

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.2.185

연료전지 내에서의 왕복유동을 이용한 확산증대 효과에 대한 연구[§]

황용신* · 최종원* · 이대영** · 김민수* · 이대흥* · 김서영** · 조성호*** · 차석원*†

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터, *** 연세대학교 기계공학과

Enhanced Diffusion in a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Using Pulsating Flow

Yong-Sheon Hwang*, Jong Won Choi*, Dae-Young Lee**, Min Soo Kim*, Deaheung Lee*, Seo-Young Kim**, Sung Ho Cho*** and Suk-Won Cha*†

* Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

** Energy Mechanics Center, Korea Institute of Science and Technology,

*** Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

(Received September 21, 2009 ; Revised December 2, 2009 ; Accepted December 8, 2009)

Key Words: Diffusion(확산), Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell(PEMFC), Pulsating Flow(왕복유동)

초록: 본 연구에서는 진동자를 이용하여 채널 내 공기 중 산소의 확산을 증대시키는 방법을 고안하였다. 왕복 유동 시 물질 전달을 지배하는 두 가지 요소인 왕복 유동 주파수와 왕복 유동 거리가 채널 내의 길이방향 확산에 어떤 영향을 미치는지에 대해 선행연구 결과를 이용한 이론적 해석을 통하여 보여주었으며, 이러한 채널 내의 길이방향 확산 량의 증가가 스택 성능에 미치는 영향에 대해 알 수 있었다. 스택의 채널 내의 길이방향 확산량은 연료전지가 반응하는 반응량에 비례하게 되며, 따라서 스택내의 길이방향 확산 량을 늘려주는 만큼 연료전지의 최고 파워 밀도가 늘어나게 된다. 이러한 길이방향 확산 량을 증가시키기 위해서는 왕복 유동이 좋은 방법이 되며, 연료전지 운전 시 왕복 유동의 주파수를 증가시키게 되거나 왕복 유동의 거리를 증가시킬 수록 채널 내의 길이방향으로 확산 량이 증대되게 된다.

Abstract: This study considered the feasibility of controlling the air concentration by oscillating flow in fuel cell channels. The fuel cell stack performance is largely influenced by the air concentration. If the air concentration is lower than 2.5 times the stoichiometric of the inlet air, the fuel cell stack performance seriously deteriorates because of air starvation. In this respect, optimizing the air concentration is crucially important to maximizing the fuel cell stack performance. In this work, the effects of oscillating actuation were studied to control the concentration. Studies have shown that there are two non-dimensional key parameters related to the frequency and oscillating amplitude. This paper presents how those parameters affect the performance of the stack.

- 기호설명 -

- D : 확산계수(m²/s)
- De : 유효확산계수(m²/s)
- d : 관의 반경
- ω : 각속도(rpm)
- ν : 동점성계수(m²/s)
- α : Wormersly 수($\frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$)
- Sc : Schmidt 수($\frac{D}{\nu}$)

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염 규제 강화 및 에너지난이 이슈화되고 있다. 이에 따라 친환경적인 대체에너지의 개발이 활발하게 진행 중에 있으며, 그 중 연료전지는 청정에너지인 수소의 사용과 높은 효율로 인해 미래사회의 최적 대안으로 가장 주목받고 있다.

연료전지는 연료의 화학 에너지가 전기에너지로 직접 변환되어 직류전류를 생산하는 능력을 갖는 전기화학적 발전설비로서, 천연가스, 프로판, 나프타, 메탄올 등의 다양한 에너지원으로부터 전력과

§ 이 논문은 2009년도 열공학부문 춘계학술대회(2009. 5. 20-22, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, swcha@snu.ac.kr

열을 동시에 활용할 수 있는 고효율, 고출력, 무공해, 무소음 등의 특징을 갖는 환경 친화적 차세대 핵심 발전 기술이다. 그러나 연료전지 상용화를 위해서는 내구성, 최적화, 물 관리 등 많은 어려움이 존재한다. 연료전지 운전에 있어 성능 및 내구성에 영향을 미치는 많은 물리적 인자가 존재하며, 연료전지의 상용화를 위해서 전기 화학적 특성 및 물리적 인자에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이러한 물리적 인자의 최적화를 통해 스택의 성능을 향상시킬 수 있으며, 시스템의 체적 감소 및 효율을 개선시키고, 열역학적인 손실을 줄일 수 있다.

