

Dead ended anode 시스템에서 다공성 유로가 연료전지 성능에 미치는 영향

김준섭 · 김준범[†]

울산대학교 화학공학부
(2022년 10월 24일 접수, 2022년 11월 27일 수정, 2022년 11월 27일 채택)

Effect of Porous Flow Field on PEMFC Performance with Dead Ended Anode System

Junseob Kim and Junbom Kim[†]

School of Chemical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea
(Received October 24, 2022; Revised November 27, 2022; Accepted November 27, 2022)

초 록

Dead ended anode (DEA) 시스템은 수소극(anode) 출구를 막고 압력으로 연료를 공급하는 방식이다. DEA 방식은 시스템 단순화를 통해 연료이용효율과 전력 효율을 향상시킬 수 있다. 하지만 DEA 운전 중 공기극(cathode)에서 수소극으로 질소와 물의 역확산으로 인한 범람(flooding)이 발생한다. 이러한 범람 현상은 연료전지 성능 저하와 전극 열화의 주요 요인이 된다. 따라서 DEA 운전 시 범람을 방지하기 위하여 연료전지 구조와 구성요소가 최적화되어야 한다. 본 연구에서는 DEA 시스템에서 연료전지의 성능과 연료이용효율 향상을 위해 발포 금속을 적용한 다공성 유로에 대한 영향을 조사하였다. 그 결과, 공기극에 다공성 유로를 사용한 경우 효과적인 물 관리로 연료전지 성능과 배출 간격(purge interval)이 개선되었고, 이를 통하여 공기극 유로 구조가 물 역확산에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이에 반해 수소극의 다공성 유로가 연료전지 성능에 미치는 영향은 미미하였다. DEA 시스템에서는 발포 금속 물성이 배출 간격에 영향을 미치며 cell 크기가 큰 발포 금속에서 안정적인 성능을 나타내었다.

Abstract

The dead-end anode (DEA) system is a method that closes the anode outlet and supplies fuel by pressure. The DEA method could improve fuel usage and power efficiency through system simplification. However, flooding occurs due to water and nitrogen back diffusion from the cathode to the anode during the DEA operation. Flooding is a cause of decreased fuel cell performance and electrode degradation. Therefore, the structure and components of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) should be optimized to prevent anode flooding during DEA operation. In this study, the effect of a porous flow field with metal foam on fuel cell performance and fuel efficiency improvement was investigated in the DEA system. As a result, fuel cell performance and purge interval were improved by effective water management with a porous flow field at the cathode, and it was confirmed that cathode flow field structure affects water back-diffusion. On the other hand, the effect of the porous flow field at the anode on fuel cell performance was insignificant. Purge interval was affected by metal foam properties and shown stable performance with large cell size metal foam in the DEA system.

Keywords: PEMFC, DEA system, Metal foam, Porous flow field, Fuel efficiency

1. 서 론

수소연료전지는 친환경적이며 에너지원의 탈탄소화를 위한 필수적 요소로서, 앞으로의 수소경제 활성화를 위해서는 연료전지 시장이 확대되어야 한다. 그 중 고분자전해질 연료전지는 높은 에너지밀도와 낮은 작동 온도로 시동/정지가 용이하여 수송 분야에 적용되고 있다 [1,2]. 무인항공기, 휴대용 보조 장치와 같이 특수목적 분야의 적용성을 확대하기 위해서는 경제성과 내구성이 개선되어야 한다. 방법 중

하나로 연료공급계를 간소화하여 에너지밀도를 높이고, 시스템을 단순화하는 연구가 수행되고 있다[3,4].

연료전지의 수소 공급 방법은 Figure 1과 같이, FTA (flow through anode), RCA (recirculation anode), DEA (dead ended anode) 시스템으로 분류된다[5]. FTA 시스템은 출구가 열려있는 구조로 양론 비 이상의 연료를 연료전지에 공급하여 시스템이 복잡하고 연료이용효율이 낮다. RCA 시스템은 배출되는 수소를 재순환시켜 연료전지에 다시 공급하는 방법으로 연료이용효율을 높일 수 있지만 전력 효율이 낮고 시스템이 복잡하다. 마지막으로 DEA 시스템은 출구를 막고 연료를 압력으로 공급하여 요구수소량만큼 소모되므로 이상적인 연료이용효율을 얻을 수 있으며, 시스템 구성이 가장 간편하여 휴대용 또는 드론과 같이, 체적 밀도가 제한된 응용분야에 적용 가능하다[6], 운전 기

[†] Corresponding Author: University of Ulsan
School of Chemical Engineering, Ulsan 44610, Korea
Tel: +82-52-259-2833 e-mail: jbkim@ulsan.ac.kr

