

왕복유동을 이용한 확산증대 효과에 대한 연구

황 용신¹⁾, 이 대영²⁾, 김 서영³⁾, 최 훈⁴⁾, 차 석원⁵⁾

Enhanced diffusion by using pulsating flow

Yong-Sheen Hwang, Dae-Young Lee, Seo-Young Kim, Hoon Choi, Suk-Won Cha

Key words : Oscillating Flow(왕복 유동), Fuel Cell(연료전지), PEMFC(고체고분자연료전지), DMFC(직접 메탄올 연료전지), Concentration (농도)

Abstract : This study considers the feasibility of the concentration control of the feul and air by oscillating flow in the channel of Fuel Cells. Fuel Cell Stack performance is largely influenced by the fuel and air concentration. If the fuel and air concentration is lower than stoichiometry 1.25 of the fuel and 2.5 of the air, its performance deteriorates seriously because of the fuel and air starvation. In this respect the optimization of the fuel and air concentration is crucially important to maximize fuel cell stack performance. In this work, the effects of oscillating actuation are studied to control the concentration. Two important nondimensional parameters are introduced, each of which represents either the oscillating frequency or the oscillating amplitude. It is shown how these factors affect the stack performance and the efficiency of the fuel cell stack stack.

Nomenclature

P : pressure, pa
 ρ : density, kg/m³
 f : friction coefficient, pa
 L : lenth of the channel, m
 D_h : hydroric diameter, m
 V : velocity, m/s
 g : gravity acceleration, m/s²
 M : mass flow rate, kg/s

subscrip

a : air
m : moisture
da : dry air
o : outlet
i : inlet
p : product

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염 규제 강화 및 에너지난이 이슈화되고 있다. 이에 따라 친환경적인 대체에너지의 개발이 활발하게 진행중에 있으며, 그 중 연료전지는 청정에너지인 수소의 사

용과 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 열을 동시에 활용할 수 있는 고효율, 고출력, 무공해, 무소음등의 특징을 갖는 환경친화적 차세대 핵심 발전 기술이다. 그러나 연료전지 상용화를 위해서는 내구성, 최적화, 물관리등 많은 어려움이 존재한다. 연료전지 운전에 있어 성능 및 내구성에 영향을 미치는 많은 물리적 인자가 존재하며, 상용화를 위하여 연료전지의 전기 화학적 특성 및 물리적 인자에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^{[3]-[7]} 이러한 물리적 인자의 최적화를 통해 스택의 성능을 향상 시킬 수 있으며, 시스템의 체적 감소 및 효율을 개선시키고, 열역학적인 손실을 줄일

1), 4) 서울대학교, 기계공학과
E-mail : yshwang@snu.ac.kr

Tel : (02)880-8050 Fax : (02)880-1910

2), 3) 한국과학기술연구원, 에너지메카닉스연구센터

E-mail : ldy@kist.re.kr, seoykim@kist.re.kr

Tel : (02)958-5690 Fax : (02)958-5689

5) 서울대학교, 기계공학과

E-mail : swcha@snu.ac.kr

Tel : (02)880-1700 Fax : (02)880-1910

수 있다.

연료전지 성능에 영향을 미치는 물리적 인자 중 연료 및 공기의 안정적 공급은 연료전지의 내구성과 효율을 향상시키는 중요 인자이다. 적은 BOP의 전원을 사용하여 최적의 스택 성능을 얻기 위해 연료전지 시스템에 가진자를 부착하여 스택으로 공급되는 연료 및 공기의 확산을 조절하는 연료공급기에 대해 연구하였다. 주기적 반복성을 갖는 왕복유동에서의 유동형태 및 물질전달의 형태는 일방향 정상유동의 경우와는 많은 차이가 있다. 왕복 유동에서의 물질전달 특성에 대한 연구는 Chatwin, Jaeger, Watson 등에^{[1]-[3]} 의하여 잘 알려져 있으며, 본 연구에서는 이들의 연구 결과를 정리 이용하여 연료전지 내 확산의 조절 및 왕복유동을 지배하는 두 무차원수에 대해 고찰한다.

