Composites Research

Vol. 39, No. 5, 444-457 (2026)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2026.39.5.444
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

# 배터리 팩 인클로저 적용을 위한 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재의 난연성, 전자기파 차폐 성능, 재활용 특성 평가

이건규* · 조운성* · 최호진* · 채효병** · 최용석** · 나원진** · 남영우*,***†

# Recyclable Flame-retardant Ni-plated Glass/Vitrimer Composites with Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Effectiveness for Battery Pack Enclosure

**Geon-Gyu Lee*, Un-Seong Jo*, Ho-Jin Choi*, Hyo-Byung Chae**, Yong-Seok Choi**, Won-Jin Na**, Young-Woo Nam*,***†**

**ABSTRACT:** Fiber-reinforced composites (FRCs) are widely used as lightweight structural materials because of their high specific strength and stiffness. However, thermoset composites are difficult to reprocess and recycle because of their irreversible crosslinked networks. In this study, Ni-plated S-glass/vitrimer composites containing 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO) were developed for electric vehicle battery pack enclosures. Their flame retardancy, electromagnetic interference (EMI) shielding, and recyclability were evaluated. The composites achieved a UL-94 V-0 rating. With DOPO addition, the peak heat release rate (pHRR) and total heat release (THR) decreased to 114.3 kW/m² and 15.8 MJ/m², respectively. The composites also exhibited an EMI SE above 20 dB over 4–18 GHz. Ni-plated S-glass fibers were recovered through solvent-based swelling and reused to fabricate recycled composites. The recycled composites retained approximately 68.0% of the tensile strength and 75.9% of the tensile modulus while maintaining EMI shielding effectiveness above 20 dB. These results demonstrate the potential of Ni-plated S-glass/vitrimer composites as sustainable multifunctional composites for electric vehicle battery pack enclosures.

**초 록:** 섬유 강화 복합재는 우수한 비강도와 비강성을 바탕으로 경량 구조재로 널리 활용되고 있으나, 열경화성 수지의 비가역적 가교 구조로 인해 재가공 및 재활용이 어렵다는 한계가 있다. 본 연구에서는 전기자동차 배터리 팩 인클로저용 다기능 복합재를 개발하기 위해 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO)가 도입된 Ni-plated S-glass/vitrimer 복합재를 제작하고 난연성, 재활용성, 전자기파 차폐 성능을 평가하였다. 본 연구에서 개발된 복합재는 UL-94 수직 연소 시험에서 V-0 등급을 달성하였으며, 콘 칼로리미터 시험 결과 DOPO 첨가 시 pHRR과 THR이 각각 114.3 kW/m²와 15.8 MJ/m²로 감소하였다. 전자기파 차폐 성능은 4–18 GHz 대역에서 20 dB 이상의 차폐 성능을 확보하였다. 용매 기반 팽윤 공정을 통해 회수된 Ni-plated S-glass 섬유를 이용하여 복합재를 재제작한 결과, 인장강도와 인장강성은 재활용 전 대비 각각 68.0%와 75.9%를 유지하였으며, 재활용 후에도 4–18 GHz 대역에서 20 dB 이상의 전자기파 차폐 성능을 유지하였다. 본 연구에서 개발된 복합재는 난연성, 강화재의 재사용 가능성, 전자기 차폐 성능을 동시에 확보하여 친환경 배터리 팩 인클로저용 다기능 구조재로서의 적용 가능성을 제시하였다.

**Key Words:** 다기능 복합재(Multifunctional composites), 비트리머(Vitrimer), 난연성(Flame retardancy), 전자기파 차폐(EMI shielding), 재활용(Recycling)

Received 1 August 2026, received in revised form 19 August 2026, accepted 4 September 2026

*Graduate School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University (KAU)
**Composites Materials Applications Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST)
***Aeronautics Major, College of Engineering, Korea Aerospace University (KAU)
†Corresponding author (E-mail: ywnam@kau.ac.kr)

## 1. 서 론

전 세계적으로 탄소 배출 저감과 자원순환에 대한 요구가 증가함에 따라 자동차 산업에서도 차량 경량화와 재활용 가능한 친환경 소재의 개발이 중요해지고 있다[1,2]. 특히 전기자동차 분야에서는 주행거리 및 에너지 효율 향상을 위해 배터리 시스템의 경량화가 중요한 기술로 고려되고 있다. 이 중 배터리 팩 인클로저는 배터리 셀과 모듈, 냉각장치, 센서, 배터리 관리 시스템 및 전력전자 부품을 외부 충격과 환경으로부터 보호하는 핵심 구조 부품이다[3]. 가장 널리 사용되는 리튬이온 배터리는 충돌, 내부 단락, 과충전 및 국부적인 온도 상승에 의해 열폭주가 발생할 수 있으며, 이때 발생한 고온과 화염은 인접 셀과 전장부품으로 확산될 수 있다[4]. 또한 고출력 전자장비들의 고집적화 및 고전압화는 센서 및 전력전자 부품 간의 전자기파 간섭 가능성을 증가시킨다. 따라서 배터리 팩 인클로저에는 충돌과 진동에 대한 구조적 안정성뿐만 아니라 경량성, 난연성, 열적 안정성 및 전자기파 차폐 성능(EMI shielding effectiveness, EMI SE)이 동시에 요구된다. 또한 전 세계적으로 환경오염 저감과 자원순환에 대한 관심이 증가함에 따라 사용 후 재사용을 고려한 지속가능성 역시 중요한 설계 요소로 부각되고 있다[5].

기존 배터리 팩 인클로저에는 주로 강과 알루미늄 합금이 사용되어 우수한 기계적 강도와 전자기파 차폐 성능을 제공하지만 상대적으로 높은 밀도로 인해 차량 경량화에는 한계가 존재한다. 이에 따라 높은 비강도와 비강성, 우수한 내식성을 갖는 섬유 강화 복합재는 배터리 팩 인클로저의 경량 구조 소재로 주목받고 있다[6]. 유리섬유는 무기질 기반의 불연성 강화재로서 우수한 기계적 특성과 전기절연성, 내환경성을 제공한다. 그러나 일반적인 GFRP의 기지재로 사용되는 열경화성 수지는 영구적인 3차원 가교 구조를 형성한다. 이에 따라 우수한 열적, 기계적 안정성을 나타내지만 가열에 의한 용융이나 용매에 의한 용해가 어려워 사용 후 재활용이 매우 제한적이다. 열경화성 복합재의 재활용에는 기계적 분쇄, 열분해 및 화학적 분해 등 다양한 방법이 적용되고 있으나 이들 공정은 많은 에너지를 요구하거나 회수된 섬유의 길이 및 물성을 저하시켜 기존 목적으로 재사용하는 데 한계가 있다[7,8].

이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 열경화성 수지의 가교 구조를 유지하면서도 외부 자극에 의해 결합 교환이 가능한 동적 공유 결합 네트워크(Covalent adaptable network, CAN)에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다[9-11]. 비트리머(Vitrimer)는 동적 공유결합을 포함하는 CAN의 한 종류로서, 일반적인 사용 온도에서는 기존 열경화성 수지와 유사한 형상 안정성과 기계적 특성을 유지한다. 반면 온도가 증가하면 동적 공유 결합의 교환반응이 활성화되어 가교 밀도를 일정하게 유지한 상태에서 네트워크의 위상구조가 재배열된다[12]. 이러한 특성으로 인해 열경화성 수지와 달리 비트리머는 경화 이후에도 재활용, 응력 완화, 재성형 및 재가공이 가능하다[13].

비트리머에 적용되는 대표적인 동적 공유결합 반응으로는 에스터 교환 반응, 이황화 결합 교환반응, 이민 교환반응 및 이미드 교환반응 등이 있으며 이 중 에스터 교환 반응을 기반으로 하는 비트리머는 원료 확보가 용이하고 기존 에폭시 수지 제조공정에 적용하기 비교적 용이하여 널리 연구되고 있다[14]. 에폭시기와 카복실기의 개환 반응을 통해 형성된 β-하이드록시 에스터 결합에 하이드록시기가 고온에서 에스터 교환 반응에 참여하며 기존 에스터 결합이 새로운 에스터 결합으로 교환됨에 따라 가교 네트워크가 재배열된다[15]. 에스터 교환 반응은 촉매의 종류와 함량에 크게 영향을 받으며, 대표적인 촉매로는 아세트산 아연과 같은 금속염 촉매와 TBD, DBU 등의 유기 염기 촉매가 있다. 이 중 1,5,7-Triazabicyclo[4.4.0]dec-5-ene (TBD)는 높은 염기성을 갖는 유기 촉매로서 에스터 결합 기반 비트리머에 널리 사용되는 대표적인 유기 염기 촉매이다[13]. 그러나 촉매 함량이 과도할 경우 가교 밀도와 유리전이온도가 저하될 수 있으므로 동적 교환반응과 수지의 열적, 기계적 안정성을 동시에 확보할 수 있는 적정 촉매 함량이 중요하다[16]. 고분자 복합재는 높은 가연성으로 인해 화재 안전성이 요구되는 곳에 적용하기에는 한계가 있다. 고분자의 난연성을 향상시키는 방법에는 할로겐계, 인계, 무기물계 및 멜라민계 난연제를 기지재에 물리적으로 분산시키는 첨가형 방식과 난연성 작용기를 고분자 네트워크에 화학적으로 도입하는 반응형 방식이 있다[17]. 첨가형 난연제는 제조공정이 간단하고 기존 수지 시스템에 적용하기 용이하지만, 충분한 난연성을 확보하기 위해 고함량으로 첨가할 경우 수지 점도 증가, 입자 응집, 계면 특성 저하를 유발할 수 있다[18]. 반면 반응형 난연제는 난연성 작용기를 고분자 네트워크에 화학적으로 도입함으로써 난연제의 용출을 억제하고, 기지재 내부에 균일하고 지속적인 난연 성능을 부여할 수 있다[19]. 대표적인 인계 난연 구조인 9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO)는 우수한 열적 안정성과 높은 난연성을 바탕으로 에폭시 수지에 널리 사용되고 있다[20-23]. DOPO의 P–H 결합은 에폭시기와 반응하여 네트워크에 화학적으로 도입될 수 있으며, 연소 과정에서는 인계 라디칼에 의한 기상 연쇄반응을 억제하고 탄화층 형성을 통해 난연성 향상에 기여한다.

그러나 DOPO가 에폭시 네트워크에 도입되면 수지의 가교 밀도와 유리전이온도에 영향을 줄 수 있어, DOPO가 도입된 비트리머는 난연성, 열적, 기계적 특성을 동시에 고려한 설계가 필요하다.

