

PEMFC 바이폴라 플레이트용 에폭시 시스템 및 재료 특성

이재영¹ · 문상진¹ · 이승훈¹ · 이흥기^{1,2†}

¹우석대학교 수소연료전지 부품 및 응용기술 지역혁신센터, ²우석대학교 수소에너지공학과

Epoxy System for PEMFC Bipolar Plate and Its Material Characteristics

JAEOYOUNG LEE¹, SANGJIN MOON¹, SEUNGHOOON LEE¹, HONGKI LEE^{1,2†}

¹Hydrogen Fuel Cell Regional Innovation Center, Woosuk University, 151 Dunsan 1-ro, Bongdong-eup, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55315, Korea

²Department of Hydrogen Energy Engineering, Woosuk University, 443 Samnye-ro, Samnye-eup, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55338, Korea

[†]Corresponding author :
hongkil@woosuk.ac.kr

Received 15 December, 2025

Revised 31 December, 2025

Accepted 5 January, 2026

Abstract >> Highly conductive bipolar plate for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) was prepared using epoxy/carbon composite. Epoxy matrix was made of difunctional epoxy, tetrafunctional epoxy and phenol novolac-type curing agent, and carbon materials were graphite powder (GP), carbon fiber filament (CFF) and graphite fiber (GF). CFF was incorporated in order to improve mechanical properties and GF was used to improve electrical conductivity. To find out the cure condition of epoxy matrix, differential scanning calorimetry analysis was carried out, and tensile and flexural tests were carried out using universal testing machine. The surface morphology of the fractured specimen and the interfacial bonding between epoxy matrix and CFF or GF were observed by a scanning electron microscopy. As CFF content increased, mechanical strength increased and GF content increased, electrical conductivity increased.

Key words : Bipolar plate(바이폴라 플레이트), PEMFC(고분자 전해질막 연료전지), Graphite fiber(흑연섬유), Carbon fiber(탄소섬유), Epoxy resin(에폭시 수지), Mechanical property(기계적 강도), Electrical conductivity(전기 전도도)

1. 서론

고분자 전해질막 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 현재 수소 자동차, 수소 상용차, 지게차, 고정형 발전 분야 등에서 사업화가 진행 중이고, 철도, 트램, 드론, 및 도심 항공 모빌리

티(Urban Air Mobility, UAM)는 물론 선박, 비행기 분야까지 그 범위를 확장하고 있다. 따라서 많은 연구자들은 PEMFC의 출력 밀도를 높이기 위한 소재 및 부품 연구, 즉 고분자 전해질막, 기체 확산층(Gas Diffusion Layer, GDL), 촉매, 바이폴라 플레이트, 전극 등의 고성능화 연구는 물론, 최근에는 연료전지

시스템의 대용량화, 고출력화, 고내구화 및 가격 저감에 목표를 두는 연구도 활발히 수행하고 있다¹⁻⁶⁾. 이들 구성 요소 중에서 바이폴라 플레이트는 재료(그라파이트, 복합재료, 금속 등) 종류 및 가공 방법에 따라 다양하기는 하지만 전체 스택 중량의 약 80 wt%이면서 크기의 90% 이상을 차지하고, 스택 전체 원가의 약 45%를 차지하는 핵심 고가 부품이다. 따라서 PEMFC 스택의 에너지 밀도를 높이면서 가격 저감을 빠르게 달성하기 위해서 바이폴라 플레이트의 경량화 및 원가 절감 연구가 중요한 주제 중의 하나가 되고 있다⁷⁻⁹⁾.

PEMFC 스택에서 인접한 셀을 분리하는 바이폴라 플레이트는 두 개의 GDL과 막 전극 접합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)와 함께 반복되는 단위이며, 주요 기능은 다음과 같다¹⁰⁻¹³⁾. (1) 수소 연료와 산화제 가스(산소 또는 공기)를 각각 애노드 극 및 캐소드 극의 유로를 통해 균일하게 공급하는 것이며, 캐소드 극 유로는 배수 역할도 한다. 또한, (2) 애노드 극에서 수소 산화 반응에 의해 생성된 전자를 외부 회로를 통해 캐소드 극 쪽으로 전달하는 역할도 한다. 따라서 100 S/cm 이상의 우수한 전기 전도도를 가져야 한다. 그리고, (3) GDL을 기계적으로 지지하는 역할은 물론 (4) 냉각 유로를 통하여 연료전지 운전시 발생하는 열을 방출 및 회수하는 역할도 담당한다.

PEMFC의 장기 내구성을 확보하기 위해서 바이폴라 플레이트는 우수한 전기전도도, 기계적 안정성, 내식성 및 낮은 기체 투과도를 가져야 하며, 이 특성들을 어느 정도 만족하는 금속 재질과 탄소 복합재료 재질이 많이 사용되고 있다¹⁴⁻¹⁶⁾. 금속 바이폴라 플레이트는 스테인리스강에 티타늄, 질화니켈, 질화크롬, 탄화니켈, 탄화크롬 등과 같은 고내식성 및 전기 전도성 재료로 코팅하여 제작된다^{8,15,17,18)}. 이것들은 우수한 기계적 강도, 높은 전기 전도도 및 낮은 가스 투과도를 제공할 수 있고, 어느 정도의 장기 내식성을 발휘할 수 있다. 그럼에도 PEMFC는 높은 상대 습도(90% 이상), 고산도(pH 2~3), 고온(60~80°C)의 가혹한 작동 조건에서 장기적으로 사용하기 위해

서 더 높은 내식성을 요구하고 있다. 특히, 코팅 공정 중 핀홀 및 장시간 사용에 따른 표면 코팅의 미세 균열은 내식성에 치명적인 결함으로 작용하게 된다. 또한, 핀홀과 미세 균열을 통해 용출된 금속 이온은 촉매층과 전해질막으로 전달되어 촉매활성을 열화시키고 수소 양성자의 전도도를 감소시키는 문제를 유발하게 된다.

