

가스확산층의 압축에 따른 공극률 및 기체투과율의 변화

이 용 택*†

* 한남대학교 기계공학과

Variation of Porosity and Gas Permeability of Gas Diffusion Layers Under Compression

Yongtaek Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.

(Received January 21, 2013 ; Revised March 14, 2013 ; Accepted March 18, 2013)

Key Words: Gas Diffusion Layer(가스확산층), Proton Exchange Membrane Fuel Cell(PEMFC 고분자전해질료전지), Compression(압축), Porosity(공극률), Gas Permeability(기체투과율), Pore Network(공극네트워크)

초록: 본 연구는 높은 압력으로 체결되어 있는 고분자전해질연료전지(PEMFC) 스택의 구성부품중 가장 크게 변형되는 가스확산층(GDL)의 공극률과 기체투과율의 변화를 제시하였다. 압축하중에 따른 체적변화를 실험을 통하여 측정하고 기존에 제시된 관계식을 이용하여 공극률과 기체투과율의 변화를 예측하였다. 또한 물의 배출을 향상시키기 위하여 첨가되는 PTFE 가 압축상태의 GDL 의 공극률과 기체투과율에 미치는 영향을 연구하였다. 물질전달에 직접 영향을 미치는 기체투과율은 PTFE 가 많이 포함된 GDL 에서 급격하게 감소하였다. 결과적으로 같은 압축하중으로 체결하는 경우 GDL 의 PTFE 함량에 따라서 공극네트워크를 통한 물질전달은 크게 달라질 수 있다. 본 결과를 이용하면 GDL 에서의 전달현상에 대한 개선된 상관식을 개발할 수 있고 그로 인하여 모델링의 정확성을 향상시킬 수 있다.

Abstract: This study suggested the variations of porosity and gas permeability of gas diffusion layers (GDLs), which are easily deformed among the components of a highly compressed PEMFC stack. The volume change owing to compression was measured experimentally, and the variations in the porosity and gas permeability were estimated using correlations published in previous literature. The effect of polytetrafluoroethylene (PTFE) which is added to the GDLs to enhance water discharge was investigated on the variations of porosity and gas permeability. The gas permeability which strongly affects the mass transport through GDL, decreases sharply with increasing compression when the GDL has high PTFE loading. As a result, the mass transport through the pore network of GDL can be changed considerably according to the PTFE loading even with the same clamping force. The accuracy of modeling of transport phenomena through GDL can be improved due to the enhanced correlations developed based on the results of this study.

- 기호설명 -

CR : 압축률, compression ratio
 d : 공극직경 (m)
 d_g : 탄소섬유 직경 (m)
 K : 기체투과율 (m^2)
 K_a : kozeny 상수
 W_A : GDL 면적당 무게 (kg/m^2)
 δ : GDL 두께 (m)
 ϵ : 공극률

ρ : 고체부분 밀도 (kg/m^3)

하첨자

0 : 비압축 초기상태

1. 서 론

1.1 연구배경

고분자 전해질 연료전지 (PEMFC)의 성능은 촉매층에서의 전기화학반응 속도와 더불어 촉매층으로 전달되는 반응물질의 물질이동 속도에 의하여 결정된다. 수소는 PEMFC 의 연료로 사용되며 산화제인 산소는 주로 공기의 형태로 공급된다. 이

† Corresponding Author, neotrin@hnu.kr

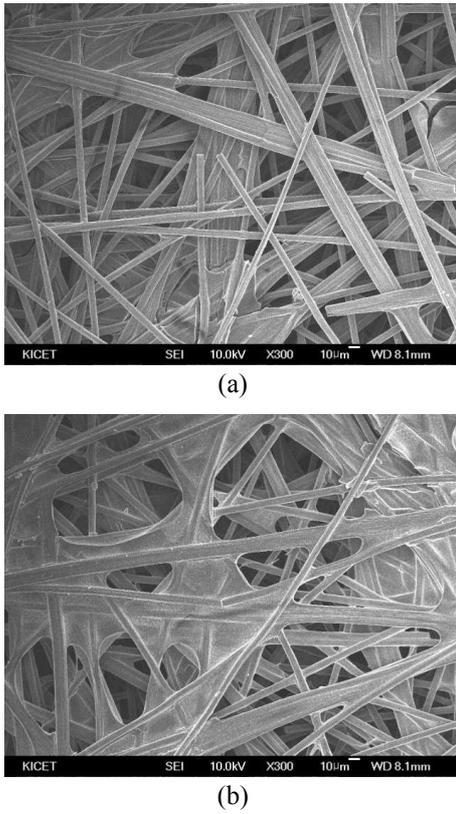


Fig. 1 SEM images of TGPH-060 with (a) 0 wt.%PTFE and (b) 20 wt.% PTFE. These have same pore structure with TGPH-120

