

분리판 분할을 통한 연료전지의 전류분포 측정법에 대한 수치적 검증

최용준*, 이기용*, 강경문*, 김환기**, 주현철*[†]

*인하대학교 기계공학부, **건국대학교 응용화학과

Computational Justification of Current Distribution Measurement Technique Via Segmenting Bipolar Plate in Fuel Cells

YONGJUN CHOI*, GIYONG LEE*, KYUNGMIN KANG*, WHANGI KIM**, HYUNCHUL JU*[†]

**School of Mechanical Engineering, Inha Univ., 253 Yonghyun-dong,
Nam-gu, Incheon, 402-751, Korea*

***Dept. of Applied Chemistry, Konkuk Univ., 322 Danwol-dong,
Chungju, Chungcheongbuk, 380-701, Korea*

ABSTRACT

Current distribution measurement technique based on a segmented bipolar plate (BP) has been widely adopted to visualize the distribution of current density in a polymer electrolyte membrane. However, a concern is raised how closely the current density of a segmented BP can approach that of a corresponding non-segmented membrane. Therefore, in this paper, the accuracy of the measurement technique is numerically evaluated by applying a three-dimensional, two-phase fuel cell model to a 100 cm² area fuel cell geometry in which segmented BPs and non-segmented membrane are combined together. The simulation results reveal that the errors between the current densities of the segmented BPs and non-segmented membrane indeed exist, predicting the maximum relative error of 33% near the U-turn regions of the flow-field. The numerical study further illustrates that the erroneous result originates from the BPs segmented non-symmetrically based on the flow channels that allows some currents bypassing flow channels to flow into its neighboring segment. Finally, this paper suggests the optimal way for bipolar plate segmentation that can minimize the deviation of current measured in a segmented BP from that of a corresponding membrane region.

KEY WORDS : Fuel cell(연료전지), Current density distribution(전류밀도분포), Polymer electrolyte membrane(고분자 전해질막), Bipolar plate(분리판), Segment(분할구역)

[†]Corresponding author : hcju@inha.ac.kr

[접수일 : 2010.1.10 수정일 : 2010.2.1 게재확정일 : 2010.2.16]

Nomenclature

| | |
|----------|--|
| a | : water activity, m^2/m^3 |
| A | : area, m^2 |
| C | : molar concentration, mol/m^3 |
| CD | : current density, A/m^2 |
| C_p | : specific heat, $kJ/kg \cdot K$ |
| CL | : catalyst layer |
| CW | : channel width |
| GDL | : gas diffusion layer |
| D | : mass diffusivity of species, m^2/s |
| EW | : equivalent molecular weight of membrane, kg/mol |
| E_a | : activation energy, $kJ/kmol$ |
| e^- | : electron |
| F | : Faraday's constant, $96487 C/mol$ |
| h_{fg} | : latent heat of water evaporation, kJ/kg |
| H_2 | : hydrogen |
| H_2O | : water |
| H^+ | : hydrogen ion |
| I | : current density, A/m^2 |
| j | : transfer current, A/m^3 |
| L | : segment width |
| K | : hydraulic permeability, m^2 |
| k | : thermal conductivity, $W \cdot m/K$ |
| M | : molecular weight, $kg/kmol$ |
| m | : mass fraction |
| n | : number of electrons transferred in electro-chemical reaction |
| n_c | : catalyst coverage coefficient |
| n_d | : electro-osmotic drag coefficient |
| O_2 | : oxygen |
| P | : pressure, Pa |
| P_c | : capillary pressure, Pa |
| R_u | : the universal gas constant, $8.314 J/mol \cdot K$ |
| r_p | : porous radius, m |
| S | : source term in transport equation or segment |
| s | : stoichiometry coefficient in electrochemical reaction |
| $S1$ | : segment 1 |
| $S2$ | : segment 2 |
| S_{wd} | : segment width length |
| S_h | : segment height length |
| T | : temperature, K |
| U_0 | : thermodynamic equilibrium potential, V |

| | |
|------------|---|
| U_{OC} | : open-circuit potential, V |
| u | : velocity vector, m/s |
| V_{cell} | : cell potential, V |
| α | : transfer coefficient |
| γ | : advection coefficient |
| ϵ | : volume fraction of gas phase in porous region or difference rate of current density |
| κ | : proton conductivity in the membrane, S/m |
| η | : overpotential, V |
| λ | : membrane water content, $mol H_2O/mol SO_3^-$ |
| μ | : fluid viscosity, kg/ms |
| ν | : kinematic viscosity, m^2/s |
| ρ | : density, kg/m^3 |
| σ | : ionic conductivity, S/m |
| τ | : viscous stress, N/m^2 |
| Φ | : phase potential, V |

Superscripts

| | |
|-------|--|
| eff | : effective value in porous region |
| g | : gas |
| l | : liquid |
| mem | : membrane |
| ref | : reference |
| 0 | : standard condition, 298.15 K and 101.3 kPa (1 atm) |

Subscripts

| | |
|-------|-----------------|
| a | : anode |
| BP | : bipolar plate |
| c | : cathode |
| e | : electrolyte |
| H_2 | : hydrogen |
| i | : species index |
| m | : mass equation |
| mem | : membrane |
| N_2 | : nitrogen |
| O_2 | : oxygen |
| ref | : reference |
| s | : solid |
| sat | : saturation |
| seg | : segment |
| $S1$ | : segment 1 |

- S2 : segment 2
 T : temperature, K
 u : momentum equation
 w : water
 ϕ : potential equation
 0 : standard condition, 298.15 K and 101.3 kPa (1 atm)

