

미분쇄 탄소섬유가 첨가된 피치계 탄소섬유기반 기체확산층용 탄소종이 특성

함은광* · 윤동호** · 김병석*** · 서민강*†

Characterization of Milled Carbon Fibers-filled Pitch-based Carbon Paper for Gas Diffusion Layer

Eun-Kwang Ham*, Dong-Ho Yoon**, Byoung-Suhk Kim***, Min-Kang Seo*†

ABSTRACT: In this work, the pitch-based carbon paper (P-CP) was prepared by re-impregnating of binder pitches and PAN-based milled carbon fibers (MCF) at low temperature carbonization process. The influence of MCF content on physicochemical properties of MCF/P-CP was investigated. As a result, the tensile strength of MCF/P-CP was increased sharply from 10 wt.% to 20 wt.% of MCF. Also, the increase of MCF content led to the decrease of interfacial contact resistivity and the improvement of electrical and thermal conductivity of MCF/P-CP. These results were probably due to the increase of density of MCF/P-CP, resulting in the formation of electrically and thermally conductive paths of the carbon paper.

초 록: 본 연구에서는 피치계 탄소섬유기반 탄소종이에 바인더 피치와 PAN계 미분쇄 탄소섬유를 첨가하여 저온탄화를 통해 재함침된 탄소종이를 제작하였으며, 미분쇄 탄소섬유의 첨가가 탄소종이의 기계적 및 전기적 특성과 열전도도에 미치는 영향을 알아보았다. 실험 결과, 인장강도는 미분쇄 탄소섬유 함량 10 wt.%부터 20 wt.%까지 첨가하였을 때 크게 증가하였다. 또한, 미분쇄 탄소섬유 함량이 증가함에 따라 계면접촉저항은 감소하였으며, 전기전도도 및 열전도도는 증가하였다. 이러한 결과는 미분쇄된 탄소섬유의 첨가가 탄소종이의 밀도를 증가시킴에 따라 전기적 및 열적 전달 경로가 형성되었기 때문이라고 판단된다.

Key Words: 탄소종이(Carbon paper), 피치계 탄소섬유(Pitch-based carbon fibers), PAN계 탄소섬유(PAN-based carbon fibers), 인장강도(Tensile strength), 계면접촉저항(Interfacial contact resistivity), 전기/열전도도(Electrical/thermal conductivities)

1. 서 론

산업의 발달에 따른 생산공정의 자동화와 생활 가전제품과 자가용 보급의 증가에 따른 에너지 소비가 증가되고 있다. 오늘날 주요 에너지 공급원은 석유나 석탄과 같은 화

석연료로서 의존도가 가장 높고 유한자원인 화석에너지의 무분별한 사용에 따른 자원의 고갈 문제, 지구온난화와 대기오염과 같은 환경오염 문제가 오래 전부터 제기되었으며, 특히 최근에 화석연료가 연소되면서 발생하는 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 탄화수소 등의 대기오염물질

Received 16 August 2016, received in revised form 31 October 2016, accepted 31 October 2016

*Korea Institute of Carbon Convergence Technology

*†Korea Institute of Carbon Convergence Technology, Corresponding author (E-mail: seomk721@kctech.re.kr)

**R&D Center, KUK IL Paper MFG. Co., Ltd.

***Department of Organic Materials and Fiber Engineering, Chonbuk National University

과 미세먼지를 포함한 대기오염에 관한 문제가 크게 이슈화 되고 있다. 이와 같은 환경문제를 해결하기 위해 기존 화석 연료를 대체 가능한 친환경 및 신재생 에너지가 산업계 및 학술계에서 많은 관심을 받고 있으며, 에너지 문제 해결에 관한 다양한 대안들이 제시되고 있다[1-4].

신재생 에너지는 자연상태에서 계속 제공되는 무한 재생이 가능한 에너지로서 이산화탄소를 비롯한 유해물질의 배출이 거의 없는 것이 가장 큰 장점이다. 이러한 신재생 에너지는 태양열, 풍력, 해양, 지열, 바이오매스, 수소에너지, 연료전지 등으로 나눌 수 있으며, 그 중 연료전지는 높은 효율과 환경 친화적 특성으로 인해 미래의 에너지원으로 주목 받고 있다[1,5-9].

