율을 고려하면 에너지효율의 문제가 발생하는 것이 자명하다. 또한, 기존의 도로를 다시 개복하는 방식이라 굴착 등의 많은 비용과 장시간의 공사시간이 발생하는 단점이 있다.

이와 같이 현재 사용되고 있는 블랙아이스 및 도로 결빙 방지기술의 단점들을 보완하고자 한양대학교에리카와 (주)이엔지소프트에서는 탄소나노튜브 기반 발열 도로 코팅제를 개발하여 도로의 블랙아이스 및 결빙 문제에 좀 더 적극적이고 효율적인 대응방안을 제시하고 있다. 이는 기존의 도로에 큰 손상 없이 빠르고 효율적인 블랙아이스 및 결빙 제거 시스템을 구축하여 겨울철 운전자들의 불안감을 제거하고 안전사고를 방지할 수 있도록 하는 데에 목적이 있다. 본 기술기사에서는 상기 연구개발 목적을 달성하기 위한 탄소나노튜브 발열 코팅제 제작과정부터 실험실 규모 실험을 진행하기까지의 연구과정과 코팅제의 발열 성능을 이용한 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템에 대해 소개한다.

3. 탄소나노튜브 기반 도로 발열 코팅제

한양대학교 ERICA에서 연구개발 중인 탄소나노튜브 기반 도로 발열 코팅제는 에폭시 등의 다양한 폴리머류에 탄소나노튜브를 분산하여 전도성을 가진 물질을 제조하고 줄히팅(저항열)을 통하여 도로 코팅제으로부터 열이 발생되게 하는 방식을 이용하고 있다. 이러한 기술은 최근 우주항공 및 재료 분야에 많은 시도가 되고 있고, 본 연구는 2019년 영국 교통국(Department for Transportation, DfT)의 Transport-Technology Research Innovation Grant (T-TRIG)와 2020년 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 개발 중에 있다.

그림 3은 탄소나노튜브 에폭시 복합체 제작과정을 나타낸다. 제작에 필요한 재료는 탄소나노튜브, 에폭시(폴리머), 아세톤이며, 아세톤은 반데르발스 힘으로 인해 큰 응집체로 존재하는 탄소나노튜브의 분산용 용매로 사용되었다. 먼저, 아세톤과 에폭시 레진을 섞은 후 일정량의 탄소나노튜브를 넣어 시료를 제작한다. 시료 내 탄소나노튜브의 반데르발스 힘을 최소화하기 위해 초음파 분산기를 이용하여 시료를 분산시키며, 분산 후 핫플레이트를 이용하여 시료 내 아세톤을 제거하고, 아세톤이 제거된 시료에 에폭시 하드너를 넣은 후 3롤밀을 이용하여 균일하게 혼합한다. 시료를 일정한 크기로 하고 진공건조기를 이용하여 시료 내 공극을 제거한다. 마지막으로 오븐을 이용하여 시료를 경화시켜 탄소나노튜브 에폭시 복합체를 제작하였다.

중형비가 큰 탄소나노튜브를 폴리머와 혼합하면 기계적 물성의 증가와 더불어 열적/전기적 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 높은 전기전도도를 갖기 위해서는 탄소나노튜브의 분산이 매우 중요한 변수로 작용되고 있다. 왜냐하면 탄소나노튜브 간의 반데르발스 힘으로 인해 폴리머 내에 분산이 쉽게 되지 않고 응집성을 보이기 때문이다. 그림 4는 탄소나노튜브가 폴리머 내에 분산된 상태를 보여주는 것으로 폴리머 내 탄소나노튜브가 잘 분산되고 네트워크를 형성하게되면 탄소나노튜브를 통해 전기가 통할 수 있다. 탄소나노튜브가 없거나 낮은 함량이 혼합된 폴리머의 경우에는 절연체로 매우 낮은 전기전도도를 가지게 되었지만 탄소나노튜브 함량이 증가할수록 전기전도도가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 현재 개발 중인 탄소나노튜브 에폭시 복합체의 전기 전도도는 $10^0 \sim 10^2$ S/m이다.

