

PTFE 입자 크기 변화와 Carbon Paper 발수 코팅 특성 변화

전 현*, 송기세**, 정문국*, 이혜민*, 조태환*, 최원경***†

*단국대학교 응용화학공학과, **동국대학교 화공생물공학과, ***단국대학교 공학대학

Characteristics of Coated Carbon Paper with PTFE Emulsion Have Different Particle Size

HYEON JEON*, KISE SONG**, MOONGOOK JEONG*, HYEMIN LEE*, TAEHWAN CHO*, WEONKYUNG CHOI***†

*Applied chemistry engineering, Dpt. School of Engineering, Dankook Univ.,
29 Anseo-dong, Cheonan, Choongnam, 330-714, Korea

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

***Grad. School of Applied Chemistry Engineering, Dankook Univ.,
29 Anseo-dong, Cheonan, Choongnam, 330-714, Korea

ABSTRACT

Treatment for water repellency on the carbon supports of GDL which composed a part of MEA has been suggested as a solution to prevent flooding. PTFE is a fluoropolymer that has hydrophobic property and a PTFE emulsion was selected as waterproof agent in this investigation. Carbon paper was coated by PTFE emulsion with different particle size of 5~500 nm and 3~5 μm as various concentration. PTFE coated carbon paper has difference in weight variation changed proportionally at PTFE concentration and coating times. Then gas permeability of the coated carbon paper with emulsion of 3~5 μm PTFE was changed vastly. Characteristics of carbon paper coated with different PTFE emulsion were analyzed by FE-SEM, FT-IR spectroscopy and were evaluated by weight variations, gas permeability and water contact angle.

KEY WORDS : Carbon supports(탄소지지체), Polytetrafluoroethylene(PTFE), Hydrophobic coating(발수 코팅), Particle size(입자 크기), Gas permeability(가스 투과율)

1. 서 론

수소 및 탄화수소를 연소가 아닌 전기화학적 에너지로 직접 변화하여 전력을 생산하는 연료전지

기술은 녹색산업의 발달을 위해 주목을 받고 있다. 수소나 메탄올을 연료로 이용하는 연료전지의 가스 확산층(GDL, gas diffusion layer)은 연료 전지의 MEA(membrane electrode assembly)에 사용되어 연료 전지 성능에 영향을 주는 부품이다¹⁻³⁾. GDL 표면에 발생하는 플러딩 현상은 연료전지 효율 저하를 초

†Corresponding author : cwk5145@dankook.ac.kr

[접수일 : 2009.9.25 수정일 : 2009.10.23 게재확정일 : 2009.10.23]

래하며⁴⁻⁷⁾ 이를 방지하기 위하여 carbon paper 표면을 발수성 물질로 코팅하는 방법이 사용되었다⁸⁻¹²⁾. Carbon paper에 코팅된 발수성 물질은 연료전지의 작동 중 발생하는 수분이 탄소 지지체(GDL)에 형성된 기공을 차단하지 못하도록 한다. 본 연구에서는 발수성 물질로 PTFE를 사용하였다. PTFE는 불소를 포함하는 발수성 불화탄소수지이며 용융점이 327°C이며, 화학적으로 안정한 물질이다¹³⁾. Nano 입자크기를 가진 PTFE 현탁액(이하, N-PTFE)은 입자 크기가 작아 침투성이 좋으며 피코팅 물질과 접촉하는 면적이 넓다는 장점이 있다^{14,15)}. Micro 입자크기를 가진 PTFE 현탁액(이하, M-PTFE)은 여러 기업들이 생산하고 있으므로 국내 생산품으로 구입이 어렵지 않고 N-PTFE 현탁액보다 가격이 저렴하다. 본 실험에서는 두 종류 PTFE 현탁액을 이용한 함침 코팅을 실시한 carbon paper의 발수성 변화와 PTFE 코팅 층의 형성에 따른 탄소지지체의 표면구조와 가스 확산 통로의 변화를 관찰하고 탄소지지체의 가스투과도의 변화를 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

Polytetrafluoroethylene(PTFE) 현탁액을 이용한 carbon paper 코팅에 영향을 주는 PTFE 입자 크기 및 농도 변화를 조사하기 위하여 5~500nm와 3~5 μm 입자 크기를 가진 PTFE 현탁액을 다양한 농도로 제조하여 사용 하였다.

