

Cathode에 따른 소형 PEM 연료전지의 성능 변화

이세원*, 이강인*, 박민수**[†], 주종남*

*서울대학교 기계항공공학부 대학원, **서울대학교 차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단

Performance of the Small PEMFC according to Cathode

SEWON LEE*, KANGIN LEE*, MINSOO PARK**[†], CHONGNAM CHU*

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.

**BK21 School for Creative Engineering Design of Next Generation Mechanical and Aerospace Systems, Seoul National Univ.

San 56-1 Shinlim-dong, Gwanak-gu, Seoul, 151-744, Korea

ABSTRACT

In this paper, experiments with an air-breathing proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) for mobile devices were carried out according to cathode conditions. These conditions are defined by the cathode flow field plate type (the channel type, the open type) and the cathode surface direction. Single-cell and 6-cell stack were used in the experiments. The experimental results showed that the open-type cathode flow field plate gave a better performance than the small channel type. In the experiments related to the direction of the slits on the cathode flow field plate, the horizontal slit cell was better than the vertical one. With respect to the cathode surface direction, when the cathode surface is placed in the direction normal to the ground, the PEMFC generated more stable power in the mass transport loss region. Since stable power in the mass transport region is closely related to the air supply, computational fluid dynamics (CFD) analysis for air-breathing PEMFC of different cathode surface directions was performed.

KEY WORDS : PEMFC(고분자 전해질형 연료전지), cathode(캐소드), fuel cell(연료전지), air-breathing(자연대류)

1. 서 론

최근에는 오염 물질을 덜 배출하면서도 높은 전력 밀도를 가지는 전원에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 휴대용 전화나 휴대용 컴퓨터 등 휴대

전자 기기의 기능과 성능이 증가하면서, 휴대 전지의 전력과 용량에 대한 요구가 늘고 있다. 하지만 현재 널리 사용되고 있는 리튬 이온 등의 2차 전지가 이러한 요구를 충족시키지 못하고 있어, 이를 대체할 수 있는 새로운 전지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 수소 연료전지는 뛰어난

[†]Corresponding author : pminsoo2@snu.ac.kr

잠재력을 바탕으로 다양한 기기의 전력 공급 장치에 대한 대안으로서 연구되고 있다¹⁾. 수소 연료전지는 리튬 이온 전지에 비해 부피당 에너지 밀도가 약 2배 가까이 크기 때문에 기기의 사용 시간을 증가시킬 수 있기 때문이다²⁾.

수소 연료전지는 수소의 형태나 반응 방법 등에 따라 여러 가지 종류로 분류된다. 이 중 직접 메탄올 방식 연료전지(DMFC)와 고분자 전해질형 연료전지(PEMFC)가 휴대용 기기에 적합한 작은 부피, 간결한 시스템, 높은 전력 밀도, 낮은 동작 온도 등의 특성을 지니고 있다³⁾. 하지만, 소형 고분자 전해질형 연료전지의 경우 수소 발생장치인 개질기(reformer)에서 발생된 일산화탄소에 의한 피독현상 때문에 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 이에 이전 연구들에서는 직접 메탄올 방식을 주로 사용하였다⁴⁾. 하지만 최근 일산화탄소 발생을 획기적으로 감소시킨 새로운 수소 발생 기술이 많이 개발되면서 일산화탄소에 의한 문제는 상당수 해결되었다⁵⁾. 또한 고분자 전해질형 연료전지는 일반적으로 직접 메탄올 방식 연료전지에 비해 물 관리가 용이하며, 출력 밀도가 높고, 수명이 길다는 장점을 지니고 있다⁶⁾. 고분자 전해질형 연료전지의 단점이 점차 해결되면서 실제 휴대용 기기에 적용한 사례도 꾸준히 발표되고 있다. 일본 CASIO 사는 2006년 고분자 전해질형 연료전지를 사용한 노트북을 개발하였다. 또한 삼성 전기는 2007년 물로 가동되는 고분자 전해질형 연료전지 휴대폰을 개발하였다.