흑연은 바이폴라 플레이트로 사용될 수 있을 정도로 전기 전도도가 높고, 우수한 내식성을 가지며, 경량화가 가능한 재료이다. 그렇지만 기계적 특성, 특히 취성이 너무 불량하고, 가공성이 매우 낮기 때문에 단독 재료로는 사용할 수 없고, 고분자 재료와 혼합하여 복합재료 형태로 사용하는 것이 바람직하다. 이로 인해 고강도, 높은 유연성, 경량화 및 저비용화는 물론 우수한 전기 전도도, 내식성을 충족할 수 있게 된다. 또한 가스 유로를 성형 공정 중에 별도의 후처리 없이 판 표면에 직접 형성시킬 수도 있다. 또한 흑연 분말 외에도 다양한 탄소재료들(팽창 흑연(EG), 카본 블랙(CB), 탄소 나노튜브(CNT), 탄소섬유, 그라파이트 섬유 등)가 사용될 수 있다¹⁹⁻²¹⁾. 고분자 매트릭스 재료로는 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리페닐렌 설파이드(PPS), 에폭시 수지, 페놀 수지, 폴리에스터 등과 같은 다양한 종류가 사용될 수 있다²²⁾. 처음 세 가지는 열가소성 수지이고 뒤의 세 가지는 열경화성 수지이다.

본 연구에서는 에폭시 매트릭스의 가교밀도를 증가시켜서 기계적 강도를 개선하기 위해 이관능형 에폭시에 사관능형 에폭시를 도입하였고, 흑연/에폭시 복합재료의 기계적 강도 및 전기 전도도를 향상시키기 위해 탄소섬유와 흑연섬유를 도입하였다.

2. 실험방법

2.1 재료

두 개의 에폭시기가 분자 사슬 말단에 각각 하나씩 있는 이관능형 에폭시 수지로 Tohto Kasei Co., Ltd. (일본)의 비스페놀-F 타입 에폭시(상품명: YSLV-80XY)

을 사용하였다. 이것의 에폭시 당량은 190~200 g/eq 이고, 녹는점은 78°C이며, 용융 점도는 150°C에서 0.1 Pa·S이다. 또한, 에폭시 경화체의 가교밀도를 증가시켜서 기계적, 전기적 특성을 개선하기 위해 네 개의 에폭시기를 갖는 사관능형 에폭시 수지(국도화학, KDT-4400)를 같이 사용하였다. 이것의 에폭시 당량은 210~240 g/eq이고, 연화점은 80~90°C이다. 경화제는 강남화성의 페놀 노블락 타입 레진인 KPN 2110을 사용하였다. 이것의 수산기 당량은 104 g/eq 이고, 연화점은 105°C이다. 그리고 촉매는 triphenyl phosphine (TPP)를 사용하였다. 이것들의 화학적 구조를 Fig. 1에 나타내었다.

흑연 분말은 TIMCAL사(스위스)의 TIMREX SFG6L 제품을 사용하였다. 탄소 함량은 99.98%이고, 그 지름(D90)은 5.5~7.5 μm이다. 탄소섬유는 Toray 사(일본)의 T700SC-24000-50C를 1 cm 길이로 잘라서 사용하였고, 그 필라멘트의 지름은 7 μm이다. 탄소 섬유는 인장강도는 4.9 GPa이고, 탄성 모듈러스는

230 GPa이며, 에폭시와의 접착성을 강화시키기 위해 표면처리된 제품이다. 흑연 섬유는 Kureha Chemical 사의 KGF-200를 사용하였고, 그 길이가 3 mm이고, 지름이 12.5 μm이다. 인장강도는 850 MPa이고, 탄성 모듈러스는 37 GPa이다.

2.2 DSC 분석에 의한 경화조건 확립

에폭시 수지 중에 혼합된 탄소 재료들은 에폭시 수지의 경화반응에 어떤 영향도 미치지 않기 때문에 경화반응 조건은 탄소재료가 포함되지 않은 에폭시 수지 계를 이용하여 분석하였다. 먼저, 이관능형 에폭시 수지 10, 9, 8 g에 사관능형 에폭시를 각각 0, 1, 2 g을 혼합한다. 여기에 경화제 13 g과 촉매 0.1 g을 넣고 혼합 믹서를 사용하여 분말상으로 균질하게 분쇄 혼합하였다. 경화반응 온도 조건을 찾기 위해서 시차 주사 열량 분석(DSC Infinity, Instrument Specialists, Inc., USA)을 행하였다. DSC용 알루미늄(Al) 팬에 에폭시 분말 혼합물을 7~10 mg을 넣어서 분석 셀에 넣고, 50 ml/min의 유속으로 질소를 흘려보내면서 실온으로부터 300°C까지 10 °C/min의 승온속도로 열분석 하였다.