들 가스는 외부로부터 스택의 내부로 공급되며 이극판(bipolar plate)의 표면에 가공된 채널을 통하여 이동한다. 이 과정에서 미세한 공극을 가지는 다공성물질인 가스확산층(gas diffusion layer, GDL)을 통하여 확산되어 전해질막 표면의 전극층으로 이동한다. 반응가스가 채널에서부터 촉매층으로 이동하는 동시에 양극(cathode)의 촉매층에서 생성된 물은 촉매층으로부터 가스와 반대방향으로 이동하여 채널을 통하여 외부로 배출된다. GDL은 Fig. 1과 같이 탄소섬유가 무작위적으로 얽힌 형태를 가지며 탄소섬유 사이의 빈 공간이 연속적으로 연결되어 구성된 공극네트워크(pore network)를 통해서 기체와 액체가 동시에 그리고 반대 방향으로 이동한다. 이러한 물질의 이동이 원활하게 발생할수록 PEMFC는 농도분극(concentration polarization)으로 인한 성능의 감소가 줄어든다. 따라서 GDL에 대한 연구, 특히 공극네트워크를 통한 물질전달에 대한 연구는 PEMFC의 기술 개발에 있어서 매우 중요하다.

반응가스의 촉매층으로의 이동을 더욱 용이하게 하기 위해서는 물의 신속한 배출이 필수적이다.

액체상태의 물이 공극 내에 갇혀 있으면 반응가스가 이동할 통로가 부족해지기 때문이다. GDL의 공극의 크기는 그 직경이 수십 μm 정도일 정도로 매우 작으며, 따라서 이 공간 내에서의 물의 이동은 모세관력(capillary force)에 의하여 지배된다. 모세관력은 공극의 표면과 액체 사이의 부착력(adhesive force)에 의하여 영향을 받기 때문에 최근 사용되고 있는 GDL은 대부분 PTFE(Polytetrafluoroethylene)과 같은 발수성 물질로 표면처리가 되어있다. 발수처리된 공극네트워크는 물에 대한 반발력이 커져서 물의 배출을 용이하게 한다. 주로 사용되는 GDL은 대략 5~30 wt.%의 PTFE를 포함하고 있으며 PTFE는 GDL을 구성하는 탄소섬유의 표면을 코팅할 뿐만 아니라 탄소섬유들이 서로 만난 접합점에서 각을 메우며 공극의 형태를 변형시킨다(Fig. 1(b)). 이는 공극의 평균크기, 공극의 분포와 같은 포로시메트리(porosimetry) 특성을 변화시키기도 하고 동시에 탄소섬유로 이루어진 구조체의 기계적 특성을 변화시킨다. 이처럼 PTFE는 GDL의 독립적인 특성에 대해서도 많은 영향을 미치며⁽¹⁻⁶⁾, 또한 GDL을 통한 물질전달 특성을 변화시켜 이로 인한 PEMFC의 전체적인 성능변화에도 절대적인 역할을 한다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

PEMFC 스택은 수십 장의 단위전지들이 직렬로 겹쳐있는 형상을 하고 있으며 하나의 단위전지는 이극판, GDL, 전해질막과 같이 여러 장의 얇은 판형 부품들이 겹쳐진 형태를 갖고 있다. 이러한 다수의 층은 보통 볼트와 너트에 의하여 체결되며 이 과정에서 상당한 체결압력이 가해진다. 부족한 체결압력은 각 층간의 전기적 접촉저항을 증가시키고 무엇보다 각 층의 틈을 통한 반응가스의 누설의 원인이 되기 때문에 적절한 압력으로 체결하는 것이 중요하다. 다만 과도한 체결압력은 각 부품의 손상, 특히 가장 약한 기계적 강도를 가지는 GDL의 심각한 변형 및 손상을 초래하기 때문에 내구성 및 성능의 감소를 유발한다.

