

탄소소재 산업부산물을 사용한 시멘트 모르타르의 전기·물리적 특성 연구

조정훈 · 김남일 · 이영준 · 서성관 · §추용식

한국세라믹기술원 에너지환경본부

A Study on the Electrical and Physical Properties of Cement Mortar used Carbon Material Industrial by-product

Jeong-Hoon Jo, Nam-Il Kim, Young-Jun Lee, Sung-Kwan Seo and §Yong-Sik Chu

Energy & Environmental Division, Korea Institute of Ceramic Eng. & Tech., Jinju 52851, Korea

요 약

본 연구에서는 탄소소재 산업부산물을 사용한 전기전도성 발열 모르타르를 제조 및 분석하였다. 이때 탄소소재 및 혼합수 함량을 제어하였으며, 전압 인가 시 전극간 거리는 0.42 m 및 0.88 m로 고정하였다. 본 연구에서 사용한 탄소소재 산업부산물은 판상형 구조의 흑연이었다. 탄소소재는 입도에 따라 미분말 및 골재 대체용으로 사용하였으며, 각각의 평균 입도는 18 μm 및 546 μm , 전기전도도는 62.3 S/m 및 32.5 S/m로 측정되었다. 동일한 모르타르 플로우 값을 유지하기 위해 탄소소재 혼합량 증가에 따라 혼합수 함량을 증가시켰으며, 이에 따라 기공률은 상승하였다. 모르타르(6주차)의 전극거리 0.42 m에서 전압-전류값은 342 V-1.48 A(S20) 및 349 V-1.44 A(S30)이었으며, 0.88 m에서는 513 V-0.98 A(S20) 및 500 V-1.01 A(S30)으로 확인되었다. 또한 발열 특성은 산업부산물이 탄소소재 함량이 증가하고, 전극간 거리가 감소할수록 우수하였다.

주제어 : 전기전도도, 산업부산물, 전극거리, 플로우, 기공률

Abstract

Electrically conductive mortar used in industrial carbon material byproducts was manufactured and analyzed in this study. The contents of the carbon material and mixed water were controlled, and the distance between electrodes was set to 0.42 m and 0.88 m. The carbon material was graphite with a layered structure. The carbon material was used as fine powder and aggregate substitutes according to particle size. The average particle sizes of each materials were 18.4 μm and 546.1 μm and the electrical conductivities were 62.3 S/m and 32.5 S/m, respectively. To maintain similar mortar flow in each sample, the water content was increased with increasing carbon material, and accordingly, the porosity showed an increasing trend. When electrode distance of the mortar (week 6) was 0.42 m, the voltage-current values were 342 V-1.48 A (S20) and 349 V-1.44 A (S30). For electrode distance of 0.88 m, these values were 513 V-0.98 A (S20) and 500 V-1.01 A (S30). The exothermic properties improved with increasing carbon material content and decreasing electrode distance.

Key words : Electrical conductivity, Industrial by-product, electrode distance, flow, porosity

· Received : October 6, 2021 · Revised : November 22, 2021 · Accepted : November 24, 2021

§ Corresponding Author : Yong-Sik Chu (E-mail : yschu@kicet.re.kr)

Energy & Environmental Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, 115, 101, Soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. 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.

1. 서 론

최근 선진국의 도로교통정책은 효율보다 안전을 강조하는 형태로 변화하고 있으며, 국내에서도 교통 안전성이 더욱 부각되고 있다¹⁾. 특히 동절기 노면 결빙으로 인한 교통사고 발생 및 인명피해가 지속적인 이슈로 대두되는 상황이다.

일반적으로 동절기 도로면에는 강설 및 강우 등으로 노면 수분이 잔존할 가능성이 높으며, 이때 기온이 영하로 떨어지면 결빙이 발생하여 교통사고 및 인명사고 발생 위험성을 높이는 원인이 된다²⁾. 이는 일반 노면보다 마찰 계수가 낮아 제동거리가 증가하기 때문이다³⁾. 실제로 건조노면과 비교해 결빙된 노면은 10배 정도 낮은 마찰계수를 보유하여 주행에 필요한 미끄럼 저항성을 충분히 생성하지 못한다⁴⁾. 통계상으로도 국내 도로 교통사고 중 블랙아이스(도로 표면의 겹고 얇은 얼음막) 생성에 의한 사고 건수는 연간 1,000여건을 상회하며, 이에 따른 사망자도 최근 5년간 198명에 이르고 있다. 또한 도로교통공단에 따르면 2018년 노면 상태별 교통사고 치사율은 건조 상태에서 1.65%, 적설 시 1.12%이지만, 서리 및 결빙 시 1.77%, 해빙 시에는 6.67%로 대폭 증가한다고 발표하였다⁵⁾. 따라서 도로 결빙 및 블랙아이스 해결 방법이 과거부터 다양하게 적용되어 왔으며, 최근에도 여러 방식의 융설 방식이 시도·적용되고 있다.