한편 배터리 팩 인클로저에는 내부 전장부품을 전자기파 간섭으로부터 보호하기 위한 전자기파 차폐 성능도 요구된다. 유리섬유는 우수한 기계적 특성과 전기 절연성을

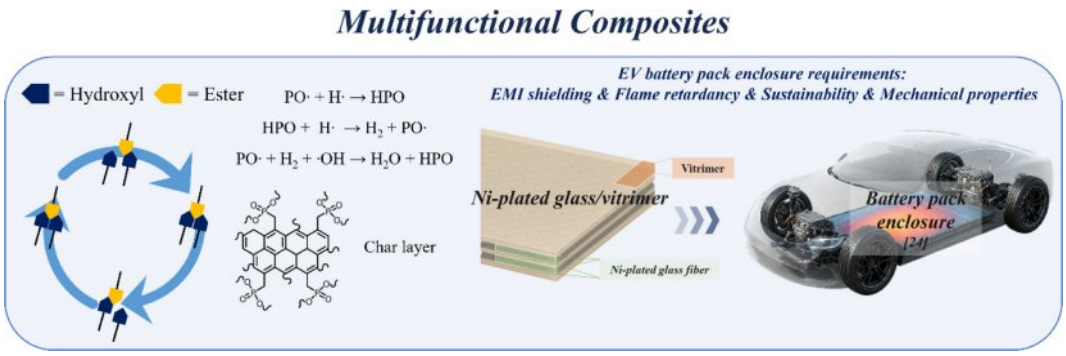



**Fig. 1.** Schematic diagram of proposed Ni-plated glass/vitrimer composites for battery pack enclosure

갖지만 전기전도성이 낮아 일반적인 GFRP만으로는 효과적인 전자기파 차폐 성능을 확보하기 어렵다. 복합재의 전자기파 차폐 성능을 향상시키기 위해 수지에 전도성 필러를 첨가할 수 있으나, 고함량의 필러는 수지 점도 증가, 입자 응집, 기계적 물성 저하를 유발할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 섬유에 금속 무전해 도금을 통해 연속적인 전도성 경로를 형성하여 섬유 보강 효과와 전자기파 차폐 성능을 동시에 구현하였다.

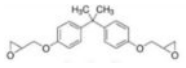
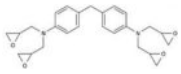
배터리 팩 인클로저 복합재에 대한 선행 문헌 조사 결과, 선행 연구들 모두 난연성, 전자기파 차폐, 재활용성 등을 개별적으로 평가하였으며 이들 특성을 하나의 복합재 시스템에서 종합적으로 구현한 연구는 매우 제한적이다[2,25-27]. 난연성과 전자기파 차폐 성능을 동시에 확보한 사례는 보고되고 있으나, 사용 후 강화재의 회수 및 재사용은 고려되지 않았다[25]. 이에 본 연구에서는 에폭시 기반 난연 비트리머 수지를 제조하고 니켈 도금 유리섬유를 강화재로 활용하여 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재를 제작하였다. DOPO 첨가에 따른 비트리머 수지의 열적 특성을 분석하였으며, 복합재의 난연성, 전자기파 차폐 성능, 기계적 물성 및 재활용 특성을 평가하였다. 특히 재활용성은 수지의 팽윤과 섬유 회수를 확인하는 수준에 그치지 않고, 회수한 니켈 도금 유리섬유로 복합재를 재제작하여 물성을 평가함으로써 강화재의 재사용성을 검증하였다. 이를 바탕으로 배터리 팩 인클로저용 다기능 구조재로서의 적용 가능성을 검토하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 재료

본 연구에서 기지 재료로는 에폭시 수지인 Diglycidyl ether bisphenol A (DGEBA, YD-128, 국도화학), Tetraglycidyl 4,4′-diaminodiphenylmethane (TGDDM, PA-806, 국도화학), 경화제 Adipic acid (Tokyo Chemical Industry), 경화 촉진제 1,5,7-Triazabicyclo[4.4.0]dec-5-ene (TBD, RHAWN), 반응형 난연제 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO, Tokyo Chemical Industry)를 사용하였으며 강화 재료로는 유리섬유(S-glass, Sinoma)를 사용하였다. 모든 재료는 별도 정제 과정 없이 사용하였으며, 비트리머 제조 시 사용된 주요 시약의 약어와 구조는 Table 1에 나타내었다.

**Table 1.** Chemical properties of flame-retardant vitrimer ingredients

| Abbrev | Chemical | Mw (g/mol) | Chemical structure |
|---|---|---|---|
| DGEBA | Diglycidyl ether bisphenol A | 340.4 |  |
| TGDDM | Tetraglycidyl 4,4'-diaminodiphenyl-methane | 422.5 |  |
| AA | Adipic acid | 146.1 |  |
| TBD | 1,5,7-Triazabicy-clo[4.4.0]dec-5-ene | 139.2 |  |
| DOPO | 9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenan-threne-10-Oxide | 216.1 |  |
| THF | Tetrahydrofuran | 72.1 |  |
| EtOH | Ethanol | 46.0 |  |
| EG | Ethylene glycol | 62.1 |  |

### 2.2 니켈 도금 유리섬유

본 연구에서는 비전도성 유리섬유에 전자기파 차폐 성능을 부여하기 위해 선행 연구에서 확립된 무전해 도금 공정과 동일한 조건을 적용하였다[28]. 무전해 도금 전 유리섬유 표면은 에폭시 말단기를 가진 실란 커플링제로 전처리하여 유리섬유와 니켈 도금층 간의 계면 상호작용을 향상시키고 섬유 표면에 균일한 도금층이 형성되도록 유도하였다. 니켈 도금 유리섬유의 표면과 단면은 주사전자현미경(SEM, JSM-IT800, JEOL)을 이용하여 분석하였으며, 그

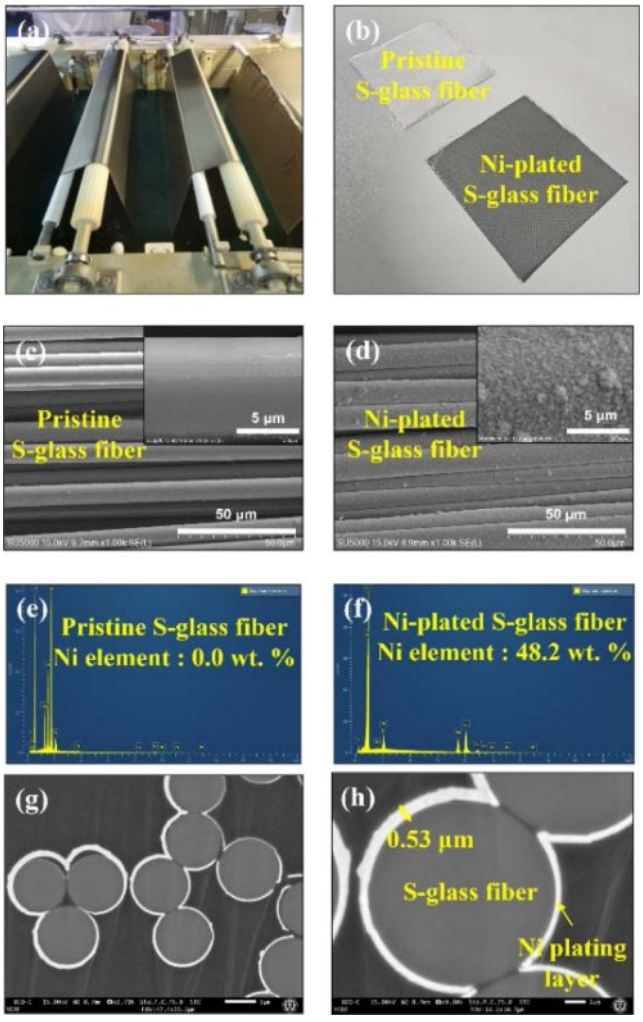



**Fig. 2.** (a, b) Electroless plating process and photograph, (c, d) Scanning electron microscope (SEM) images of pristine and Ni-plated S-glass fiber, (e, f) Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) results of pristine and Ni-plated S-glass fiber and (g, h) Cross-section SEM images of Ni-plated S-glass fiber

결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(e,f) 에너지 분산형 X선 분광분석(EDS)을 통해 유리섬유 표면의 원소 조성을 분석한 결과 일반 유리섬유에서는 니켈이 검출되지 않은 반면 니켈 도금 유리섬유에서는 니켈 함량이 48.2 wt%로 확인되었다. 또한 단면 SEM 이미지(Fig. 2(g,h))를 통해 니켈 도금층의 두께를 측정한 결과, 약 0.5 μm 두께의 니켈 도금층이 형성되었음을 확인하였다.

## 3. 제작 및 평가

### 3.1 난연 비트리머 수지 제작

TGDDM, DGEBA의 에폭시기는 Adipic acid와 반응하여 β-하이드록시 에스터를 형성하고, 생성된 에스터 결합은 동적 가교 네트워크를 형성한다. DOPO는 에폭시와 공유결합하여 네트워크 내에 도입됨으로써 난연성을 부여하며 비트리머의 화학 구조는 Fig. 3(a)에 나타내었다. 본 연구에서는 DOPO 첨가 유무에 따라 두 종류의 비트리머 수지를 제조하였다. 기본 비트리머는 DGEBA 40 g과 TGDDM 60 g을 혼합하였으며 에폭시기와 카복실기의 당량비가 1:1이 되도록 Adipic acid를 첨가하여 제조하였다. TBD는 카복실기를 기준으로 5 mol% 첨가하였다. DOPO가 첨가된 비트리머의 경우 DGEBA와 TGDDM의 총 질량인 100 g을 기준으로 DOPO 10 g을 첨가하였으며, 이를 DOPO 10 wt%로 정의하였다. 수지 제작 과정은 Fig. 3(b)에 나타내었다. Fig. 3(c)의 푸리에 변환 적외선 분광법(FTIR)을 이용하여 수지를 분석한 결과, 비트리머는 약 3400 $cm^{-1}$에서 하이드록실기(O-H) 진동 피크가 관찰되었으며, 이는 에폭시 개환 반응이 진행되었음을 나타낸다. 약 1730 $cm^{-1}$에서는 에스터 카보닐기(C=O)의 진동 피크가 관찰되어 에스터 결합의 형성을 확인하였다. 또한 DOPO가 첨가된 시편에서는 약 1260 $cm^{-1}$에서 P=O 결합에 기인한 피크가 관찰되어 DOPO 유래 인계 구조가 비트리머 네트워크에 도입되었음을 확인하였다[20].

