

방염 코팅 적용이 섬유 강화 복합재의 열방출 특성 및 기계적 성능에 미치는 영향

여승준^{*,**} · 윤성준^{*,**} · 이현준^{*,**} · 신해름^{*,***} · 김만태^{*,†}

Effects of Flame-Retardant Coating Application on the Heat Release Characteristics and Mechanical Performance of Fiber-Reinforced Composites

Seung Jun Yeo^{*,**}, Sung Jun Yun^{*,**}, Hyeon Jun Lee^{*,**}, Hae Reum Shin^{*,***}, Man Tae Kim^{*,†}

ABSTRACT: This study evaluated surface flame-retardant coatings for basalt fiber/epoxy FRP composites under direct flame exposure. Three coatings (Type A: phosphorus-based, Type B: inorganic-based, and Type C: carbon-based) and an uncoated (BFRP) specimen were tested by monitoring internal temperature and ignition behavior, observing surface damage (optical microscopy), measuring residual tensile strength, and conducting cone calorimetry (peak HRR and THR). The neat specimen showed rapid temperature rise and early ignition, whereas Type A and Type B suppressed temperature increase and maintained a stable protective layer, leading to improved residual strength. Type B exhibited the best thermal-barrier stability under prolonged exposure and the greatest THR reduction, making it the most favorable option considering both fire performance and residual structural performance. Type C showed an initial thermal-barrier effect but suffered protective-layer degradation during prolonged exposure, resulting in higher internal temperature and reduced residual strength, indicating the need for further improvement for practical use.

초 록: 본 연구에서는 현무암 섬유/에폭시 기반 섬유 강화 복합재(FRP)의 화염 노출 시 열차단 및 난연 성능을 향상시키기 위해 표면 방염 코팅을 적용하고, 코팅 유형에 따른 방염 성능 차이를 비교 및 평가하였다. 3종 방염 코팅(Type A: 인계, Type B: 무기계, Type C: 카본계)을 도포한 시편과 무코팅(BFRP) 시편을 대상으로 직접 화염 노출 시험을 수행하여 내부 온도 변화와 착화 거동을 분석하였고, 시험 전후 표면 손상을 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 화염 노출 후 잔존 인장강도 평가를 통해 구조적 성능 유지 효과를 검토하였으며, 콘칼로리미터 시험을 통해 최대 열방출률(peak HRR)과 총 방출열량(THR)을 측정하여 열방출 특성을 정량화하였다. 그 결과 무코팅 시편은 화염 노출 초기부터 내부 온도 상승과 착화가 빠르게 발생한 반면, Type A 및 Type B 코팅은 내부 온도 상승을 효과적으로 억제하고 보호층을 안정적으로 유지하여 잔존 인장강도가 향상되는 경향을 보였다. 특히 무기계(Type B) 코팅은 장시간 노출 조건에서 차열 안정성이 가장 우수하였고 THR 저감 효과가 두드러져, 난연 성능과 잔존 구조 성능을 동시에 고려할 때 가장 유리한 코팅으로 판단되었다. 반면 카본계(Type C) 코팅은 초기 차열 효과에도 불구하고 장시간 노출에서 보호층 유지성이 저하되어 내부 온도 상승 및 잔존 강도 저하가 나타나 적용 시 보완이 필요할 것으로 판단된다.

Key Words: 현무암 섬유 (Basalt fiber), 섬유강화복합재 (FPR), 방염코팅 (Flame-retardant coating), 열방호 (Thermal barrier), 잔류강도 (Residual strength)

Received 28 February 2026, received in revised form 19 March 2026, accepted 25 March 2026

*Convergence Transport Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology

**School of Mechanical Engineering, Pusan National University

***School of Convergence, Pusan National University

†Corresponding author (E-mail: ginggiscan@kicet.re.kr)

1. 서 론

섬유 강화 복합재(Fiber Reinforced Polymer, FRP)는 높은 비강도와 우수한 내식성, 설계 자유도 등을 바탕으로 항공, 에너지, 토목, 해양 구조물 등 다양한 산업 분야에서 활용 범위를 빠르게 확장해 왔다[1-4]. 그러나 FRP는 고분자 매트릭스를 기반으로 하는 재료적 특성상 열과 화염 환경에서 매트릭스의 연화, 열분해 및 연소가 발생하기 쉽고, 그 결과 섬유-수지 계면 열화, 층간 박리, 강도 저하 등 구조적 성능의 급격한 감소가 나타날 수 있다[5-7]. 특히 단일 기능을 목표로 설계된 복합 구조라 하더라도, 화염에 직접 노출되는 조건에서는 단일 성능만으로 안전성이 확보되지 않으며, 화염 노출 시 열 유입 억제와 연소 거동 제어를 동시에 고려한 설계가 필요하다[8,9].

