중성자 방사선 촬영법을 이용한 PEMFC 내의 2 상 유동 가시화 예비 실험

김태주†, 정용미*, 김무환*, M. Arif**, 심철무***, 이승욱***, 전진수***

Feasibility Test for 2-Phase Flow Visualization at the PEMFC Using the Neutron Radiography Image Technology

TaeJoo Kim†, YongMi Jung*, MooHwan Kim*, M. Arif, CheulMuu Sim***, SeungWoo Lee***, JinSu Jeon*****

Key Words : Neutron Radiography(중성자 방사선 촬영법), PEMFC(PEM 연료전지), Water management(물관리), Attenuation Coefficients(흡수계수), Visualization(가시화)

Abstract

The feasibility test was performed to check the possibility of 2-phase flow visualization and water distribution at inside the PEMFC using neutron radiography image technique. It was composed using water and pressured air. From the image, several 2-phase flow patterns were discovered and water fraction was estimated by the reference specimen and image analysis.

기호설명

I	중성자강도	[n/cm^{2}sec]
t	두께	[cm]
Σ	거시 반응 단면적	[cm^{-1}]

하첨자

ch	채널
Dry	물과 압축 공기의 공급 없이
o	콜리메이터 출구에서의
water	물
Wet	물과 압축 공기의 공급

1. 서 론

높은 에너지 변환 효율과 화학적 오염이 없기 때문에 PEMFC 는 발전소, 자동차, 그리고 휴대용 전자 장치 전원의 차세대 연료로 최근 들어 각광받고 있다[1]. PEMFC 는 연료로 수소가스와 공기 중의 산소를 사용하여 전기를 만들며, 그 과정에서 물과 열을 생성한다. 이처럼 부산물로 생기는 물과 열 때문에 PEMFC 내부에서는 유체 유동, 열전달 및 물질 전달이 서로 결합된 문제들이 발생된다. 특히 전해질에서 수소 이온의 전도성은 물의 양에 따라서 크게 달라지기 때문에 연료전지 시스템 최적화를 위해 효율적인 물 관리는 무척이나 중요하다. 예를 들면 연료전지 내의 전해질과 채널에서 물의 양이 작으면 수소 이온의 전도성이 급격히 감소하게 되어 효율이 떨이지게 되며, 반대로 물의 양이 너무 많으면 산소 및 연료의 공급을 방해하게 되어 효율이 감소하게 된다[2].

그러므로 연료전지 성능 향상을 위해서는 PEMFC 내의 가시화는 필요하다. 그러나 대부분의 PEMFC 는 금속에 덮여있기 때문에 가시광선을 이용한 기존의 가시화 기법으로는 내부를 관찰할 수 없다. 방사선 촬영법은 측정 물질에서 감쇠되는 방사선의 강도 차이를 이용한 가시화 기법 중 하나로, 사용하는 방사선으로는 X-선, γ-선, 열(thermal) 및 속(fast) 중성자 등이 있다. 각각의 방사선은 물질에 따라서 흡수 메커니즘이 다르기 때문에 사용할 수 있는 분야가 다르다. Fig.1 은 열중성자와 X-선, γ-선의 질량 흡수 계수를 원자 번호에 대한 변화이다. X-선과 γ-선은 전자와 반응하기 때문에 질량 흡수 계수는 원자번호에 따라 단

† 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : dragon11@postech.ac.kr
TEL : (054)279-5911 FAX : (054)279-3199
* 포항공과대학교 기계공학과
** NIST, USA
*** 한국원자력연구소

순 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로, X-선과 γ-선 가시화법은 무거운 원소 내에 있는 가벼운 원소를 구별할 수 있는 충분한 명암 차이를 얻을 수 없어 적용에 한계가 있다. 그렇지만 열 중성자는 원자핵과 반응하기 때문에 질량 흡수 계수는 원자 번호에 무관하게 불규칙적인 특성을 보인다. 더욱이 열 중성자는 금속은 잘 투과하고, 수소, 물 그리고 카드뮴 같은 물질에는 쉽게 흡수되는 것을 Fig. 1 에서 알 수 있다[3,4,5,6,7]

