

혼합 다채널 사형 유로의 혼합영역이 PEMFC 성능에 미치는 영향

이지홍[†], 이명용*, 김현주*, 이상석*, 이도형**

*부경대학교 대학원 에너지시스템 공학과, **부경대학교 기계공학부

The Effect of Mixing Region in Mixed Multiple Serpentine Flow-field to PEMFC Performance

JIHONG LEE[†], MYEONGYONG LEE*, HUNJU KIM*, SANGSEOK LEE*, DOHYUNG LEE**

*Dept. of Energy System Engineering, Grad. School of Pukyong National Univ.,
San 100 Yongdang-dong Nam-gu, Busan 608-739, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National Univ.,
San 100 Yongdang-dong Nam-gu, Busan 608-739, Korea

ABSTRACT

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) has low operating temperature and high efficiency. And PEMFC consists of many components as bipolar plate, gas diffusion layer, membrane etc.. Flow-field in bipolar plate roles path for transporting reactants to membrane. Therefore a design of flow-field has an effect on PEMFC's performance. In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were performed for comparing mixed multiple serpentine (MMS) flow-field and multiple serpentine (MS) flow-field. And we studied an effect according to change mixing region design in MMS flow-field. Finally the applicability of results is verified by performing CFD simulation about fixed MMS flow-field which is combined good designs.

KEY WORDS : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Mixing region(혼합영역), CFD(전산유체역학), Flow-field design(유로 설계), Mixed multiple serpentine flow-field(혼합 다채널 사형 유로)

Nomenclature

$i_{avg.}$: average of current density, A/cm²

V_{Cell} : cell voltage, V

T : temperature, K

λ : water content inside MEA

σ_m : membrane conductivity, S/m

i : local current density, A/cm²

m_{wl} : mass fraction of liquid water

1. 서 론

최근 화석연료의 사용에 따른 에너지 문제 및 환경오염 문제가 대두됨에 따라 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 신재생에너지의 종류에는 풍력, 태양열, 태양광, 연료전지 등이 있으며,

[†]Corresponding author : pasama1208@pknu.ac.kr

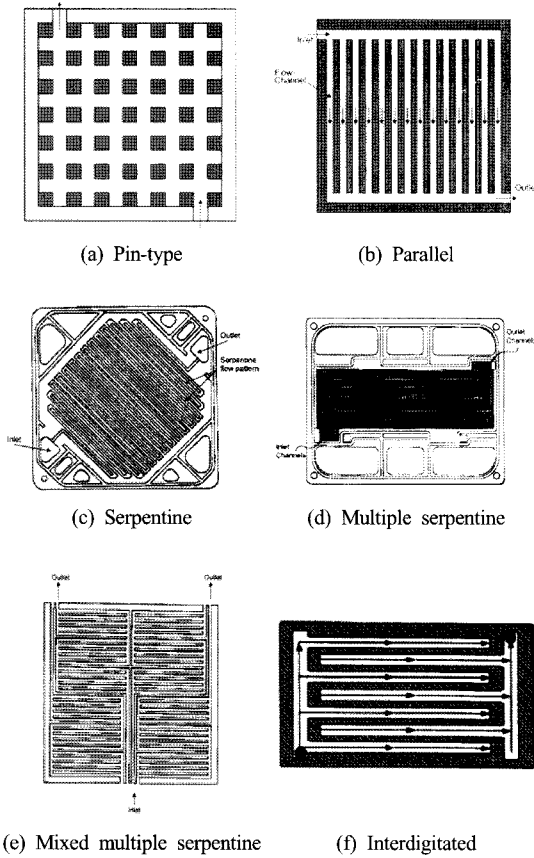


Fig. 1 Various flow-field design.

그 중에서 PEMFC(고분자 전해질 연료전지)는 저온에서 작동하는 연료전지로 주로 운송수단이나 건물용 전력 공급 시스템에 적용된다¹⁻³⁾.

PEMFC는 전해질, 촉매층, 가스확산층, 양극판으로 구성되며, 양극판은 반응물질의 통로 및 구조적 지지 역할을 한다. 양극판에 만들어지는 유로는 반응물질의 수송에 큰 영향을 미치게 되므로 PEMFC의 성능을 좌우한다. 여러 연구자들은 Fig. 1과 같이 다양한 유로 형태를 제시하였으며, 그 종류는 pin형에서부터 interdigitated형까지 다양하다⁴⁾. 그 중 Watkins 등⁵⁾이 제안한 multiple serpentine(MS)형 유로는 serpentine형을 병렬로 한 형태으로써 serpentine형 유로에 비하여 압력강하를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그리고 Cavalca 등⁶⁾이 제안한 mixed multiple

serpentine(MMS)형 유로는 MS형 유로와 parallel형 유로를 섞은 형태로써 반응물질이 180도 턴할 때마다 혼합이 이루어짐에 따라 MS형에서 일부 채널이 수분에 의해 차단이 일어나는 것을 최소화한다⁷⁾.