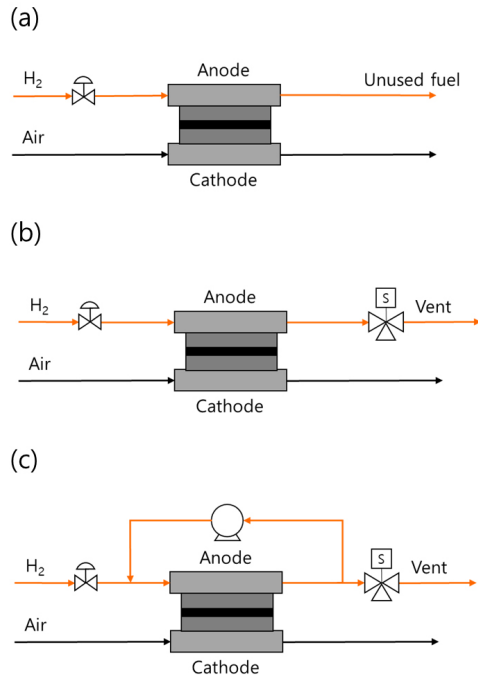


Figure 1. Schematic diagram of fuel supply system (a) flow through anode (FTA) (b) dead ended anode (DEA) (c).

법, 스택 설계 개발을 통한 개선 여지도 있다[7].

DEA 시스템은 수소극의 출구가 막혀있는 구조이기 때문에 운전 간에 공기극으로부터 역확산되는 물과 크로스오버되는 질소가 수소극에 축적되어 연료전지의 성능이 저하되고[8,9], 수소극의 출구 인근 영역에서 반응물이 촉매로 도달하지 못하여 연료 고갈현상이 발생한다[10,11]. 이러한 연료 고갈은 공기극의 전극을 높은 전압으로 유도하여 탄소 부식과 같은 열화를 가속하는 것으로 보고되었다[12]. Matsuura[13]은 DEA 시스템에서 전극 위치에 대한 국소부위의 열화를 분석하였고, 입구 영역에 비하여 출구 영역에서 전극 열화가 극심하게 발생하는 것을 확인하였다. 더욱이 DEA 시스템에서 운전이 지속될수록 수소극의 입구 영역은 건조한 수소로 인하여 전해질막 수화도가 감소하고, 출구 영역은 역확산된 물로 인하여 범람(flooding)이 발생하게 된다[14]. 이로 인하여 반응 면적에 대하여 전해질막 수화도의 구배가 발생하고, 출력 전류밀도분포가 불균등해지는 등 내구성이 저하된다[15]. Yang[16]은 전류밀도 분포를 측정할 수 있는 세그먼트 셀을 이용하여 DEA 시스템에서 반응면적에 대하여 전류밀도가 불균일한 것을 실험적으로 확인하였다.

DEA 시스템에서는 일반적으로 솔레노이드 밸브를 주기적으로 개폐하여 수소극에 축적된 물과 질소를 배출하는 방법을 사용하고 있다[17]. 하지만 배출(purge) 동안 미반응 연료도 같이 배출되기 때문에 연료이용효율이 저하되고[18], 범람으로 인한 전압 강하와 전력 변동이 발생한다[19]. 연료이용효율 향상과 연료전지 내구성 개선을 위한 배출 전략(purge strategy)에 관한 연구가 다수 수행되었고[20-22], 수소 배출 방법 또는 운전 조건이 연료이용효율과 성능에 영향을 미치는 것으로 확인되었다[23,24]. 하지만 운전 조건 최적화를 통하여 효과적으로 불순물을 배출할 수 있지만, 원천적으로 물의 역확산에 의한 범람 현상을 막지 못하기 때문에 연료 이용효율을 개선하는데 한계가 있다. 때문에 범람 현상을 억제하기 위해서 운전 간 연료전지 내에서의 물 거동과 수분 응축에 관한 연구가 수행될 필요가 있다.

Table 1. Physical Properties of Metal Foam

	Cell size (um)	Thickness (mm)	Compression ratio (%)	Flow field thickness (mm)
S1	580	1.9	47.4	1.0
S2	3,000	4.5	77.8	

최근 가시화 분석 기법의 발달로 연료전지 운전 간에 분리판 채널 및 기체확산층 내에서 물 거동과 수분 응축에 관한 연구가 다수 수행되었다[25-27]. Wu[25]는 중성자 방사선 촬영기술을 이용하여 사형유로 형상에서 채널 개수에 대한 물 거동을 분석하였고, 채널 수가 증가할수록 낮은 차압으로 인하여 채널 내 물 함량이 증가하는 것으로 보고하였다. 또한 Zhao[27]는 DEA 시스템 운전 시 공기극에서 반응으로 형성된 물이 수소극으로 역확산되어 채널 내에서 응축되는 것을 관찰하였다. 따라서 DEA 시스템에서 범람 현상을 최소화하기 위하여 수분 응축을 최소화하고 물 배출이 원활한 유로 형상을 설계할 필요가 있다.

