

고분자전해질형 단위 연료전지의 공기극 유로 채널 내 온도 분포와 플러딩 현상에 관한 연구

김 한상¹⁾, 하 태훈²⁾, 민 경덕³⁾

A Study of Temperature Distribution and Flooding Phenomena of Cathode Flow Channel in a PEM Unit Fuel Cell

Han-Sang Kim, Taehun Ha, Kyoungdoug Min

Key words : Water management(물 관리), PEM fuel cell(고분자전해질형 연료전지), Cathode flooding(공기극 플러딩), Flow channel(유로), Transparent cell(가시화 셀), Temperature distribution(온도 분포)

Abstract : Water management is considered to be one of the main issues to be addressed for the performance improvement of proton exchange membrane (PEM) fuel cell. For good water management, the detailed information on the water distribution inside an operating PEM fuel cell should be available to main an adequate level of hydration in the PEM while avoiding performance decline due to liquid water flooding. For the PEM fuel cell to be commercially viable as vehicle applications, the flooding on the cathode side should be minimized during the fuel cell operation. In this study, to investigate cathode flooding and its relation with temperature distribution in flow channels, visualization study was performed on the cathode side of a PEM fuel cell. For the direct visualization of temperature field and water transport in cathode flow channels, a transparent cell was designed and manufactured using quartz window. Water transport and its two-phase flow characteristics in flow channels were investigated experimentally. Also, the visualization of temperature distribution in cathode flow channels was made by using IR camera. Results indicated that the temperature rise near the exit of cathode flow channel was found. It is found that this area corresponds to the flooding area from both temperature and flooding visualization results. It is expected that this study can effectively contribute to get the detailed data on water transport linked with heat management during the operation of a PEM fuel cell.

1. 서 론

최근 들어 환경 문제, 화석 연료 고갈 문제 등에 대한 전 세계적인 관심이 증가됨에 따라 미래 에너지원으로서 연료전지에 대한 적극적인 연구가 이루어지고 있다. 수소 연료전지는 수소와 산소가 반응하여 물을 생성시키는 반응으로 에너지 변환 과정에서 유해 배출물이 생성되지 않으며 기존 동력원에 비하여 효율을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히, 그 중에서도 고분자 전해질형 연료전지는 낮은 작동 온도, 빠른 부하 응답 특성, 높은 효율 및 출력 밀도, 짧은 시동 시간 등으로 자동차용 및 정지형(stationary)의 동력원으로 적합한 것으로 인식되면서 상용화를 위한

연구, 개발 노력이 본격적으로 진행되고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾

그런데, 고분자전해질형 연료전지의 경우, 낮은 작동 온도(70 - 80℃) 때문에 효율과 성능을 최적으로 유지하기 위해서는 전기화학 반응에서 생성되는 물을 적절히 제어, 관리하는 것이 매우 중

-
- 1) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : hsk007@plaza.snu.ac.kr
Tel : (02)880-1705 Fax : (02)874-2001
 - 2) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : glassrose@empal.com
Tel : (02)880-8363 Fax : (02)874-2001
 - 3) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : kadmin@snu.ac.kr
Tel : (02)880-1661 Fax : (02)883-0179

요한 과제 중의 하나이다. 이와 같은 물 관리는 적절한 가습을 통한 전해질 막의 수소 이온 전도도의 유지에 1차적인 목적이 있다. 그렇지만, 연료전지 내에서 생성된 물이 연료전지 밖으로 배출되는 수소 및 공기에 의하여 적절한 속도로 제거되지 못하여 발생하는 플러딩 현상의 최소화도 물 관리에서 동시에 구현되어야 할 중요한 과제이다. 특히, 공기극의 플러딩 현상은 고 전류 밀도 영역에서 질량 전달 손실(mass transfer loss)을 크게 하여 연료전지 성능을 저하시키는 심각한 문제를 야기하므로 이와 관련된 다양한 연구가 수행되어 왔다. 특히 자동차용 연료전지의 경우 질량 전달 한계의 개선이 성능 향상에 직접적인 영향을 나타내므로 최근에는 자동차용 연료전지 연구의 경우 플러딩 현상의 예측 및 제어 연구 등에 보다 많은 관심과 노력이 집중되고 있는 실정이다.