기본적인 유로형태 외에 채널 폭, 랜드 폭과 같은 유로의 설계 치수는 PEMFC의 성능에 영향을 미치며, 이러한 설계 치수에 대한 영향 분석 및 최적화하는 과정은 PEMFC의 설계에 있어 필수조건이라 할 수 있다. 하지만 유로 치수에 대한 연구는 실험적으로 행해지기에는 시간과 경제적 측면에서 불리하며, 컴퓨터 성능의 향상과 함께 전산유체역학을 이용한 많은 연구가 시도되고 있다. S. Shim-Palee 등^{8,9)}은 MS형 유로에 대하여 채널과 립의 단면적의 영향 및 유로의 길이의 영향에 관하여 연구하였으며, Lee 등¹⁰⁾은 연료극과 공기극의 유로폭비에 따른 영향을 분석하고 taguchi법을 사용하여 최적화를 수행하였다.

본 논문에서는 수치해석을 통하여 1) MMS형 유로와 MS형 유로를 비교하고, 2) MMS형 유로의 특징이라 할 수 있는 혼합 부분의 형상 변경에 따른 PEMFC의 성능을 예측하여 경향을 파악하여 보고자 한다. 그리고 3) MMS형 유로의 일부분을 MS형 유로를 혼합하여 성능을 분석하고 4) 앞의 연구 결과를 토대로 하여 적절히 조합한 유로 형태를 수치해석을 이용하여 성능을 예측해보고자 한다.

2. 수치해석

2.1 형상 및 격자

2.1.1 기본 유로

Table 1은 D. H. Jeon 등¹¹⁾의 연구결과를 참고로 한 본 논문의 수치해석 대상이 되는 PEMFC의 기본 유로 형상 치수 및 물성이다. Fig. 2는 본 연구에서 기본이 되는 MS와 MMS의 형상이며, 이는 선행연구¹²⁾의 single serpentine형과 동일 유로 폭 및 두께, 랜드 폭, 반응면적을 가지는 4개의 다채널 가진 유로 형태이다.

Table 1 Geometry details and properties

| Properties | Value |
|--|---------|
| Channel width (mm) | 0.8 |
| Channel height (mm) | 1.0 |
| Land width (mm) | 0.8 |
| Reacting area (cm ²) | 10 |
| GDL thickness (mm) | 0.25 |
| GDL porosity | 0.7 |
| GDL permeability (m ²) | 1.0e-12 |
| GDL thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹) | 0.21 |
| MEA thickness (mm) | 0.05 |
| MEA thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹) | 0.15 |
| Bipolar plate thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹) | 5.7 |

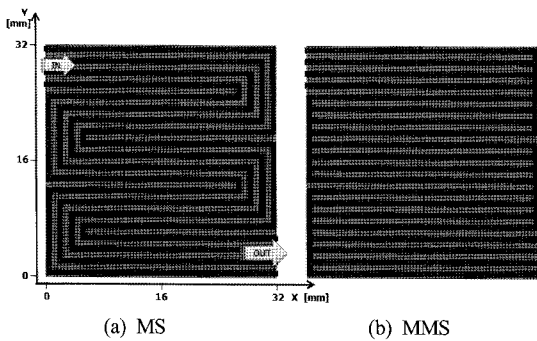


Fig. 2 MS and MMS flow-field design.

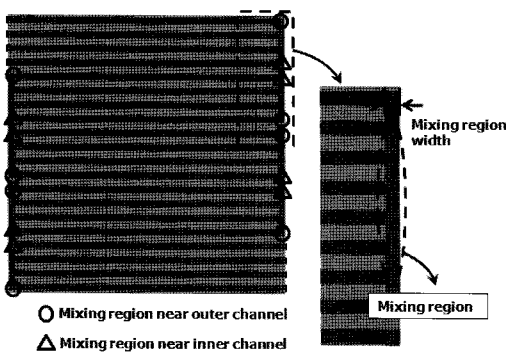


Fig. 3 Definition of mixing region.

