

## 섬유강화 복합재를 사용한 PEM 연료전지 분리판의 전기적·기계적 특성 평가

이 희 섭<sup>1)</sup> · 안 성 훈<sup>2)</sup> · 전 의 식<sup>3)</sup> · 안 상 열<sup>3)</sup> · 안 병 기<sup>3)</sup>

서울대학교 기계항공공학부<sup>1,2)</sup> · 현대모비스 선행연구부 연료전지그룹<sup>3)</sup>

### Evaluation of Mechanical and Electrical Properties of Bipolar Plate Made of Fiber-reinforced Composites for PEM Fuel Cell

Hee-Sub Lee<sup>1)</sup> · Sung-Hoon Ahn<sup>2)</sup> · Ui-Sik Jeon<sup>3)</sup> · Sang-Yeoul Ahn<sup>3)</sup> · Byung-Ki Ahn<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, & Institute of Advanced Machinery and Design,  
Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>3)</sup>Department of Advanced Technology Fuel Cell Group, Hyundai-Mobis Company, 80-10 Mabook-dong,  
Guseoung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 449-910, Korea

(Received 9 December 2005 / Accepted 30 March 2006)

**Abstract** : The fuel cell is one of promising environment-friendly energy sources for the next generation. The bipolar plate is a major component of the PEM fuel cell stack, which takes a large portion of stack cost. In this study, as alternative materials for bipolar plate of PEM fuel cells, graphite composites were fabricated by compression molding. Graphite particles mixed with epoxy resin were used as the main substance to provide electric conductivity. To achieve desired electrical properties, specimens made with different mixing ratio, processing pressure and temperature were tested. To increase mechanical strength, one or two layers of woven carbon fabric were added to the graphite and resin composite. Thus, the composite material was consisted of three phases: graphite particles, carbon fabric, and epoxy resin. By increasing mixing ratio of graphite, fabricated pressure and process temperature, the electric conductivity of the composite was improved. The results of tensile test showed that the tensile strength of the two-phase graphite composite was about 4MPa, and that of three-phase composite was increased to 57MPa. As surface properties, contact angle and surface roughness were tested. Graphite composites showed contact angles higher than 90°, which mean low surface energy. The average surface roughness of the composite specimens was 0.96  $\mu\text{m}$ .

**Key words** : PEM fuel cell(고분자 전해질 연료전지), Bipolar plate(분리판), Electric conductivity(전기전도성), Graphite particles(흑연입자), Fiber-reinforced composite(섬유강화 복합재), Mechanical strength(기계적 강도)

### 1. 서 론

연료전지는 최근 지구온난화를 방지하기 위한 기후 변화 협약의 발족과 이산화탄소의 총량 규제, 저공해 자동차 의무 판매 등의 제약이 강화되고 있어

서 미래의 친환경 대체에너지원으로 주목 받고 있다. 연료전지는 40% 이상의 높은 에너지 효율과 무공해, 무소음 등의 특징을 가지고 있으며, 보통 사용되는 전해질에 따라 여러 종류로 구분된다. 그 중에서 고분자 전해질 연료전지는 높은 전력밀도와 낮은 반응온도, 빠른 시동조건 등의 특성을 가지며, 또한

\*Corresponding author, E-mail: ahnsh@snu.ac.kr

지속적인 연구를 통해 축적된 기술을 배경으로 다양한 분야에서 적용이 기대되고 있다.

연료전지 스택(Stack)은 수소와 산소의 화학반응을 통해 전기를 발생시키는 여러 개의 단위전지가 직렬로 적층된 형태를 이루고 있다. 이러한 연료전지 스택은 전체 시스템의 가격 중 50% 정도의 비중을 차지하며, 스택의 구성품 중 하나인 분리판(Bipolar plate)은 스택 가격의 약 25% 이상을 차지하고 있다. 이렇듯 가격 면에서 높은 비중을 차지하고 있는 분리판은 스택 내에서 다음과 같은 여러 가지 기능을 담당하고 있다. (1) 각각의 단위전지들 간의 분리, (2) 연료와 공기, 그리고 물이 지나가는 통로 역할, (3) 단위전지 속에서 전류가 흐를 수 있게 하는 역할, (4) MEA (Membrane Electrode Assembly)의 지지 역할 등 다양한 기능을 담당하고 있다.<sup>1)</sup>