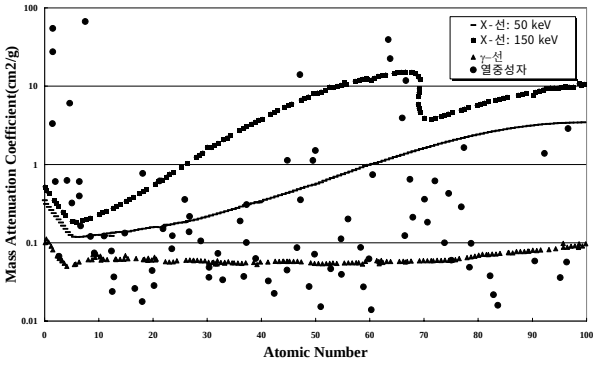


Fig. 1 Comparison mass attenuation coefficient among thermal neutron, X-ray and γ-ray

대부분의 PEMFC 는 금속 피막을 가지며, 운전 과정에서 항상 물이 생긴다. 그러므로 열 중성자를 이용하면 PEMFC 내의 전해질과 채널에서의 2 상 유동 거동 및 물의 분포를 가시화할 수 있다. 본 연구에서는 실제 PEMFC 실험 장치를 원자로 내에 구성하고, 이를 운전 상황에서 중성자 방사선 촬영법으로 이미지를 얻기 전에 물과 압축 공기를 이용한 예비 실험 장치를 구성하고 PEMFC 내부에서의 2 상 유동 거동과 물의 분포를 중성자 방사선 촬영법으로 가시화가 가능한 지를 확인하였다.

2. PEMFC 구성 물질의 해석적 검증

중성자 방사선 촬영법으로 가시화 실험을 수행하기 전에 PEMFC 구성 물질이 중성자 방사선 촬영 적합성을 검증하였다. 본 연구에 사용된 PEMFC 는 스테인리스 스틸, 구리, 탄소, 유리 섬유 및 고분자 물질 등으로 구성되어 있으며, 각각의 질량 흡수 계수가 다르기 때문에 중성자 투과율은 다르게 나타난다. Fig.2 는 연료전지의 구성 물질에 따라 나타나는 중성자 투과율 변화를 나타낸다. 연료전지의 엔드 플레이트(endplate)로 사용된 유리섬유의 두께가 3cm 로 너무 두꺼워 중성자 감쇠율이 상당히 큼을 알 수 있다. 그래서 본 연구에서는 명확한 명암 차이를 얻기 위해 질량 흡수 계수가 작은 알루미늄으로 대체하였다. 엔드 플레이트(endplate)의 재질을 알루미늄으로 교체 후 PEMFC 의 구성 물질에 의해 중성자 투과율 변화를 계산을 통해 확인하였다. Fig.3 은 PEMFC 의 구성 물질 순서에 따라서 중성자 투과율 변화를 나타낸다.

