

## 표면처리 탄소섬유가 PEMFC용 탄소/에폭시 복합재료 분리판의 기계적 강도에 미치는 영향

이흥기<sup>1,2†</sup> · 한경식<sup>3</sup>

<sup>1</sup>우석대학교 수소연료전지 부품 및 응용기술 지역혁신센터, <sup>2</sup>우석대학교 에너지전기공학과, <sup>3</sup>우석대학교 생명과학과

### Effect of Surface-Modified Carbon Fiber on the Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composite for Bipolar Plate of PEMFC

HONGKI LEE<sup>1,2†</sup>, KYEONGSIK HAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hydrogen Fuel Cell Parts and Applied Technology RIC, Woosuk University, 151 Dunsan1-ro, Bongdong-eup, Wanju 55315, Korea

<sup>2</sup>Department of Electricity and Electrical Engineering, Woosuk University, 443 Samnye-ro, Samnye-eup, Wanju 55338, Korea

<sup>3</sup>Department of Life Science, Woosuk University, 443 Samnye-ro, Samnye-eup, Wanju 55338, Korea

†Corresponding author :  
hongkil@woosuk.ac.kr

Received 23 December, 2019

Revised 4 February, 2020

Accepted 28 February, 2020

**Abstract >>** Epoxy/carbon composite was used to prepare a bipolar plate for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC). Phenol novolac-type epoxy and diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)-type epoxy mixture was used as a matrix and graphite powder, carbon fiber (CF) and graphite fiber (GF) were used as carbon materials. In order to improve the mechanical properties of the bipolar plate, surface-modified CF was incorporated into the epoxy/carbon composite. To determine the cure temperature of the epoxy mixture, differential scanning calorimetry (DSC) analysis was performed and the data were introduced to Kissinger equation in order to get reaction activation energy and pre-exponential factor. Tensile and flexural strength was obtained by using universal testing machine (UTM). The surface morphology of the fractured specimen and the interfacial morphology between epoxy matrix and CF or GF were observed by a scanning electron microscopy (SEM).

**Key words :** Bipolar plate(분리판), PEMFC(고분자 전해질막 연료전지), Graphite fiber(흑연섬유), Carbon fiber(탄소섬유), Epoxy resin(에폭시 수지), Mechanical property(기계적 강도), Electrical conductivity(전기전도도)

## 1. 서론

최근 국내의 환경규제 강화와 에너지 효율 향상 요구로 인해 수송 분야의 전기혁명이 자동차 산업을

선두로 급속히 진행되고 있다. 그러나 배터리를 자동차 동력원으로 사용하는 경우, 오랜 충전시간 대비 짧은 운행시간의 제한으로 인해 사용 시간 극대화 기술이 새로운 쟁점으로 부각되고 있으며, 이와 같은

문제들을 해결하기 위해 연료전지 단독 또는 연료전지/배터리 하이브리드 형태의 동력원에 대한 연구가 진행되고 있다. 고분자 전해질막 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)의 장점은 전류 밀도가 높고, 운전 온도가 낮으며, 연료 공급이 편리하고, 수명이 길다는 점이다. 따라서 자동차용 및 건물용으로 적용할 수 있는 가장 확실한 에너지원으로 평가받고 있다.

PEMFC는 고분자 전해질막(PEM)과 Pt/C 촉매 전극 및 기체 확산층(GDL)을 일체화시킨 MEA와 분리판으로 구성되어 있다. 이 부품들을 제조하기 위해 사용하는 재료들은 고가이고 높은 기술력이 요구되기 때문에 많은 연구자들이 가격을 낮추면서 성능이 우수한 소재를 개발하기 위한 연구에 집중하고 있다<sup>1-5)</sup>. 수소 양이온(H<sup>+</sup>) 전도성을 갖는 고분자 전해질막은 높은 이온전도도, 낮은 기체투과도 및 기계적/열적 강도를 가져야 하며, 필름 형태로 가공이 쉽고 수전해 시스템 운전조건에서 견딜 수 있는 내구성을 가져야 한다. 상용화된 제품인 DuPont사(USA)의 Nafion은 0.1 S/cm의 이온 전도성을 가지고 약 250 MPa의 기계적 강도를 갖는다. 그렇지만 이 제품의 경우 높은 가격(500-600\$/m<sup>2</sup>)으로 인해 전체 스택의 제조비용이 크게 증가하는 요인이 된다<sup>6)</sup>. 따라서 Nafion을 대체할 수 있는 탄화수소계 고분자 전해질막 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 현재로서는 이것을 대체할 수 있을 정도의 성능을 발휘하는 소재가 개발되지 못하였다. 촉매 전극층은 수소의 산화 반응을 위한 음극 촉매층이 고분자 전해질막의 한쪽면에 형성되어 있고, 다른쪽 면에는 산소의 환원 반응을 위한 양극 촉매층이 부착되어 있다. 촉매로는 주로 백금 나노입자가 탄소재료 담체에 단독으로 담지되어 있거나 또는 조촉매가 소량 혼합된 형태로 사용되기도 한다. 촉매의 형상은 나노 크기의 입자(particle), 로드(rod) 또는 다공성(porous) 형태를 이루고 있으며, 다양한 합성법에 의해 제조가 가능하다<sup>7,8)</sup>. 그럼에도 불구하고 백금 촉매의 양을 최소화하기 위한 연구는 지속적으로 진행될 필요가 있다. 분리판 재료에는 금속, 흑연, 탄소 복합재 등이 있으며, 그중