상기와 같이 도로 결빙에 의한 사고 예방을 위해 다양한 제설 및 제빙 방법을 사용해 왔으며, 각각의 방법에 따라 다양한 단점도 존재한다. 현재 노면결빙 센싱 기술을 이용한 염화물 자동살포 방식과 인력이 직접 염화물을 살포하는 방식이 흔히 사용되고 있다. 상기 방식은 짧은 시간에 융설이 가능한 효과적 방법이나, 염화물에 의한 환경오염과 차량 부식 등이 고질적인 문제로 지적되고 있다¹⁾. 더불어 제설제 분사 펌프 노후화 등 사후 유지관리가 용이하지 못한 단점이 있으며, 염소계열 제설제는 구조물의 균열부에 침투하여 철근 부식 등 구조물의 노후화까지 유발하는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 상기와 같은 화학적 방법 이외에도 전열선 및 전열판을 이용하여 직접적인 열전달을 통한 제설 방식이 존재한다. 이 방식은 구리-니켈 합금선 등과 같은 전열선 및 전열판이 지열 혹은 전기적 저항으로 인해 발열하여 노면을 융설하는 기술로, 포장체 내 5~7 cm 깊이로 매설된다. 이 방식은 운영 시 초기 예열과정이 필요하

나, 화학 제설제의 문제점은 피할 수 있다⁷⁾. 하지만 차량 주행 시 전열선의 단선이 발생할 우려가 있으며, 이에 따른 유지보수가 매우 어렵다는 단점을 갖는다. 더불어 적용 구간이 길어질 경우, 설치 및 전력비용이 높으며, 교면 포장 설치 시 방수재가 노후화 된다는 단점도 있다.

최근에는 상기에서 언급한 방법들의 단점을 보완할 수 있는 다양한 연구가 추진되고 있으며, 그 중 전기전도성 물질을 혼합한 모르타르 및 콘크리트에 대한 연구가 대안으로 제시되고 있다. 일반 모르타르는 10 k Ω 이상의 저항을 가지나, 탄소계열 소재를 첨가하면 비저항이 10 Ω cm 이하까지 하락할 수 있다. 이처럼 비저항이 낮아진 복합체의 양 끝단에 전극을 설치하여 전압을 인가하면 전류가 흐르며, 이때 저항에 의한 열이 발생할 수 있다⁸⁾. 일반적으로 전기전도성 물질은 흑연, 코크스, 카본블랙, 탄소섬유 등이 있으며, 이들 소재가 모르타르 및 콘크리트에 첨가된다. 즉 전기전도성 물질의 혼합에 따른 모르타르 및 콘크리트의 물리적 특성과 더불어 전기저항 및 발열 변화 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 상황이다⁹⁾. 미국 아이오와 주립대학의 경우 디모인 국제공항에 22.9×7.3 m에 달하는 전기전도성 콘크리트 슬라브 설치 후 발열 성능 측정 및 융설 현장실험이 진행되었으며, 미국 네브래스카주의 경우 Roca Spur Bridge에 전도성 발열 콘크리트 기술을 적용한 바 있다. 반면, 국내에서는 아직까지 대부분 소형 복합체 위주의 연구가 이루어지고 있어 이와 같은 현장 적용에 대한 가능성 판단이 매우 어려운 실정이다.

따라서 본 연구는 탄소소재 산업부산물을 혼합한 1×1 m 크기의 시멘트 모르타르를 제조하여 전기전도성 및 발열 특성에 대한 실험을 진행하였다. 이때 전기전도성 물질 혼합 비율에 따른 모르타르 특성 변화와 전극간 거리에 따른 전기적 특성변화도 분석하였다. 또한 상기 조건 변화에 따른 상관관계를 분석하여, 전기전도성 발열 모르타르의 현장 적용 가능성 여부를 분석·평가하였다. 특히 탄소 제조 산업공정에서 부산되는 탄소 부산물을 재활용하여 경제적·환경적 이익에 기여하고자 하였다.

2. 실험 방법

탄소소재 산업부산물은 탄소 제조 산업공정에서 생성되며, 이를 혼합 사용한 모르타르의 전기전도성 및 발열 특성을 분석·평가하기 위해 Fig. 1과 같이 시험하였

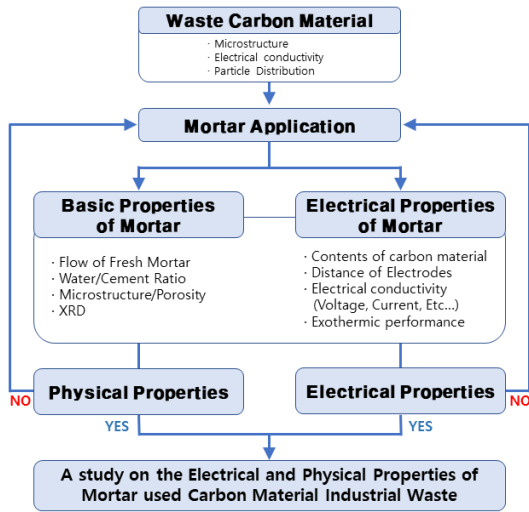
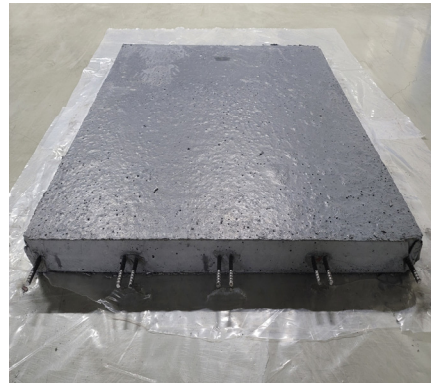


Fig. 1. Schematic diagram of experimental procedure.