2.3 가열 압축성형에 의한 시편 제조

에폭시/탄소 복합재료 계의 기계적 특성 및 전기 전도도를 평가하기 위해서 에폭시 매트릭스 25 wt%에 흑연 입자 65~70 wt%와 흑연 섬유 0~9 wt%, 그리고 탄소섬유 필라멘트를 0~1 wt% 범위 내에서 변화시키면서 혼합하였다. 모든 원료들이 분말상 또는 섬유상이기 때문에 혼합 믹서를 사용하여 균질하게 분산시킨 후 사용하였다. 에폭시/탄소 복합재료의 조성물 혼합비는 E_a-GP_b-CFF_c-GF_d으로 명명하였고, 여기서 E는 에폭시 매트릭스, GP는 흑연 입자(graphite powder), CFF는 탄소섬유 필라멘트(carbon fiber filament), 그리고 GF는 흑연섬유(graphite fiber)를 뜻하며, 아래 첨자 a, b, c, d는 각 성분의 중량 조성비를 나타낸다. DSC 분석을 통해서 본 에폭시 계의 경

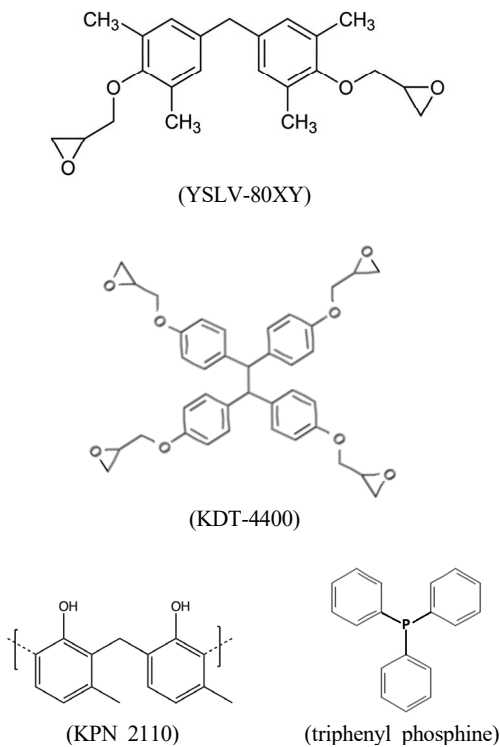


Fig. 1. Chemical structure of reagents

화반응 온도 및 시간은 120°C에서 2시간 경화반응 후 180°C에서 3시간 동안 후경화를 시키는 것이 적합함을 알 수 있었고, 이 조건에 따라 탄소 복합재료 시편을 가열 압축 성형하여 제조하였다.

2.4 기기분석

각각의 조성비를 갖는 에폭시/탄소 복합재료에 대해서 두께 2.5 mm의 시험편을 제조한 후 인장시험 및 굴곡시험을 행하였다. 인장시험편은 JIS B7502에 의해 제작되었고, 만능 시험기(SHM-C-500, Shamhan Tech, 한국)을 사용하여 10 mm/min의 crosshead 속도로 측정하였다. 굴곡시험편은 JIS B7507에 의해 70×10×2.5 mm 크기의 시험편을 제작하였고, 3점 굴곡 시험법에 의해 굴곡강도를 측정하였다. 이 시험도 인장시험에서 사용한 것과 같은 만능 시험기를 사용하여 측정하였고, crosshead 속도는 10 mm/min이었다. 두 시험의 측정온도는 23°C이고, 상대습도는 50%이었다. 인장 강도 및 굴곡강도는 10개의 시험편에 대해 측정된 값에서 최대값과 최소값을 제외한 8개 시험편에 대한 평균값과 표준편차로부터 구하였다.

전기전도도는 Keithley Multimeter (2000 Model, USA)를 사용하여 측정하였다.

탄소섬유 필라멘트 또는 흑연섬유와 에폭시 수지의 결합상태를 관찰하기 위해서 인장시험 파단면을 전계 방사형 주사 전자현미경 (FE-SEM, JMS-6701F, JEOL)을 사용하여 관찰하였다. 이때 가속 전압은 15 kV이었다.

3. 결과 및 고찰

이관능형 에폭시/사관능형 에폭시/경화제/촉매 계에서 이관능형 에폭시와 사관능형 에폭시의 혼합비에 따른 경화반응 온도 조건을 찾기 위해서 DSC 분석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이관능형 에폭시와 사관능형 에폭시의 혼합 중량비는 (a) 10 : 0, (b) 9 : 1, (c) 8 : 2이다. 이관능형 에폭시와 사관능형 에폭시의 혼합 중량비가 10 : 0인 (a) thermogram에서

