

고전도 복합재료 기반 차량용 부품의 전기·화학적 특성 분석 및 열전달 시뮬레이션 연구

유성훈^{1,3} · 윤현성¹ · 서영훈² · 심지현^{1†}

¹DYETEC연구원, ²주식회사 휴비스, ³부산대학교 응용화학공학부

Research on the Electrical·Chemical Properties and Heat Transfer Simulation of Composite-based Vehicle Components

Seong-Hun Yu^{1,3}, Hyun-Seong Yun¹, Yeong-Hun Seo², and Jee-Hyun Sim^{1†}

¹Computer Aided Engineering Team, DYETEC, Daegu 41706, Korea

²Huvis, Inc., Daejeon 34017, Korea

³School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract: In this research, a PTC/GNP mixture was manufactured by mixing GNP with various mass fractions (0.1–0.5 wt.%), and then PTC/GNP was coated on a meta-aramid plain fabric mixed with a conductive yarn to manufacture a planar heating element for a vehicle heating device. After analyzing the thermal and electrical characteristics, the optimal manufacturing process conditions were derived. A heat transfer simulation study on a human dummy model in a virtual space was also conducted in parallel, and the study was conducted to derive predictions for the thermal environment of the human body without actually performing complex tests, thereby reducing development costs and time. The results of the analysis of the characteristics of PTC/GNP mixtures according to GNP content are as follows. As the GNP content increased, the room-temperature electrical resistance decreased, but at 0.1 wt.%, the PTC ratio increased significantly at 150 °C due to excessive network collapse between GNPs. When the GNP content was 0.3 wt.%, the balance between room-temperature and high-temperature resistances was the best, and it was judged to be the optimal composition for stably implementing self-temperature control characteristics. As a result of heat transfer analysis in a virtual vehicle environment, the heat flux felt by the human body dummy was the highest at 126.5 W/m² in a GNP composition of 0.3 wt.%, and it is expected to be effective in improving actual vehicle heating efficiency. In the future, we plan to conduct additional research on the comfort and stability felt by human dummy models in virtual vehicle spaces.

†Corresponding Author: Jee-Hyun Sim
E-mail: enviro1234@dyetec.or.kr

Received January 13, 2026

Revised February 23, 2026

Accepted February 23, 2026

© 2026 The Korean Fiber Society

Keywords: PTC composite, graphene nanoplatelet (GNP), self-regulating heating element, planar heating element, heat transfer simulation

1. 서 론

전기자동차에서는 엔진 폐열을 활용할 수 없어 난방 시 주행거리 감소가 크기 때문에, 고효율·저전력 난방이 가능한 면상발열체가 필수적이며, 특히 면상발열체는 빠른 국부 난방과 균일한 열분포를 통해 에너지 소비를 줄이면서도 승객의 열적 쾌적성을 효과적으로 향상시킬 수 있다[1].

내연기관 자동차는 일반적으로 약 5 kW의 폐열이 자연적으로 발생하기 때문에 난방을 위한 별도의 전력이 거의 불필요한 반면, 전기차의 경우 운행거리(electric range)가 증가할수록 별도의 전력이 요구되기 때문에 고효율·고성능의 발열체 기술 개발이 시급한 상황이다[2]. 이에 따른 해결책 중 하나로써, 고내열 섬유 기반 도전사 및 나노탄소 동소체(탄소나노튜브(CNT), 그래핀(graphene) 등) 적용 면상발

열체에 대한 연구가 진행되고 있다[3-7].

Lin Wang 등은 메타아라미드(poly(m-phenylene isophthalamide), meta-aramid) 섬유와 탄소나노튜브를 이용하여 경량화된 발열체 제조에 관한 연구를 진행하였으며, 발열체 제조 조건에 따른 인장강도, 및 전기전도도 변화에 대한 연구를 진행하였다[8]. Iman Naseri 등은 아라미드 섬유 기반 면상발열체를 제조하기 위하여, 아라미드 섬유 위에 레이저 유도 그래핀(laser-induced graphene) 패턴을 형성하는 연구를 진행하였으며[9], 아라미드 섬유를 이용하여 제조된 부직포(non-woven) 표면 위에 플라즈마 처리 후, 은(Ag) 소재를 증착시켜 전기전도성 직물을 제조하는 연구도 진행된 바 있다[10].

아라미드 섬유 소재를 활용하여 제조된 면상발열체의 경우, 인체에 대한 안정성에 대한 검증이 필수적으로 요구된다. 면상발열체 제조 및 인체에 대한 안정성 최종 검증까지 소요되는 시간과 비용을 절약하기 위해서, 시뮬레이션(simulation)을 통한 예비 성능 검증이 매우 유용하게 사용될 수 있다.