복합재의 난연 및 방염 성능을 향상시키기 위한 접근은 크게 매트릭스 자체의 난연화, 섬유/계면 또는 중간층설계, 표면 방염 코팅 층 적용으로 구분될 수 있다[10-12]. 이 중 표면 방염 코팅은 기존 적층 구조나 내부 조성을 크게 변경하지 않고도 적용이 가능하며, 대면적 구조물에 대한 공정 호환성이 높다는 점에서 실용적 장점이 크다[13,14]. 또한 표면 코팅은 화염 노출 동안 발포 및 탄화 등을 통해 보호층을 형성하거나, 산소 및 열전달 경로를 차단하여 기재의 열분해를 지연시키는 방식으로 성능을 발현한다[15]. 다만 이러한 코팅 기반 방염 전략은 코팅 층의 열적 팽창/수축, 균열/박리, 열전도 특성에 따라 단일 및 난연 성능이 크게 달라질 수 있어, 코팅 적용 여부만으로 성능을 평가하기 어렵다[16].

표면 방염 코팅 층 형성으로 인한 난연 및 단일 효과를 정량화하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. Kandola 등[17]은 유리섬유/에폭시 복합재에 상용 코팅 층을 적용하고 콘칼로리미터를 이용해 열방출률, 총방출열량, 착화 시간 등을 분석하는 동시에, 코팅 층의 팽창 과 열전도 특성이 열차단 성능과 연결됨을 논의하였다. 또한 Beh 등[18]은 얇은 필름형 팽창성 코팅에서 탄화 층 형성과 HRR 저감 간의 관계를 제시하며, 코팅 설계가 단순 난연제를 넘어 열적 응답 제어 관점으로 확장될 수 있음을 보여주었다.

한편, 현무암 섬유를 이용한 복합소재 기반의 난연 성능과 기계적 물성의 균형을 다룬 연구들이 보고되었으며, 예를 들어 Guo 등[19]은 난연 에폭시 시스템에 현무암 섬유를 도입한 복합재에서 콘칼로리미터 및 기계적 특성 평가를 통해 구성요소 변화가 화재 거동에 미치는 영향을 논의하였다. 또한 현무암 섬유 강화 열가소성 복합재에서 인계 난연제 및 다양한 난연제 조합을 통해 난연성을 확보하려는 시도도 보고되고 있다[20].

그럼에도 불구하고, 실제 화염 노출 환경에서 요구되는 것은 열방출 지표의 개선뿐 아니라 화염 노출 후에도 구조적 기능을 유지하는 잔존 기계적 성능이다. 즉, 화재 안전

관점에서 불이 얼마나 강하고 오래 유지되는지(THR/HRR)와 그 후 구조가 얼마나 남는지는 함께 고려되어야 한다[21]. Qiang 등[22]은 CFRP 복합재 시트에 방화 코팅을 적용한 뒤 서로 다른 화재 조건에서 노출 시험을 수행하고, 화염 노출 후 굽힘 성능을 평가하여 코팅층이 열 유입을 완화함으로써 잔존 기계적 성능 저하를 줄일 수 있음을 보고하였다. 또한 Vacandare 등[23]은 일측 화염 노출 조건에서 탄소섬유 강화 적층판의 열 및 손상 거동과 인장 하중 조건을 함께 고려하여, 화염 노출로 발생하는 손상 및 변형 메커니즘이 잔존 기계적 성능 변화로 연결되는 과정을 체계적으로 제시하였다. 이러한 선행연구들은 코팅 기반 방염 성능 평가가 단순 난연 등급 확인을 넘어, 열적 거동과 잔존 기계적 성능을 함께 고려하는 방향으로 확장되고 있음을 보여주고, 복합재의 열 안정성과 기계적 특성을 함께 고려한 소재에 대한 연구가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 화염이나 고온 환경에 노출이 필수적인 구조용 복합소재에 적용이 가능한 방염 코팅재를 개발하고 이를 복합소재 표면에 적용시켜 화염 노출 동안의 복합재 표면 특성과 열방출 열량지표(THR, HRR)에 대한 평가 및 화염 노출 후 잔존 인장강도를 평가하여 기계적 특성의 차이가 발생하는지 연구하였다. 특히 본 연구는 화염에 대한 복합소재의 열방출 지표와 잔존 인장강도의 상호 관계에 대해 연구를 수행함으로써 개발된 코팅소재의 열적 안정성 특성과 적용된 복합소재의 구조설계 시 활용할 수 있는 재료 물성 확보를 위한 기초 데이터로 활용될 수 있다.