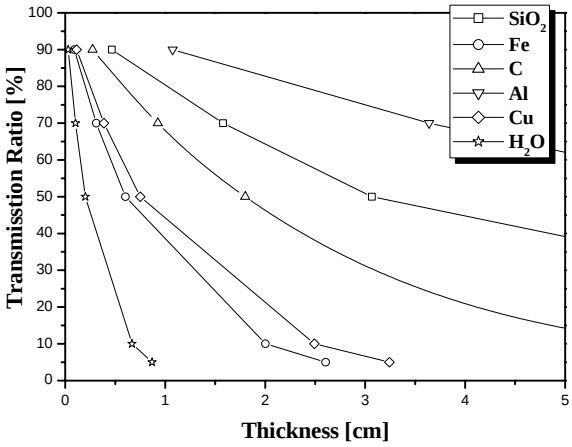


Fig. 2 Neutron transmission ratio according to PEMFC materials thickness

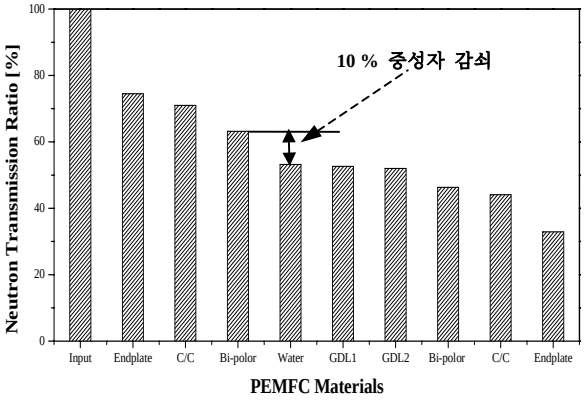


Fig. 3 Neutron transmission rate variation according to PEMFC materials sequence

비록 엔드 플레이트(endplate)의 재질을 알루미늄으로 교환하였어도 두께 때문에 약 30%의 중성자가 감쇠하는 것을 알 수 있다. 채널에서 생성되는 물에 의해 감쇠되는 중성자 비율은 약 10%이다.

3. 실험 장치

3.1 예비 실험 장치

Fig.4 는 예비 실험 장치의 개략도이다. 실험 장치는 물 공급 라인, 압축 공기 공급 라인, 그리고 PEMFC 와 회수 라인으로 구성되어 있다. 물과 압축 공기를 이용하여 연료전지의 운전 상황을 모사하였다. 각각의 압력 조절기(pressure regulator)를 이용하여 압축 공기와 물의 유량을 독립적으로 조

절하였다. 실제 운전 중에 연료전지의 채널에서 생성되는 물의 양이 많지 않고, 채널의 크기가 작기 때문에 공급되는 물의 양이 너무 많을 경우 채널에서 2 상 유동 생성을 방해하기 때문에 2 개의 압력 조절기를 이용하여 가능한 유량을 최소로 유지하였다. 압축 공기와 물은 T 형 연결부에서 혼합되어 중성자 빔 라인 내부에 설치된 PEMFC 로 2 상 유동 상태로 유입되며, 회수 라인을 이용해 회수하였다.

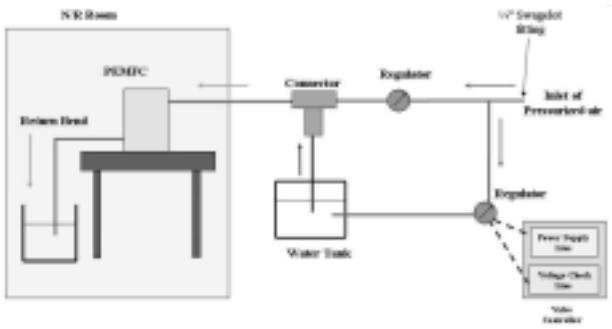


Fig. 4 Schematic diagram of test apparatus

3.2 중성자 방사선 촬영 장치

중성자 방사선 촬영법은 중성자원, 전환막, 거울 상자 그리고 CCD 카메라 시스템으로 구성된다. Fig.5 는 중성자 빔 라인에 설치된 중성자 방사선 촬영 장치이다. 본 연구의 예비 실험 장치와 영상 장치는 미국 NIST 의 BT-6 에 설치되었다. 사용된 중성자 특성은 콜리메이터 출구 직경 2cm 에서 중성자속 1.84×10^{7} n/cm^{2}s, L/D 비 280 을 가지고 있다. 모든 이미지는 노출 시간 1 초에, 총 1000 초 동안 기록하였다. 중성자는 연료전지 위치 별로 서로 다른 투과 특성 때문에 감쇠율이 부분적으로 다르게 나타나며, 연료전지를 통과한 중성자는 연료전지 후단에 설치된 0.3mm 두께의 중성자 전환막과 반응하여 파장 530nm 인 가시광선을 발생시킨다. 전환막에서 발생한 빛을 2048*2048 픽셀의 CCD 카메라(Andor Technology 사)를 사용하여 기록하였다. 유해한 방사선으로부터 CCD 카메라를 보호하기 위해 전환막 후단에 설치된 거울 상자를 이용하여 CCD 카메라를 중성자 빔의 주 흐름 외부에 설치하였다.