Jeon 등은 메타아라미드 섬유에 그래핀 및 다중벽 탄소나노튜브(MW-CNT) hybrid filler를 첨가한 전기전도성 필름을 제조한 후, 전압 인가 시 온도 상승 곡선, 발열 응답 속도 등의 성능을 측정하여 전기적 특성 해석에 대한 연구를 진행하였다[11]. 또한 아라미드 섬유와 카본블랙(carbon black) 복합 소재를 사용하여 에너지 효율 및 온도 제어 범위에 대한 시뮬레이션 연구도 진행된 바 있다[12,13]. 아라미드 섬유를 이용하여 자동차 난방장치용 면상발열체를 제조하였을 경우, 면상발열체의 진동, 마찰, 고온 특성 등의 환경요인이 인체에 복합적으로 작용한다[14,15]. 면상발열체가 자동차용 난방장치에 적용되었을 때 자동차 내부 대류 조건에 따른 열전달 시뮬레이션을 통하여 인체에 대한 영향성도 분석할 수 있다[16-19].

따라서 본 연구에서는 면상발열체에 주로 쓰이는 양전온계수(positive temperature coefficient, PTC) 잉크의 자기온도조절 특성으로 과열을 방지하면서, 높은 전기·열전도성 특성을 발현하기 위하여 그래핀 나노플레이트(graphene nanoplatelets, GNP) 기반 면상발열체에 대한 연구를 진행하고자 하였다. GNP를 다양한 질량 분율(0.1-0.5 wt.%)로 혼합한 PTC/GNP 혼합물을 제조 한 후, 도전사가 혼합된 메타아라미드 평직물 위에 PTC/GNP를 코팅하여 차량 난방장치용 면상발열체를 제조하였으며 열적·전기적 특성 분석 후 최적의 제조 공정 조건을 도출하였다. 가상의 공간에서 인체 터미 모델에 대한 열전달 시뮬레이션 연구도 병행하여, 실제로 복잡한 시험을 수행하지 않고도 열적 환경에서의 인체에 대한 예측값을 도출하여, 개발 비용 및 시간을 절감할 수 있는 연구를 수행하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료 및 시편 제작

면상발열체 제조에 사용된 전기전도성 섬유로서, 메타아라미드 방적사(Huvis Inc., Korea)와 50 μm 굵기의 구리 원사(Geolife Inc., Korea)를 이용하였고, 메타아라미드 방적사 소재의 기본 정보들을 Table 1에 나타내었다. 메타아라미드 섬유는 내열성, 전기적 안정성 및 기계적 내구성이 상대적으로 우수하며, 장시간 열노출에도 열수축 및 열변형이 거의 없기 때문에, 면상발열체의 주요 소재로 활용되었다. 메타아라미드 방적사와 구리 원사를 복합화하기 위하여, 메타아라미드 방적사 1가닥에 구리 원사 2가닥을 S연 형태로 합사하는 방식을 선정하여 복합사를 제조하였다. 복합사를 활용하여 제조된 평직물의 정보는 Table 2에 나타내었다.

제조된 평직물 표면의 잔류물질(PVA, 아크릴 고분자, 전분 등)의 제거를 위하여 호발 및 정련, 저온 환경에서의 수세 등 전처리 공정을 실시하였다. 전처리 공정은 Cold-Pad-Batch (CPB) (MCPB1205, Samil CND, Korea)를 활용하여 진행하였으며, 공정 조건은 Table 3에 나타내었다.

제조된 평직물 표면위에 BaTiO_3 기반 PTC 잉크(conro

Table 1. Characterization of meta-aramid yarn

Properites	Meta-aramid spun yarn
Yarn count (Nec)	40.84 (± 4.6)
Single yarn strength (cN)	1.56 (± 3.6)
Strain (%)	16.04 (± 2.2)

Table 2. Characterization of plain fabric(meta-aramid/Cu fiber)

Properites	Plain fabric (meta-aramid spun yarn/Cu fiber)
Materials	Warp : m-aramid Weft : m-aramid / Cu fiber
Twist per meter	450
Width (inch)	62.32
Length (yard)	95.24
Density of warp (/inch)	73.91
Density of weft (/inch)	95.02

Table 3. Pretreatment process conditions for meta-aramid plain fabric

Component	Pre-treatment conditions
Oxidizing agent (g/l)	12.0 \pm 0.1
Scouring penetrating agent (g/l)	1.0 \pm 0.01
NaOH (g/l)	5.0 \pm 0.05
De-oiling agent (g/l)	3.5 \pm 0.1
Time (min)	40
Tempaerature ($^{\circ}\text{C}$)	100 \pm 2

