

유로 형상 변화에 따른 CFD 해석 결과와 PEM 연료전지 성능 비교

*이 강인²⁾, **박 민수¹⁾, 이 세원²⁾, 주 종남²⁾

Comparison between CFD analysis and experiments according to various PEMFC flow-field designs

*Kangin Lee, **Minsoo Park, Sewon Lee, Chongnam Chu

Key words : Polymer electrolyte membrane fuel cell(양이온 교환막 연료전지), Computational fluid dynamics, Flow-field(유로)

Abstract : Flow-field design has much influence over the performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) because it affects the pressure magnitude and distribution of the reactant gases. To obtain the pressure magnitude and distribution of reactant gases in four kinds of flow-field designs without additional measurement equipment, computational fluid dynamics (CFD) analysis was performed. After the CFD analysis, the performance values of PEMFC according to the flow-field configurations were measured via a single cell test. As expected, the pressure differences due to different flow-field configurations were related to the PEMFC performance because the actual performance results showed the same tendency as the results of the CFD analysis. A large pressure drop resulted in high PEMFC performance. So, the single serpentine configuration gave the highest performance. On the other hand, the parallel flow-field configuration gave the lowest performance because the pressure difference between inlet and outlet was the lowest.

1. 서 론

PEMFC는 다른 연료전지들과 비교해 출력 밀도가 높고 상대적으로 낮은 온도에서 작동이 가능한 장점이 있다. 이러한 장점들 덕분에 PEMFC는 소형 휴대용 전자기기부터 자동차에 이르기까지 그 적용이 활발히 연구 되고 있다.¹⁻⁴⁾

PEMFC의 핵심부품으로는 MEA(Membrane electrode assembly), 개스킷(Gasket), 유로판, 엔드플레이트(End plate)가 있다. 그 중에서 유로판은 다음과 같은 중요한 역할을 담당하고 있다. 유로판은 MEA에서 생성된 전기를 모으는 커런트 컬렉터(Current collector)의 기능 및 수소와 공기와 같은 반응 기체(Reactant gases)들을 MEA에 공급하는 역할을 담당한다. 또한 발전 후에 부산물로 생기는 물을 제거하는 역할도 가지고 있다.

유로의 형상은 싱글 설펜타인(Single serpentine), 멀티플 설펜타인(Multiple serpentine), 패러럴(Parallel), 인터디지테이트드(Interdigitated) 등으로 다양하다. 이런 다양한 유로 형상들이 연료전지 성능에 끼치는 영향

에 대해선 그동안 많은 연구가 진행되었다. 하지만 유로 형상에 따라 반응 기체의 압력 크기 및 분포가 변화하여, 연료전지 성능에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 연구는 별로 진행된 것이 없었다. 따라서 본 연구에서는 유로 형상에 따라 반응 기체의 압력 크기 및 분포가 어떻게 변하는지를 CFD를 통해 해석하고, 그 해석 결과를 연료전지 성능 실험 결과와 비교해 보았다.

1) 서울대학교 차세대 기계항공시스템 창의설계 인력 양성사업단

E-mail : pminsoo2@snu.ac.kr

Tel : (02)880-7147 Fax : (02)887-7259

2) 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : idboy@hanmail.net

Tel : (02)880-7147 Fax : (02)887-7259

2. 실험 방법

2.1 다양한 캐소드 유로 형상

본 실험에서는 총 4가지 캐소드(Cathode)쪽 유로 디자인이 사용되었다. 이 4가지 유로 디자인은 싱글 설펜타인, 멀티플 설펜타인, 패러럴 설펜타인, 패러럴이다. 4가지 유로 모두 채널의 깊이와 폭은 1 mm로 동일하다. 이는 채널의 크기가 달라질 경우에는 성능에 영향을 끼칠수 있기 때문이다. 패러럴 설펜타인 유로와 패러럴 유로의 경우 각각의 채널을 연결하는 큰 스템(Stem) 채널이 존재하는데 스템 채널의 크기는 폭 3 mm, 깊이 1 mm이다.