앞서 언급한 바와 같이 기존의 약점이 극복되면서, 여러 장점이 있는 고분자 전해질형 연료전지는 휴대용 전력 공급 장치로서 활발히 연구되고 있다. 특히 공기의 공급 방식에 있어서, 대기의 공기 중 산소를 별다른 부가 장치 없이 이용하는 자연대류 방식이 휴대 기기용 전원으로 활발히 연구되고 있다. 강제대류 방식은 자연대류 방식에 비해 필요한 공기의 공급을 위해 펌프, 가열기, 가습기 등 별도의 장치들을 필요로 한다⁷⁾. 이러한 장치들로 인해 시스템 전체의 부피가 커지고, 전력 소비도 발생한다⁸⁾. 반면 자연대류 방식의 연료전지는 별도의 공

기 공급 장치가 필요 없고 대기 중의 산소를 사용하여 전기를 발생시킨다. 따라서 자연대류 방식을 사용하면 시스템을 간단히 구성할 수 있어 휴대용 기기에 더 적합하다고 할 수 있다.

자연대류 방식의 연료전지는 별도의 공기 공급 장치가 없기 때문에, 반응면 주변의 공기 유동과 같은 대류 조건에 의해 크게 영향을 받는다. 이러한 영향에 대해서는 꾸준히 연구가 진행되어 왔는데, 특히 Y. Tabe는 그의 연구에서 채널 타입의 캐소드 유로판이 오픈 타입보다 더 좋은 성능을 낼 수 있다고 하였다⁹⁾. 하지만 본 연구에서 사용된 소형 연료전지는 휴대용 기기에 적합하도록 작게 제작되었기 때문에, Y. Tabe가 사용한 일반적 크기의 연료전지와는 다른 경향을 보였다. 또한 휴대용 기기는 다양한 위치에 다양한 자세로 놓일 수 있으므로, 캐소드면의 방향에 따라서 성능 차이를 보일 수 있으나 관련 연구가 전무한 실정이다.

본 논문에서는 자연대류 방식 소형 연료전지의 캐소드 유로판 형태 및 방향에 따른 성능 변화를 살펴보았다. 이를 통해 성능 극대화를 위한 캐소드 조건을 찾아보았다.

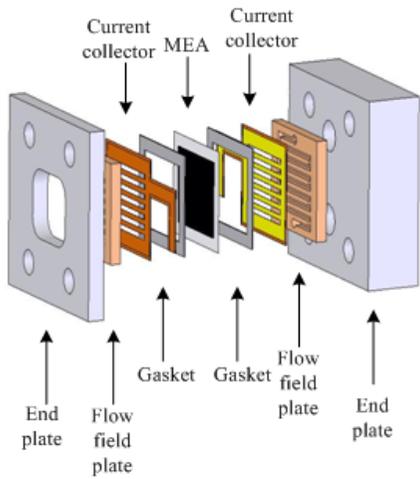
2. 실험

2.1 연료전지 실험방법

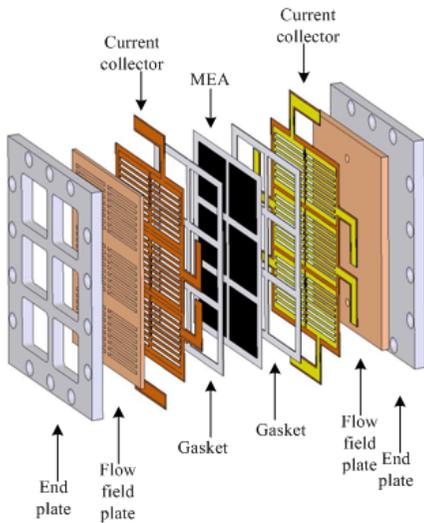
2.1.1 연료전지 설계

실험에 사용된 셀은 단위 전지와 6셀 스택, 두 가지 이다. 먼저 단위 전지를 사용하여 실험을 수행하였다. 단위 전지는 전지의 적층 과정에서 발생할 수 있는 변인들을 제거할 수 있기 때문에 기초 실험에 유용하다. 또한 단위 전지는 유로판의 제작이 용이하기 때문에, 다양한 형태의 캐소드 유로판에 대한 실험이 가능하다. 따라서 단위 전지를 사용하여 기초 실험을 진행한 후 6셀 스택에 대한 실험을 진행하였다. Fig. 1은 각각 실험에서 사용된 단위 전지와 6셀 스택의 개략적인 조립도를 나타낸다.