2.1.2 혼합 영역 변경

Fig. 3은 혼합영역 및 혼합영역 폭을 정의한 것

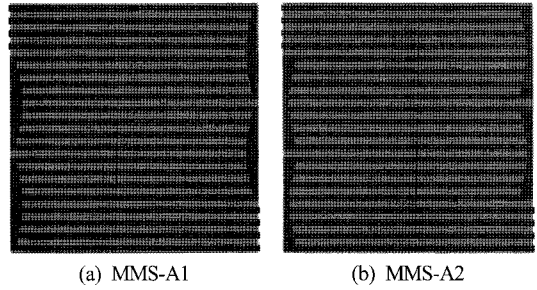


Fig. 4 MMS designs of mixing region width which has gradient.

Table 2 Case description of changed mixing region design

| Case | Description |
|---------|--|
| MMS | Mixing region width = 0.8mm |
| MMS-0.5 | Mixing region width = 0.4mm |
| MMS-2 | Mixing region width = 1.6mm |
| MMS-3 | Mixing region width = 2.4mm |
| MMS-A1 | Mixing region width near outer channel = 1.6mm Mixing region width near inner channel = 0.8mm |
| MMS-A2 | Mixing region width near outer channel = 0.8mm Mixing region width near inner channel = 1.6mm |

이며, MMS-0.5, MMS-2, MMS-3은 기본 형상인 MMS형의 혼합영역의 폭을 변경한 형상으로 정의 하였다. 그리고 Fig. 4의 MMS-A1과 MMS-A2는 각 채널의 균일한 유량 분배를 위하여 폭의 구배가 있는 혼합영역을 가지는 형상이다. 혼합영역에서 바깥쪽 채널과 안쪽 채널과 만나는 혼합영역 폭의 비를 각각 2:1, 1:2로 한 형상이다. 각 형상에 대한 자세한 내용은 Table 2와 같다.

2.1.3 MMS형과 MS형 혼합

PEMFC의 유로를 따라 수송된 반응 물질은 GDL (가스확산층)에서의 확산을 통하여 CL(촉매층)에 도달하여 반응이 일어난다. 이에 따라 주 반응면의 형태는 유로형태를 띄게 된다. MS형의 경우 MMS 형과는 달리 각 채널간의 혼합영역이 없어 물질 수

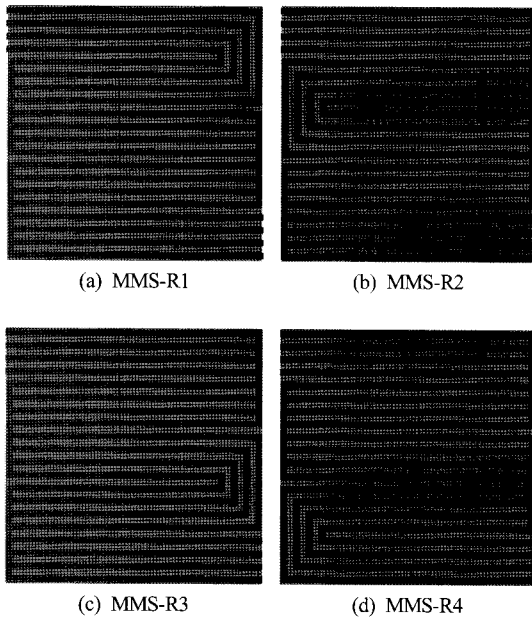


Fig. 5 Combined MMS and MS flow-field.

송이 더 독립된 형태로 이루어져 있으며, 격임부에서는 GDL과 유로가 접하는 면적이 MMS형에 비해 더 넓다. 이에 따라 Fig. 5와 같이 MMS의 4개의 격임부를 각각 MS형 유로를 적용하여 성능을 예측함으로써 그에 따른 영향을 알아보고자 하였다.

2.2 수치해석

수치해석을 위하여 각 형상별로 약 80~140만개 정도의 hexahedral 격자를 사용하였으며, 격자 의 존도 및 참고문헌¹¹⁾과의 해석결과 검증은 해석 이전에 충분히 수행하였다. 유동 특성상 층류로 가정하였으며, 상용 CFD 코드인 STAR-CD v3.26과 PEMFC 전문 프로그램인 es-PEMFC v2.20을 연계하여 수치해석을 수행하였다. 사용된 지배방정식 및 전기화학 방정식은 서로 연결되어 있으며, 자세한 내용은 참고문헌¹³⁾을 참고하기 바란다. 그리고 잔차가 $1.0e-6$ 이하가 되고, 수소, 산소, 물 등의 화학 종 불균형이 1% 이하가 될 때 수렴하였다고 판단하였다.