### 3.2 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재 제작

본 연구에서 복합재는 핸드 레이업 공정을 통해 제작되었으며, 각 시험에서 요구되는 시편 두께를 만족하도록 각 Cured Ply Thickness (CPT)를 기준으로 적층 수를 조절하였다. 이후 핫 프레스를 활용하여 1 MPa 조건에서 140 °C 3시간, 160 °C 3시간 총 6시간 동안 경화하였다. 전체 복합재 제작 공정은 Fig. 4에 나타내었다.

### 3.3 열적 거동 평가

비트리머 수지의 유리전이온도는 시차 주사 열량계(DSC 2500, TA Instruments)를 이용하여 약 10 mg의 시료를 30–250 °C까지 10 °C/min의 승온 속도로 가열하여 측정하였다. 시료의 열적 안정성은 열중량분석기(TGA, Discovery SDT 650, TA Instruments)를 이용하여 질소 대기에서 30–750 °C까지 10 °C/min의 승온 속도로 가열하여 측정하였다.

### 3.4 난연 성능 평가

복합재의 난연 성능은 UL-94 규격에 맞추어 수직 연소 시험 방법을 통해 평가하였다[29]. 시편 하단에 불꽃을 10초 동안 두 차례 가한 후 1차 및 2차 잔염 시간, 탈지면의 발화 여부를 측정하여 V-0, V-1, V-2 또는 NR 등급으로 분류하였다. UL-94 수직 연소 시험은 잔염 시간과 발화 여부에 따른 등급 기반의 정성적 평가 방법으로, 동일 등급 내에서는 복합재의 연소 거동을 정량적으로 평가하기 어렵다. 따라서 특정 외부 열유속 조건에서 재료의 연소거동을 정량적으로 평가할 수 있는 콘 칼로리미터 시험을 ISO 5660-1 규격에 따라 수행하였다[30]. 시편은 100 mm × 100 mm 크기로

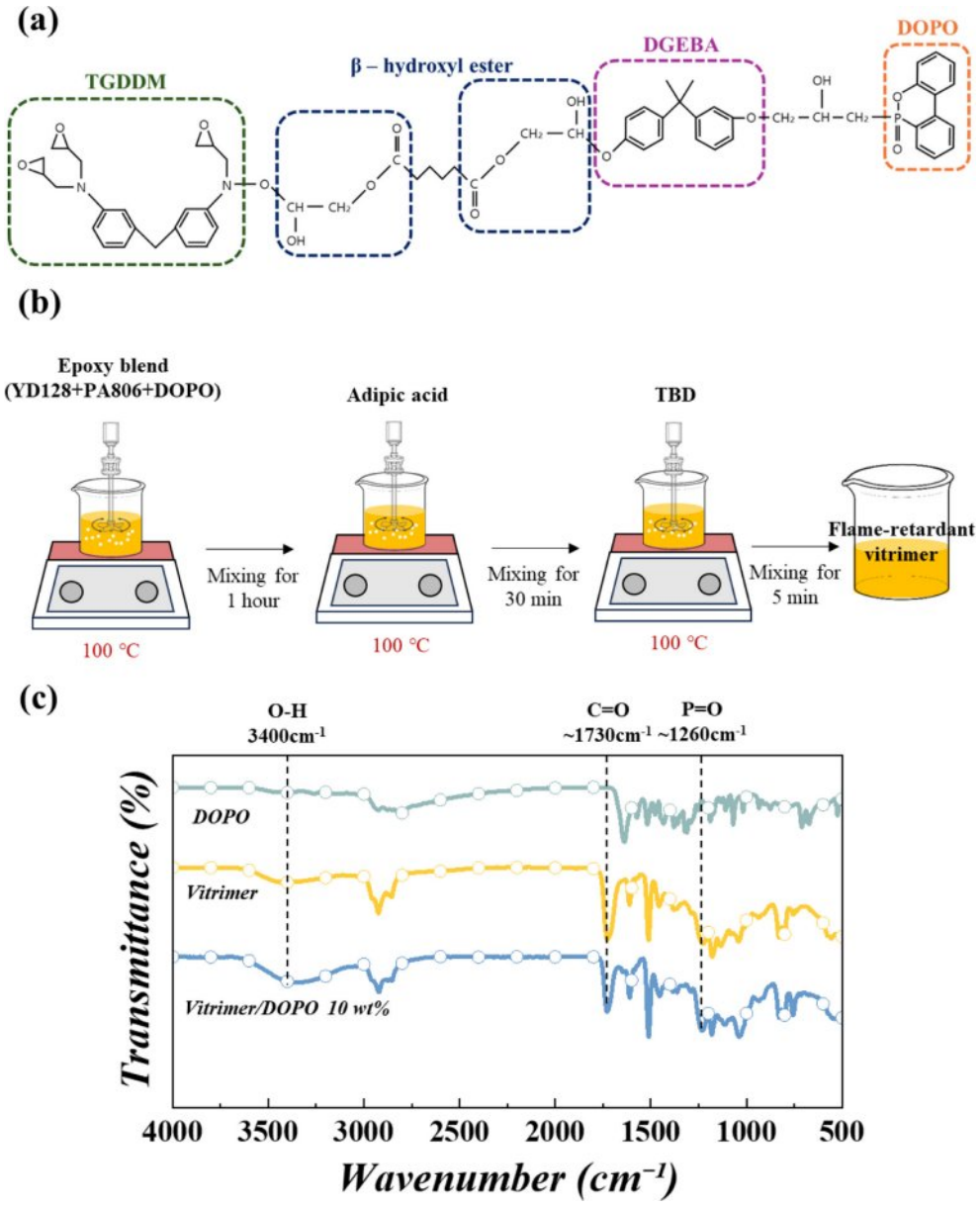



**Fig. 3.** (a) Schematic illustration of the flame-retardant vitrimer network, (b) Synthesis process of the flame-retardant vitrimer resin and (c) FTIR spectrum of DOPO, Vitrimer and Vitrimer/DOPO 10 wt%

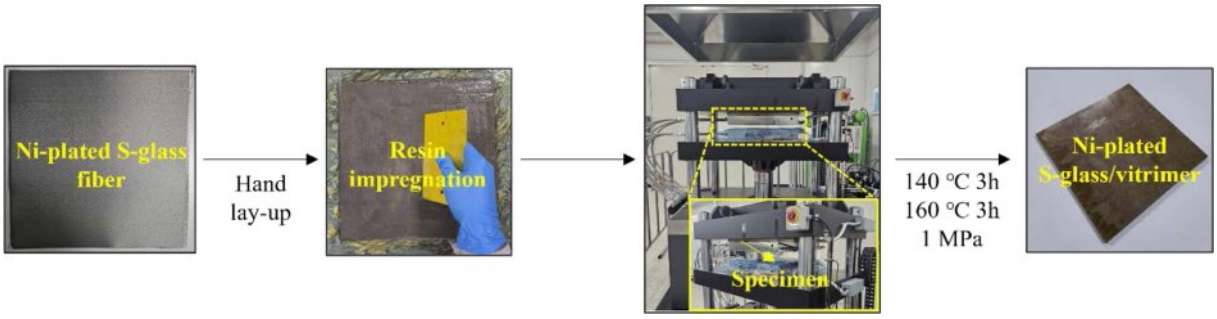



**Fig. 4.** Fabrication process of Ni-plated S-glass/vitrimer composites

가공하고 알루미늄 호일로 감싼 뒤 시편 홀더에 장착하였으며, 외부 열 유속은 35 kW/m²로 설정하였다. 시험을 통해 착화 시간(Time to ignition, TTI), 열 방출률(Heat release rate, HRR), 최대 열 방출률(Peak heat release rate, pHRR), 총 열 방출량(Total heat release, THR)을 측정하였다.

### 3.5 재활용성 평가

비트리머 수지의 가교 밀도와 용매에 대한 팽윤 거동을 평가하기 위해 젤 분율 및 팽윤 시험을 수행하였다. 시편을 Tetrahydrofuran (THF), THF/ethanol (THF/EtOH) 및 THF/ethylene glycol (THF/EG) 용액에 96시간 동안 침지한 후 질량 변화를 측정하였다. 식 (1)과 (2)을 통해서 젤 분율(Gel fraction, GF)과 팽윤율(Swelling ratio, SR)을 계산하였으며 $W_1$은 침지 전에 측정한 무게, $W_2$는 침지 후 표면의 용매를 간단히 제거한 뒤 측정한 무게, $W_3$는 상온에서 24시간 동안 건조 후 측정한 무게이다.

$$GF = \frac{W_3}{W_1} \times 100\ \% \tag{1}$$

$$SR = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\ \% \tag{2}$$

이후 수지의 팽윤율이 가장 높게 나타난 용매에 복합재를 상온에서 96시간 동안 침지하여 네트워크의 팽윤을 유도한 뒤 니켈 도금 유리섬유를 회수하였다. 이때 회수된 섬유는 SEM을 이용하여 잔류 수지와 표면 손상 여부를 관찰하였다. 또한 회수된 섬유를 활용해 복합재를 재제작한 후, 기존 복합재와의 기계적 물성과 전자기파 차폐 성능을 비교하여 재활용성을 평가하였다.

### 3.6 기계적 물성 평가

복합재의 기계적 물성은 만능재료시험기(UTM, AGX-V2, SHIMADZU)를 이용하여 ASTM D3039 규격에 따라 인장시험을 수행하였다[31]. 인장시험은 2 mm/min 속도로 수행하였으며 각 조건당 5개의 시편으로부터 강도와 강성을 도출하였다.