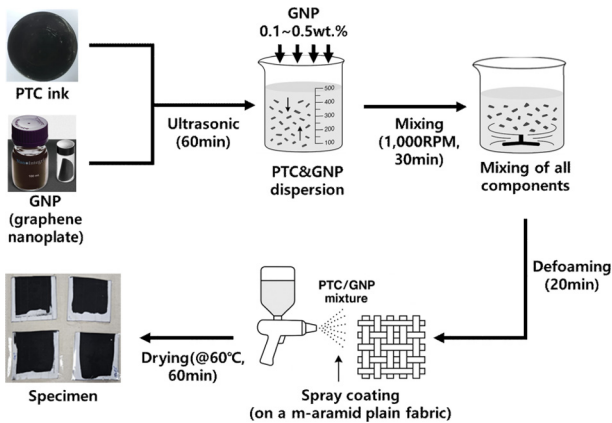


Figure 1. Schematic diagram of the preparation of PTC/GNP mixture.

Inc., China) 및 그래핀 나노플레이트(graphene nanoplatelets, GNP), Scist Co., Korea)를 혼합한 PTC/GNP 혼합물을 코팅하여 자동차 난방장치용 면상발열체를 제조하고자 하였다. 그래핀 나노플레이트(GNP)는 그래핀을 겹쳐놓은 형태의 두께 100 nm 이하의 평평한 시트(sheet) 형태를 가지고 있다[20]. GNP는 그래핀보다 비용이 저렴하고 분산이 쉬우면서, 카본블랙보다 상대적으로 높은 전도성을 가지고 있기 때문에, 고효율 면상발열체를 제조하기 위하여 복합화 연구를 진행하였다. GNP를 소량 첨가할 경우, GNP의 판상 구조로 인한 응력 분산, 전기전도성 증가 등 긍정적인 효과를 나타낼 수 있지만, 과도하게 첨가될 경우 PTC 잉크의 성능을 저하시키는 문제점을 야기할 수 있다[21,22]. PTC/GNP 혼합물 제조 시, GNP의 질량분율을 0.1 wt.%, 0.2 wt.%, 0.3 wt.% 0.4 wt.% 및 0.5 wt.%로 설정하였으며, 제조 모식도는 Figure 1에 나타내었다.

2.2. 전기적 특성 분석 방법

제조된 PTC/GNP 혼합물을 메타아라미드 직물에 코팅하기 전에, GNP 질량분율에 따른 PTC/GNP 혼합물의 전기적 특성 평가를 진행하였다. 전기적 특성을 평가하기 위하여 PTC ratio를 식 (1)에 따라 산출하였다.

$$PTC \text{ ratio} = R_T/R_{25} \quad (1)$$

R_T : resistance value at a specific temperature(Ω /sq)

R_{25} : resistance value at a 25°C(Ω /sq)

PTC ratio의 값이 클수록, 특정 온도에서의 전기 저항값이 크다는 것을 의미하고, 전류의 흐름이 감소하여 스스로 발열을 억제하거나 발열체를 보호할 수 있다는 것을 나타낸다. PTC/GNP의 PTC ratio를 측정하기 위하여, 30°C에서 150°C까지 20°C 간격으로 건조된 PTC/GNP의 혼합물의 전기저항값을 측정하였다. 각 설정 온도 도달 후의 열평형(온도 안정화) 시간은 5분으로 설정하였고, 전기저항 측정에

는 4단자 측정기(Keithley 2450, Korea)를 사용하였으며, 다섯 번 측정한 후 평균값을 결과값으로 활용하였다.

2.3. 열적 특성 분석 방법

PTC/GNP가 코팅된 메타아라미드 직물 기반 면상발열체의 기본 발열 특성을 평가하기 위해, 각 시편 양단에 5 V의 전압을 인가하고 시간에 따른 표면 온도 변화를 측정하였다. 전압 인가 후 60초까지 비접촉식 적외선 온도계(SP 40/42, Korea)를 이용하여 면상발열체의 발열 영역의 온도를 측정하였고, 각 시편의 60초 후 온도 값을 비교하여 발열 특성을 평가하였다. 표면 온도의 경우, 면상발열체를 가로 및 세로로 이등분하여 사분할한 후, 각 중앙 지점 온도의 평균값을 활용하였다. 표면 온도의 경우 접촉식 적외선 온도계를 동일하게 활용하였다. 표면 온도의 균일도는 다음의 식 (2)를 이용하여 산출하였다. 온도 균일도는 1에 가까울수록 균일하다는 것을 의미한다.