Table 3 Boundary and operating conditions

| Conditions | | Value |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| Anode inlet | Flow rate (L/min) | 0.207 |
| | Stoichiometry | 1.2 |
| | Relative humidity (%) | 100 |
| | Temperature (°C) | 80 |
| | Pressure (atm) | 1 |
| Cathode inlet | Flow rate (L/min) | 0.614 |
| | Stoichiometry | 2.0 |
| | Relative humidity (%) | 100 |
| | Temperature (°C) | 70 |
| | Pressure (atm) | 1 |
| Outlet | Pressure (atm) | 1 |
| OCV (V) | | 0.96 |
| Cell temperature (°C) | | 70 |

Table 4 Performance of MS and MMS

| Case | V_{Cell} [V] ($i_{avg}=1.0A/cm^2$) | Pressure drop [Pa] | |
|------|---|--------------------|---------|
| | | Anode | Cathode |
| MS | 0.5125 | 39.371 | 422.522 |
| MMS | 0.5120 | 55.712 | 967.643 |

2.3 경계조건 및 운전조건

본 연구에 사용된 경계조건 및 운전조건은 Table 3과 같으며, 연료극과 공기극의 입구 경계조건은 수분을 충분히 공급하기 위하여 상대습도 100% 조건을 사용하였고, 출구측은 상압운전조건을 사용하였다. 여기서 입구 유속 계산을 위한 기준 전류밀도는 수분 생성 및 이론 유량이 많아 형상변화에 민감할 것으로 예상되는 높은 전류밀도에 해당하는 $1.0A/cm^2$ 로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 MS형과 MMS형의 비교

Table 4는 MS형과 MMS형의 평균전류밀도가 $1.0A/cm^2$ 일 때 계산 결과로써 셀 전압 및 양극의 압력강하이다. MS형이 MMS형에 비하여 셀 전압

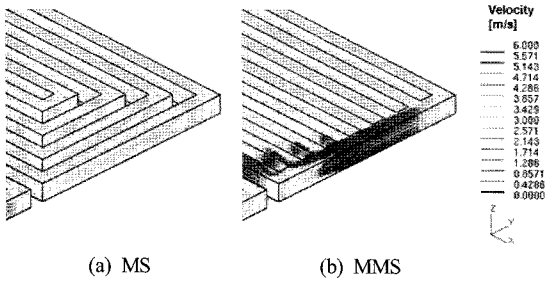


Fig. 6 Velocity [m/s] vector on cathode channel (around 1st mixing region, 1st turning).

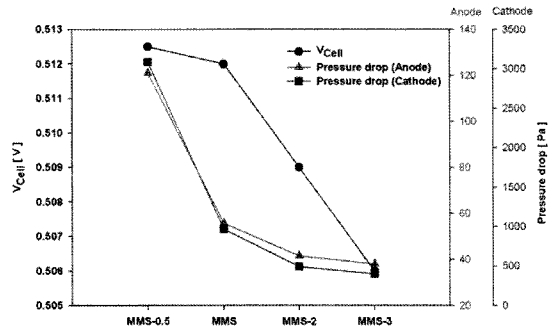


Fig. 8 Variation of V_{Cell} and pressure drop by changing mixing region width.

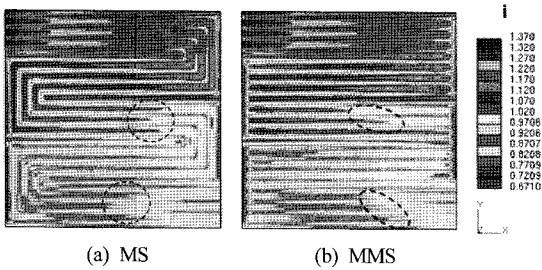


Fig. 7 Current density [A/cm^2] distribution on MEA surface.

이 높게 예측되었으며, 양극 모두 압력강하가 작게 예측되었다. 이것은 Fig. 6과 같이 MMS형은 혼합영역에서 4개의 채널이 합해짐에 따른 혼합영역에서의 유속 증가가 원인이라 생각된다. 그리고 MS형과 MMS형 모두 공기극이 연료극에 비하여 압력강하가 컸으며, 공기극의 유량이 연료극에 비해 큰 것이 원인이라 생각된다. Fig. 7은 MEA 표면에서 전류 밀도 분포이며, 전류밀도 분포가 유로형태와 유사한 것으로 보아 MS형과 MMS형의 유로형태가 잘 반영된 것을 확인 할 수 있었으며, 계산이 잘 이루어졌음을 확인 할 수 있다. MMS형의 경우 유로 후반부에서 인접 채널간의 전류밀도 분포의 구배 형태가 직선 패턴을 보이므로 유로 최적 설계 시 MS형에 비하여 접근이 용이할 것으로 추측된다.