선진연구에서 연료전지의 유로 형상이 DEA 시스템에서 범람 현상에 영향을 미치는 것으로 보고되었다[28-30]. Yang[28]은 평행, 꼬임, 사형 유로 형상에 대한 전극 면적에 대한 전류밀도분포를 측정하였고, DEA 시스템 운전 시 사형유로에서 연료전지 성능이 가장 안정적인 것으로 보고하였다. 또한 Kim[30]은 휴대용 전원을 목적으로 외부 가습 장치 없이 DEA 시스템에서 발포 금속 유로를 적용한 연료전지를 이용하여 성능과 연료이용효율을 평가하였고, 발포 금속 유로를 적용한 경우에 원활한 반응물 공급과 물 관리로 연료이용효율을 개선할 수 있는 것으로 확인되었다. 이를 통하여 유로 형상이 운전 간에 물 거동과 수분 응축에 영향을 미치는 것으로 고려할 수 있다. 그 중 다공성유로는 기존의 유로 형상 분리판과 다르게 유로가 없고, 기공을 통하여 반응물을 전극 면적에 균일하게 전달 할 수 있는 장점이 있어 활발히 연구되고 있다[31]. 또한 선형연구를 통하여 고분자전해질 연료전지에 발포 금속을 공기극 유로로 적용하였을 경우에 물질전달 저항이 감소하는 것을 확인하였다[32]. 본 연구에서는 DEA 시스템에서 발포 금속에 대한 범람 현상 경향과 연료전지 성능 특성을 연구하였다.

2. 실험

2.1. 단위전지 제작

DEA 시스템에서 분리판의 유로 형상에 대한 성능과 범람 현상을 평가하기 위하여 활성 면적이 25 cm²인 유로가 없는 분리판과 사형유로 형상 분리판을 제작하였다. 사형유로 형상은 깊이가 0.9 mm인 5개의 채널로 구성되어 있고, 다공성유로는 깊이가 1 mm인 홈으로 구성되었다.

실험에 사용한 발포 금속은 개포형(open cell)으로 크기가 580, 3000 um인 구리 폼(E&KOA, Korea)을 분리판 홈 깊이에 맞추어 두께를 1 mm로 압축하여 사용하였고, Table 1에 실험에 사용한 발포 금속의 압축률을 정리하였다. 발포 금속의 표면 형상을 전자주사현미경을 이용하여 관측하였고, Figure 2(a)에 S1 (580 um)를 Figure 2(b)에 S2 (3000 um)의 표면 형상을 나타내었다. 막-전극접합체는 음극과 양극의 백금 로딩량이 0.4 mg_p/cm² 인 G-type (CNL energy, Korea)를 사용하였고, 기체확산층은 두께가 250 um인 JNT20-A3 (JNTG, Korea)를 30% 압축되도록 단위전지를 100 kgf·cm으로 체결하였다.

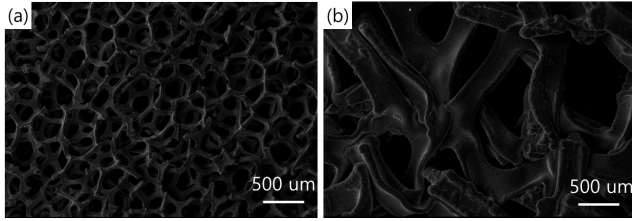


Figure 2. SEM images of metal foam for different cell size (a) 580 um (S1) (b) 3,000 um (S2).

2.2. 전기화학분석

전기화학분석은 FTA 시스템에서 65 °C, 상대습도 100% 조건에서 분극곡선(IV curve), 전기화학 임피던스 분광법(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)을 사용하였다. 제작한 단위전지를 OCV - 0.5 V - OCV 전압 범위를 20회 반복하여 활성화한 후 연료전지 성능을 측정하였다. 분극곡선은 수소와 공기 유량을 부하전류밀도에 해당하는 유량의 양론 비 1.5 및 2.0으로 공급하면서 각각의 부하 전류에서 1분간 유지하였고 2 Hz 간격으로 전압을 측정하여 마지막 10개의 측정값을 평균 내어 기록하였다. 전기화학 임피던스 분광법은 수소와 공기를 각각 520, 1660 sccm으로 공급하였고, ZIVE SP5 (WonATech, Korea)와 ZB560B (WonATech, Korea)를 사용하여 100 mHz~10 kHz 사이의 주파수 범위에서 진폭을 측정 전류의 10%로 하여 측정하였다.

2.3. DEA 시스템

DEA 시스템에서 연료전지 성능 특성과 범람 현상을 평가하기 위하여 수소는 가스 레귤레이터를 이용하여 0.25 bar 압력으로 상온의 건조한 상태로 공급하였고, 유량계측기(Kofloc, Japan)와 디지털 압력 센서(Nuri-tech, Korea)를 사용하여 수소 공급량과 수소극의 출구 압력을 실시간으로 측정하였다. 공기는 65 °C, 상대습도 100%로 유량계측기(Kofloc, Japan)를 이용하여 부하 전류에 대하여 2.0의 양론 비로 단위 전지에 공급하였다. LabVIEW와 DAQ (USB-6221, National Instrument, USA)를 사용한 제어프로그램을 작성하여 연료전지의 전압, 수소의 유량과 압력을 측정하였고, 배출 조건(purge condition)에 대한 솔레노이드 밸브(Parker, USA) 개폐를 자동으로 제어하였다. 배출 조건은 단위전지의 평균 전압이 초기 운전 전압에 비하여 0.1 V 감소하였을 때 배출 시간(purge duration)을 0.1 s으로 제어하여 물을 배출하도록 하였다. 평균 전압이 0.1 V 감소하는 데 소요되는 전체 시간을 배출 간격(purge interval)으로 나타내었고 전압이 감소하기 시작한 시점에서부터 0.1 V까지 감소하는 데 소요되는 시간을 측정하여 전압 감소를 계산하였다.