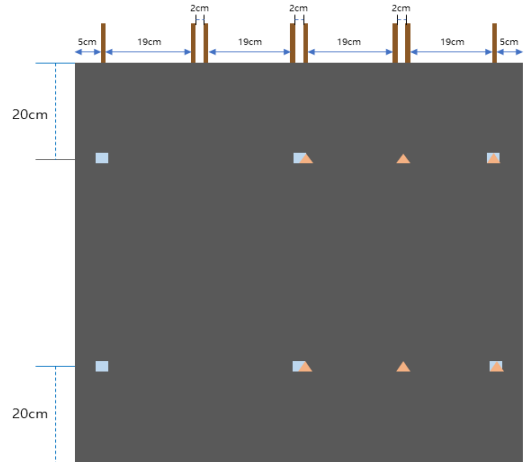
다. 출발원료인 탄소소재는 국내 A기업 배출 부산물을 입수·사용하였으며, 탄소소재 자체 특성을 분석하기 위해 주사전자현미경(제조사 JEOL社, JSM-6380, JAPAN)을 사용한 미세구조 관찰, 입도분석기(Horiba社, LA-350, JAPAN)를 사용한 입도 특성 등을 시험하였다. 또한 탄소소재의 전기전도성을 확인하기 위해 20×10 mm(지름, 높이) 원기둥 몰드에 탄소소재 부산물을 채운 후 전압인가 장비인 직류 전류 공급장치(Keysight社, N8742A, USA)를 사용하여 전류 값을 측정하였다.

탄소소재는 140 μm체로 분리하여 통과분은 미분말로, 잔류분은 잔골재 대체용으로 사용하였다. 이때 미분말은 시멘트 중량 대비 10 % 외할 첨가하였으며, 잔류분은 골재 중량의 20~30 %를 치환하여 모르타르 시편(1×1×0.075 m) 제조에 사용하였다. OPC(Ordinary Portland Cement)는 국내 H社 제품을 사용하였으며, 모르타르 플로우 값을 190±10 mm로 유지하기 위해 혼합수 함량을 제어하였다. 전기전도성 및 발열 특성 측정을 위해 전극(지름 1 cm 철근)을 삽입하였으며, Fig. 2(b)와 같이 최외곽 전극은 양 끝단으로부터 0.05 m 내부에 설치하였고, 이 외의 전극은 각각 0.19 m 및 0.02 m 간격으로 총 8개를 설치하였다.

성형된 모르타르는 20±1 °C, 상대습도 50±5 %가 유지되는 실험실에 방치하여 대기 양생하였다. 양생 중 모르타르의 전기적 특성 및 발열 성능은 전극거리(0.42 m, 0.88 m)를 2가지로 설정하여 측정하였다. 이때 전력은



(a) Picture of manufactured mortar



(b) Temperature measurement points

Fig. 2. Mortar mixed with carbon material industrial by-product.

500±10 W로 설정하였으며, 2~6주차 동안 일주일 간격으로 1시간 씩 측정하였다. 발열온도는 모르타르 표면에 열전대(TECPEL社, DTM-319, 대만)를 부착·측정하였으며, 측정부위는 Fig. 2(b)에 나타내었다. 더불어 기공률 측정장비(Micromeritics社, AutoporeIV, 미국)를 사용한 기공특성도 분석하였다.

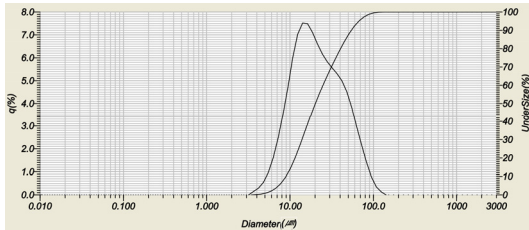
3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 탄소소재 분석

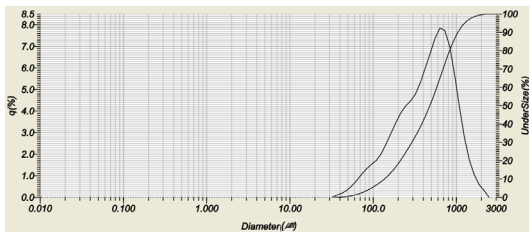
Table 1은 탄소소재 산업부산에 대한 분석 결과이다. 해당 물질의 밀도는 2.13 g/cm³로 미량의 Sulfur와 다량의 Fixed Carbon로 이루어져 있으며, 탄소가 대부분을 구

Table 1. Component composition of carbon material industrial by-product (unit : %)

	Sulfur	Fixed Carbon	Real Density (g/cm ³)
Contents	0.3	99.7	2.13



(a) E-powder



(b) E-grain

Fig. 3. Particle size of carbon material industrial by-product.

성하고 있어 우수한 전기전도성을 기대할 수 있다고 사료된다.

탄소소재의 입도 범위에 따라 미분말(E-powder) 및 골재대체용(E-grain)으로 분류하여 입도분석을 수행하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. E-powder의 입도는 3.9~133.1 μm의 범위에 존재하였으며, 평균 입도는 26.7 μm이었다. E-grain의 입도 분포 범위는 136.7~2,301.9 μm, 평균 입도는 546.1 μm로, 미분말과 비교하여 약 20.5배 수준의 크기로 확인되었다.