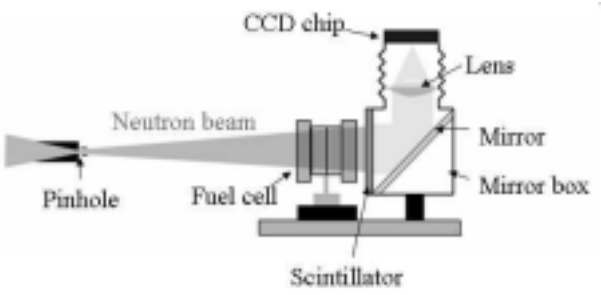


Fig. 5 Schematic diagram of neutron radiography image system (NIST)

3.3 실험 방법 및 이미지 프로세싱

본 연구에 사용된 PEMFC 는 3 개의 채널(수소, 산소 그리고 냉각수)을 가지고 있기 때문에 각각의 채널에 대해 실험을 수행하였다. 연료전지 내부를 흐르는 2 상 유동을 한 종류의 이미지를 이용해서 구분하기에는 노이즈가 많기 때문에 각 실험에서는 3 종류((Dry, Wet 및 Dark current)의 이미지를 획득하였다. 그 중 Dark current 이미지는 CCD 카메라 자체에서 발생하는 노이즈를 없애기 위해 사용된다. Dry 이미지는 압축 공기와 물을 공급하지 않은 상태에서 찍은 이미지로 이미지에는 2 상 유동 및 물 분포에 대한 정보가 없지만, 물을 제외한 다른 구성 물질 때문에 생기는 노이즈를 제거할 수 있기 때문에 무척이나 중요하다. Dry 및 Wet 이미지는 이미지 프로세싱 S/W 를 이용하여 먼저 Dark current 이미지를 빼서 CCD 카메라 자체에서 발생된 노이즈를 제거 하였다. 그리고, PEMFC 내의 물에 의한 영향만을 보기 위해 이미지 프로세싱 S/W 를 사용하여 Wet 이미지를 Dry 이미지로 나누었다. 이와 같은 이미지 프로세싱 후 이미지는 각각의 채널에서 2 상 유동 및 물 분포에 대한 정보만을 가지게 된다.

각 채널에 존재하는 물의 양을 측정하기 위하여 알루미늄으로 기준 시편을 제작하였다. Fig.6 은 기준 시편의 사진이다. 기준 시편은 50 μm (하부)에서 500 μm (상부)까지 두께가 증가하도록 10 개의 층으로 구성되어 있다. 물 두께에 따른 그레이스케일(gray scale) 값을 구하기 위해 Dry, Wet 및 Dark current 이미지를 획득했으며, 이미지 프로세싱 S/W 와 이미지들을 이용하여 기준 시편에서 물 두께에 따른 그레이스케일 값을 구했다. 이 값을 PEMFC 채널에서의 그레이 스케일 값과 상호 비교하여 채널에 존재하는 물의 양을 계산하였다.