분산이 잘 된 탄소나노튜브 코팅제는 외부 전압 또는 전류가 가해졌을 때 줄히팅(저항열)의 원리에 따라서 열을 발산하는 성질을 가지며, 높은 전기전도도를 가진 탄소나노튜브 코팅제일수록 발열 시 외부의 전력을 최소한으로 사용할 수 있다. 줄히팅(저항열)은 저항체를 이용하여 전기에너지를 열에너지로 정량적으로 전환 할 수 있고, 줄히팅의 공식에 따라 코팅제에서 발생하는 열은 가해지는 전압에 비례하고 코팅제의 저항에 반비례를 한다. 그림 5는 탄소나노튜브 코팅제의 열적 성능을 나타내고 있는 것으로 외부에서 가해지는 전압이 커질수록 그리고 전기전도도가 높은 코팅제일수록 높은 열적 성능을 보여주고 있다.

제작된 탄소나노튜브 발열 코팅제를 실제 환경에 적용하기 위해 시편의 길이를 증가시켜 연구를 수행하였다. 한양대학교에 리카 캠퍼스 내 3m 길이와 폭 10cm를 직접 도포하고 영하의 온도에서 220V의 외부전압을 가하였다. 그림 6에서는 전압이 가해짐과 동시에 코팅제의 표면온도가 빠르게 상승하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 단 5분 이내로 영상의 온도 이상으로 도달하고 시간이 지날수록 코팅제 표면의 온도가 지속적으로 상승하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 염화칼슘 도포나 열선 및 열관 이용 방식에 비해 매우 빠르게 블랙아이스 및 결빙을 제거하는 것을 보여준다.

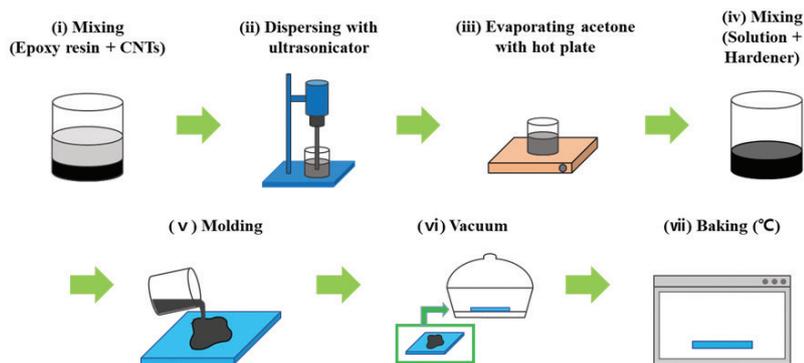


그림 3. 탄소나노튜브 에폭시 복합체 제작과정

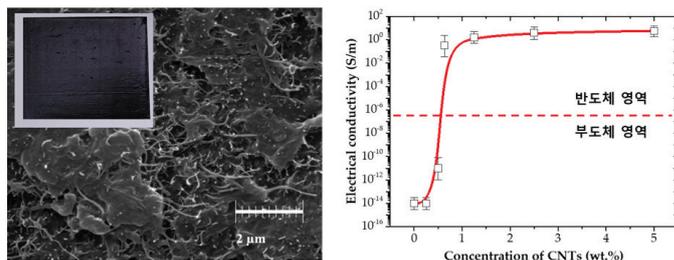


그림 4. 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제와 탄소나노튜브 함량에 따른 전기전도도 변화