본 연구에 사용된 탄소소재의 입도별 XRD 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 탄소소재는 흑연(Graphite)으로 확인되었다. 다만 E-powder가 E-grain에 비해 X-Ray 피크 강도가 높았으며, 이는 E-powder의 입자 크기가 미세하여 시료준비 시 입자간 밀집이 보다 잘 이루어졌기 때문으로 사료되었다. 일반적으로 탄소는 화학적으로 불활성이며, 전기적으로는 좋은 전도성을 보유하여 전도성 첨가제로서 많이 사용된다¹⁰⁾. 이러한 탄소에 이루어져 있는 것이 흑연으로 대부분이 육방정계이며, 일부는 삼방정계의 결정구조를 가지고 있다. 또한 탄소는 벤젠고리처럼

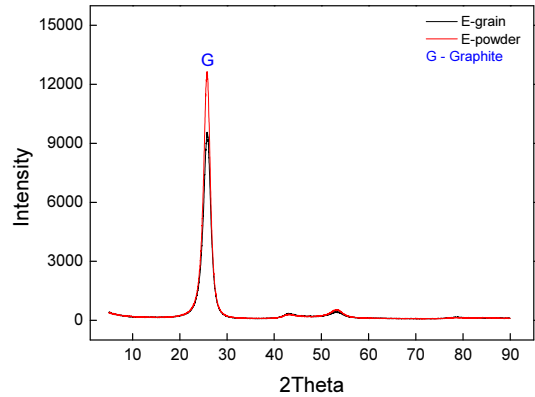


Fig. 4. XRD Pattern of carbon material industrial by-product.

Table 2. Electrical characteristics of carbon material industrial by-product (Unit : Amp)

Porosity	E-powder	E-grain
Voltage (V)	0.11	0.21
Electrocurrent (A)	0.1024	0.1024

연결된 육각형이 판상체를 이루면서 연속된 층을 형성한다. 탄소 원자의 전자는 평면상에서 3개가 강한 공유결합을 하며, 나머지 하나는 위 혹은 아래층과 결합되어 있다. 육각판상 한 층의 높이는 3.40 Å이고 육각형 고리 내 가장 인접한 탄소간 거리는 1.42 Å이다. 판상체의 상하거리가 탄소원자 간의 중심 거리보다 훨씬 크므로 육각판상 위쪽의 전자는 다소 자유롭게 움직일 수 있게 되어 흑연은 우수한 전기전도도를 보유하게 된다¹¹⁾. 이와 같은 성질을 지닌 탄소소재 산업부산물은 모르타르 및 콘크리트에 전기전도성을 부여하는 용도로 활용하기에 적합할 것으로 사료된다.

탄소소재의 전기전도성 측정결과를 Table 2에 나타내었다. 측정은 지름 0.02 m, 높이 0.01 m의 원기둥 몰드에 탄소소재를 채운 후 50 kgf로 압축 충전한 뒤 매설된 구리선에 전압인가 장치를 연결하여 각각 2회씩 진행하였다¹²⁾. E-powder의 측정 값 평균은 0.11 V에서 0.1024 A, 저항 값은 1.07 Ω으로 나타났으며, E-grain의 경우 0.21 V에서 0.1024 A 및 2.05 Ω의 저항 값을 나타내었다. 이때 전극(구리선)간의 거리 0.015 m를 고려할 경우, E-powder는 0.016 Ω · m(전기전도도 62.3 S/m) 및 E-grain은 0.031 Ω · m(전기전도도 32.5 S/m)로 계산되었다. 상기와 같이 E-grain이 E-powder에 비해 낮은 전기전도도를 보유한

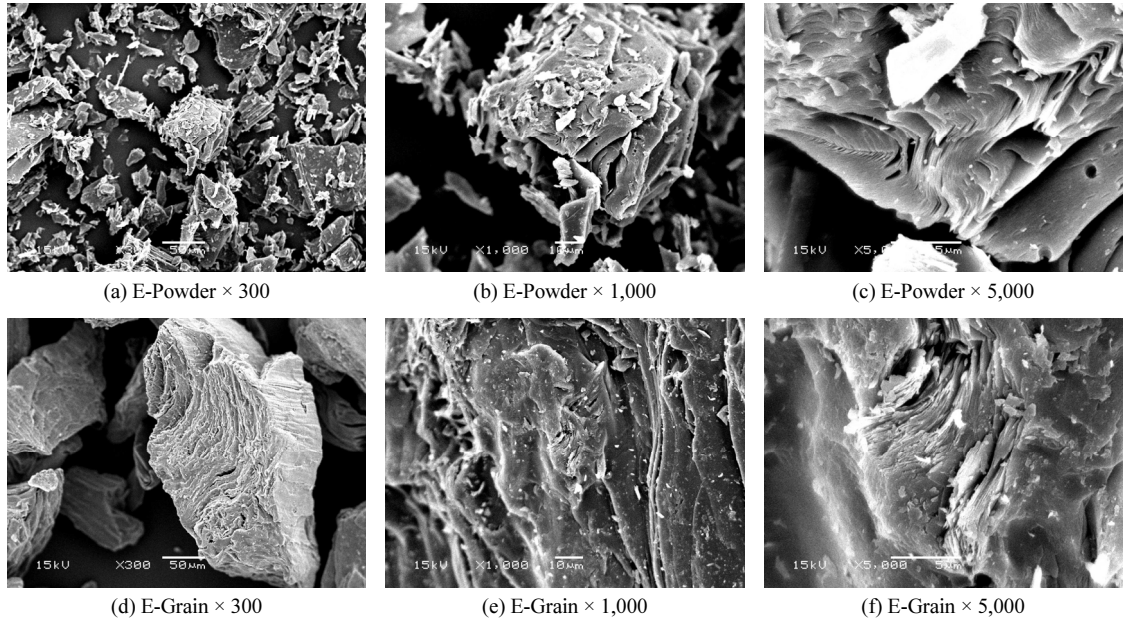


Fig. 5. Microstructure of carbon material industrial by-product.