4가지 유로에 공급하게 되는 공기의 양은 화학량론적(Stoichiometric) 수 4로 정하고 이 수에 맞춰 CFD 분석을 진행하였다. 또한 이 결과를 실제 성능 결과와 비교하기 위한 단위 연료전지 성능 측정실험을 진행하였는데, 그 때도 공급하는 공기의 양을 화학량론적 수 4로 맞추었다.

2.1.2 CFD 분석 및 가정

CFD분석을 위해서 상용 유동 해석 프로그램인 FLUENT 6.3을 사용하였다. 시뮬레이션을 위한 4가지 유로 디자인의 모델링은 GAMBIT 2.3.16으로 진행하였다. 모델링에서 메쉬(Mesh)의 크기는 0.5였으며 메쉬의 타입은 Tet/Hybrid 타입이었다. 해석 진행 시 다음과 같은 가정들이 사용되었다.

- 1) 채널에서 모든 공기 유동은 층류이며 스테디(Steady)로 가정하였다.
- 2) 채널 벽의 4면은 금 코팅된 알루미늄으로 구성되어 있다.
- 3) 공기 중 산소의 사용 및 물의 생성은 무시되었다.
- 4) 채널 안에서 공기의 온도는 343 K로 고정하였다.
- 5) 출구쪽 대기 압력은 게이지(Gage) 압력으로 0 Pascal로 설정하였다.
- 6) 채널 벽은 논 슬립 컨디션(Non-slip condition)으로 가정하였다.

2.1.2 단위 연료전지 성능 측정

단위 연료전지의 성능 측정은 동일한 MEA를 이용해 4가지 형태의 유로판을 바꿔가며, 공기를 화학량론적 수를 4 만큼 공급하면서 진행하였다. 실험에 사용된 PEMFC 모델의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 단위 연료전지 성능 측정 실험에서 MEA는 반응 면적이 25 cm² 인 상용 MEA를 사용하였으며 애노드(Anode)와 캐소드 각 면 모두 40 wt.% Pt 촉매를 사용하였다.

유로판의 재료는 알루미늄으로, 유로판의 부식을 방지하고, MEA와 유로판과의 계면 저항을 줄이기 위해 금을 코팅(Coating)하였다. 이렇게 금도금된 알루미늄 유로판은 유로판의 재료로 일반적으로 널리 이용되는 흑연과 비슷한 성능을 낸다고 알려져 있다.⁵⁾

실험 시 애노드 쪽에는 75 °C의 온도로 가열한 상대 습도가 100%인 수소를 공급하였다. 이때 화학량론적 수는 1.5 였다. 캐소드 쪽에는 70 °C

의 상대습도 100%인 공기를 화학량론적 수 4로 공급하였다. 실험 시 단위 연료전지의 온도는 70 °C로 유지하였다. 전류 전압 커브(IV-curve)는 전기 로더(Electric loader:WFCTS, WonATech Co.,Ltd.)를 통해 측정되었다.

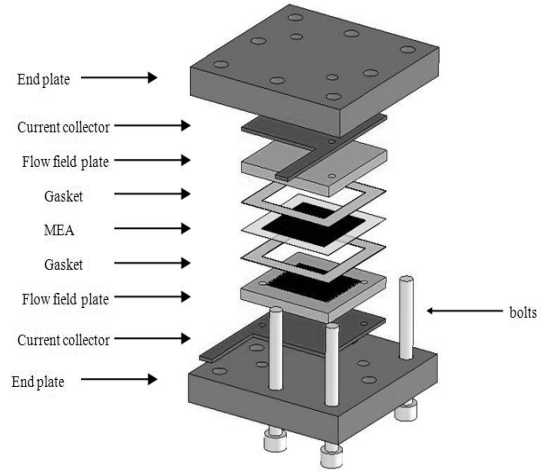
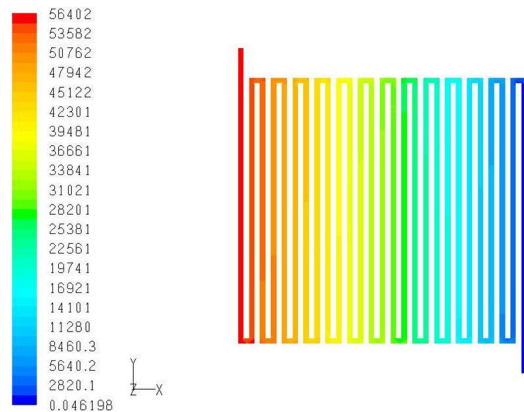