2. 실 험

2.1 실험재료

본 연구에서 사용된 섬유 강화 복합재의 기지재는 Hengdian GBF Basalt Fiber Co의 먼 중량 200g/m² 현무암 섬유 평직 Fabric을 사용하였고, 매트릭스는 주재료 (주)국도화학의 Bisphenol-F계 에폭시 수지인 KFR 5121과, 경화제는 KFH 9581LV를 사용하였다.

복합재 표면의 방염 코팅을 위한 방염재는 3종의 계열로 구분하여 Type A는 인계 화합물을 베이스로 개발한 무색의 인계 방염재, Type B는 무기계 화합물을 베이스로 개발한 백색의 무기계 방염재, Type C는 CNT를 베이스로 개발한 흑색의 카본계 방염재를 사용하였다.

2.2 시편 제작 및 시험

본 섬유 강화 복합재 제작 공정으로는 현무암 섬유 직물을 10ply 적층한 후 Va-RTM 공정을 통해 에폭시 수지를 함침하였다. 함침된 성형체를 오토클레이브 장비를 활용하여 120°C의 온도와 5bar의 압력 조건에서 2시간 동안 경화를 수행하였다. 경화 후 복합재의 두께는 약 2 mm이고 섬유 체적분율(fiber volume fraction, Vf)은 약 65%이다.

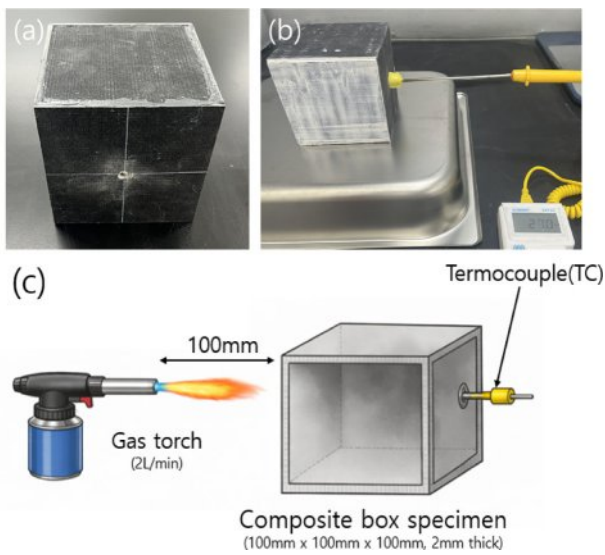


Fig. 1. Direct flame exposure test: (a) composite box specimen, (b) test image, (c) schematic illustration of the test setup

화염 노출 시험을 위해 100 mm × 100 mm × 100 mm 사각형태의 복합재 박스를 제작하였다. 해당 박스 시편은 평판 복합재를 별도로 제작한 후, 각 면을 절단하여 에폭시 접착제를 이용해 조립하는 방식으로 제작하였다. Fig. 1과 같은 형태의 사각박스의 한 개 표면에 방염재를 코팅한 후 5분간 화염에 노출하였다. 화염 노출 시험은 프로판 가스를 사용하는 토치 버너를 이용하여 수행하였다. 토치의 가스 유량은 약 2.0 L/min으로 설정하였으며, 화염 길이는 약 100 mm 수준으로 유지하였다. 화염의 중심 온도는 약 1,200~1,300°C 범위이고, 시편 표면에 직접적으로 노출되도록 설정하였다. 토치와 시편 표면 간 거리는 약 100 mm로 일정하게 유지하였으며, 화염은 시편 표면에 수직 방향으로 인가하였다. 모든 시험은 동일한 조건에서 5분(300초) 동안 수행하여 코팅 종류에 따른 열차단 및 난연 성능을 비교하였다. 내부 온도의 변화를 확인하기 위해 온도센서를 부착하고 화염 노출면의 온도 변화 및 표면의 화염에 의한 손상정도를 직접 확인하였다.

화염 노출 시험 이후, 노출된 면을 포함하는 영역에서 시편을 절단하여 인장시험용 시편을 제작하였다. 시편은 화염 노출에 따른 열손상이 반영될 수 있도록 노출 중심부를 기준으로 채취하였으며, ASTM D 3039 규격에 따라 가공하고 만능재료시험기(INSTRON 5982) 장비를 활용하여 인장 시험을 수행하였다.