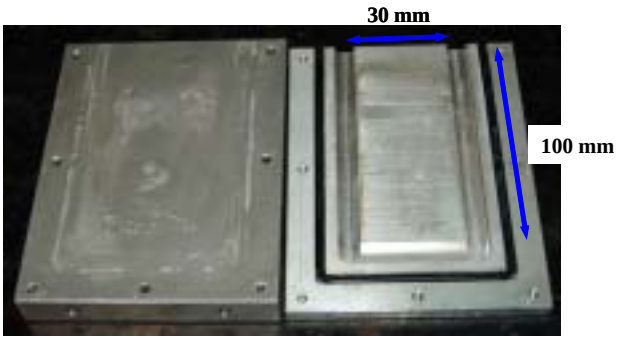


Fig. 6 Schematic diagram of reference specimen

4. 실험 결과 및 토론

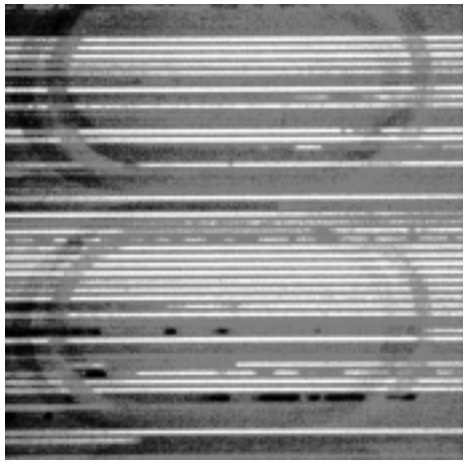
Fig.7 은 수소, 산소 및 냉각수 채널에서 2 상 유동 거동을 나타낸 것이다. Dry, Wet 및 Dark current 이미지와 이미지 프로세싱 S/W 를 사용하여 모든 이미지들은 무차원화 했기 때문에 이미지에서 흰색은 물에 의해 중성자 감쇠가 가장 큰 것을 의미하며, 검정색은 공기에 의해 중성자 투과가 큰 것을 의미한다. 일반적인 중성자 방사선 촬영 이미지는 중성자 투과율 변화를 이용하기 때문에 본 연구의 이미지와는 반대로 나타난다(흰색은 낮은, 검정색은 높은 중성자 투과). 그러나 본 연구에서는 아래 식들을 사용했기 때문에 이미지의 상이 역전되었다.

$$I_{Dry} = I_o e^{-\Sigma t_{ch}}, I_{wet} = I_o e^{-\Sigma (t_{ch}+t_{water})} \quad (1)$$

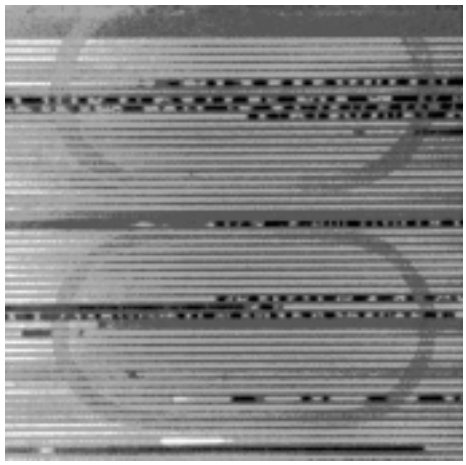
$$\frac{I_{wet}}{I_{Dry}} = \frac{I_o e^{-\Sigma (t_{ch}+t_{water})}}{I_o e^{-\Sigma t_{ch}}} = e^{-\Sigma t_{water}} \quad (2)$$

$$\Sigma t_{water} = \ln\left(\frac{I_{Dry}}{I_{wet}}\right) = \ln\left(\frac{I_o e^{-\Sigma t_{ch}}}{I_o e^{-\Sigma (t_{ch}+t_{water})}}\right) \quad (3)$$

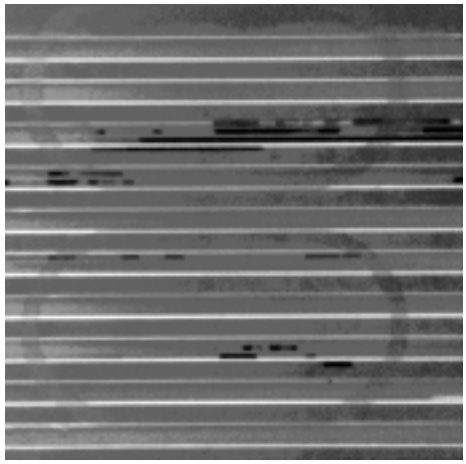
Fig.7 에서 각 채널에서의 이미지는 노출 시간 1 초로 얻은 200 장의 이미지의 합한 것이다. 노출 시간 1 초는 채널에서 2 상 유동 형태와 천이를 관찰하기에는 너무 길지만, 예비 실험을 수행할 때 정상 상태를 유지했기 때문에 몇 가지 2 상 유동 형태를 관찰할 수 있다. 각각의 예비 실험에서 체적 유량을 측정했다면, 상관식을 이용해 구한 유동 형태와 천이점을 실험 결과와 비교를 통하여 명확하게 유동 형태 등을 제공할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구의 목적은 중성자 방사선 촬영법을 이용하여 PEMFC 내부의 2 상 유동 가시화 가능성을 판단하는 것이기 때문에 유량은 중요치 않아 측정하지 않았다. 본 연구의 목적인 중성자 방사선 촬영법을 이용한 PEMFC 내부 가시화는 가능함을 Fig.7 을 통해 확인할 수 있다.