Table 3. Mix design of mortar (unit : wt%)

Type	W/C (%)	Cement	Sand	E-Powder	E-Grain	Fluidizer
S20	65	24.3	58.1	2.4	14.7	0.5
S30	73		51	2.4	21.8	0.5

것으로 확인되었으며, 이는 E-powder의 입자크기가 작아 입자간 접촉 및 밀집이 E-grain에 비해 유리하여 전기적 흐름이 더 원활했던 것으로 추정되었다. 일반적으로 모르타르는 약 $10^{10} \Omega \cdot m$ 의 비저항을 보유한 부도체로 알려져 있지만, 탄소소재 혼합 시에는 전기저항이 낮아져 전기전도 특성 개선을 기대할 수 있을 것으로 판단되었다¹³⁾.

Fig. 5는 본 연구에 사용된 탄소소재의 미세구조를 나타낸 것이며, E-powder 및 E-grain 모두 관찰하였다. 2개 소재는 모두 판상이 적층된 층상 결정구조를 나타내고 있으며, 이는 일반적인 흑연의 층상구조로 판단되었다. E-powder의 경우 E-grain에 비해 입자가 조밀하며, 뭉쳐진 입자에서 떨어져나간 것으로 추정되는 다수의 부스러기가 관찰되었다.

3.2. 탄소소재 혼합 모르타르의 특성 분석

실험에 사용된 탄소소재 산업부산물 혼합 모르타르는 Table 3과 같은 비율로 배합을 설계하였으며, 혼합수를

제외한 분체 및 골재 등의 비율을 wt %로 나타내었다. S20과 S30의 경우, 시멘트와 E-powder 및 유동화제의 양은 동일하며, S20은 총 골재 양의 20 %를 E-grain으로 치환하였고, S30은 골재의 30 %를 치환하였다. 혼합과정은 우선적으로 혼합수를 제외한 재료를 2분간 건식 혼합하였다. 이후 혼합수를 투입하여 1분 30초 간 혼합후 1분 30초간 정지, 다시 2분간 혼합을 진행하였다. 이 때, 탄소소재 혼합량 증가에 따라 Flow가 급격히 감소하는 등 작업성이 불량해졌으며, 이는 탄소소재의 층상 구조로 인해 수분 흡수율이 증가한 것으로 사료되었다. 따라서 충분한 작업성 확보를 위해, 즉 모르타르 플로우가 190±10 mm 범위를 벗어나지 않도록 각각의 시멘트에 대한 혼합수의 비율(W/C)을 변화시켰다.

Fig. 6은 S20과 S30 시험체의 6주 후 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다. Quartz, graphite, C-S-H, Ca(OH)₂, CaCO₃, ettringite 등의 결정을 확인 할 수 있었으며, 그 중 quartz 피크 강도가 가장 높게 발현되었다. 이는 혼합 재료

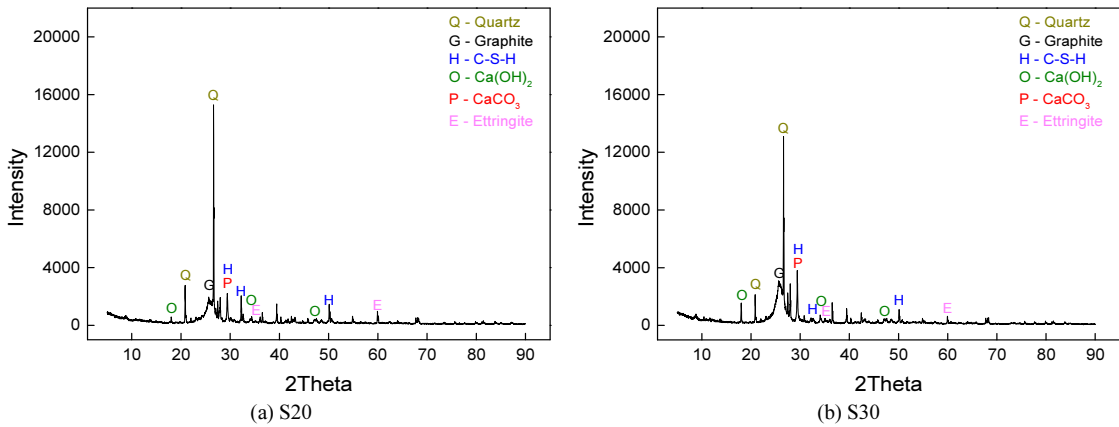


Fig. 6. XRD pattern of Mortar.

Table 4. Pore characteristics of mortar at 6th week (unit : %)

Porosity	S20	S30
1	14.79	18.92
2	15.52	17.55
Average	15.16	18.24

중 모래 혼합량이 가장 많기 때문으로 추정되었다. Quartz 피크 강도는 S30이 S20에 비해 낮게 나타났으며, 이는 S30에서 모래 대체율이 높게 설정되어 S20에 비해 모래 함량은 적고 탄소소재의 함량이 많기 때문이다. 한편 함께 검출된 Ca(OH)₂, C-S-H 및 Ettringite는 시멘트의 대표적인 수화물이며, CaCO₃의 경우 시멘트 제조공정에서 혼합재로 첨가되는 석회석으로부터 기인하였다.

Table 4는 S20과 S30의 6주 양생 후 측정된 기공률 값을 나타낸 것이다. 각각의 시험체에서 동일 위치 시료를 샘플링 하였으며, 기공률 결과 값의 오차를 줄이기 위해 각각 2회씩 측정하였다. S20은 14.79 % 및 15.52 %, S30은 18.92 % 및 17.55 %의 기공률 결과 값을 나타내었으며, 각각의 평균은 15.16 %, 18.24 %로 S30이 S20에 비해 1.2배 정도의 기공을 보유한 것으로 계산되었다. 이는 탄소소재 함량 증가에 따른 탄소소재 자체의 기공 기여, 혼합수 함량 증대와 상대적인 시멘트 함량 감소에 따른 수화 기여도 감소에 따른 복합 효과로 추정되었다.