$$\text{Temperature uniformity} = 1 - \delta_T/T_{\text{avg}} \quad (2)$$

δ_T : Temperature standard deviation after 60 seconds($^{\circ}\text{C}$)

T_{avg} : Average temperature of the surface heating element after 60 seconds($^{\circ}\text{C}$)

면상발열체의 열전달 해석 수행을 위해 필요한 열전도도 값은 비접촉식 열전도도 측정기(LFA447, Korea)를 이용하여 측정하였으며, 비열 값은 KS M ISO 11357-4 규격에 의거하여 측정하였다. 각 실험을 다섯 번 반복 진행하여 도출된 평균값을 최종 결과값으로 활용하였다.

2.4. 형태학적 특성 분석 방법

메타아라미드 직물 위에 코팅된 PTC/GNP혼합물의 형태학적 특성을 분석하기 위하여, FE-SEM (Apreo S, Korea)를 이용하여 입자 분산 정도 및 입자 응집 정도에 대한 분석을 실시하였다.

2.5. 열전달 해석 조건 설정

열적 특성 분석 결과에 대한 데이터를 in-put 데이터로 활용하여 차량 안에 있는 인체 모델에 대한 열전달 해석을 실시하였다. 제조된 면상발열체의 경우, 실제 차량 또는 실제와 유사한 환경에서 발열 특성 또는 온도 상승 속도 등의 신뢰성을 검증하는 것이 타당하나, 실제 시험에 드는 시간이나 비용적 측면에서 부담이 된다. 하지만 가상의 공간에 실제와 유사한 환경을 구축하여 열전달 특성에 대한 시뮬레이션을 진행한다면 개발 시간 및 비용적 측면에서 50% 이상 절감이 가능하다. 시뮬레이션에 필요한 기본 in-put 데이터로써 열전도도계수, 비열 등이 사용되었다. 인체 모델 생성을 위하여 AUTOCAD (autocad 2022, autodesk, USA)와 Hyper mesh (hypermesh 2022, altair eng., USA)가

Table 4. In-input data and out-put data of heat protection fabric

In-input data	Out-put data
Heat transfer coefficient (W/m ² ·k)	Heat flux for 3D model
Specific heat (J/kg·k)	
Thickness (mm)	

활용되었으며, 열전달 시뮬레이션을 위하여 열해석 소프트웨어(abaqus CAE, dassault, USA)를 사용하였다. 시뮬레이션에 필요한 in-input data 및 결과물인 out-put data를 Table 4에 나타내었다.

열유속(Heat flux)은 단위 시간당 단위 면적에 흐르는 열의 양을 의미하며, 단위는 W/m²이다. 단위 시간당 열전달량 Q를 단면적 A로 나누면 단위 시간당 단위 면적에 흐르는 열량인 열유속이 계산된다.

$$\text{Heat flux}(q, \text{W/m}^2) = Q/A$$

Q: heat transfer per unit time(W)

A: Cross-sectional area through which heat passes(m²)

3. 결과 및 고찰

3.1. 전기적 특성 분석 결과

GNP 질량분율에 따른 PTC/GNP 혼합물의 전기적 특성 평가를 진행한 결과를 Figure 2와 Table 5에 나타내었다. GNP의 질량분율이 증가함에 따라, 25°C에서의 전기저항(R₂₅) 값은 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 GNP가 PTC ink 내에서 전도성 네트워크(percolation network)를 형성함에 따라 전자 이동 경로가 증가하기 때문인 것으로 판단된다[23].

PTC/GNP 혼합물들의 PTC ratio 값은 온도 상승에 따라 전기저항값이 증가하는 전형적인 PTC 거동이 관찰되었으나, GNP의 질량분율에 따른 PTC ratio의 증가 양상에는 뚜렷한 차이가 발생하였다. GNP의 질량분율이 0.1 wt.%인 경우, 150°C에서의 PTC ratio가 최대 26.7% 이상 증가된 값

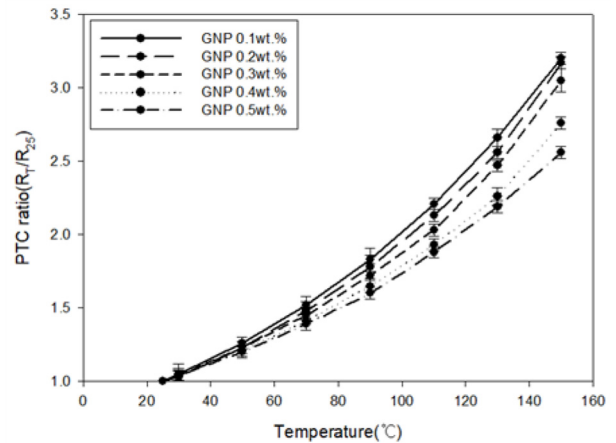


Figure 2. Electrical properties evaluation results of PTC/GNP mixtures according to GNP mass fraction.