3. 결 과

3.1. 운전 조건에 대한 영향

DEA 시스템에서 반응으로 생성된 물의 영향과 범람 현상 특성을 분석하기 위하여 수소극과 공기극에 사형유로 분리판을 이용하여 단위전지를 제작하였다. 400, 800, 1,200 mA/cm²에서의 정전류 조건에 대한 단위전지 전압과 배출 간격을 측정하여 Figure 3(a)에 400 mA/cm²에 대한 배출 주기(purge cycle)을, Figure 3(b)에 부하 전류에 대한 배출 주기를 나타내었다. Figure 3(a)에서 운전 초기에 0.75 V로 안정적인 전압을 출력하다가 운전시간이 지속됨에 따라 수소극에 물과 질소가 축적되어 전압이 감소하기 시작하였고, 솔레노이드 밸브로

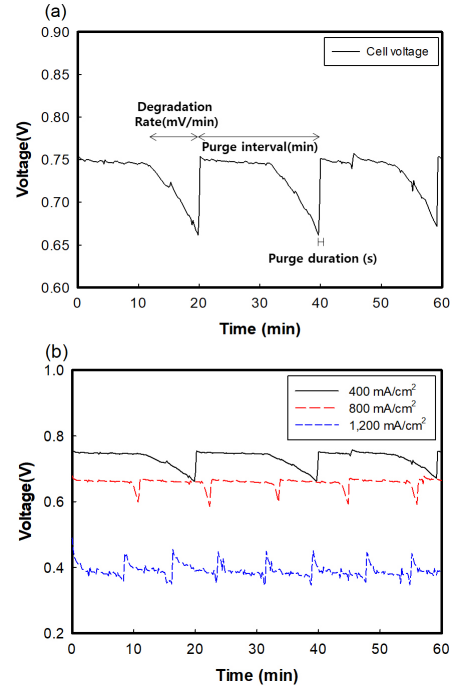


Figure 3. Cell voltage at DEA system (a) purge cycle (b) purge cycle at different current.

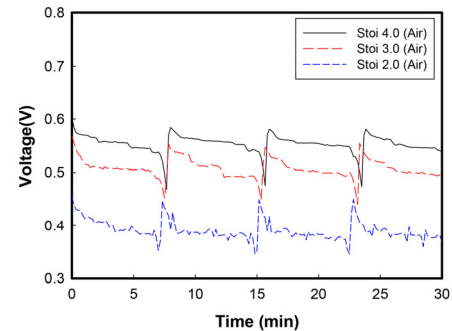


Figure 4. Effect of air stoichiometry on purge cycle at 1,200 mA/cm².

수소극에 축적된 불순물을 배출하면 연료전지 성능이 회복되었다. DEA 시스템에서 건조한 상태의 수소를 공급하였기 때문에 배출 동안에 수소극에서 배출되는 물은 공기극으로부터 역확산된 것으로 고려할 수 있다. Figure 3(b)에서 부하전류가 증가할수록 배출 간격은 19.7, 10.3, 7.9 min으로 감소하였고, 전압 감소율은 9.6, 77.3, 84.6 mV/min으로 증가하였다. DEA 시스템에서 부하전류가 증가할수록 반응으로 생성되는 물의 양이 증가하므로 공기극의 유로 및 기체확산층에서 수분 함량이 증가하기 때문에 수소극으로의 물 역확산 속도가 증가하여 배출 간격이 짧아지고 전압 감소율이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 1,200 mA/cm²의 고전류밀도 조건에서는 배출 이후에 회복된 전압이 짧은 시간 내에 감소하다가 유지되는 등 불안정한 전압을 나타내었다.

고전류밀도 조건에서 공기 유량에 대한 범람 현상을 분석하기 위하여 1,200 mA/cm² 전류밀도 조건에서 양론 비 4.0, 3.0, 2.0의 공기 유량을 공급하여 DEA 시스템에서 정전류 실험을 수행하였고 Figure 4에 양론 비에 대한 배출 주기를 나타내었다. Figure 4에서 양론 비가

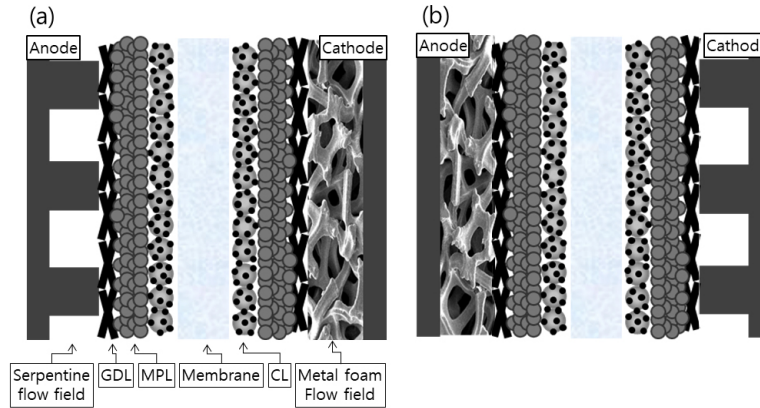


Figure 5. Schematic diagram of unit cell with metal foam flow field (a) CaF, (b) AnF.