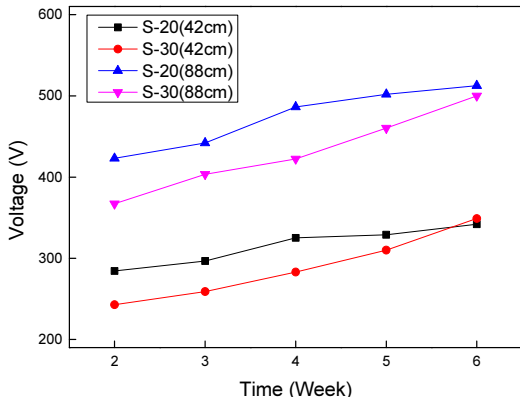
3.3. 탄소소재 혼합 모르타르의 전기적 특성

Fig. 7은 탄소소재 혼합 모르타르의 5주간(2~6주 양생 조건) 전압, 전류, 전기저항 값을 나타낸 것이다. 전압은

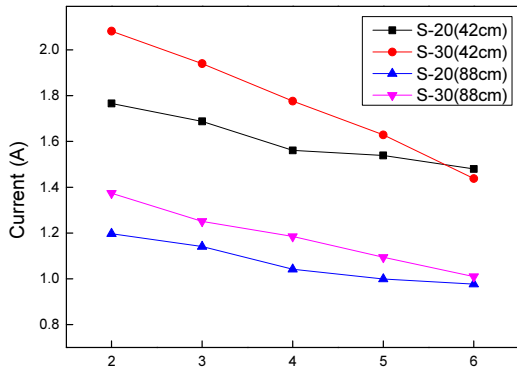
전력(전압×전류)이 500±10 W 범위를 벗어나지 않도록 조정하여 실험하였으며, 전극간 거리를 0.42 m 및 0.88 m로 고정하여 측정하였다.

탄소소재 산업부산물 혼합 비율에 따른 전기특성 값 비교 시, 전극거리 0.88 m 조건에서의 2주 양생 S20-S30의 전압(S30 대비 격차)은 423 V-367 V(15 %)이며, 6주차에 513 V-500 V(3 %)로 S20의 전압수치가 높게 측정되었다. 또한 전류의 경우 2주차에서 1.20 A-1.37 A(-13 %), 6주차에서는 0.98 A-1.01 A(-3 %)가 측정되었다. 이에 따라 저항값은 2주차에서 311.0 Ω·m-235.1 Ω·m(32 %), 6주차의 경우 461.7 Ω·m-435.6 Ω·m(6 %)로 확인되었다.

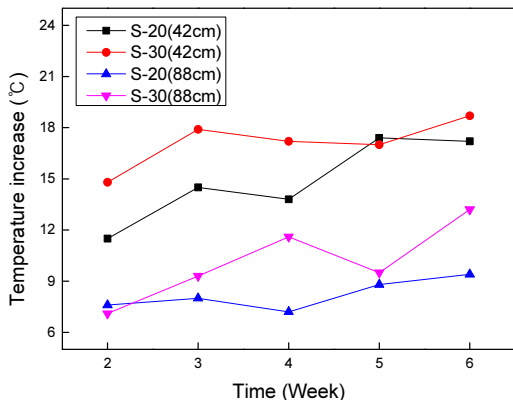
전극 거리에 따른 측정값을 비교할 경우, S20에서 전극거리 0.42 m-0.88 m의 전압(0.42 m 대비 격차)은 2주차 284 V-423 V(49 %), 6주차 342 V-513 V(50 %)로 각각 0.88 m에서 높게 측정되었다. 전류 값은 2주차 1.77 A-1.20 A(-32 %) 및 6주차 1.48 A-0.98 A(-34 %)이었다. 이에 따라 저항은 2주차 70.8 Ω·m-311.0 Ω·m(339 %) 및 6주차 101.6 Ω·m-461.7 Ω·m(354 %)로 0.42 m에 비해 증가하는 것으로 확인되었다. S30의 경우, 전압은 2주차 243 V-367 V(51 %), 6주차 349 V-500 V(43 %), 전류 값은 2주차 2.08 A-1.37 A(-34 %), 6주차 1.44 A-1.01 A(-30 %)이었다. 이에 따른 저항은 2주차 51.3 Ω·m-235.1 Ω·m(358 %), 6주차 106.8 Ω·m-435.6 Ω·m(308 %)의 격차를 나타내었다. 전극 거리별 전기전도성은 양생 기간에 따른 차이도 있으나, 0.42 m에서 좀 더 우수하였다. 상기와 같이 양생기간 증가에 따라 전류 값은 감소하며, 전력 유지를 위해 필요한 전압의 수치는 상승하는 경향을 나타



(a) Voltage



(b) Current



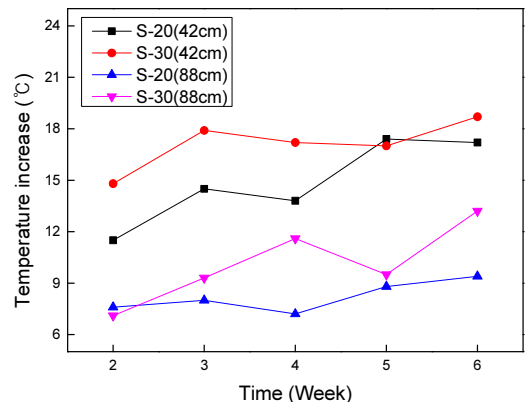
(c) Resistivity

Fig. 7. Electrical characteristics of mortar.