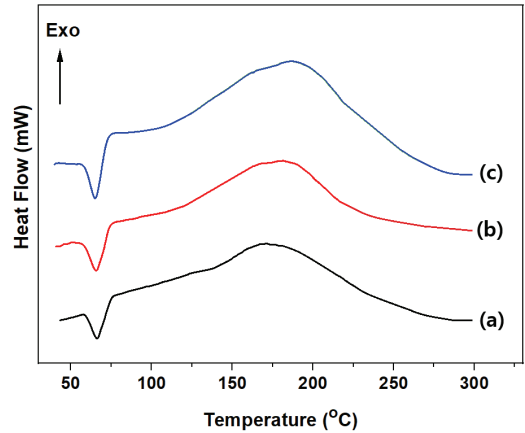


Fig. 2. DSC thermograms for difunctional epoxy (10, 9, 8 g)/tetrafunctional epoxy (0, 1, 2 g)/curing agent (13 g)/catalyst (0.1 g) at 10 °C/min

이관능형 에폭시가 용융되고 사관능형 에폭시가 연화되면서 흡열피크가 55~75°C 범위에서 나타나며, 그 이후에는 에폭시의 경화반응이 느리게 진행되면서 발열 피크가 서서히 증가한다. 그러다가 경화제의 연화점 부근인 110°C 정도부터 발열 피크는 빠르게 증가하여 171.6°C에서 피크점에 다다르고, 그 이후로는 발열량이 감소하였다. 이관능형 에폭시와 사관능형 에폭시의 혼합 중량비가 9 : 1 및 8 : 2인 (b)와 (c)의 thermogram도 유사한 경향을 나타내었다. 다만, 사관능형 에폭시 함량이 증가함에 따라 경화 피크의 온도가 10~17°C 정도 고온에서 나타났다. 이

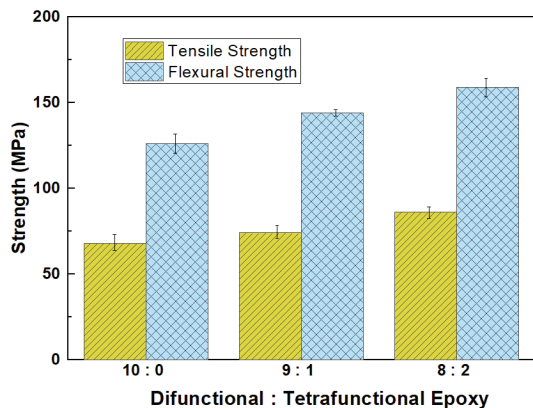


Fig. 3. Tensil and Flexural strength for difunctional epoxy (10, 9, 8 g)/tetrafunctional epoxy (0, 1, 2 g)/curing agent (13 g) /catalyst (0.1 g)

상으로부터 본 에폭시 계들의 경화반응 온도 및 시간은 120°C에서 2시간 경화반응 후 피크 온도 부근의 180°C에서 3시간 동안 후경화를 시키는 것이 적절한 것으로 판단하며, 이후 에폭시/탄소 복합재료 시편을 제조할 때 이 조건에서 경화시켰다.

Fig. 3은 이관능형 에폭시/사관능형 에폭시의 혼합비에 따른 인장강도 및 굴곡강도를 나타내고 있다. 사관능 에폭시를 도입하며 기대한 바와 같이 사관능 에폭시 함량이 증가함에 따라 기계적 강도가 증가하였다. 이는 사관능 에폭시 도입에 의해 가교밀도가 증가하기 때문으로 판단된다. 이후로는 에폭시/탄소 복합재료의 매트릭스로 이관능 에폭시 : 사관능 에폭시의 혼합비 = 8 : 2로 고정하여 제조하였다.

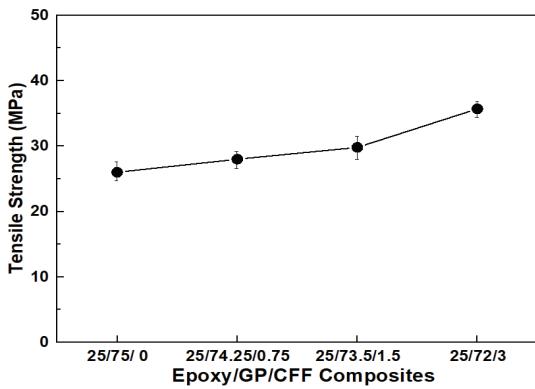


Fig. 4. Effect of GP/CFF content on the tensile strength of E₂₅-GP_b-CFF_c composite, where difunctional epoxy : tetrafunctional epoxy = 8 : 2 and b+c=75

Fig. 4와 5는 에폭시/탄소 복합재료의 인장강도 및 굴곡강도에 미치는 흑연분말(GP)/탄소섬유(CFF)의 영향을 나타내었다. Fig. 4에서 E₂₅-GP₇₅-CFF₀ 계의 인장강도는 26.2 MPa이고, CFF 함량이 증가함에 따라 인장강도가 증가하였다. CFF가 3 wt% 첨가된 E₂₅-GP₇₂-CFF₃ 계는 36% 증가된 35.7 MPa를 나타내었다.

에폭시/탄소 복합재료 계의 굴곡강도도 Fig. 5에서와 같이 CFF 함량이 증가함에 따라 크게 증가하였다. E₂₅-GP₇₅-CFF₀ 계의 굴곡강도는 58.1 MPa이고, E₂₅-GP₇₂-CFF₃ 계의 굴곡강도는 77.2 MPa로 33% 증가된 값을 보였다.