MEA는 멤브레인(membrane)은 nafion 212를



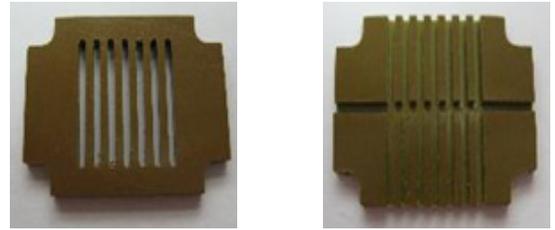
(a) single cell



(b) 6 cell stack

Fig. 1 Schematic diagram for fuel cell assemble

이용하였고, 기체 확산층(gas diffusion layer)은 탄소 섬유(carbon cloth)를 이용하여 제작되었다. 백금 촉매는 캐소드와 애노드 양면에 각각 1.0 mg/cm^2 을 로딩(loading)하였고, 단위 전지의 총 반응 면적은 1.68 cm^2 ($1.2 \text{ cm} \times 1.4 \text{ cm}$)이다. 엔드 플레이트(end plate)는 스테인리스 스틸을 사용



(a)

(b)

Fig. 2 Flow field plate of the cathode; (a) open type, (b) channel type

하였는데, 애노드(anode)는 10 mm , 캐소드는 3 mm 두께의 판을 사용하였다. 유로판으로는 폴리 아미드이미드(poly-amide imide, PAI)가 사용되었다. 애노드 유로판은 두께가 2 mm 이고, 유로는 싱글 섀펜타인(single serpentine) 형태로 만들어졌다. 유로의 단면적은 0.8 mm^2 ($0.8 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$)이다. 캐소드 유로판은 두 가지 형태로 만들었다. Fig. 2는 본 실험에서 사용된 오픈(open) 타입과 채널(channel) 타입의 유로판 사진이다.

오픈 타입은 두께 1 mm PAI판을 사용하였고, 폭 0.8 mm , 길이 13 mm 의 슬릿(slot)이 7개 뚫려 있다. 채널 타입은 폭 0.8 mm , 깊이 1 mm 의 채널이 7개 있고, 이 채널들에 수직한 하나의 채널이 관통하고 있다. 오픈 타입에서는 캐소드 유로판이 두꺼울 경우 공기와 반응면 사이의 거리가 길어져, 접촉이 어려워진다. 반면 채널 타입의 경우 두꺼운 캐소드 유로판에는 단면적이 넓은 채널이 들어갈 수 있으므로 반대로 공기 공급이 원활해진다. 또한 채널 타입의 유로판은 오픈 타입의 유로판과 비교하여 MEA반응면에 고른 압력을 가할 수 있어 반응면과 커런트 컬렉터 사이의 접촉 저항을 줄일 수 있다. 이러한 이유로 일반적인 크기의 연료전지에서는 채널 타입이 오픈 타입보다 더 좋은 성능을 보인다⁹⁾. 하지만 본 실험에서 쓰인 것과 같은 작은 크기의 연료전지에서는 유로의 크기가 작기 때문에 기존의 연구와 다른 결과를 보일 수 있으므로 두 가지 유로판에 대한 실험을 진행하였다.