또한, 개발된 탄소나노튜브 코팅제는 음의 온도 계수(NTC; Negative Temperature Coefficient)를 갖는 특징을 가지기에 도로 표면에 부착되어 도로 표면의 온도를 실시간으로 감지 할 수 있다. 온도 감지 성능 평가를 위해 코팅제 샘플 일부를 -40°C 및 80°C로 냉각 및 가열시켰을 때의 탄소나노튜브 코팅제의 저항변화를 분석하였다. 그림 7은 탄소나노튜브 코팅제의 온도 감지 성능과 적용성을 평가하기 위한 실험 결과로, 열화상 카메라의 측정 결과를 통해 국부적인 온도 변화를 확인할 수 있으며, 이에 따라 측정된 탄소나노튜브 코팅제의 저항변화를 나타낸다. 실험결과 80°C 가열된 부분의 저항이 최대 25% 이상 떨어졌으며, 냉각의 경우 온도를 -40°C로 낮추면 실온에 비해 저항이 최대 30% 증가했다. 적외선 열화상 이미지 결과와 비교했을 때 온도 변화에 따라 저항이 변화된 위치와 크기 잘 반영되었고 향후 최적화를 통해 도로 표면의 정확한 온도의 변화와 위치를 판단 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 개발된 탄소나노튜브 기반 발열 도로 코팅제가 가지고 있는 장점은 다음과 같다. 첫 번째, 무엇보다도 기존의 도로에 신속하고 저렴하게 적용 할 수 있다는 것이다. 기존 도로 표면에 포설 및 코팅 형식으로 적용됨으로써 기존의 도로를 손상시키지 않고 짧은 공사기간 및 인원으로 설치가 가능하기 때문에 설치비용이 감소될 것으로 예상됨에 따라 고속도로 뿐만 아니라 지방도로 등 블랙아이스 위험이 있는 모든 도로에 저비용으로 설치할 수 있다. 특히, 우리나라 기후 특성 상 겨울철 기간에만 단기적으로 설치가 가능하고 어느 구간이든 형태에 상관없이 작업이 가능하다는 장점이 있다. 두 번째, 탄소나노튜브 기반 발열 도로 코팅제는 도로 표면에 바로 부착되는 형태이기 때문에 발열 시 열적 손실이 거의 없는 아주 높은 열적 효율성을 보인다. 매립형태의 경우 아스팔트나 콘크리트의 도로 포장재료가 매우 낮은 열전도율을 가지고 있기 때문에 최종적으로 도로 표면에 도달하는 동안 많은 열적 손실이 발생한다. 그 외에도 염화칼슘 살포에 따른 도로 주변 환경오염이나 차량 부식의 문제를 해결 할 수 있는 대안이 될 수도 있다.

