

연료전지 성능에 영향을 미치는 채널형상에 대한 연구

김 기정¹⁾, 전 유탉²⁾, 김 효균³⁾

Numerical analysis of the shape effect on PEMFC's Performance

kjkim Kim, yutaek Jeon, hyogyun Kim

Key words : CFD(전산유체역학), PEMFC(고분자연료전지), Metal Bipolar plate(금속분리판)

Abstract : Formability is requested to successfully develop of a metal bipolar plate for mass production. From this point of view, wider channel and land width is more helpful to improve formability. But the performance of the fuel cell can be affected by its channel and land shape. So it is very important to select proper channel and land shape not to deteriorate the fuel cell performance. In this work, 3-dimensional, non-isothermal numerical simulation was performed to analyse the effects of channel and land width on the fuel cell performance. 3 types of straight channel were selected for the numerical simulation. The simulation results reveal that wide channel and land width lower fuel cell performance and decrease voltage at a high current density region. Water activity, temperature, oxygen concentration distributions were investigated to find the reasons of performance degradation. The results show that wide channel and land width give an bad effect on fuel cell performance because of low cooling efficiency and lack of oxygen gas under the land.

Nomenclature

u,v,w : velocity of x,y and z direction, m/s
T : temperature, °C
P : pressure, Pa
 μ : dynamic viscosity, kg-s/m²
 ρ : density of the mixture, kg/m³
I : local current density, A/cm²
 V_{oc} : cell opencircuit voltage, V
V : cell voltage, V
 a_k : activity of water in stream k, dimensionless
 h_{rxn} : enthalpy of water formation, kJ/kmol
 σ_m : membrane conductivity, S/m

강도 및 가공성 확보가 어려운 흑연분리판 대신 기계적 성질이 우수한 금속계 분리판을 적용하려는 연구가 진행되고 있으며, 일본의 경우 이미 금속계 분리판을 적용한 스택 및 연료전지 자동차가 개발되어 관련 연구가 상당히 진척되어 있는 것으로 알려져 있으나 국내에서는 아직 금속분리판을 적용한 연료전지에 대한 연구는 크게 진척되지 못하고 있는 실정이다.

금속계 분리판의 경우 흑연 분리판과 마찬가지로 기계가공으로 유로를 제작할 경우 높은 제작가격 및 낮은 생산성으로 상용화가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이에 반응가스 및 냉각수 유

1. 서 론

연료전지에서 분리판은 막전극체(MEA)와 기체 확산층(GDL)의 구조적 지지, 발생한 전류의 수집, 반응가스의 수송, 반응열 제거를 위한 냉각수 수송등을 담당하는 핵심부품으로 최근 기계적

- 1) 현대하이스코 연구개발팀
E-mail : siren77@hysco.com
Tel : (031)899-3340
- 2) 현대하이스코 연구개발팀
E-mail : ytjeon@hysco.com
Tel : (031)899-3337
- 3) 현대하이스코 연구개발팀
E-mail : hgkim@hysco.com
Tel : (041)350-9810

로를 생성하는 방법으로 에칭 또는 스템핑 가공 방법이 많이 적용되고 있다. 에칭의 경우 미세하고 복잡한 유로를 생성하기 쉬운 장점이 있으나 금속분리판의 두께와 무게로 인하여 스템핑의 무게 및 부피감소가 어려운 단점이 있다. 따라서 스템핑의 무게 및 부피를 감소시키고, 높은 가격 경쟁력과 생산성을 확보를 위하여 얇은 박판을 스템핑 가공하여 생산하는 방법이 집중 연구되고 있는 추세이다.

본 연구에서는 스템핑 가공된 금속분리판의 채널 및 랜드 폭의 변화가 성능변화에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 분석하고, 스템핑 가공에 적합한 최적 유로설계에 필요한 데이터로 활용하고자 한다.

2. 채널형상 및 수치해석방법

2.1 채널형상

스템핑 가공으로 만들어진 금속분리판의 채널 형상은 흑연계 분리판과는 달리 아래의 Fig.1 과 같이 사다리꼴 형상을 가지게 된다. 본 연구에서는 채널 윗면의 좁은 부분을 채널 폭의 기준으로 정하여, 1mm, 1.5mm, 2mm의 3가지 폭의 채널을 선정하였으며, GDL과 접촉하는 랜드 부분의 폭 역시 채널폭과 동일하게 증가하도록 채널형상 모델을 선정하였다. 그리고 모델의 단순화를 위하여 전체 채널의 형상을 여러개의 동일한 채널이 평행하게 존재하는 것으로 가정하여 한 개의 채널만을 모델링한 후 양쪽 면에 대칭조건을 적용하여 해석에 필요한 격자를 완성하였다.