플러딩 현상은 연료전지의 다양한 작동 조건에 따라 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그 중 작동 온도의 작은 변화도 입구 습도, 응축/증발 특성 변화에 큰 영향을 미친다. 연료전지 내에서 발생한 열은 온도를 증가시켜 물 분포에 영향을 미치며, 작동 기체의 국부적인 포화 증기압을 변화시킨다.⁽⁴⁾ 또한, 작동 온도는 촉매의 활성도, 질량 전달, 전해질 막의 마름(dehydration) 현상, 열 관리 특성에 직접적인 영향을 미치고, 전해질 막 내의 온도 분포는 고분자 전해질형 연료전지의 성능, 내구성, 신뢰성과 밀접한 관계를 나타낸다.

이와 같은 현상을 효과적으로 제어하기 위해 고분자 전해질형 연료전지의 경우, 물 관리(water management) 뿐만 아니라 열 관리(thermal management)가 성능 및 효율 향상을 위하여 필수적인 연구 과제로 인식되고 있다.

본 연구에서는 연료전지 자동차의 상용화를 위한 기초 연구의 일환으로 공기극 플러딩 현상을 작동 온도와 연관하여 자세히 고찰하기 위하여 활성화 면적 25cm²의 가시화용 단위 연료전지를 설계, 제작하여 공기극 유로 내에서 발생하는 플러딩 현상을 가시화하고, 적외선 카메라를 이용하여 공기극 채널 내 온도 분포를 고찰하였다. 이를 통하여 플러딩 발생 시 2상 유동의 변화 과정과 온도 분포 변화를 분석하였다.

2. 플러딩 및 온도 분포 가시화

2.1 온도 분포 측정

고분자 전해질형 연료전지 내 온도 분포의 정량적인 파악은 물 및 열 관리를 위해서 매우 중요하다. 따라서, 작동 조건에 따른 연료전지 내의 온도 분포를 측정하기 위한 다양한 연구가 시도되어 왔다. 그 중 대표적인 것이 열전대를 이용한

온도 측정과 광학적 장비를 이용한 비접촉 방식인 적외선 카메라(Infra Red Camera)를 이용한 온도 측정법이다.

열전대를 적용하는 경우 연료전지의 정상적인 작동에 영향을 주지 않을 정도로 충분히 작은 크기이어야 하므로 주로 마이크로 열전대가 주로 적용되는데, 열전대의 삽입에 많은 기술과 노력이 뒤따르는 한계가 있다.⁽⁵⁾ 반면, 적외선을 이용한 온도 측정 방법은 측정하고자 하는 대상에 장비를 직접 설치하지 않고도 대상의 온도를 측정할 수 있는 장점이 있으며, 실시간으로 전체 표면의 온도를 효과적으로 파악할 수 있다.

본 연구에서는 공기극 플러딩 발생 시의 유로 채널 내 온도 분포의 측정을 위하여 적외선 카메라를 이용한 비접촉식 온도 측정법을 적용하였다.

2.2 온도 분포 가시화용 연료전지

Fig. 1은 가시화용 단위 연료전지를 나타낸 것이다. 공기극 유로 채널 내의 플러딩 현상과 온도 분포를 고찰하기 위하여 공기극 채널을 1 mm 두께의 탄소 복합판으로 제작하였다.

유로 채널 내 온도 분포의 측정을 위해서는 채널 내에서 발생하는 적외선을 감지할 수 있어야 하므로 적외선이 투과될 수 있는 재료 중 하나인 quartz를 적용하여 윈도우를 제작하고 공기극 채널과 결합하여 사용하였다. 전기적인 연결을 원활하게 하기 위하여 황동으로 제작된 판을 금으로 표면 도금하여 집전판(current collector)으로 공기극과 수소극에 각각 적용하였다.