이처럼 실제로 운전중인 PEMFC의 GDL은 높은 체결압력에 의하여 초기상태에 비하여 상당히 압축된 상태로 존재할 수 밖에 없으나, 기존의 대부분의 GDL의 특성에 대한 연구들은 가압에 되지 않은 자유상태의 GDL에 대해서 이루어졌다. 특히, 전기전도도 혹은 열전도도와 달리 공극네트워크의 물질전달 특성은 하중에 노출된 상태에서 측정하기 매우 어려웠기에 이에 대한 정보는 매우 제한적인 상태이다. 이에 본 연구에서는 압축하중

이 가해진 상태에서 GDL 의 체적변화를 측정하고, 기존에 제시된 관계식을 통하여 공극률 및 기체투과율의 변화를 예측하고자 한다. 또한 동일한 압축하중 하에서 PTFE 의 함유량에 따른 공극률, 기체투과율의 변화를 제시한다. 본 연구의 결과는 GDL 에서의 물질전달에 대한 모델링의 정확성을 향상시킬 수 있는 기초 자료로 사용될 수 있다.

1.2 관련이론

GDL 이 압축되는 조건에서 공극률과 기체투과율의 압축에 따른 변화는 기존의 몇몇 연구들로부터 이론적으로 도출되거나 실험적인 방법을 통하여 관계식이 제시되었다.

Shi 등⁽¹³⁾에 의하면 공극률은 식 (1)과 같이 예측되며

$$\varepsilon = 1 - W_A/\rho\delta \quad (1)$$

압축에 의하여 두께가 줄어든 GDL 의 기체투과율은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$K = \frac{K_0}{\varepsilon_0} \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \left(1 - \frac{(1 - \varepsilon_0)d_0}{d} \right) \quad (2)$$

Wang 등⁽¹⁴⁾은 compression ratio (CR)을 이용하여 압축으로 인한 공극률의 변화를 식 (3)과 같이 제시하였다.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 - CR}{1 - CR} \quad (3)$$

그리고 그로 인한 기체투과율의 변화를 Blake-Kozeny 식을 이용하여 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$K = \frac{d_g^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (4)$$

여기서 d_g 는 particle 의 직경이며 GDL 에서는 carbon fiber 의 직경으로 대체할 수 있다. 본 연구에서 사용한 GDL 과 동일 제조사의 GDL 의 SEM 이미지⁽⁶⁾로부터 측정된 결과 대략 10 μm 의 직경을 갖고 있는 것으로 판단된다.

Chang 등⁽¹⁵⁾은 제조사와 PTFE 함유를 밝히지 않은 두께 120 μm 의 GDL 을 이용한 실험을 통하여 구한 기체투과율과 Carman-Kozeny 식(식 (5))을 비교하여 공극률의 변화를 예측하였다.

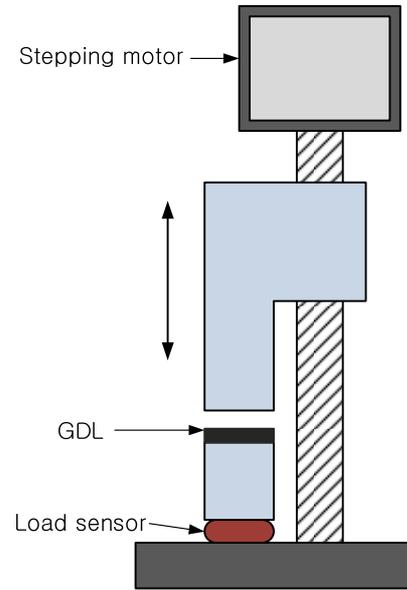


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup to compress the GDL specimen and measure the thickness variation precisely

$$K = \frac{\varepsilon d_g}{K_a(1 - \varepsilon)^2} \quad (5)$$

여기서 K_a 는 Kozeny 상수이며 60 에서 180 사이의 값을 가진다. 이를 통하여 압축된 상태의 GDL 의 두께와 공극률의 상관식을 개발하였다.(식 (6))

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[-\frac{(\delta - 24)}{60} \right] \quad (6)$$