콘칼로리미터(Cone calorimeter, FESTECC)를 이용한 열량 방출 시험을 위한 100 mm × 100 mm 플레이트를 제작하여 표면에 개발된 Type A, B, C 3가지의 방염재 용액을 복합재 표면에 도포하고 바코터를 이용하여 약 10 μm 일정한 두께로 코팅 후 상온에서 24시간 동안 경화하였다. Fig. 2는 현무암 섬유 강화 복합재(BFRP)와 Type A(BFRP-A), B(BFRP-

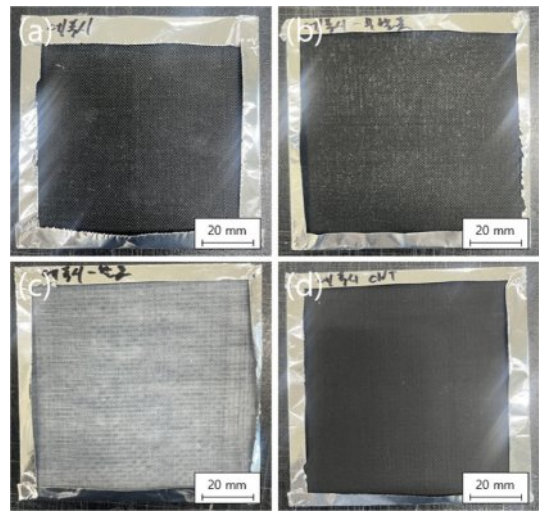


Fig. 2. Flame-retardant coated FRP specimens (a) BFRP (b) BFRP-A, (c) BFRP-B, (d) BFRP-C

B), C(BFRP-C) 방염재가 코팅된 복합재 플레이트를 나타낸다. 열량방출 시험은 KS F ISO 5660-1 규격에 따라 수행하였으며, 시험 중 최대 열방출률(peak HRR, kW/m²)과 총 방출열량(THR, MJ/m²)을 측정하여 난연 성능을 정량적으로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염 노출 시험

화염 노출 시험에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 화염 노출 시험에서 무코팅(Neat) 시편은 노출 90초 시점에 측정 온도 약 70°C에 도달함과 동시에 착화가 발생하여 시험 지속이 불가하였다. 반면 Type A 및 Type B 코팅 시편은 90초까지 30°C 이하의 낮은 온도를 유지하였고, 300초 경과 시 약 60°C 수준으로 온도 상승이 제한되었다. Type C 코팅 시

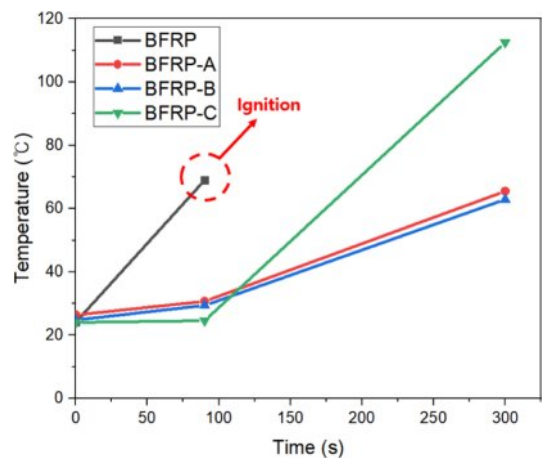


Fig. 3. Temperature history inside the composite box during the flame exposure test

편도 90초까지는 30°C 이하로 초기 차열 효과가 확인되었으나, 300초에서 100°C 이상으로 상승하여 장시간 노출 조건에서 온도가 급격히 증가하였다.

이러한 결과는 코팅 적용에 의해 90초 이전의 초기 구간에서 열유입 지연이 공통적으로 확보되었음을 의미하며, 동시에 300초의 장시간 노출에서는 코팅 종류에 따른 열적 안정성 차이가 있음을 나타낸다. 특히 Type A/B는 300초에서도 온도 상승이 완만해 인계 또는 무기계 보호 층의 안정성이 상대적으로 우수하였고, 반면 Type C는 초기에는 차열이 나타났으나 시간이 경과하면서 카본계 보호 층의 균열 및 박리 또는 복사열 흡수 증가 등이 복합적으로 작용하여 열차단 능력이 빠르게 저하된 것으로 판단된다.

3.2 화염 노출 시험 후 표면 분석

화염 노출 시험 이후 시편 표면의 손상 양상과 보호층 형성 여부를 확인하기 위해 광학현미경(Optical microscopy, OM) 관찰을 수행하였다. Fig. 4은 BFRP 및 BFRP-A/B/C 시편의 방염시험 전후 표면을 비교한 결과로, (a), (b), (c), (d)는 각각 BFRP, BFRP-A, BFRP-B, BFRP-C에 해당하며, 좌측은 방염시험 전, 우측은 방염시험 후 표면을 나타낸다.