연료전지 성능에 영향을 미치는 물리적 인자 중 연료 및 공기의 안정적 공급은 연료전지의 내구성과 효율을 향상시키는 중요 인자이다. 그러나 일부 휴대용 연료전지는 체적 에너지를 높이기 위해서 또는 작은 부피를 유지하기 위해서 송풍기나 압축기등 공기 공급 장치를 쓰지 않고 자가 호흡형으로 시스템을 제작한다. 이러한 자가 호흡형 연료전지는 공기의 공급이 순수 확산에 의존하게 되며, 스택의 공기층에 수막이 형성 시 운전이 어렵게 되고, 외부의 환경에 영향을 많이 받게 된다.

본 연구에서는 송풍기나 압축기등의 사용이 어려운 상황에서 주변 환경에 영향을 덜 받으며, 최적의 스택 성능을 얻기 위해 연료전지 시스템에 가진자를 부착하여 스택으로 공급되는 연료 및 공기의 확산을 조절하는 연료공급기에 대해 연구를 수행하였다. 주기적 반복성을 갖는 왕복 유동에서의 유동형태 및 물질전달의 형태는 일방향 정상유동의 경우와는 많은 차이가 있다. 왕복

유동에서의 물질전달 특성에 대한 연구는 Chatwin, Jaeger, Watson등에⁽⁴⁻⁶⁾ 의하여 잘 알려져 있으며, 본 연구에서는 이들의 연구 결과를 정리 이용하여 연료전지 내 확산의 조절 및 왕복유동을 지배하는 인자에 대해 고찰하며, 순수 왕복유동을 이용한 확산 증대 효과가 연료전지 스택에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다.

2. 왕복유동 적용 시 스택 내에서의 확산 증대 영향

2.1 실험 장치 및 제목

Fig. 1에 왕복유동 실험을 위한 연료전지 성능 측정 장비의 개념도를 나타내었다. 연료는 수소를 사용하였으며, 질량유량계를 사용하여 연료를 공급하였다. 공급되는 연료는 버블러 타입의 가슴기를 이용하여 습구온도를 조절하였으며, 라인 히터를 이용하여 건구온도를 조절 하였다. 공기 측은 순수 왕복유동을 적용하기 위해서 공급 측 시작부에 진동자를 두었다. 진동자는 모터, 감속기, 모터 컨트롤러, 크랭크 축, 디스크 판으로 이루어져 있으며, 모터의 원운동을 크랭크축을 이용하여 직선운동으로 변화시켰다. 왕복 유동인자를 변화시키며 실험하기 위해서 모터 컨트롤러를 이용하여 각속도를 변화시켰으며, 디스크 판을 이용하여 왕복유동 거리를 조절 하였다. 왕복 유동의 실험 시에는 공랭식 스택의 공기극 입구 부분 방향 외에는 유체의 흐름이 존재하지 않는다. 스택의 성능을 측정하기 위해서 Agilent사의 N3300A 전기 부하기를 이용하였으며, NI사의 Compact DAQ를 이용하여 데이터를 수집하

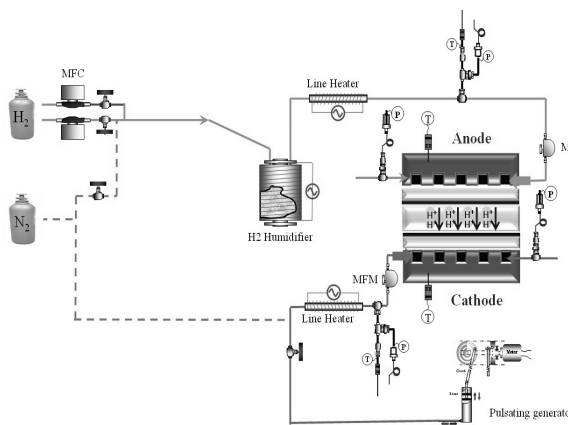


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup



Fig. 2 Air cooling type PEMFC stack

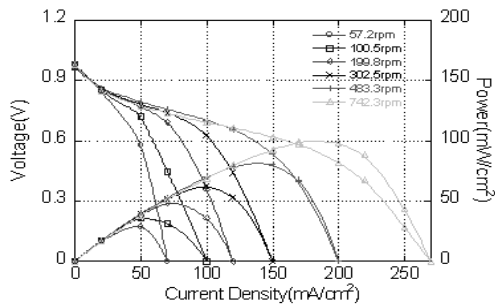


Fig. 3 Stack Performance with respect to angular velocity

였다.