1. 서 론

연료전지 내부 전해질막(membrane)에서의 전류밀도분포(current density distribution)는 연료전지내부 여러 가지 복잡한 물리적인 현상에 기인하여 전해질막 면적에 균일하게 분포하지 않는다. 특히 전해질막의 전류밀도는 전해질막의 건조(membrane dehydration) 현상과 공기극에서 산소공급 및 플러딩(flooding) 정도에 크게 영향을 받으므로, 전해질막의 전류밀도분포를 분석하는 것은 셀의 물 관리(water management) 정도를 판단할 수 있는 중요한 척도이다. 그러므로 이미 많은 연구들이 연료전지내 전류밀도분포를 여러 작동조건에서 측정함으로써 전류밀도분포경향이 연료전지 성능과 내구성에 미치는 상관관계를 분석하였다¹⁻⁶⁾. Stumper등¹⁾은 전류밀도분포를 측정하기 위해 다음과 같은 세 가지 방법을 제시하였다; 1) 막-전극 집합체(membrane electrode assembly, MEA)에 촉매를 부분적으로 로딩 하는 방법, 2) MEA를 일정한 크기를 가진 구역으로 분할하여 분할된 구역끼리는 절연시킨 후 각각에 대하여 전류밀도를 측정하는 방법, 3) 저항 측정을 이용한 간접적인 전류밀도분포 측정방법. 그들은 위와 같은 방법으로 측정된 전류밀도분포를 분석하여 공기극의 출구 쪽으로 갈수록 플러딩(flooding) 현상이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 물질전달 손실(mass transport loss)로 이어져 연료전지 성능하락을 초래한다고 설명하였다. 그러나 Stumper등¹⁾이 전류밀도분포를 측정하기 위해 분할하거나 절연한 MEA는 실제 연료전지가 제작되고 작동될 때 사용되는 MEA와는 차이가 있다. 이러한 이유 때문에 Stumper등¹⁾이 적용한 방법에 의한 결과가 실제 연료전지에서도 같은 결과를 가져올 것이라고 신뢰하기는 힘들다. 따라서 Mench

등²⁾은 Stumper등¹⁾이 사용한 한계성을 극복하고 실제 연료전지가 구동될 때와 비슷한 조건에서의 전류밀도분포 측정하기 위하여 연료전지 분리판(bipolar plate)과 엔드플레이트(end-plate) 사이에 집전판(current collector)을 위치시켜 분할구역들이 설정된 분리판으로부터 직접적으로 전류밀도분포를 측정하였다. Mench등²⁾은 공기극에 공급되는 당량비(stoichiometry)가 증가할수록 공기극에서의 플러딩 현상을 완화시킬 수 있다는 사실을 전류밀도분포 측정연구를 통해 입증하였다. Ju등³⁾은 그들의 연료전지 수치해석 모델을 기존에 Mench등²⁾이 수행했던 전류밀도분포 측정 데이터를 통해 자세히 검증하였다. 그들은 실험 셀과 같은 크기의 수치적 셀을 제작하고 시물레이션 수행을 통해 얻어진 수치결과를 실험결과와 비교하였다. 그들의 시물레이션 결과는 평균전류밀도(average current density)상에서 비교될 때는 거의 완벽하게 일치하나, 전류밀도분포 상에서는 일치정도가 부족함이 드러났다. 이러한 결과들을 기반으로 Ju등³⁾은 연료전지 모델 검증은 상세한 실험 데이터, 예를 들면 전류밀도분포 데이터를 통해서 이루어져야 한다는 사실을 입증하였다.

현재까지 전류밀도분포를 측정하기위해 가장 많이 사용하고 있는 방법은 Mench등²⁾이 채택한 분리판(bipolar plate)과 엔드플레이트(end-plate) 사이에 집전판(current collector)을 위치시켜 분할구역이 설정된 분리판 으로부터 직접적으로 전류밀도분포를 측정하는 방법이다^{1,2,4)}. 하지만 이러한 전류밀도분포 측정방법은 전해질막의 전류밀도분포와 분리판에서의 전류밀도분포가 같다는 큰 가정이 내포되어 있다. 사실 분리판의 전류밀도분포는 분리판에 제작된 유로채널의 형상에도 영향을 받을 것으로 예측되기 때문에, 보다 세밀한 분리판 분할에 의한 전류분포 측정법이 요구된다. 본 연구의 목적은 기존에 개발된 연료전지모델⁷⁻¹⁰⁾을 이용한 수치 시물레이션을 수행함으로써, 전해질막과 분리판에서의 전류밀도분포 차이를 비교하고, 일반적으로 적용되었던 분리판 분할을 통한 전해질막에서의 전류밀도분포 측정법에 대한 이론적인 검증을 하는데 있다. 또한 분리판과 전해질막에서 전류밀도분포 오차를 최

소화하기 위해 분리판을 분할할 때 기본적으로 고려되어야 할 사항들을 제시하는데 있다.

2. 연료전지 모델 시뮬레이션

2.1 수치 모델(computational model)

본 연구에 이용된 연료전지 수치모델(computational fuel cell dynamics, CFCFD)은 Ju 등⁷⁻¹⁰⁾에 의해 개발된 것으로서, 3차원(three-dimensional), 이상(two-phase), 비등온(non-isothermal) 연료전지 모델이다. 본 모델은 연료전지 전류밀도 분포를 산출하기 위해 연료전지의 연료극(anode), 공기극(cathode), 촉매층

(catalyst layer)과 전해질막(membrane)에서의 전기화학반응과 물질전달현상에 대한 해석을 제공한다. 모델에 가정된 내용은 다음과 같다.