3.2 혼합영역의 형상 변경에 따른 영향

Fig. 8은 혼합영역의 폭에 따른 셀 전압 및 연료

극과 공기극의 압력강하를 나타낸다. 혼합영역의 폭이 증가할수록 셀 전압 및 압력강하가 감소하는 경향을 보였다. 그 원인은 혼합영역 폭이 작아짐에 따라 GDL에서의 물질 수송이 더 활발해져 셀 전압이 증가하고 압력강하가 커진 것이라 생각된다. 그리고 셀 전압은 MMS-0.5에서 MMS로 변화할 때보다 MMS에서 MMS-2, MMS-3의 변화할 때 더 컸으며 압력강하의 경우 그 반대의 경향이 나타남을 알 수 있었다. 이것은 MMS에 비하여 MMS-0.5의 경우 혼합영역의 폭이 좁아짐에 따른 셀 전압 증가량보다는 압력강하의 증가가 더 크기 때문이고, MMS-2와 MMS-3의 경우 혼합영역의 폭이 커짐에 따른 압력강하의 감소에 비하여 셀 전압은 더 떨어졌기 때문이라 생각된다.

Fig. 9는 혼합영역 폭에 따른 MEA 표면에서의 전류밀도 분포를 나타내며, 혼합영역에서 다른 영역에 비하여 낮은 전류밀도가 나타났다. 혼합영역 폭이 커질수록 이러한 영역이 더 넓어짐을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 Fig. 10과 같이 혼합영역에서 GDL층으로의 유동이 다른 영역에 비하여 작아 열전달이 원활하지 않아 온도가 상승하게 된다. 이에 따라 MEA 내부의 물 포함률이 작아져, 이온 전도율이 낮아지고 그 결과 음 손실 커지기 때문이다.

그리고 Fig. 9에서 혼합영역 폭이 커질수록 전류 밀도 분포가 인접 채널들과 유사한 형태를 나타낼 수 있었다. 각 채널의 유동 흐름은 혼

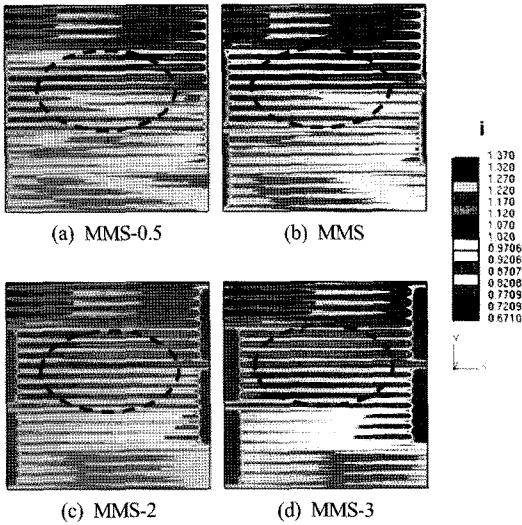


Fig. 9 Current density [A/cm²] distribution on MEA surface according to various mixing region width.

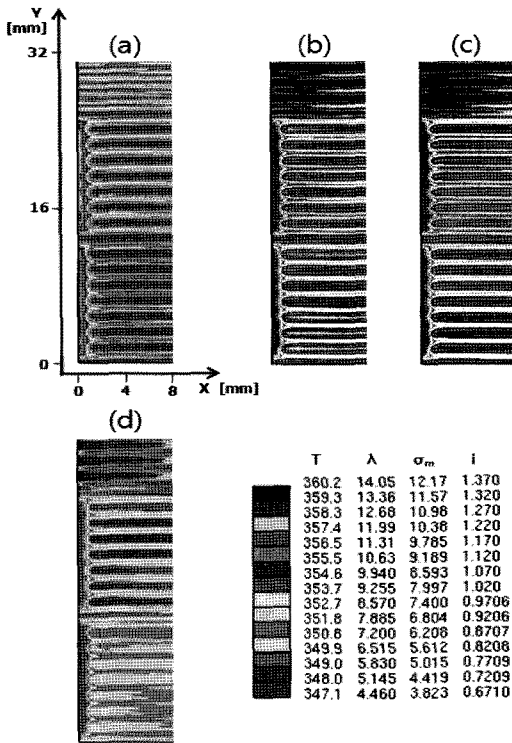


Fig. 10 Scalar distributions on MEA surface around mixing region in MMS (a) Temperature distribution [K] (b) Water content inside MEA (c) Membrane conductivity [S/m] (d) Current density [A/cm²].