Fig. 2에 본 실험에서 사용되었던 스택의 사진을 나타내었다. 본 연구에서 사용된 스택은 성능 실험을 위하여 활성면적이 61.3cm^2 이며, 멤브레인은 Dupont사의 Nafion 112 막을 사용하였고, 공기극과 연료극의 GDL은 Carbon Paper를 사용하였으며, 촉매량은 양극에 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 으로 Supported Carbon을 사용하였다. 스택의 연료극 유로는 사형 유로를 사용하여 제작하였으며, 공기극 유로는 일자형 유로로 공랭식 채널로 제작하였다. 유로 채널의 넓이는 2mm, 높이는 2.5mm로 제작하였으며, 유동 방향으로의 채널 길이는 78.8mm이다. 또한 공기 공급 시 공기의 흐름을 방해하지 않기 위해서 스택을 체결하는 전산볼트는 양쪽 측면에 배치하였다. 공기의 흐름을 고르게 하기 위해서 공랭식 스택의 공기측 입구부분에 메니폴드를 제작하여 공기를 공급하였으며, 열의 유출입을 최소화하기 위해서 메니폴드부의 단열을 실시하였다. 스택 체결 시 체결압력은 80 kgf-cm로 체결을 수행하였다.

스택의 온도는 스택 끝판에 히터를 장착하여 조절 하였으며, 각 실험은 스택 운전 시 스택이 일정 온도 범위에 들어갔을 때 측정을 수행하였다. 실험 온도 범위는 $30\sim 40^\circ\text{C}$ 사이에서 측정을 수행 하였으며, 공기측은 무가습, 수소측의 습도는 상대습도 100%로 공급하였다. 수소측의 과급율은 2.0으로 공급하였으며, 측정 압력범위는 수소측 약 0.1bar이하, 공기측은 0.01bar이하로 측정하였다. 좀 더 정확한 성능 측정을 위해서 전류 밀도를 증가 시키며 측정한 후 전류 밀도를 감소 시키며 측정한 결과의 평균을 내서 성능을 측정하였다.

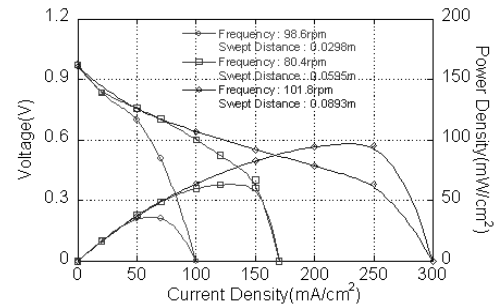


Fig. 4 Stack Performance with respect to swept distance

2.2 결과

2.2.1 왕복유동 실험

공기의 유량이 변화한다는 것은 공기의 총 플럭스가 변화한다는 의미가 된다. 대류가 지배적인 영역에서는 이러한 유량의 변화가 총 플럭스의 변화에 영향을 미치게 된다. 확산이 지배적인 영역에서는 확산량의 증감이 총 플럭스의 변화에 영향을 준다. 본 연구에서는 공기의 공급 시 평균 유량의 흐름이 없는 상태에서 확산을 증대시키기 위해서 왕복 유동을 적용 시켰으며, 이러한 왕복유동에 의한 확산 증대 효과가 스택의 성능에 미치는 영향을 알아보았다.

Fig. 3은 왕복 유동거리가 0.0595m일 때 각속도가 57.2rpm ~ 742.3rpm까지 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 57.2rpm에서 $28.9\text{mW}/\text{cm}^2$ 에서 742.3rpm에서 $100.0\text{mW}/\text{cm}^2$ 까지 나왔다. Fig. 3.에서 나타나듯이 각각의 왕복 유동거리에서 주파수가 늘어나면 늘어날수록 성능이 좋아지는 것을 알 수 있다.

지금까지는 왕복 유동을 이용하여 스택의 성능을 향상시킬 수 있으며, 주파수가 증가할수록 확산량이 증가하여 스택의 성능이 좋아지는 것을 알 수 있었다. 그러나 왕복 유동을 통한 확산량 증가 방법에는 주파수 외에 왕복 유동거리 또한 확산량 변화에 중요한 변수가 된다. 이러한 확산량 증가는 역시 스택의 채널 내 확산량을 증가시키며, 스택의 성능을 더욱 좋게 만들게 된다.

Fig. 4에 왕복 유동 거리에 따른 스택의 성능 변화를 나타내었다. 실험은 왕복 유동 거리가 0.0116m (Angular Velocity : 270.1rpm), 0.0298m (Angular Velocity : 302.5rpm), 0.0595m (Angular

Velocity : 267.4rpm)인 경우에 수행하였다. Fig. 4의 결과에서 알 수 있듯이 왕복 유동의 거리가 증가할수록 스택의 최고 파워 밀도가 증가하는 것을 알 수 있다. 본 결과를 통해서 왕복유동의 거리가 증가하게 되면 반응에 들어가는 확산량이 증가하게 되고 스택의 성능은 더욱 좋아지게 된다는 것을 알 수 있었다.