단위 전지 실험 후에는 6셀 스택에 대한 실험도

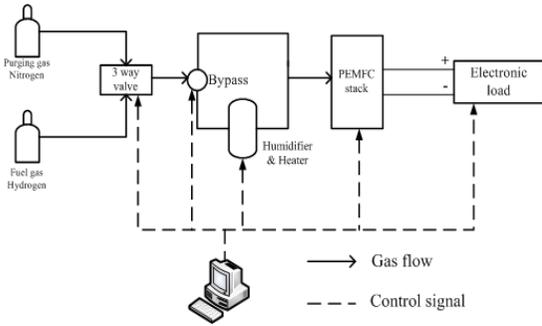


Fig. 3 Schematic diagram of and experimental equipment setup

수행하였다. 단위 전지는 휴대용 기기에 적합한 전압을 낼 수 없다. 적절한 전압을 얻기 위해 단위 전지를 직렬로 연결시킨 것이 스택이다. 일반적으로 연료전지를 적층시킬 때는 구조가 간단한 수직 적층 방식을 사용한다. 하지만 수직 적층 방식은 전체 두께가 두꺼워지기 때문에 휴대용 기기에 적합하지 않다. 따라서 연결 방식이 다소 복잡하더라도 수평 적층 방식을 사용하여 전체 부피를 줄일 수 있도록 하였다. 수평 적층 방식으로는 밴디드(banded) 형식을 적용하였다. MEA는 단위 전지와 같은 방식으로 제작하여 3행 2열로 배치하였다. 각 단위 전지의 반응 면적은 2.24 cm^2 ($1.4 \text{ cm} \times 1.6 \text{ cm}$)이고, 스택 전체의 반응 면적은 13.44 cm^2 이다. 엔드 플레이트(end plate)는 양쪽 모두 3 mm 두께의 스테인리스 스틸을 사용하였다.

밴디드 방식의 수평 적층을 위하여 연성 PCB를 사용한 커런트 컬렉터(current collector)를 제작하였다. 일반적으로 유로판은 금속이나 흑연판(graphite)으로 만들어지는데, 이들은 전기 전도성이 우수하므로, 유로와 커런트 컬렉팅의 역할을 동시에 수행할 수 있다. 하지만 밴디드 방식에서는 적층되는 각각의 단위 전지가 전기적으로 분리되어 있어야 한다. 따라서 유로판은 부도체로 만들고, 연성 PCB로 커런트 컬렉터를 제작하여 이를 해결하였다.

2.1.2 실험방법

실험은 다음과 같은 조건에서 수행되었다. 애노

드에는 가열, 가습되지 않은 수소를 공급하였다. 그 이유는 가열이나 가습을 위한 장치들은 전체 시스템을 크게 만들고, 추가적인 전력을 소모하므로 휴대용 기기에 적합하지 않기 때문이다. 수소는 단위 전지에서 분당 30 cc를 공급하였고, 6셀 스택에서는 50 cc를 공급하였다. 캐소드면은 대기 중에 노출시켰다. 실험 중 의도하지 않은 공기 유동에 의해 캐소드면이 영향을 받는 것을 방지하기 위해, 모든 실험은 $950 \text{ mm} \times 1650 \text{ mm} \times 2800 \text{ mm}$ 의 폐쇄 공간에서 진행되었다. 이 공간 내부는 기온 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 상대 습도는 $58 \pm 2 \%$ 의 조건으로 유지하였다. Fig. 3은 실험 장치의 구성을 개략적으로 나타낸 것이다.

2.2 수치해석

실험 결과를 분석하기 위해 유동 해석을 수행하였다. Gambit 2.3.16을 사용하여 메쉬(mesh)를 생성하였고, fluent 6.3을 사용하여 유동 해석을 진행하였다. 메쉬의 크기는 10이고 총 1,594개의 메쉬가 생성되었다. 해석한 모델은 실제의 6셀 스택과 같은 크기로 모델링(modeling)되었다. 스택으로부터 아주 멀리 떨어진 곳에서 발생하는 유동은 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것이라는 가정하에 스택 주변 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 공간의 유동에 대해서만 해석하였다.

해석시의 가정은 다음과 같다.

- 1) 공기는 이상 기체이다.
- 2) 대기의 온도는 298 K, 캐소드면의 온도는 333 K이다. 333 K는 실제 실험 중 온도가 안정 상태에 이르렀을 때의 6셀 스택의 온도이다.
- 3) 연료전지 표면은 no slip condition이다.
- 4) 난류는 발생하지 않는다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단위 전지