위에 제시된 결과들은 외력에 의하여 변형된 GDL 에 대해서 변형된 정도로부터 공극률의 변화 및 기체투과율을 이론 및 실험적 방법으로 계산하였다. 그러나 실제의 PEMFC 스택은 일정하중을 기준으로 체결하므로 변형률 보다는 GDL 에 가해지는 하중이 더욱 중요한 설계요소가 될 것이다. 게다가 하중에 따른 GDL 의 변형률은 GDL 의 구조 및 PTFE 와 같은 첨가물에 따라 매우 다르므로 본 연구와 같이 압축하중을 설계변수로 하여 GDL 의 물질전달 특성을 연구하는 것이 필요하다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 측정하고자 하는 GDL 을 지름 19 mm 의 원형으로 자른 시편을 Fig. 2 의 실험장치를 이용하여 압축하며 동시에 두께의 변화를 측정하였다. Fig. 2 의 실험장치는 시편이 놓이는 부

분을 기준으로 상부와 하부로 나누어져 있다. 상부는 스텝모터를 이용하여 수직으로 이동시키며 동시에 이동거리를 측정할 수 있게 하였고 GDL 시편에 가해지는 힘은 하부의 로드센서를 이용하여 실시간 측정하였다. 상부가 시편위로 하강하며 하중을 가하는 도중에 지정된 하중에 도달하면 그때까지의 이동거리를 이용하여 시편의 두께 변화를 측정하였다.

본 실험에서는 4 가지의 GDL 을 사용하였다. 모든 GDL 은 Toray 의 TGPH-120 을 기본으로 하며 PTFE 의 함유량에 따라 0 wt.%, 10 wt.%, 30 wt.%, 60 wt.%로 구분하였다. 실제로 많이 사용되는 GDL 의 PTFE 함유량은 0 wt.%-30 wt.% 정도이나 PTFE 의 영향을 넓은 범위에서 확인하고자 60 wt.%의 PTFE 를 가지는 GDL 을 포함하였다. PTFE 의 함유량에 따른 TGPH-120 의 사양은 Table 1 에 정리하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 2 의 GDL 압축장치를 이용하여 GDL 을 압축하였을 때 재현성을 알아보기 위하여 동일한 GDL 의 시편 5 개에 대해서 85 kPa 부터 1567 kPa 까지 단위면적당 압축하중을 증가시키며 압축률을 측정하였다. 5 개의 시편은 하나의 GDL 시트로부터 얻어졌으며 불균일한 PTFE 의 영향을 배제하기 위하여 PTFE 를 0 wt.% 함유한 GDL 을 사용하여 측정하였다. Fig. 3 는 단위면적당 압축하중의 증가에 따른 압축률, CR 의 변화와 그에 따른 표준편차의 분포를 나타내고 있다. 여기서 압축률, CR 은 식 (7)와 같이 정의된다.

$$CR = \frac{\delta_0 - \delta}{\delta_0} \quad (7)$$

단, 본 압축력-압축률 측정장치는 GDL 의 표면에 압축하중이 전혀 작용하지 않았을 경우의 GDL 의 두께를 얻을 수 없기 때문에 이후의 모든 실험결과들은 최소의 단위면적당 압축하중, 즉 85 kPa 의 압력이 가하여진 상태를 자유상태(압축이 이루어

Table 1 Specification of TGPH-120 with various PTFE loading

	PTFE loading			
	0%	10%	30%	60%
Porosity*	0.771	0.747	0.637	0.429
STD	0.0190	0.00543	0.0104	0.0314

* Porosity in this table was measured for uncompressed GDL.

지지 않은 상태)로 간주하여 계산되었다. 따라서 압축률 CR 은 85 kPa 의 압력 조건에서 0 의 값을 가진다. 표준편차는 압축 초기에 0.008 이상으로 증가하기도 하였으나 점차 줄어들어 0.003 에서 0.006 사이에서 수렴하는 추이를 보인다. 이는 최대 CR 의 5% 이내에 해당하므로 본 실험장치를 사용하여 GDL 을 측정하였을 때 충분한 재현성을 확보하고 있는 것으로 간주할 수 있다.

GDL 에 함유되어 있는 PTFE 의 분포에 대한 영향을 살펴보기 위하여 0, 10, 30, 60 wt.%의 PTFE 를 함유하고 있는 GDL 의 CR 표준편차를 Fig. 4 에 나타내었다. 각각의 GDL 은 5 개의 시료를 이용하여 측정하였고 그 표준편차의 분포를 단위면적당 압축하중에 따라서 표시하였다. 전반적으로 PTFE 의 함유량이 증가함에 따라서 표준편차가 증가하였다. 이는 높은 PTFE 를 가진 GDL 일수록 시료마다 동일 압력을 가했을 때 부피의 변화가 균일하지 않았다는 것이며 이는 즉 동일하게 PTFE 처리