을 나타내었다. 이는 온도 상승에 따른 PTC ink의 열팽창으로 인해 GNP 간 네트워크가 쉽게 분리되어, 전도 경로가 손실되었기 때문인 것으로 판단된다.

GNP의 질량분율이 0.3 wt.%인 경우, 110°C 이상의 온도 조건에서 GNP 간 네트워크의 부분적 붕괴로 인하여 PTC ratio의 값이 일부 향상되는 결과를 나타내었다. 150°C 조건에서의 PTC ratio 값은 GNP의 질량분율이 0.1 wt.%인 경우와 비교했을 때, 약 7.8% 감소된 값을 나타내었다. 25°C에서의 전기 저항값과 고온에서의 전기 저항값으로 미루어 볼 때, 자기온도제어(self-regulating) 특성이 가장 균형적으로 구현되는 조성인 것으로 판단된다.

GNP의 질량분율이 0.4 wt.% 이상인 경우, 25°C에서의 저항값이 매우 낮은 경향을 나타내었다. 또한 GNP 간 네트워크가 치밀하게 형성되기 때문에, GNP 간 응집 현상이 발생할 수 있고, 온도 상승에 따른 PTC ratio 값이 다른 경우와 비교하여 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

3.2. 열적 분석 결과

PTC/GNP 혼합물이 메타아라미드 평직물 표면에 약 0.2 mm

Table 5. Electrical properties evaluation results of PTC/GNP mixtures according to GNP mass fraction

	Specimen (PTC/GNP)					
	GNP 0.1 wt.%	GNP 0.2 wt.%	GNP 0.3 wt.%	GNP 0.4 wt.%	GNP 0.5 wt.%	
R ₂₅ (Ω/sq)	450.20	443.40	390.30	385.20	380.10	
PTC ratio (R ₁ /R ₂₅)	at 30°C	1.05	1.03	1.04	1.04	1.04
	at 50°C	1.26	1.23	1.23	1.21	1.20
	at 70°C	1.52	1.48	1.45	1.41	1.39
	at 90°C	1.83	1.78	1.72	1.65	1.60
	at 110°C	2.21	2.13	2.03	1.93	1.88
	at 130°C	2.66	2.56	2.47	2.30	2.19
	at 135°C	3.20	3.17	3.05	2.76	2.56

Table 6. Evaluation of thermal characteristics of planar heating elements according to mass fraction of GNP

	Specimen (PTC/GNP)				
	GNP 0.1wt.%	GNP 0.2wt.%	GNP 0.3wt.%	GNP 0.4wt.%	GNP 0.5wt.%
Surface temperature (°C)	112.4	125.7	126.6	124.0	120.5
Temperature uniformity (-)	0.92	0.93	0.96	0.87	0.85
Thermal conductivity (W/m-k)	0.42	0.46	0.55	0.53	0.52
Specific heat (J/(kg·K))	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4

두께로 코팅되어 있는 면상발열체의 발열 특성 분석 결과를 Table 6에 나타내었다. 각 시편의 양단에 5 V의 전압을 60초 동안 인가하였을 때, 평균 표면 온도는 GNP 질량분율을 증가에 따라 전반적으로 상승하는 경향을 나타내었다. GNP의 질량분율이 0.1 wt.% 시편의 경우 비교적 낮은 발열 특성을 나타내었다. GNP의 질량분율이 0.3 wt.%인 경우 GNP 입자 간 네트워크 형성에 의해 발열 효율이 크게 향상된 것으로 판단된다.

GNP의 질량 분율이 0.4 wt.% 이상인 시편에서는 3% 이내로 온도가 소폭 상승되는 경향을 나타내었으나, 온도 균일도는 GNP의 질량분율이 0.3 wt.%인 경우와 비교하여 9.3% 감소된 값을 나타내었다. 이는 과도한 GNP 첨가로 인하여 입자 간 응집 현상이 발생되고, 전기적·열적 불균일성이 증가한 것으로 판단된다.