3.1.1 캐소드 종류에 따른 성능 변화

Fig. 4는 단위 전지에서 캐소드판을 오픈 타입

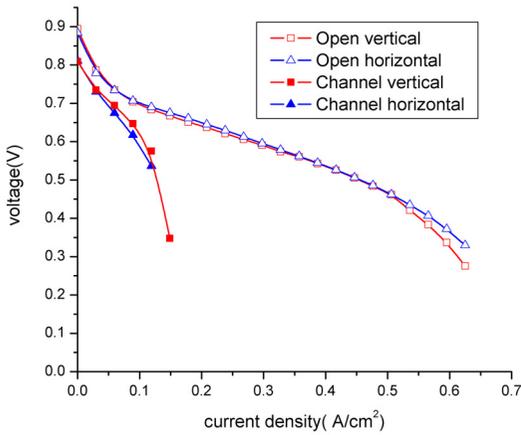


Fig. 4 IV curves of the open type and the channel type according to direction

과 채널 타입으로 바꾸어 진행한 실험의 전류 밀도에 따른 전압 변화 곡선을 나타낸 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 채널 타입이 오픈 타입보다 매스 트랜스포트 손실(mass transport loss) 구간이 일찍 나타나는 것을 확인할 수 있다. 채널 타입은 0.1 A/cm^2 에서 나타나는데 비해, 오픈 타입은 0.5 A/cm^2 에서 나타났다. 이것은 채널 타입에 비해 오픈 타입에서 공기 공급이 원활하다는 것을 의미한다. 이러한 경향은 Y. Tabe의 연구결과와 반대의 것이다. 그의 연구에서는 크기가 충분히 큰 연료전지를 사용하였으므로, 채널 타입의 채널 단면적이 충분히 커서 공기 소통이 원활이 이루어지지만, 크기가 작은 연료전지의 경우에는 오히려 공기 소통에 불리하다. 실제로 Y. Tabe의 연구에서의 채널 단면적은 2 mm^2 ($1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$)이고, 본 연구의 채널 단면적은 0.8 mm^2 ($0.8 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$)로 단면적에서 확인한 차이를 보인다. 반면 open 타입은 판이 얇은 경우, 반응면과 공기 사이의 거리가 짧아져서 공기와의 접촉이 유리해진다. 이러한 이유로 소형 연료전지에서는 오픈 타입이 채널 타입보다 약 3배 정도 높은 최대 전력밀도를 보였다.

3.1.2 유로 방향에 따른 성능 변화

채널과 슬릿의 방향에 따른 실험을 수행하였다.

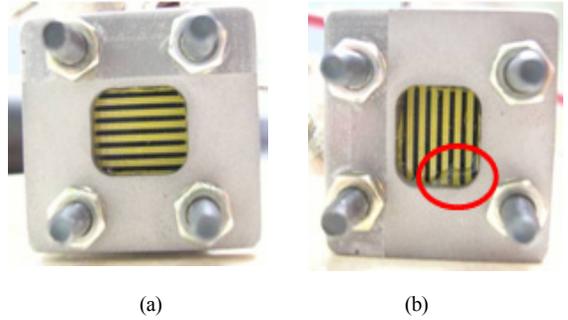


Fig. 5 Condensed water droplet of the open type PEMFC; (a) horizontal slit, (b) vertical slit

Fig. 5에서 채널 타입의 경우 채널이 세로 방향으로 놓여 있을 때의 성능이 더 좋은 것을 확인할 수 있다. 채널 안에 공기는 반응열에 의해 가열되고, 가열된 공기는 밀도가 작아져 상승하게 된다. 따라서 채널이 공기의 유동 방향과 같은 세로 방향으로 있을 때 유동이 원활하게 이루어지는 것이다.

오픈 타입의 경우 최대 전력 밀도는 가로, 세로 모두 233 mW/cm^2 으로 비슷했지만, 최대 전력일 때 안정성에서 차이를 보였다. 즉 슬릿이 가로로 놓여 있을 때 최대 전력에서 안정성이 더 우수하였다. 이는 물 증발량의 차이 때문이다.

Fig. 5는 오픈 타입 연료전지가 매스 트랜스포트 손실 영역에서 구동될 때의 캐소드의 사진이다. Fig. 3 (a)는 가로 슬릿이고, (b)는 세로 슬릿이다. 세로 슬릿 아래쪽에 물이 응결되어 있는 것을 확인할 수 있다. 오픈 타입의 경우 응결된 물은 슬릿의 아래쪽에 모이게 된다. 이 때, 가로 슬릿에서는 생성된 물이 넓게 퍼지지만, 세로 슬릿의 경우 생성된 물이 좁은 슬릿에 모이게 된다. 넓게 퍼진 물은 표면적이 커서 증발에 유리하지만 좁은 곳에 모인 물은 표면적이 작아 증발이 원활하지 않고, 응결된 상태로 반응면을 덮게 된다. 결국 생성된 물이 반응면에서의 반응을 방해하여 매스 트랜스포트 손실 영역에서 전압 안정성의 차이를 보이게 된다.