1. 공급되는 가스는 이상기체(ideal gas)
 2. 연료전지의 막전극접합체(membrane electrode assembly, MEA)를 구성하는 가스확산층(gas diffusion layer, GDL), 촉매층(catalyst layer, CL)은 등방(isotropic), 균일(homogeneous)한 구조
 3. 채널 내에서 유동하는 가스는 낮은 속도로 흐르고, 이에 따라 비압축성 층류로 가정
- 모델 시뮬레이션에 필요한 지배방정식(governing

Table 1 Two-phase steady-state fuel cell model

| Governing equations | | |
|---------------------|---|-----|
| Mass | $\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m$ | (1) |
| Momentum | Flow channels (Navier-Stokes Eqs.): $\frac{1}{\epsilon^2} \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau$ | (2) |
| | Porous Media (Darcy's Eqs.): $\rho \vec{u} = -\frac{K}{\nu} \nabla p$ | (3) |
| Species | Flow channels and porous media: $\nabla \cdot (\gamma_i \rho m_i \vec{u}) = \nabla \cdot [\rho^g D_i^{g,eff} \nabla (m_i^g)] + \nabla \cdot [(m_i^g - m_i^l) \vec{j}^i] + S_i$ | (4) |
| | Water transport in the membrane: $\nabla \cdot \left(\frac{\rho^{mem}}{EW} D_w^{mem} \nabla \lambda \right) M_w - \nabla \cdot \left(n_d \frac{1}{F} \right) M_w + \nabla \cdot \left(\frac{K^{mem}}{V^l} \nabla P^l \right) = 0$ | (5) |
| Charge | Proton transport: $\nabla \cdot (\kappa^{eff} \nabla \Phi_e) + S_\Phi = 0$ | (6) |
| | Electron transport: $\nabla \cdot (\sigma^{eff} \nabla \Phi_s) - S_\Phi = 0$ | (7) |
| Energy | $\nabla \cdot (\rho \vec{u} C_p T) = \nabla \cdot (\kappa^{eff} \nabla T) + \nabla \cdot (h_{j\Phi} \rho^l \vec{u}^l) + S_T$ | (8) |

Table 2 Two-phase steady-state fuel cell model

| Source/sink terms | | |
|-------------------|---|------|
| Mass | In the CLs: $S_m = \sum_i S_i + M_w \nabla \cdot \left(D_w^{mem} \frac{\rho^{mem}}{EW} \nabla \lambda \right)$ | (9) |
| Species | For water in CLs: $S_i = M_i \left[-\nabla \cdot \left(\frac{n_d}{F} T \right) - \frac{s_i^j}{nF} \right]$ | (10) |
| | For other species in CLs: $S_i = -M_i \frac{s_i^j}{nF}$ | (11) |
| Charge | In the CLs: $S_\Phi = j$ | (12) |
| Energy | In the CLs: $S_T = j \left(\eta + T \frac{dU_o}{dT} \right) + \frac{I^2}{\kappa^{eff}}$ | (13) |
| | In the membrane: $S_T = \frac{I^2}{\kappa^{eff}}$ | (14) |

equation), 생성항(source terms), 전기화학반응 관련 식들은 Table 1, Table 2와 Table 3에 각각 요약되어 있다.

2.2 셀 기하학적 형상 및 분할구역(segment) 설정

본 모델의 시뮬레이션을 수행하기 위해 적용된 연료전지셀의 기하학적 형상은 Fig. 1의 (a), (b)에서

Table 3 Electrochemical correlations

| |
|--|
| <p>Electrochemical reactions:</p> $\sum_k s_i M_i^z = n e^- , \text{ where } \begin{cases} M_i = \text{chemical formula of species } i \\ s_i = \text{stoichiometry coefficient} \\ n = \text{number of electrons transferred} \end{cases} \quad (15)$ |
| <p>Hydrogen Oxidation Reaction (HOR) in the anode side:</p> $H_2 - 2H^+ = 2e^- \quad (16)$ <p>Transfer current density, [A/m³]:</p> $j = (1-s)^{n_c} a_{o,a}^{ref} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \right)^{1/2} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{R_u T} F \eta \right), \text{ where } a_{o,a}^{ref} = 1.0 \times 10^9 \text{ A/m}^3, C_{H_2,ref} = 40.88 \text{ mol/m}^3, \alpha_a = \alpha_c = 1 \quad (17)$ <p>Surface over-potential, [V]: $\eta = \phi_s - \phi_e$ (18)</p> |
| <p>Oxygen Reduction Reaction (ORR) in the cathode side:</p> $2H_2O - O_2 - 4H^+ = 4e^- \quad (19)$ <p>Transfer current density [A/m³]:</p> $j = -(1-s)^{n_c} a_{o,c}^{ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}} \right)^{3/4} \exp\left(-\frac{\alpha_c}{R_u T} F \eta\right), \text{ where } a_{o,c}^{ref} = 2.0 \times 10^4 \text{ A/m}^3, C_{O_2,ref} = 40.88 \text{ mol/m}^3, \alpha_c = 1 \quad (20)$ <p>Surface over-potential, [V]: $\eta = \phi_s - \phi_e - U$. (21)</p> <p>Thermodynamic equilibrium potential: (22)</p> $U_s = 1.23 - 0.9 \times 10^{-3} (T - 298.15)$ <p>Temperature dependence of the ORR kinetic parameter: (23)</p> $a_{o,c}^{ref}(T) = a_{o,c}^{ref}(353K) \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{R_u} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{353.15}\right)\right]$ |