Carbon paper(toray industries, Inc.)는 코팅 전 불순물을 제거하기 위하여 아세톤으로 세척 후 진공 건조 하였다. 건조한 carbon paper를 PTFE 현탁액에 함침 시켜 PTFE를 도포 하였으며 함침 후 carbon paper 표면에 잔존하는 휘발분을 제거하기 위하여 진공 건조를 실시하였다. 건조한 carbon paper는 비활성 가스를 주입하며 30분간 390°C 고온에서 열처리하여 코팅 막을 형성 시켰다. 다양한 농도로 제조된 PTFE 현탁액으로 동일한 공정을 반복한 후 현탁액 농도 및 코팅 횟수에 의한 PTFE 코팅 막 특성을 조사하였다.

점도계(brookfield engineering, DV-2)를 사용하여 다양한 농도(10 wt.%, 15 wt.%, 20 wt.%)로 제조된 PTFE 현탁액 점도를 측정하였다. FE-SEM(hitachi high technologies, SU-70)으로 발수 처리 전, 후 carbon paper 표면 미세구조 변화 및 형태 변화를 분석하였다. PTFE 코팅 후의 질량변화를 정밀하게 측정하여 코팅량 제어 가능성을 평가 하였으며, 가스투과도는 PTFE 코팅된 carbon paper에 비활성 가스를 1kg/m²로 주입하여 측정하였다. PTFE로 코팅된 carbon paper의 발수성은 접촉각 측정기(KRUSS GmbH, DSA 100)를 이용하여 확인하였고, FT-IR(thermofisher scientific, nicolet 380)로 코팅된 carbon paper의 분광학적 특성을 분석하였다. 분석 결과들의 오차를 최소화하기 위해 접촉각 측정은 30 개소의 접촉각을 측정한 평균값을 표시하였다. 질량변화율은 5 회 이상의 칭량 평균값이 사용되었고 가스투과율 역시 5회 이상의 측정을 통해 얻어진 값을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

다양한 농도로 제조된 PTFE 현탁액 점도를 측정하여 Fig. 1에 그래프로 나타내었다. Fig. 1에서 10 wt.%, 15 wt.%와 20 wt.% N-PTFE 현탁액 점도는 각각 1.2 cP, 1.27 cP와 1.3 cP로 측정되는 반면 동일농도 M-PTFE 현탁액 점도는 1.8 cP, 2.1 cP와 2.3 cP로 측

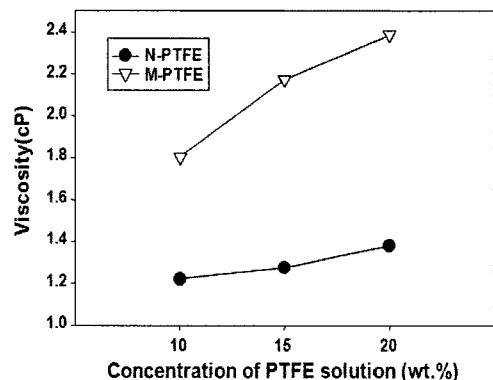


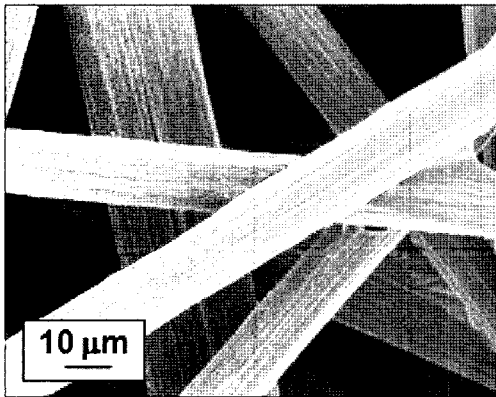
Fig. 1 Viscosity changes of PTFE emulsion at various concentration of N-PTFE and M-PTFE.