Table 2. Fuel Cell Configuration with Metal Foam and Cell Performance with S1

	Anode BP	Cathode BP	C.D.(mA/cm ²) @ 0.6 V	R _{CT+MT} (mΩ*cm ²) @ 800mA/cm ²	Purge interval(min) @ 800mA/cm ²
BoF	Metal foam	Metal foam	1131.2	121.2	9.98
CaF	Serpentine	Metal foam	1198.9	120.1	11.44
AnF	Metal foam	Serpentine	943.1	239.2	6.10
Ser	Serpentine	Serpentine	926.5	242.0	10.51

증가할수록 연료전지 평균 전압은 0.388, 0.507, 0.551 V으로 증가하고 출력 전압도 안정적이거나, 평균 배출 간격은 7.5, 7.69, 7.79 min으로 미세하게 증가하였다. 따라서 DEA 시스템 운전 시 고전류밀도에서 불안정한 전압을 나타내는 것은 수소극에서의 범람 현상 보다는 공기극에서 물 관리에 의한 물질 전달로 인하여 발생하는 것으로 확인되었고, 공기 유량과 같은 운전 조건을 이용한 배출 간격 개선은 한계가 있었다.

3.2. 발포 금속에 대한 영향

수소극과 공기극에 대한 영향을 각각 분석하기 위하여 다공성유로를 수소극과 공기극에 적용한 단위전지(BoF), 공기극에 적용한 단위전지(CaF), 수소극 적용한 단위전지(AnF), 수소극과 공기극에 사형 유로를 적용한 단위전지(Ser)를 제작하여 실험을 수행하였다. Figure 5(a)에 CaF와 Figure 5(b)에 AnF의 구성을 나타내었고, Table 2에 실험에 사용한 단위전지를 정리하였다.

Cell 크기가 580 um인 발포 금속을 유로로 사용한 단위전지의 분극 곡선과 임피던스를 측정하였고, Figure 6(a)에 분극곡선을, Figure 6(b)에 Nyquist plot을 나타내었다. Figure 6(a)에서 600 mA/cm² 이하의 저전류밀도 영역에서는 다공성유로에 관계없이 동일한 성능을 출력하였지만, 600 mA/cm² 이상에서는 전류밀도가 증가할수록 공기극에 다공성유로를 사용한 CaF와 BoF에서 성능이 높은 것으로 확인되었다. Figure 6(b)의 Nyquist plot에서도 공기극에 다공성유로를 적용한 단위전지에서 물질전달 저항과 전하전달 저항에 해당하는 반원의 크기가 작은 것으로 나타났다. 다공성유로는 전극 면적에 대하여 균등한 연료 공급과 효과적인 물 관리로 물질전달 저항을 감소시키는 것으로 보고되었다[31]. 또한 고분자전해질 연료전지에서 수소극보다 공기극의 전압 손실이 지배적이며, 물질전달 손실은 주로 공기극에서 발생하기 때문에 공기극에 다공성유로를 적용한 경우에 연료전지 성능이 높은 것으로 판단된다.

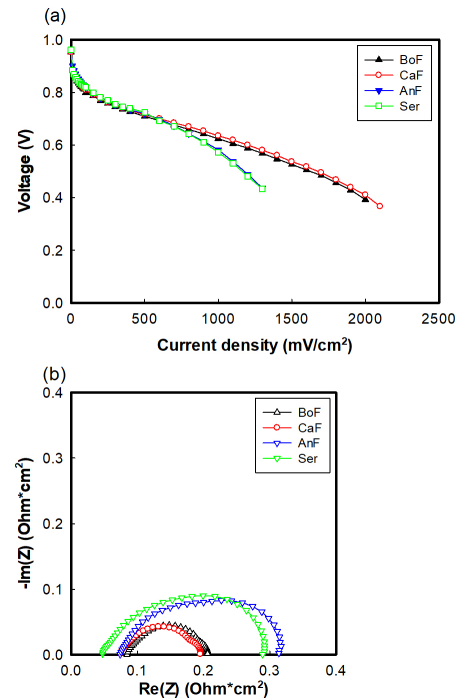


Figure 6. Effect of flow field configuration on cell performance (S1) (a) IV-curve (b) Nyquist plot at 800 mA/cm².