2. 실험 방법

왕복 유동이 확산에 미치는 영향을 알아보기 위해서 초기에 관내에 물을 채워 넣고 주파수에 따라 입구측 잉크가 물에 얼마나 잘 퍼지는지를 관찰하였다. 왕복 유동에 따른 잉크의 퍼짐 정도를 정량화하기 위한 실험 데이터의 처리 과정을 Fig. 1에 나타내었다. 잉크는 초기 좌측에서 출발하여 우측으로 확산되어진다. 각 주파수에서 일정 시간이 흐른 후에 1 주기에 4장의 사진을 찍었으며, 데이터 처리의 간략화를 하기 위해서 각 사진은 흑백으로 처리하였다. 흑백으로 처리된 사진은 한 주기 내에서 시간 평균을 수행하였다. 시간 평균된 데이터를 이용하여 면적 적분을 수행하게 되면 잉크의 퍼짐 정도를 정량적으로 알 수 있게 된다.

본 연구는 0.88 rad/sec, 2.51 rad/sec, 6.28 rad/sec의 각속도 영역에서 실험을 수행하였으며, 각 주파수 영역 내에서 1분, 2분 30초, 7분에서 사진을 찍었다. 왕복 유동의 이동거리는 6.28cm로 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과

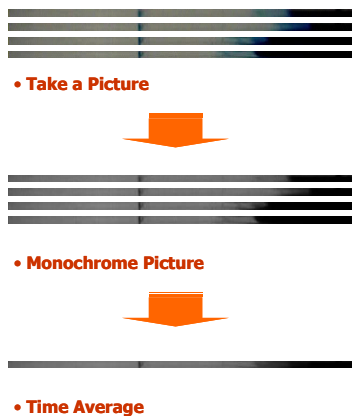


Fig. 1 Time Average Process of the Pulsating Flow

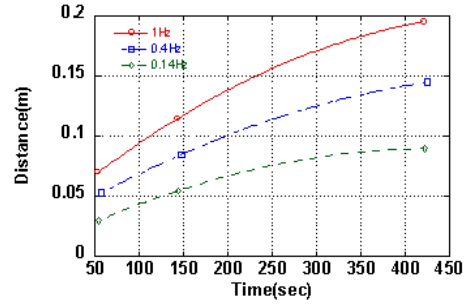


Fig. 2 Variation of the distance with respect to time

3.1 Pulsating Effect

왕복유동 시 잉크의 퍼짐량을 시간 및 면적 적분을 수행하였다. 측정된 거리(0~35cm)이며, 농도의 정보는 사진의 픽셀정보를 이용하였다. 픽셀의 정보는 화면의 밝고 어두움을 나타내는 척도로서 농도의 분포를 나타내게 된다. 확산의 측정은 0.14Hz 시 1분, 2분 30초, 7분에서의 농도 분포를 구하였으며, 0.4Hz, 1Hz의 주파수에서 동일 시간의 농도 분포를 측정하였다.

각각의 주파수에서 시간당 퍼짐의 정도를 알기 위해서 농도가 약 10% 되는 곳의 퍼짐 거리를 Fig. 2에 나타내었다. X축은 측정한 시간이며, y축은 잉크가 퍼져간 거리를 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 시간이 지나면 지날수록 퍼짐의 정도는 지수함수의 형태로 증가하며, 주파수가 커질수록 그 퍼짐정도가 더욱 커지는 것을 알 수 있었다.

3.2 Effective Diffusivity

왕복 유동 시 주파수가 확산에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 왕복유동에서 주파수에 따라 확산이 증대되는 것은, 확산계수가 증대되기 때문이다. 본 연구에서는 주파수에 따라서 얼마나 확산이 증대되는지 알기 위해서 Transient Diffusion 식을 이용하여 실험결과의 확산계수를 찾아내었으며, 왕복유동의 주파수와 관련된 무차원 수인 Wormersly 수인

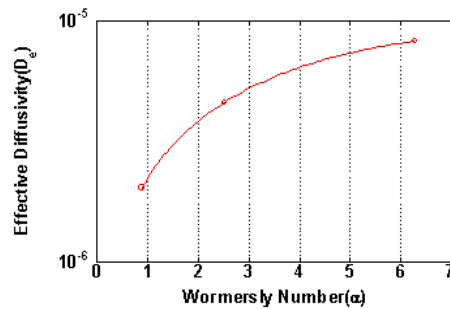


Fig. 3 Variation of the Effective Diffusivity with respect to Wormersly Number

$$\alpha = a \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (1)$$

를 이용하여 확산계수의 변화를 나타내었다. Womersly 수는 왕복유동 주파수에 관계된 무차원수로서, Stokes 경계층 두께에 대한 관반경의 비를 나타낸다.