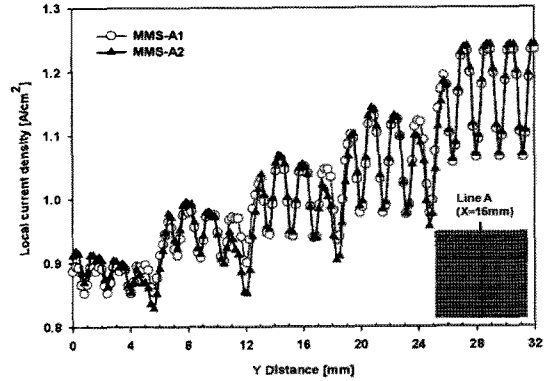


Fig. 11 Local current density profile at line A (X=16mm).

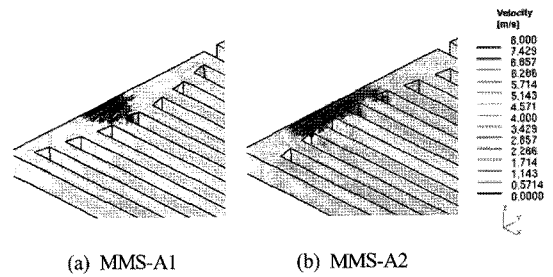


Fig. 12 Velocity[m/s] vector on cathode channel around last mixing region, last turning.

혼합영역에서 모이게 되고 유동 완충 역할을 한다고 볼 수 있다. 이러한 유동 완충 역할은 혼합영역 폭이 증가할수록 커지게 되고, 이에 따라 인접 채널 들끼리 유사한 유동 형태를 가지게 되기 때문에 혼합영역 폭이 커질수록 인접 채널들과 유사한 형태를 가지는 것이라 추측된다.

Fig. 11은 MMS-A1과 MMS-A2에서 X=16mm 인 선 A에서 MEA 표면에서의 국부전류밀도를 나타낸 그래프이다. MMS-A1이 MMS-A2보다 전류 밀도 분포가 더 균일하였다. 이러한 원인은 Fig. 12와 같이 혼합영역 폭의 변화로 인해 MMS-A2는 혼합영역에서 각 채널로의 유량 분배가 고르지 못한 반면, MMS-A1은 고르게 분포하기 때문이라 생각된다. 이러한 효과에 의하여 Table 5와 같이 MMS-A1이 셀 전압이 높고 압력강하는 작게 나타남을 알 수 있었다.

Table 5 Performance of MMS-A1 and MMS-A2

| Case | V_{Cell} [V] ($i_{avg}=1.0A/cm^2$) | Pressure drop [Pa] | |
|--------|---|--------------------|---------|
| | | Anode | Cathode |
| MMS-A1 | 0.5103 | 43.368 | 535.092 |
| MMS-A2 | 0.5093 | 51.991 | 869.779 |

Table 6 Performance of combined MMS and MS

| Case | V_{Cell} [V] ($i_{avg}=1.0A/cm^2$) | Pressure drop[Pa] | |
|--------|---|-------------------|---------|
| | | Anode | Cathode |
| MMS-R1 | 0.5122 | 49.394 | 833.678 |
| MMS-R2 | 0.5123 | 51.097 | 794.487 |
| MMS-R3 | 0.5124 | 52.393 | 785.209 |
| MMS-R4 | 0.5119 | 53.377 | 812.243 |

3.3 MMS형 유로에 MS형 유로를 적용함에 따른 영향

Table 6은 MMS형 유로에 MS형 유로 적용에 따른 셀 전압 및 압력강하를 나타낸 것이며, MMS-R3의 셀 전압이 가장 높게 예측되었다. 연료극의 경우 출구에 가까운 꺾임부에 MS형 유로를 적용할수록 압력강하가 커지는 경향을 보였다. 하지만 공기극의 경우 출구와 가장 가까운 마지막 꺾임부

에 적용할 경우 오히려 높아졌다. Fig. 13은 전류밀도와 액상 수분의 질량 분율을 나타내며, 출구와 가까울수록 국부 전류밀도는 낮아지는 경향을 보이고 액상의 수분이 많아지는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 국부 전류밀도가 낮아짐에 따라 발열량과 온도는 낮아지고 포화압력이 낮아져 응축되는 액상의 수분이 많아짐에 따른 현상이다. MMS-R4의 경우 마지막 꺾임부에 혼합영역이 없어 채널간의 물질 수송의 불균형에 의해 출구 부근의 국부전류밀도가 다른 모델들에 비하여 낮게 분포하는 것이라 생각된다. 이에 따라 응축 수분의 질량 분율 증가로 인하여 압력강하가 오히려 증가한 것이라 생각된다.