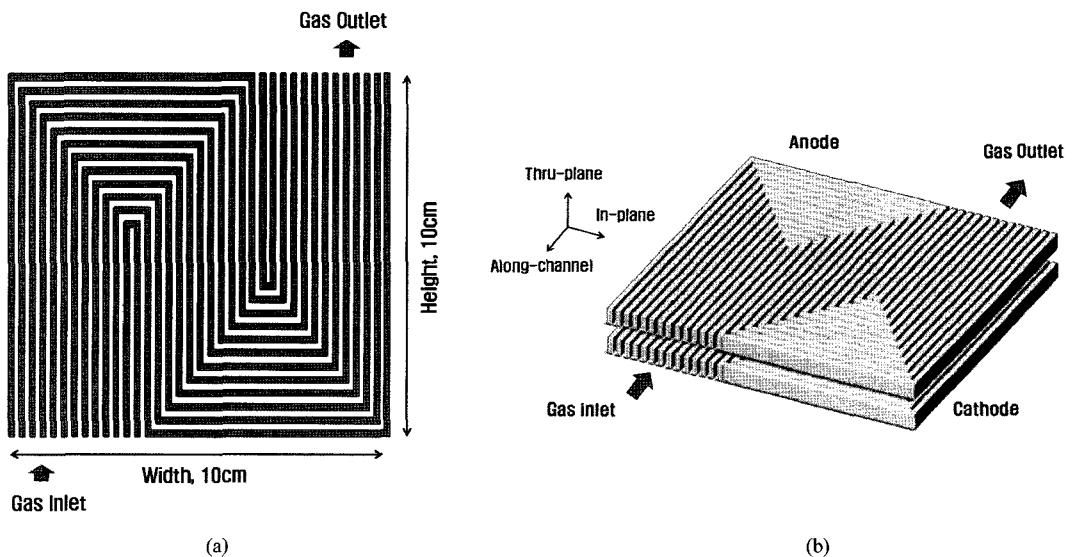


Fig. 1 (a) Two-dimensional and (b) three-dimensional views of the 100 cm² fuel cell geometry with 3-pass serpentine flow field.

2D와 3D로 각각 묘사되어있다. 적용된 셀의 MEA는 100cm^2 의 반응면적(reaction area)을 가지며, 분리판에 제작된 유로채널은 상업적으로 주로 사용되는 3-pass 서펜타인(serpentine) 유로형상(flow field)

을 기반으로 한다. Fig. 2a는 이러한 100cm^2 의 반응면적을 가지는 연료전지셀의 전류밀도분포를 측정하기 위해 분리판을 일정한 크기를 가지는 구역(segment)으로 분할한 모양을 나타낸다. 구역의 분할은 10cm

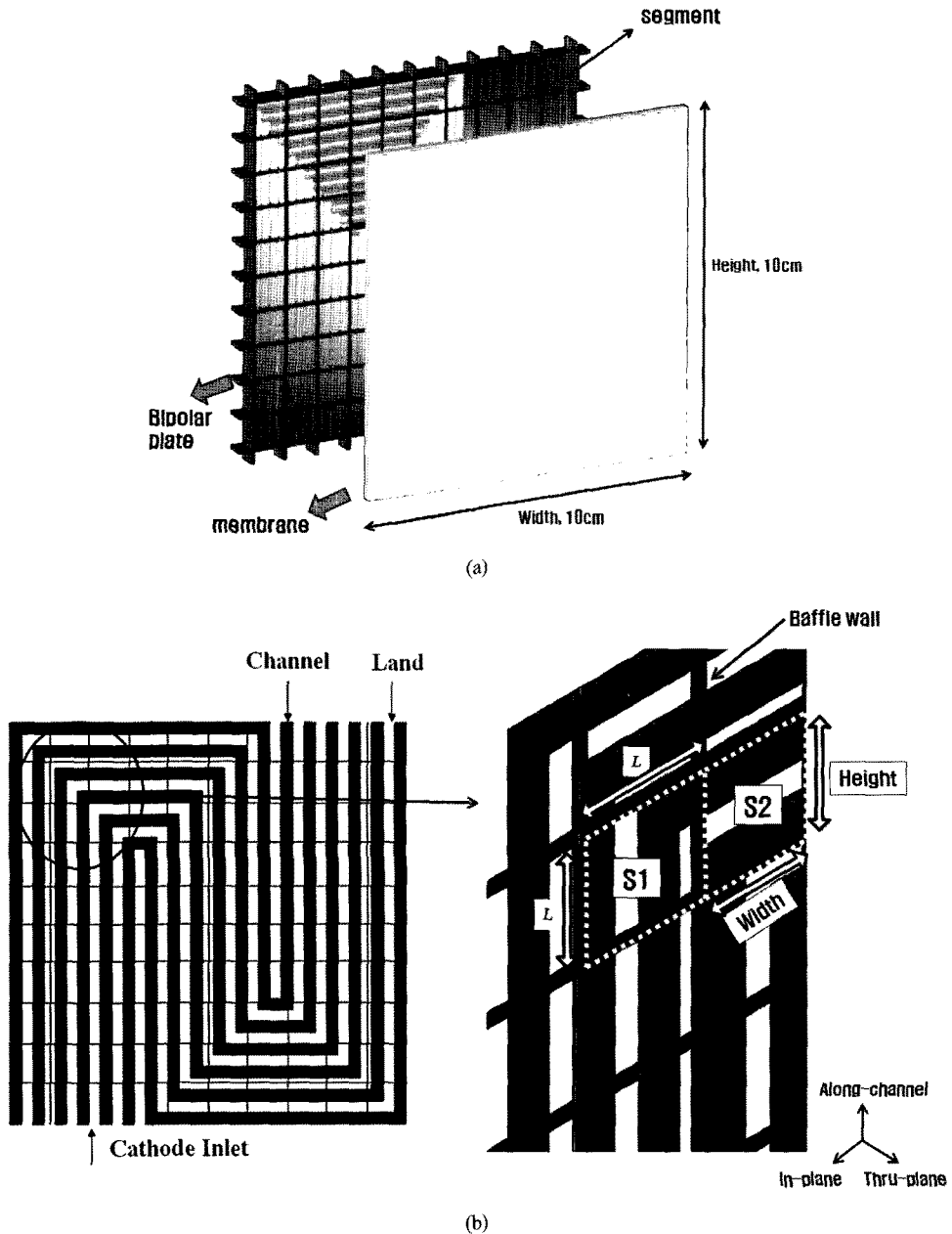


Fig. 2 (a) Schematic diagram of the 10 by 10 uniformly segmented bipolar plate and non-segmented membrane and (b) detailed mesh configuration of the segmented flow channels and lands .