BFRP 시편은 Fig. 4의 (a)에서 볼 수 있듯이 화염 노출 시

험 전에는 직물 조직이 뚜렷하게 관찰되었으나, 시험 후에는 표면이 국부적으로 변형되고 섬유 주변에서 용융(melting) 흔적이 확인되었다. 이는 화염 노출 동안 매트릭스의 열연화 및 열분해가 진행되면서 표면 보호 기능이 충분히 확보되지 못했음을 의미하며, 3.1절에서 관찰된 초기 착화 경향과도 정합적인 결과로 판단된다.

BFRP-A 시편은 Fig. 4의 (b)에서 볼 수 있듯이 화염 노출 시험 후 표면에 비교적 균일한 보호층이 형성된 것이 관찰되었으며, 일부 영역에서는 현무암 섬유 노출이 관찰되나 전반적으로 섬유 조직의 큰 붕괴 없이 형상을 유지하고 있었다. 이는 인계 방염재의 응축상 메커니즘에 의해 탄화층이 형성되어 열유입 및 표면 손상 진행을 지연시킨 결과로 해석될 수 있다.

BFRP-B 시편은 Fig. 4의 (c)에서 볼 수 있듯이 시험 후 표면에서 보호층 형성이 가장 뚜렷하게 관찰되었고, 섬유가 직접 노출되어 보이는 영역이 상대적으로 적었다. 특히 표면이 연속적인 막 형태로 유지되는 양상을 보이며, 이는 무기계 코팅이 열 노출 중 무기 잔사/차열 장벽을 형성하여 기재를 효과적으로 차단했을 가능성을 시사한다. 이러한 표면 관찰 결과는 3.1절에서 BFRP-B가 장시간 노출에서도 온도 상승이 제한되었던 경향과 함께, 보호층의 안정성이 차열 성능에 기여했음을 뒷받침한다.

반면 BFRP-C 시편은 Fig. 4의 (d)와 같이 화염 노출 시험 후 보호층이 대부분 소실된 것으로 관찰되며, 표면에 국부적인 결손 영역이 확인된다. 다만 섬유 조직 자체는 완전히 붕괴되기보다는 일정 수준의 형상을 유지하고 있어, 카본계 코팅이 초기에는 표면 보호에 일부 기여하였으나 장시간 노출에서 보호층 안정성이 저하되어 차열 성능이 약화된 것으로 해석된다. 즉, BFRP-C는 보호층 유지 관점에서는 BFRP-A/B 대비 불리하나, 섬유 형상 유지에는 제한적으로 기여했을 것으로 판단된다.

3.3 화염 노출 시험 후 인장시험

화염 노출 이후의 시편으로 수행한 인장시험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. BFRP-A는 BFRP 대비 인장강도가 약 23% 향상되었으며, BFRP-B는 약 20% 향상된 반면, BFRP-C는 약 20% 감소하였다. 일반적으로 고분자 매트릭스 복합재는 화염 또는 고온에 노출되면 매트릭스의 열분해 및 연화, 그리고 섬유-수지 계면의 열적 열화가 진행되어 기계적 강도가 감소하는 경향을 보인다.

본 연구에서 BFRP-A 및 BFRP-B에서 관찰된 강도 향상은 단순히 열손상이 감소하는 것 뿐만 아니라, 코팅층이 화염 노출 동안 안정적인 보호층을 형성함으로써 열 및 산소의 전달을 효과적으로 차단하고, 복합재 내부로의 열유입을 지연시킨 결과로 해석할 수 있다. Fig. 3의 내부 온도 변화 결과에서 확인되었듯이, Type A 및 Type B 코팅은 300초 동안 온도 상승을 상대적으로 낮은 수준으로 유지하였으며, 이

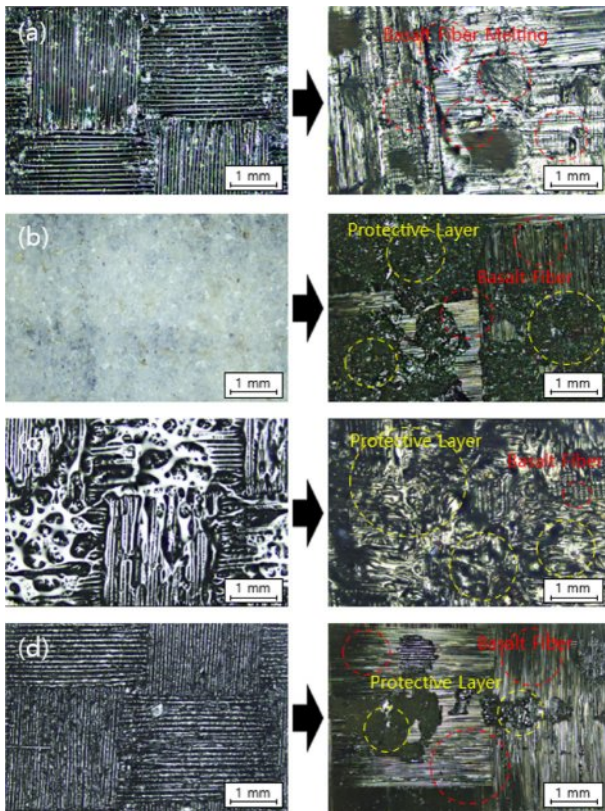


Fig. 4. Optical microscopy images of specimen surfaces before and after flame exposure: (a) BFRP, (b) BFRP-A, (c) BFRP-B, and (d) BFRP-C

