

## 나노사이즈 불화탄소수지 용액 농도에 따른 GDL 발수 코팅

정문국\*, 송기세\*\*, 조태환\*, 최원경\*\*\*†

\*단국대학교 응용화학공학과 대학원, \*\*동국대학교 화공생물공학과 대학원, \*\*\*단국대학교 공학대학

## Water Repellent Coating of GDL with Different Concentration of Nano-sized PTFE Solution

MOONGOOK JEONG\*, KISE SONG\*\*, TAEHWAN CHO\*, WEONKYUNG CHOI\*\*\*†

\*Grad. School of Applied Chemistry Engineering, Dankook Univ.,  
29 Anseo-dong, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 330-714, Korea

\*\*Grad. School of Chemical & Biochemical Engineering, Dongguk Univ.,  
26. Pil-dong 3-ga Jung-gu, Seoul, 100-715, Korea

\*\*\*School of Engineering, Dankook Univ.,  
29 Anseo-dong, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 330-714, Korea

### ABSTRACT

Efficiency of a fuel cell is determined by the generated water. If water is not removed sufficiently, water will be accumulated at GDL, which causes flooding. Therefore, water control is regarded as a crucial factor to sustain fuel cell performance. In this study, PTFE coating on the surface of carbon paper was carried out to establish optimum process for hydrophobic treatment of GDL. Carbon paper was immersed at different concentrations of nano-sized PTFE coating solution. Their characteristics were analyzed systematically by FE-SEM, water contact angle, cyclic voltamogram, XRD and FT-IR. The quantitative correlation between the amount of coated-PTFE on a carbon paper and concentration of coating solution was carefully investigated. It is suggested that the amount of PTFE-coating on a carbon paper can be managed by means of controlling concentration of coating solution.

**KEY WORDS** : Gas diffusion layer(GDL, 가스확산층), Carbon paper(카본 페이퍼), Polytetrafluoroethylene(PTFE), Water repellency(발수성), Water contact angle(접촉각)

### 1. 서 론

상온에서 작동이 가능한 고분자전해질형 연료전지(PEMFC : proton exchange membrane fuel cell)

는 700℃ 이상의 작동온도가 필요한 용융탄산염형 연료전지(MCFC)나 고체산화물형 연료전지(SOFC) 등에 비하여 저온에서 작동하므로 열손실을 억제할 수 있고, 부피가 작고 가볍다는 특징을 가지고 있다. 이는 핸드폰, 노트북 등 휴대용 기구나 자동차의 동력원으로 이용하는데 장점으로써 현재 연

†Corresponding author : cwk5145@dankook.ac.kr

료전지 관련 연구개발의 90% 정도를 차지하고 있다<sup>1,2)</sup>.

PEMFC의 전해질은 이온전도막 고분자이며 전해질의 양측에는 촉매가 첨가된 다공질 전극이 접합된 연료극(anode)-전해질(electrolyte)-공기극(cathode)의 접합체는 하나의 부품으로서 기계적으로 약한 특성을 가지며 이것을 막-전극 접합체(MEA : membrane electrode assembly) 라고 한다<sup>3)</sup>. 가스확산층(GDL : gas diffusion layers) 은 MEA를 물리적으로 지지하는 역할을 하며 열 및 기체의 확산 통로가 되고 전자가 이동하는 중요한 특성을 가진다. 이러한 이유로 인해 다공질이면서 전도성이 높은 carbon paper 및 carbon cloth가 오랫동안 GDL의 소재로서 사용되어 왔다<sup>4,5)</sup>.

수소이온의 전도도는 수분의 양에 직접 비례하며 GDL의 수분 관리는 PEMFC의 성능에 밀접한 영향을 준다. 연료전지의 높은 작동 온도는 GDL내부를 건조한 상태로 만들기 때문에 산소와 수소기체는 가습된 상태로 공급되고, 연료전지 내부의 높은 전류밀도는 과포화된 수증기를 응축시켜 물을 생성한다<sup>3)</sup>. 상기의 과정들을 통해 만들어지는 물의 양이 제거되는 물의 양보다 점차 많아져서 축적될 경우 플러딩(flooding) 현상이 일어난다. 기체가 이동할 수 있는 GDL의 미세통로가 물에 의해 막혀 버리면 기체가 원활히 이동하는데 방해가 되고, 촉매층 활성부위를 둘러싸서 반응성을 저하시킨다. 따라서 플러딩은 연료전지의 효율과 성능을 급격히 악화시키는 직접적인 원인이 된다<sup>4,5)</sup>.