DEA 시스템에서 다공성유로에 대한 범람 현상 경향을 분석하기 위하여 800 mA/cm² 전류밀도 조건에서 정전류 운전 평가를 수행하였고, Figure 7(a)에 S1에 대한 배출 주기를, Figure 7(b)에 S2에 대한 배출 주기를 나타내었다. Figure 7(a)에서 BoF, CaF, 그리고 AnF의 배출 간격은 9.98, 10.69, 6.1 min으로 수소극에 다공성유로를 적용한

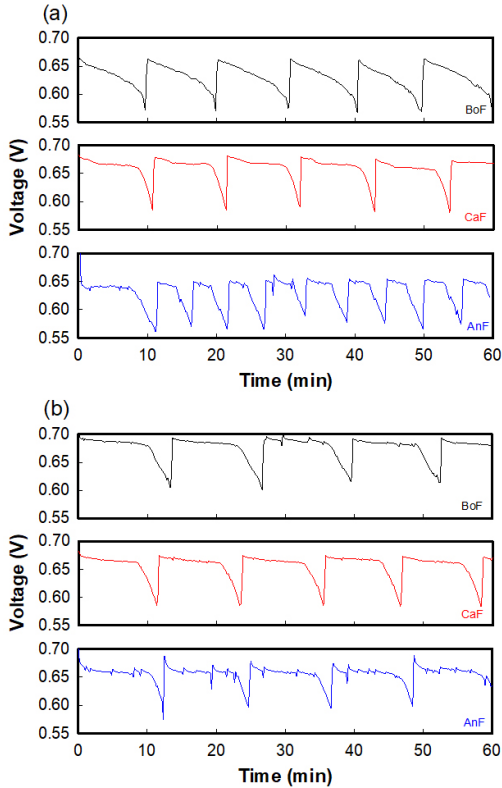


Figure 7. Effect of metal foam on purge cycle at DEA system (a) S1 (b) S2.

BoF, AnF에서 수소극과 공기극에 사형유로를 사용한 Ser보다도 짧은 배출 간격을 나타냈다. 또한 BoF의 경우 AnF에 비하여 배출 간격은 증가하지만, 배출 이후에도 회복된 전압이 유지되지 않고 감소하는 경향을 나타내었다. 이에 반해 cell 크기가 3,000 μm 인 발포 금속을 사용한 Figure 7(b)에서는 BoF, CaF, 그리고 AnF에 대하여 배출 간격이 12.87, 11.45, 12.14 min으로 Figure 7(a)와 비교하여 비교적 균일한 배출 간격을 보였으며, 수소극에 발포 금속을 사용한 BoF와 AnF에서도 안정적인 전압을 출력하였다. DEA 시스템에서 수소극 출구에 생성수를 저장할 수 있는 버퍼를 설치한 경우에 배출 간격이 증가하고 연료전지 성능이 안정적인 것으로 보고되었다[28]. 이는 DEA 시스템에서 공기극에서 수소극으로 역확산된 물이 출구 부근에 축적되면서 액막이 전극을 덮어 범람 현상이 발생하는 것으로 고려할 수 있다. 따라서 수소극에 S1을 유로로 사용한 경우에는 상대적으로 작은 기공 크기로 인하여 물 관리에 취약하고, 이에 반해 S2를 사용한 경우에는 상대적으로 많은 양의 물을 보유할 수 있어 연료전지 성능과 배출 간격이 높은 것으로 판단된다. 이를 통하여 발포 금속의 기공 크기와 압축률이 연료전지 성능과 물 거동에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

DEA 시스템에서 공기극의 유로 형상에 대한 연료전지 성능과 범람 현상 영향을 비교하기 위하여 공기극에 다공성유로를 사용한 단위전지의 배출 주기를 Figure 8에 나타내었다. 800 mA/cm^2 전류밀도 조건에서 분리판 종류와 관계없이 안정적인 전압을 출력하다가 9 min 이후 전압이 감소하기 시작하였고, 분리판 형상에 따라서 전압 감소율이 Ser, CaF (S1), 그리고 CaF (S2)에 대하여 77.3, 46.8, 34 mV/min 으로 발포 금속을 사용한 경우에 전압 감소율이 감소하였고, cell 크기가 3,000 μm 으로 큰 CaF (S2)에서 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는

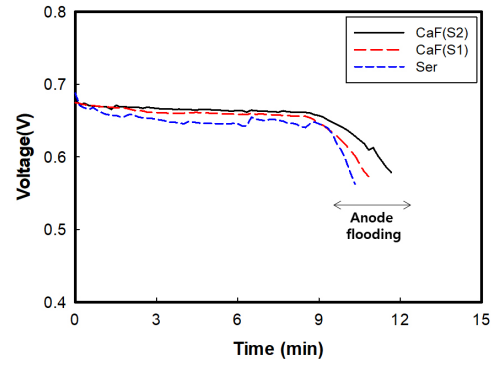


Figure 8. Effect of metal foam cell size on anode flooding at DEA system.