본 연구에서는 두께 약 50 μm의 Nafion®112 전해질 막을 적용하였다. 공기극과 수소극에는 각각 변형 사형(serpentine) 유로를 사용하였다. 공기와 수소의 공급 방향은 공급 기체 간의 물질 전달을 보다 효과적으로 구현하고자 대향류(counter flow)를 유지하도록 하였다. 본 연구에서는 두께 약 50 μm의 Nafion®112 전해질 막을 적용하였다.

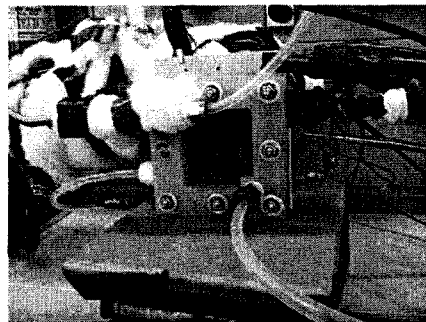


Fig. 1 Experimental apparatus for the measurement of temperature distribution in the cathode flow channels

공기 및 수소의 유량은 유량 조절 장치에 의해 제어된다. 공급된 공기와 수소는 가스 버블러 형태의 가습기에 의하여 가습되어 단위 전지로 공급된다. 그리고 공급 기체의 온도 및 습도, 압력 등을 제어할 수 있도록 열전대 및 압력 센서 등이 설치되어 있으며 공급 가스의 유량, 온도, 습도, 입, 출구 압력 강하 데이터는 Labview 기반의 데이터 처리 시스템에 의하여 각각 분석된다.

Fig. 2는 본 연구에 적용된 적외선 카메라를 나타낸 것이다. 적용된 적외선 카메라는 Inframetrica PM280이다. 이를 이용하여 플러딩 발생 시의 유로 채널 내의 온도 분포를 가시화하였다.

3. 가시화 실험 결과

공기극 플러딩 시 온도 분포 가시화 실험을 위하여 일정 전압 (0.4 V)에서 실험을 수행하였다. 공기 및 수소의 경우 모두 완전 가습 조건으로 공급하였으며, 대기압 하에서 실험은 수행되었다. 가시화 실험 조건은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

적외선 카메라로 촬영한 이미지는 플러딩 현상이 발생하기 시작하는 시점(육안으로 관찰되기 시작하는 시점)에서부터 40초 간격씩 촬영하여 PC에 저장하였으며, 이 결과를 채널 내 온도 분포와 플러딩 현상의 분석에 적용하였다.



Fig. 2 IR(Infra Red) camera adopted for the temperature measurement

Table 1. Summary of test conditions

Flow rate (l/min) (Air/H ₂)	0.75/0.16
Temperature (°C) (Cathode/Cell/Anode)	40/40/40
Pressure (Cathode/Anode)	Near ambient
Humidification	Fully humidified

3.1 유로 채널 내 플러딩 가시화 결과

Fig. 3은 연료전지 작동 온도 40°C에서 공기극 채널 내의 플러딩 현상을 가시화한 결과이다. 플러딩 현상은 유로 출구 쪽에서 먼저 나타나는 것을 알 수 있으며, 이후 유로를 따라서 공기 유동 방향과 반대쪽으로 점차 확대됨을 알 수 있다.

Fig. 3에서 오른쪽 유로 채널 (유로 채널 출구부와 가까운 쪽)은 물방울 생성으로 유로 일부가 막힌 영역이 존재함을 알 수 있는데, 이 영역에서는 물방울들이 공기가 유로를 따라 효과적으로 진행되는 것을 막아, 가스 확산층으로의 원활한 공기(산소) 공급이 이루어지지 않는 플러딩이 발생했음을 알 수 있는데, 이러한 유로 채널에서는 전류를 발생하는 역할을 제대로 할 수 없게 된다.