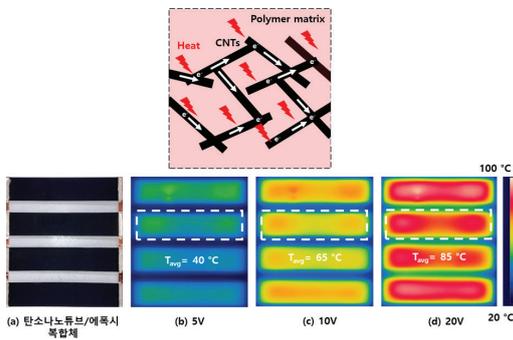


그림 5. 탄소나노튜브 코팅제의 발열 메커니즘 및 전압에 따른 발열성능

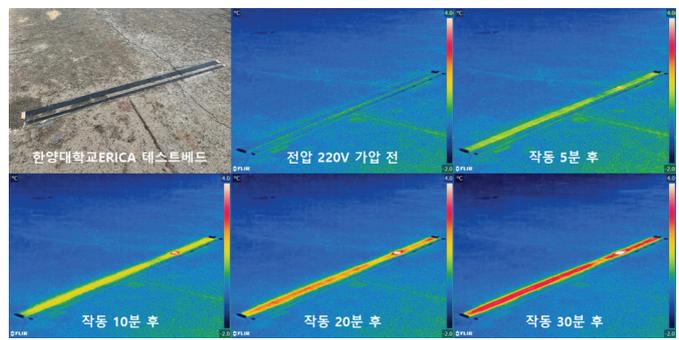


그림 6. 탄소나노튜브 기반 도로 발열 코팅제 성능

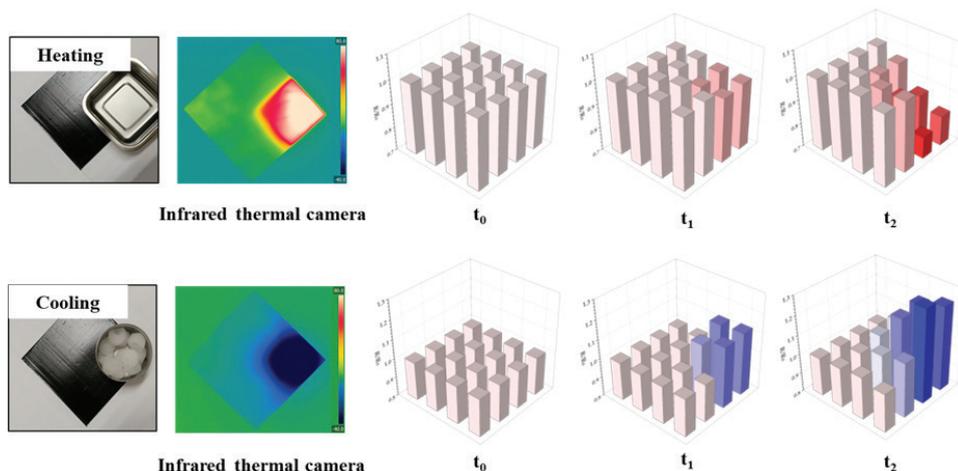
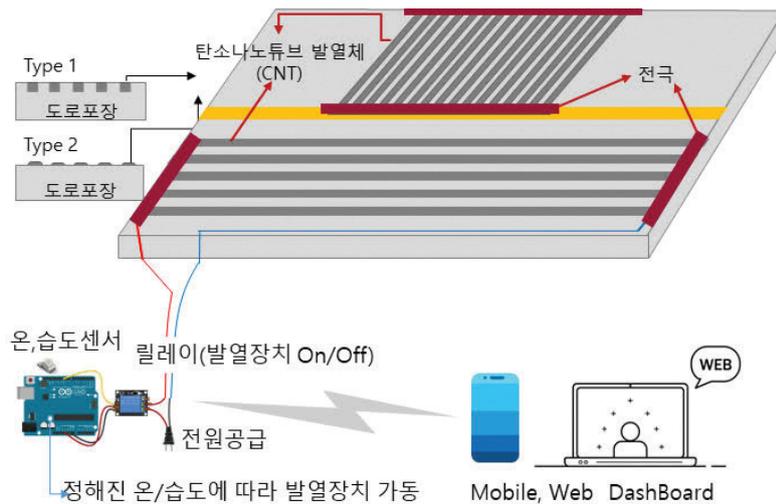