연료전지의 플러딩현상을 방지하고 소수성을 부여하기 위한 방법으로 polytetrafluoroethylene(PTFE) 수지를 이용한 발수코팅을 실시한다. 낮은 표면에너지 값을 가지는 물질은 소수성을 띠어 물과 잘 섞이지 않는 발수성을 가지게 된다. GDL의 발수 처리는 carbon paper가 연료전지 작동 중 물에 젖지 않도록 화학적인 처리를 통해 소수성을 갖게 하는 방법이다. PTFE는 polyethylene 사슬에 불소관능기를 치환시킨 구조로 내식성, 열안정성, 소수성, 전기적 안정성 등의 우수한 화학적 성질을 가지고 있어 매우 넓은 분야에서 사용되고 있다. L. Giorgi

등은 PTFE를 이용하여 발수처리를 함으로서 GDL의 다공도는 줄어드는 반면 전극의 성능은 개선된다고 보고하였다<sup>6)</sup>. Gu-Gon Park등은 논문에서 PTFE의 함량이 증가 할수록 기체가 이동하는 통로를 막아서 물이 배출되는 것을 방해하지만 전극의 성능에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고하였다<sup>7)</sup>. K.-F. Chiu등은 그들의 연구에서 기존의 함침법이 아닌 스프터링 법에 의한 코팅을 실시하여 보고하였다<sup>8)</sup>.

본 연구에서는 플러딩현상 때문에 발생하는 GDL의 성능 저하를 방지하기 위하여 GDL의 소재로 선택된 carbon paper에 소수성 PTFE를 이용하여 발수 코팅을 실시하고 코팅에 의해 얻어진 발수특성을 분석하였다. 또한 분광학적, 결정학적 구조의 변화 조사를 통해 코팅처리 전·후를 비교하여 카본페이퍼와 PTFE사이에 형성된 코팅층을 평가하였다. PTFE의 함량이 MEA의 성능에 영향을 미치므로 carbon paper에 코팅되는 PTFE의 함량을 코팅용액의 농도를 다양하게 조절함으로써 직선적인 변화량을 정량적으로 계산하였다.

## 2. 실험방법

GDL에 발수성을 부여하기 위하여 carbon paper (Toray, TGP 060)를 이용하여 코팅을 실시하였다. Carbon paper를 일정한 면적으로 자르고 표면의 먼지 및 불순물을 제거하기 위하여 아세톤에 3분간 담가 세척을 실시하였다. Carbon paper 표면에 불순물이 있을 경우 코팅된 표면의 균일성을 저하시켜 코팅효율을 감소시키며 carbon paper 표면에 불순물이 잔존하여 코팅 후에는 제거할 수 없게 된다. 세척된 carbon paper는 진공건조기에서 건조되었다. 코팅을 위한 발수처리 용액으로 PTFE(aldrich, 60wt.% dispersion in water) 용액을 5, 10, 15, 20wt.% 농도로 희석하여 PTFE 농도변화에 따른 발수 코팅 특성을 조사하였다.

세척 후 건조한 carbon paper들을 다양한 농도로 희석된 PTFE 용액에 함침시켰다.

PTFE 수용액을 코팅재로 사용하였기 때문에

코팅된 시료는 다량의 유기용매와 분산제 등의 휘발성 첨가제를 함유하고 있다. 표면발수 처리에 필요한 물질들은 carbon paper와 PTFE 용액을 견고하게 결합시키기 위해서 제거되어야 하므로 함침이 끝난 후 carbon paper를 진공건조기에서 건조시켰다. PTFE 용액이 carbon paper의 표면에 부분적으로 불균일하게 코팅될 수 있으므로 일정한 속도로 회전을 시켜 PTFE 용액이 균일하게 코팅되도록 회전건조를 실시하였다. 건조된 carbon paper는 공기 및 외부환경에 노출되어 산화되거나 불순물에 오염될 수 있으므로 아르곤(Ar) 분위기에서 열처리 되었다. 열처리 온도는 PTFE가 완전하게 용융되어 carbon paper에 견고하게 코팅될 수 있도록 380°C의 온도에서 진행되었다.