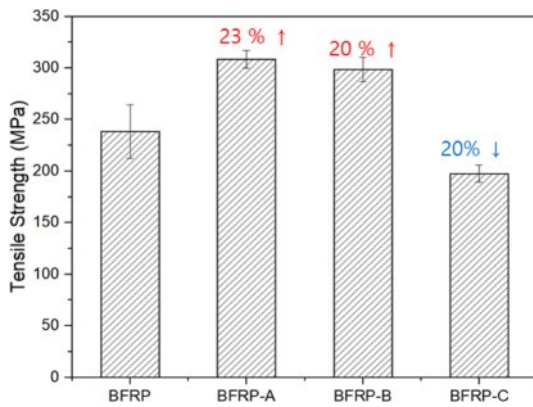


Fig. 5. Residual tensile strength of specimens after flame exposure

는 매트릭스의 열분해 진행을 억제하고 섬유-수지 계면의 열적 열화를 감소시키는 데 기여한 것으로 판단된다.

특히 Type A 코팅은 인계 기반의 탄화층 형성을 통해 표면 보호 효과를 제공하며, Type B 코팅은 무기계 보호층을 형성하여 열 및 산소 전달을 보다 효과적으로 차단하는 특성을 나타낸다. 이러한 보호 메커니즘 차이는 Fig. 4의 표면 관찰 결과에서도 확인되며, Type B의 경우 보다 연속적이고 안정적인 보호층이 유지되는 경향을 보였다.

반면 BFRP-C는 초기 차열 효과에도 불구하고 장시간 노출 조건에서 보호층의 균열 및 탈락이 발생하여 열이 복합재 내부로 빠르게 전달되었으며, 이에 따라 매트릭스 열분해 및 계면 손상이 상대적으로 크게 발생한 것으로 판단된다. 그 결과, 열적 손상이 누적되면서 인장강도 감소로 이어진 것으로 해석된다. 즉, 초기 차열 성능뿐 아니라 장시간 노출에서의 보호층 형성 및 유지 안정성이 잔존 기계적 성능 확보에 중요한 인자로 작용함을 확인할 수 있다.

3.4 난연 성능 시험

콘칼로리미터 시험에 따른 최대 열방출율(Peak HRR)과 총 열방출율(THR)을 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. BFRP 시편의 THR은 9.3 MJ/m^2 , Peak HRR은 96.45 kW/m^2 로 나타났으며, BFRP-A는 THR 5.6 MJ/m^2 및 Peak HRR 41.28 kW/m^2 , BFRP-B는 THR 3.7 MJ/m^2 및 Peak HRR 73.97 kW/m^2 , BFRP-C는 THR 8.3 MJ/m^2 및 Peak HRR 104.68 kW/m^2 을 나타냈다.

전반적으로 BFRP-A와 BFRP-B에서 열방출 지표가 개선되었으며, 각 코팅은 서로 다른 특성을 나타내었다. BFRP-A는 최대 열방출률(Peak HRR)이 크게 감소하여 화염 노출 시 연소가 급격히 확대되는 양상을 효과적으로 억제하는 특성을 보였고, BFRP-B는 총 방출열량(THR)이 가장 낮게 나타나 연소 과정에서 방출되는 열의 누적량을 감소시키는 데 유리한 거동을 나타냈다.