이처럼 다양한 조건을 만족시키기 위해 여러 가지 소재를 사용하여 분리판을 제작하려는 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 분리판 재료로 그래파이트(Graphite)가 사용되고 있으나, 취성이 강해서 다루기가 어렵고, 재료비용 및 가공비가 많이 드는 단점이 있다. 이렇듯 기존의 분리판을 대체할 수 있는 재료의 연구들 중, Besmann<sup>2)</sup> 등은 탄소섬유복합재 분리판을 제작하고 전도성 및 무게, 그리고 부식성 등에 대해 측정하여, 그래파이트를 대체할 수 있는 분리판 재료로서의 가능성을 평가해 보았으며, Wu와 Show<sup>3)</sup>는 분리판에 탄소나노튜브(Carbon NanoTube)를 첨가하여 제작함으로써 전도성 및 기계적 물성을 향상시키고, 제품의 저가 생산 가능성에 대해 연구하였다.

또한, Kumar와 Reddy<sup>4)</sup>는 니켈-크롬 금속 폼 재료를 사용하여 분리판 재료로서의 제작 가능성에 대해 고찰해 보았으며, Wind<sup>5)</sup> 등은 금속으로 코팅한 분리판의 제작을 통해 새로운 제작공정과 재료의 가격을 줄일 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 그 밖에도 저가의 분리판 제작에 대해 다양한 재료의 연구가 수행되어 왔다.<sup>6-14)</sup>

본 연구에서는 간단한 제작공정으로 다중벽 탄소나노튜브(Multi-Walled Carbon NanoTube), 카본블랙(Carbon Black), 흑연입자(GX-15, P-15), 이 네 가지 종류의 전도성이 좋은 입자들과 수지로 혼합된 복합재를 제작하고,<sup>15-18)</sup> 저항, 인장강도, 접촉각, 표면

조도 등을 측정하여 분리판 소재로서의 적용가능성에 대해 평가해 보았다.

## 2. 실험

실험은 고분자 전해질 연료전지 분리판으로서 요구되는 다양한 특성들을 만족시키기 위해 사용하는 재료와 성형조건의 특성을 변화시키면서 진행하였다. 이 중에서도 특히 연료전지 전체의 효율을 결정할 수 있는 중요한 성질인 전기적 특성과 다양한 하중에 견딜 수 있는 강도 특성 평가에 초점을 맞추어 실험을 진행하였다.

분리판은 전극지지체의 양쪽에 위치하면서 전지에서 발생하는 전류를 이동시켜주는 역할을 하므로 전기를 전도할 수 있는 성질이 좋아야 한다. 그리고 연료전지 스택내에서 직렬로 여러 장 겹쳐서 사용하기 때문에 스택의 체결이 필요하고, 자동차용으로 사용할 경우 활동하는 환경에 잘 견디는 내구성을 얻기 위해 어느 정도 이상의 강도가 필요하다.

한편, 연료전지 스택은 여러 개의 단위전지들의 체결로 이루어지며, 이때 스택 체결의 기밀성을 얻기 위해서는 분리판의 표면이 고르고, 거칠지 않은 특성을 가지고 있어야 한다.

연료전지의 원활한 작동을 위해서는 수소와 산소의 반응에서 발생하는 물의 이동이 중요하다. 분리판의 채널을 통해 이동하게 되는 물은 채널표면의 에너지가 낮아야 원활히 이동할 수 있다. 이는 재료의 접촉각을 측정함으로써 표면에너지가 낮을수록 접촉각이 크게 나타나는 관계를 통해 확인할 수 있다. 접촉각이 90° 이상이면 소수성을 나타내며, 그 이하이면 친수성 재료로 판단할 수 있다.

이처럼 위에서 언급한 내용들을 평가하기 위해 실험을 진행하였으며, 사용된 전도성 입자는 다중벽탄소나노튜브, 카본블랙, 그리고 흑연입자(GX-15, P-15)를 사용하였으며, 이 중 좋은 전기적 특성을 보이는 재료에 대해 인장강도, 접촉각, 표면조도 등의 특성을 평가해 보았다.