Fig. 6은 에폭시/탄소 복합재료의 전기전도도에 미

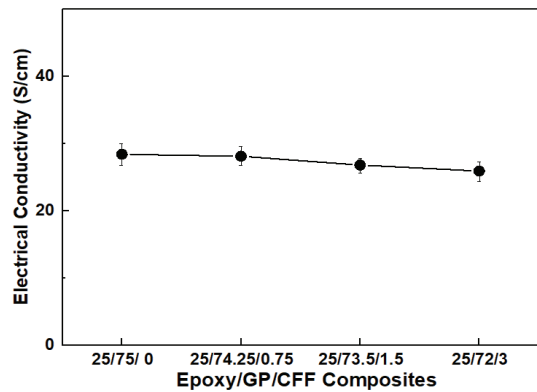


Fig. 6. Effect of GP/CFF content on the electrical conductivity of E₂₅-GP_b-CFF_c composite, where difunctional epoxy : tetrafunctional epoxy = 8 : 2 and b+c=75

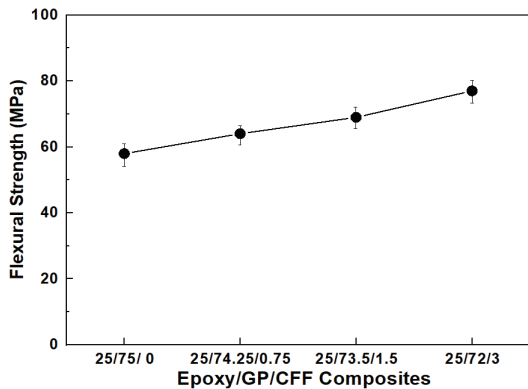


Fig. 5. Effect of GP/CFF content on the flexural strength of E₂₅-GP_b-CFF_c composite, where difunctional epoxy : tetrafunctional epoxy = 8 : 2 and b+c=75

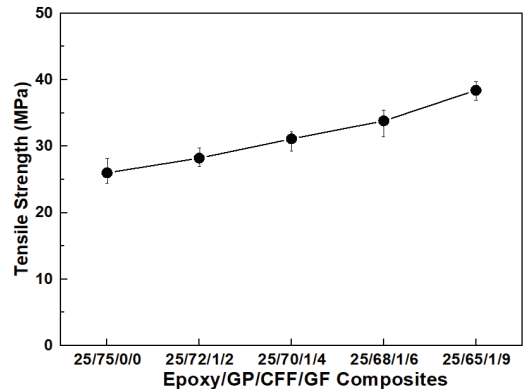


Fig. 7. Effect of GP/CFF/GF content on the tensile strength of E₂₅-GP_b-CFF_c-GF_d composite, where difunctional epoxy : tetrafunctional epoxy = 8 : 2 and b+c+d=75

치는 GP/CFF 함량의 영향을 나타내었다. 에폭시/GP 계의 전기 전도도는 28.4 S/cm이고, CFF 함량이 증가함에 따라 약간 감소하였다. CFF가 3 wt% 첨가된 계는 25.9 S/cm으로 8.8% 감소된 값을 나타내었다. 이는 CFF가 흑연 입자 간에 연결 통로가 되어 전자의 이동 통로로 작용할 것으로 예상했으나, 탄소섬유 중에 국부적으로 비결정성 영역이 존재하기 때문에 전도도가 낮아진 것으로 판단된다. 따라서 바이폴라 플레이트의 가장 중요한 충족 요소인 전기 전도도를 향상시키기 위해서는 결정화도가 높은 흑연섬유를 도입할 필요가 있다.

탄소재료의 총량은 75 wt%, 즉 GP+CFF+GF = 75 wt%로 하고, 그 중에서 탄소섬유, CFF = 1 wt%로 고정하고, 흑연섬유, GF 증가분만큼 흑연입자, GP를 감소시켰다. Fig. 7은 GF 증가에 따른 인장강도 변화를 나타내고 있으며, GP가 감소하고 GF가 증가함에 따라 인장강도가 증가하였다. E₂₅-GP₇₅-CFF₀-GF₀ 계의 인장강도는 26.2 MPa이고, GF가 9 wt%인 E₂₅-GP₆₅-CFF₁-GF₉ 계의 인장강도는 계는 46% 증가된 38.4 MPa를 나타내었다. 이는 CFF 및 GF가 에폭시 복합재료 내에서 강한 계면 결합력을 발휘하면서 기계적 특성을 강화시키기 때문이다.