### 3.7 전자기파 차폐 성능 평가

전자기파 차폐 성능은 자유공간 측정 시스템과 벡터 네트워크 분석기(VNA, P9375A, Keysight)를 활용하여 200 mm × 200 mm × 2 mm 크기의 시편을 4-18 GHz 주파수 범위에서 평가하였다. 자유공간 측정 시스템은 2-port TRL(Through–Reflect–Line) 방법으로 교정하였으며, 주변 측정 환경에서 발생하는 불필요한 반사 신호의 영향을 최소화하기 위해 Time gating을 적용하였다. 측정된 S-parameter $S_{11}$, $S_{21}$을 이용하여 반사 전력계수 (R), 투과 전력계수 (T), 흡수 전력계수 (A)를 식 (3–5)과 같이 계산하였다.

$$R = |S_{11}|^2 \tag{3}$$

$$T = |S_{21}|^2 \tag{4}$$

$$A = 1 - R - T \tag{5}$$

전자기파 차폐에 대한 주요 메커니즘으로는 식(6-8)과 같이 임피던스 차이로 인한 반사 차폐($SE_R$), 전자기파가 차폐재를 통과할 때 발생하는 흡수 차폐($SE_A$), 차폐재 내부에서 반복적인 반사를 통해 감쇠되는 다중 반사 차폐($SE_{MR}$)로 구분할 수 있다. 일반적으로 충분한 전도성을 갖는 차폐재에서 다중 반사 차폐는 총 차폐 효율이 15 dB 이상이거나 흡수 차폐 효율이 10 dB 이상인 경우 무시할 수 있다[32]. 본 연구에서 측정된 흡수 차폐 효율은 최소 14 dB로 10 dB 기준을 상회하였고, 총 차폐 효율 또한 20 dB 이상으로 나타났다. 따라서 두 기준을 모두 만족하므로 본 연구에서는 총 차폐 효율을 반사 차폐 효율과 흡수 차폐 효율의 합으로 계산하였다[33].

$$SE_T = SE_R + SE_A + SE_{MR} \tag{6}$$

$$SE_R = 10\log\left(\frac{1}{1-R}\right) = 10\log\left(\frac{1}{1-|s_{11}|^2}\right) \tag{7}$$

$$SE_A = 10\log\left(\frac{1-R}{T}\right) = 10\log\left(\frac{1-|s_{11}|^2}{|s_{21}|^2}\right) \tag{8}$$

## 4. 결과 및 토론

### 4.1 비트리머 수지 및 열적 거동 분석

Fig. 5(a)는 DOPO 함량에 따른 비트리머 수지의 DSC 분석 결과를 나타낸다. DOPO가 첨가됨에 따라 유리전이온도($T_g$)는 89.4 °C에서 78.6 °C로 감소하였으며, 이는 DOPO의 P–H기가 에폭시기와 반응하여 경화에 참여할 수 있는 에폭시기의 일부를 사전에 소모하여 네트워크의 가교 밀도를 감소시켰기 때문이다[17,20]. Fig. 5(b)는 질소 환경에서 측정한 DOPO에 따른 수지의 열중량분석(TGA) 곡선이며, Fig. 5(c)는 이에 대한 미분 열중량분석(DTG) 결과이다. 시험 결과 DOPO 함량이 증가함에 따라 5 wt%의 질량 손실이 발생하는 온도인 $T_{5\%}$는 319.8 °C에서 254.0 °C로, 최대 질량 손실이 나타나는 온도 $T_{max}$는 405.4 °C에서 377.8 °C로 감소하였다. 이는 DSC 분석 결과와 마찬가지로 DOPO 도입에 따른 가교 밀도 저하와 인 함유 구조의 조기 열분해 때문이다. 반면, 700 °C에서의 잔류 질량인 $R_{700}$은 6.8 wt%에서 20.9 wt%로 증가하였다. 이는 DOPO의 열분해 시 생성된 인계 화학종이 에폭시의 탈수 및 탄화 반응을 촉진하여 탄화층 형성을 유도했기 때문이다[17,23].

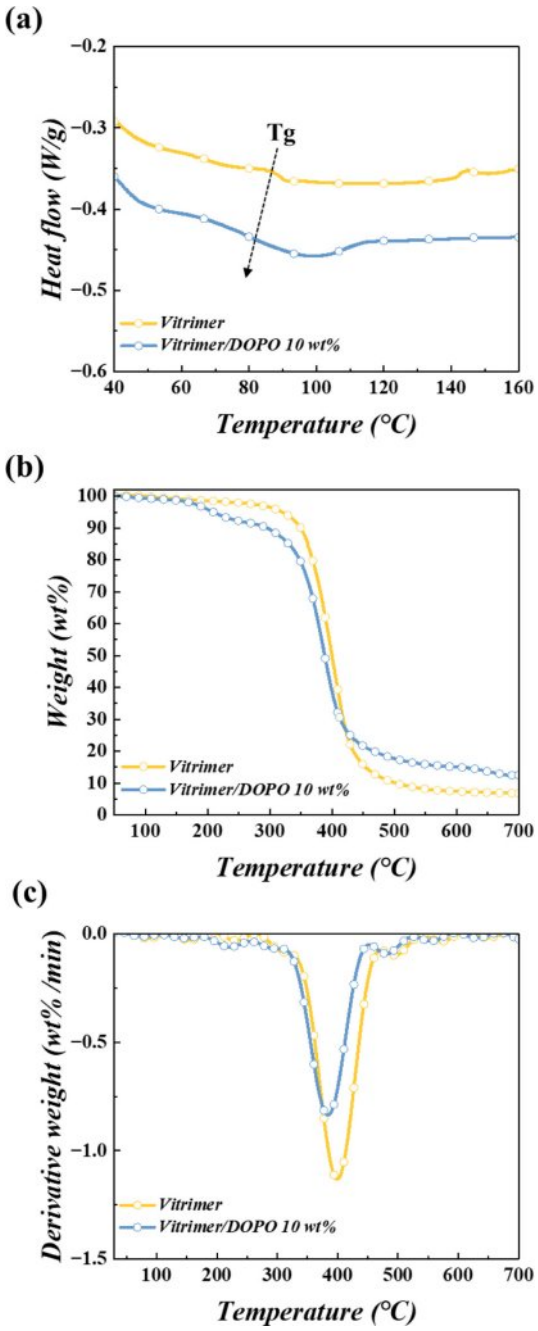



**Fig. 5.** (a) DSC, (b) TGA, and (c) DTG curves of Vitrimer and Vitrimer/DOPO 10 wt%

### 4.2 난연 성능 분석

Fig. 6(a)는 UL-94 수직 연소시험의 시험 구성과 방법을 나타낸다. Fig. 6(b)와 (c)는 각각 일반 유리섬유/비트리머 복합재와 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재의 연소 거동을 보여주며 Fig. 6(d)는 수직 연소시험 후 열화상 카메라를 이용하여 측정한 복합재의 온도 분포를 나타낸다. Table 2는 본 연구에서 수행한 UL-94 수직 연소 시험 결과이다. 일반 유리섬유/비트리머는 1차 접염 후 잔염 시간이 0초로 나타났으나 2차 접염 후에는 잔염이 60초 이상 지속되어 UL-94 등급 기준을 충족하지 못하였다. 반면 니켈 도금 유리섬유 복합재는 모두 1차 및 2차 접염 후 잔염 시간이 0초로 나타났으며 UL-94 V-0 등급을 만족하였다. 이러한 니켈 도금 유리섬유 복합재의 우수한 난연 거동은 니켈 도금층이 복합재의 열전달 및 연소 거동에 영향을 미쳐 잔염을 억제한 결과로 판단된다. 선행연구에서도 섬유 표면에 형성된 니켈 도금층이 복합재의 열전도 특성을 향상시킬 수 있다고 보고하였다[34-36]. 본 연구의 열전도도 측정 결과에서도 일반 유리섬유/비트리머 복합재의 열전도도는 25 °C에서 0.655 W/m·K로 나타난 반면, 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재는 0.902 W/m·K로 증가하여 37.7% 높은 열전도도 값을 나타내었다. 이러한 결과는 니켈 도금층의 도입으로 복합재의 열전도도가 향상되었음을 보여주며, 이는 연소 과정에서 국부적으로 축적되는 열을 보다 효과적으로 분산시키는 데 기여했을 것으로 판단된다. 실제 열화상 분석에서도 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재는 일반 유리섬유/비트리머 복합재보다 연소 부위 인근에서 48.1 °C 낮은 온도를 나타내어 이러한 해석과 일치하는 경향을 보였다. 하지만 정성적인 등급 기반의 UL-94 시험만으로는 인계 난연제인 DOPO 첨가에 따른 난연 효과를 정량적으로 구분

**Table 2.** UL-94 V test results of pristine S-glass/vitrimer, Ni-plated S-glass/vitrimer and Ni-plated S-glass/vitrimer composites with DOPO

| Samples | UL-94 V | | | |
|---|---|---|---|---|
| | t1(s) | t2(s) | Cotton ignition | Classifications |
| Pristine S-glass/vitrimer | 0 | ≥60 | No | NR |
| Ni-plated S-glass/vitrimer | 0 | 0 | No | V-0 |
| Ni-plated S-glass/vitrimer DOPO 10 wt% | 0 | 0 | No | V-0 |

**Table 3.** Cone calorimeter test results of pristine S-glass/vitrimer, Ni-plated S-glass/vitrimer and Ni-plated S-glass/vitrimer composites with DOPO

| Samples | Cone calorimeter | | | |
|---|---|---|---|---|
| | pHRR ($kW/m^2$) | THR ($MJ/m^2$) | TTI (s) | Mass loss (%) |
| Pristine S-glass/vitrimer | 118.1 | 25.5 | 276.4 | 20.0 |
| Ni-plated S-glass/vitrimer | 150.9 | 36.4 | 319.2 | 22.2 |
| Ni-plated S-glass/vitrimer DOPO 10 wt% | 114.3 | 15.8 | 268.8 | 18.4 |