### 2.1 재료

실험은 열경화성 수지인 에폭시(Epoxy)와 전도성입자를 사용하였다. 에폭시수지(YD-128)와 경화

제, 경화촉진제는 (주)국도화학의 제품을 사용하였으며(Table 1), 전도성 입자는 다중벽탄소나노튜브(MWCNT, CM-95), 카본블랙(CB, Ketjenblack), 그리고 (주)카보닉스의 흑연 분말의 종류인 GX-15(후처리 가공된 흑연분말)와 P-15(후처리 되지 않은 흑연 분말)를 사용하여 실험을 진행하였다(Table 2, Fig. 1). Table 3은 사용된 (주)KPI의 KN C125 EPC 탄소섬유(Plain weave: 평직)의 특성이다.

Table 1 Properties of epoxy resin

Property	Material	Epoxy resin(YD-128)
Density		1.17 g/cc
Viscosity		11500-13500 cps at 25°C

Table 2 Properties of conductive particles

Property	Material	MWCNT	CB	Graphite	
				GX-15	P-15
Density		0.1g/cc*	0.13g/cc*	1.1g/cm <sup>3</sup>	0.9g/cm <sup>3</sup>
Diameter		10-15nm	40nm	18.5µm	18.8µm

\*Apparent bulk density

Table 3 Properties of carbon fabric (Woven)

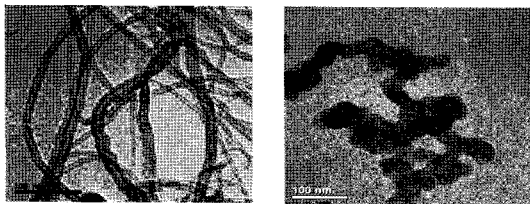
Property	Material	KN C125 EPC
Thickness		160 µm
Mass		290 ± 15 g/m <sup>2</sup>

## 2.2 제조 및 실험 방법

제조한 복합재는 우선 에폭시수지와 경화제 그리고 경화촉진제를 일정한 비율로 혼합한 뒤 전도성 입자를 각각 원하는 비율에 따라 첨가하여 입자와 수지를 혼합하는 방식으로 제조하였다. 이때 수지와 입자들 간의 균질한 혼합을 위해 High shear mixing기법을 사용하였으며, 이렇게 혼합된 재료는 미리 제작된 몰드에 넣고 Hot-press를 이용하여 압축성형방법으로 제작하였다. 압축성형방법은 기존의 유동채널과 판을 두 단계로 제작하는 기계식 가공 과정에 비해, 이를 한 번에 압축성형으로 제작할 수 있으므로 비교적 공정이 간단하다.

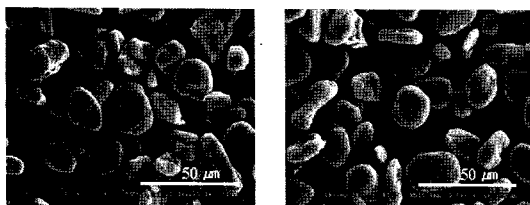
네 가지 전도성 입자를 사용하여 복합재를 제작하고 각각의 저항을 측정하여 분리판용 재료로서의 가능성을 평가해보고, 그 중에서 측정된 저항이 다른 재료에 비해 작은 특성을 보이는 재료에 대해 다양한 조건으로 추가적인 실험을 진행하였다.

탄소섬유가 첨가된 3 상 복합재의 제조 방법 또한, 위의 경우와 마찬가지로 입자와 에폭시수지를 혼합한 뒤, 마지막으로 복합재를 압축성형하기 전에 입자와 에폭시수지 사이에 탄소섬유층을 더 추가하여 금형에 넣고, Hot-press를 이용하여 경화시키는 방법으로 제작하였다. Fig. 2는 양 측면에 전도성 입자와 수지로 제작된 복합재가 위치하고, 그 가운데에 탄소섬유층이 위치하는 형상을 보여주고 있다.