금속 분리판은 부식 문제가 있으며, 흑연 분리판은 밀링기계 가공으로 제작하게 되어 대량 생산에 적합하지 않다. 따라서 부식 문제가 없으면서 대량 생산이 가능한 탄소 복합재 분리판에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 분리판은 가격 측면에서 연료전지 스택의 20% 정도를 차지하고, 중량 측면에서 70% 정도를 차지하는 큰 부품이다<sup>9-11)</sup>.

분리판은 연료 가스(수소 또는 산소)가 전극 촉매 표면에서 효율적으로 산화 또는 환원 반응하여 전기를 생산할 수 있도록 GDL을 통해 전극에 수소와 산소를 공급해주는 역할과 각각의 단위 셀에서 생산한 전기를 외부 회로에 전달해 주는 전류 집전체 역할 그리고 캐소드 측에서 생성된 물을 외부로 배출하는 역할을 수행한다. 또한 분리판은 MEA의 지지체 역할과 냉각 유로를 통한 발생 열의 방출 및 회수 역할도 담당 한다<sup>3,12-14)</sup>.

분리판 재료는 전기전도도가 높고, 부식 저항성이 탁월해야 하며, 단위중량당 우수한 출력 밀도를 가져야 한다. 또한 열전도도, 기계적 강도 및 가스 투과도 등도 뛰어나야 한다. 이와 같은 특성들을 충족시키는 재료로서 도전성 탄소 소재를 폴리머에 도입한 복합재료가 많이 연구되고 있다. 본 연구에서는 에폭시/탄소 복합재료의 기계적 강도를 개선하기 위해서 페놀 노블락 타입/diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) 타입 에폭시 수지 혼합물에 에폭시 실란 표면처리 탄소섬유를 도입하였고, 전기전도도를 향상시키기 위해서 흑연 분말과 흑연 섬유를 도입하여 그 영향들을 연구하였다.

## 2. 실험

### 2.1 재료

에폭시 수지는 고체상 페놀 노블락 타입 에폭시 수지와 고체상 DGEBA 타입 에폭시 수지를 혼합하여 사용하였다. 전자는 상품명 YSLV-80XY이며, 제조사는 일본의 Tohto Kasei Co., Ltd.이다. 전자의 에폭시 당량은 184-200 g/eq이고, 녹는점은 77-85℃

이며, 용융 점도는 150°C에서 0.1 Pa·s이다. 후자는 상품명 Araldite®B46 (Huntsman Advanced Materials Ltd., UK)이며, 이것의 에폭시 당량은 408-435 g/eq이고, 녹는점은 35-50°C이며, 120°C에서의 점도는 650-850 mPa·s이다. 경화제는 페놀 노블락 타입으로 강남화성(Seoul, Korea)의 KPN2110 제품을 사용하였다. 수산기 당량은 104 g/eq이고, 연화점은 105°C였다. 그리고 촉매는 triphenyl phosphine, TPP (Sigma Aldrich)를 사용하였다. 분말상 흑연은 탄소 함량이 99.98%이고 평균 입경이 5.5-7.5 μm인 TIMCAL사 (Bodio, Switzerland)의 TIMREX SFG6L 제품을 사용하였다. 탄소섬유는 Toray사(Japan)의 unsized T300을 1 cm 길이로 잘라서 사용하였고, 그 필라멘트 지름은 7 μm였다. 인장강도는 3,530 MPa이고, 에폭시 실란으로 표면처리하여 사용하였다<sup>15)</sup>. 절단된 탄소 섬유를 질산 수용액으로 전처리 한 후 아세톤에 넣고 끓여서 표면의 불순물을 제거한다. 그리고 에폭시 실란/에탄올 중에 넣어서 사이징 처리한 후 건조시켜서 사용한다. 흑연 섬유는 Kureha Chemical사(Tokyo, Japan)의 KGF-200을 사용하였고, 그 길이가 3 mm이고, 지름이 14.5 μm였다. 인장강도는 800 MPa이고, 전기 저항은 50 μΩ·m이다.