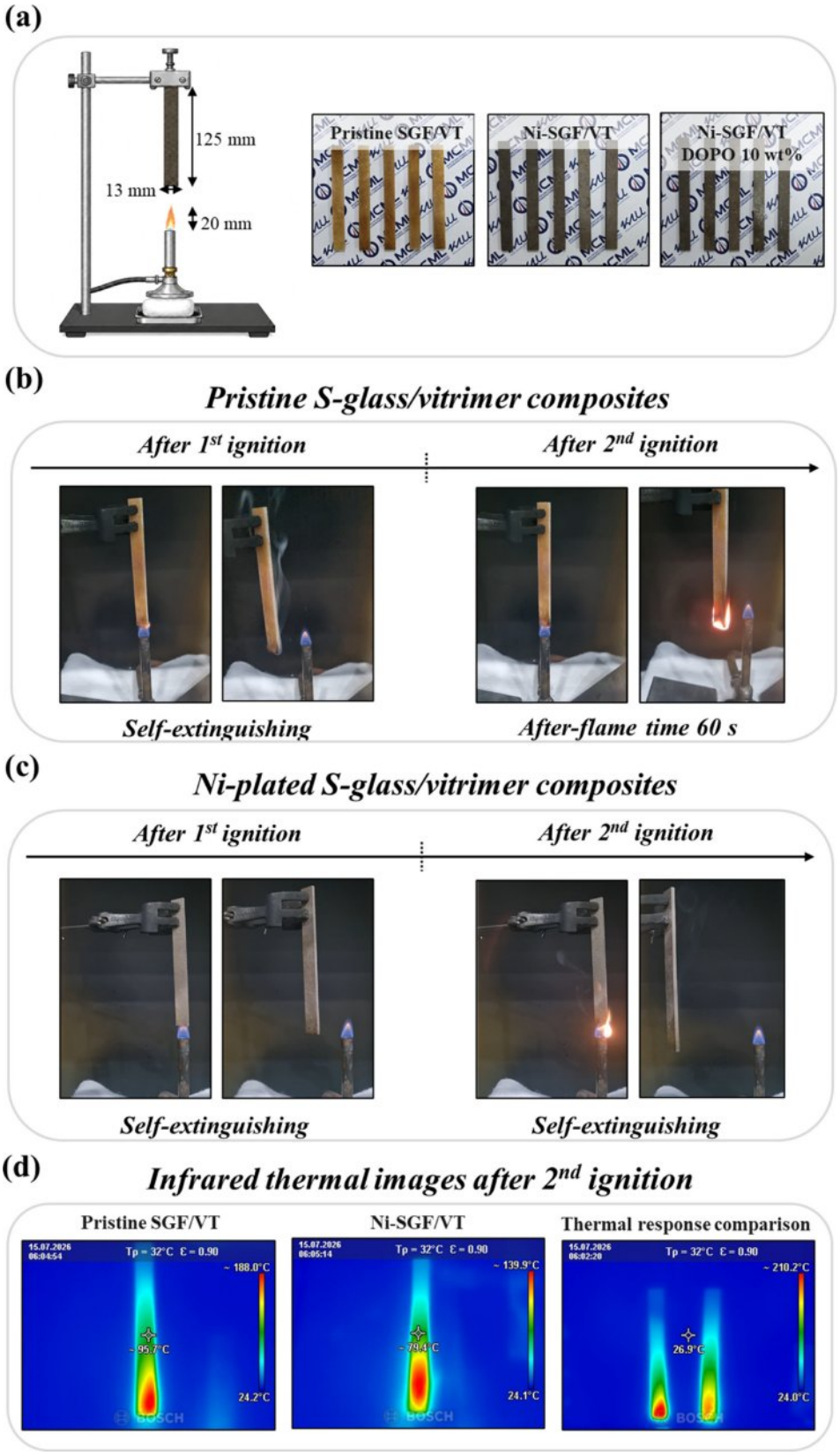



**Fig. 6.** (a) UL-94 vertical burning testing setup and specimen dimensions, (b, c) Video snapshots of vertical burning for pristine S-glass/vitrimer and Ni-plated S-glass/vitrimer composites and (d) Infrared images of pristine S-glass/vitrimer and Ni-plated S-glass/vitrimer composites

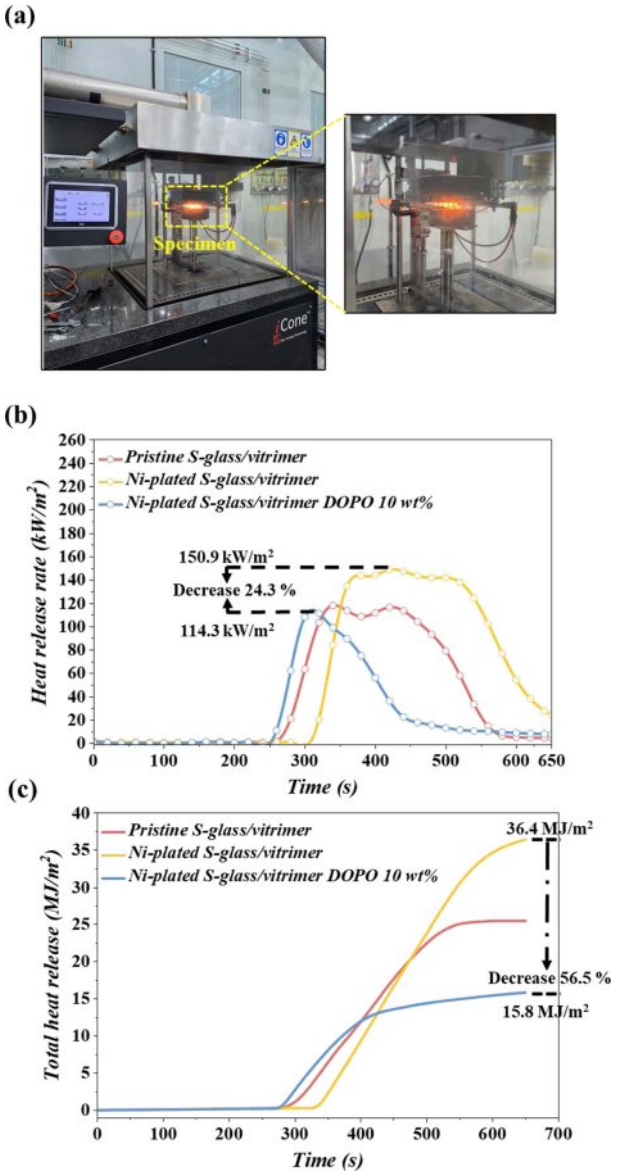



**Fig. 7.** (a) Cone calorimeter test setup, (b) Heat release rate (HRR) curves and (c) Total heat release curves (THR) of pristine S-glass/vitrimer, Ni-plated S-glass/vitrimer and Ni-plated S-glass/vitrimer DOPO 10 wt% composites

하기 어렵다. 이에 DOPO의 난연 기여도를 정량적으로 평가하기 위해 35 kW/m²의 외부 열 유속 조건에서 콘 칼로리미터 시험을 수행하였다. Fig. 7과 Table 3은 일반 유리섬유/비트리머 복합재, 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재, DOPO 10 wt%가 첨가된 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재의 콘 칼로리미터 시험 결과이다. 일반 유리섬유/비트리머 복합재의 착화 시간(TTI)은 276.4 s로 나타난 반면, 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재에서는 319.2 s로 증가하여 42.8 s의 착화 지연을 나타냈다. 앞서 열전도도 분석에서 니켈 도금에 따라 복합재의 열전도도가 37.7% 증가한 결과를 고려하면 이러한 TTI 증가는 니켈 도금 층 도입에 따른 열전달 거동의 변화와 관련된 것으로 판단된다. 그러나 착화 이후에는 니켈 도금 복합재에서 열 방출률이 급격히 증가하여 최대 열 방출률(pHRR)은 일반 유리섬유/비트리머 복합재의 118.1 kW/m²에서 150.9 kW/m²로 27.8% 증가하였다. 총 열 방출량(THR) 역시 25.5 MJ/m²에서 36.4 MJ/m²로 42.7% 증가하였다. 이러한 결과는 니켈 도금층이 초기 착화를 지연시키는 데 기여하지만 착화 이후에 보다 급격한 열 방출 거동이 나타날 수 있음을 보여준다. 반면 DOPO 10 wt%가 첨가된 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재에서는 착화 이후의 열 방출 거동이 뚜렷하게 억제되었다. pHRR은 150.9 kW/m²에서 114.3 kW/m²로 24.3% 감소하였으며, THR은 36.4 MJ/m²에서 15.8 MJ/m²로 56.5% 감소하였다. 또한 시험 후 질량 감소율은 22.2%에서 18.4%로 감소하였다. 반면 TTI는 319.2 s에서 268.8 s로 15.7% 감소하였다. 이는 DOPO가 상대적으로 낮은 온도에서 열분해되어 반응에 관여하기 시작하기 때문이다. 앞서 TGA 분석에서도 DOPO 도입에 따라 5 wt% 질량 감소가 발생하는 온도인 $T_{5\%}$가 319.8 °C에서 254.0 °C로 감소하고, 최대 질량 감소 온도 $T_{max}$ 또한 405.4 °C에서 377.8 °C로 감소하였다. 이러한 초기 열분해 온도의 감소는 콘 칼로리미터 시험에서 DOPO 첨가 복합재의 TTI가 짧아진 결과와 일치하는 경향을 나타낸다. 그러나 700 °C에서의 잔류 질량은 6.8 wt%에서 20.9 wt%로 증가하였으며, 콘 칼로리미터 시험에서도 DOPO 첨가 후 질량 손실이 3.8%p 감소하였다. 따라서 DOPO는 초기 열분해를 앞당기지만 이후 난연 반응과 탄화층 형성을 촉진하여 착화 이후의 열 방출을 효과적으로 억제하는 것을 알 수 있다.

### 4.3 재활용성 및 재가공성 분석

본 연구에서는 THF, THF/EtOH, THF/EG 용액에서 순수 비트리머 수지와 DOPO 첨가 비트리머 수지에 대해 젤 분율 및 팽윤율 시험을 진행하였다. 젤 분율은 용매에 분해되지 않고 남아 있는 수지의 질량 비율로 THF/EG, THF, THF/EtOH 용액 순으로 높게 측정되었다. 시험 결과, 본 연구에서 개발한 비트리머 수지는 90% 이상의 높은 젤 분율을 나타냈으며 이는 가교 네트워크가 안정적으로 형성되었음을 의미한다. 다만 DOPO 첨가 시 젤 분율이 낮아지는 경향이 있다. 이는 반응형 인계 난연제인 DOPO가 사전에 에폭시기와 반응하여 경화에 참여할 수 있는 에폭시기 수를 감소시켜 네트워크의 치밀한 가교 형성을 제한한 결과이다[37]. 팽윤율 시험 결과 THF/EG 용액에서 가장 높은 팽윤율을 나타냈다. 이는 THF가 비트리머 가교 네트워크 내부로 침투해 사슬 간 거리를 확장시키고 이에 따라 에틸렌 글리콜의 내부 확산을 촉진했기 때문이다. 또한 이관능성 알코올인 에틸렌 글리콜이 네트워크와의 상호작용을 통해 가교 사슬 간 간격이 확대되어 체적 팽창이 더욱 증가한 것으로 판단된다[38]. 젤 분율 및 팽윤율 시험 결과는 Table 4에 정리하였다. 팽윤율이 가장 높게 나타난 용액에서 복합재의 재

**Table 4.** Gel fraction and swelling ratio of the Vitrimer and Vitrimer/DOPO 10 wt%

| Samples | THF | | THF+EtOH | | THF+EG | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | GF (%) | SR (%) | GF (%) | SR (%) | GF (%) | SR (%) |
| Vitrimer | 96.0 | 111 | 93.2 | 113 | 99.1 | 124 |
| Vitrimer/DOPO 10 wt% | 95.8 | 112 | 90.3 | 108 | 98.1 | 125 |