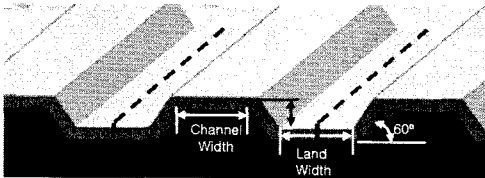


Fig. 1 금속분리판 채널 형상

성능해석에 적용된 각 계산 case의 치수를 table 1에 정리하였다. 각 case는 동일한 길이와 높이를 가지도록 하였고, 채널과 랜드의 폭만 달라지도록 하였다.

Table 1 계산 case 치수 점의

	case 1	case 2	case 3
Channel & Land width(mm)	1.0	1.5	2.0
Depth(mm)	0.5	0.5	0.5
Length(mm)	314	314	314

2.1.1 해석 격자 형상

시뮬레이션에 사용된 격자의 수는 약 150만개이며 해석영역의 격자 형상은 Fig 2와 같다.

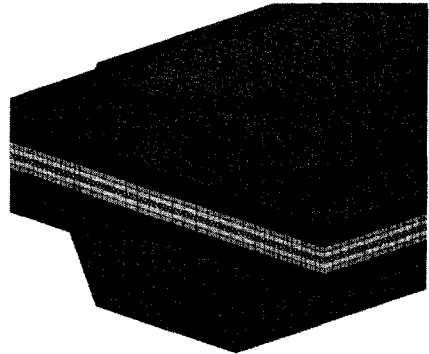


Fig. 2 해석영역의 격자 형상

2.2 해석방법

모델링된 금속분리판의 성능해석을 위하여 상용 유동해석 프로그램인 STAR-CD와 연료전지 해석 모듈인 es-pemfc를 사용, 각 case의 I-V curve를 구하였다.

STAR-CD의 연료전지 해석 모듈은 3차원, 정상 상태, 비등온 모델로서 채널내부의 물과 가스의 상태를 단일상으로 가정, Mixture gas의 물성치를 가지고 해석을 수행한다.

시뮬레이션의 각 단계는 먼저 Navier-stokes 방정식을 통해 Mixture gas의 속도와 압력을 계산하고, 계산된 속도와 압력장을 사용하여 전기 화학반응식과, 수증기와 물의 이동을 계산한 뒤 변화된 각 gas의 양을 반영하여 유동장을 계산하는 반복과정을 거치게 된다. 수렴조건은 각 반응 gas의 잔차가 10^{-6} 이하로 하였으며, 약 600에서 1000번의 반복계산을 통하여 수렴된 결과를 구하였다.

2.3 경계조건 및 물성

연료전지의 성능곡선을 구하기 위하여 실제 성능실험과 동일한 방법으로 평균전류밀도에 따라 유량을 변화시켜 해석을 수행하였다. Anode와 Cathode 입구에서의 유입 유량은 반응면적과 가습조건, 양론비에 따라 달라지는데, 본 연구에서는 작동온도 70°C, 가습조건은 100%, 양론비는 1.5/2.0 (Anode/Cathode)로 하여 유입유량조건을 설정하였고, 출구쪽은 대기압으로 경계조건을 설정하였다.

또한 연료전지 작동시 많은 열이 발생하게 되는데 연료전지를 적절한 온도에서 작동시키기 위하여 가열 또는 냉각을 시켜주어야 한다. 실험의 경우 연료전지의 작동온도를 70°C로 유지하기 위하여 분리판의 양쪽면을 Heating plate로 가열하게 되는데 본 해석에서도 금속 분리판의 외부 전면이 70°C로 고정되도록 벽경계조건을 설정하였

다. 본 해석에 적용된 금속분리판의 재질인 SUS316의 열전달계수 및 기타 물성치를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Thermal property of material

	Bipolar Plate
Density (kg/m ³)	8238
Conductivity (W/m-K)	13
Cp (J/kg-K)	468

3. 결과

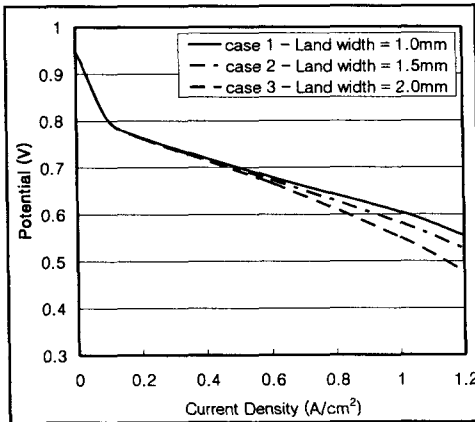


Fig. 3 case 별 성능곡선

앞에서 제시한 3가지 채널 형상에 대한 성능해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 성능해석 결과를 살펴보면 낮은 전류밀도 영역에서는 동일한 성능을 보이나 0.6 A/cm² 을 기점으로 성능차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 전류밀도가 높은 영역에서 더욱 커지는데 case 1의 성능이 상대적으로 좋으며, case 3이 가장 낮은 성능을 보이는 것으로 나타났다.