면상발열체의 열전도도의 경우, GNP 질량분율 증가에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 나타냈다. GNP의 질량분율이 0.1 wt.%인 시편의 경우 PTC ink와 메타아라미드 섬유는 열전달 특성이 지배적으로 작용하여 비교적 낮은 열전도도를 나타낸 반면, GNP 함량이 증가함에 따라 GNP의 높은 고유 열전도도와 전도 네트워크 형성 효과로 인해 열전도도가 점진적으로 증가하였다. 특히 0.3 wt.% 이상에서는 GNP 간 연결성이 향상되면서 열전달 경로가 보다 연속적으로 형성되어 열전도도 증가 폭이 상대적으로 크게 나타날 것으로 판단된다.

한편, 비열의 경우 GNP 질량분율 증가에 따라 큰 변화가 없는 경향을 나타내었다. 이는 GNP의 비열이 고분자 매

트릭스 대비 상대적으로 낮고, 전체 복합체 내 GNP 함량이 0.5 wt.% 이하로 제한적이기 때문에 복합체 전체 비열에는 제한적인 영향을 미치는 것으로 해석된다.

3.3. 형태학적 특성 분석 결과

PTC/GNP 혼합물이 메타아라미드 평직물 표면에 코팅된 면상발열체의 형태학적 특성 분석 결과를 Figure 3에 나타내었다. GNP의 질량분율이 0.5wt.%인 경우에, 입자간 응집 현상이 발생하는 것을 확인하였으며, 이에 따라 전기적·열적 특성이 저하된 것으로 판단된다.

3.4. 열전달 해석 결과

가상의 차량 공간에 난방장치용 면상발열체가 있다고 가정했을 때의 열전달 해석 연구를 수행하였으며, 열전도도, 비열 등의 열적 특성 분석 결과를 in-pur 데이터로써 활용하였고, 성인 남성 30대 기준 인체 물성 데이터를 Table 7에 나타내었다.

차량에 탑승한 인체 더미(Human dummy) 모델을 figure 4에 나타내었다. 실제 차량에 탑승한 인체 모델링은 3차원 형상이지만, 차량 내부 공간의 현실적인 모델링과 시뮬레이션 효율성을 향상시키기 위해 2차원으로 인체 더미 모델링 및 격자를 생성하였다. 이때, 면상발열체를 제외한 모든 공간은 공기로 구성하였고, 열전달 시뮬레이션을 위한 격자는 code 39로 선택하였다. 면상발열체가 설치된 위치는 차량 앞좌석 근처 부근으로 설정하였다.

가상의 차량에 난방장치용 면상발열체가 적용되었을 때

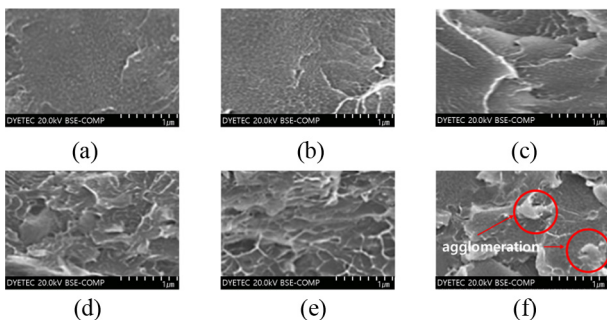


Figure 3. Morphological characteristics analysis results of planar heating elements according to GNP mass fraction; (a) 0 wt.%, (b) 0.1 wt.%, (c) 0.2 wt.%, (d) 0.3 wt.%, (e) 0.4 wt.%, and (f) 0.5 wt.%.

Table 7. Human body property data used in simulation

Data	Value	Unit
Density	0.98~1.07	ton/mm ³
Specific heat	3,470,000	J/ton-K
Thermal conductivity	0.0003	W/mm-K



Figure 4. Human dummy model shape riding in a vehicle.

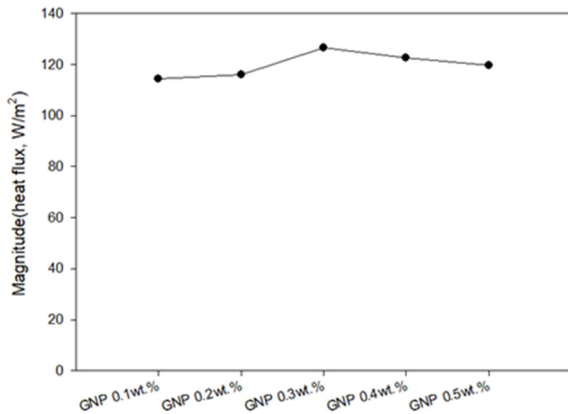


Figure 5. Heat transfer simulation results for a human dummy model.