그림 7. 극한 온도 변화에 따른 탄소나노튜브 코팅제 온도 감지 성능

4. 블랙아이스 감지 및 제거 자동화 시스템

사물인터넷 기반의 블랙아이스 감지 및 제거 시스템은 탄소나노튜브 발열 코팅제가 설치된 장소의 기상현황을 파악하고, 외기 온·습도 및 노면 온·습도 등의 측정을 통해 블랙아이스 생성 상황을 감지하여 설정된 작동 조건에 따라 자동으로 또는 원격지에서 웹 또는 모바일 장치를 통해 수동을 작동시켜 블랙아이스 또는 도로 결빙을 제거할 수 있도록 하는 시스템이다. 본 시스템은 대쉬보드 형태로 구축이 되어 다양한 정보를 효율적으로 가시화하고 있으며, 관리자의 PC 뿐 만 아니라 모바일 환경에서도 간편하게 제어할 수 있도록 사용 플랫폼 제약이 적은 웹 환경에서 개발되었다. 모니터링 시스템을 통해 외기 온·습도 및 노면 온·습도 등의 조건에 대해 사용자의 선택에 따라 자동 작동 조건을 설정할 수 있으며, 수집된 데이터와 설정된 작동 조건 간 비교를 통해 자동으로 발열 시스템의 작동을 제어할 수 있다. 또한 발열 시스템 작동 조건이 충족되지 않더라도 시스템 관리자의 판단에 따라 시스템 작동이 요구되는 경우 원격지에서도 수동으로 발열 시스템의 제어가 가능하다.

탄소나노튜브 발열 코팅제를 이용한 본 시스템은 노면에서의 발열성능이 우수하기 때문에 블랙아이스 발생 방지 및 제거의 기능을 넘어 내리는 눈을 쌓이지 않고 바로 녹게 하는 용설 시스템의 역할도 충분히 할 수 있다. 따라서 블랙아이스 상습 발생 구역 뿐 만 아니라 주요 도로, 교량 구간, 터널 출입구, 경사로, 노약자 시설, 주차장 등 다양한 곳에서 블랙아이스 제거 및 도로 용설 시스템으로 활용될 수 있다.