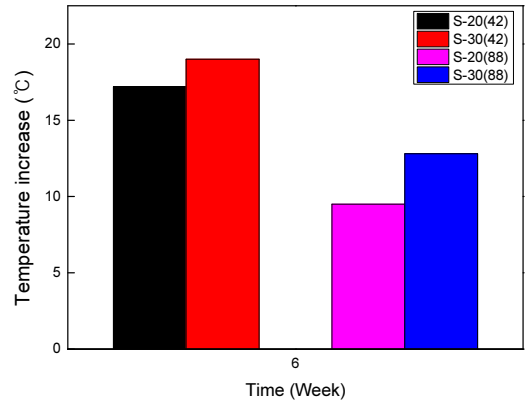
내었다. 더불어 탄소소재의 혼합량이 많을 경우, 전압과 저항은 낮아지고, 전류는 높게 측정되었다. 이는 최 등이 발표한 연구결과와 연관되는 것으로 사료되었으며, 이들은 모르타르의 물-시멘트 비가 커질수록 기공량이 증가하

Table 5. Surface temperature of mortar added carbon material (unit : °C)

Time (week)	S20 (average of 6 points after 1 hr)		S30 (average of 6 points after 1 hr)	
	42 (cm)	88 (cm)	42 (cm)	88 (cm)
2	31.5	27.6	34.8	27.1
3	34.5	28.0	37.9	29.3
4	33.8	27.2	37.2	31.6
5	37.4	28.8	37.0	29.5
6	37.2	29.4	38.7	33.2



(a) Increasing temperature 2~6 week



(b) Increasing temperature of 6th week

Fig. 8. Exothermal characteristic of mortar (average of 6 points).

여 비저항을 높이고, 전기전도의 저해요소로 작용한다는 연구결과를 발표하였다¹⁴⁾. 본 실험에서도 전기전도성 물질의 혼합량이 많을수록 혼합수량이 증가하였으며, 이는 기공률 증가를 초래하여 전기전도성 감소에 기여했을 것

으로 추정되었다.

Table 5는 탄소소재 혼합 모르타르의 전압 인가에 따른 표면 온도의 평균을 나타낸 것이며, Fig. 8은 양생기간과 측정 조건에 따른 온도 변화폭을 나타낸 것이다. 실험 시작 전 표면 온도는 20 ± 0.5 °C였으며, 500 ± 10 W의 전력을 1시간 동안 가한 뒤 동일한 위치 6곳을 선정·측정 후 평균값을 계산하였다. 각 시험체는 대체적으로 시간 경과에 따라 발열량이 증가하였으며, 모두 6주차에서 가장 높은 온도가 발현되었다. 가장 높은 발열 특성을 나타낸 것은 S30(0.42 m)으로, 전극간 거리가 짧고 전도성 물질이 다량 혼합된 시편이었다. 상기 조건에서의 온도 상승폭은 2주차 14.8 °C, 6주차 18.7 °C를 기록하였으며, 0.88 m의 경우 2주차 7.1 °C 및 6주차 13.2 °C로 나타났다. 반면, 가장 낮은 발열 특성을 나타낸 것은 S20(0.88 m)로 온도 상승폭은 2주차 7.6 °C 및 6주차 9.4 °C였으며, 0.42 m에서는 2주차 11.5 °C 및 6주차 17.2 °C가 측정되었다. 전체적인 발열 성능은 S30(0.42 m) > S20(0.42 m) > S30(0.88 m) > S20(0.88 m)의 순서로 우수하였으며, 전기전도성 물질의 혼합량이 높을수록, 전극의 거리가 가까울수록 높은 발열 성능을 나타내었다. 한편, Jo 등은 전도성 물질이 혼합되지 않은 모르타르의 경우 발열특성이 발현되지 않는다고 발표한바 있으며, 본 실험에서 확인된 전도성 모르타르의 발열 성능은 충분히 유의미하다고 사료된다¹²⁾. 따라서 본 연구에서 사용된 탄소소재 산업부산물의 전기전도성 및 발열 특성을 확인할 수 있었으며, 이는 탄소소재 산업부산물의 모르타르 적용에 따른 겨울철 노면 빙결 해소 및 용설 활용 가능성을 확인할 수 있는 결과라고 판단되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄소소재 산업부산물을 사용하여 겨울철 도로교통 사고 방지용 전기전도성 모르타르를 제조하였다. 탄소소재 산업부산물은 모르타르 내부에서의 전기전도성 발현용으로 사용하였으며, 이때 탄소소재 혼합량, 혼합수 함량 및 전극간 거리를 제어하였다. 이와 같이 제조된 탄소소재 혼합 모르타르의 기공 특성 및 전기적 특성을 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1. 본 연구에서 활용한 탄소소재 산업부산물은 판상형 구