Fig. 1 The schematic of the PEMFC model for the single cell test

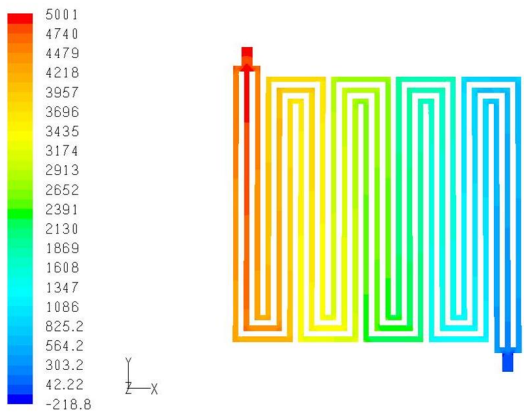
3. 실험 결과

3.1 CFD 분석 결과

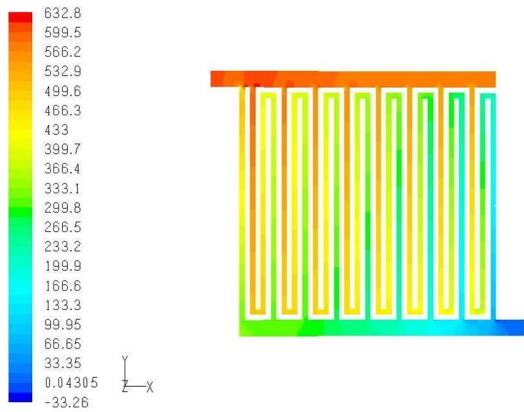
연료전지의 경우 애노드 쪽보다는 캐소드 쪽이 연료 공급 속도에 제한을 더 크게 받는다. 공기 중의 산소가 수소에 비해 더 느리게 MEA 안쪽의 GDL(Gas diffusion layer)로 확산 되기 때문이다. 이런 이유로 유로 형상은 애노드 쪽보다 캐소드 쪽에서 더 큰 영향을 미친다.⁶⁾ 그래서 이번 실험에서는 애노드 쪽 유로 형상은 싱글 설펜타인으로 고정하고, 캐소드쪽 유로만 바꿔가며 유로 형태에 따른 성능 차이만 관찰하였다. 4가지 유로의 CFD실험 결과는 Fig.2에 나타내었다.



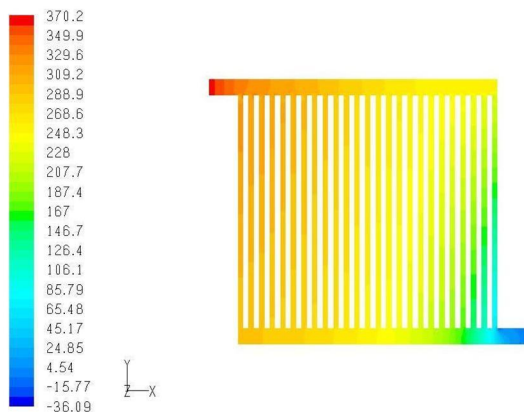
(a) Single serpentine



(b) Multiple serpentine



(c) Parallel serpentine



(d) Parallel

Fig. 2 The CFD pressure analysis results according to cathode flow-field design

CFD 분석 결과 싱글 섀펜타인 유로가 입/출구 간 압력차이가 가장 큰 것으로 나타났다. 입력 압력은 56402 Pa 이었고 출력 압력은 0.05 Pa 이었다. 공기의 압력은 유로를 따라 꾸준히 감소하는 형태로 나타났다. 싱글 섀펜타인 유로의 전 채널에 걸친 평균 압력은 30302 Pa로 나타났다. 멀티플 섀펜타인 유로의 경우 입구 쪽 압력은

5001 Pa로 싱글 섀펜타인과 비교하여 약 10 % 정도였다. 전 채널에 걸친 평균 압력은 2527 Pa 이었다. CFD 분석 결과, 싱글 섀펜타인을 제외한 나머지 3개 유로에서는 국소적으로 압력이 흡수인 부분이 나타났다. 이 부분은 채널들이 겹치는 부분에서만 국소적으로 나타난 것으로 공기가 외부로 벤트(Vent) 되는 것에는 문제가 없었다.