(a) MWCNT

(b) CB



(c) Graphite (GX-15)

(d) Graphite (P-15)

Fig. 1 Images of four types of conductive particles

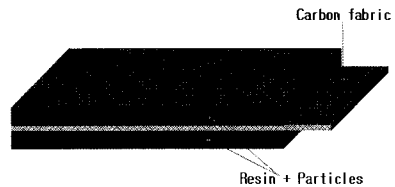


Fig. 2 Cross section of 3 phase composite

### 2.2.1 전기적 특성 평가

제작된 복합재의 전기적 특성을 평가하기 위해 길이, 넓이, 두께가 각각 80 mm, 20 mm, 2 mm인 시편을 제작하고, Milli-ohm meter장비를 이용하여 저항을 측정하고 그 값을 비교하였다.

Milli-ohm meter는 양쪽의 지그를 이용하여 시편을 물릴 수 있고, 각각의 지그에서는 전류를 흘려주고 이때 발생하는 전압을 측정하여 저항을 계산하

는 방식으로 시편의 저항을 측정할 수 있는 장비이다.

### 2.2.2 기계적 특성 평가

제작된 복합재의 기계적 특성을 평가하기 위해 ASTM D638 기준에 의해 시편을 제작하고, 인장강도를 측정하였다.

그리고 표면의 거친 정도를 확인하기 위해 복합재의 표면조도는 Marsurf XR 20을 사용하여 측정하였고, 접촉각은 마이크로피펫으로 일정량의 물을 떨어뜨리고 현미경을 통해 측정하였다.

## 3. 결과 및 토의

고분자전해질 연료전지 분리판 재료로 사용하고 자 전도성 입자와 수지 그리고 탄소섬유를 사용하여 복합재를 제작하고 전기 및 기계적 특성을 확인해 보았다.

### 3.1 전기적 특성

본 연구에서는 네 가지 전도성입자와 수지로 복합재를 제작하고 첨가비율, 성형압력, 성형온도 조건을 달리하면서 시편을 제작하고 이에 따른 저항을 측정하여 복합재의 전기적 특성을 평가하였다. 비저항과 전기전도성의 관계는 서로 역수를 취하여 얻을 수 있는 값으로써, 이는 낮은 저항값이 곧 높은 전기전도성을 의미한다고 할 수 있다.

#### 3.1.1 네 가지 입자의 저항 측정

전기적 특성이 우수한 네 가지 종류의 전도성 입자를 에폭시수지에 80vol%의 첨가비율로 혼합하고, 3.5MPa의 압력과 120°C의 온도에서 30분 동안 경화하여 복합재를 제작하고, 각각의 시편에 대해 저항을 측정하였다.

MWCNT와 CB의 경우 상대적으로 낮은 밀도를 가지고 있어서 실제 80vol%의 비율로 혼합하였으나, 무게비로 나타내면 각각 26wt%와 31wt%로 혼합되었다는 것을 알 수 있었다. 이에 비해 흑연입자(GX-15, P-15)의 경우는 상대적으로 MWCNT나 CB에 비해 높은 밀도를 가지고 있어서 70-80wt%의 무게비로 혼합되어 있는 것으로 환산할 수 있었다.

네 종류의 전도성 입자를 가지고 실험을 한 결과 흑연입자 중 후처리 가공을 하지 않은 P-15입자로

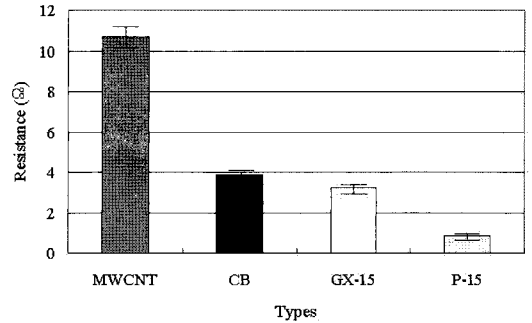


Fig. 3 Surface resistance of each specimens made of particles (80vol%, 120°C, 3.5MPa)

제작된 시편이 가장 낮은 저항을 가지고 있음을 확인하였으며(Fig. 3), 이는 분리판이 요구하는 높은 전도성 재료의 특성을 P-15입자가 가지고 있음을 나타내는 것이다.

MWCNT와 CB의 경우 흑연입자와 같은 부피비로 혼합되었다고 하지만, 사실은 흑연입자들에 비해 더 낮은 무게비로 혼합되어 있어서 양적인 비교로는 전기적 특성을 평가하기가 힘들다.