3.2 6셀 스택

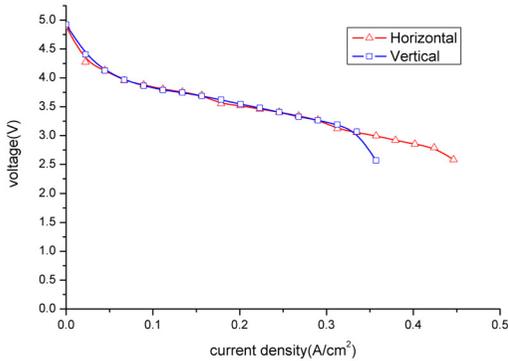


Fig. 6 IV curves of the open type 6 cell stack

3.2.1 유로 방향에 따른 성능 변화

실제로 휴대용 기기에 적용할 수 있는 6셀 스택에 대한 실험을 수행하였다. 우선 단위 전지와 6셀 스택을 비교하여 같은 특성을 보이는지 확인하기 위해 6셀 스택을 이용하여 유로 방향에 따른 성능 실험을 수행하였다. Fig. 6은 이 실험의 결과를 전류 밀도에 따른 전압 변화 곡선으로 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 보인 바와 같이 6셀 스택도 단위 전지와 동일한 경향을 보인다. 매스 트랜스포트 손실 구간에서 가로 슬릿이 더 안정적인 경향이 더욱 확연해져서, 6셀 스택에서는 매스 트랜스포트 손

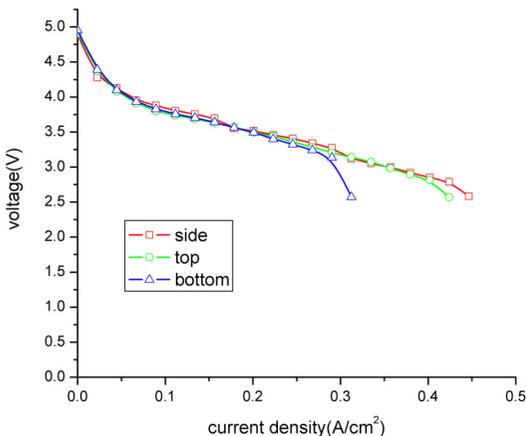


Fig. 8 IV curves according to cathode directions

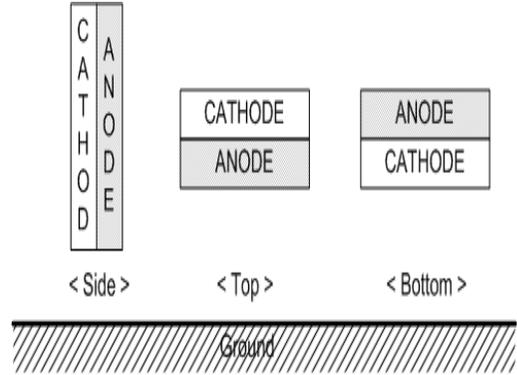


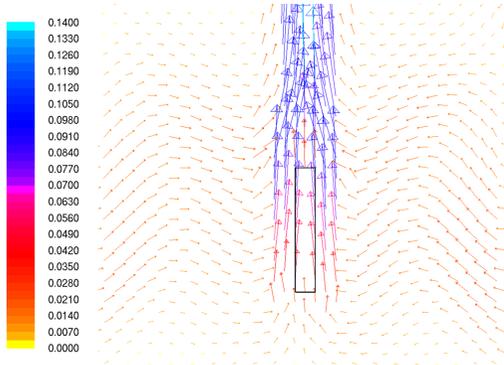
Fig. 7 Schematic diagram of the cathode directions

실이 나타나는 시점과 최대 전력 밀도에서도 차이를 보였다. 세로 슬릿의 경우 약 0.3 A/cm^2 에서 매스 트랜스포트 손실이 나타났고, 가로 슬릿의 약 경우 0.45 A/cm^2 에서 나타났다. 또한 최대 전력 밀도도 세로 슬릿은 171.21 mW/cm^2 , 가로 슬릿은 197.21 mW/cm^2 으로 가로 슬릿이 더 우수한 성능을 보였다. 이 실험을 통해 가로 슬릿이 더 좋은 성능을 낸다는 것을 6셀 스택의 경우에도 확인할 수 있다.