2.2.2 실험의 이론적 해석

왕복유동은 주파수 외에 많은 물리적 인자에 의해 확산의 현상을 지배할 것이다. 이러한 물리적 인자 중 확산을 지배하는 중요 인자의 파악 및 확산을 증대시킬 수 있는 방안을 Watson⁽⁶⁾의 결과를 이용하여 알 수 있다. 확산 증대 효과에 대한 해석 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{D_c}{D} = R + 1 \quad (1)$$

여기서, R 은 확산이 증대되어지는 양을 나타내며, D_c 는 유효확산계수, D 는 확산계수를 나타낸다. 여기서 나온 R 은 Watson에 의해 다음과 같이 나타내어진다.

$$R = f_s \left(\frac{d^2 \omega}{\nu}, Sc \right) \left(\frac{V}{Ad} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, 함수 f_s 는 채널의 shape과 Wormersly 수, Schmidt 수에(Sc) 의존하는 값이며, $\frac{V}{Ad}$ 는 왕복유동의 크기를 나타내는 무차원수이다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 확산이 증대되어 지는 증분은 채널의 형상과 물질이 정해지면 Wormersly 수와 왕복 유동의 크기를 나타내는 무차원 수 $\frac{V}{Ad}$ 에 의존하게 된다. 즉, 채널 내의 확산을 증대시키는 주된 무차원수는 두 가지이며, 이 두 가지는 주파수에 관련된 Wormersly 수와 왕복유동 크기를 나타내는 $\frac{V}{Ad}$ 수에 의존하게 된다.

4. 결 론

연료전지의 운전 시 스택 내에 반응 시 필요한 연료 또는 공기의 공급은 스택 성능에 중요한 영향을 미치게 된다. 특히 공기 중 산소의 분율이

약 21%정도밖에 되지 않기 때문에 연료전지 구동에 필요한 산소를 적절히 공급해 주는 것은 연료전지의 최적 성능을 얻기 위한 필요조건이다. 하지만, 휴대용 연료전지 분야에서는 시스템 부피의 최소화 문제 때문에 송풍기나 압축기의 사용이 어렵게 되어 스택 운전 시 산소의 공급이 원활하지 않을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 진동자를 이용하여 확산을 증대시키는 방법을 고안하였으며, 이러한 진동자는 얼마든지 그 크기를 작게 하는 것이 가능하고 기생전력 또한 낮출 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 왕복 유동 시 물질 전달을 지배하는 두 가지 요소인 왕복 유동 주파수와 왕복 유동 거리가 채널 내의 길이방향 확산에 어떤 영향을 미치는지에 대해 선행연구 결과를 이용한 이론적 해석을 통하여 보여주었으며, 이러한 채널 내의 길이방향 확산량의 증가가 스택 성능에 미치는 영향에 대해 알 수 있었다. 스택의 채널 내 길이방향 확산량은 연료전지가 반응하는 반응량에 비례하게 되며, 따라서 스택내의 길이방향 확산량을 늘려주는 만큼 연료전지의 최고 파워 밀도가 늘어나게 된다. 이러한 길이방향 확산량을 증가시키기 위해서는 왕복 유동이 좋은 방법이 된다. 연료전지 운전 시 왕복 유동의 주파수를 증가시키게 되거나 왕복 유동의 거리를 증가시킬수록 채널 내의 길이방향으로 확산량이 증대되게 된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원 에너지메카닉스 센터의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Arico, A. S., Srinivasan, S. and Antonucci, V., 2001, "DMFCs: From Fundamental Aspects to Technology Development," *Fuel Cells*, Vol. 1, No. 2, pp. 133~161.
- (2) Arico, A. S., Creti, P., Kim, H., Mantegna, R., Giordano, N. and Antonucci, V., 1996, "Analysis of the Electrochemical Characteristics of a Direct Methanol Fuel Cell Based on a PT-RU/C Anode Catalyst," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, pp.

- 3950~3959.
- (3) Bagotzky, V. S. and Vassilyev, Yu. B., 1967, "Mechanism of Electro-Oxidation of Methanol on the Platinum Electrode," *J. Electrochemica Acta.*, Vol. 12, pp. 1323~1343.
- (4) Chatwin, P. C., 1975, "On the Longitudinal Dispersion of Passive Contaminant in Oscillatory Flows in Tubes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 71, Part 3, pp. 513~527.
- (5) Jaeger, M. J. and Kurzweg, U. H., 1983, "Determination of the Longitudinal Dispersion Coefficient in Flows Subjected to High-Frequency Oscillations," *Phys. Fluids*, Vol. 26, pp. 1380~1382.
- (6) Watson, E. J., 1983, "Diffusion in Oscillatory Pipe Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 133, pp. 233~244.