전류밀도가 높은 영역에서 성능차이가 발생하는 요인은 2가지로 볼 수 있는데 그중 하나가 MEA의 이온전도도 저하와 다른 하나는 산소결핍 현상에 의한 Over potential의 증가이다.

MEA의 이온전도도 저하는 Ohmic loss의 증가로 이어지게 되는데 위의 성능곡선을 보면 채널과 랜드의 폭이 커질수록 이온전도도가 더 많이 낮아지는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 이온전도도를 좌우하는 것은 water contents라는 MEA 내부에서의 물의양인데 water contents는 water activity라는 무차원 변수의 영향을 받는다. water activity의 정의는 다음과 같다.

$$a_w = \frac{X_{w,k} P(x, y)}{P_{sat,wk}}$$

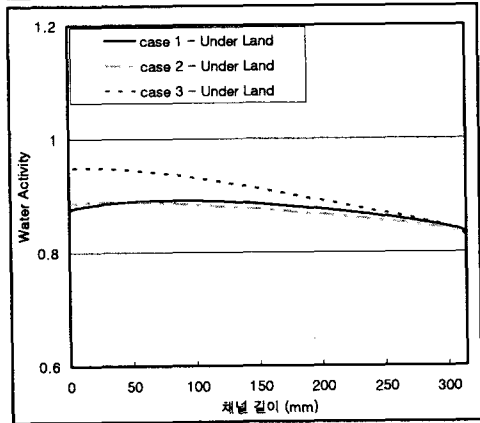
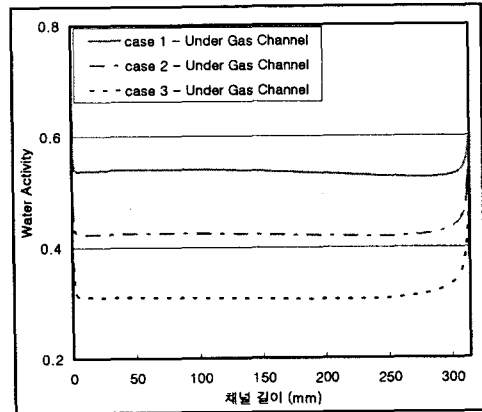


Fig. 4 Water Activity 분포

Fig 4에 평균전류밀도가 1.0A/cm² 일때의 채널과 랜드 아래부분에서의 water activity 분포를 나타내었다. 그림을 살펴보면 랜드의 아래부분보다 채널의 아래부분에서의 water activity의 변화가 더 큰 것을 알 수 있는데 채널의 폭이 넓을수록 채널 중심부에서 water activity는 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 채널아래부분에서 냉각이 원활히 이루어지지 않아 높은 발열로 인한 포화수증기압의 상승으로 상대적으로 water activity가 낮아지는 것으로 해석할 수 있다.

연료전지에서 냉각은 분리판의 전면적에 걸쳐서 이루어지나 Heat sink의 역할을 수행하는 것은 GDL과 접촉하는 랜드부분이 된다. 따라서 채널의 폭이 커질수록 채널 중심에서 랜드까지의 거리가 멀어지므로 열전달량이 그만큼 줄어들게 된다. 결국 이러한 영향은 채널 아래부분에서 높은 온도를 형성하게 되고 그만큼 높아진 포화수증기압으로 인하여 MEA표면에서 수분부족현상이 발생하게 되는 것으로 이해할 수 있다.

채널 아래부분에서 온도의 변화를 Fig 5에 case 별로 나타내었다. 랜드의 경우 냉각되는 효과로 70℃에 균일하게 유지되나 채널아래부분의 경우 길이에 따라 온도차가 5-6℃ 정도 유지되는 것을 볼 수 있다. 따라서 앞에서 언급한 바와 같이 높아진 온도만큼 MEA에서의 이온전도도는 낮

아지는 것으로 생각할 수 있으며, 그만큼의 ohmic loss가 성능저하로 표현된 것으로 볼 수 있다. 따라서 물 및 열의 관리라는 측면에서 보았을 때 채널의 폭이 커지는 것은 적절하지 못한 것으로 보인다.