Table 4 Operating condition

| Description | Value |
|--|---------|
| Anode and Cathode inlet pressure | 1.5 bar |
| Operating cell voltage | 0.6V |
| Operating temperature | 70 °C |
| Anode and cathode inlet humidification at 70 °C | 100% |
| Anode/Cathode stoichiometry at 1 A/cm ² | 2 |

× 10cm MEA 면적을 높이 및 두께방향으로 각각 균일하게 10등분함으로써 이루어졌으며, 이를 통해 총 100개의 전류밀도분포 데이터를 얻을 수 있다. Fig. 2b는 분리판 분할에 의한 절단된 채널과 랜드 형상을 격자(grid)형태로 좀 더 자세히 보여준다. 각 분할구역들 사이의 전류전달을 차단하기위해 무한이 얇은 두께를 가지는 baffle wall이 수치 셀에 적용되었다.

2.3 모델 시뮬레이션

본 연구에 사용된 연료전지 모델은 상용 Star-CD 전산유체(computational fluid dynamics, CFD) 패키지를 이용하여 실행되었으며, 질량(mass), 운동량(momentum), 화학종(chemical species), 전하(charge), 및 에너지(energy) 보존방정식들(conservation equations) 및 관련된 생성항(source term)들은 유저코드(user code) 기능을 이용해 코드화되었다. 또한 Meng과 Wang¹¹⁾의 grid-independence 연구를 기반으로 하여 대략 300만개의 격자(grid)가 연료전지 모델에 적용되었다. 시뮬레이션을 위해 생성된 격자들은 직육면체 형태를 가지지만 모든 크기가 동일하지는 않다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 연료전지 모델의 연료극(anode)과 공기극(cathode)에는 각각 수소와 공기가 공급되었으며, 작동조건(operating condition)은 Table 4에 나열되어 있다. 또한, 본 시뮬레이션에 적용된 물질전달 변수(parameter)들과 셀 프로퍼티(property)들은 Ju의 연구⁷⁾에서 사용된 것들과 동일하며 Table 5와

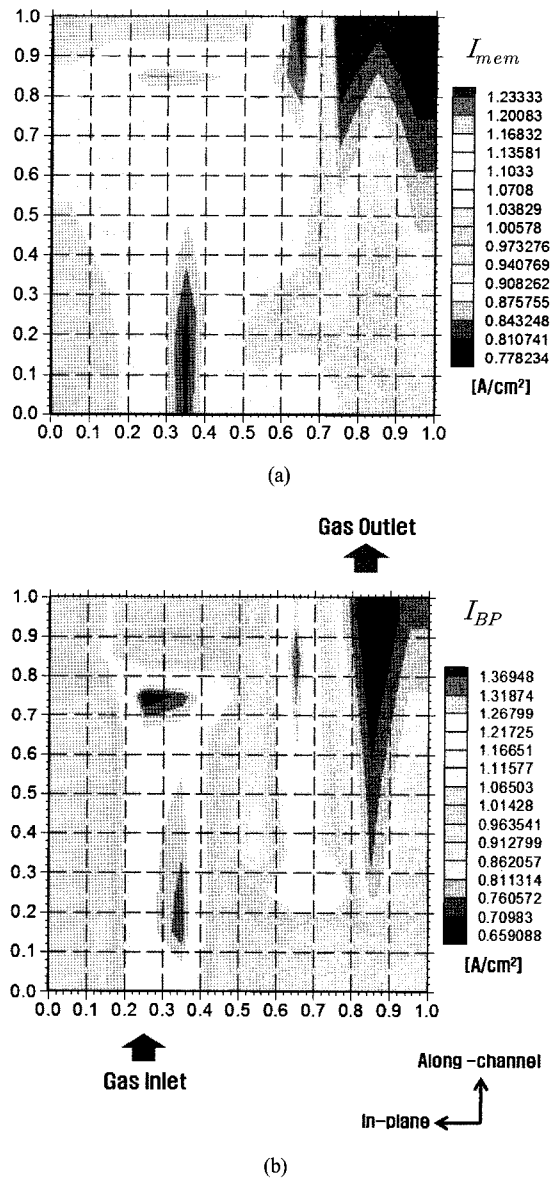


Fig. 3 Current density distributions in (a) the non-segmented membrane and (b) segmented bipolar plate.