정되었으며 N-PTFE의 농도변화에 따라 증가하는 점도보다 M-PTFE의 농도변화에 따른 점도 증가율이 크게 나타났다. 이러한 점도 차이는 PTFE 현탁액에 포함된 PTFE 입자 크기에 영향을 받는다^{16,17}.

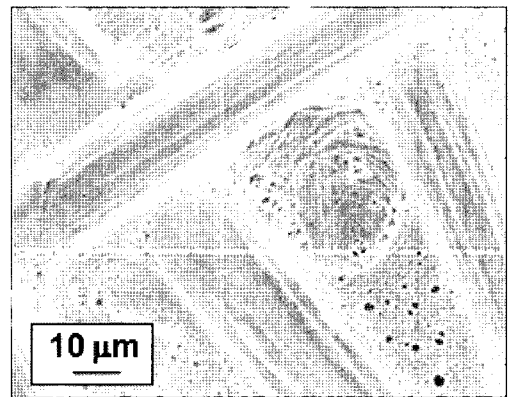
Carbon paper 발수 처리 전·후 표면 변화를 확인하기 위하여 FE-SEM 사진을 촬영하였다. Fig. 2(a)는 코팅 전 carbon paper 표면을 1000배 확대한 사진으로 7 μm ~10 μm 두께를 가진 탄소 섬유들이 불규칙적으로 교차하며 탄소 섬유들 사이에 가스가 이동할 수 있는 통로가 형성되어 있다. Fig. 2(b)는 carbon paper 표면을 고배율로 확대한 사진으로 탄소섬유 표면에는 스크래치가 형성된 탄소 섬유 표면 구조를 확인할 수 있다. Fig. 3(a)와 (b)는 15 wt.% PTFE 현탁액으로 1

회 코팅한 carbon paper 표면 사진이다. Fig. 3(a)는 PTFE로 코팅한 carbon paper의 표면을 1000배 확대한 사진으로 코팅된 PTFE가 탄소섬유 사이를 채우고 있는 모습이 확인 되었다. Fig. 3(b)는 탄소 섬유를 고배율로 확대한 사진으로, PTFE가 탄소 섬유의 표면에 균일한 코팅 층을 형성한 모습이 확인된다.

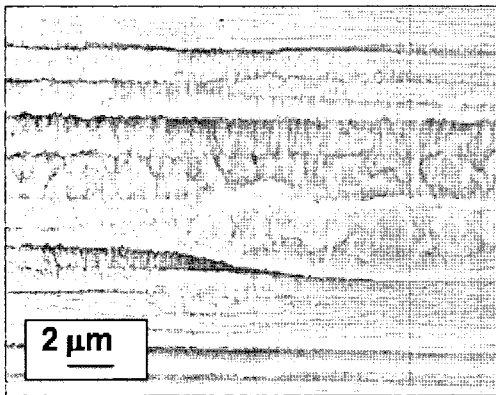
PTFE 현탁액의 농도변화와 코팅 횟수의 변화에 따른 코팅량의 변화를 조사하기 위해 코팅 후의 질량 변화를 측정하였다. (1)의 식을 이용하여 계산된 코팅 후의 질량변화를 Fig. 4(a)와 (b)에 N-PTFE와 M-PTFE현탁액의 농도와 코팅 횟수 변화에 따른 질량변화 결과를 나타내었다.