Fig. 3의 내부 온도 변화, Fig. 4의 표면 관찰 결과, 그리고

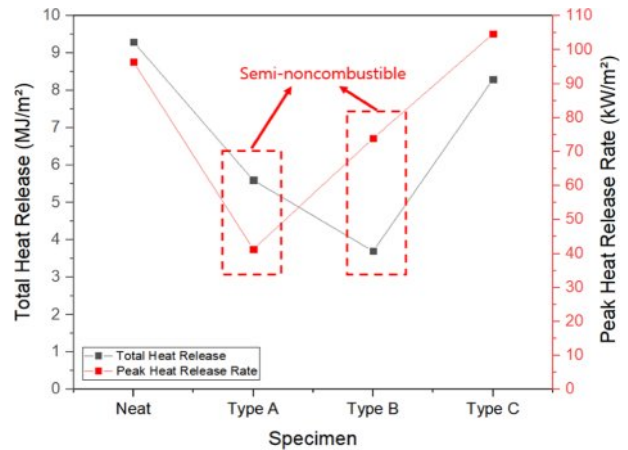


Fig. 6. Cone calorimeter results (THR and peak HRR) of Neat and coated specimens

Fig. 5의 잔존 인장강도 결과를 종합적으로 고려하면, Type B 코팅은 장시간 화염 노출 조건에서도 안정적인 보호층을 유지하여 열 및 산소 전달을 효과적으로 차단하고, 이에 따라 복합재 내부 온도 상승을 억제함으로써 매트릭스 열분해 및 계면 열화를 최소화하는 데 기여한 것으로 나타났다. 이러한 열적 손상 억제 메커니즘은 최종적으로 잔존 기계적 성능 유지로 이어지는 것으로 해석된다.

반면 Type A 코팅은 초기 연소 억제 측면에서는 우수한 성능을 보였으나, 장시간 노출 시 보호층의 안정성 측면에서는 Type B 대비 다소 제한적인 경향을 나타냈으며, Type C 코팅은 보호층 유지성이 낮아 열차단 효과가 지속되지 못하는 것으로 나타났다.

따라서 열차단 성능(내부 온도 상승 억제), 열방출 특성(THR 및 peak HRR), 그리고 화염 노출 후 잔존 기계적 성능을 종합적으로 고려할 때, 무기계(Type B) 코팅이 본 연구 조건에서 가장 균형 잡힌 성능을 나타내는 것으로 판단된다. 또한, 난연 및 불연 성능을 판단하는 기준인 “건축물 마감재료의 난연 성능 및 화재 확산 방지구조기능”의 성능 기준과 비교할 때, BFRP-A 및 BFRP-B는 준불연 성능을 만족하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구 결과, FRP 표면 방염 코팅은 무기계 대비 화염 노출 시 열유입을 지연시키고 연소 확산을 억제하여 화염 노출 후 물성 저하를 완화할 수 있음을 확인하였다. 특히 무기계(Type B) 코팅은 화염 노출 동안 보호층이 가장 안정적으로 유지되며 내부 온도 상승을 효과적으로 억제해, 잔존 기계적 성능 유지와 누적 열방출 저감 측면에서 가장 유리한 경향을 보였다. 인계(Type A) 코팅 또한 방염 성능 개선에 효과적이었으나, 화염 노출 시험 후 코팅층 유지 및 기

재 보호 같은 전반적 안정성은 무기계 코팅이 상대적으로 우수하였다. 반면 카본계(Type C) 코팅은 초기 차열 효과에도 불구하고 화염 노출 시험에서 보호층 유지성이 낮아 잔존 강도 저하로 이어질 수 있어 적용 시 보완이 필요하다. 이러한 결과는 고열 및 화염 노출 위험이 상존하는 제철 또는 열처리 공정 설비 주변, 고온 작업 환경의 보호 커버/패널 등에서 FRP의 적용 범위를 확대하는 데 유용한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 무기계 기반 표면 코팅이 구조용 FRP의 난연화 및 잔존 성능 확보에 효과적인 설계 방향임을 시사한다.