## 2.2 가열 압축성형에 의한 시편 제조

에폭시/흑연 분말/흑연 섬유/표면처리 탄소섬유 복합재료의 가열 압축 성형 절차는 다음과 같다. 먼저, 에폭시 수지 매트릭스의 경화 반응 조건을 연구하기 위해서 시차 주사 열량계(DSC Infinity, Instrument Specialists Inc., Wisconsin, USA)을 사용하여 다양한 승온속도 조건에서 분석을 수행하였다. 페놀 노블락 타입 에폭시 수지(8.0 g)와 DGEBA 타입 에폭시 수지(2.0 g)를 당량비의 경화제(12.4 g)와 혼합하고, 반응을 촉진하기 위해서 촉매(0.1 g)를 혼합 믹서를 사용하여 분말 상으로 균일하게 혼합하였다. 경화 반응 속도론을 연구하기 위해서 DSC용 알루미늄 팬에 에폭시 혼합물 10-11 mg을 넣고 밀봉한 후 DSC 셀에 넣고, 실온에서 300°C까지 5, 10, 15 또는 20°C/min

의 승온조건으로 각각 경화 반응 발열량을 측정하였고, 그 결과를 아래의 Kissinger equation<sup>16)</sup>에 대입하여 경화 반응 활성화 에너지 및 pre-exponential factor 값을 구하였다.

$$-\ln(q/Tp^2) = Ea/RTp - \ln(AR/Ea) \quad (1)$$

여기서 q: 승온속도, Tp: 발열피크가 나타나는 온도, Ea: 경화 반응 활성화 에너지, A: pre-exponential factor 그리고 R: 기체상수, 8.314 J/mol·K이다.

에폭시/흑연 분말/흑연 섬유/표면처리 탄소섬유 복합재료의 기계적 성질을 분석하기 위해 에폭시 매트릭스 25 wt%, 흑연 입자 65-70 wt%, 흑연 섬유 1-5 wt% 그리고 표면처리 탄소섬유를 1-5 wt% 등을 변화시키면서 혼합 믹서를 사용하여 혼합하였다. 에폭시/탄소 복합재료의 혼합비는 E<sub>a</sub>-GP<sub>b</sub>-CF<sub>c</sub>-GF<sub>d</sub>으로 표시하였고, 여기서 E는 에폭시 매트릭스, GP는 흑연입자(graphite powder), CF는 탄소섬유(carbon fiber) 그리고 GF는 흑연섬유(graphite fiber)를 의미하며, 아래 첨자 a, b, c, d는 각 성분의 중량 조성비를 나타낸다.

## 2.3 기기분석

인장 및 굴곡 시험을 위해서 에폭시/탄소 복합재료 혼합물을 125°C에서 2시간 경화 반응 후 180°C에서 3시간 동안 후경화시켜서 두께 2.5 mm의 시편을 제조하였다. 인장시편은 JIS B7502 규격에 따른 몰드에서 제작되었고, 인장강도는 만능 시험기(SHM-C-500, Shamhan Tech, Bucheon, Korea)를 사용하여 10 mm/min의 crosshead speed로 측정되었다. 굴곡시편은 JIS B7507 규격에 따른 몰드에서 70×10×2.5 mm<sup>3</sup> 크기로 제작되었고, 인장강도에서와 동일한 만능시험기를 사용하여 3점 굴곡시험법에 의해 굴곡강도를 측정하였다. 이 경우에도 crosshead speed는 10 mm/min였다. 인장 및 굴곡시험 측정 분위기는 23°C, 50 RH%였다.

파괴가 진행된 인장 시편의 파단면 모폴로지 및 탄소 섬유 또는 흑연 섬유와 에폭시 수지의 계면 결

합 상태를 관찰하기 위해서 전계 방사형 주사 전자 현미경(FE-SEM, JMS-6701F, JEOL, Tokyo, Japan)을 사용하였다. 이때 가속 전압은 10 kV였다.

탄소/에폭시 복합재료 분리판의 전기전도도는 Keithley 2000 conductivity meter (Tektronix, Inc., Beaverton, USA)를 사용하여 4-point probe method를 사용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 승온속도를 변화시키면서 구한 페놀 노블락 타입 에폭시 수지(8.0 g)/DGEBA 타입 에폭시 수지(2.0 g)/경화제(12.4 g)/TPP (0.1 g) 계의 DSC 열량분석 결과이다. 5°C/min의 승온속도에서 구한 DSC 곡선으로부터 57-75°C 범위에서 흡열피크가 나타나고, 그 이후로 발열 곡선이 서서히 증가하며, 183.12°C에서 피크가 나타나고, 그 이후로는 발열량이 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다. 처음의 흡열 피크는 DGEBA 타입 에폭시 및 페놀 노블락 타입 에폭시가 녹으면서 열을 흡수하기 때문에 발생하며, 발열곡선은 에폭시 기와 경화제의 화학 반응에 기인하는 것으로 판단된다. 이것으로부터 본 에폭시 계의 경화 반응 온도 및 시간은 120°C에서 3시간 경화 반응 후 연속적

으로 180°C에서 3시간 동안 후경화를 시키는 것이 적절하다는 것을 알 수 있었다. 탄소 재료는 에폭시 수지의 경화 반응 메커니즘에는 거의 영향을 미치지 않기 때문에 이 조건에 따라 에폭시/탄소 복합재료를 경화시켜서 분리판을 가열 압축 성형하였다.