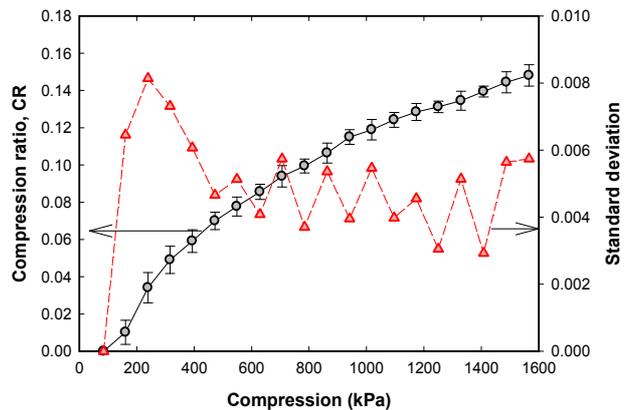


Fig. 3 Distribution of reproducibility and standard deviation of the compression ratio measurement

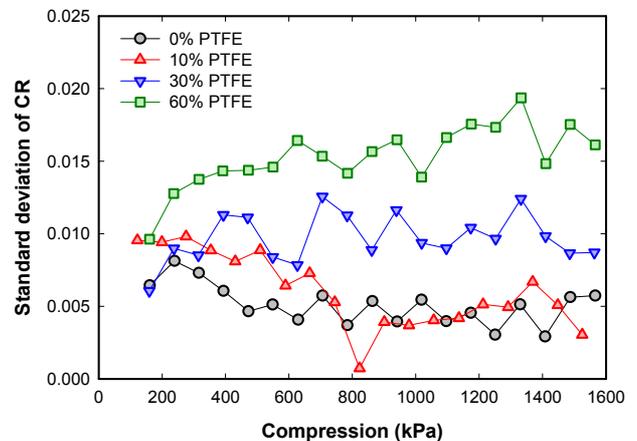


Fig. 4 Distribution of standard deviation of the compression ratio measurement for the GDLs with various PTFE loading

된 GDL 이라도 부위에 따라서 PTFE 의 함량이 차이를 보인다는 결론을 가져온다. 예를 들어 30 wt.% PTFE 처리된 GDL 이라도 PTFE 의 분포가 고르지 않고 부위에 따라서 높은 PTFE 함량과 낮은 PTFE 함량을 가진다는 것이다. 이는 PTFE 를 도포하는 방법의 개선을 통해서 극복할 수 있는 내용이며 이와 관련된 연구들도 추가적으로 진행될 필요성이 있다.

Fig. 5 는 단위면적당 압축하중의 증가에 따른 압축률의 변화를 보여주고 있다. PTFE 의 함유량이 증가함에 따라 동일한 단위면적당 압축하중에서 압축률이 작은 것을 볼 수 있다. 즉 GDL 에 포함된 PTFE 로 인하여 전체적인 GDL 의 기계적인 강도가 증가함을 알 수 있다. PTFE 는 탄소섬유의 겉을 코팅하여 탄소섬유 자체의 기계적 강도를 증가시킬 뿐만 아니라 무엇보다도 탄소섬유끼리 겹치는 부분에서 사잇각을 매우며 굳기 때문에 전체 다공성구조체의 강도를 증가시킨다. 따라서 높은 비율의 PTFE 를 함유하고 있는 GDL 이 동일 단위면적당 압축하중 하에서 변형률이 작은 것으로 판단된다. 또 다른 원인으로 PTFE 함량이 작은 GDL 은 상대적으로 높은 공극률을 갖고 있기 때문에 그 만큼 더 많이 구조가 변형될 가능성을 갖고 있기 때문인 것으로 판단된다. 다만 단위면적당 압축하중이 작은 영역(Fig. 5 의 적색 원 부분)에서는 PTFE 의 영향이 크게 나타나고 있지 않다. 그 원인은 GDL 의 변형이 아직 크게 발생하지 않는 영역이기 때문에 GDL 이 변형되는 과정에 필요한 공극이 PTFE 의 함량에 크게 지배되지 않는 것이라 볼 수 있다. 결과적으로 PEMFC 스택을 조립하여 체결할 때 GDL 에 가해지는 압력이 400kPa 이하라면 GDL 의 PTFE 함량과 관계없이 동일한 스택의 높이를 갖게 될 것이다.