CFF 및 GF와 같은 섬유상 재료가 에폭시 수지 계의 기계적 강도를 증가시키는 현상을 관찰하기 위해서 인장 시편 파단면에 노출된 CFF 및 GF 표면을 FE-SEM으로 관찰하여 Fig. 8에 나타내었다. CFF 및 GF가 도입되지 않은 계에 대한 SEM 관찰 결과를 Fig. 8(a)에 나타내었고, 흑연입자들이 균일하게 분산되어 있으며 거시적으로 입자들이 서로 연결되어 있는 것을 볼 수 있다. 그리고, CFF가 1 wt%, GF가 6 wt% 도입된 계에서 CFF 및 GF의 분산 상태를 확인하기 위해 Fig. 8(b)에서와 같이 저배율로 파단면을 관찰하였고, 도입된 CFF 및 GF가 전체적으로 균일하게 분산되어 있고, 이것들이 에폭시 매트릭스로부터 빠져나온 것들을 볼 수 있다. 에폭시와 CFF 또는 GF 사이의 계면 강도를 평가하기 위해서 에폭시 매트릭스로부터 빠져나온 CFF 및 GF 표면을 고배율로 관찰하였고, 그 사진을 Fig. 8(c)에 나타내었다. 사

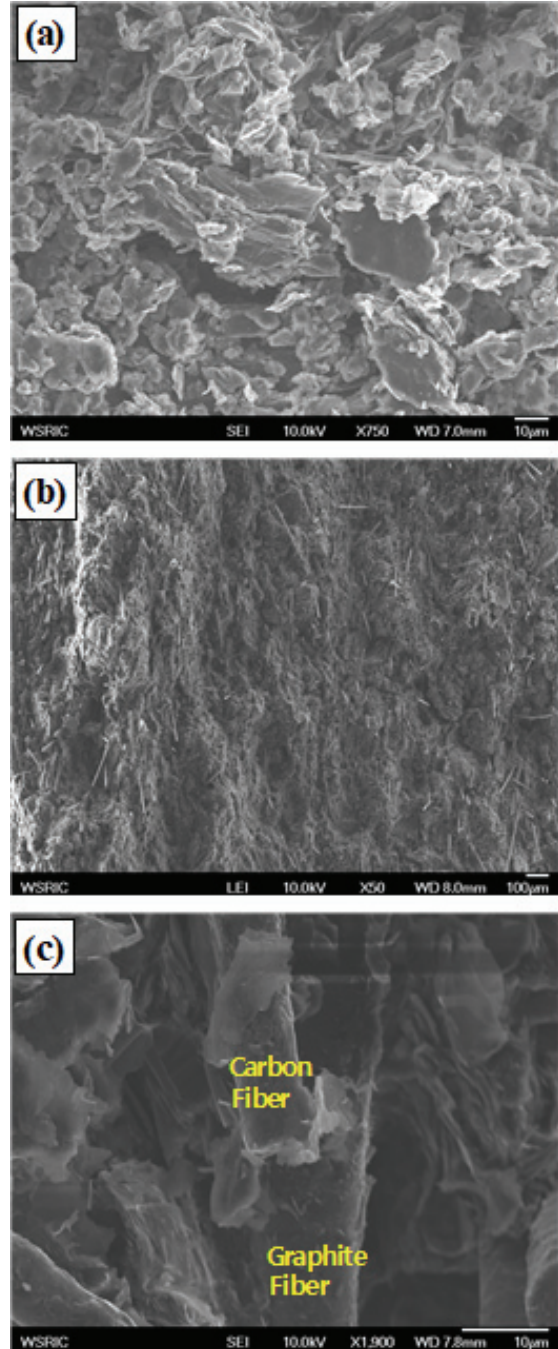


Fig. 8. SEM photos for (a) fractured surface of E₂₅-GP₇₅ and (b) CFF and GF surface from the fractured surface in E₂₅-GP₆₈-CF₁-GF₆. (c) shows the pulled-out CFF and GF surface in (b)

진에서 보듯이 CFF 및 GF 표면에 에폭시 수지 파편들이 부착되어 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 CFF

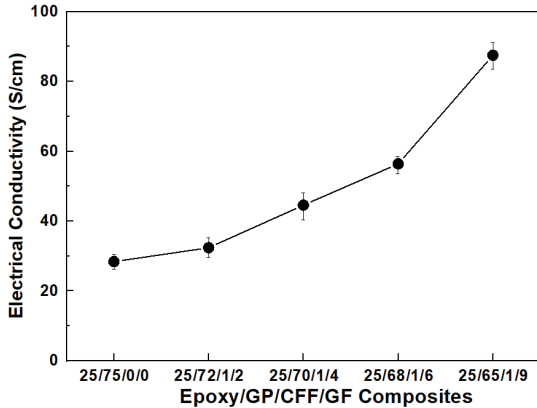


Fig. 9. Effect of GP/CFF/GF content on the electrical conductivity of $E_{25}\text{-GP}_b\text{-CFF}_c\text{-GF}_d$ composite, where difunctional epoxy : tetrafunctional epoxy = 8 : 2 and $b+c+d=75$

및 GF와 에폭시 사이에 강한 결합력이 작용하기 때문에 파단에 의해서 CFF 및 GF가 에폭시 매트릭스로부터 빠져 나올 때 다량의 에폭시가 부착된 상태로 빠져나오기 때문이다. 즉, 에폭시 매트릭스와 섬유상 보강재 사이의 강한 파괴에너지는 debonding energy, post debond friction energy 그리고 pull-out energy 메커니즘으로 설명할 수 있다²³⁻²⁵. 섬유가 매트릭스 내에서 절단되는 과정에서 소비되는 에너지를 debonding energy라 하고, 절단된 섬유 주변에서 섬유와 고분자 매트릭스의 계면이 분리되면서 소비되는 post debond friction energy, 그리고 섬유가 고분자 매트릭스로부터 빠져나오는 과정에서 소비되는 pull-out energy를 구성되어 있다는 것이다. 따라서 섬유상 표면에 고분자 매트릭스가 다량 부착되어 있다는 것은 그것들 사이의 계면 강도가 크기 때문에 post debond friction energy가 높게 작용하므로 기계적 강도가 증가하게 되는 것이다.