승온속도에 따른 DSC 곡선들을 살펴보면 승온속도가 증가함에 따라 흡열피크 및 발열 피크에서의 온도가 증가하는 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이것은 승온속도가 증가할수록 더 짧은 시간 동안에 주위 온도가 더 빨리 증가하기 때문에 에폭시 수지의 녹음 현상 또는 경화 반응이 더 빨리 진행되기 때문이다. 각각의 승온속도 조건에서 구한 발열피크 온도를 구하여 Table 1에 나타내었고, Kissinger equation에 대입하기 위해서  $-\ln(q/T_p^2)$  항과  $1/T_p$  항을 구하여 Table 1에 같이 나타내었다. 경화 반응 활성화 에너지 및 pre-exponential factor와 이 두 항의 직선의 관계식을 구하기 위해서 Fig. 2에서와 같이 least square fitting법을 사용하여 식(2)와 같은 직선의 관계식을 구하였다.

$$-\ln(q/T_p^2) = 9.82 \times 103/T_p - 10.94 \quad (2)$$

이 직선의 기울기로부터 경화 반응 활성화 에너지,  $E_a$ 를 구할 수 있고, y-절편으로부터 pre-exponential factor,  $A$ 를 구할 수 있으며, 이 값들은 각각 81.64 kJ/mol과  $9.22 \times 10^6 \text{ min}^{-1}$ 이었다.

Fig. 3과 4는 에폭시/탄소 복합재료의 인장강도에 미치는 에폭시 실란 표면처리 탄소섬유의 영향을 나타내었다. Fig. 3에서  $E_{25}\text{-GP}_{75}\text{-CF}_0$  계의 인장강도는 24.8 MPa이고, 미처리 CF 함량이 증가함에 따라 인장강도가 크게 증가하였다. 미처리 CF가 3 wt% 첨

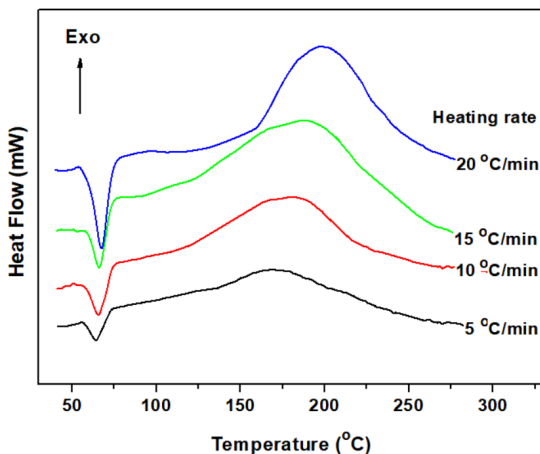


Fig. 1. DSC curves for phenol novolac-type epoxy (8.0 g)/DGEBA-type epoxy (2.0 g)/curing agent (12.4 g)/catalyst (0.1 g) system at various curves

Table 1. Cure kinetic parameters for Fig. 1

q (K/min)	$T_p$ (K)	$1/T_p \times 10^3$ (K <sup>-1</sup> )	$-\ln(q/T_p^2)$
5	456.27	2.19	10.64
10	468.18	2.14	10.00
15	475.32	2.10	9.62
20	485.57	2.06	9.37

가된 E<sub>25</sub>-GP<sub>72</sub>-CF<sub>3</sub> 계는 136% 증가된 값을 나타내었다. 표면처리 CF 함량이 증가하는 경우에도 Fig. 4에서 보는 바와 같이 인장강도가 크게 증가하였다. 표면처리 CF 함량이 3 wt%인 계의 값은 37.2 MPa로 에폭시/GP 계에 비해 150% 증가된 값을 나타내었다. 이 결과로부터 에폭시 실란 표면처리 탄소섬유가 에폭시/탄소 복합재료의 인장강도에 매우 좋은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

에폭시/탄소 복합재료의 굴곡강도에 미치는 에폭시 실란처리 CF 함량의 영향(Fig. 5)에 대해서도 평가하였으며, 인장강도에서와 마찬가지로 에폭시 실란처리 CF 함량이 증가함에 따라 굴곡강도가 크게 증

가하였다. E<sub>25</sub>-GP<sub>75</sub>-CF<sub>0</sub>-GF<sub>0</sub> 계의 굴곡강도는 52.7 MPa 이고, 표면처리 CF가 3 wt% 첨가된 계는 146% 증가된 값을 나타내었다. 이 결과들로부터 에폭시 실란 표면처리 CF가 에폭시 복합재료 내에서 강한 결합력을 발휘하면서 기계적 특성을 강화시킨다는 것을 알 수 있다.