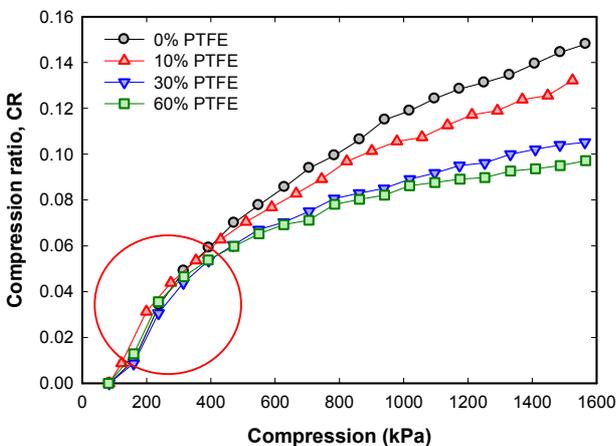


Fig. 5 Variation of compression ratio for the GDLs with various PTFE loading according to the compression

Fig. 6 은 단위면적당 압축하중에 따른 공극률의 변화를 나타낸다. 압축되는 조건에서의 공극률의 변화는 식 (3)을 이용하여 예측하였고 압축되지 않은 상태의 초기 공극률은 Table 1 의 값을 사용하였다. 압축하중이 증가함에 따라서 공극률 역시 감소하는 추세를 보였다. 공극률의 범위가 GDL 의 종류에 따라서 0.35 이상과 0.8 의 이하에 분포됨에 따라서 본 그래프에서는 PTFE 의 함량에 따른 공극률 변화의 추이가 두드러지게 구분되지 않는다. 다만 본 결과는 PEMFC 내부 물질전달 모델링에 사용할 수 있을 것이다. 현재 많은 모델링에서 GDL 이 압축변형되지 않은 것으로 가정하여 진행하거나, PTFE 의 함량을 고려하지 않은 공극률의 변화치를 적용하고 있는 실정이다. 따라서 본 결과를 이용하면 모델링의 정확성을 좀 더 향

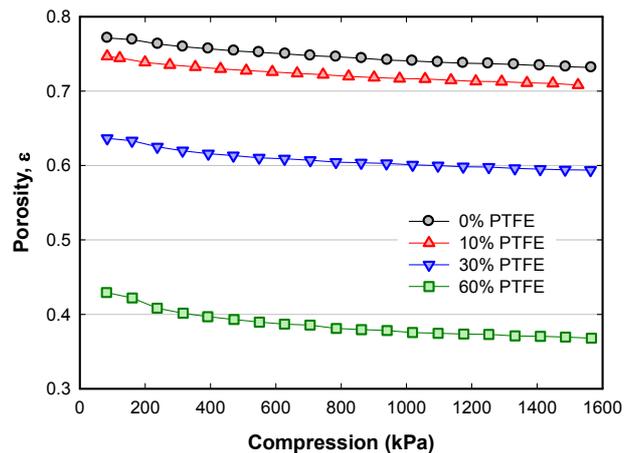


Fig. 6 Variation of porosity for the GDLs with various PTFE loading according to the compression.

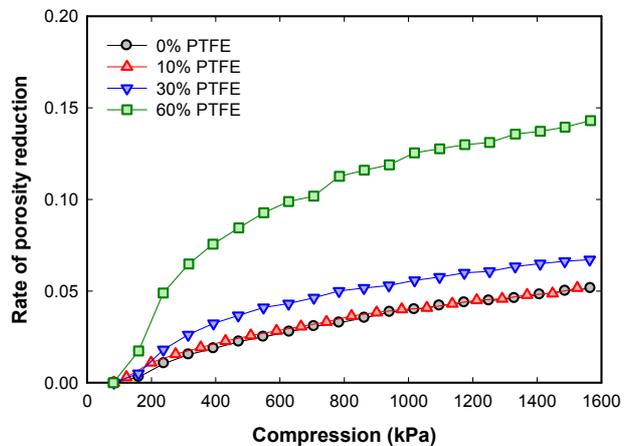


Fig. 7 Variation of rate of porosity reduction for the GDLs with various PTFE loading according to the compression

상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

PTFE의 함량의 효과를 부각시키기 위하여 PTFE의 함량에 따른 공극률 변화의 차이를 공극률 변화율의 형태로 Fig. 7에 나타내었으며 여기서 공극률 변화율은 식 (8)과 같이 구하였다.

$$\text{Rate of porosity reduction} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (8)$$