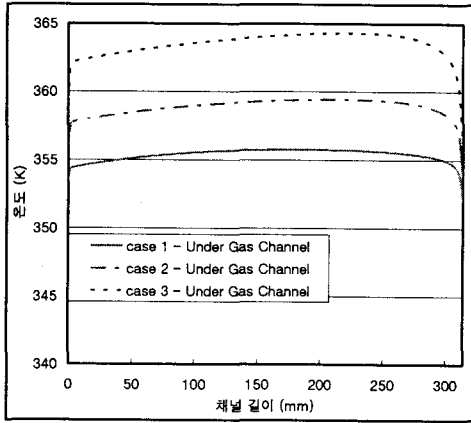


Fig. 5 온도 분포

앞에서 언급한 다른 한가지는 바로 산소 부족에 의한 overpotential의 증가이다. 분리판의 아래부분에는 GDL이라 부르는 다공성 메질이 존재하는데 다공성 메질의 역할은 반응가스가 MEA에 균일하게 유입되도록 도와주는 역할을 한다. 하지만 유동에 대한 저항성이 큰 만큼 랜드 아래부분과 같이 폐쇄된 지역으로의 반응가스 유입이 쉽지 않을 것으로 생각할 수 있다.

그러한 관점에서 Fig. 6에 랜드의 중앙부분에서 산소의 농도분포를 나타내었다. 그림을 살펴보면 랜드의 폭이 커질수록 랜드 중앙에서의 산소농도는 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 반응가스의 침투력이 낮은 것과 반응에 의한 산소의 지속적인 고갈이 주원인이라 볼 수 있다.

특히 case3의 경우 채널의 중간부분부터는 산소가 거의 없어지는 것으로 나타났다.

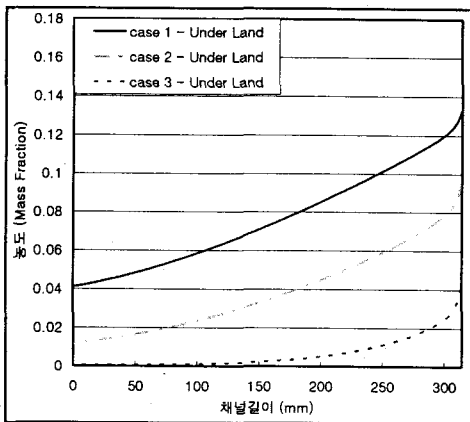


Fig. 6 산소 농도 분포

따라서 랜드의 폭이 넓어지는 것은 반응가스의 불균일을 심화시킬 수 있으므로 적절하지 못한 설계로 판단되어진다.

4. 결론

본 연구에서는 3가지 형상의 분리판 채널과 랜드 폭에 대한 적정성을 시뮬레이션을 통하여 분석해 보았다. 시뮬레이션 결과 채널과 랜드의 폭이 넓어지는 것이 연료전지의 성능을 저하시키는 것으로 나타났는데 이는 동일한 면적에서 채널의 채널을 디자인 할 때 채널의 개수가 줄어들수록 성능이 더 나빠진다는 것을 의미한다.

채널의 폭이 넓어질 경우 채널 아래부분의 냉각효율이 떨어지며, 이온의 전도도를 떨어트리게 된다. 또한 랜드의 폭이 넓어지게 될 경우 반응가스의 고른 분포를 저하시켜 성능에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

따라서 이론적으로는 채널과 랜드의 폭이 작을수록 성능에 좋은 영향을 미칠 것으로 판단되나 실제 제작에 있어 무한정 채널과 랜드의 폭을 작게 가져갈 수 없으므로 프레스 성형성을 고려한 적절한 채널과 랜드의 폭의 선택이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Hyunchul Ju, Hua Meng, Chao-Yang Wang, 2005, "A single-phase, non-isothermal model for PEM fuel cells," International J. of HEAT and MASS TRANSFER, Vol. 48, No. 7, pp. 1303-1315, 2005.
- [2] Hyunchul Ju, Chao-Yang Wang Hong, Simon Cleghorn, Uwe Beuscher, 2005, "Nonisothermal Modeling of Polymer Electrolyte Fuel Cells I. Experimental Validation," J. of The Electrochemical Society, Vol. 152, No. 8, pp. A1645-1653, 2005.
- [3] Hua Meng, Chao-Yang Wang, 2004, "Large-scale simulation of polymer electrolyte fuel cells by parallel computing," Chemical Engineering Science, Vol. 59, No. 16, pp. 3331-3343, 2004.
- [4] S. Shimpalee, S. Dutta, J. W. Van Zee, 2000, "Numerical Prediction of Local Temperature and Current Density in a PEM Fuel Cell," 2000IMECE, pp. 2-6-3-2, 2000.
- [5] S. Shimpalee, S. Dutta, 2000, "Numerical Prediction of temperature distribution in PEM Fuel Cells," Numerical Heat Transfer, Vol. 38, No. 2, pp. 111-128, 2000.
- [6] S. Shimpalee, S. Greenway, D. Spuckler, J.W. Van Zee, 2004, "Predicting water and current distributions in a commercial-size PEMFC," J. of Power Sources, Vol. 135, No. 1, pp. 79-87, 2004.