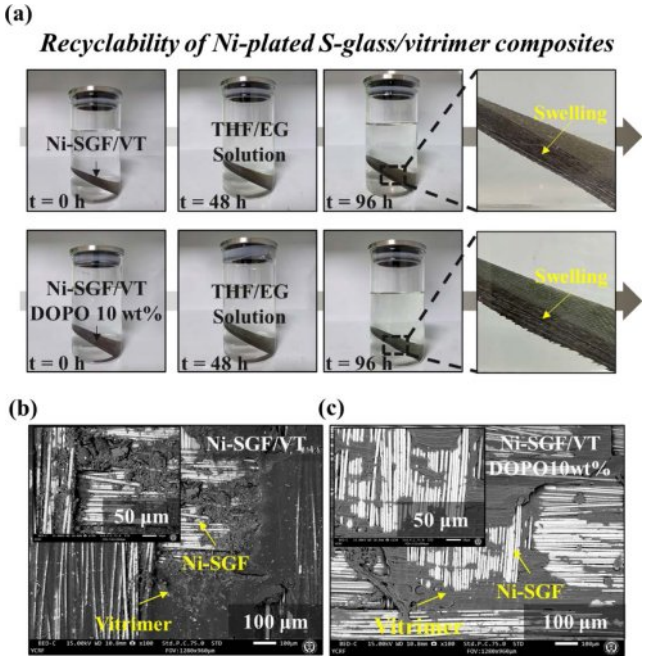



**Fig. 8.** Recycling test of Ni-plated S-glass/Vitrimer composites: (a) Photographs taken after immersing for 48 h and 96 h, and (b, c) SEM images of the recycled Ni-plated S-glass fibers

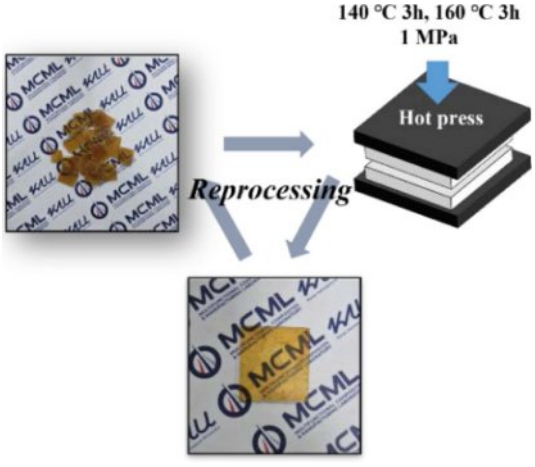



**Fig. 9.** Reprocessing of vitrimer via transesterification

활용성 평가를 진행하였으며, Fig. 8(a)는 THF/EG 용액에서의 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재의 팽윤 거동을 나타낸다. 침지 시간이 증가함에 따라 복합재의 팽윤 현상이 관찰되었으며, 이는 용매가 비트리머 네트워크 내부에 침투하여 고분자 사슬 간 간격을 증가시킨 결과이다.

이를 통해 니켈 도금 유리섬유를 회수하였다. Fig. 8(b, c)는 회수된 니켈 도금 유리섬유의 SEM 분석 결과이다. 회수된 섬유에서 일부 잔류 수지가 관찰되었으나, 섬유 표면에서 뚜렷한 균열이나 구조적 손상이 없음을 확인하였다. Fig. 9는 비트리머의 재가공성을 평가하기 위해 비트리머 수지를 작은 조각으로 절단해 금형에 투입한 후 핫 프레스를 이용해 1 MPa의 압력에서 총 6시간 동안 가압·가열을 진행한 결과이다. 재가공 후 개별 수지 조각이 하나의 시편 형태로 재성형된 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 개발한 비트리머 수지가 특정 열과 압력 조건에서 재가공될 수 있음을 보여주며, 이러한 거동은 동적 공유 결합의 교환반응에 따른 가교 네트워크의 재배열 때문이며 비트리머의 고유한 특성을 보여준다.

### 4.4 기계적 물성 분석

본 연구에서 제작한 비트리머 복합재의 기계적 특성을 평가하기 위하여 Fig. 10(a)에 나타낸 바와 같이 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험 시편은 ASTM D3039 규격에 맞추어 가공하였다. Fig. 10(b)에 나타낸 결과, 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재의 인장강도는 DOPO 첨가에 따라 246 MPa에서 319 MPa로 29.7% 증가하였다. 반면, 인장 강성은 31 GPa에서 29 GPa로 6.5% 감소하였다. 일반적으로 섬유강화 복합재의 강성은 섬유의 탄성률과 섬유 체적분율에 크게 의존하는 반면, 인장강도는 섬유와 기지재 간의 계면 특성에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다[39]. Table 5에 나타낸 바와 같이 DOPO 첨가 시 CPT는 0.133 mm에서 0.138 mm로 증가하였으며 이에 따라 섬유 체적분율은 61.8%에서 59.6%로 감소하였다. 섬유 체적분율이 감소하였음에도 인장강도가 29.7% 증가한 것은, DOPO 첨가로 인해 기지재 자체의 특성 및 계면 특성 변화가 발생된 것으로 판단된다. 선행 연구에서도 DOPO는 에폭시기와 반응하여 수지의 가교 밀도 및 네트워크 구조를 변화시킬 수 있으며, 이는 복합재의 기계적 특성에 영향을 미칠 수 있다고 보고하였다[40,41]. Fig. 10(c)의 응력-변형률 곡선에서 DOPO 첨가에 따른 파손 거동의 차이가 확인되었다. DOPO 10 wt% 첨가 복합재는 DOPO 미첨가 복합재에 비해 높은 파단 변형률을 나타낸 반면, DOPO 미첨가 복합재에서는 상대적으로 낮은 변형률에서 파손이 발생하였다. 따라서 DOPO 10 wt% 첨가에 따른 인장강도 증가는 비트리머 수지의 네트워크 구조 변화와 이에 따른 기지재 및 계면의 파손 거동 변화가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 다만 본 연구에서는 계면 특성에 대한 직접

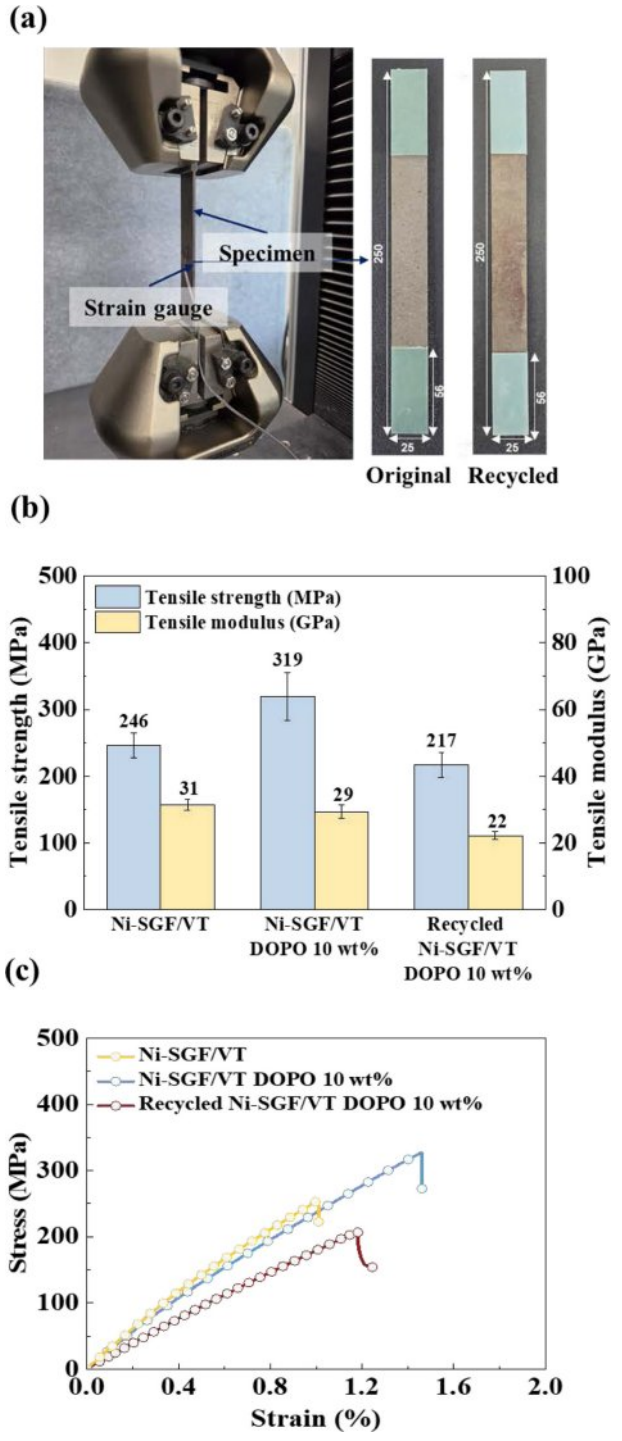



**Fig. 10.** (a) Tensile testing setup and dimensions of the specimen, (b) Tensile properties of Ni-plated S-glass/vitrimer composites and (c) Stress-strain curves of Ni-plated S-glass/vitrimer composites

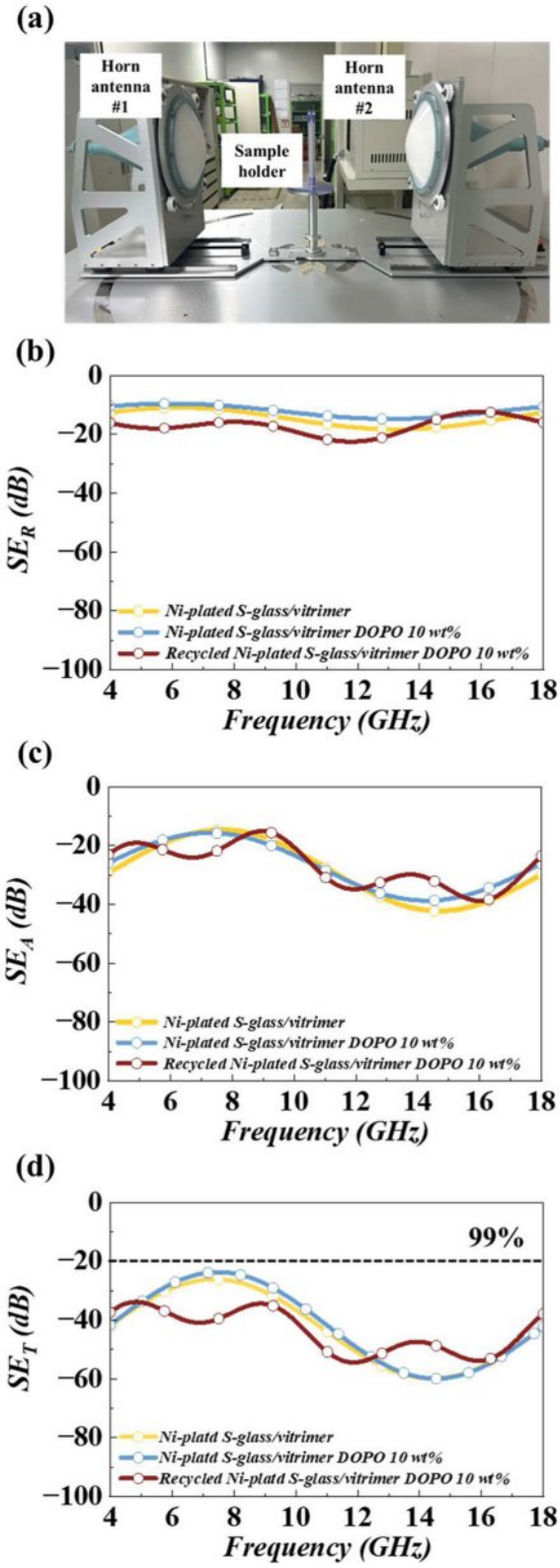



**Fig. 11.** EMI shielding effectiveness of Ni-plated S-glass/vitrimer composites: (a) Free-space measurement system (FMS), (b) Reflection shielding effectiveness ($SE_R$), (c) Absorption shielding effectiveness ($SE_A$) and (d) Total shielding effectiveness ($SE_T$)

적인 정량 평가를 수행하지 않았으므로, 향후 파단면에 대한 SEM 분석 및 전단 시험을 통해 이를 검증할 예정이다.