인체 더미 모델에 열전달 시뮬레이션 결과를 Figure 5에 나타내었다. GNP의 질량분율이 0.3 wt.%인 경우에 인체 더미 모델이 느끼는 열유속(heat flux) 값이 126.5 W/m²로 가장 높게 나타났으며, GNP의 질량분율이 0.1 wt.%인 경우와 비교하여 11.5% 향상된 값을 나타내었다. 실제로 인체가 따뜻함을 느끼는 열유속값은 100 W/m² 이상으로써[24], 실제로 차량에 면상발열체가 적용되었을 때 난방효율이 증가할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 GNP의 질량분율(0.1–0.5 wt.%)에 따라 PTC/GNP 혼합물을 제조하고, 메타아라미드 평직물에 코팅한 후에, 열적·전기적 특성 분석 및 가상의 인체 더미 모델에 대한 열전달 시뮬레이션 연구를 수행하였고, 이에 대한 연구 결론은 하기와 같다.

1. GNP 함량 증가에 따라 상온 전기저항은 감소하였으나, 0.1 wt.%에서는 150°C의 온도에서 과도한 GNP 간 네트워크 붕괴로 PTC ratio가 크게 증가하였고, 0.4 wt.% 이상에서는 네트워크 과밀 및 응집으로 PTC 효과가 저하되었다. 반면 0.3 wt.% 조성은 상온 저항과 고온 저항 간 균형이 가장 우수하여 자기온도제어 특성이 안정적으로 구현되는 최적 조성으로 판단된다.
2. 면상발열체의 평균 표면온도와 열전도도는 GNP 질량분율 증가에 따라 전반적으로 상승하였으며, 특히 0.3 wt.%에서 전도 네트워크 형성에 의해 발열 효율이 크게 개선되었다. 반면 0.4 wt.% 이상에서는 GNP 응집으로 인해 온도 균일도가 오히려 감소하였다.
3. 가상 차량 환경에서의 열전달 해석 결과, GNP 0.3 wt.% 조성에서 인체 더미가 느끼는 열유속이 126.5 W/m²로 가장 높게 나타났으며, 이는 인체가 따뜻함을 인지하는 기준인 100 W/m²를 충분히 상회하는 값이다. 이를 통해

해당 조성의 면상발열체가 실제 차량 난방 효율 향상에 효과적일 것으로 판단된다. 추후 가상의 차량 공간에서 인체 더미 모델이 느끼는 쾌적함이나 안정성에 대한 연구도 추가로 진행할 계획이다.

감사의 글: 본 연구는 산업통장지원부의 소재부품기술개발사업이 지원하는 연구과제(20026439, 20017544)로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

References

1. H. Ling, L. Yan, H. Pan, S. Chen, F. Li, and S. Zhang, “Full-scene Battery Self-heating Method Based on Powertrain System for Electric Vehicles at Extremely Low Temperatures”, *eTransportation*, 2025, **26**, 100465.
2. V. Yadav, M. H. Wiebenga, D. Haddad, J. R. Salvador, N. P. W. Pieczonka, R. D. Schmidt, H. J. Gonzalez Malabet, and L. Wang, “In situ Analysis and Mechanistic Understanding of Gas Species Generated in Battery Cells During Thermal Abuse”, *J. Energy Chem.*, 2026, **114**, 699–708.
3. S. Sundar, N. Jayaprakash, and D. Govindaraj, “Carbon-based Nanomaterials in the Remediation of Antibiotics from Aquatic Environments: Advances, Mechanisms, and Future Perspectives”, *Environmental Pollution and Management*, 2026, **3**, 99–116.
4. L. Ma, J. Song, H. Si, C. Li, C. Gong, and J. Zhang, “Multi-Interface Engineering in rGO/VO₂/EP Composites for Intelligent and Broadband Microwave Absorption”, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2026, **266**, 141–150.
5. M. Inagaki and F. Kang, “Graphene Derivatives: Graphane, Fluorographene, Graphene Oxide, Graphyne and Graphdiyne”, *J. Mater. Chem. A*, 2014, **2**, 13193–13206.
6. G. Silva, S. Kim, R. Aguilar, and J. Nakamatsu, “Natural Fibers as Reinforcement Additives for Geopolymers – A Review of Potential Eco-friendly Applications to the Construction Industry”, *Sustainable Materials and Technologies*, 2020, **23**, 28–37.
7. S. Yu, B. Guo, T. Zeng, H. Qu, J. Yang, and J. Bai, “Graphene-based Lithium-ion Battery Anode Materials Manufactured by Mechanochemical Ball Milling Process: A Review and Perspective”, *Compos. Part B Eng.*, 2022, **246**, 110232.
8. B. Yang, X. Ding, M. Zhang, and L. Wang, “Scalable Electric Heating Paper Based on CNT/Aramid Fiber with Superior Mechanical and Electric Heating Properties”, *Compos. Part B*, 2021, **224**, 109242.
9. I. Naseri, M. Ziaee, Z. N. Nilsson, D. R. Lustig, and M. Yourdkhani, “Electrothermal Performance of Heaters Based on Laser-Induced Graphene on Aramid Fabric”, *ACS Omega*, 2022, **7**, 3746–3757.
10. S. Zhu, C. W. Lou, S. Zhang, N. Wang, J. Li, Y. Feng, R. He, C. Xu, and J. H. Lin, “Clean Surface Additive Manufacturing of Aramid Paper-based Electrically Heated Devices for Medical