DEA 시스템에서 수소극뿐만 아니라 공기극의 유로 형상도 범람 현상에 영향을 미치는 것으로 고려할 수 있다. 다공성유로의 경우, 사형유로보다 물 관리가 원활하기 때문에 공기극에서 낮은 수분 함량을 유지하여 물 역확산 속도가 낮은 것으로 판단되고, S1과 S2를 비교하여 발포 금속의 기공 크기, 기공률에 따라서 연료전지 내부의 수분 함량이 영향을 받는 것으로 확인되었다. 따라서 DEA 시스템에서 연료전지의 수소극 유로는 많은 양의 물을 저장할 수 있는 구조로, 공기극 유로는 물 배출이 원활한 구조로 설계하여 연료이용효율과 출력 안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 발포 금속을 이용하여 DEA 시스템에서 다공성 유로 구조에 대한 범람 현상과 연료전지 성능 평가 실험을 수행하였다. DEA 시스템에서 운전이 지속될수록 수소극에 축적되는 물로 인하여 범람 현상이 발생하며 부하전류가 증가할수록 물 생성량이 증가하여 배출 간격은 감소하고 전압 감소율은 증가하였고, 고전류밀도 조건에서는 공기 유량을 증가시키더라도 배출 간격은 거의 동일하였다. 이를 통하여 DEA 시스템에서 운전 조건을 최적화를 통한 연료이용효율 개선은 한계가 있는 것으로 확인되었다.

발포 금속을 공기극 유로로 사용한 경우에 전극 면적에 대하여 효과적인 연료 공급과 물 관리로 물질전달 손실이 감소하여 연료전지 성능이 증가하였고, 수소극 유로로 사용한 경우에는 성능에 미치는 영향이 미미한 것을 확인하였다. 이에 반해 DEA 시스템에서는 수소극에 기공이 작은 발포 금속을 사용한 경우에는 물 관리에 취약하여 배출 간격이 감소하였고, 기공이 큰 발포 금속에서는 배출 간격이 증가하며 안정적인 성능을 나타내었다. 공기극의 경우 발포 금속의 cell 크기에 관계없이 사형유로에 비하여 배출 간격이 증가하였고, 기공 크기가 클수록 원활한 물 배출로 연료전지 성능이 증가하였고 범람 현상에 의한 전압 감소율이 감소되었다. 따라서 DEA 시스템에서 연료 이용효율을 개선하기 위해서는 수소극에서는 역확산된 물을 저장할 수 있는 유로구조와 공기극에서는 효과적으로 물을 배출할 수 있는 유로구조로 설계되어야 한다. 이외에도 발포 금속의 기공률, 두께와 소수성 등의 물성에 의한 영향 연구도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감 사

이 논문은 산업통상자원부가 지원한 ‘이전공공기관연계 육성사업’

으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다[과제명:전기·ESS기반 에너지산업 혁신생태계 구축사업(P0002068)]. 이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20011633).