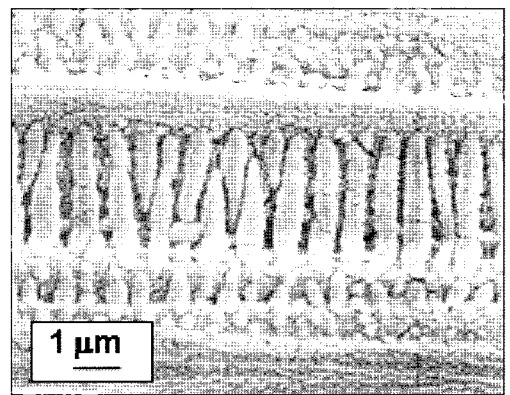
(a)



(a)



(b)



(b)

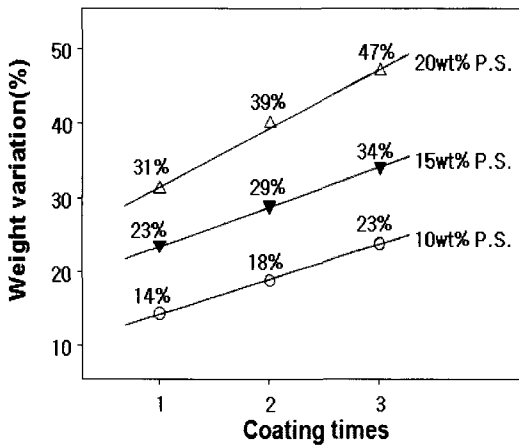
Fig. 2 FE-SEM images of as-purchased carbon paper (a : $\times 1000$, b : $\times 7620$).

Fig. 3 FE-SEM image of carbon paper after PTFE coating (a : $\times 1000$, b : $\times 7620$).

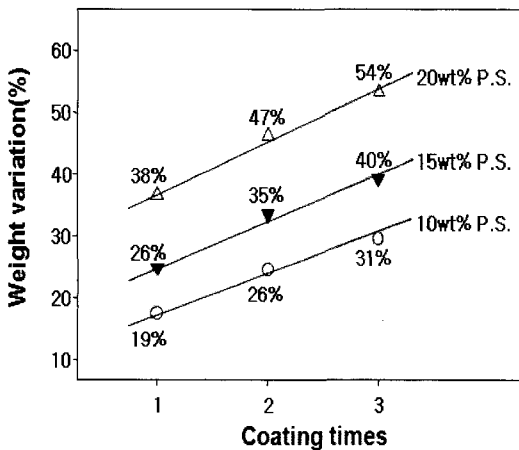
$$PTFE(g) = \frac{CP_1 - CP_0}{CP_1} \times 100\% \quad (1)$$

CP0 : 코팅 전 carbon paper의 질량
 CP1 : 코팅 후 carbon paper의 질량
 PTFE : 코팅된 PTFE의 질량

Figure 4(a)에 나타낸 10 wt.% N-PTFE 현탁액으로 1회 코팅한 carbon paper 질량변화율은 14%로 측정되었다. 15 wt.% 현탁액에서 23%, 20 wt.% 현탁액에서 31 wt.%로 측정되었고 현탁액의 농도와 함께 증가하는 경향을 보였으며 코팅 횟수가 증가할수록 질량변화율이 거의 일정하게 증가하였다. 1회 코팅 시에 발생하는 질량 변화는 15 wt.%와 20 wt.% PTFE 현탁액 점도가 10 wt.% PTFE 현탁액 점도 보다 높기 때문에 더 많은 PTFE가 carbon paper 표면에 코팅되는 것으로 사료된다. 코팅 횟수의 증가에 대한 질량 변화율이 일정한 것으로 보아 동일 농도 코팅 용액에서 코팅되는 PTFE 일정한 양으로 확인되었다. Fig. 4(b)는 M-PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper 질량 변화를 그래프이다. 10 wt.% M-PTFE 현탁액으로 1회 코팅한 carbon paper의 질량 변화율은 19%로 측정되었다. 15 wt.% 현탁액에서 26%, 20 wt.% 현탁액에서 38%로 계산되었으며 코팅 횟수 증가에 따라 직선적으로 증가하였으며 동일 농도의 N-PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper보다 큰 질량 증가율을 나타내었다. 이러한 결과는 동일 면적의 피코팅체에 코팅된 M-PTFE 현탁액에 분산된 PTFE 입자의 질량이 크기 때문으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 4 Weight variations of carbon paper after coating with (a) N-PTFE, (b) M-PTFE emulsion.