또한 우수한 난연 성능과 기계적 물성을 나타낸 DOPO 10 wt% 첨가 복합재에서 재활용성을 평가하였다. DOPO

**Table 5.** Tensile test results of the Ni-plated S-glass/vitrimer composites

| Samples | Fiber areal weight ($g/m^2$) | CPT (mm) | Number of plies | Fiber volume fraction (%) | Failure load (kN) | Tensile strength (MPa) | Tensile modulus (GPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ni-plated S-glass/vitrimer | 241±4.7 | 0.133±0.08 | 18 | 61.8 | 14 ± 1.1 | 246 ± 21.1 | 31 ± 1.4 |
| Ni-plated S-glass/vitrimer DOPO 10 wt% | 241±4.7 | 0.138±0.03 | 18 | 59.6 | 22 ± 2.2 | 319 ± 36.0 | 29 ± 1.4 |
| Recycled Ni-plated S-glass/ vitrimer DOPO 10 wt% | 294±7.1 | 0.161±0.03 | 18 | 51.1 | 15 ± 1.3 | 217 ± 21.2 | 22 ± 0.7 |

10 wt% 첨가 복합재를 THF/EG 용액에 침지하여 니켈 도금 유리섬유를 회수한 후, 회수 섬유를 이용하여 재활용 전과 동일한 적층 수 및 성형 조건으로 복합재를 재제작하고 인장시험을 수행하였다. 재활용된 복합재의 인장강도는 217 MPa로 회수 전 복합재 대비 68.0%의 강도를 유지하였으며, 인장 강성은 22 GPa로 75.9% 수준을 유지하였다. 재활용 후 물성 감소의 원인을 분석하기 위해 강화재의 면중량과 CPT를 비교하였다. 니켈 도금 유리섬유의 면중량은 회수 전 241 $g/m^2$에서 회수 후 294 $g/m^2$로 21.9% 증가하였다. 이는 SEM 분석 결과에서 알 수 있듯이 섬유 표면에 잔류한 비트리머 수지로 판단된다. 이에 따라 CPT는 0.138 mm에서 0.161 mm로 증가하였고, 섬유 체적분율은 59.6%에서 51.1%로 감소하였다. 섬유강화 복합재의 인장 물성은 혼합법칙에 따라 섬유 체적분율에 비례하므로 잔류 수지에 의한 섬유 체적분율의 감소는 재활용 복합재의 기계적 물성 저하로 이어진 것으로 판단된다[39]. 이는 회수된 강화재 표면의 잔류 수지가 성형 중 배출되지 못하여 섬유 체적분율이 감소하고, 국부적으로 형성된 수지 영역이 응력 집중원으로 작용하여 기계적 물성이 감소할 수 있다고 보고한 선행연구와 일치한다[42].

### 4.5 전자기파 차폐 성능 분석

복합재의 전자기파 차폐 성능을 평가하기 위해 Fig. 11(a)와 같이 자유공간 측정 시스템(Free-space Measurement System, FMS)을 이용하여 4-18 GHz 대역에서 측정을 수행하였다. Fig. 11(b-d)는 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재와 DOPO 10 wt% 첨가 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재, 재활용된 DOPO 10 wt% 첨가 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재의 반사 차폐 효율, 흡수 차폐 효율, 총 차폐 효율을 나타낸다. Fig. 11(d) 총 차폐 효율 결과를 보면 모든 시편은 4-18 GHz 전 대역에서 20 dB 이상의 차폐 성능을 나타냈다. Fig. 11(b)와 (c)를 비교하면 4-18 GHz 대역에서 반사 차폐 효율은 약 10-22 dB 수준인 반면 흡수 차폐 효율은 약 14-46 dB로 흡수 차폐 효율은 반사 차폐 효율보다 높은 값을 나타냈으며, 이는 복합재 내부로 유입된 전자파가 니켈 도금층의 전도 손실과 섬유 및 계면에서의 내부 반사에 의해 효과적으로 감쇠되었음을 보여준다. Fig. 11(b–d)에서 재활용 전후 복합재의 반사, 흡수 및 총 차폐 효율은 유사한 수준을 나타냈으며, 이를 통해 용매 기반 재활용 공정 이후에도 전자기파 차폐 성능이 유지됨을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 니켈 도금 유리섬유/비트리머 복합재는 4–18 GHz 광대역에서 우수한 전자기파 차폐 성능을 나타내어 고전압, 고출력 시스템에서 발생할 수 있는 전자기파 간섭을 억제하고 배터리 관리 시스템 및 전력전자 부품의 전자기파 간섭 억제가 요구되는 친환경 전기차 배터리 팩 인클로저용 다기능 구조재 후보로서의 가능성을 보여준다. 다만 본 연구의 전자기파 차폐 성능 평가는 4–18 GHz 대역에 한정되어 있어, 실제 배터리 팩에 적용되는 다양한 전장부품 및 고주파 시스템에서 발생할 수 있는 전자기파 간섭 특성을 모두 반영하기에는 한계가 있다. 따라서 실제 부품 수준의 적용성을 검증하기 위해서는 향후 30 GHz 이상의 대역을 포함한 보다 넓은 주파수 범위에서의 전자기파 차폐 성능 평가가 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 에스터 결합 기반 난연 비트리머 수지와 니켈 도금 유리섬유를 활용하여 난연성, 전자기파 차폐 성능 및 재활용성을 동시에 갖는 다기능 복합재를 개발하였다. FTIR 및 SEM/EDS 분석을 통해 DOPO 유래 인계 구조와 유리섬유 표면의 연속적인 니켈 도금층을 확인하였다. DOPO 도입에 따라 비트리머 수지의 유리전이온도는 89.4 °C에서 78.6 °C로, 5 wt% 질량 손실 온도는 319.8 °C에서 254.0 °C로 감소하였으나, 700 °C에서의 잔류 질량은 6.8 wt%에서 20.9 wt%로 증가하여 탄화층 형성이 진행되었음을 확인하였다. UL-94 수직 연소시험에서 Pristine S-glass/vitrimer 복합재는 등급을 확보하지 못한 반면, Ni-plated S-glass/vitrimer 복합재는 잔염 시간 0 s로 V-0 등급을 만족하였다. 또한 콘 칼로리미터 시험 결과, DOPO 10 wt% 첨가 시 pHRR은 150.9 $kW/m^2$에서 114.3 $kW/m^2$로 24.3% 감소하였으며, THR은 36.4 $MJ/m^2$에서 15.8 $MJ/m^2$로 56.5% 감소하였다. 이를 통해 니켈 도금에 의한 UL-94 난연 등급 확보와 DOPO 도입에 따른 열 방출 억제 효과를 각각 확인하였다. 재활용성 평가에서는 THF/EG 용액을 이용하여 Ni-plated

S-glass를 회수하였다. SEM 분석 결과 회수 섬유에서 뚜렷한 구조적 손상은 관찰되지 않았으나 표면에 잔류 수지가 확인되었다. 또한 회수된 섬유를 이용해 복합재를 재제작하고, 재활용 전후의 기계적 물성을 비교하였다. 재활용 복합재의 인장강도와 인장강성은 각각 217 MPa와 22 GPa로, 재활용 전 복합재 대비 각각 68.0%와 75.9%를 유지하였다. 이러한 재활용된 복합재의 물성 감소는 SEM 분석 및 섬유 면중량 증가로부터 확인된 회수 섬유 표면의 잔류 수지에 기인하는 것으로 판단되며 향후 회수된 섬유의 잔류 수지 제거 및 재활용 공정의 최적화를 통해 이를 개선할 예정이다. 전자기파 차폐 평가에서는 Ni-plated S-glass/vitrimer 복합재가 4–18 GHz 대역에서 20 dB 이상의 총 차폐 효율을 나타내어 입사 전자기파의 99% 이상을 차폐하였다. DOPO 첨가에 따른 차폐 성능 변화는 미미하였으며, 재활용된 복합재 역시 4–18 GHz 대역에서 20 dB 이상의 차폐 성능을 유지하였다. 본 연구에서 개발된 복합재는 난연성, 강화재의 회수 및 재사용 가능성, 전자기파 차폐 성능을 동시에 확보함으로써 배터리 팩 인클로저용 친환경 다기능 복합재 후보로서의 가능성을 제시하였다. 다만 기계적 물성 평가가 인장시험에 한정되어 있어, 실제 운용 환경을 고려한 굽힘, 충격, 진동 및 반복하중에 대한 추가적인 구조 성능 평가가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업[GRRC항공2023-B05]과 2026년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2022R1A6A1A03056784).