하지만 실험에 사용된 전도성 입자들을 혼합하기 위한 성형성과 저항값을 비교해 볼 때, 다른 입자들에 비해 높은 밀도와 상대적으로 낮은 저항특성을 보인 P-15입자가 본 실험에서 요구하는 높은 전도성을 가져야 하는 특성에 가장 적합한 성질을 나타내어, 이 입자에 대해 몇 가지 전기적 특성을 더 알아보기 위한 추가 실험을 진행하였다.

#### 3.1.2 성형조건에 따른 흑연입자의 전기적 특성

흑연입자(P-15)와 에폭시수지의 첨가비율, 성형압력과 온도 조건을 달리 하여 시편을 제작하고 각각의 조건에 따른 저항특성을 확인해 보았다.

##### 1) 첨가비율에 따른 저항

흑연입자와 에폭시수지로 제작된 복합재의 첨가비율에 따른 전기적 특성을 알아보기 위해 성형압력과 온도를 10MPa과 120°C로 고정하고, 흑연입자의 첨가비율을 80, 85, 90vol%로 증가시키면서 시편을 제작하였다.

제작된 복합재의 저항을 측정한 결과 흑연입자를 첨가하는 비율이 높아질수록 저항이 감소하는 것을 알 수 있었다(Fig. 4). 이는 전기를 전도할 수 있는 특

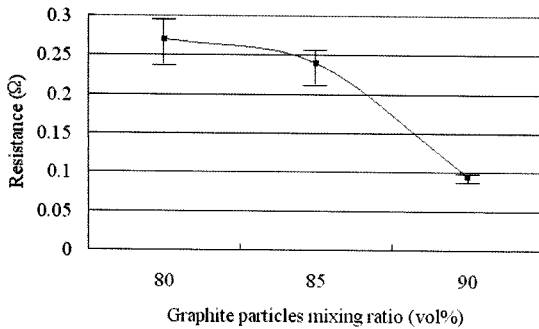


Fig. 4 Resistance of specimens with various mixing ratios (120°C, 10MPa)

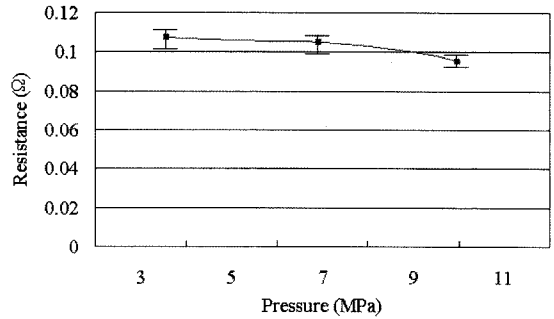
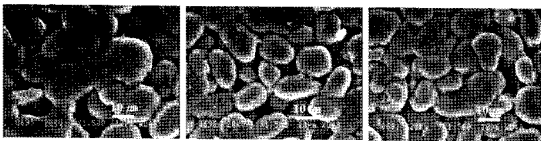


Fig. 6 Resistance of specimens with various processing pressures (90vol%, 120°C)



(a) 80vol% graphite (b) 85vol% graphite (c) 90vol% graphite  
Fig. 5 SEM(Scanning Electron Microscope) images of graphite composites ( $\times 1500$ )



(a) 3.5MPa (b) 7MPa (c) 10MPa  
Fig. 7 SEM images of graphite composites ( $\times 1500$ )

성을 가진 흑연입자의 밀도가 에폭시수지에 비해 상대적으로 높아지고, 입자간의 간격이 조밀해져서 저항이 감소한 것으로 추측할 수 있었다(Fig. 5).

SEM 사진에서 관찰할 수 있듯이 80vol%로 혼합하여 제작한 시편의 경우, 상대적으로 에폭시수지의 비율이 높아 수지가 입자를 둘러싸고 있는 모습을 관찰할 수 있었으며, 85와 90vol%로 증가할수록 수지의 비율이 줄고 입자와 입자사이의 간격이 조밀해지는 것을 확인할 수 있었다.