PTFE 코팅층의 발수성을 평가하기 위해 다양한 농도로 제조된 PTFE 현탁액으로 1회 코팅한 carbon paper 표면 접촉각을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다¹⁸⁾. 10 wt.% N-PTFE 현탁액으로 1회 코팅한 carbon paper의 접촉각은 138.2°로 측정되었고 15 wt.% 현

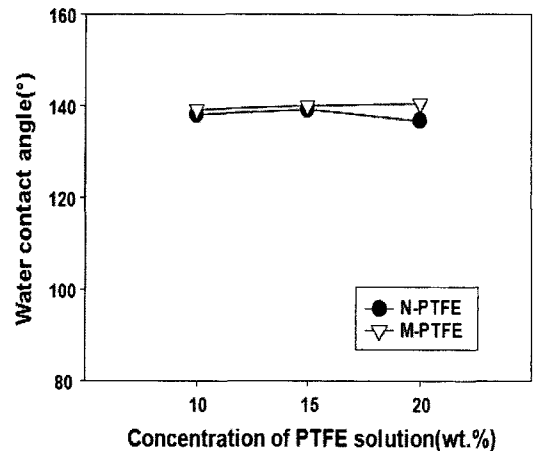


Fig. 5 Water contact angles of PTFE coated carbon paper at various concentration.

탁액에서 139.3°, 20 wt.% 현탁액에서 136.9°로 측정되었다. 10 wt.% M-PTFE 현탁액으로 1회 코팅한 carbon paper의 접촉각은 139.2°로 측정되었고 15 wt.% 현탁액에서 140.1°, 20 wt.% 현탁액에서 140.6°로 측정되었다. PTFE 현탁액으로 carbon paper를 코팅할 때 현탁액의 농도가 발수성에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 물과 접촉하였을 때 계면에너지가 높아 90° 이상의 접촉각을 나타내는 물질을 발수성 물질이라고 한다. 접촉각이란 액체와 고체가 접촉하고 있을 때 액체의 자유표면이 고체 표면과 이루는 각도를 말하며 액체 분자 사이 응집력과 액체, 고체 벽 사이의 부착력으로 결정되어 발수성의 기준이 되는 수치이다. 접촉각이 90° 이상일 때 발수성을 가진다고 하며 110° 이상일 때 고발수성, 150° 이상일 때 초발수성을 가진다고 한다¹⁹⁾. 본 실험을 통해 10 wt.% 이상의 농도를 가진 PTFE 현탁액으로 코팅한 모든 carbon paper에서 고발수성이 확인되었다. 표면 처리를 하지 않은 carbon paper의 접촉각과 표면장력 측정에 사용된 피코팅체에 diiodomethane이 흡수되어 정확한 측정이 불가능하였다.

10 wt.% M-PTFE 현탁액과 N-PTFE 현탁액으로 carbon paper를 1~3회 코팅한 후 접촉각을 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. N-PTFE로 1회 코팅

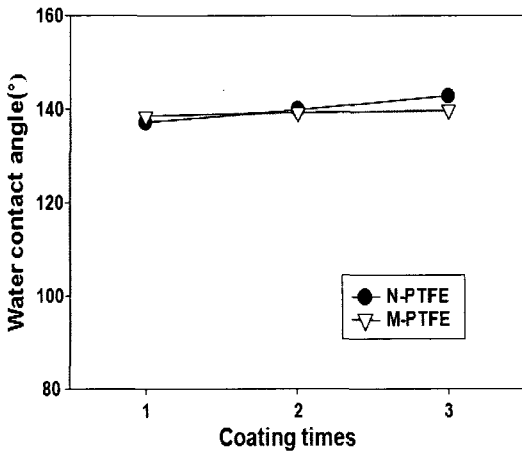


Fig. 6 Water contact angle of PTFE coated carbon paper with 5 wt.% PTFE emulsion as coating times.