후 기

본 연구는 한국산업기술기획평가원 로봇산업기술개발사업(과제번호 RS-2024-00507783)으로부터 지원받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Zhang, Z., Han, F., Li, H., Li, T., Yang, B., Hu, J., and Pan, Y. T., "Flame-Retardant Fiber-Reinforced Composites: Advances and Prospects in Multi-Performance Synergy," *Journal of Composites Science*, Vol. 9, No. 12, 2025, 703.
- Nazrun, T., Hassan, M. K., Hasnat, M. R., Hossain, M. D., Ahmed, B., and Saha, S., "A Comprehensive Review on Intumescent Coatings: Formulation, Manufacturing Methods, Research Development, and Issues," *Fire*, Vol. 8, No. 4, 2025, 155.
- Bourbigot, S., and Duquesne, S., "Fire Retardant Polymers: Recent Developments and Opportunities," *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 17, No. 22, 2007, pp. 2283-2300.
- Weil, E. D., "Fire-protective and Flame-retardant Coatings-A State-of-the-art Review," *Journal of Fire Sciences*, Vol. 29, No. 3, 2011, pp. 259-296.
- Jimenez, M., Duquesne, S., and Bourbigot, S., "Intumescent Fire Protective Coating: Toward a Better Understanding of Their Mechanism of Action," *Thermochimica Acta*, Vol. 449, No. 1-2, 2006, pp. 16-26.
- Mohd Sabee, M. M. S., Itam, Z., Beddu, S., Zahari, N. M., Mohd Kamal, N. L., Mohamad, D., ... and Abdul Hamid, Z. A., "Flame Retardant Coatings: Additives, Binders, and Fillers," *Polymers*, Vol. 14, No. 14, 2022, 2911.
- Keller, T., and Bai, Y., "Structural Performance of FRP Composites in Fire," *Advances in Structural Engineering*, Vol. 13, No. 5, 2010, pp. 793-804.
- Bai, Y., and Keller, T., "Modeling of Mechanical Response of FRP Composites in Fire," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40, No. 6-7, 2009, pp. 731-738.
- Gibson, A. G., Wright, P. N. H., Wu, Y. S., Mouritz, A. P., Mathys, Z., and Gardiner, C. P., "The Integrity of Polymer Composites during and after Fire," *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, No. 15, 2004, pp. 1283-1307.
- Gibson, A. G., Wu, Y. S., Evans, J. T., and Mouritz, A. P., "Laminate Theory Analysis of Composites Under Load in Fire," *Journal of Composite Materials*, Vol. 40, No. 7, 2006, pp. 639-658.
- Firmo, J. P., Correia, J. R., and Bisby, L. A., "Fire Behaviour of FRP-strengthened Reinforced Concrete Structural Elements: A State-of-the-art Review," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 80, 2015, pp. 198-216.
- Ding, C., Bai, Y., Azhari, F., and Keller, T., "Fire Dynamic Responses of Fiber-Reinforced Polymer Composite Buildings," *Journal of Composites for Construction*, Vol. 28, No. 3, 2024, 04024013.
- Kandola, B. K., Bhatti, W., and Kandare, E., "A Comparative Study on the Efficacy of Varied Surface Coatings in Fireproofing Glass/epoxy Composites," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 97, No. 11, 2012, pp. 2418-2427.
- Kandola, B. K., Luangtriratana, P., Duquesne, S., and Bourbigot, S., "The Effects of Thermophysical Properties and Environmental Conditions on Fire Performance of Intumescent Coatings on Glass Fibre-reinforced Epoxy Composites," *Materials*, Vol. 8, No. 8, 2015, pp. 5216-5237.
- Luangtriratana, P., Kandola, B. K., Duquesne, S., and Bourbigot, S., "Quantification of Thermal Barrier Efficiency of Intumescent Coatings on Glass Fibre-reinforced Epoxy Composites," *Coatings*, Vol. 8, No. 10, 2018, 347.
- Beh, J. H., Yew, M. C., Yew, M. K., and Saw, L. H., "Fire Protection Performance and Thermal Behavior of thin Film Intumescent Coating," *Coatings*, Vol. 9, No. 8, 2019, 483.
- Kandare, E., Griffin, G. J., Feih, S., Gibson, A. G., Lattimer, B. Y., and Mouritz, A. P., "Fire Structural Modelling of Fibre-polymer Laminates Protected with an Intumescent Coating," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 5, 2012, pp. 793-802.
- Liang, W., Bonsu, A. O., Lv, H., Yang, B., Liu, C., and Deng, J., "Intumescent Coating Thickness Effect on the Post-heat Mechanical Properties of Composites," *In Structures*, Elsevier, Vol. 28, 2020, pp. 2056-2072.
- Yang, J., Ji, C., Wang, D., Zhang, H., Zhou, Z., Hu, J., and Wang, B., "Fire Behavior and Post-fire Residual Tensile Strength Prediction of Carbon Fiber/phthalonitrile Composite Laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 252, 2024, 110624.
- Guo, Y., Zhou, M., Yin, G. Z., Kalali, E., Wang, N., and Wang, D. Y., "Basalt Fiber-based Flame Retardant Epoxy Composites: Preparation, Thermal Properties, and Flame Retardancy," *Materials*, Vol. 14, No. 4, 2021, 902.
- Arslan, Ç., and Doğan, M., "Flame Retardancy of Basalt Fiber-reinforced PBT Composite: Effect of Red Phosphorus and TiO₂ Synergism," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 148, No. 19, 2023, pp. 10151-10161.
- Qiang, X., Wang, K., Jiang, X., Xiao, Y., and Yibo, E., "Effect of Fireproof Coatings on the Post-fire Behavior of CFRP Composite Sheets," *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 18, 2023, 10369.
- Vacandare, J., Vieille, B., Patel, S., Naejus, C., and Denize, M., "Comparison of the Tensile Behavior of Carbon Fibers Reinforced Laminates Exposed to Fire Conditions," *Fire Technology*, Vol. 61, 2025, pp. 4851-4870.