Fig. 3에 Womersly 수의 변화에 따른 확산계수의 변화를 나타내었다. X축은 Womersly 수를 나타내며, y축은 유효 확산계수를 지수함수로 나타내었다. 앞선 결과와 같이 Womersly 수가 증가할수록 Effective Diffusivity가 증가하며, 왕복유동에 의해 확산계수가 약 $10^4 \sim 10^5$ 사이로 증가한 것을 알 수 있다.

3. 모델링

3.1 모델링 및 지배방정식

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 해석해를 이용해 찾아보았다.

본 연구의 대상인 가진자를 가진 왕복유동의 개념적 구조를 Fig. 4에 나타내었다. 유체의 공급은 가진자만을 이용하여 공급하므로 y 방향으로의 채널 내 평균 유속은 존재하지 않는다.

본 연구에서는 직관 내 주기적 왕복유동을 하는 과정에서 각 인자들의 물리적 연관성을 파악하기 위하여 몇몇 가정을 통해 지배방정식을 간략화한 후, 해석해를 구하였다. 여기서 구한 해석해를 이용하면 인자들 사이의 상호관계에 대해 조금 더 본질적인 통찰이 가능할 것이다. 이론해를 얻기 위해 사용된 가정들은 다음과 같다.

- 1) 스택 내에서는 소비에 필요한 전력을 발생시키기 위하여 전력 발생에 필요한 일정한 양의 메탄을 소모가 발생한다.
- 2) 스택 내의 전기 화학반응은 고려되지 않았다.
- 3) 유체는 비압축성이며, 완전히 발달된 층



Fig. 4 Schematic diagram of the oscillating actuator

류유동이다.

- 4) 유체의 속도와 농도가 시간에 대하여 정현파의 형태로 변동한다.
 - 5) 유동 분포와 농도 분포는 주기정상상태이다.
- 각 변수들은 다음과 같이 무차원화 한다.

$$X = \frac{2x}{L_s}, \eta = \frac{y}{a}, \tau = \omega t \quad (2)$$

$$u = \frac{v_x}{u_o}, u_o = \frac{L_s \omega}{2}, \theta = \frac{C - C_{in}}{C_{in}} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{2a}{\mu u_o L_s} P, \gamma = \frac{\delta \theta}{\delta X} \quad (4)$$

여기서 u_o 는 유체 입자의 단면평균 최대속력, L_s 는 유체가 x방향으로 움직이는 단면평균 거리, ω 는 왕복유동 각속도이며, γ 는 유체의 길이방향 농도기울기이다. 위에서 정리한 무차원 변수 $u, \frac{d\phi}{dX}, \theta$ 는 시간에 대하여 주기적으로 반복되는 형태이므로 다음과 같이 정현파 형태로 가정한다.

$$u(\eta, \tau) = \text{Real}[f(\eta)e^{i\tau}] \quad (5)$$

$$\theta(X, \eta, \tau) = \text{Real}[\gamma X + g(\eta)e^{i\tau}] \quad (6)$$

$$\frac{d\phi}{dX} = \text{Real}[\Phi e^{i\tau}] \quad (7)$$

위에서 f 와 Φ 그리고 g 는 각각 복소함수와 복소수로서 크기와 위상각을 가진다. 식 운동량 방정식과 농도방정식에 식 (2)~(7)까지의 관계를 도입하면 다음과 같은 상미분 방정식이 된다.

$$f''(\eta) - i\alpha^2 f(\eta) = \Phi \quad (8)$$

$$g''(\eta) - i\alpha^2 Sc g(\eta) = \alpha^2 Sc f(\eta) \quad (9)$$

여기서 α, Sc 는 각각

$$\alpha = a \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (10)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (11)$$

로 정의된다. 여기서 α 는 Womersly 수로 알려져 있으며, 왕복유동 주파수에 관계된 무차원수

로서, Stokes 경계층 두께에 대한 관 반경의 비를 나타낸다. Sc 는 Stokes의 물질전달 경계층 두께에 대한 관 반경의 비를 의미한다. 계산의 편의를 위해서

$$\beta = \alpha Sc \quad (12)$$

로 정의 하였다.