상기 공정을 통해 발수 코팅된 carbon paper는 FE-SEM(SU-70, hitachi)을 이용하여 미세구조 및 표면 형태를 분석하였고, cyclic voltamogram(PGZ 301, voltalab)을 이용한 전기화학적 방법과 접촉각 측정장비(DSA 100, KRUSS GmbH)를 이용하여 발수특성 및 소수성을 평가 하였다. 또한 FT-IR(Niclet 380, thermo science)과 X-ray diffraction(D8 discover with GADDS, bruker AXS)를 이용하여 코팅 전·후의 화학적·결정학적 변화를 분석하였다. 코팅 용액 농도의 영향을 분석하기 위하여 다양한 농도로 코팅된 carbon paper의 코팅량을 백분율로 계산하였다. 백분율의 계산식은 식 (1)을 통해 구하였다.

$$PTFE \text{ wt. \%} = \frac{CP_1 - CP_0}{CP_1} \times 100\% \quad (1)$$

$CP_0$  : weight of carbon paper  
 $CP_1$  : weight of coated carbon paper

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1에는 5, 10, 15, 20wt.%의 PTFE 용액에서 코팅된 carbon paper의 발수성을 측정하기 위하여 접촉각 측정장비를 통해 표면 물방울의 이미지

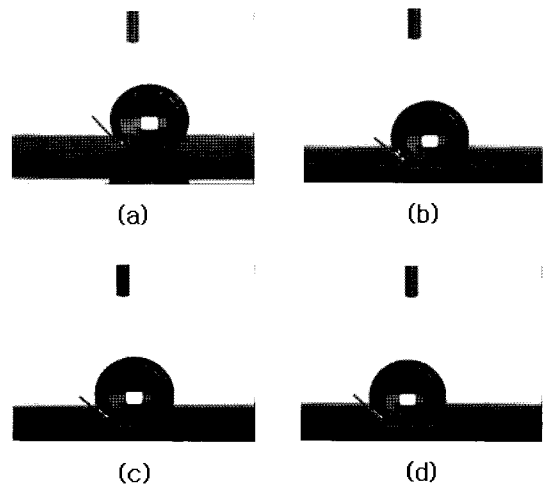


Fig. 1 Measured contact angle and sphere images of distilled water on PTFE coated carbon papers at various PTFE concentrations (a) : 5wt.% PS\*,  $\theta = 137.3^\circ$ , (b) : 10wt.% PS,  $\theta = 138.2^\circ$ , (c) : 15wt.% PS,  $\theta = 139.3^\circ$ , (d) : 20wt.% PS,  $\theta = 136.9^\circ$ .  
PS\* : PTFE solution

와 측정된 접촉각을 나타내었다. 접촉각은 물질의 표면에너지에 따른 물방울과 표면접촉각을 이용하여 친수성과 소수성을 평가하는 방법으로 물방울과 표면사이 접촉각으로부터 코팅된 carbon paper 표면의 소수성과 발수성을 평가할 수 있다. 보통 액체상 물방울이 표면에 접촉한 후 표면과 액체간의 접촉각  $\theta$ 가  $90^\circ$  이하의 값을 나타내면 친수성을 가진다고 하고  $\theta$ 가  $90^\circ$  이상의 값을 나타내면 소수성을 가진다고 한다<sup>9)</sup>. 본 연구에서 사용된 접촉각측정 장비는 측정 표면에 떨어진 물방울을 카메라가 이미지로 저장한 후 그 접촉각을 연속적으로 30회 측정하여 그 평균값을 구하여 얻어진다. 5, 10, 15, 20wt.% 용액을 이용하여 코팅한 carbon paper들의 접촉각이  $136.9^\circ \sim 139.3^\circ$ 로 측정되었다. GDL로 이용하기 위한 carbon paper의 이상적인 접촉각이  $120^\circ \sim 140^\circ$ 의 범위인 것을<sup>10)</sup> 고려할 때 본 연구에서 제작한 PTFE가 코팅된 carbon paper는 GDL로 이용하기에 적합한 발수성을 갖는 것으로 평가된다.