연료전지는 19세기 초반 영국에서 발명되었고 20세기 중반부터 본격적인 연구가 시작되었으며 항공우주와 같은 특수 분야에서 제한적으로 사용되었다. 연료전지의 작동원리는 물을 전기분해하는 반응의 역반응을 이용한 것으로 수소와 산소의 전기화학 반응으로 생기는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 기술로서 수소와 산소가 결합되면서 전기, 물, 열이 생성되는 친환경적인 기술이다. 이러한 연료전지는 발전효율은 40% 이상이며 열효율을 포함하면 80% 정도의 에너지 효율을 얻을 수 있고 이는 화력발전 대비 최대 50% 정도의 연비향상 효과가 있다[1,10-12].

연료전지는 전극과 전해질로 구성되며 사용되는 전해질과 작동온도에 따라 알칼리형(alkaline fuel cell, AFC), 인산형(phosphoric acid fuel cell, PAFC), 용융탄산염형(molten carbonate fuel cell, MCFC), 고체산화물형(solid oxide fuel cell, SOFC), 직접메탄올연료전지(direct methanol fuel cell, DMFC), 고분자전해질형(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)으로 다양 하지만 기본적으로 같은 원리에 의해서 작동된다[1].

다양한 연료전지 형태중 고분자 전해질형 연료전지는 저온에서 동작되고 출력밀도가 높기 때문에 소형화가 가능하며, 응용기술 적용이 용이하기 때문에 자동차용, 휴대용, 가정용 등 폭 넓은 용도로 상업화가 가능하다는 장점이 있다[3,13-18].

고분자 전해질형 연료전지는 분리판, 전극, 고분자 전해질막으로 구성되며, 여기서 고분자 전해질 막의 전극은 촉매층, 고분자 전해질, 가스확산층으로 구성되는데, 이때 가스확산층은 전극과 분리판 사이의 집전체 역할을 하고 반응물과 생성물의 매개체 역할을 한다. 따라서 가스확산층은 전기전도도와 기계적 물성이 우수하고 소수성의 다기공성 재료가 적합하기 때문에 탄소종이가 가스확산층에 알맞은 재료라고 보고되고 있다[11,15,17-19].

또한, 연료전지의 가스확산층용 탄소종이에 관련된 연구는 기계적 물성이 우수한 PAN계 탄소섬유를 활용한 연구가 주를 이루고 있다[10,14,16]. 하지만 피치계 탄소섬유는 PAN계 탄소섬유에 비해 전기적 특성과 열적특성이 우수

하다는 장점이 있기 때문에 피치계 기반 탄소종이에 PAN계 미분쇄 탄소섬유 또는 바인더를 이용하여 기계적 물성 강화한다면 피치계 기반 가스확산층용 탄소종이 개발이 기대된다[8].

따라서 본 연구에서는 피치계 탄소섬유로 제작된 탄소종이를 바인더 피치와 미분쇄된 PAN계 탄소섬유를 첨가하여 재함침후 800°C에서 저온탄화하여 재함침된 탄소종이를 제작하여 PAN계 탄소섬유와 저온탄화가 전기적 특성과 기계적 특성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구의 탄소종이 제조에 사용된 탄소섬유는 GS Caltex社의 사이징 처리하지 않은 피치계 탄소섬유이며, 수용성 무기계 바인더인 polyvinyl alcohol(PVA)를 사용하였다.

탄소종이 재함침시 첨가되는 보강재로 사용된 탄소섬유는 Apply Carbon SA社의 평균길이 160 μm 의 PAN계 미분쇄 탄소섬유를 사용하였으며, 바인더는 GS Caltex社의 바인더 피치를 사용하였다. 바인더 피치의 용매로는 퀴놀린을 사용하였다.

2.2 탄소종이 재함침 및 저온탄화

탄소종이 제조는 피치계 탄소섬유의 분산을 위해서 증류수, polyvinyl alcohol(PVA), 분산제를 각각 질량비 89:10:1로 제조하였다. 제조된 분산용액에 피치계 탄소섬유를 분산시킨후 피치계 탄소섬유/분산제 혼합용액을 틀에 초조하고 건조시켜 탄소종이를 제작하였다.