Table 6에 각각 요약되어 있다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 연료전지 수치 시뮬레이션을 통해 계산된 100개로 분할된 분리판과 분할되지 않은 전해질막에서의 전류밀도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보이는 것처럼 전해질막과 분리판 모두, 입구에서 출구 쪽으로 갈수록 전류밀도가 감소한다. 특히 출구 쪽에서는

Table 5 Mass transfer correlations

| Gas transport | |
|---|------|
| Species diffusivity in the gas mixture ¹²⁾ $D_i^g = \frac{1-x_i}{\sum_{j \neq i} \frac{x_j}{D_{i,j}}}$, where $D_{i,j} = \frac{1.013 \cdot 10^{-7} \cdot T^{1.75}}{p(x_i^{1/3} + x_j^{1/3})^2} \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)^{1/2}$ $x_{H_2} = 7.07, x_w = 12.7, x_{N_2} = 17.9, x_{O_2} = 16.6$ | (24) |
| Knudsen diffusion coefficient for a porous medium $D_i^k = \frac{2}{3} \left(\frac{8R_u T}{\pi M_i} \right)^{1/2} \tau_p$ | (25) |
| Effective species diffusivity ¹³⁾ $D_i^{g,eff} = [\epsilon(1-s)]^n \left(\frac{1}{D_i^g} + \frac{1}{D_i^k} \right)^{-1}$ | (26) |
| Two-phase transport | |
| Diffusive mass flux of the liquid phase ¹⁴⁾ $\vec{j}_i = \rho^l \vec{u}_i - \lambda^l \rho \vec{u} = \frac{k}{\nu} \lambda^l \lambda^g \nabla P_c$, where $\sigma = 0.0625$ N/m | (27) |
| capillary pressure $P_c = P^g - P^l = \sigma \cos \theta \left(\frac{\epsilon}{K} \right)^{1/2} J(s)$ | (28) |
| Leverett function $J(s) = 1.417(1-s) - 2.120(1-s)^2 = 1.263(1-s)^3$ for hydrophilic ($\Theta_c < 90^\circ$) $J(s) = 1.417s - 2.120s^2 = 1.263s^3$ for hydrophilic ($\Theta_c > 90^\circ$) | (29) |
| Advection correction factor ¹⁴⁾ $\gamma_i = \frac{\rho(\lambda^l m_i^l + \lambda^g m_i^g)}{(s \rho^l m_i^l + (1-s) \rho^g m_i^g)}$ | (30) |
| Transport in electrolyte phase | |
| Electro-osmotic drag coefficient ¹⁵⁾ $n_d = \frac{2.5\lambda}{22}$ | (31) |
| Proton conductivity in the membrane ¹⁵⁾ $\kappa = (0.5139\lambda - 0.326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]$ | (32) |
| Water diffusion coefficient in the membrane ¹⁶⁾ $D_w^{mem} = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{-\frac{2346}{T}} & \text{for } 0 < \lambda \leq 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \lambda (1 + 161e^{-\lambda}) e^{-\frac{2346}{T}} & \text{otherwise} \end{cases}$ | (33) |
| Water content of the membrane ¹⁵⁾ $\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 & \text{for } 0 < a \leq 1 \\ 22 & \text{for } a > 1 \end{cases}$ | (34) |
| Water activity ¹⁵⁾ $a = \frac{C_w^g R_u T}{P_{sat}}$ | (35) |

입구에 비해 전류밀도가 현저히 저하된 것을 확인할 수 있다. 이는 출구 쪽으로 갈수록 산소환원반응(식 (19))을 위해 필요한 산소의 농도가 감소하여 물질전달손실(mass transport loss)이 증가하기 때문이다. 그러나 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)의 비교를 통해 전해질막

과 분리판의 출구 쪽으로 갈수록 전류밀도가 감소하는 경향은 같지만, 서로 대응되는 지역에 대한 전류밀도 크기에는 차이가 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3의 전해질막과 분리판의 서로 대응되는 면에 대한 전류밀도 상대오차를 나타낸 것이다.

Table 6 Cell properties

| Description | Value |
|--|----------------------------------|
| Thermal conductivity for CL, k_{CL} | 1.0 W/m·K |
| Thermal conductivity for GDL, k_{GDL} | 10.0 W/m·K |
| Thermal conductivity for BP, k_{BP} | 10.0 W/m·K |
| Thermal conductivity for membrane, k_{mem} | 1.0 W/m·K |
| Contact angle of GDL | 110° |
| Permeability of anode and cathode GDLs, K_{GDL} | $1.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ |
| Porosity of anode and cathode CLs, ϵ_{CL} | 0.6 |
| Porosity of anode and cathode GDLs, ϵ_{GDL} | 0.6 |
| Hydraulic permeability of membrane, K_{mem} | $5.0 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ |
| Effective electron conductivity in CLs, σ_{CLs} | 1000 S/m |
| Effective electron conductivity in GDLs, σ_{GDLs} | 1000 S/m |
| Effective electron conductivity in BPs, σ_{BP} | 20000 S/m |

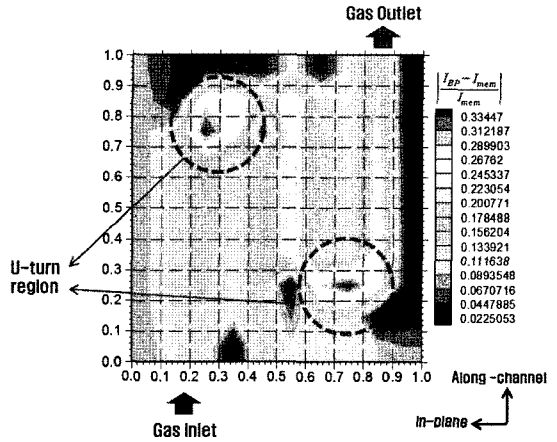


Fig. 4 Contour of relative error between the current densities of the segmented bipolar plate and non-segmented membrane.

오차는 분리판과 전해질막의 전류밀도 차이를 전해질막의 전류밀도로 나누어 계산된 것이다. Fig. 2와 Fig. 4를 비교해볼 때, 전류밀도 오차는 분리판 유로 채널이 유턴(U-turn)되는 부근에서 두드러짐을 확인할 수 있으며, 최대 오차율은 33%로 예측되었다.