### 2) 성형압력에 따른 저항

제작된 복합재의 성형압력에 따른 전기적 특성을 확인하기 위해, 첨가비율과 성형온도를 90vol%와 120°C로 하고, 성형압력을 증가시키면서 실험을 진행하였다.

이렇게 제작된 시편의 저항을 측정된 결과 성형압력이 3.5, 7, 10MPa로 증가할수록 저항이 감소하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6). 이 또한 첨가비율이 증가하는 경우와 비슷하게, 가하는 압력의 상승으로 인해 흑연입자들의 간격이 조밀해지고, 밀도가 높아져서 저항이 감소하는 것을 알 수 있었다.

위의 사진은 압력에 따른 입자의 표면 상태를 보

여주고 있다(Fig. 7). 압력이 증가할수록 입자와 입자사이의 간격이 좁아지는 것을 확인할 수 있었다.

### 3) 성형온도에 따른 저항

마지막으로 성형온도에 따라 변화하는 전기적 특성을 확인하기 위해 첨가비율과 성형압력조건을 90vol%, 10MPa로 하여 실험을 진행하였다.

성형온도를 80, 100, 120°C로 높이면서 복합재를 제작한 결과, 온도가 상승할수록 저항이 감소하는 특성을 확인할 수 있었다(Fig. 8). 이는 온도가 높아질수록 분자들의 이동이 활발해져서 입자들이 고르

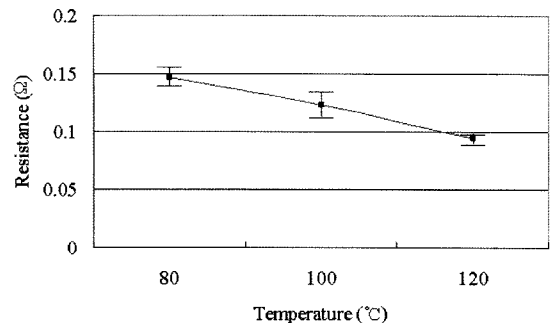


Fig. 8 Resistance of specimens with various processing temperatures (90vol%, 10MPa)

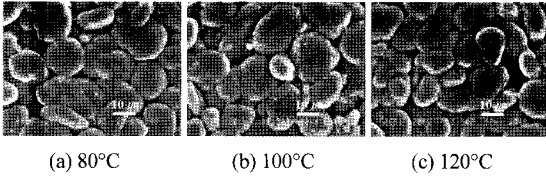


Fig. 9 SEM images of graphite composites (× 1500)

게 분포되며, 또 한 에폭시수지도 점도가 낮아져서 수지와 입자들이 고르게 분포할 수 있도록 해주기 때문인 것으로 추측할 수 있었다(Fig. 9).

3.2 기계적 특성

전기적 특성 실험에서 가장 좋은 전도성을 보인 성형조건으로 복합재를 제작하고, 이 재료에 대해 인장강도를 측정하여 기계적 강도를 확인해 보았다. 그리고 여기에 탄소섬유를 추가하여 3상 복합재를 제작하고 인장강도를 측정하였다. 탄소섬유를 추가하여 3상 복합재를 제작하고 저항을 측정된 결과 전기적 특성에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

그리고 표면특성을 확인하기 위해 표면조도를 측정하여 표면의 거친 정도를 확인하였고, 접촉각을 측정하여 표면에너지의 정도를 확인할 수 있었다.

3.2.1 인장강도 측정

1) 시편의 형상 및 측정 장비

인장강도 측정 시편은 Fig. 10과 같은 치수와 형상을 가지며, 측정 장비는 LLOYD Instruments LR 50K를 사용하였다.

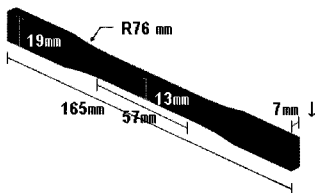


Fig. 10 Dimensions of tensile specimen

2) 인장강도 측정 결과

흑연입자와 수지로 제작된 복합재와 탄소섬유를 각각 1장, 2장 첨가한 복합재에 대해 인장시험을 한 결과는 Table 4와 같다.