제조된 탄소종이의 전기 및 열전도도, 기계적 물성을 향상시키기 위해 바인더 피치와 평균 길이 160 μm 의 미분쇄된 PAN계 탄소섬유를 퀴놀린에 혼합하여 바인더 피치/미분쇄 탄소섬유/퀴놀린 용액을 제작하였으며, 5 × 5 cm^2 크기의 탄소종이에 함침시킨 다음 재함침된 탄소종이의 퀴

Table 1. Experimental Names of the Samples

Experimental methods	Experimental names
As received pitch based carbon paper	P-CP
Pitch based carbon paper with 0 wt.% PAN based milled carbon fibers / binder pitch	0MCF/P-CP
Pitch based carbon paper with 7 wt.% PAN based milled carbon fibers / binder pitch	7MCF/P-CP
Pitch based carbon paper with 10 wt.% PAN based milled carbon fibers / binder pitch	10MCF/P-CP
Pitch based carbon paper with 15 wt.% PAN based milled carbon fibers / binder pitch	15MCF/P-CP
Pitch based carbon paper with 20 wt.% PAN based milled carbon fibers / binder pitch	20MCF/P-CP

놀린을 제거하기 위해 110°C 오븐에서 10시간 동안 건조시켰다. 건조된 탄소종이를 열가압성형기(hot-press)를 이용하여 1 MPa의 압력을 주어 180°C에서 5분간 압착한 다음 800°C에서 저온탄화하여 제작하였으며, 시편명칭을 Table 1에 정리하였다.

2.3 기계적 물성

밀도는 단위 체적당 중량으로 겉보기 밀도를 측정하였으며 다음과 같이 밀도를 계산하였다.

$$\text{Density (g/cm}^3\text{)} = \frac{M \text{ (g)}}{T \text{ (cm)} \times W \text{ (cm)} \times L \text{ (cm)}} \quad (1)$$

여기서, M 은 시편의 무게, T 는 시편의 두께, W 는 시편의 넓이, L 은 시편의 길이이다.

탄소종이의 기계적 물성을 인장강도를 통하여 알아보았으며, 만능 시험기(universal testing machine, LR5K, Lloyd, England)를 사용하여 측정하였다.

2.4 전기적 특성

탄소종이의 계면접촉저항(interfacial contact resistance) 측정은 Fig. 1과 같이 하였으며, 탄소종이의 양면에 구리판을 접촉시켜 탄소종이의 두께가 450 μm 가 되도록 압착하여 구리판에 전류를 주어 전압차를 측정하였으며, 다음과 같이 계면접촉저항을 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{Interfacial contact resistance (m}\Omega\text{cm}^2\text{)} \\ = \frac{T \text{ (cm)} \times W \text{ (cm)} \times V \text{ (V)}}{I \text{ (A)}} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, T 는 시편의 두께, W 는 시편의 넓이, V 는 접촉면의 전압, I 는 접촉면에 인가되는 전류다.

또한, 탄소종이의 전기전도도를 알아보기 위해 면저항 측정기(Mitsubishi Chemical, Japan)를 이용하여 시편의 5점을 측정 후 다음 식으로 계산하여 평균값을 구하였다.

$$\text{Electrical Conductivity (S/cm)} = \frac{1}{R} \times \frac{L}{A} \quad (3)$$

여기서, R 은 저항, A 는 시편의 단면적, L 은 전압 접촉부 사이의 거리이다.

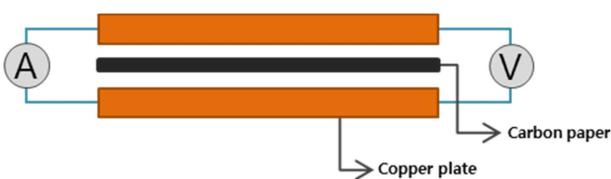


Fig. 1. Schematic diagram of the test for interfacial contact resistance

2.5 열전도도

탄소종이의 열전도도를 측정하기 위해 탄소종이를 25 × 25 mm²로 제작하였고 열전도도 측정기(TPS 2500S, Hot Disk AB.)를 이용하여 측정하였고 다음 식으로 열전도도를 계산하였다.

$$\Delta T_s(\tau) = P_0(\pi^{3/2}r\lambda)^{-1}D(\tau) \quad (4)$$

여기서, P_0 는 열전도율 측정 프로브의 출력, r 은 프로브의 반경, λ 는 시료물질의 열전도율, τ 는 $\tau = (t/\theta)^{1/2}$ 로 정의되고, $\theta = r^2/\alpha$ 이다.

2.6 모폴로지 특성

탄소종이의 모폴로지 특성은 주사형 전자현미경(scanning electron microscope, AIS2000C, Seron Tech., Korea)을 사용하여 관찰하였다.