패러럴 섀펜타인 유로는 멀티플 섀펜타인과 비교하여 입구쪽 압력이 멀티플 섀펜타인의 11.5 % 크기였다. 이는 싱글 섀펜타인과 비교하면 1.1 % 수준이다. 평균 압력은 393 Pa 이었다. 마지막으로 패러럴의 경우에는 가장 낮은 입/출구 압력 차이를 보였다. 입구쪽 압력은 370 Pa 이었고 평균 압력은 256 Pa 이었다.

이상의 결과에서 살펴 볼 수 있듯이 4가지 유로들의 입/출구 압력차의 순서는 싱글 섀펜타인, 멀티플 섀펜타인, 패러럴 섀펜타인, 패러럴의 순이었다.

3.2 단위 연료전지 실험 결과와 비교

Fig.3 단위 연료전지의 IV-curve를 나타낸다. 성능 순서는 싱글 섀펜타인, 멀티플 섀펜타인, 패러럴 섀펜타인, 패러럴로 나타났다. 이 순서는 앞의 CFD 분석 결과인 Fig.2에서 4가지 유로들의 입/출구의 압력차의 순서와 일치한다. 싱글 섀펜타인의 경우는 다른 유로들과 비교해 현저히 높은 성능을 나타냈다. 반면에 패러럴 유로의 경우는 확연히 낮은 성능을 보였다.

이 결과는 입/출구의 높은 압력차가 매스 트랜스포트 로스 지역(Mass transport loss region)이 더 늦게 나타나게 하는 것으로 설명 될 수 있다. 매스 트랜스포트 로스 지역이 늦게 나타남으로써 PEMFC는 더 높은 전력 밀도(Power density)를 얻을 수 있다. 또한 입/출구의 높은 압력차는 옴릭 로스 지역(Ohmic loss region)에서 같은 전류 밀도에서 더 높은 전압이 나올 수 있게 한다.

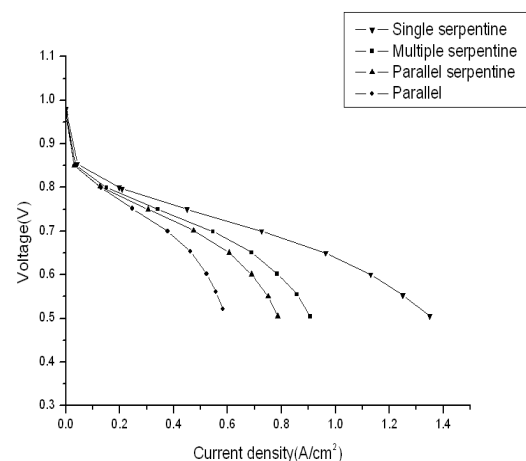


Fig. 3 IV-curve according to cathode flow-field design

입/출구 압력차가 클 때 위와 같은 현상이 나타나는 이유는 높은 평균 압력으로 인해 화학 반

음이 일어나는 MEA의 3상 계면에 더 많은 반응 기체들이 공급 될 수 있기 때문이다. 즉 높은 전류 밀도에서는 많은 산소가 필요하고, 압력이 높을수록 이때 필요한 산소가 잘 공급되는 것이다. 싱글 셀펜타인의 경우 높은 압력 차로 인해 매스 트랜스포트 로스 지역이 늦게 나타나는 것을 알 수 있으며, 패러럴의 경우에는 낮은 압력차로 인해 매스 트랜스포트 로스 지역이 빨리 나타남을 알 수 있다.