◆ 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 H/W 및 시스템

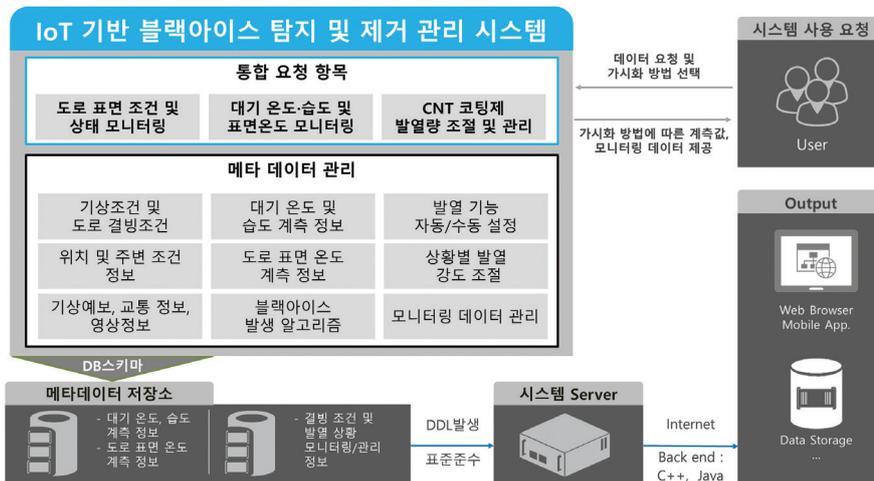


그림 8. 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 개요도

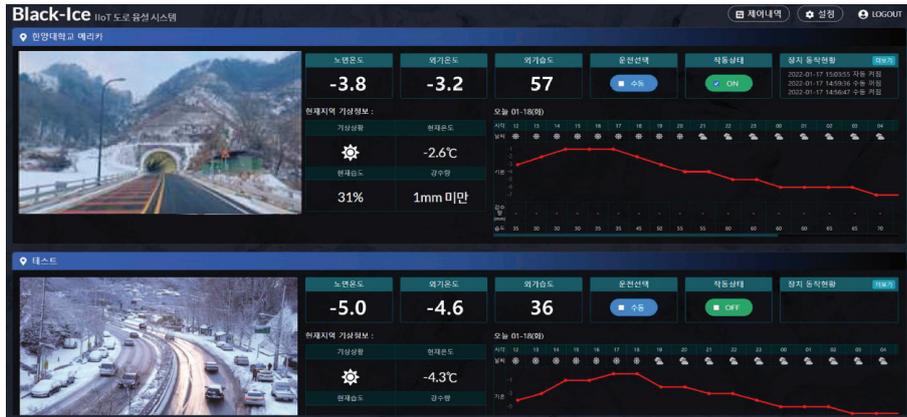


그림 9. 블랙아이스 감지 및 제거 시스템

5. 결론

지금까지 매년 겨울철 문제가 되고 있는 블랙아이스 및 도로 결빙에 의한 피해를 방지할 수 있는 탄소나노튜브 기반의 도로 발열 코팅제를 이용한 블랙아이스 감지 및 제거 시스템을 소개하였다. 탄소나노튜브의 발열 성능을 이용한 본 시스템은 겨울철 도로의 블랙아이스 발생에 따른 결빙구간을 제거할 수 있을 뿐 만 아니라 폭설에 대비한 도로 응설 시스템으로도 충분히 활용될 수 있을 것이다. 또한, 향후 스마트 시티의 다양한 정보 시스템과 연계하여 다양한 정보를 상호 공유할 수도 있을 것이며, 이를 통해 겨울철 도로 결빙에 의한 사고를 방지할 수 있는 매우 적극적이고 능동적인 역할을 할 수 있을 것이다.

해당 기술은 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 총 2차년도 연구를 한양대에리카와 ㈜이엔지소프트가 공동으로 완료하였고, 앞으로 지속적인 연구개발을 통한 고도화를 이루어 다양한 현장에 적용할 수 있도록 하는 기술 사업화를 목표로 하고 있다. 본 연구에서 개발된 탄소나노튜브 기반 도로 발열 코팅제를 비롯하여 다양한 첨단 기술로 개발된 새로운 시스템이 적용되어 보다 적극적이고 효율적인 제설방식으로 국민들의 겨울철 블랙아이스 및 도로 결빙에 대한 불안감을 줄이고, 겨울철 도로 교통사고를 획기적으로 감소시켜 국민의 생명과 재산을 보호하는데 기여할 수 있기를 기대한다.

WRITER INTRODUCTION



장승환 교수는 미국 Columbia University 토목공학과에서 다기능성 탄소나노튜브 복합체에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 미국 카네기멜론대학교와 네덜란드 델프트공대에서 Post Doc., 영국 University of Plymouth 조교수를 거쳐 2019년부터 한양대학교에리카 건설환경공학과 조교수로 재직하고 있다. 주관심 연구 분야는 다기능성 복합재료와 스마트 건설재료 개발이며 현재 우리학회 학회지편집위원회 위원을 맡고 있다.
sj2527@hanyang.ac.kr



정유진 석박사통합과정은 한양대학교 ERICA캠퍼스 스마트시티공학과에서 석·박사통합과정으로 재학 중이다. 주 관심 연구 분야는 탄소나노튜브를 활용한 다기능성 건설재료 개발이다.
yujin0421@hanyang.ac.kr



이승준 석박사통합과정은 한양대학교 건설환경공학과에서 석·박사통합과정으로 재학 중이다. 구조재료연구실에서 탄소나노튜브를 활용한 블랙아이스 감지 및 제거 코팅제 개발 연구를 수행하고 있으며, 주 관심 연구 분야는 탄소나노튜브 복합체, 구조물 건전성 모니터링이다.
sj5523@hanyang.ac.kr



남상혁 박사는 연세대 토목공학과에서 탄소성 경계면 모델을 이용한 지하 철근콘크리트 구조물의 내진 해석에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 연세대학교 건설환경공학과 연구교수, (주)두컴스엔지니어링 대표이사를 거쳐 현재 (주)이엔지소프트 대표(CTO)로 재직하고 있으며, 건설IT융합기술 개발 및 스마트건설기술 개발을 위한 다양한 연구를 진행하고 있다.
shnam@engsoft.kr

기획 | 장승환 편집위원 sj2527@hanyang.ac.kr