Carbon paper로 전극을 제작하고 수용성 전해질을 이용한 반전지를 조립하여 주사속도  $150 \text{ mVs}^{-1}$

로 순환전류곡선(cyclic voltamogram)을 측정하여 PTFE 코팅 전·후의 변화를 평가하였다. Fig. 2에는 전기화학적인 순환전류곡선으로 측정된 결과로 carbon paper 코팅 전·후의 발수성을 평가하였다. Fig. 2(a)는 코팅하지 않은 carbon paper 전극의 측정 결과로 넓은 면적의 순환전류곡선이 관찰되었다. 한편 Fig. 2(b)는 15wt.%의 PTFE용액으로 발수 코팅한 carbon paper 전극을 측정된 결과로서 코팅하지 않은 carbon paper 전극에 비해 좁은 면적의 전류순환곡선이 관찰 되었다. 발수 코팅이 이루어진 carbon paper 전극은 코팅하지 않은 전극의 축전 용량에 비교하면 매우 적은 것을 알 수 있다. 두 전극간의 면적을 비교해 볼 때, PTFE 발수 코팅된 전극표면에 전해질의 흡착에 의한 전기 이중층 형성이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 이것은 carbon paper 전극 표면에 발수성이 없으면 전해질로부터 자유로이 흡착된 화학종에 의해 전기 이중층이 형성되고 전극반응이 원활하게 진행되는 것을 알 수 있다. 반면 전극 표면이 발수성을 띄면 수용성 전해질이 전극표면으로 이동하지 못하므로 전극과 수용액의 계면사이의 전기이중층을 형성하지 못하여 전기화학적 가역반응을 진행시키지 못하는 것을 설명한다. 이 분석방법은 발수 코팅 재료에 대하여 새롭게 제안되는 전기화학적 평가법으로 전도성 재료로 전극을 만들 수 있는 금속이나 탄소재료 등에 이용한다면 간편하게 발수성을 평가할 수 있어 널리 사용 될 것으로 기대되는 분석법이다.

PTFE를 이용한 발수코팅 전·후의 외형 변화를 비교하기 위하여 PTFE 코팅 전·후 carbon paper의 FE-SEM 사진을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a), (b)는 발수 코팅 전 carbon paper 표면 이미지로 직경이 7 $\mu\text{m}$ ~10 $\mu\text{m}$  인 carbon fiber들이 불규칙적으로 적층된 구조체로 제조된 것이 확인되었다. 날 섬유들 사이에 충분한 공간들이 형성되어 있는 것이 보이며 이 공간이 기체가 이동할 수 있는 통로로 작용하는 것을 알 수 있다. 앞에서 설명했듯이 flooding현상이 일어나는 경우 물 분자가 carbon fiber 사이의 공간을 점유하면 기체가 확

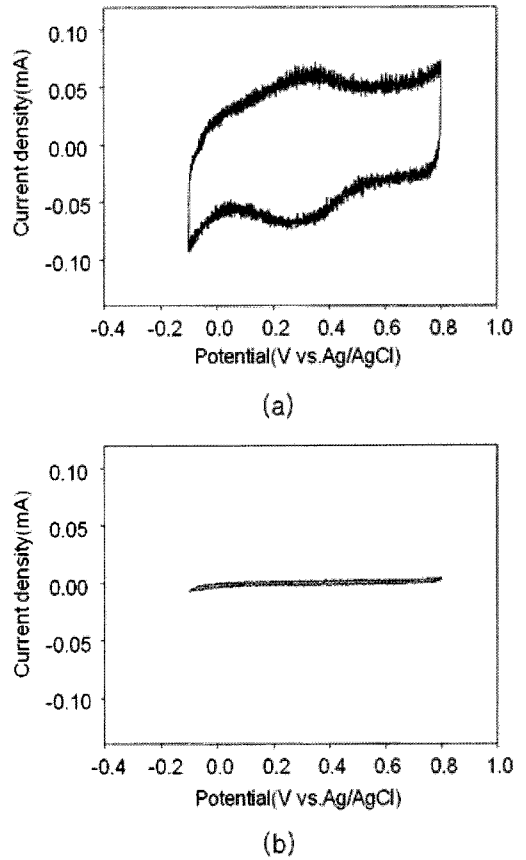


Fig. 2 Cyclic voltamograms of (a) carbon paper and (b) PTFE coated carbon paper with 15wt.% PS.