전해질막과 분리판 절류밀도 사이에 오차를 유발하는 원인은 Fig. 5를 통해 설명될 수 있다. Fig. 5는 전해질막을 흐르는 전류가 GDL을 거쳐 유로채널을 우회(bypass)하여 분리판 내부로 흐르는 과정을 보여준다. 거기서 S1과 S2는 전류밀도분포를 측정하기 위해 분할된 분리판의 분할구역 1(Segment 1)과 분할구역 2(Segment 2)를 나타낸다. Fig. 5에

서는 분리판이 분할될 때 두 가지의 극단적인 경우들을 고려하고 있다. 첫 번째 경우(Case 1)는 분할구역이 채널을 중심으로 대칭적으로 분할될 때, 즉 S1과 S2의 경계가 채널 중심에 위치할 경우를 나타내며, 두 번째 경우(Case 2)는 S1과 S2의 경계가 채널 끝에 위치하여 비대칭적으로 분할구역이 설정되는 경우를 의미한다. Case 1의 경우에는 전해질막을 흐르는 전류가 채널 밑에서 우회한 후 분할구역 S1과 S2에 대칭적으로 편입되어 전해질막에서 S1에 속한 전류는 분리판에서도 S1에 속하며 전해질막에서 S2에 속한 전류는 분리판에서도 S2로 흘러들어가 결과적으로 분리판과 전해질막의 전류밀

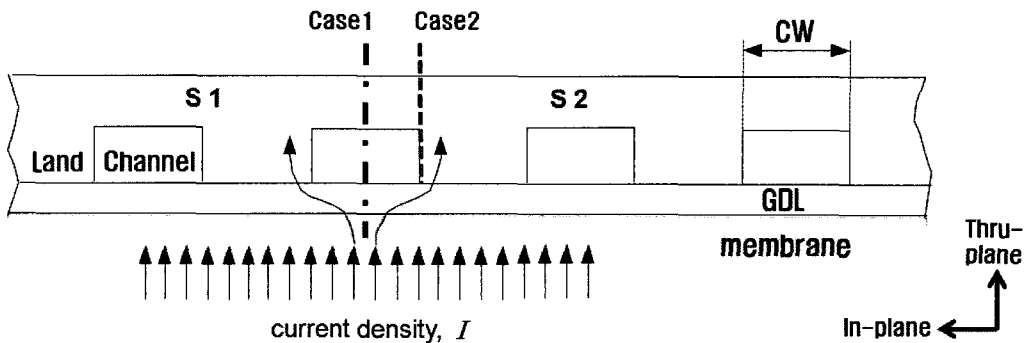


Fig. 5 Schematic diagram of current transfer through the membrane and bipolar plate. A current at the boundary1 is divided equally; the current go toward closed land. S1 and S2 mean segment 1 and 2.

도 오차는 없어지게 된다. 반면에 Case 2의 경우에는 전해질막에서 S1에 속한 전류가 채널을 우회할 때 S2로 편입되어 분리판과 전해질막 전류밀도 사이의 오차를 유발하게 된다. 이러한 오차를 정량적으로 산출하기 위해 S1에서 S2로 유입되는 전류를 계산할 수 있다. 먼저 Fig. 2b에서 예시된 것처럼 분리판이 폭과 높이가 L로서 균등하게 분할되었다고 가정하면 S1 과 S2 의 면적은 모두 L^2 이 된다.

$$A_{S1} = A_{S2} = L^2 \quad (36)$$

각 분할구역 면적(L^2)당 폭이 CW인 채널 하나가 Case 2 경우처럼 비대칭적으로 분할되었다고 가정하면 채널을 우회한 후 S1에서 S2로 유입되는 전류는 다음과 같다.

$$Current_{S1 \rightarrow S2} = I \cdot \frac{CW}{2} \cdot L \quad (37)$$

결과적으로 분할구역 S2의 분리판에서는 전류밀도, $I_{S2,bp}$ 는 전해질막의 전류밀도, $I_{S2,mem}$ 에 비해 S1에서 S2로 유입되는 전류(식 (37))만큼 증가하게 된다.

$$I_{S2,mem} = I \quad (38a)$$

$$\begin{aligned} I_{S2,bp} &= \frac{Current_{S2} + Current_{S1 \rightarrow S2}}{L^2} \quad (38b) \\ &= \frac{I \cdot L^2 + I \cdot \frac{CW}{2} \cdot L}{L^2} = I + I \cdot \frac{CW}{2L} \end{aligned}$$

마지막으로 전해질막의 전류밀도와 분리판의 전류밀도의 상대오차를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{CD} &= \left| \frac{I_{S2,mem} - I_{S2,bp}}{I_{S2,mem}} \right| \quad (39) \\ &= \left| \frac{I - \left(I + I \cdot \frac{CW}{2L} \right)}{I} \right| = \frac{CW}{2L} \end{aligned}$$

이처럼 전류밀도 상대오차는 분리판의 분할구역 면적(L^2)당 분할할 때, 발생하는 채널기준 비대칭면적($CW \cdot L/2$)으로 계산되며 분할할 때의 비대칭면적이