## REFERENCES

1. Kang, J., and Nam, C., “Next-Generation Vitrimer Composites for Future Mobility: Balancing Sustainability and Functionality—A Perspective,” *European Polymer Journal*, Vol. 233, 2025, 113967.
2. Farhadi, M., Aidi, B., Goossens, H., Chen, L., Chang, F., Lattimer, B.Y., and Case, S.W., “Experimental Response of Intumescent Fiber-Reinforced Glass Fiber Filled Polypropylene Thermoplastic Battery Enclosure Materials to External Fire and Mechanical Loading,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 310, 2026, 113102.
3. Choi, C.H., Cho, J.M., Kil, Y., and Yoon, Y., “Development of Polymer Composite Battery Pack Case for an Electric Vehicle,” *SAE Technical Paper*, 2013-01-1177, 2013.
4. Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., and Chen, C., “Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery,” *Journal of Power Sources*, Vol. 208, 2012, pp. 210–224.
5. Woo, G., Kim, J., Park, J.H., Lee, H.S., Lee, U., and Kim, J., “Comprehensive Analysis of Broadband Electromagnetic Interference Shielding Performance and Mechanisms of Recycled CF-Reinforced PA6 Composites,” *Composites Research*, Vol. 38, No. 5, 2025, pp. 562–568.
6. Um, H.J., Hwang, Y.T., Bae, I.J., and Kim, H.S., “Design and Manufacture of Thermoplastic Carbon Fiber/Polyethylene Terephthalate Composites Underbody Shield to Protect the Lithium-Ion Batteries for Electric Mobility from Ground Impact,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 238, 2022, 109892.
7. Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., and Zafar, S., “A Review on Recycling and Reuse Methods for Carbon Fiber/Glass Fiber Composites Waste from Wind Turbine Blades,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 215, 2021, 108768.
8. Zhang, Y., Zhang, L., Yang, G., Yao, Y., Wei, X., Pan, T., Wu, J., Tian, M., and Yin, P., “Recent Advances in Recyclable Thermosets and Thermoset Composites Based on Covalent Adaptable Networks,” *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 92, 2021, pp. 75–87.
9. Kloxin, C.J., and Bowman, C.N., “Covalent Adaptable Networks: Smart, Reconfigurable and Responsive Network Systems,” *Chemical Society Reviews*, Vol. 42, 2013, pp. 7161–7173.
10. Denissen, W., Winne, J.M., and Du Prez, F.E., “Vitrimers: Permanent Organic Networks with Glass-Like Fluidity,” *Chemical Science*, Vol. 7, No. 1, 2016, pp. 30–38.
11. Bowman, C.N., and Kloxin, C.J., “Covalent Adaptable Networks: Reversible Bond Structures Incorporated in Polymer Networks,” *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 51, 2012, pp. 4272–4274.
12. Montarnal, D., Capelot, M., Tournilhac, F., and Leibler, L., “Silica-Like Malleable Materials from Permanent Organic Networks,” Science, Vol. 334, No. 6058, 2011, pp. 965–968.
13. Santiago, D., Guzmán, D., Padilla, J., Verdugo, P., De la Flor, S., and Serra, À., “Recyclable and Reprocessable Epoxy Vitrimer Adhesives,” *ACS Applied Polymer Materials*, Vol. 5, 2023, pp. 2006–2015.
14. Liu, T., Zhao, B.M., and Zhang, J.W., “Recent Development of Repairable, Malleable and Recyclable Thermosetting Polymers through Dynamic Transesterification,” *Polymer*, Vol. 194, 2020, 122392.
15. Capelot, M., Montarnal, D., Tournilhac, F., and Leibler, L., “Metal-Catalyzed Transesterification for Healing and Assembling of Thermosets,” *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 134, 2012, pp. 7664–7667.
16. Capelot, M., Unterlass, M.M., Tournilhac, F., and Leibler, L., “Catalytic Control of the Vitrimer Glass Transition,” *ACS Macro Letters*, Vol. 1, 2012, pp. 789–792.
17. Varganici, C.D., Rosu, L., Bifulco, A., Rosu, D., Mustata, F., and Gaan, S., “Recent Advances in Flame Retardant Epoxy Systems from Reactive DOPO-Based Phosphorus Additives,” *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 202, 2022, 110020.
18. Zhang, F.Q., Zhao, Y.Z., Xu, Y.J., Liu, Y., and Zhu, P., “Flame Retardation of Vinyl Ester Resins and Their Glass Fiber Reinforced Composites via Liquid DOPO-Containing 1-Vinylimidazole Salts,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 234, 2022, 109697.

19. Huo, S., Song, P., Yu, B., Ran, S., Chevali, V.S., Liu, L., Fang, Z., and Wang, H., "Phosphorus-Containing Flame Retardant Epoxy Thermosets: Recent Advances and Future Perspectives," *Progress in Polymer Science*, Vol. 114, 2021, 101366.
20. Li, X., Zhang, J., Zhang, L., Ruiz de Luzuriaga, A., Rekondo, A., and Wang, D.Y., "Recyclable Flame-Retardant Epoxy Composites Based on Disulfide Bonds: Flammability and Recyclability," *Composites Communications*, Vol. 25, 2021, 100754.
21. Salmeia, K.A., and Gaan, S., "An Overview of Some Recent Advances in DOPO-Derivatives: Chemistry and Flame Retardant Applications," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 113, 2015, pp. 119–134.
22. Perret, B., Schartel, B., Stöß, K., Ciesielski, M., Diederichs, J., Döring, M., Krämer, J., and Altstädt, V., "Novel DOPO-Based Flame Retardants in High-Performance Carbon Fibre Epoxy Composites for Aviation," *European Polymer Journal*, Vol. 47, No. 5, 2011, pp. 1081–1089.
23. Zhang, Y.R., Gu, S., Wang, Y.Z., and Chen, L., "Intrinsically Flame-Retardant Epoxy Vitrimers with Catalyst-Free Multi-Reprocessability towards Sustainable Carbon Fiber Composites," *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 40, 2024, e00883.
24. Wang, Y., Sun, E., Zhang, Z., Chen, Y., Cao, X., and Wang, N., "Molecularly Engineered, 1300 °C-Stable Aerogel with Integrated Flame Retardancy, EMI Shielding, and Self-Powered Sensing for AI-Predictive Battery Safety and Rescue Systems," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 524, 2025, 169371.
25. Höhne, C.C., Blaess, P., Ilinzeer, S., and Griesbaum, P., "New Approach for Electric Vehicle Composite Battery Housings: Electromagnetic Shielding and Flame Retardancy of PUR/UP-Based Sheet Moulding Compound," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* Vol. 167, 2023, 107404.
26. Fragiadaki, A., and Tserpes, K., "Moisture Absorption Behavior of Sheet Molding Compound Thermoplastic Composites and Its Influence on the Impact Performance of a Battery Housing," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 312, 2026, 113349.
27. Etchegaray-Bello, M., Millen, S.L.J., Fernández-de-Palencia-Navarro, M., Schöberl, J., Nguyen, T.A.D., Körber, L., O'Connor, E., Schuhmann, M., and Drechsler, K., "Experimental Thermal Runaway Degradation and Residual Performance of Fiber-Reinforced PEEK and PPS Composites for Battery Enclosure Applications," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 185, 2026, 110430.
28. Jang, M.S., Choi, J.H., Jang, W.H., Nam, Y.W., and Kim, C.G., "Effects of Dot-Type Electroless Nickel Plating on the Mechanical Properties of Glass/Epoxy Used for Radar-Absorbing Structures," *Composite Structures*, Vol. 257, 113165, 2021.
29. Underwriters Laboratories, UL 94, Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances, UL Standards & Engagement, USA, 2024.
30. ISO 5660-1:2015, Reaction-to-fire tests — Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate — Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate (Dynamic Measurement), 2015.
31. ASTM D3039/D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
32. Hong, J., Kwon, J., Im, D., Ko, J., Nam, C.Y., Yang, H.G., Shin, S.H., Hong, S.M., Hwang, S.S., Yoon, H.G., and Lee, A.S., "Best Practices for Correlating Electrical Conductivity with Broadband EMI Shielding in Binary Filler-Based Conducting Polymer Composites," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 455, 2023, 140528.
33. Munalli, D., Dimitrakis, G., Chronopoulos, D., Greedy, S., and Long, A., "Electromagnetic Shielding Effectiveness of Carbon Fibre Reinforced Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 173, 2019, 106906.
34. Yi, L.-F., Yamamoto, T., Onda, T., and Chen, Z.-C., "Microstructure and Thermal Properties of Nickel-Coated Carbon Fibers/Aluminum Composites," *Journal of Composite Materials,* Vol. 54, No. 19, 2020, pp. 2539–2548.
35. Lee, J.S., Jo, H., Choe, H.S., Lee, D.S., Jeong, H., Lee, H.R., Kweon, J.H., Lee, H., Myong, R.S., and Nam, Y., "Electro-Thermal Heating Element with a Nickel-Plated Carbon Fabric for the Leading Edge of a Wing-Shaped Composite Application," *Composite Structures*, Vol. 289, 2022, 115510.
36. Hao, M., Qian, X., Zhang, Y., Yang, J., Li, C., Gong, H., Wang, X., Wang, P., Liu, L., and Huang, Y., "Thermal Conductivity Enhancement of Carbon Fiber/Epoxy Composites via Constructing Three-Dimensionally Aligned Hybrid Thermal Conductive Structures on Fiber Surfaces," *Composites Science and Technology*, Vol. 231, 2023, 109800.
37. Long, Y., Li, C., Yu, X., Zhang, T., Xin, M., Fan, G., and Hao, C., "Breaking the Trade-Off in Flame-Retardant Epoxy Resins: A High-Crosslinking DOPO Additive for Simultaneous Fire Safety and Mechanical Reinforcement," *International Journal of Adhesion and Adhesives,* Vol. 144, 2026, 104186.
38. Mu, Q., An, L., Hu, Z., and Kuang, X., "Fast and Sustainable Recycling of Epoxy and Composites Using Mixed Solvents," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 199, 2022, 109895.
39. Gibson, R.F., Principles of Composite Material Mechanics, CRC Press, Boca Raton, USA, 2016.
40. Wang, S., Lou, S., Fan, P., Ma, L., Liu, J., and Tang, T., "A Novel Aromatic Imine-Containing DOPO-Based Reactive Flame Retardant towards Enhanced Flame-Retardant and Mechanical Properties of Epoxy Resin," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 213, 2023, 110364.
41. Isarn, I., Cortés, A., de la Vega, J., Wang, D.Y., Prolongo, S.G., and Jiménez-Suárez, A., "Development of DOPO-Resveratrol Epoxy Materials and Glass/Carbon Fiber Composites with Improved Flame Retardancy and Structural Properties," *Polymer Degradation and Stability,* Vol. 252, 2026, 112277.
42. Kennedy, A., Ghafafian, C., and Nutt, S., "Production and Remanufacturing of Vitrimer Matrix Composite Tubes," *Journal of Composites Science*, Vol. 10, No. 1, 2026, 14.