산·이동되는 통로를 막기 때문에 결국 연료전지의 연료기체들이 촉매전극으로 이동을 할 수 없게 되어 MEA와 연료전지의 효율이 저하된다. Fig. 3(b)에는 carbon fiber 표면이 매끄럽지 않고 흡이 파인 특징이 섬유 표면에 나타나고 있으므로 기체나 이중재료의 흡착 및 접촉에 용이한 표면성질을 갖고 있을 것으로 생각된다. Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)는 15wt.% PTFE 용액을 이용하여 carbon paper를 코팅한 FE-SEM 사진이다. PTFE 코팅 전에 나타났던 가스의 이동 통로 역할을 할 것으로 판단되는 carbon fiber 사이의 공간을 PTFE가 조밀하게 채우고 있으며 각 carbon fiber 표면에도 PTFE로 코팅된 것이 관찰되었다. 1 $\mu\text{m}$  이하의 크기를 갖는 PTFE 입자가 carbon fiber의 표면에 견고하게 코

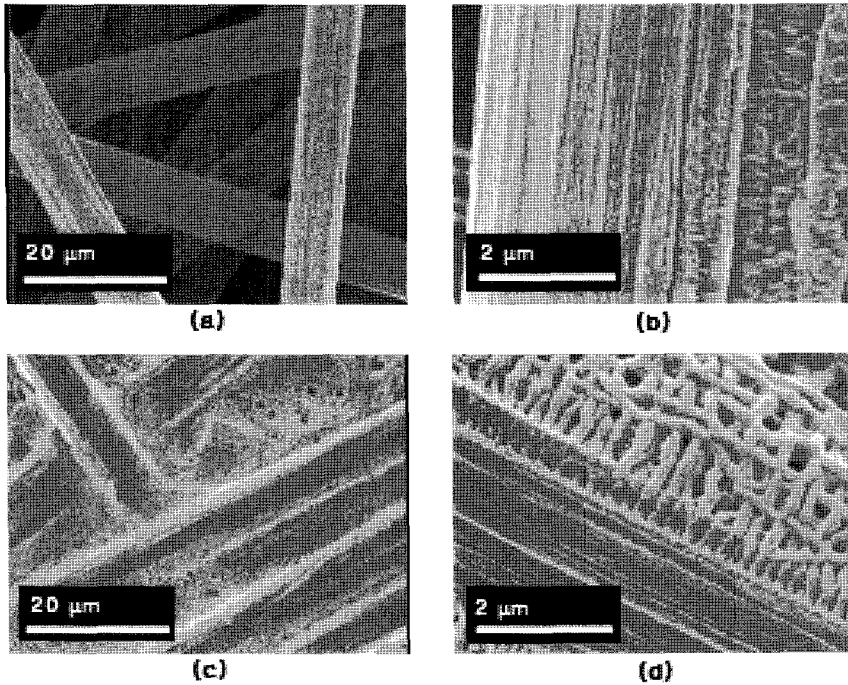


Fig. 3 FE-SEM images of as-purchased carbon paper(a), (b) and PTFE-coated carbon paper with 15wt.% PS. (c), (d).

팅되어 있는 것으로 나타났다. 코팅전의 carbon fiber의 표면은 순수한 탄소재료로 이루어진 다공성의 표면으로 가스나 액체의 흡착 등에 우호적인 성질을 가질 것으로 판단되지만 고분자재료 PTFE가 견고하게 코팅되면서 처음 탄소섬유 표면의 성질과는 다른 PTFE의 성질에 가까운 특성을 나타낼 것으로 판단된다. 따라서 소수성을 가지는 PTFE가 carbon paper를 구성하는 fiber 표면을 견고하게 코팅하고 carbon fiber 사이의 공간을 조밀하게 채우고 있기 때문에 carbon paper는 물이나 수증기에 대한 우수한 발수능력을 가지는 것으로 사료된다.