3. 결 과

3.1 밀도

PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이의 밀도 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 실험 결과, 재함침되지 않은 탄소종이(P-CP)의 밀도는 0.23 g/cm³로 측정되었고, 바인더 피치로 재함침된 탄소종이(0MCF/P-CP)의 밀도는 0.29 g/cm³로 측정되어 재함침되지 않은 탄소종이에 비해 밀도가 증가하였다. 또한, 기계적 물성 향상을 위해 첨가한 PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량이 증가할수록 밀도는 증가하여 탄소종이(20MCF/P-CP) 시편의 경우 밀도가 0.38 g/cm³로 가장 높게 측정되었다.

3.2 인장특성

PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이의 인장강도 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실험 결

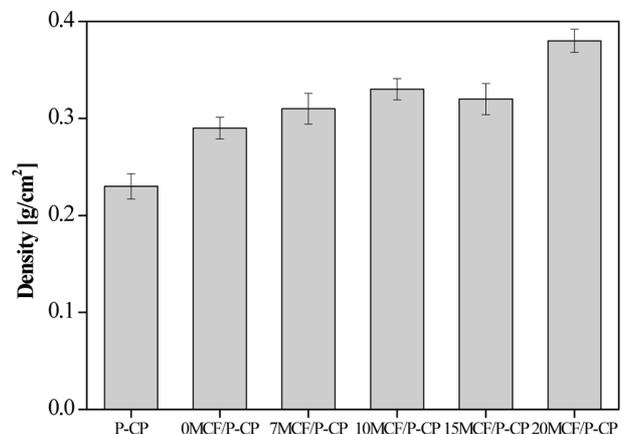


Fig. 2. Density of pitch based carbon paper with different PAN carbon fiber contents

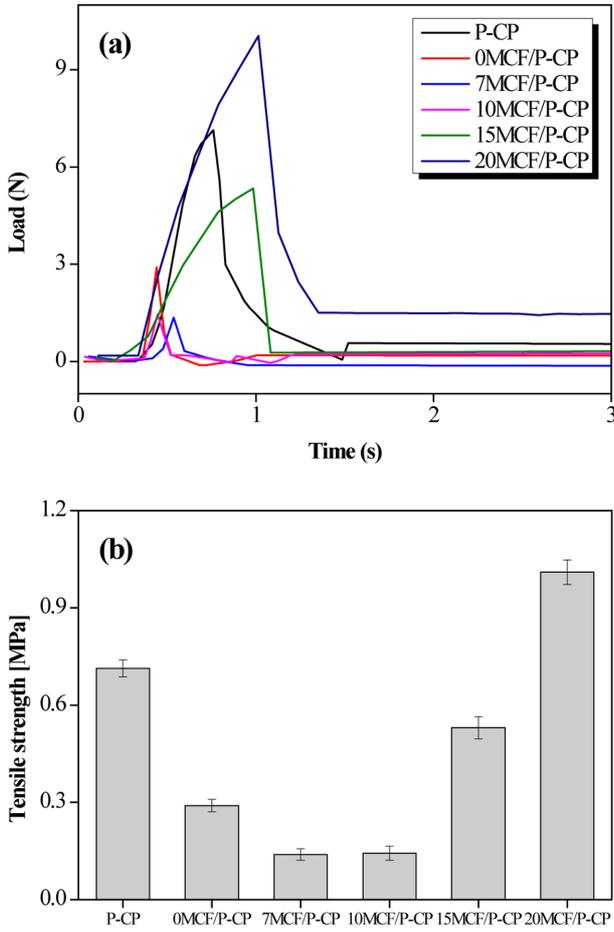


Fig. 3. Tensile properties of pitch based carbon paper with different PAN carbon fiber contents; (a) load-time diagrams and (b) tensile strength

과, 재함침하지 않은 탄소종이(P-CP)의 인장강도는 0.7 MPa로 측정되었으며, 0~7 wt.% PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치가 함침된 탄소종이(0MCF/P-CP, 7MCF/P-CP)는 각각 0.3, 0.1 MPa로 측정되면서 재함침하지 않은 탄소종이에 비해 인장강도가 감소되었다.

15 wt.% PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치가 함침된 탄소종이(15MCF/P-CP)의 인장강도 증가 폭이 크게 증가되어 0.5 MPa로 측정되었고, 20 wt.% PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이(20MCF/P-CP)의 인장강도는 1 MPa로 가장 높은 값이 측정되었다. 이는 저온탄화 과정에서 열에 의해 탄소종이 내의 탄소섬유의 물성 감소를 초래하였기 때문에 재함침하지 않은 탄소종이보다 PAN계 미분쇄 탄소섬유를 7 wt.%까지 첨가하여 재함침된 탄소종이의 인장강도가 다소 감소되었다고 판단된다. 하지만 PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량을 크게 증가 시킬수록 인장강도가 향상된 결과를 미루어 보았을 때 기계적 물성이 우수한 PAN계 탄소섬유가 피치계 기반 탄소종이 내에서 바인더 피치와 함께 결합력을 향상시킴으로써 기

계적 물성이 증가에 영향을 주었다고 판단된다[8,11].