입자와 수지로만 제작된 복합재에 비해 탄소섬유

Table 4 Results of tensile test

Property \ Specimens	No fabric	1 fabric	2 fabric
Strength (MPa)	4.41	28.56	56.89
Modulus (GPa)	10.1	18.1	30.85
Poisson's ratio	0.23	0.22	0.21



Fig. 11 Failure modes of specimens

가 1장 첨가된 섬유강화 복합재로도 강도는 7배, 강성은 2배 정도 향상됨을 확인할 수 있었다.

흑연입자와 수지로만 제작된 복합재는 입자의 첨가비율에 비해 바인더 역할을 해주는 수지의 양이 너무 작아서 취성이 강한 특성을 보였으나, 가운데 층에 탄소섬유를 추가하여 제작한 복합재의 경우 강도 특성이 좋아지는 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 11은 인장시편의 파손형태를 보여주고 있으며, 탄소섬유가 첨가된 복합재는 입자와 수지로 된 부분에서부터 파손이 시작되고 나중에 완전히 파손되는 것을 확인할 수 있었다.

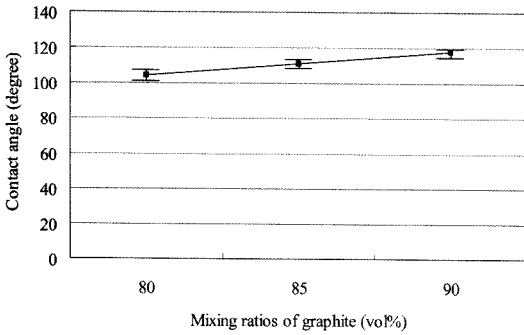
3.2.2 표면조도 측정

제작된 복합재의 표면 거칠기를 측정한 결과 0.96 μm 정도의 표면조도를 얻을 수 있었다. 각각의 성형 조건에 따라 큰 차이 없이 1 μm 정도의 표면 거칠기를 나타내었으며, 이는 압축성형 시 최저압력인 3.5 MPa 이상의 압력으로 제작한다면, 얻을 수 있는 값으로 확인할 수 있었다.

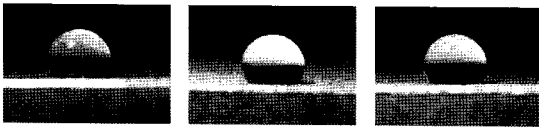
3.2.3 접촉각 측정

실험은 마이크로피펫을 이용하여 2 μl의 물을 재료의 표면에 떨어뜨리고, 40배의 배율을 가진 전자현미경을 통해 재료표면과 물방울 간의 접촉각을 측정하였다. Fig. 12(b)에 표시된 각이 측정된 각의 방향을 나타내고 있다.

아래의 Fig. 12는 각각 다른 첨가비율에서 측정된 복합재의 접촉각이며, 전체적으로 100°가 넘는 높은 접촉각을 보여 주었다. 흑연입자의 첨가비율이



(a) Contact angle of specimens with various manufacturing conditions (120°C, 10MPa)



(b) 80vol% graphite (c) 85vol% graphite (d) 90vol% graphite  
Fig. 12 Contact angle of graphite composite (degree)

증가함에 따라 물방울과 재료가 접하는 면이 작아지는 즉, 접촉각이 조금씩 커지는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고분자 전해질 연료전지의 분리판으로 활용하고자 다양한 종류의 입자와 수지, 그리고 탄소섬유를 혼합하여 복합재를 제작하고 그 특성을 평가해 보았다.

- 1) MWCNT, CB, Graphite(GX-15, P-15) 입자들 중 같은 조건에서 성형하였을 때 P-15 입자가 가장 작은 저항 값을 보였다.
- 2) 흑연입자의 첨가비율과 성형압력, 성형온도를 증가시켜 복합재를 제작할수록 저항이 감소하였다.
- 3) 흑연입자와 수지로 제작된 복합재에 탄소섬유를 추가하여 제작할 경우 강도가 향상되었다.
- 4) 다양한 성형조건에서 제작한 복합재의 표면조도는 0.96  $\mu\text{m}$  정도 이다.
- 5) 성형조건을 120°C에서 10MPa의 압력으로 각각 80, 85, 90vol%의 흑연입자 첨가비율로 제작한 복합재의 접촉각은 100° 이상의 값을 나타내었다.