Carbon paper의 발수 코팅 전·후의 X선 회절 패턴을 측정된 후 carbon paper 및 PTFE의 결정구조 변화에 대하여 분석하였다. Fig. 4는 본 연구에서 사용한 PTFE 분말, carbon paper, PTFE 용액으로 발수 코팅된 carbon paper의 XRD 패턴을 나타내고 있다. XRD 피크의 정확성을 위하여 작은 intensity로 측정된 피크들은 우측 상단에 확대하

여 나타내었다. Fig. 4(a)는 PTFE 분말의 XRD 패턴으로  $2\theta = 18.1^\circ$ 에서 뚜렷한 피크가 보이고  $2\theta = 31.7^\circ, 37.1^\circ, 41.4^\circ$  세 개의 약한 피크를 갖는 전형적인 PTFE의 피크가 관찰되었다. Fig. 4(b)는 carbon paper의 XRD 패턴을 나타내고 있으며  $2\theta = 26.4^\circ(002), 42.5^\circ(100), 43.5^\circ(101)$ 와  $54.5^\circ(004)$ 에서 흑연 결정구조에 해당하는 피크들이 관찰되었다<sup>11,12</sup>. PTFE용액을 이용하여 발수코팅을 실시한 carbon paper의 XRD 패턴을 나타낸 Fig. 4(c)에는 PTFE 분말의 XRD 패턴과 carbon paper의 XRD 패턴이 혼합되어 동시에 나타나고 있다. 이 결과는 앞에서 나타낸 FE-SEM 사진의 결과와 마찬가지로 carbon paper를 완전히 덮지 않고 부분적으로 노출된 PTFE 코팅층이 형성되었기 때문에 두 재료의 혼합 XRD 패턴이 나타난 것으로 생각된다. 더불어 본 PTFE 발수코팅 공정을 통해 carbon paper와 PTFE 사이에 새로운 반응을 통해 만들어지는 중간체 등이 형성되지 않은 것도 알 수 있다. PTFE의 상전이 온도는 carbon paper를 구성하는

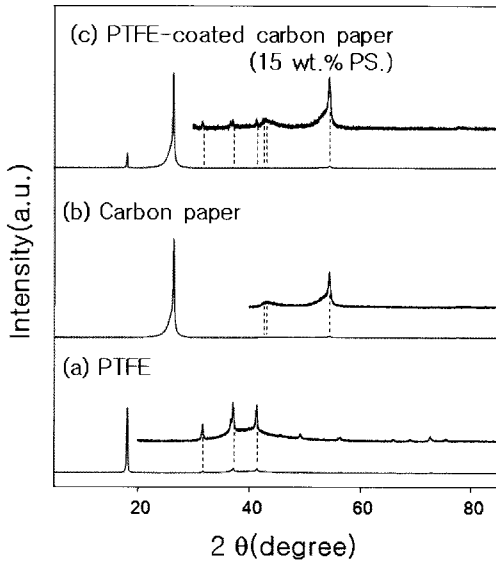


Fig. 4 X-ray diffraction patterns of carbon paper, PTFE and 14 wt.% PTFE coated carbon paper.

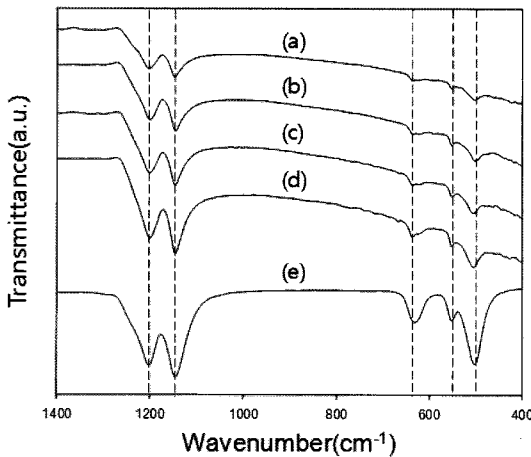


Fig. 5 FT-IR spectrum changes for PTFE coated surface of carbon papers at various PTFE concentrations (a) 5% PS, (b) 10% PS, (c) 15% PS and (d) 20% PS and (e) PTFE particle.

carbon fiber의 용융온도에 비해 너무 낮기 때문에 두 재료간 결합에 의해 새로운 물질상 형성이 이루어지지 않는 원재료들의 성질을 그대로 유지하는 안정한 코팅으로 확인되었다.