3.3 전기적 특성

가스확산층으로 사용되는 탄소종이는 전자를 분리판에서 또는 분리판으로부터 전달하는 전기전도체의 역할을 하기 때문에 계면접촉저항 및 전기전도도는 중요한 요소이다[3,7-9].

Fig. 4는 PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이의 계면접촉저항을 나타낸 결과이다. PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량이 증가할수록 계면접촉저항은 감소되었으며, 특히 20 wt.% PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이(20MCF/P-CP)의 계면접촉저항은 8 mΩcm²로 재함침하지 않은 탄소종이(P-CP)의 계면접촉저항 19 mΩcm²에 비해 크게 감소하였다.

Fig. 5는 PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이의 전기전도도를 나타낸 결과로서 PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량이 증가할수록 전기전도도는 증가되었으며, 재함침하지 않은 탄소종이(P-CP)에 비해 바인더 피치로 재함침된 탄소종이(0MCF/P-CP)의 전기전도도는 크

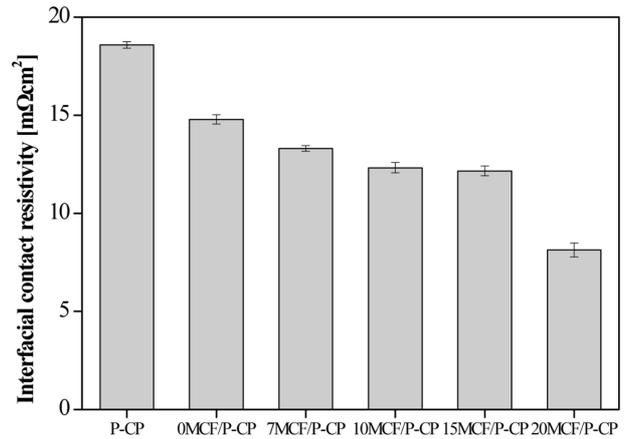


Fig. 4. Interfacial contact resistivity of pitch based carbon paper with different PAN carbon fiber contents

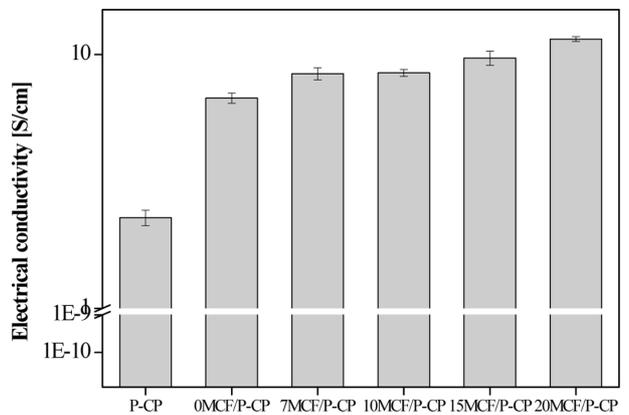


Fig. 5. Electrical conductivity of pitch based carbon paper with different PAN carbon fiber contents

게 증가하였고, PAN계 미분쇄 탄소섬유가 첨가됨으로써 전기전도도가 더욱 증가됨을 알 수 있었다. PAN계 미분쇄 탄소섬유가 7 wt.% 이상 첨가되었을 때부터 완만하게 증가하였으며, 20 wt.% PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이(20MCF/P-CP)의 전기전도도는 1.2×10^1 으로 가장 높게 측정되었다. 이는 탄소종이 내에 PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량이 증가함에 따라서 충전 밀도가 증가되어 전자가 이동할 수 있는 전기적 네트워크가 증가하였다. 또한, 일반적으로 탄소섬유의 탄화공정을 거치면 결정성이 향상되고 전도도가 증가된다고 보고되며, 이러한 원리에 따라 PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이가 저온탄화 공정을 거치면서 탄소종이 내의 탄소섬유와 바인더 피치의 결정성이 증가된 결과로 계면접촉저항은 감소되었고 전기전도도는 증가된 것으로 판단된다[8-10].