에폭시와 CF 사이의 강한 결합력을 확인하기 위해서 인장 시편 파단면에 노출된 CF 표면을 FE-SEM으로 관찰하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 표면처리하지 않은 CF의 표면 사진으로, 에폭시 실란으로 표면처리하지 않은 경우에도 CF 표면의 많은 부분이 에폭시로 코팅되어 있는 것을 볼 수 있다. 그렇

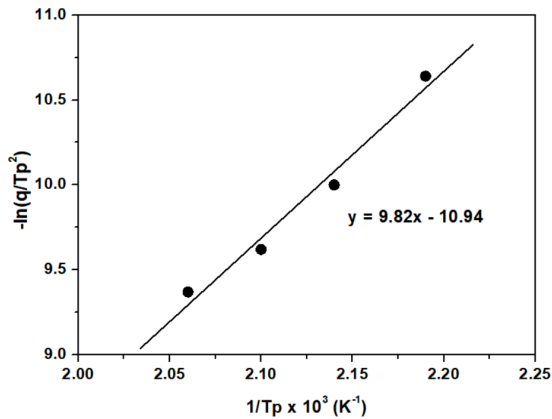


Fig. 2. Kissinger plot of 1/TP vs. -ln(q/TP<sup>2</sup>) for phenol novolac-type epoxy (8.0 g)/DGEBA-type epoxy (2.0 g)/curing agent (12.4 g)/catalyst (0.1 g) system

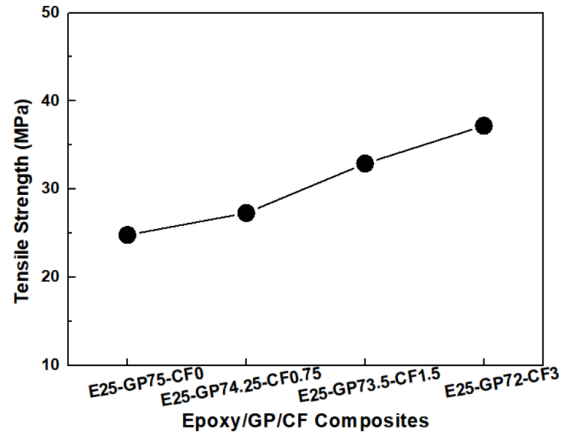


Fig. 4. Effect of epoxy silane-modified CF content on the tensile strength of E<sub>25</sub>-GP<sub>b</sub>-CF<sub>c</sub> composite, where b+c=75

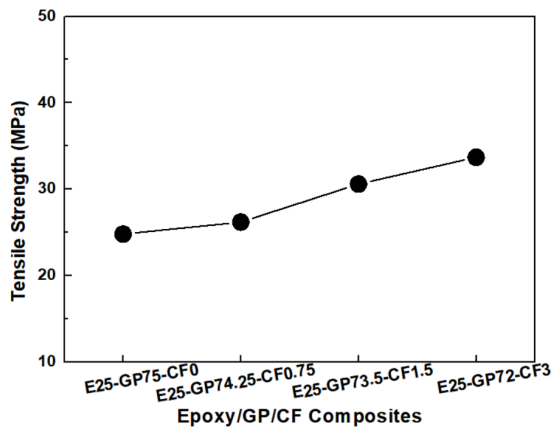


Fig. 3. Effect of unmodified CF content on the tensile strength of E<sub>25</sub>-GP<sub>b</sub>-CF<sub>c</sub> composite, where b+c=75

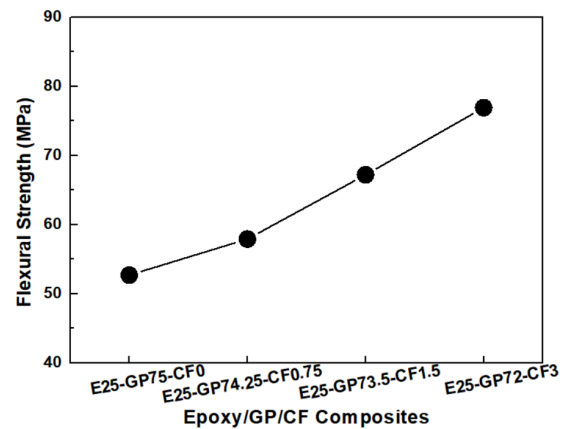


Fig. 5. Effect of epoxy silane-modified CF content on the flexural strength of E<sub>25</sub>-GP<sub>b</sub>-CF<sub>c</sub> composite, where b+c=75