한 carbon paper의 접촉각은 138.2°로 측정되었으며 2회 코팅 후 139.5°, 3회 코팅 후 140.6°로 측정되었다. M-PTFE로 1회 코팅한 carbon paper의 접촉각은 139.2°로 측정되었고 2회 코팅 후 139.7°, 3회 코팅 후 140.3°로 측정되었으며 GDL에 사용되는 carbon paper의 접촉각이 130~140°인 것으로 미루어 볼 때, 양호한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. PTFE 현탁액으로 carbon paper를 코팅하였을 때, 현탁액 농도 및 코팅횟수는 코팅된 carbon paper의 발수성에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 10 wt.%의 낮은 농도로 제조한 PTFE 현탁액으로 carbon paper를 1회 코팅하여 양호한 발수성을 부여 할 수 내었다는 것을 확인할 수 있었으며, PTFE 입자 크기는 발수성에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다.

다양한 농도로 제조한 PTFE 현탁액으로 carbon paper를 코팅한 후 가스 투과율을 코팅 횟수별로 측정 후²⁰⁾ Fig. 7에 나타내었다. 10~15 wt.% N-PTFE 현탁액으로 carbon paper를 1~3회 코팅하였을 때 표면에 코팅된 PTFE는 carbon paper의 가스 투과량에 영향을 미치지 않는 100%의 가스투과도가 측정되었다. 20 wt.% N-PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper의 가스 투과량은 코팅 횟수가 증가함에 따라 97%, 88%로 감소하는 결과를 나타내었다. 10 wt.% M-PTFE 현탁액으로 1회 코팅한 carbon paper는 가스투과도의 변화를 보이지 않았

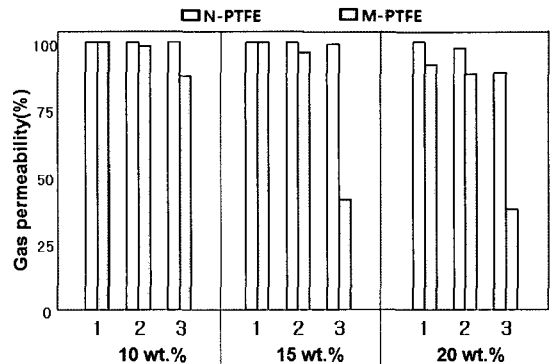
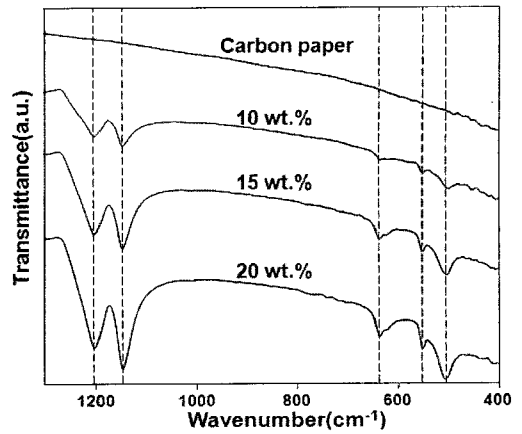


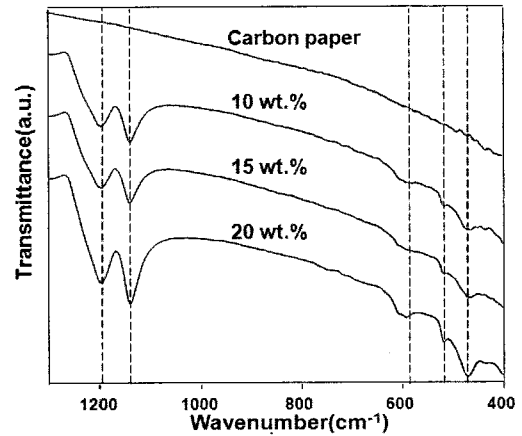
Fig. 7 Gas permeability of PTFE coated carbon paper as coating times.