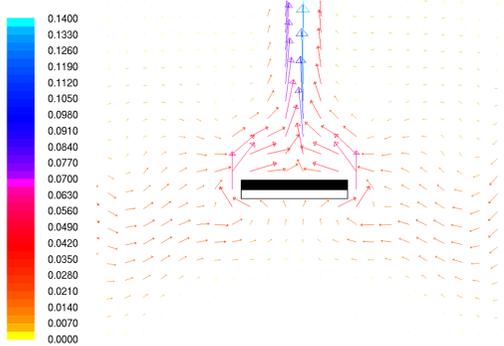
3.2.2 캐소드 방향에 따른 성능 변화

6셀 스택은 구동 중에 자체 반응열에 의해 온도가 60°C 까지 올라간다. 이 열은 6셀 스택 주변 공기를 가열하고, 가열된 공기는 위로 상승하게 된다. 결국 6셀 스택이 구동할 때, 셀 주변에는 온도 차에 의한 공기 유동이 발생한다. 따라서 공기와 반응면이 직접 접촉하는 캐소드면의 방향에 따라 반응면이 노출되는 유동 환경이 바뀌어 성능에서도 차이를 보이게 된다. Fig. 7는 캐소드면을 옆으로 했을 때와 위, 아래로 했을 때의 실험 예를 나타낸 개념도이다.

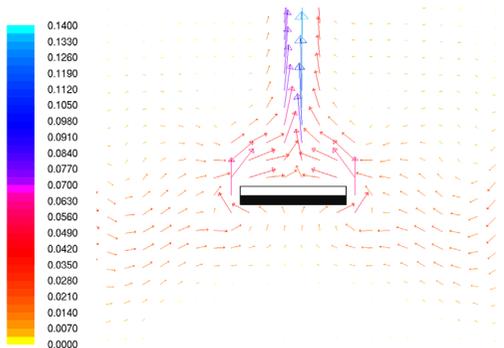
실험의 결과를 Fig. 8과 같이 나타내었다. Fig. 8에 보인 바와 같이 각 실험에 따라 매스 트랜스포트 손실 구간의 시작점이 다른 것을 확인할 수 있다. 즉 옆면(side)의 경우 0.43 A/cm^2 , 윗면(top)의 경우 0.4 A/cm^2 , 아랫면(bottom)의 경우 0.3



(a) side



(b) top



(c) bottom

Fig. 9 Air flow vectors around PEMFC. The rectangle is the 6 cell stack and the black side is the cathode surface



Fig. 10 Demonstration of the cellular phone powered by 6 cell stack PEMFC

A/cm^2 의 순서로 각각 매스 트랜스포트 손실의 시작점이 빨리 나타났다. 이것은 캐소드의 방향에 따라 공기 공급에 차이가 있다는 것을 의미한다. 자세에 따라 6셀 스택 주변의 공기 공급이 어떻게 다른지 알아보기 위해 유동 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 9와 같다.

캐소드 주변의 공기 유동을 파악하면 간접적으로 캐소드면에 공급되는 산소의 양을 알 수 있다. 유동의 속도가 빠르다는 것은 캐소드면 주변 공기의 출입이 활발하다는 의미이다. 따라서 유동의 속도가 빠르면 산소가 소비된 공기가 빨리 빠져나가고, 새로운 공기가 들어오게 된다. 이에 따라 캐소드 주변의 산소 농도가 일정하게 유지될 수 있다. 유동의 속도뿐만 아니라 유동의 방향도 성능에 영향을 미칠 수 있다. 발생한 유동이 캐소드 면과 수평 방향인 경우 큰 저항 없이 이루어진다. 반면에 캐소드면과 수직인 유동은 셀 자체에 의해 저항을 받게 되어 원활한 공기 공급이 이루어지지 않는다.