References

1. Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, and X. C. Adroher, A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research, *Appl. Energy*, **88**, 981-1007 (2011).
2. G. Wang, Y. Yu, H. Liu, C. Gong, S. Wen, X. Wang, and Z. Tu, Progress on design and development of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for vehicle applications: A review, *Fuel Process. Technol.*, **179**, 203-228 (2018).
3. S. Rodosik, J. P. Poirot-Crouvezier, and Y. Bultel, Simplified anode architecture for PEMFC systems based on alternative fuel feeding: Experimental characterization and optimization for automotive applications, *Int. J. Hydrog. Energy*, **45**, 19720-19732 (2020).
4. Z. Huang, Q. Jian, and J. Zhao, Experimental study on improving the dynamic characteristics of open-cathode PEMFC stack with dead-end anode by condensation and circulation of hydrogen, *Int. J. Hydrog. Energy*, **45**, 19858-19868 (2020).
5. J. C. Kurnia, A. P. Sasmito, and T. Shamim, Advances in proton exchange membrane fuel cell with dead-end anode operation: A review, *Appl. Energy*, **252**, 113416 (2019).
6. D. F. M. Santos, R. B. Ferreira, D. S. Falcão, and A. Pinto, Evaluation of a fuel cell system designed for unmanned aerial vehicles, *Energy*, **253**, 124099 (2022).
7. I. S. Han, J. Jeong, and H. K. Shin, PEM fuel-cell stack design for improved fuel utilization, *Int. J. Hydrog. Energy*, **38**, 11996-12006 (2013).
8. Y. Lee, B. Kim, and Y. Kim, An experimental study on water transport through the membrane of a PEFC operating in the dead-end mode, *Int. J. Hydrog. Energy*, **34**, 7768-7779 (2009).
9. Q. Meyer, S. Ashton, S. Torija, C. Gurney, P. Boillat, M. Cochet, E. Engebretsen, D. P. Fiegan, P. Adcock, P. R. Shearing, and D. J. L. Brett, Nitrogen blanketing and hydrogen starvation in dead-ended-anode polymer electrolyte fuel cells revealed by hydro-electro-thermal analysis, *Electrochim. Acta*, **203**, 198-205 (2016).
10. B. Chen, Y. Cai, J. Shen, Z. Tu, and S. H. Chan, Performance degradation of a proton exchange membrane fuel cell with dead-ended cathode and anode, *Appl. Thermal Eng.*, **132**, 80-86 (2018).
11. Y. Yang, X. Zhang, L. Guo, and H. Liu, Overall and local effects of operating conditions in PEM fuel cells with dead-ended anode, *Int. J. Hydrog. Energy*, **42**, 4690-4698 (2017).
12. S. Abbou, J. Dillet, D. Spornjak, R. Mukundan, R. L. Borup, G. Maranzana, and O. Lottin, High potential excursions during PEM fuel cell operation with dead-ended anode, *J. Electrochem. Soc.*, **162** (10), F1212-F1220 (2015).
13. T. Matsuura, J. Chen, J. B. Siegel, and A. G. Stefanopoulou, Degradation phenomena in PEM fuel cell with dead-ended anode, *Int. J. Hydrog. Energy*, **38**, 11346-11356 (2013).
14. J. Yu, Z. Jiang, M. Hou, D. Liang, Y. Xiao, M. Dou, Z. Shao, and B. Yi, Analysis of the behavior and degradation in proton exchange membrane fuel cells with a dead-ended anode, *J. Power Sources*, **246**, 90-94 (2014).
15. S. Abbou, J. Dillet, G. Maranzana, S. Didierjean, and O. Lottin, Local potential evolutions during proton exchange membrane fuel cell operation with dead-ended anode - Part I: Impact of water diffusion and nitrogen crossover, *J. Power Sources*, **340**, 337-346 (2017).
16. Y. Yang, X. Zhang, L. Guo, and H. Liu, Local degradation in proton exchange membrane fuel cells with dead-ended anode, *J. Power Sources*, **477**, 229021 (2020).
17. J. Chen, J. B. Siegel, and A. G. Stefanopoulou, Optimization of purge cycle for dead-ended anode fuel cell operation, *Int. J. Hydrog. Energy*, **38**, 5092-5105 (2013).
18. Z. Liu, J. Chen, H. Liu, C. Yan, Y. Hou, Q. He, J. Zhang, and D. Hissel, Anode purge management for hydrogen utilization and stack durability improvement of PEM fuel cell systems, *Appl. Energy*, **275**, 115110 (2020).
19. B. Chen, Z. Tu, and S. H. Chan, Performance degradation and recovery characteristics during gas purging in a proton exchange membrane fuel cell with a dead-ended anode, *Appl. Therm. Eng.*, **129**, 968-978 (2018).
20. Y. F. Lin and Y. S. Chen, Experimental study on the optimal purge duration of a proton exchange membrane fuel cell with a dead-ended anode, *J. Power Sources*, **340**, 176-182 (2017).
21. M. Steinberger, J. Geiling, R. Oechsner, and L. Freya, Anode recirculation and purge strategies for PEM fuel cell operation with diluted hydrogen feed gas, *Appl. Energy*, **232**, 113416 (2018).
22. J. Shen, Z. Tu, and S. H. Chan, Effect of gas purging on the performance of a proton exchange membrane fuel cell with dead-ended anode and cathode, *Int. J. Energy Res.*, **45**, 14813-14823 (2021).
23. R. Omrani, S. S. Mohammadi, Y. Mafinejad, B. Paul, R. Islam, and B. Shabani, PEMFC purging at low operating temperatures: An experimental approach, *Int. J. Energy Res.*, **43**, 7496-7507 (2019).
24. J. Zhao, Q. Jian, Z. Huang, L. Luo, and B. Huang, Experimental study on water management improvement of proton exchange membrane fuel cells with dead-ended anode by periodically supplying fuel from anode outlet, *J. Power Sources*, **435**, 226775 (2019).
25. Y. Wu, J. I. S. Cho, T. P. Neville, Q. Meyer, R. Ziesche, P. Boillat, M. Cochet, P. R. Shearing, and D. J. L. Brett, Effect of serpentine flow-field design on the water management of polymer electrolyte fuel cells: An in-operando neutron radiography study, *J. Power Sources*, **399**, 254-263 (2018).
26. A. Soopee, A. P. Sasmito, and T. Shamim, Water droplet dynamics in a dead-end anode proton exchange membrane fuel cell, *Appl. Energy*, **233-234**, 300-311 (2019).
27. J. Zhao, Q. Jian, and Z. Huang, Visualization study on enhancing water transport of proton exchange membrane fuel cells with a dead-ended anode by generating fluctuating flow at anode compartment, *Energy Convers. Manag.*, **206**, 112477 (2020).
28. M. E. Kim and Y. J. Sohn, Different flow fields, operation modes and designs for proton exchange membrane fuel cells with dead-ended anode, *Int. J. Hydrog. Energy*, **43**, 1769-1780 (2018).
29. M. E. Kim and Y. J. Sohn, Study on polymer electrolyte fuel cells with nonhumidification using metal foam in dead-ended operation, *Energies*, **13**, 1238 (2020).

30. B. Chen, Q. Liu, C. Zhang, Y. Liu, J. Shen, and Z. Tu, Numerical study on water transfer characteristics under joint effect of placement orientation and flow channel size for PEMFC with dead-ended anode, *Energy*, **254**, 1234365 (2022).
31. Y. Zhang, Y. Tao, and J. Shao, Application of porous materials for the flow field in polymer electrolyte membrane fuel cells, *J. Power Sources*, **492**, 229664 (2021).
32. J. Kim and J. Kim, Metal foam flow field effect on PEMFC per-

formance, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 442-448 (2021).

Authors

Junseob Kim; M.Sc., Doctor's course, School of Chemical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea; dhwm007@naver.com
Junbom Kim; Ph.D., Professor, School of Chemical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea; jbkim@ulsan.ac.kr