기체의 공급 방식도 압력의 차에 영향을 받는다. 패러럴 유로 같이 낮은 압력차에서는, GDL을 통한 촉매까지의 기체 공급이 확산(diffusion)으로만 이루어진다. 하지만 싱글 셀펜타인처럼 높은 압력차가 발생하는 경우에는 채널 사이에 압력 차이가 크기 때문에 채널간 대류가 발생하게 된다.⁶⁾ 이런 대류에 의한 기체의 공급은 산소의 접근성을 더욱 높이게 되므로 매스 트랜스포트 로스 지역이 늦게 나타나게 된다.

마지막 이유는 물이 쉽게 제거되는 것이다. MEA에서 화학 반응후 반응물로 나오는 물은 필요한 양 이상으로 생성되면, GDL위의 반응 지역(active area)을 덮게 되고 이는 반응 지역의 감소로 이어져 매스 트랜스포트 로스 지역에 빨리 도달하도록 한다. 패러럴 유로의 경우에는 낮은 입/출구 압력차로 인해 생성된 물이 쉽게 제거되지 못해 성능의 하락을 유발시킨다.⁷⁾ 하지만 싱글 셀펜타인의 경우에는, 높은 입/출구 압력차로 인해 필요 없는 물이 빠르게 제거되어 더 높은 출력을 낼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 유로형상에 따른 입/출구 압력 차 및 분포를 CFD로 분석하고, 그 결과를 단위 연료전지 성능 실험 결과와 비교 분석하였다. 4가지 유로들의 입/출구 압력차의 순서는 싱글 셀펜타인, 멀티플 셀펜타인, 패러럴 셀펜타인, 패러럴의 순이었다. 단위 연료전지 성능도 위와 동일한 순서이므로 입/출구 압력차가 클수록 성능이 높게 나오는 것을 확인하였다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 유로 내에서 반응 기체의 압력이 더 높을수록 반응 기체들이 화학 반응이 일어나는 MEA의 3상 계면에 더욱 많이 접근 할 수 있다.
- 2) 기체가 촉매에 접근할 때, 채널 간 높은 압력 차에 의해 기체 공급이 확산 뿐 아니라 대류에 의해서도 이루어진다.
- 3) 입/출구단의 압력차가 클수록 필요 없는 물이 쉽게 제거 될 수 있다.

이상의 실험 및 분석을 통해 유로의 형태가 연료전지의 성능에 큰 영향을 줄 수 있음을 알게 되었다. 연료전지 유로 내에서 기체의 압력 하강이 크더라도 높은 성능을 내는 것이 필요한 경우에는 싱글 셀펜타인 유로가 가장 적당할 것이며, 연료전지의 성능보다 기체의 압력 하강이 중요한 경우에는 패러럴 유로가 적당할 것이다. 만일 두 경우 모두를 고려해야 할 경우에는 멀티플 셀펜타인을 사용하는 것이 적당할 것이다.

References

- [1] Dyer, C.K., 2002, "Fuel cells for portable applications," J. of Power Sources, Vol. 106, Issue 1-2, pp. 31-34.
- [2] Heinzl, A., Hebling, C., Müller, Zedda, M. and Müller, C., 2002, "Fuel cell for low power applications," J. of Power Sources, Vol. 105, Issue 2, pp. 250-255.
- [3] Shimpalee, S. and Van Zee, J.W., 2007, "Numerical studies on rib & channel dimension of flow-field on PEMFC performance," Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 32, Issue 7, pp. 842-856.
- [4] Cheng, C.H., Fei, K. and Hong, C.W., 2007, "Computer simulation of hydrogen proton exchange membrane and direct methanol fuel cells," Computers & Chemical Engineering, Vol. 31, Issue 4, pp. 247-257.
- [5] Mepsted, G.O. and Moore, J.M., 2003, "Handbook of Fuel Cells: Fundamentals Technology and Applications," Vol. 3, pp. 286-293, John Wiley & Sons, New York.
- [6] O'Hayre, R., Cha, S.W., Colella, W. and Prinz, F.B., 2006, "Fuel Cell Fundamentals," pp. 145-168, John Wiley & Sons, New York.
- [7] Tuber, K., Oedegaard, A., Hermann, M. and Hebling, C., 2004, "Investigation of fractal flow-fields in proton exchange membrane and direct methanol fuel cells," J. of power sources, Vol. 131, Issue 1-2, pp. 175-181.