우선 충분한 압축이 된 후, 즉 단위면적당 압축하중이 대략 600 kPa 이상이 되면 0-30 wt.%의 GDL은 PTFE의 함량에 상관없이 그래프들의 기울기가 거의 동일함을 보인다. 또한 60 wt.% PTFE의 GDL의 경우에는 다른 GDL보다는 다소 큰 기울기를 갖고는 있으나 단위면적당 압축하중이 작은 부분에 비하면 다른 GDL의 기울기와 상당히 비슷해졌다고 볼 수 있다. 반면에 압축이 시작되는 영역, 즉 단위면적당 압축하중이 작은 조건에서는 공극률의 감소율의 변화가 크다. 특히 PTFE 함량이 증가함에 따라서 그 증가폭이 커짐을 알 수 있다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 저 압축하중 영역에서는 PTFE 함량이 GDL의 변형에 크게 영향을 끼치지 않는다. 따라서 $\varepsilon_0 - \varepsilon$ 는 PTFE 함량에 상관없이 유사한 값을 가질 것으로 예측되나, 초기 공극률, ε_0 이 PTFE의 함량에 크게 영향을 받으며 PTFE 함량의 증가에 따라서 감소하는 추이를 가짐으로써 전체적으로 공극률 감소율(Rate of porosity reduction)은 높은 PTFE 함량을 가진 GDL의 경우에 큰 증가폭을 나타내게 된다.

Fig. 8은 단위면적당 압축하중의 증가에 따른 기체투과율의 변화를 보여준다. 기체투과율을 로그 스케일로 표현하였을 때 그림과 같이 거의 선

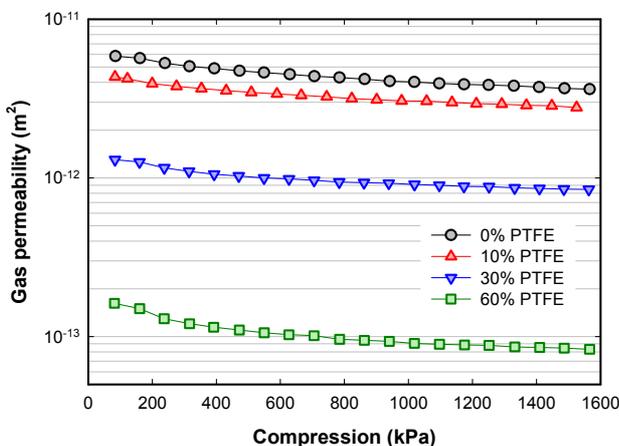


Fig. 8 Variation of gas permeability for the GDLs with various PTFE loading according to the compression

형적으로 변화하나 실제의 투과율의 변화는 PTFE의 함량에 따라 크게 달라진다. 예를 들어 0 wt.% PTFE의 GDL에 대해서 기체투과율은 단위면적당 압축하중이 85 kPa인 경우 $5.85e-12 \text{ m}^2$ 였으나 1567 kPa에서는 $3.62e-12 \text{ m}^2$ 로 38% 감소된 결과를 나타내었다. 반면, 60 wt.%의 PTFE의 GDL의 경우는 85 kPa에서 $1.62e-13 \text{ m}^2$ 였던 기체투과율은 1567 kPa에서 $8.31e-14 \text{ m}^2$ 로 95%가 감소하는 결과를 보였다. 즉, 압축하중의 증가에 따른 기체투과율의 변화는 GDL이 함유하고 있는 PTFE의 함량에 따라서 매우 다른 경향을 보이므로 PTFE 함량도 압축되는 GDL의 기체투과율을 결정하는 중요한 요인으로 고려되어야 할 것이다.

4. 결론

실제 사용되는 PEMFC 스택은 높은 압력으로 체결되어 있기 때문에 스택을 구성하는 모든 부품은 압축하중에 노출되어있다. 그 중에서 GDL은 기계적강도가 제일 약하기 때문에 압축하중에 의하여 쉽게 변형된다. 압축에 의해서 변형된 GDL을 체적 변화율을 실험을 통해서 측정하고 이를 바탕으로 공극률과 기체투과율의 변화율을 예측하였다. 동시에 물의 배출을 향상시키기 위하여 첨가되는 PTFE가 압축상태의 GDL의 공극률과 기체투과율에 미치는 영향을 관찰하였다.