3.4 열전도도

연료전지가 작동될때 지속적인 전극반응에 의해 내부온도가 상승하므로 내부 열을 방출하기 위해 연료전지의 가스확산층용 탄소종이의 높은 열전도도 특성은 중요한 요소 중 하나이다[3,20].

PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이의 열전도도 측정 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 실험 결과, 재함침하지 않은 탄소종이(P-CP)의 열전도도는 0.7 W/mK로 측정되었고 PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량을 증가할수록 열전도도가 증가하는 결과를 나타내었으며, 20 wt.% PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이(20MCF/P-CP)의 열전도도는 0.8 W/mK로 가장 높게 측정되었다. 이는 전기전도도가 증가된 원인과 마찬가지로 탄소종이 내에 PAN계 미분쇄 탄소섬유 함량이 증가함에 따라 밀도가 증가하였으며, 이에 따라 열전도 네트워크가 많아졌다고 판단되며, 저온탄화 공정에 따라 바인더 피치

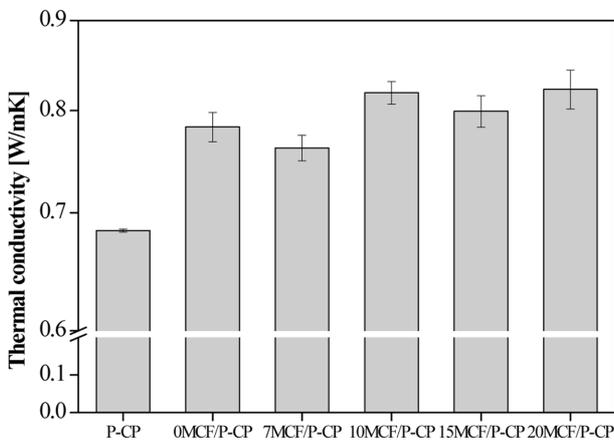


Fig. 6. Thermal conductivity of pitch based carbon paper with different PAN carbon fiber contents

와 탄소섬유의 결정성 증가에 따라 열전도도가 증가되었다고 판단된다[8].