에폭시/탄소 복합재료 바이폴라 플레이트의 전기 전도도에 미치는 GF 함량의 영향을 Fig. 9에 나타내었으며, GF 함량이 증가하면 전기 전도도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. GF 함량이 가장 높은 $E_{25}\text{-GP}_{65}\text{-CF}_1\text{-GF}_9$ 계의 전기 전도도는 87.5 S/cm로서 GF가 첨가되지 않은 $E_{25}\text{-GP}_{75}\text{-CF}_0\text{-GF}_0$ 계의 전기 전도도, 28.4 S/cm보다 3.08배 향상된 값을 나타내었다.

4. 결론

PEMFC용 바이폴라 플레이트의 기계적 성질을 개량하기 위해 비스페놀-F 타입 이관능성 에폭시 수지에 사관능형 에폭시 수지를 도입하였고, 페놀 노블락 수지를 경화제로 사용하였다. 그리고, 탄소 재료로는 흑연 분말 (GP), 탄소섬유 필라멘트 (CFF) 및 흑연섬유 (GF)를 사용하였다. 경화반응 온도 및 시간은 120°C에서 2시간 경화반응 후 피크 온도 부근의 180°C에서 3시간 동안 후경화를 시키는 것이 적절한 것으로 평가되었으며, 이관능 에폭시 : 사관능 에폭시의 혼합비 = 8 : 2인 경우에 인장강도 및 굴곡강도가 최대값을 나타내었다. 에폭시/GP/CFF 계에서 CFF 함량이 증가함에 따라 인장강도 및 굴곡강도가 크게 증가하였고, CFF가 첨가되지 않은 $E_{25}\text{-GP}_{75}\text{-CFF}_0$ 계의 인장강도 및 굴곡강도는 각각 26.2 MPa 및 58.1 MPa이고, CFF가 3 wt% 첨가된 $E_{25}\text{-GP}_{72}\text{-CFF}_3$ 계의 두 값은 36%와 33% 증가된 35.7 MPa 및 77.2 MPa 이었다. 그렇지만 CFF 도입만으로는 전기 전도도에 악영향을 미치기 때문에 흑연섬유를 도입할 필요가 있으며, 에폭시/GP/CFF/GF 계에서 GF 함량이 증가함에 따라 전기 전도도가 증가하는 것을 확인하였다. GF가 가장 많이 첨가된 $E_{25}\text{-GP}_{65}\text{-CF}_1\text{-GF}_9$ 계의 전기 전도도는 87.5 S/cm로서 GF가 첨가되지 않은 $E_{25}\text{-GP}_{75}\text{-CF}_0\text{-GF}_0$ 계의 전기 전도도, 28.4 S/cm보다 3.08배 향상된 값을 나타내었다.

후 기

이 논문은 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0018390, 2025년 전주기적 산업혁신지원사업(Net-Zero 산업혁신기반구축)).

References

1. F. Van Der Linden, E. Pahon, S. Morando, and D. Bouquain, "A review on the proton-exchange membrane fuel cell break-in physical principles, activation procedures, and