PTFE 코팅 전·후 carbon paper의 화학적 구조 변화를 FT-IR을 통해 측정하여 Fig. 5에 나타내었

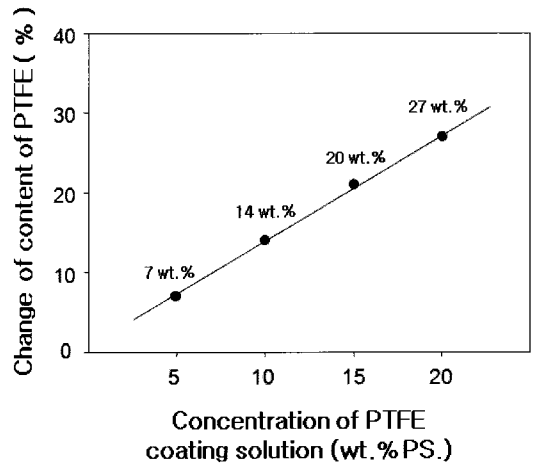


Fig. 6 Changes of content of PTFE according to various concentration of PTFE coating solution for carbon papers.

다. Fig. 5(a)~(d)는 각각 5, 10, 15, 20wt.%의 다양한 PTFE 용액으로 코팅한 carbon paper의 FT-IR 스펙트라를 보여준다.  $505\sim 640\text{cm}^{-1}$ 의 영역에서 3개의 크고 작은 흡수 피크들이 관찰되었고  $1141\text{cm}^{-1}$ 과  $1200\text{cm}^{-1}$ 에서 뚜렷한 피크를 확인 할 수 있었다. 이는 PTFE의 전형적인 피크로서 기본 구조인 C-C결합의 polyethylene에 fluorine이 치환된  $\text{CF}_2$  구조에서 관찰되는 rocking, bending, symmetrical stretching, wagging과 asymmetrical stretching운동에 의한 것이다<sup>13,14</sup>. PTFE분말의 FT-IR 스펙트럼 Fig. 5(e)와 비교할 때 코팅 후의 피크들이 정확하게 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 코팅 전·후 carbon paper와 PTFE사이에 화학적인 변화가 일어나지 않고 안정적인 코팅층을 만든 것으로 사료된다.

5, 10, 15, 20wt.% 농도의 용액으로 코팅한 carbon paper의 무게 변화량을 식 (1)의 방법을 이용하여 PTFE의 carbon paper에 코팅량으로 계산한 후 Fig. 6에 그래프로 나타내었다. 코팅용액의 농도가 높아질수록 carbon paper에 코팅되는 PTFE의 양이 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 용액 농도가 증가함에 따라 코팅된 PTFE의 양이 일정하게 직선적으로 변화하므로, 특정양의 PTFE가 코팅되기를 원할 경우 외삽법으로 코팅용액의 농도

계산이 가능할 것이다. 코팅용액의 농도가 5wt.% 씩 증가하면서 carbon paper에 코팅되는 PTFE의 양이 약 1.3배로 증가되는 것으로 확인되었다. Carbon paper의 코팅량이 주어지면 코팅용액 농도를 조절하여 carbon paper 표면에 코팅되는 PTFE 양을 정밀하게 조절할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

연료전지 효율의 저하를 가져오는 GDL의 flooding을 방지하기 위하여 PTFE를 이용한 carbon paper의 발수처리에 대한 연구를 실시하였다. 코팅 전·후의 변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 발수 처리된 carbon paper의 접촉각 측정을 통해  $136.9^{\circ} \sim 139.3^{\circ}$ 의 접촉각을 얻었다. 이는 소수성을 가지는 높은 접촉각으로 carbon paper의 발수 처리가 효과적으로 이루어진 것이 확인되었다.
- 2) 발수 코팅한 carbon paper를 전극으로 이용하여 순환전류곡선을 분석한 결과 수용성 전해질이 흡착의 제약으로 전기이중층을 형성하지 못하는 것으로 분석되었다. 이것은 carbon paper에 발수성의 PTFE가 코팅된 것으로 평가된다.
- 3) FE-SEM을 통해 코팅 전·후 carbon paper 표면의 형태 변화를 분석한 결과 PTFE가 견고하고 균일하게 carbon fiber 표면에 코팅이 되었으며 flooding이 발생할 경우 물에 의해 막혀버리는 carbon fiber들 사이의 공간에도 PTFE의 코팅이 이루어 졌음이 확인되었다.
- 4) XRD 패턴과 FT-IR 스펙트럼을 이용하여 코팅 전·후의 결정학적, 분광학적 분석을 한 결과 코팅과정에서 carbon fiber와 PTFE 사이에 새로운 반응이 생기지 않는 안정한 결합이 만들어지는 것이 확인되었다.
- 5) 코팅용액의 농도 변화에 따라 carbon paper에 코팅되는 PTFE 질량이 직선적으로 변화 하는 것을 확인하였다. 특정 코팅용액의 농도를 제조

하면 PTFE를 carbon paper에 목표한 질량으로 코팅할 수 있는 방법으로 제시한다.