2.3 해석해

식 (8), (9)는 2차 상미분 방정식이며, 해는

$$f(\eta) = \frac{\left[\frac{\cosh(\sqrt{i}\alpha\eta) - 1}{\cosh(\sqrt{i}\alpha)} \right]}{\left[\frac{\tanh(\sqrt{i}\alpha) - 1}{\sqrt{i}\alpha} \right]} \quad (13)$$

$$g(\eta) = \frac{A}{i} \left[-\frac{\alpha \tanh(\sqrt{i}\alpha) \cosh(\sqrt{i}\beta\eta)}{\beta(\alpha^2 - \beta^2) \sinh(\sqrt{i}\beta)} + \frac{1}{(\alpha^2 - \beta^2)} \frac{\cosh(\sqrt{i}\alpha\eta)}{\cosh(\sqrt{i}\alpha)} + \frac{1}{\beta^2} \right] \quad (14)$$

식 (13), (14)의 해는 α 와 β 의 무차원 변수 조합으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 실제 냉각 패드의 모델을 간략화 함으로서 냉각패드를 지배하는 두 무차원 변수를 구하였고 또한 해 자체가 무차원 변수에 의하여 지배됨을 알 수 있었다.

확산에 영향을 미치는 중요 인자를 파악하기 위해서 확산의 플러스를 계산하여 유효 확산계수를 구하였다. 유효 확산계수와 확산계수의 비는

$$\begin{aligned} \frac{D_e}{D} = \frac{Lu_o}{\gamma D} < \frac{(\theta + 1)u}{\theta} > = \frac{Lu_o}{2D} < f^*g > \\ = \frac{1}{8} \lambda \alpha^2 Sc < f^*g > \quad (15) \end{aligned}$$

이 된다. 식 (15)를 통하여 알 수 있듯이 왕복유동에 의한 확산 효과는 왕복유동의 크기인 λ , 주파수에 관련된 무차원 수 α , 물질의 특성에 관련된 Sc 에 의존하는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

연료전지의 안정적 운전과 효율을 높이기 위해서 공기 및 연료의 확산을 증대 시켜야한다. 공기 및 연료의 확산을 증대시키기 위해서 블로워나 압축기의 사이즈를 크게 한다면 많은 에너지 소모가 발생하며, 시스템의 사이즈 또한 커지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 연료전지 시스템에 왕복유동을 적용하면 확산의

증대를 통하여 시스템내의 BOP 크기 및 에너지 소모를 줄이면서 스택내에 공기 및 연료의 안정적 공급을 할 수 있음을 실험을 통하여 알 수 있었다. 또한, 왕복유동 시 확산을 증대시키는 중요 인자를 찾기 위해서 해석을 수행하였으며, 왕복유동을 지배하는 2가지 중요 무차원수 α , λ 및 물질의 특성에 의해 결정되는 1가지 무차원 수인 Sc 를 찾을 수 있었다. 이러한 해석 결과를 이용하여 왕복유동을 조절 할 수 있으며, 스택내의 연료공급을 원활히 하고 기생전력을 최소화 할 수 있게 된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원 에너지 메카닉스 연구센터의 휴대 연료전지용 마이크로 BOP 시스템 개발과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] A. S. Arico, S. Srinivasan 2001, DMFCs:From Fundametal Aspects to Technology Development, Fuel Cells, No. 2, pp. 133-161
- [2] H. Yang, T. S. Zhao 2005, Pressure drop behavior in the anode flow field of liquid feed direct methanol fuel cells, Journal of Power Source, Vol. 142, pp. 117-124.
- [3] Kim. D, Lee. J, 2006, Operational characteristics of a 50W DMFC stack, Journal of Power Source, Vol. 155, pp. 203-212.
- [4] H. Yang, T. S. Zhao, Effect of anode flow field design on the performance of liquid feed direct methanol fuel cells, Electrochemical Acta, Vol. 50, pp. 3243-3252.
- [5] A. S. Arico, P. Creti, 2000, Influence of flow field design on the performance of a direct methanol fuel cell, Journal of Power Source, Vol 91, pp. 202-209.
- [6] Jin. S, Cowart, 2005, An experimental and modeling based investigation into the high stoichiometric flow rates required in direct methanol fuel cells, Journal of Power Source, Vol. 143, pp. 30-35.
- [7] Yasuro. Y, Akira. S, 2003, Development of 5kW Polymer Electrolyte Fuel Cell, IHI Engineering Review, Vol. 36, No. 1.