- characterization methods”, *Journal of Power Sources*, Vol. 575, 2023, pp. 233168, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233168>.
2. Y. Zhao, M. Luo, J. Yang, B. Chen, P. C. Sui, and W. Zhou, “Experimental study of PEMFC stack performance degradation considering the shutdown and rest processes”, *International Journal of Energy Research*, Vol. 2025, No. 1, 2025, pp. 3246950, doi: <https://doi.org/10.1155/er/3246950>.
 3. S. K. Ryu, M. Vinothkannan, A. R. Kim, and D. J. Yoo, “Effect of type and stoichiometry of fuels on performance of polybenzimidazole-based proton exchange membrane fuel cells operating at the temperature range of 120-160°C”, *Energy*, Vol. 238, 2022, pp. 121791, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121791>.
 4. D. J. Yoo, S. H. Hyun, A. R. Kim, G. G. Kumar, and K. S. Nahm, “Novel sulfonated poly(arylene biphenylsulfone ether) copolymers containing bisphenylsulfonyl biphenyl moiety: structural, thermal, electrochemical and morphological characteristics”, *Polymer International*, Vol. 60, No. 1, 2010, pp. 85-92, doi: <https://doi.org/10.1002/pi.2914>.
 5. S. Tzelepis, K. A. Kavadias, G. E. Marnellos, and G. Xydis, “A review study on proton exchange membrane fuel cell electrochemical performance focusing on anode and cathode catalyst layer modelling at macroscopic level”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 151, 2021, pp. 111543, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111543>.
 6. E. F. Hidayat, Juliandri, S. M. Zain, and A. R. Noviyanti, “Advances in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) materials: a review of developments from 2021 to 2025”, *Journal of Power Sources*, Vol. 657, 2025, pp. 238124, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238124>.
 7. C. Mathew, A. Bobby, P. R. Varghese, S. N. Mohamed, and D. L. Singaravelu, “Effect of multi-walled carbon nanotubes on the properties of composite bipolar plate for polymer electrolyte membrane fuel cells”, *Engineering Research Express*, Vol. 7, No. 1, 2025, pp. 015552, doi: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adb372>.
 8. J. Guo, X. Li, Z. Ouyang, and Z. Shao, “A comprehensive review of metallic bipolar plates in PEMFCs of surface engineering and new materials development”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 137, 2025, pp. 553-574, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.093>.
 9. M. Sarker, J. M. Mora, F. Mojica, A. C. Yang-Neyerlin, B. Pivovar, D. S. Hussey, D. L. Jacobson, J. M. LaManna, and P. Y. A. Chuang, “Sensitivity study of operating conditions and liquid water transport behavior in an anion exchange membrane fuel cell aided by modeling and neutron radiography”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 333, 2025, pp. 119750, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119750>.
 10. B. Cunningham and D. G. Baird, “The development of economical bipolar plates for fuel cells”, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 16, No. 45, 2006, pp. 4385-4388, doi: <https://doi.org/10.1039/B611883F>.
 11. A. Tang, L. Crisci, L. Bonville, and J. Jankovic, “An overview of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells”, *Journal of Renewable Sustainable Energy*, Vol. 13, No. 2, 2021, pp. 022701, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0031447>.
 12. L. Wenkai, X. Zhiyong, and Z. Haodong, “Current status of research on composite bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): nanofillers and structure optimization”, *RSC Advances*, Vol. 14, No. 10, 2024, pp. 7172-7194, doi: <https://doi.org/10.1039/D3RA08054D>.
 13. V. Modanloo, H. Talebi-Ghadikolaee, V. Alimirzaloo, and M. Elyasi, “Fracture prediction in the stamping of titanium bipolar plate for PEM fuel cells”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 7, 2021, pp. 5729-5739, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.088>.
 14. M. W. Akhtar, Y. S. Lee, D. J. Yoo, and J. S. Kim, “Alumina-graphene hybrid filled epoxy composite: Quantitative validation and enhanced thermal conductivity”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 131, 2017, pp. 184-195, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.067>.
 15. A. R. Kim, M. Vinothkannan, S. Ramakrishnan, B. H. Park, M. K. Han, and D. J. Yoo, “Enhanced electrochemical performance and long-term durability of composite membranes through a binary interface with sulfonated unzipped graphite nanofibers for polymer electrolyte fuel cells operating under low relative humidity”, *Applied Surface Science*, Vol. 593, 2022, pp. 153407, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153407>.
 16. X. Wang, S. Wei, Y. Wu, H. Cai, Z. Qu, and P. He, “Achieving high electrochemical performance of PEMFCs with ultrathin and highly conductive graphite-resin composite bipolar plates”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 55, 2024, pp. 654-664, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.190>.
 17. F. B. Weng, M. M. Dlamini, and C. H. Chen, “Review on proton exchange membrane fuel cell’s metallic bipolar plate fabrication challenges”, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 17, No. 5, 2022, pp. 22052, doi: <https://doi.org/10.20964/2022.05.53>.
 18. T. Bohackova, J. Ludvik, and M. Kouril, “Metallic material selection and prospective surface treatments for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates - a review”, *Materials*, Vol. 14, No. 10, 2021, pp. 2682, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14102682>.
 19. B. D. Cunningham, J. Huang, and D. G. Baird, “Development of bipolar plates for fuel cells from graphite filled wet-lay material and a thermoplastic laminate skin layer”, *Journal of Power Sources*, Vol. 165, No. 2, 2007, pp. 764-773, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.035>.
 20. J. Y. Lee and H. K. Lee, “Thermal curing and electrical properties

- of epoxy/graphite/expanded graphite composite for bipolar plate of PEMFC”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 22, No. 6, 2011, pp. 827-834.
21. S. Shojaei, E. Rostami-Tapeh-Esmaeil, and F. Mighri, “A review on key factors influencing the electrical conductivity of proton exchange membrane fuel cell composite bipolar plates”, Polymers for Advanced Technologies, Vol. 35, No. 2, 2024, pp. e6301, doi: <https://doi.org/10.1002/pat.6301>.
 22. E. Planes, L. Flandin, and N. Alberola, “Polymer composites bipolar plates for PEMFCs”, Energy Procedia, Vol. 20, 2012, pp. 311-323, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.031>.
 23. J. Y. Lee, M. J. Shim, and S. W. Kim, “DGEBAs-MDA-SN-Hydroxyl group system and composites: 2. fracture energy of fiber reinforced composites”, Journal of Korean Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 5, No. 4, 1994, pp. 737-742.
 24. P. W. R. Beaumont and P. D. Anstice, “A failure analysis of the micromechanisms of fracture of carbon fibre and glass fibre composites in monotonic loading”, Journal of Materials Science, Vol. 15, No. 10, 1980, pp. 2619-2635, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00550768>.
 25. J. Lee, W. Lee, H. Rim, G. Joung, and H. Lee, “Effect of carbon fiber filament and graphite fiber on the mechanical properties and electrical conductivity of elastic carbon composite bipolar plate for PEMFC”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 25, No. 2, 2014, pp. 131-138, doi: <http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.2.131>.