(1) 단위면적당 압축하중이 적은 조건에서는 PTFE에 의한 변형률 차이가 크지 않으나 단위면적당 압축하중이 약 400 kPa을 초과하면서 많은 PTFE를 함유하고 있는 GDL의 변형률이 상대적으로 작게 나타났다.

(2) 그러나, 단위면적당 압축하중의 증가에 따른 실제의 공극률의 감소는 60 wt.%의 PTFE를 함유하고 있는 GDL의 경우에 급격하게 발생하였다. 반면에 30 wt.% PTFE까지는 완만한 증가를 나타낸다.

(3) 이에 따라서, PTFE 함량이 증가함에 따라 GDL의 기체투과율이 단위면적당 압축하중의 증가에 의하여 더욱 급격하게 감소하였다.

압축에 의한 GDL의 공극네트워크의 특성은 PTFE의 함량에 따라서 매우 다르게 변화하므로 이를 고려한 상관식의 개발이 필요하다.

후기

이 논문은 2013 학년도 한남대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Wilde, P. M., Mandle, M., Murate, M. and Berg, N., 2004, "Structural and Physical Properties of GDL and GDL/BPP Combinations and their Influence on PEMFC Performance," *Fuel Cells*, Vol. 4, pp. 180~184.
- (2) Escribano, S., Blachot, J., Ethève, J., Morin, A. and Mosdale, R., 2006, "Characterization of PEMFCs Gas Diffusion Layers Properties," *Journal of Power Sources*, Vol. 156, pp. 8~13.
- (3) Antolini, E., Pozio, A., Giorgi, L. and Passalacqua, E., 1998, "Morphological Characteristics of Carbon/ Polytetrafluoroethylene Films deposited on Porous Carbon Support," *Journal of Material Science*, Vol. 33, pp. 1837~1843.
- (4) Kong, C. S., Kim, D. Y., Lee, H. K., Shul, Y. G. and Lee, T. H., 2002, "Influence of Pore-size Distribution of Diffusion Layer on Mass-transport Problems of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 108, pp. 185~191.
- (5) Lee, H. K., Park, J. H., Kim, D. Y. and Lee, T. H., 2004, "A Study on the Characteristics of the Diffusion Layer Thickness and Porosity of the PEMFC," *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 200~206.
- (6) Lee, Y., Kim, B., Kim, Y. and Li, X., 2011, "Degradation of Gas Diffusion Layers through Repetitive Freezing," *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 5111~5119.
- (7) Park, G. G., Sohn, Y. J., Yang, T. H., Yoon, Y. G., Lee, W. Y. and Kim, C. S., 2004, "Effect of PTFE Contents in the Gas Diffusion Media on the Performance of PEMFC," *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 182~187.
- (8) Lim, C. and Wang, C. Y., 2004, "Effects of Hydrophobic Polymer Content in GDL on Power Performance of a PEM Fuel Cell," *Electrochimica Acta*, Vol. 49, pp. 4149~4156.
- (9) Velayutham, G., Kaushik, J., Rajalakshmi, N. and Dhathathreyan, K. S., 2007, "Effect of PTFE Content in Gas Diffusion Media and Microlayer on the Performance of PEMFC tested under Ambient Pressure," *Fuel Cells*, Vol. 7, pp. 314~318.
- (10) Krishnamurthy, B. and Deepalochani, S., 2009, "Effect of PTFE Content on the Performance of a Direct Methanol Fuel Cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 446~452.
- (11) Kang, S. J. and Kim Y. B., 2012, "Numerical Modeling of Current Density and Water Behavior at a designated Cross Section of the Gas Diffusion Layer in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol 36, pp. 161~170.
- (12) Jeong H. S., Kim, J. I., Lee S. H., Ahn, B. K. and Kim, C. J., 2012, "Analysis of Mass Transport in PEMFC GDL," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol 36, pp. 979~988.
- (13) Shi, Z., Wang, X. and Guessous, L., 2010, "Effect of Compression on the Water Management of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Different Gas Diffusion Layers," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 7, pp. 021012-1~021012-7.
- (14) Wang, Y. and Chen, K. S., 2011, "Effect of Spatially-Varying GDL Properties and Land Compression on Water Distribution in PEM Fuel Cells," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 158, pp. B1292~B1299.
- (15) Chang, W. R., Hwang, J. J., Weng, F. B. and Chan S. H., 2007, "Effect of Clamping Pressure on the Performance of a PEM Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol. 166, pp. 149~154.