커지면 커질수록 오차는 증가하게 된다. 그러므로 Fig. 4에서 나타난 것처럼 유턴(U-turn)부근에서 전해질막과 분리판의 전류밀도 상대오차가 두드러지게 큰 이유는, 유턴(U-turn)부근을 분할할 때 유로채널형상의 복잡성에 기인한 비대칭 면적이 커지기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 개발된 연료전지 해석모델을 이용해 현재 많이 사용되고 있는 분리판 분할을 통한 전류밀도분포 측정법을 수치적으로 검증하였다. 이러한 수치적 검증을 위해, 먼저 3차원 연료전지 해석모델이 3-pass 서펜타인(serpentine) 유로형상(flow field)을 기반으로 한 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 연료전지 수치 셀에 적용되었다. 적용된 수치 셀의 분리판은 100개의 같은 면적을 가지는 구역으로 분할되어 연료전지 전류밀도분포측정 상황과 동일하게 묘사되었다. 시뮬레이션 결과를 종합해보면, 분리판 전류밀도와 전해질막 전류밀도사이의 오차는 유로채널의 형상에 크게 영향을 받으며, 유로채널의 유턴(U-turn) 지역에서 최대 33%의 오차율이 예측되었다. 이러한 오차를 발생하는 원인은 각 분할구역이 유로채널기준으로 대칭적으로 분할되지 않았을 때 전해질막을 흐르던 전류가 유로채널을 우회한 후 분리판의 타 분할구역으로 편입되기 때문이다.

지금까지 설명한 것을 종합하면, 전해질막과 분리판의 전류밀도 오차는 분리판 분할구역이 유로채널 기준으로 어느 정도 대칭적으로 분할되었느냐에 따라 결정되며, 이러한 오차를 최소화하기 위해서는 분할구역의 경계면이 유로채널 기준으로 대칭적으로 위치해야 한다. 그러나 최근 상업적으로 사용되는 연료전지의 분리판내 유로채널형상은 상당히 복잡하며, 이러한 복잡한 유로채널을 정확하게 대칭적으로 분할하기는 거의 불가능하다. 따라서 분리판 분할을 통한 전류밀도분포 측정법을 채택한다면 비교적 간단한 유로채널형상을 채택을 통해 분리판과 전해질막 사이의 전류밀도 오차를 최소화해야 한다는 사실이 본 논문을 통해 도출된 결론이다.

후 기

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(한국연구재단-2009-C1AAA001-2009-0093168). 연료전지 수치모델 시뮬레이션에 필요한 기술적인 부분은 CD-Adapco Korea를 통해 지원받았습니다.

참 고 문 헌

- 1) Stumper, J., Campbell, S. A., Wilkinson, D. P., Johnson, M. C., and Davis, M. : "In-situ methods for the determination of current distributions in PEM fuel cells", *Electrochimica Acta*, Vol. 43, No. 24, 1998, pp. 3773-3783.
- 2) Mench, M. M., Wang, C. Y., and Ishikawa, M. : "In situ current distribution measurements in polymer electrolyte fuel cells", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 150, No. 8, 2003, pp. A1052-A1059.
- 3) Ju, H. and Wang, C. -. : "Experimental validation of a PEM fuel cell model by current distribution data", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 151, 2004, No. 11, pp. A1954-A1960.
- 4) Cleghorn, S. J. C., Derouin, C. R., Wilson, M. S., and Gottesfeld, S. : "A Printed Circuit Board approach to measuring current distribution in a fuel cell", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 28, No. 7, 1998, pp. 663-672.
- 5) Hottinen, T., Noponen, M., Mennola, T., Himanen, O., Mikkola, M., and Lund, P. : "Effect of ambient conditions on performance and current distribution of a polymer electrolyte membrane fuel cell", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 33, No. 3-4, 2003, pp. 265-271.
- 6) Brett, D. J. L., Atkins, S., Brandon, N. P., Vasileiadis, N., Vesovic, V., and Kucernak, A. R. : "Membrane resistance and current distribution measurements under various operating conditions in a polymer electrolyte fuel cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 172, No. 1, 2007, pp. 2-13.
- 7) 주현철 : "고분자전해질형연료전지의 가스 채널 최적화를 위한수치적연구(I)", *대한기계학회 논문집 B권*, Vol. 32, No. 9, 2008, pp. 683-694.
- 8) 주현철, 남진무 : "고분자전해질형연료전지의 가스 채널 최적화를 위한 수치적 연구(II)", *대한기계학회 논문집 B권*, Vol. 33, No. 9, 2009, pp. 688-698.
- 9) Kang, K. and Ju, H. : "Numerical modeling and analysis of micro-porous layer effects in polymer electrolyte fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 194, No. 2, 2009, pp. 763-773.
- 10) Ju, H. : "Investigation of the effects of the anisotropy of gas-diffusion layers on heat and water transport in polymer electrolyte fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 191, No. 2, 2009, pp. 259-268.
- 11) Meng, H. and Wang, C. -. : "Large-scale simulation of polymer electrolyte fuel cells by parallel computing", *Chemical Engineering Science*, Vol. 59, No. 16, 2004, pp. 3331-3343.
- 12) Bird, R. B., Stewart, W.E., and E. N. Lightfoot : "Transport Phenomena", John Wiley Sons, New York, 1960.
- 13) Meredith, R. E. and Tovies, C. W. : "Conduction in Heterogeneous Systems, *Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering*2", John Wiley & Sons, New York, Vol. 2, 1962, pp. 15-47.
- 14) Wang, C. Y. and Cheng, P. : "A multiphase mixture model for multiphase, multicomponent transport in capillary porous media-I. Model development", *Int.J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, 1996, pp. 3607-3618.
- 15) Springer, T. E., Zawodinski, T. A. and Gottesfeld, S. : "Polymer electrolyte fuel cell model", *J.Electrochem.Soc.*, Vol. 136, 1991, pp. 2334-2341.
- 16) Motupally, S., A. J. Becker, and J. W. Weidner : "Diffusion of Water in Nafion 115 Membranes", *J.Electrochem.Soc.*, Vol. 147, 2000, p. 3171.