- Therapy Application”, *Surfaces and Interfaces*, 2022, **29**, 101689.
11. G. W. Jeon and Y. G. Jeong, “Electric Heating Films Based on m-aramid Nanocomposites Containing Hybrid Fillers of Graphene and Carbon Nanotube”, *J. Mater. Sci.*, 2013, **48**, 4041–4049.
 12. Y. Chen, C. Xie, S. Yang, R. He, Y. Guo, Z.-X. Guo, B. Guo, and X. Tuo, “Aramid-based Electric Heating Films by Incorporating Carbon Black”, *Materials Today Communications*, 2023, **34**, 105105.
 13. J. Zhang, J. Chen, M. Takao, S. Diahm, T. Li, and X. Chen, “Electrical Aging Characteristics of Aramid Paper Under Nanosecond Impulse and AC Voltages for the Stator Slot of Electric Vehicle Motors”, *Japanese J. Appl. Phys.*, 2022, **61**, 046002.
 14. M. Ruf, A. Hupfeld, K. Heidacher, D. Joop, C. Wrana, and A. Horoschenkoff, “Analysis of the Integration of Aramid Fiber Tension Struts in a Box-shaped Pressure Vessel”, *Appl. Compos. Mater.*, 2022, **29**, 1733–1745.
 15. J. W. Zhang, W. H. Deng, C. Putson, F. Belhora, and A. Hajjaji, “Analysis of Physical and Chemical Properties of Aramid Insulating Paper After Pulse and AC Voltage Electrical Aging”, *Green Energy and Technology*, 2024, **2057**, 125–139.
 16. C. Bai, J. Zheng, G. A. Rizzi, and P. Colombo, “Low-temperature Fabrication of SiC/geopolymer Cellular Composites”, *Compos. Part B: Eng.*, 2018, **137**, 23–30.
 17. Q. Wang and C. Zhang, “Fire Safety Analysis of Building Partition Wall Engineering”, *Procedia Engineering*, 2018, **211**, 747–754.
 18. L. P. Muthusamy, A. P. Periyasamy, and N. Govindan, “Prediction of Pilling Grade of Alkali-treated Regenerated Cellulosic Fabric Using Fuzzy Inference System”, *J. Text. Inst.*, 2022, **113**, 2759–2769.
 19. R. Ma, J. Shi, W. Lin, and J. Chen, “Synthesis and Sintering of Nanocrystalline SiC Ceramic Powders”, *Mater. Chem. Phys.*, 2020, **253**, 278–287.
 20. J. He, Y. Liu, C. Wu, S. Liu, Y. Lu, and Q. Wu, “Pre-oxidation of Cellulose Controlled by the Nitrogen-phosphorus Compound Catalyst to Prepare Fibers with Ultra-high Flame Retardancy”, *Ind. Crops and Prod.* 2023, **195**, 116355.
 21. Y. Arafat and A. J. Uddin, “Recycled Fibers from Pre- and Post-consumer Textile Waste as Blend Constituents in Manufacturing 100% Cotton Yarns in Ring Spinning: A Sustainable and Eco-friendly Approach”, *Heliyon*, 2022, **8**, e11275.
 22. J.-H. Yang, H.-S. Cho, S.-H. Park, and J.-H. Lee, “A Study on Skin Temperature Distribution of the Human Body as Fundamental Data for Developing Heat Energy Harvesting Clothing”, *Korean Society for Emotion and Sensibility*, 2011, **14**, 435–444.
 23. M. Haghgoo, R. Ansari, and M. K. Hassanzadeh-Aghdam, “Prediction of Piezoresistive Sensitivity and Percolation Probability of Synergetic CNT-GNP Conductive Network Composite”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, **336**, 113414.
 24. A. Alasif, A. Pucciarelli, and A. Shams, “Development of an Improved Turbulent Heat Flux Model for the Heat Transfer of Supercritical Fluids”, *Progress in Nuclear Energy*, 2026, **193**, 106190.