지만 일부는 에폭시로 코팅되어 있지 않고, 특히 CF 표면에 그래파이트 입자가 전혀 부착되어 있지 않은 것을 볼 수 있다. 이에 반해 Fig. 6(b)에서와 같이 에폭시 실란으로 표면처리 된 CF 표면은 에폭시 수지로 완전히 코팅되어 있으며, 또한 그래파이트 입자들과도 강하게 부착되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 CF 표면에 존재하는 에폭시 기와 에폭시 매트릭스 사이의 경화제 사이에 화학결합이 일어나기 때문에 파단 과정에서 CF가 에폭시 매트릭스로부터 끌려나올 때 에폭시가 코팅된 상태로 빠져나오기 때문이다. 또한, CF 표면에 부착된 그래파이트가 깨지면서 작은 그래파이트 입자 형태가 CF 표면에 존재하게 되는 것이다. CF와 에폭시 매트릭스 사이의 강한 파괴에너지는 debonding energy, post debond friction energy 그리고 pull-out energy 메커니즘으로 설명할 수 있다<sup>17-19)</sup>.

CF가 도입되지 않은 계에 대한 FE-SEM 관찰 결과를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 관찰의 흑연 입자들이 균일하게 분산되어 있으며 거시적으로 볼 때에는 흑

연 입자들이 서로 연결되어 있는 것처럼 보이지만, Fig. 7(a)에서와 같이 미시적으로 살펴보면 흑연입자들 사이에 상당히 큰 공간들이 존재하는 것을 볼 수 있으며, 이 공간들로 인해서 분리판의 기계적 강도 및 전기전도도가 크게 감소하게 된다. 따라서 도전성 섬유를 도입함으로써 멀리 떨어져 있는 흑연 입자들

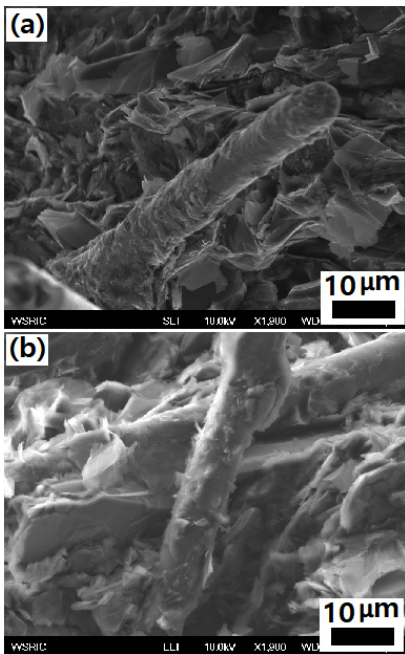


Fig. 6. SEM photos for the pulled-out CF surface from the fractured surface in E25-GP70-CF5 : (a) unmodified CF and (b) epoxy silane-modified CF

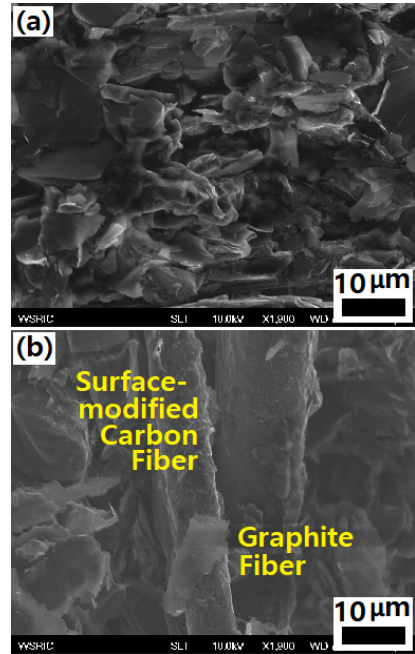


Fig. 7. SEM photos for (a) fractured surface of E25-GP75 and (b) epoxy silane-modified CF and GF surface from the fractured surface in E25-GP65-CF2-GF8

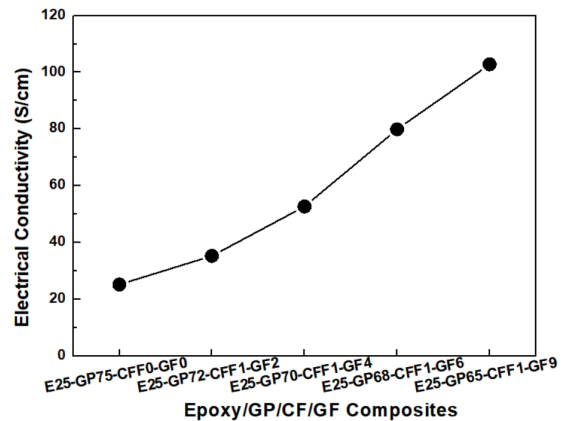


Fig. 8. Effect of GF content on the electrical conductivity of E25-GP<sub>b</sub>-CF<sub>1</sub>-GF<sub>d</sub> composite, where b+d=73