3.2 유로 채널 내 온도 분포 결과

Fig. 4는 온도 40°C에서의 공기극 유로 채널 내의 온도 분포를 나타낸 것이다. 실험이 진행된 초기에는 유로 채널 내에서 온도 분포 차이가 상대적으로 작지만, 시간이 경과되면서 유로 채널 출구 쪽 영역의 채널 온도가 다른 유로 채널 영역에 비하여 높아짐을 알 수 있다. 특히 온도가 높은 영역은 유로 채널 출구로부터 주위로 조금씩 확대되어 감을 알 수 있다.⁽⁶⁾

시간이 지남에 따라 온도가 높아진 유로 채널 영역의 부분이 불규칙하게 생성되기 시작함을 알 수 있는데, 이러한 영역은 공기극 플러딩 현상이 발생하는 영역과 거의 일치함을 알 수 있다.

일반적으로 작동 중인 연료전지의 경우 시간이 지남에 따라 전류 발생에서 나타나는 연료전지 내부에서의 발열 현상으로 인하여 유로 채널 내의 국부적인 온도가 상승한다.



Fig. 3 Images of flow channel flooding at the operating temperature of 40°C

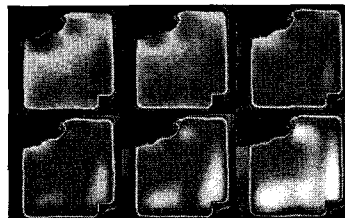


Fig. 4 Images of the temperature distribution in cathode flow channels (at the time interval of 80 sec)

그렇지만, 전류 발생에 의하여 상승할 수 있는 온도 이상으로 나타난 영역이 있음을 알 수 있다. 이는 추가적인 에너지의 공급이 존재함을 의미하는데, 플러딩 발생 영역과 그 위치가 거의 일치하는 것으로 판단해 볼 때, 플러딩 현상 발생 시 수증기가 액체로 응축되면서 방출되는 열의 영향으로 유로 채널 내 온도가 추가적으로 상승한 것임을 알 수 있다.

이와 같이 유로 채널 내의 온도 분포 측정을 통하여 공기극에서의 플러딩 발생이 유로 채널 내 온도를 추가적으로 상승시키는 것을 파악할 수 있었다.⁽⁶⁾

4. 결론

고분자 전해질형 단위 연료전지에 대한 공기극 플러딩과 유로 채널 온도 분포 가시화 실험을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 연료전지 작동 중 플러딩 발생 시 공기극 출구 쪽 유로 부분의 온도가 다른 부분에 비하여 높아짐을 알 수 있다. 이는 플러딩 현상 발생 영역과 거의 일치함을 알 수 있다.

(2) 온도 분포 측정 결과, 40°C 작동 조건에서 공기극 플러딩 발생 시 유로 내 온도 분포는 최대 약 7°C의 차이를 나타낸다. 이와 같은 온도의 증가는 수증기의 응축 과정에서 방출되는 응축열 때문으로 분석된다.

(3) 위의 연구를 통하여 얻어진 플러딩 발생이 가능한 유로 채널 내 온도 분포 데이터는 플러딩 현상을 간접적으로 파악할 수 있는 기초 데이터가 될 수 있음을 확인할 수 있다.

References

- [1] J. Larminie and A. Dicks, 2000. Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons.
- [2] A. Hakenjos, H. Muentert, U. Wittstadt, and C. Hebling, 2004. "A PEM fuel cell for combined measurement of current and temperature distribution, and flow field flooding", J. Power Sources, Vol. 131, pp. 213-216.
- [3] Klaus Tüber, David Póczy, and Christopher Hebling, 2003. "Visualization of water buildup in the cathode of a transparent PEM fuel cell", J. Power Sources, Vol. 124, pp. 403-414.
- [4] M. Wang, H. Guo, and C. Ma, 2006. "Temperature distribution on the MEA surface of a PEMFC with serpentine channel flow bed", J. Power Sources, Vol. 157, pp. 181-187.
- [5] M. M. Mench, D. J. Burford, and T. W. Davis, 2003. "In Situ Temperature Distribution Measurement in an Operating Polymer Electrolyte

Fuel Cell", Proceedings of IMECE'03, November 16-21, Washington, D. C.

[6] Han-Sang Kim, 2005. "A Study of Cathode Flooding and Species and Water Distribution in the Flow Channel of PEM Unit Fuel Cell", Ph. D. Thesis, Seoul National Univ.