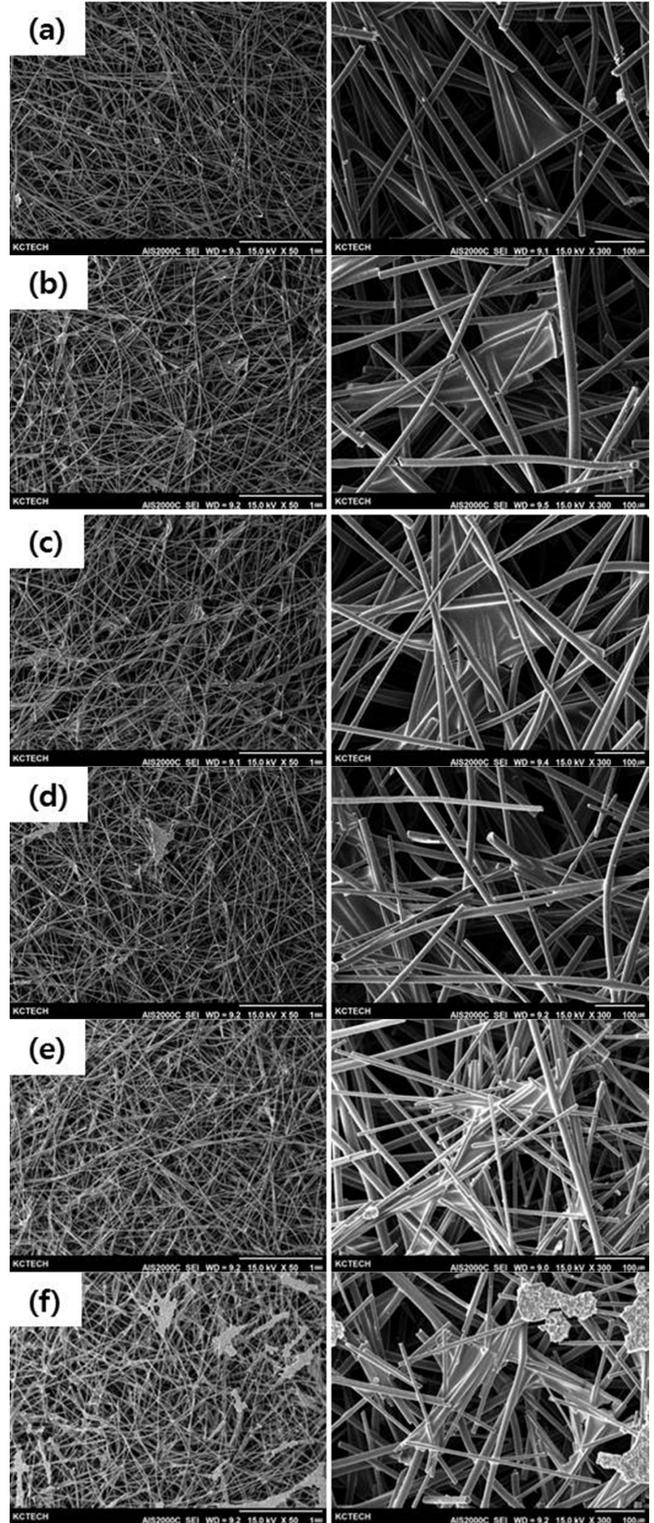


Fig. 7. SEM images of pitch based carbon paper with different PAN carbon fiber contents : (a) P-CP, (b) 0MCF/P-CP, (c) 7MCF/P-CP, (d) 10MCF/P-CP, (e) 15MCF/P-CP, and (f) 20MCF/P-CP

3.5 모폴로지

PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치로 재함침된 탄소종이의 모폴로지 특성을 Fig. 7에 나타내었다. 그 결과, PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량이 증가할수록 탄소종이 표면의 밀도가 증가하는 것을 관찰하였고 탄소종이의 섬유 웹을 형성하고 있는 피치계 탄소섬유가 PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치에 결합되어 많은 접점이 형성된 것을 관찰하였으며, 이와 같은 접점 형성 때문에 계면접촉저항의 감소와 전기전도도 및 열전도도가 증가되었다고 판단된다[9,10].

4. 결 론

본 연구에서는 피치계 탄소섬유 기반 탄소종이에 PAN계 미분쇄 탄소섬유와 바인더 피치를 첨가하여 800°C의 저온탄화공정을 통해 재함침된 탄소종이를 제작하였으며, 재함침된 탄소종이 내의 미분쇄 탄소섬유와 저온탄화가 기계적, 전기적, 열적 특성에 미치는 영향을 알아보았다.