#### 후 기

본 연구는 서울대학교 ERC (Micro Thermal System Research Center)와 현대모비스 산학협력과제 (BKM-2004-28C)의 지원으로 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) V. Mehta and J. S. Cooper, "Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing," Journal of Power Sources, Vol.114, pp.32-53, 2003.
- 2) T. M. Besmann, J. W. Klett, J. J. Henry, Jr. and L. C. Edgar, "Carbon/carbon Composite Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," Journal of The Electrochemical Society, Vol.147, No.11, pp.4083-4086, 2000.
- 3) M. Wu and L. L. Shaw, "A Novel Concept of Carbon-filled Polymer Blends for Applications in PEM Fuel Cell Bipolar Plate," International Journal of Hydrogen Energy, Vol.30, pp.373-380, 2005.
- 4) A. Kumar and R. G. Reddy, "Materials and Design Development for Bipolar/end Plates in Fuel Cells," Journal of Power Sources, Vol.129, pp.62-67, 2004.
- 5) J. Wind, R. Späh, W. Kaiser and G. Böhm, "Metallic Bipolar Plates for PEM Fuel Cells," Journal of Power Sources, Vol.105, pp.256-260, 2002.
- 6) E. A. Cho, U.-S. Jeon, H. Y. Ha, S.-A. Hong and I.-H. Oh, "Characteristics of Composite Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," Journal of Power Sources, Vol.125, pp.178-182, 2004.
- 7) H. -C. Kuan, C. -C. M. Ma, K. H. Chen and S. -M. Chen, "Preparation, Electrical, Mechanical and Thermal Properties of Composite Bipolar Plate for a Fuel Cell," Journal of Power Sources, Vol.134, pp.7-17, 2004.
- 8) S. I. Heo, J. C. Yun, C. K. Jung and K. S. Han, "Fabrication and Characterization of Graphite Reinforced Conductive Polymer Composites," Proceeding of the KSCM Spring Annual Mee-

- ting, pp.147-150, 2004.
- 9) E. Middelma, W. Kout, B. Vogelaar, J. Lenssen and E. Waal, "Bipolar Plates for PEM Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.118, pp.44-46, 2003.
  - 10) J. S. Cooper, "Design Analysis of PEMFC Bipolar Plates Considering Stack Manufacturing and Environment Impact," *Journal of Power Sources*, Vol.129, pp.152-169, 2004.
  - 11) A. Yasmin and I. M. Daniel, "Mechanical and Thermal Properties of Graphite Platelet/epoxy Composites," *Polymer*, Vol.45, pp.8211-8219, 2004.
  - 12) M. H. Oh, Y. S. Yoon and S. G. Park, "The Electrical and Physical Properties of Alternative Material Bipolar Plate for PEM Fuel Cell System," *Electrochimica Acta*, Vol.50, pp.777-780, 2004.
  - 13) A. Heinzl, F. Mahlendorf, O. Niemzig and C. Kreuz, "Injection Moulded Low Cost Bipolar Plates for PEM Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.131, pp.35-40, 2004.
  - 14) D. R. Hodgson, B. May, P. L. Adcock and D. P. Davies, "New Lightweight Bipolar Plate System for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.96, pp.233-235, 2001.
  - 15) K. Arshak, E. Moore, L. Cavanagh, J. Harris, B. McConigly, C. Cunniffe, G. Lyons and S. Clifford, "Determination of the Electrical Behaviour of Surfactant Treated Polymer/carbon Black Composite Gas Sensors," *Composites Part A*, Vol.36, pp.487-491, 2005.
  - 16) M. K. Seo and S. J. Park, "Electrical Resistivity and Rheological Behaviors of Carbon Nanotubes-filled Polypropylene Composites," *Chemical Physics Letters*, Vol.395, pp.44-48, 2004.
  - 17) I. Krupa, I. Novak and I. Chodak, "Electrically and Thermally Conductive Polyethylene/graphite Composites and Their Mechanical Properties," *Synthetic Metals*, Vol.145, pp.245-252, 2004.
  - 18) I. Novak, I. Krupa and I. Janigova, "Hybrid Electro-conductive Composites with Improved Toughness, Filled by Carbon Black," *Carbon*, Vol.43, pp.841-848, 2005.