3.4 조합 유로의 성능

앞선 수치해석 결과를 이용하여 좋은 성능이 나타나는 모델들(MMS-0.5, MMS-A1, MMS-R3)을 조합하여 Fig. 14와 같이 수정된 혼합영역을 가지고 MS형이 혼합된 MMS형의 최종 유로 형상을 동일 조건에서 수치해석을 수행하였다. 그 결과 Table 7과 같이 MMS에 비하여 셀 전압의 경우 0.2%의 성능이 향상됨을 확인 할 수 있었으며, 압력강하는 연료극은 0.6% 증가, 공기극은 10% 감소하였다. 연료

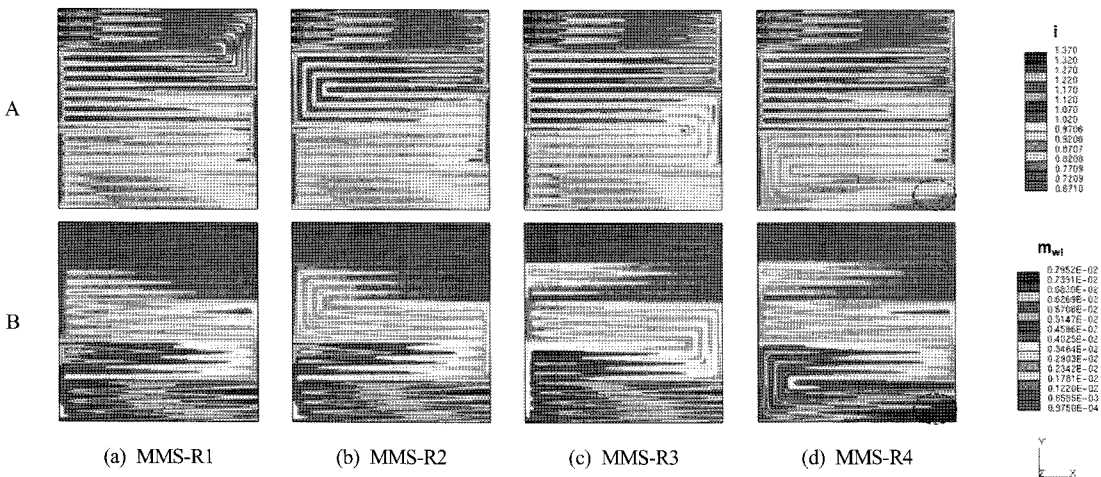


Fig. 13 Scalar distributions on MEA surface of combined MMS and MS (A: Local current density [A/cm²], B: Mass fraction of liquid water at cathode side).

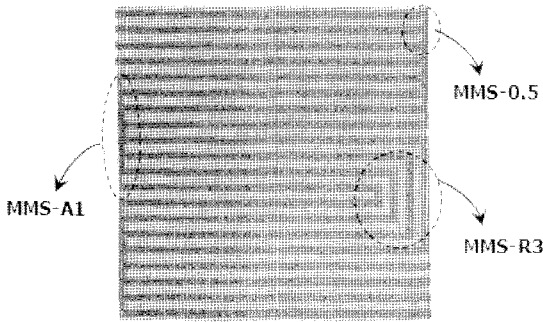


Fig. 14 Final model (Combination of MMS-0.5, MMS-A1 and MMS-R3).

Table 7 Performance of MMS and Final model

| Case | V _{Cell} [V] (<i>i</i> _{avg.} =1.0A/cm ²) | Pressure drop[Pa] | |
|-------------|---|-------------------|---------|
| | | Anode | Cathode |
| MMS | 0.512 | 55.712 | 967.643 |
| Final Model | 0.513 | 56.025 | 858.350 |

극의 압력강하의 증가는 공기극의 압력강하의 감소에 비하여 무시할 정도이고 셀 전압이 향상하였기 때문에 MMS에 비하여 성능이 향상되었다고 할 수 있다. 또한 이러한 결과를 통해 앞의 수치해석 결과의 적용 가능성을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 수치해석을 통하여 MMS형 유로와 MS형 유로의 차이점을 분석하고, MMS형 유로의 혼합영역 변경 및 일부 혼합영역에 MS형 유로를 적용하여 성능을 분석하였다. 그리고 좋은 성능을 가지는 조건들을 조합한 최종 유로를 성능평가 해보았다.