결과로서, 재함침된 탄소종이의 인장강도는 PAN계 미분쇄 탄소섬유가 7 wt.%까지 첨가되었을 때 다소 감소하였지만 PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량을 10 wt.% 이상 첨가되었을 때부터 인장강도가 증가되기 시작하여 20 wt.%까지 첨가되었을 때 가장 높은 값이 측정되었다. 계면접촉저항은 PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량이 증가됨에 따라서 낮은 저항값이 측정되었고 전기전도도, 열전도도는 PAN계 미분쇄 탄소섬유의 함량이 증가함에 따라서 높은 전기전도도 및 열전도도가 측정되었다. 이는 재함침된 탄소종이 내의 PAN계 미분쇄 탄소섬유 함량 증가에 따라 전기 및 열이 이동하는 통로가 많아짐에 따라서 증가된 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 에너지개발사업(폭 2 m 이상 대량생산 가능한 Wet-laid 공정을 이용한 연료전지 GDL용 Pitch계 카본페이퍼 개발: 20153030031710)의 지원으로 수행된 것이며, 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- Lee, K.S., Sim, S.M., and Kim, D.M., "Performance of Fuel Cell with PEMFC Fabricated under Different Pressure", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 24, No. 1, 2013, pp. 70-75.
- Kim, S.H., Lee, Y.G., Seo, S.H., Joo, H.J., and Yoon, S.J., "Structural Design and Installation of Tracking-type Floating PV Generation System", *Composites Research*, Vol. 27, No. 2, 2014, pp. 59-65.
- Heo, S.I., Oh, K.S., Jang, J.H., Yang, Y.C., and Han, K.S., "A Study on Precuring Condition of the 2-step Manufacturing Method for PEMFC Composite Bipolar Plates", *Composites Research*, Vol. 20, No. 2, 2007, pp. 10-16.
- Kim, B.J., Lim, S.D., Sohn, Y.J., Kim, C.S., Yang, T.H., and Kim, Y.C., "The Effect of Stack Clamping Pressure on the Performance of a Miniature PEMFC Stack", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 20, No. 6, 2009, pp. 499-504.
- Stambula, S., Gauquelin, N., Bugnet, M., Gorantla, S., Turner, S., Sun, S., Liu, J., Zhang, G., Sun, X., and Botton, G.S., "Chemical Structure of Nitrogen-Doped Graphene with Single Platinum Atoms and Atomic Clusters as a Platform for the PEMFC Electrode", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 118, 2014, pp. 3890-3900.
- Chun, J.H., Jo, D.H., Lee, J.Y., and Kim, S.H., "Numerical Study on the Effect of Gas Diffusion Layer (GDL) Properties in Cathode on the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 50, No. 3, 2012, pp. 556-561.
- Assumma, L., Nguyen, H.D., Iojoiu, C., Lyonnard, S., Mercier, R., and Espuche, E., "Effects of Block Length and Membrane Processing Conditions on the Morphology and Properties of Perfluorosulfonated Poly(arylene ester sulfone) Multiblock Copolymer Membranes for PEMFC", *Applied Materials Interfaces*, Vol. 7, 2015, pp. 13808-13820.
- Park, S.J., Seo, M.K., Park, M.L., and Kim, H.Y., *Carbon Materials*, Myoungmoon Pub. Co., Seoul, Republic of Korea, 2015.
- Ko, T.J., Kim, S.H., Hong, B.K., Lee, K.R., Oh, K.H., and Moon, M.W., "High Performance Gas Diffusion Layer with Hydrophobic Nanolayer under a Supersaturated Operation Condition for Fuel Cells", *Applied Materials Interfaces*, Vol. 7, 2015, pp. 5506-5513.
- Lee, J.H., Yoo, Y.J., and Park, S.J., "Preparation and Electrical Properties of Carbon Paper Using Chopped Carbon Fiber", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 24, No. 2, 2013, pp. 121-125.
- Kim, S.J., Park, S.B., and Park, Y.I., "Fabrication of Gas Diffusion Layer for Fuel Cells Using Heat Treatment Slurry Coating Method", *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 25, No. 2, 2012, pp. 65-73.
- Jeong, H.S., Kim, J.I., Lee, S.H., Lim, C.H., Ahn, B.K., and Kim, C.J., "Analysis of Mass Transport in PEMFC GDL", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 36, No. 10, 2012, pp. 979-988.
- Jabbour, L., Robin, C., Nandjou, F., Vincent, R., Micoud, F., Poirot-Crouvezier, J.P., d'Arbigny, J., and Gerard, M., "Feasibility of In-plane GDL Structuration: Impact on Current Density Distribution in Large-area Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 299, 2015, pp. 380-390.
- Tamayol, A., McGregor, F., and Bahrami, M., "Single Phase Through-pane Permeability of Carbon Paper Gas Diffusion Layers", *Journal of Power Sources*, Vol. 204, 2012, pp. 94-99.
- Park, J.M., Oh, H.Y., Cho, J.H., Min, K.D., Lee, E.S., and Jyoung, J.Y., "Study on the Durability Characteristics of the PEM Fuel Cells having Gas Diffusion Layer with Different Micro Porous

- Layer Penetration Thickness”, *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 24, No. 3, 2013, pp. 216-222.
16. Shim, J.P., Han, C.S., Sun, H.J., Park, G.S., Lee, J.J., and Lee, H.K., “Preparation and Characterization for Carbon Composite Gas Diffusion Layer on Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells”, *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 1, 2012, pp. 34-42.
 17. Choi, J.M., Kim, T.J., Hyun, M.S., Peck, D.H., Kim, S.K., Lee, B.R., Park, J.S., and Jung, D.H., “Preparation of Bipolar Plated for Fuel Cell Using CNT/Graphite Nano-Composite”, *Carbon Science*, Vol. 6, No. 3, 2005, pp. 181-187.
 18. Hung, C.J., Liu, C.H., Wang, C.H., Chen, W.H., Shen, C.W., Liang, H.C., and Ko, T.H., “Effect of Conductive Carbon Material Content and Structure in Carbon Fiber Paper Made from Carbon Felt on the Performance of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, *Renewable Energy*, Vol. 78, 2015, pp. 364-373.
 19. Lee, J.J., Kim, I.T., Zhang, Y., Lee, H.K., and Shim, J.P., “Comparison of Cell Performance with Physical Properties of Gas Diffusion Layers in PEMFCs”, *Journal of the Korean Electrochemical Society*, Vol. 10, No. 4, 2007, pp. 270-278.
 20. Zamel, N., Litovsky, E., Li, X., and Kleiman, J., “Measurement of the Through-plane Thermal conductivity of Carbon Paper Diffusion Media for the Temperature Range from -50 to +120°C”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 2, 2011, pp. 12618-12625.