사이에 도전 통로를 연결해줄 필요가 있다. 그러나 이전 연구를 통해서 흑연 분말 함량을 줄이고 탄소 섬유 함량을 증가시킬 경우 오히려 전기전도도가 감소하는 것이 보고되었으며<sup>19)</sup>, 따라서 본 논문에서는 분리판의 기계적 강도를 증가시키기 위해서 CF를 도입하였고, 전기전도도를 증가시키기 위해서 전기전도도가 높은 흑연 섬유를 같이 도입하였다. Fig. 7(b)는 에폭시 매트릭스로부터 끌려나온 CF와 GF의 표면을 나타내는 SEM 사진이다. CF와 GF가 그래파이트 분말들 사이를 관통해서 존재하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 그래파이트 입자들 사이를 연결시켜주는 GF들은 멀리 떨어져 있는 그래파이트 입자 사이에 전자 이동 통로로 작용할 수 있기 때문에 에폭시/탄소 복합재료 분리판의 전기전도도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

에폭시/탄소 복합재료 분리판의 전기전도도에 미치는 GF 함량의 영향을 Fig. 8에 나타내었으며, GF 함량이 증가하면 전기전도도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. GF 함량이 가장 높은 E<sub>25</sub>-GP<sub>65</sub>-CF<sub>1</sub>-GF<sub>9</sub> 계의 전기전도도는 102.8 S/cm로서 GF가 첨가되지 않은 E<sub>25</sub>-GP<sub>75</sub>-CF<sub>0</sub>-GF<sub>0</sub> 계의 전기전도도, 25.2 S/cm보다 4.08배 향상된 값이다. E<sub>25</sub>-GP<sub>65</sub>-CF<sub>1</sub>-GF<sub>9</sub> 계의 인장강도와 굴곡강도는 각각 39.7 MPa와 78.2 MPa이고, 이 값들은 CF와 GF가 전혀 첨가되지 않은 E<sub>25</sub>-GP<sub>75</sub>-CF<sub>0</sub>-GF<sub>0</sub> 계의 값에 비해 각각 1.60배와 1.48배 향상된 값을 나타내었다. 이 값들은 미국 에너지성(DOE)의 전기전도도 목표값인 100 S/cm 이상과 굴곡강도 목표값인 25 MPa 이상을 충족하는 값이다<sup>20)</sup>.

## 4. 결론

PEMFC용 분리판 제작을 위해 페놀 노블락 타입 에폭시/DGEBA 타입 에폭시/탄소 복합재료 계가 사용되었다. 페놀 노블락 타입 에폭시 수지(8 g)/DGEBA 타입 에폭시 수지(2 g)/경화제(12.4 g)/촉매(0.1 g)계의 경화 반응 활성화 에너지는 81.64 kJ/mol이고, pre-exponential factor 값은  $9.22 \times 10^6 \text{ min}^{-1}$ 이었다. 에

폭시/GP/CF 계에서 에폭시 실란 표면처리 CF의 함량이 증가함에 따라 인장강도 및 굴곡강도가 크게 증가하였고, CF가 3 wt% 첨가된 E<sub>25</sub>-GP<sub>72</sub>-CF<sub>3</sub> 계의 이 값들이 각각 150% 및 146% 정도 증가하였다. 이것은 CF 표면의 에폭시기와 에폭시 매트릭스의 경화제 사이에 강한 화학결합으로 인해 파괴 에너지가 크게 증가하기 때문이다. 그렇지만 CF 자체만으로는 전기전도도에 악영향을 미치지 않기 때문에 그래파이트 섬유를 도입할 필요가 있으며, 에폭시/GP/CF/GF 계에서 GF 함량이 증가함에 따라 전기전도도가 증가하는 것을 확인하였다. GF가 가장 많이 첨가된 E<sub>25</sub>-GP<sub>65</sub>-CF<sub>1</sub>-GF<sub>9</sub> 계의 전기전도도는 102.8 S/cm이며, 이 값은 GF가 첨가되지 않은 E<sub>25</sub>-GP<sub>75</sub>-CF<sub>0</sub>-GF<sub>0</sub> 계의 전기전도도, 25.26 S/cm에 비해 4.08배 향상된 값이다. 이상의 결과로부터 E<sub>25</sub>-GP<sub>65</sub>-CF<sub>1</sub>-GF<sub>9</sub> 계가 미국 에너지성(DOE)의 전기전도도 및 굴곡강도를 충족한다는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 지역혁신센터사업(2019)으로 수행된 연구결과입니다.