- 1) MS형에 비하여 MMS형은 혼합영역에 의해 압력강하가 큰 반면, 유로 최적 설계 시 접근이 쉬울 것으로 생각된다.
- 2) 혼합영역 폭이 좁아질수록 성능은 증가하였으나, 압력강하는 증가하는 경향을 보였으며 MMS-A1의 혼합영역 형태는 MMS-A2의 혼합영역 형태

에 비하여 전류밀도 분포가 더 균일하였다.

- 3) MMS형 혼합영역에 MS형 유로를 부분적으로 적용한 결과 입구에서 멀어질수록 성능은 증가하는 경향을 보였으나, 마지막 혼합영역에 적용할 경우 오히려 성능은 감소하였다.
- 4) 각 조건별 좋은 성능을 보이는 형상(MMS-0.5, MMS-A1, MMS-R3)을 조합한 최종 유로형상은 MMS에 비하여 성능이 개선되는 결과를 얻을 수 있었다.

이와 같은 결과를 통하여 혼합영역에 변형에 따른 영향과 PEMFC 유로 설계 시 적용 가능성을 확인 할 수 있었다. 하지만 본 연구 결과는 열·유체역학적 관점에서 접근한 것이기 때문에 스택의 체결압에 따른 구조적 변형과 같은 현상들을 고려하지 않아 한계가 있을 수 있다. 따라서 추후 열·유체역학과 구조역학 해석을 연동한 연구가 필요할 것이라 생각된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- 1) 이원용, 정귀성, 유상필, “가정용 고분자연료전지 시스템의 운전 방법에 따른 성능 비교”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 16, No. 4, 2005, pp. 364-371.
- 2) 김민진, 송영준, 김경연, “연료전지 하이브리드 자동차의 고효율 수소 재순환 시스템의 개발”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 19, No. 2, 2008, pp. 118-123.
- 3) 유상석, 이영덕, 홍동진, “가정용 고분자연료전지 운전 모드 해석을 위한 동특성 모델 개발”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 19, No. 4, 2008, pp. 313-321.
- 4) Xianguo Li, Imran Sabir, “Review of bipolar plate in PEM fuel cells: Flow-field design”,

- International journal of hydrogen energy, Vol. 30, Issue. 4, 2005, pp. 359-371.
- 5) Watkins et al., "Fuel cell fluid flow field plate", U.S. Patent, No. 5, 108, 849, 1992.
 - 6) Calvalca et al., "Flow field plate for use in a proton exchange membrane fuel cell", U.S. Patent, No. 5, 686, 199, 1997.
 - 7) Frano Barbir, "PEMFC Fuel Cells-Theory and Practice-", Elsevier Academic Press, 2005.
 - 8) S. Shimpalee, S. Greenway, J.W. Van Zee, "The impact of channel path length on PEM fuel cell", Journal of Power Source Vol. 160, Issue. 1, 2006, pp. 398-406.
 - 9) S. Shimpalee, J.W. Van Zee, "Numerical studies on rib & channel dimension of flow-field on PEMFC performance", International journal of hydrogen energy, Vol. 32, Issue. 7, 2008, pp. 842-856.
 - 10) Sungho Lee, Heeseok Jeong, Byungki Ahn, Taewon Lim, Youngin Son, "Parametric study of the channel design at the bipolar plate in PEMFC performances", International journal of hydrogen energy, Vol. 33, Issue. 20, 2008, pp. 5691-5696.
 - 11) D.H. Jeon, S. Greenway, S. Shimpalee, J.W. Van Zee, "The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance", International journal of hydrogen energy, Vol. 33, Issue. 3, 2008, pp. 1052-1066.
 - 12) 이지홍, 이명용, 이상석, 이도형, "연료극과 공기극 유로의 겹침이 PEMFC 성능에 미치는 영향", 한국신·재생에너지학회지, Vol. 5, No. 1, 2009, pp. 18-25.
 - 13) ES-PEMFC methodology : CD-adapco Group, <http://www.adapco.com>