#### 후 기

본 연구는 2008년 오창 산업단지 혁신클러스터 사업 현장맞춤형 기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) A. Kirubakaran, Shailendra Jain, R.K. Nema : "A review on fuel cell technologies and power electronic interface", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Article in press.
- 2) Atilla Bı.yı.koglu : "Review of proton exchange membrane fuel cell models", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, 2005, pp. 1181-1212.
- 3) James Larminie, Andrew Dicks : "Fuel Cell System Explained(second edition)", Wiley, England, 2003, pp. 67-94.
- 4) Hui Li, Yanghua Tang, Zhenwei Wang, Zheng Shi, Shaohong Wu, Datong Song, Jianlu Zhang, Khalid Fatih, Jiujuan Zhang, Haijiang Wang : "A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell", Journal of Power Sources, Vol. 178, 2008, pp. 103-117.
- 5) L. Cindrella, A.M. Kannana., J.F. Lin, K. Saminathan, Y. Ho, C.W. Lin, J. Wertz : "Gas diffusion layer for proton exchange membrane fuel cells—A review", Journal of Power Sources, Article in press.
- 6) L. Giorgi, E. Antolini, A. Pozio, E. Passalacqua : "Influence of the PTFE content in the diffusion layer of low-Pt loading electrodes for polymer electrolyte fuel cells", Electrochimica Acta, Vol. 43, 1998, pp. 3675-3680.
- 7) Gu-Gon Park, Young-Jun Sohn, Tae-Hyun Yang, Young-Gi Yoon, Won-Yong Lee, Chang-Soo

- Kim : "Effect of PTFE contents in the gas diffusion media on the performance of PEMFC", *Journal of Power Sources*, Vol. 131, 2004, pp. 182-187.
- 8) K.-F. Chiu, K.W. Wang : "Hydrophobic coating on carbon electrodes for proton exchange membrane fuel cells", *Surface & Coating Technology*, Vol. 202, 2007, pp. 1231-1235.
- 9) Ugur Pasaogullari, C. Y. Wang : "Liquid Water Transport in Gas Diffusion Layer of Polymer Electrolyte Fuel Cells", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol 151, 2004, pp. A399-A406.
- 10) Vladimir Gurau, Michael J. Bluemle, Emory S. De Castro, Yu-Min Tsou, J. Adin Mann Jr., Thomas A. Zawodzinski Jr. : "Characterization of transport properties in gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells I. Wettability (internal contact angle to water and surface energy of GDL fibers)", *Journal of Power Sources*, Vol. 160, 2006, pp. 1156-1162.
- 11) Jiang L, Eve S. S, Senthil Sm, Weijie L, Charles M. Lukehart : "Carbon nanofibers "spot-welded" to carbon paper by carbothermal reduction : A nanomicro-scale hierarchical architecture having low contact resistance.", *Chem. Mater*, Vol. 19, 2007, pp. 6001-6006.
- 12) Jong Hyeok Park and O Ok Park : "Morphology and electrochemical behaviour of ruthenium oxide thin film deposited on carbon paper", *Journal of Power Sources*, Vol. 109, 2002, pp. 121-126.
- 13) Jielong S, Guozhong W, Yaodong L, Hongyan Z. : "Study on polytetrafluoroethylene aqueous dispersion irradiated by gamma ray.", *J Fluorine Chemistry*, Vol. 127, 2006, pp. 91-96.
- 14) Francisco A, Enric B, Pere-Lluís C. : "Impedance study of the evolution of a HO<sub>2</sub>-generating hydrophobic gas diffusion electrode", *Electrochemistry Communication*, Vol. 4, 2002, pp. 838-43.