a) Hydrogen Channel



b) Oxygen Channel

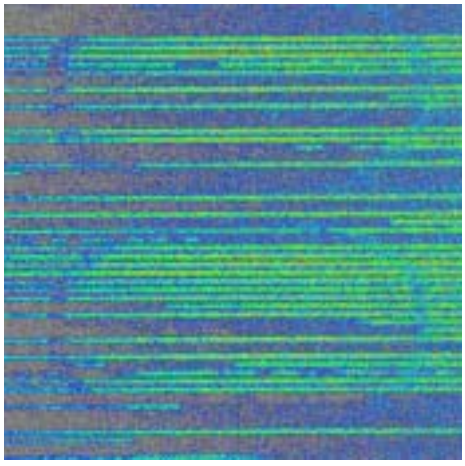


c) Cooling Channel

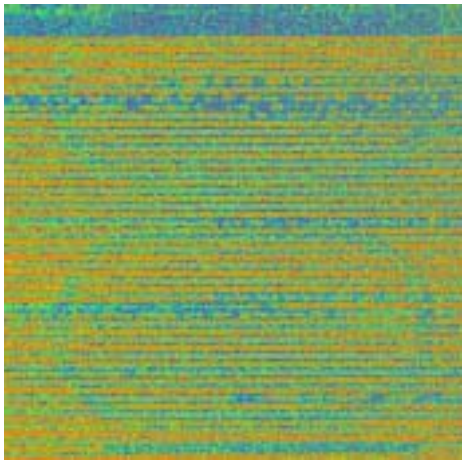
Fig. 7 2-phase flow images at a) Hydrogen, b) Oxygen, and c) Cooling Channels

다른 가시화 기법을 이용한 기존의 PEMFC 가시화는 단위 전지 음극(Cathode)에서 물의 생성을

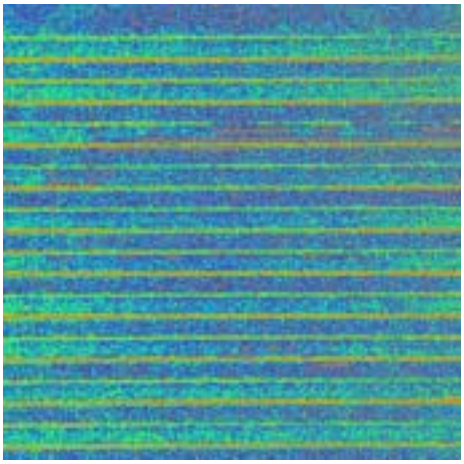
주로 연구했었다. 그렇지만 여러 개의 연료전지가 직렬로 연결될 경우 생성되는 물의 양은 증가하게 되고, 결국에는 2 상 유동을 형성하게 된다. 그러므로 물의 생성 메커니즘에 관한 연구도 중요하지만, 연료전지 시스템의 관점에서 본다면, 2 상 유동 거동도 중요하다. Fig.7 의 수소와 산소 채널을 자세히 관찰하면 몇 부분은 액체만, 몇 부분은 2 상 유동 (액적류 및 환상류) 이 존재함을 알 수 있다. Fig.7 은 운전 중인 연료전지에서 획득한 이미지가 아니기 때문에 2 상 유동 형태는 실제 상황을 의미하지 않는다. 그러나 중성자 방사선 촬영법을 이용하여 운전 중인 연료전지를 가시화 한다면, 운전 조건에 따라서 주된 2 상 유동 형태와 천이점을 판단할 수 있을 것으로 추측되며, 이러한 정보는 연료전지 시스템의 효율 향상에 기여할 것이다.



a) Hydrogen Channel



b) Oxygen Channel



c) Cooling Channel

Fig. 8 Water Distribution Images of a) hydrogen, b) oxygen, and c) cooling channel