## References

1. F. A. de Bruijn, V. A. T. Dam, and G. J. M. Janssen, "Review: durability and degradation issues of PEM fuel cell components", *Fuel Cells*, Vol. 8, No. 1, 2008, pp. 3, doi: <https://doi.org/10.1002/fuce.200700053>.
2. A. Garsuch, D. A. Stevens, R. J. Sanderson, S. Wang, R. T. Atanasoski, S. Hendricks, M. K. Debe, and J. R. Dahna, "Alternative catalyst supports deposited on nanostructured thin films for proton exchange membrane fuel cells", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 157, No. 2, 2010, pp. B187, doi: <https://doi.org/10.1149/1.3261855>.
3. S. R. Dhakate, R. B. Mathur, B. K. Kakati, and T. L. Dhani, "Properties of graphite-composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 17, 2007, pp. 4537-4543, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.02.017>.
4. A. R. Kim, C. J. Park, M. Vinothkannan, and D. J. Yoo, "Sulfonated poly ether sulfone/heteropoly acid composite

- membranes as electrolytes for the improved power generation of proton exchange membrane fuel cells”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 155, 2018, pp. 272-281, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.016>.
5. R. Arukula, M. Vinothkannan, A. R. Kim, and D. J. Yoo, “Cumulative effect of bimetallic alloy, conductive polymer and graphene toward electrooxidation of methanol: an efficient anode catalyst for direct methanol fuel cells”, *J. Alloys. Compd.*, Vol. 771, 2019, pp. 477-488, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.303>.
  6. K. Y. Ahn, C. N. Yang, and S. Lee, “A study on electrochemical characteristics of MEA with nafion ionomer content in catalyst layer for PEMFC”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 21, No. 6, 2010, pp. 540-546.
  7. C. He, S. Desai, G. Brown, and S. Bollepalli, “PEM fuel cell catalysts: cost, performance, and durability”, *Electrochem. Soc. Interface*, Vol. 14, No. 3, 2005, pp. 41-44. Retrieved from [https://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal05/IF8-05\\_Pg41-44.pdf](https://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal05/IF8-05_Pg41-44.pdf).
  8. K. W. Park, and K. S. Seol, “Nb-TiO<sub>2</sub> supported Pt cathode catalyst for polymer electrolyte membrane fuel cells”, *Electrochem. Commun.*, Vol. 9, No. 9, 2007, pp. 2256-2260, doi: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2007.06.027>.
  9. S. R. Dhakate, S. Sharma, and R. B. Mathura, “A low-density graphite-polymer composite as a bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells”, *Carbon Letters*, Vol. 14, No. 1, 2013, pp. 40-44, doi: <http://dx.doi.org/10.5714/CL.2012.14.1.040>.
  10. H. Tsuchiya and O. Kobayashi, “Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 29, No. 10, 2004, pp. 985-990, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.10.011>.
  11. S. Liu, T. J. Pan, R. F. Wang, Y. Yue, and J. Shen, “Anti-corrosion and conductivity of the electrodeposited graphene/poly-pyrrole composite coating for metallic bipolar plates”, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 136, 2019, pp. 105237, doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105237>.
  12. B. K. Kakati and D. Deka, “Differences in physico-mechanical behaviors of resol(e) and novolac type phenolic resin based composite bipolar plate for proton exchange membrane (PEM) fuel cell”, *Electrochim. Acta*, Vol. 52, No. 25, 2007, pp. 7330-7336, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.06.021>.
  13. S. Srinivasan, “Fuel cells for extraterrestrial and terrestrial applications”, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 136, No. 2, 1989, pp. 41C, doi: <https://doi.org/10.1149/1.2096647>.
  14. S. J. Lee, S. Mukherjee, J. McBreen, Y. W. Rho, Y. T. Kho, and T. H. Lee, “Effects of Nafion impregnation on performances of PEMFC electrodes”, *Electrochim. Acta*, Vol. 43, No. 24, 1998, pp. 3693-3701, doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(98\)00127-3](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(98)00127-3).
  15. W. K. Choi, B. J. Kim, B. G. Min, K. M. Bae, and S. J. Park, “Effects of sizing treatment of carbon fibers on mechanical interfacial properties of nylon 6 matrix composites”, *Elastomers and Composites*, Vol. 45, No. 1, 2010, pp. 2-6. Retrieved from <http://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=2843557>.
  16. R. B. Prime, “Thermal characterization of polymeric materials”, Academic Press, USA, 1982, pp. 435.
  17. J. N. Kirk, M. Munro, and P. W. R. Beaumont, “The fracture energy of hybrid carbon and glass fibre composites”, *J. Mater. Sci.*, Vol. 13, No. 10, 1978, pp. 2197-2204, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00541674>.
  18. 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”, *J. Mater. Sci.*, Vol. 15, No. 10, 1980, pp. 2619-2635, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00550768>.
  19. J. Y. Lee, W. K. Lee, H. R. Rim, G. B. Joung, and H. K. Lee, “Effect of carbon fiber filament and graphite fiber on the mechanical properties and electrical conductivity of elastic carbon composite bipolar plate for PEMFC”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 2, 2014, pp. 131-138, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.2.131>.
  20. H. E. Lee, Y. S. Chung, and S. S. Kim, “Feasibility study on carbon-felt-reinforced thermoplastic composite materials for PEMFC bipolar plates”, *Composite Structures*, Vol. 180, 2017, pp. 378-385, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.037>.