으나 2회, 3회 코팅 횟수가 증가 할수록 가스 투과율이 98%, 87%로 감소하였다. 15 wt.% M-PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper는 1회 코팅 하였을 때, 가스투과도의 변화가 나타나지 않았으나, 코팅 횟수가 증가할수록 96%, 41%로 감소하였다. 20 wt.% PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper는 1회 코팅 하였을 때부터 가스투과도가 91%로 감소하였으며, 코팅 횟수가 증가할수록 88%, 37%로 감소되었다. 동일 농도에서 두 PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper의 가스 투과율은 코팅 횟수의 증가에 따라 질량의 변화와 함께 감소하였다. 특히 3회 M-PTFE 현탁액으로 코팅 한 경우 가스 투과율의 현격한 감소가 나타났다. 질량 변화량이 큰 것은 탄소섬유구조 사이를 메우는 PTFE 양이 많아지므로 가스 이동 통로가 좁아지는 것을 의미한다. 그러므로 충분한 발수성을 부여할 수 있는 최소 농도의 PTFE 현탁액으로 carbon paper를 코팅해야 한다. 10 wt.%, 15 wt.% N-PTFE 혼탁액으로 코팅한 carbon paper는 코팅 횟수의 증가에도 가스투과율의 변화가 적게 나타났다. M-PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper는 10 wt.%에서 1회 코팅하였을 때 가스투과율의 변화가 없었으나, 2회 코팅하였을 때부터 가스투과도의 변화가 나타나므로 코팅 시에 가스투과도를 유지하기 위해 N-PTFE 현탁액이 유리한 것으로 판단된다.

PTFE 현탁액으로 carbon paper를 코팅한 후 FT-IR을 이용하여 분광학적 특성변화를 측정하였다. Fig. 8(a)은 N-PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper 표면을 분석한 FT-IR스펙트럼이다. 발수처리 되지 않은 carbon paper의 스펙트럼은 탄소구조의 전형적인 스펙트럼으로 400~1300cm⁻¹ 영역에서 피크가 발견되지 않았으나 발수 처리한 carbon paper의 스펙트럼에서는 PTFE 피크들을 발견할 수 있었다. CF₂ 결합 영역(505~640cm⁻¹)에서 CF₂ rocking, CF₂ bending, CF₂ wagging을 나타내는 피크가 나타났고 1141cm⁻¹과 1200cm⁻¹ 피크에서 CF₂ symmetrical stretching과 CF₂ asymmetrical stretching을 나타내는 피크가 나타났으며, C=C 결합의 영역에서(1600~1680cm⁻¹) 피크가 나타났다²¹⁾. 이를 통해 코팅 후 carbon paper 표면에 PTFE가 코팅된 것을 확인 할



(a)



(b)

Fig. 8 FT-IR spectra of PTFE coated carbon paper with (a) N-PTFE, (b) M-PTFE emulsion.

수 있었다. 또한 각 피크들은 PTFE 현탁액 농도에 비례하여 증가 하는 모습을 나타내며, 농도가 증가 할수록 carbon paper에 코팅되는 PTFE의 양이 증가한다는 것을 분광학적으로 증명한다. Fig. 8(b)은 M-PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper FT-IR 스펙트럼이며, N-PTFE 현탁액으로 코팅한 carbon paper와 유사한 경향성을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

수소연료전지 등에 사용되는 GDL의 성능 평가

를 위해 입자 크기가 다른 PTFE 현탁액을 이용한 carbon paper 코팅에서 다음의 결론을 얻었다.

- 1) PTFE 현탁액 코팅 조건을 조절하여 carbon paper 표면에 코팅되는 PTFE 양을 조절하는 것이 가능한 것으로 확인되었다.
- 2) PTFE 현탁액으로 carbon paper를 코팅하였을 때, 현탁액 농도와 코팅횟수 및 PTFE 입자 크기는 코팅된 carbon paper의 발수성에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 3) 수소나 공기 등 기체의 투과 성능에 대한 평가에서 10 wt.%, 15 wt.% N-PTFE 혼탁액으로 코팅한 carbon paper는 코팅 횟수 증가에도 가스투과도 변화는 적었다. M-PTFE 현탁액으로 1회 코팅하였을 경우 100% 가스투과도를 유지하였지만 농도 및 코팅 횟수가 증가할수록 급격히 감소하였다.