각 채널에서 2 상 유동에 관한 정보 외에 물의 분포와 양은 연료전지 효율 향상에 무척이나 중요하다. Fig.8 은 연료전지 내의 물 분포 및 양을 나타낸다. 물의 양은 기준 시편을 이용하여 계산하였다. Fig.7 과 달리 Fig.8 은 노출시간 1 초에서의 이미지를 나타내며, 총 200 장의 이미지를 획득하였다. 획득한 이미지를 이용하여 동영상을 만들 수 있으며, 이 경우 물의 양을 정성적으로 예측할 수 있다. 운전 중인 연료 전지의 이미지를 얻는다면, 운전 상황에 따라서 달라지는 물의 양에 대한 정보를 알 수 있으며, 이는 성능 향상에 크게 기여할 것이다.

각 채널에서 2 상 유동의 형태와 물 분포 및 양에 대한 정보뿐 아니라, 중성자 방사선 촬영법을 이용할 경우 연료전지의 손상 없이 내부의 기하학적 조건과 내부 문제를 확인할 수 있다. 예로, Fig.7 에서 냉각수 채널과 산소(또는 수소) 채널의 물의 존재를 의미하는 흰색의 크기가 서로 다름을 알 수 있다. 이것은 냉각수와 산소(또는 수소) 채널의 폭이 서로 다름을 의미한다. 이처럼 중성자 방사선 촬영법은 미리 내부의 기하학적인 조건을 알지 못해도, 촬영한 이미지를 통해 알 수 있으며, 특히 운전 중인 연료전지에서 혹시라도 발생할 수 있는 폭발 같은 안전성 검사를 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 중성자 방사선 촬영법을 이용하여 PEMFC 내의 2 상 유동 및 물의 분포에 대한 가시화를 수행하였다. 비록 운전 중인 연료전지를 이용하지 않았지만, 물과 압축 공기를 이용한 예비 실험 장치를 이용하여 중성자 방사선 촬영법으로 PEMFC 내부 가시화 가능성을 확인하였으며, 정상

상태에서 PEMFC 에서 생기는 2 상류를 관찰하였다. 그리고 기준 시편과 이미지 분석 기법을 이용하여 PEMFC 의 채널에서 생성되는 물의 양을 계측하였다. 만약 운전 중인 연료전지에서의 물의 양과 2 상 유동 형태에 관한 정보는 연료전지 시스템 효율 향상에 크게 도움이 될 것이다. 그렇지만, 아직까지는 중성자 방사선 촬영법으로 실시간 관찰에 어려움이 있기 때문에 운전 중인 연료전지에서 2 상 유동의 거동 및 물의 분포를 가시화하기 위해서는 영상 기법 및 실험 방법 최적화가 요구된다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업(NRL) 및 현대 자동차 연구소의 후원으로 수행되었으며, 실험을 도와준 NIST 의 Dr. D. Jacobson 과 D. Hussey 에 감사드립니다.

참고문헌

(1) C. K. Dyer, 2002, “Fuel cells for portable applications, ” J. Power Sources, 106, 31-34
(2) W. Vielstich, A. Lamm, H. Gasteiger, 2003, “Handbook of fuel Cells-Fundamentals, Technology, Application, ” Wiley, New York
(3) K. Mishima, T. Hibiki, 1996, “Quantitative limits of thermal and fluid phenomena measurements using the neutron attenuation characteristics of materials, ” Exp. Therm. and Fluid Sci., 12, 461-472
(4) T. Hibiki, K. Mishima, 1996, “Feasibility of high frame-rate neutron radiography by using a steady thermal beam with 10^6 n/(cm^2s) flux,” Nucl. Instr. and Meth., 369, 186-194
(5) K. Mishima, T. Hibiki, H. Nishihara, 1997, “Visualization and measurement of two-phase flow by using neutron radiography,” Nucl. Eng. and Design, 175, 25-35
(6) K. Mishima, T. Hibiki, 1998, “Development of high-frame-rate neutron radiography and quantitative measurement method for multiphase flow research,” Nucl. Eng. and Design, 184, 183-201
(7) Sl Koerner, E. Lehmann, P. Vontobel, 2000, “Design and optimization of a CCD-neutron radiography detector,” Nucl. Instr. and Meth.,454, 158-164