즉, 옆면의 경우 유동이 큰 저항 없이 발생하여 공기 공급이 원활하고, 윗면과 아랫면의 경우는 그렇지 못하여 공급이 원활하지 않게 된다. Fig. 10은 앞에서의 실험 결과를 바탕으로 6셀 스택을 설치하고, 실제로 휴대폰을 구동한 사진이다. 실험에 사용한 휴대폰의 필요 정격 전압은 3.7 V로, 6셀 스택으로 정격 전압에 적합한 전압을 발생 시킬 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 캐소드면의 대류 조건에 따라 자연대류 방식의 고분자 전해질형 연료전지의 성능이 어떻게 변화하는지에 대해 알아보았다. 자연대류 방식의 연료전지는 주변 대기에서 산소를 직접 공급받기 때문에, 대류 조건에 따라 성능 차이를 보인다. 특히 캐소드 유로관의 형태와 캐소드면의 방향은 매우 중요한 요소이다. 이 연구를 통하여 성능을 높일 수 있는 캐소드 조건을 알 수 있었다. 노트북 컴퓨터나 휴대폰 등 휴대용 기기에 자연대류 방식의 고분자 전해질형 연료전지를 적용시킬 때에는 다음의 조건들을 고려해야 할 것이다.

- 1) 휴대용 소형 연료전지에서는 오픈 타입이 채널 타입보다 더 유리하다. 이는 오픈 타입에서 반응면과 공기의 접촉이 더 용이하기 때문이다.
- 2) 오픈 타입에서는 가로 슬릿이 세로 슬릿보다 유리하다. 이는 가로 슬릿에서 생성된 물은 세로 슬릿에서보다 증발이 원활하기 때문이다.
- 3) 캐소드면이 중력 방향과 평행하게 위치하는 것이 더 유리하다. 이는 유동이 받는 저항이 적어 원활한 유동이 이루어지기 때문이다.

따라서 실제 휴대용 기기의 소모 전력이 가장 클 때 최적 성능을 낼 수 있도록 연료전지를 설계하여야 한다. 더 나아가서 캐소드 조건이 변화하여도 최적 성능을 유지할 수 있는 방법에 대한 연구도 뒤따라야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) P. Agnolucci, "Economics and market prospects of portable fuel cells", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 32, Issue 17, 2007, pp. 4319-4328.
- 2) C. K. Dyer, "Fuel cells for portable applications", *J. of Power Sources*, Vol. 106, Issue 1-2, 2002, pp. 31-34.
- 3) 이현숙, 배병찬, 이재영, 임태훈, 하홍용, "직접매탄을 연료전지의 장기운전 특성 분석 및 성능향상 연구", *한국수소 및 신에너지 학회 논문집*, Vol. 16, No. 1, 2005, pp. 31-39.
- 4) S. Gottesfeld, "Fuel cell techno-personal milestones 1984-2006", *J. of Power Sources*, Vol. 171, Issue 1, 2007, pp. 37-45.
- 5) J. H. Gil, C. R. Chung, and J. H. Jang, "Hydrogen Generator", *KIPO Patent 10-2007-0004663*, 2007.
- 6) S. D. Knights, K. M. Colbow, J. St-Pierre, and D. P. Wilkinson, "Aging mechanisms and lifetime of PEFC and DMFC", *J. of Power Sources*, Vol. 127, Issue 1-2, 2004, pp. 127-134.
- 7) 천광우, 박창권, 이호열, 오병수, "소면적 PEM연료전지 성능개선 연구", *한국수소 및 신에너지 학회논문집*, Vol. 15, No. 4, 2004, pp. 291-300.
- 8) 이현근, 오병수, 정귀성, "PEM 연료전지 자동차 적용을 위한 성능실험에 관한 기초연구", *한국수소 및 신에너지 학회논문집*, Vol. 11, No. 3, 2000, pp. 137-147.
- 9) Y. Tabe, S. K. Park, K. Kikuta, T. Chikahisa, and Y. Hishinuma, "Effect of cathode separator structure on performance characteristics of free-breathing PEMFCs", *J. of Power sources*, Vol. 162, Issue 1, 2006, pp. 58-65.