후 기

본 연구는 2009년도 단국대학교 일반연구과제 연구비 지원으로 진행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

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*, Vol. 13, 2009, pp. 2430-2440.
- 2) Atilla koglu, "Review of proton exchange membrane fuel cell models", *International J. Hydrogen Energy*, Vol. 30, 2005, pp. 1181-1212.
- 3) 박창권, 조인수, 오병수, "고분자 전해질형 연료전지내의 질량유동이 성능에 미치는 영향", *한국수소 및 신에너지 학회 논문집*, Vol. 18, No. 4, 2007, pp. 422-431.
- 4) James Larminie, Andrew Dicks, "Fuel Cell System Explained (second edition)", Wiley, England, 2003, pp. 67-94.
- 5) Hui Li, Yanghua Tang, Zhenwei Wang, Zheng

- Shi, "A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell", *J. Power Sources*, Vol. 178, 2008, pp. 103-117.
- 6) 이현숙, 배병찬, 이재영, 임태훈, 하홍용, "직접메탄올 연료전지의 장기운전 특성 분석 및 성능향상 연구", *한국수소 및 신에너지 학회 논문집*, Vol. 16, No. 1, 2005, pp. 31-39.
- 7) S. Shimpalee, U. Beuscher, J. W. Van Zee, "Analysis of GDL flooding effects on PEMFC performance", *Electrochimica Acta*, Vol. 52, 2007, pp. 6748-6754.
- 8) 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", *J. Power Sources*, Vol. 194, 2009, pp. 146-160.
- 9) 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.
- 10) 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", *J. Power Sources*, Vol. 131, 2004, pp. 182-187.
- 11) 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.
- 12) Trung V. Nguyen, "A Gas Distributor Design for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, 1996, pp. L103-L105.
- 13) Rae P., Dattelbaum D., "The properties of polytetrafluoroethylene in compression", *Polymer*, Vol. 45, 2004, pp. 7615-7625.
- 14) A. Rogachev, M. Yarmolenko, A. V. Rahachou, S. Tamulevicius, I. Prosycevas, "Structure and

- properties of nano composite polymer coatings”, J. Physics, Vol. 14, No. 1, 2008, pp. 40-43.
- 15) 정문국, 송기세, 조태환, 최원경, “나노 사이즈 불화탄소수지 용액 농도에 따른 GDL 발수 코팅”, 한국 수소 및 신에너지 학회 논문집, Vol. 20, No. 4, pp. 323-330.
- 16) ZHAO Hia-Fei, LUO Zhong-Yang, NI Ming-Jiang, CEN Ke-Fa, “Dependence of NANofluid Viscosity on Particle Size and pH Value”, CHIN. PHYS. LETT, Vol. 26, No. 6, 2009, pp. 066202-1-3.
- 17) P. J. T. Mills, J. P. K. Seville, P. C. Knight, M. J. Adams, “The effect of binder viscosity on particle agglomeration in a low shear mixer/agglomerator”, Power Technology, Vol. 113, 2000, pp. 140-147.
- 18) T. Ous, C. Arcoumanisa, “Visualisation of water droplets during the operation of PEM fuel cells”, J. Power Sources, Vol. 173, 2007, pp. 137-148.
- 19) K. Tadanaga, N. Katata, T. Minami, “Super-Water-Repellent Al₂O₃ Coating Films with High Transparency”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 80, 1997, pp. 1040-1042
- 20) Jeff T. Gostick, Michael W. Fowler, Mark D. Pritzker, Marios A. Ioannidis, Leya M. Behra, “In-plane and through plane gas permeability of carbon fiber electrode backing layers”, J. Power Sources, Vol. 162, 2006, pp. 228-238.
- 21) Jielong S., Guozhong W., Yaodong L., Hongyan Z., “Study on PTFE aqueous dispersion irradiated by gamma ray”, J. Fluorine Chemistry, Vol. 127, 2006, pp. 91-96.