- 조가 적층된 형태이었으며, E-powder의 입도 범위는 3.90~133.1 μm , 평균 입경는 26.7 μm , E-grain는 각각 136.7~2301.9 μm 및 546.1 μm 이었다. 더불어 전기전도도는 각각 62.3 S/m 및 32.5 S/m으로 측정되어, E-powder에서 좀 더 우수한 전기전도 특성이 발현되었다.
- 모르타르 플로우 값을 동일 수준으로 유지하기 위해 혼합수 함량을 조절하였으며, 혼합수 함량은 S20에서 65 %, S30은 73 % 수준이었다. 이를 통해 탄소소재 함량 증가에 따라 동일한 작업성 확보를 위해서는 혼합수 함량 또한 증가되어야 한다는 것을 확인할 수 있었다.
- 모르타르(6주차)의 전극거리가 0.42 m 일 때 전압-전류 값은 342 V-1.48 A(S20) 및 349 V-1.44 A(S30)이었으며, 0.88 m는 513 V-0.98 A(S20) 및 500 V-1.01 A(S30)로 확인되었다. 즉 모르타르 내부의 전기전도성 물질 함량이 많고, 전극간 거리가 가까울수록 우수한 전기전도성을 나타내는 것으로 판단되었다.
- 각 모르타르별 최대 발열온도는 6주차에서 발현되었으며, 발열성능은 S30(0.42 m) > S20(0.42 m) > S30(0.88 m) > S20(0.88 m)의 순서로 측정되었다. 즉 전기전도성 물질 함량이 많고, 전극간 거리가 가까울수록 발열 특성이 좀 더 우수하였으며, 최대 발열온도는 18.7 °C이었다.
- 본 연구에서는 산업부산물로 발생하는 탄소소재의 모르타르 적용에 따라 전기전도성 및 발열 특성을 확인할 수 있었다. 즉 본 연구에서 사용한 탄소소재 산업부산물은 겨울철 노면 결빙 해소 및 용설 가능성을 확인할 수 있는 결과라고 판단되었다.

References

- Jin-Nyung Heo, Bum-Jin Park, Tae-Hyeong Kim, 2013 : A Feasibility Study on Developing Snow Melting Systems Using CNT-Cement Composite, International Journal of Highway Engineering, 15(2), pp.29-37.
- Geon-Hun Sin, Young-Jun Song, Young-Gap You, 2011 : Bridge Road Surface Frost Prediction and Monitoring System, The Journal of the Korea Contents Association, 11(11), pp.42-48.
- Hee-Seob Lim, Sang-Tae Kim, 2020 : A Study on Road Ice Prediction by Applying Road Freezing Evaluation Model, Journal of the Korean Applied Science and Technology, 37(6), pp.1507-1516.

4. Chi-Su Lim, Kwang-Pil Park, Jae-Jun Lee, et al., 2016 : Fundamental Study for Development of an Anti-Icing Pavement System Using Carbon-Fiber Sheet, International Journal of Highway Engineering, 18(3), pp.59-65.
5. KoROAD, Traffic accident analysis system, http://taas.koroad.or.kr/sta/acs/exs/typical.do?menuId=WEB_KMP_OVT_UAS_ASA#, September 7, 2021.
6. Sung-Hoon Lee, Hee-Young Lee, Won-Seok Chung, 2018 : Experimental Study on Voltage Supply Efficiency of Nano Cement Composite for Prevention of Road Icing, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 18(6), pp.221-228.
7. Jong-Woo Kim, Hyun-Ki Kim, 2010 : Introduction of Prevention and Prediction Techniques of Road Surface Freezing, The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation, 10(4), pp.35-39.
8. Seok-Hwa Kang, Ja-Sool Koo, 1999 : A Study On The Characteristics of Heating Concrete, Remicon, 61, pp.36-51.
9. Hong-Jin Ahn, Sang-Heon Kim, Soo-Kyung Choi, 2016 : An Experimental Study on Electric Resistivity and Exothermic Property Of Electrically Conductive Mortar Using Amorphous Graphite, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 16(3), pp247-255.
10. Il-Woo Nam, Hyeong-Ki Kim, 2015 : Electrically Conductive Cement Composites Incorporating Carbon Materials, Magazine of the Korea Concrete Institute, 27(4), pp.32-36.
11. Soo-Jae Lee, 2000 : Types and uses of graphite, Journal of the Mineralogical Society of Korea, 13(2), pp.40-50.
12. Ki-sick Jo, Nam-II Kim, Kyoung-Seok Kim, et al., 2021 : A Study on the Electrical and Physical Properties of Mortar Incorporating Carbon Black, Journal of the Korean Ceramic Society, 58(4), pp.414-421.
13. No-Dong Kim, Sang-Joon Park, 2013 : A Study On The Electrical Characteristics of Electro Heat-Generation Mortar Mixing Amorphous Graphite, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 29(7), pp.101-108.
14. Gil-Seob Choi, Bong-Chan Kim, Wan-Ki Kim, et al., 2000 : A Study on the Properties of Electrical Conductive Cement Mortar, Journal of the Korea Concrete Institute 2000 Apr, pp.458-463.

조정훈



- 국립안동대학교 응용신소재공학전공 학사
 - 부산대학교 재료공학과 석사과정
 - 현재 한국세라믹기술원 학생연구원
-

김남일



- 국립경상대학교 건축공학과 졸업
 - 한양대학교 건축공학과 석사과정
 - 현재 한국세라믹기술원 학생연구원
-

이영준



- 국립경상대학교 건축공학과 졸업
 - 현재 한국세라믹기술원 학생연구원
-

서성관



- 숭실대학교 화학과 학사
 - 한양대학교 신소재공학과 박사
 - 현재 한국세라믹기술원 선임기술원
-

추용식



- 한양대학교 신소재공학과 박사
 - 라파즈한라시멘트 기술연구소 주임연구원
 - 현재 한국세라믹기술원 수석연구원
 - 당 학회지 제29권 2호 참조
-