

고분자 전해질 연료전지의 매니폴드 설계 및 해석

정혜미¹⁾, 엄석기²⁾, 박정선³⁾, 이원용⁴⁾, 김창수⁵⁾

NUMERICAL STUDY ON THE FLOW CHARACTERISTICS OF MANIFOLD FEED-STREAM IN POLYMER ELECTROLYTE FUEL CELL

Hye-Mi JUNG, Sukkee UM, Jungsun PARK, Won-Yong LEE, Chang-Soo KIM

Key words : Manifold Design (매니폴드 디자인), Polymer Electrolyte Fuel Cells (고분자 전해질 연료전지), Bipolar plates (분리판), Heat Generation (열생성)

Abstract : The effects of internal manifold designs on the reactant feed-stream in Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFCs) is studied to figure out mass flow-distribution patterns over an entire fuel cell stack domain. Reactants flows are modeled either laminar or turbulent depending on regions and the open channels in the bipolar plates are simulated by porous media where permeability should be pre-determined for computational analysis. In this work, numerical models for reactant feed-stream in the PEFC manifolds are classified into two major flow patterns: Z-shape and U-shape. Several types of manifold geometries are analyzed to find the optimal manifold configurations. The effect of heat generation in PEFC on the flow distribution is also investigated applying a simplified heat transfer model in the stack level (i.e. multi-cell electrochemical power-generation unit). This modeling technique is well suited for many large scale problems and this scheme can be used not only to account for the manifold flow pattern but also to obtain information on the optimal design and operation of a PEMC system.

Nomenclature

- D_h hydraulic diameter [m]
- \dot{m} the mass flow rate [kg/s]
- P_e the electrical power of the stack [W]
- Re Reynolds number
- ξ_i the usage of reactants [dimensionless]
- V_o the average voltage of each cell [V]
- ρ fluid density [kg/m³]
- μ molecular viscosity [kg/ms]
- P the static pressure [Pa]
- k turbulent energy
- ϵ turbulent dissipation

1. 서론

고분자 전해질 연료전지는 연료(수소) 및 산소가 가지고 있는 화학에너지를 전기화학반응에 의해 곧바로 전기에너지로 변환시켜주는 첨단 발전 방식으로, 현재 널리 쓰이고 있는 디젤 기관발전, 중기가스 발전 등과는 달리 연소과정이

나 기계적 일이 필요 없는 직접적인 에너지변환 방식이다. 연료전지는 연료가 가지고 있는 자유 에너지를 직접 이용하는 방식을 택함에 따라 에너지 손실이 적어 총 발전 효율이 최고 80% 정도로 매우 높다. 이와 같이 연료전지는 열기관에 비해 에너지 효율이 매우 높기 때문에 CO₂ 배출량이 억제될 수 있으며, 열기관의 연소과정에서 발생하는 질소산화물, 황산화물, 매연 등의 유해물질이 거의 발생하지 않는 청정에너지 원으로 그 중요성이 더욱 커지고 있다.

여러 형태의 연료전지 중에서도 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte fuel cell,

1) 한국항공대학교 항공우주기계공학과

E-mail : ham1978@kier.re.kr

Tel : (042)860-3542 Fax : (042)860-3104

2) 한국에너지기술연구원 고분자연료전지연구단

E-mail : sukkeeum@kier.re.kr

3) 한국항공대학교 항공우주기계공학과

E-mail : jungsun@mail.hangkong.ac.kr

Tel : (02)300-0283 Fax : (02)3158-3189

4) 한국에너지기술연구원 고분자연료전지연구단

E-mail : wy82lee@kier.re.kr

Tel : (042)860-3574 Fax : (042)860-3104

5) 한국에너지기술연구원 고분자연료전지연구단

E-mail : cskim@kier.re.kr

Tel : (042)860-3573 Fax : (042)860-3104

PEMFC)는 다른 형태의 연료전지에 비하여 전류 밀도 및 출력밀도가 크고, 기동 시간이 짧은 동시에 부하 변화에 대한 응답특성이 빠르다. 이러한 특성을 바탕으로 고분자 전해질 연료전지는 무공해 차량의 동력원, 가정용 발전, 우주선용 전원, 이동용 전원, 군사용 전원 등 매우 다양한 분야에 응용될 수 있다.⁽¹⁻²⁾

본 연구는 채널 형상 설계, 매니폴드 종류, 매니폴드 형상, 공급 관의 형상, 유동의 안정화를 위한 완충장치의 길이 등에 대한 해석을 수행하였다. 또한 단순열전달 모델을 적용하여 스택 내부 온도 분포 및 열전달 현상 고려 유무에 따른 유동 분배 패턴의 변화를 조사하였다.

2. 이론적 배경 및 지배방정식

2.1 연료전지의 구성 및 작동원리

기본적으로 단위전지는 Fig. 1과 같이 MEA에 의하여 분리된 연료극 및 공기극의 두 분리판으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 2에서 제시된 가장 일반적으로 널리 사용되고 있는 직사각형 단면형상을 갖는 다중 사행 형상의 채널을 선택하여 사용하였다. 계산비용과 소요시간 문제를 해결하기 위해서 Fig. 2에서 제시된 축소 모델을 도입하였다. 매니폴드의 종류 및 형상에 대한 영향을 고찰하고자, Fig. 3와 같이 분리판을 적층하여 실제 연료전지 시스템에 사용하는 스택과 동일한 형상을 갖는 모델을 사용하였다.

2.2 수치적 고찰

본 해석에서는 채널 및 스택의 유동장을 해석하기 위해서 기본적으로 연속방정식과 운동량 방정식을 사용하여, 정상상태에 대한 3차원 전산모사를 수행하였다. 해석에 앞서 식 (1)-(3)을 이용하여 채널 및 매니폴드의 형상에 대한 유동특성을 판단하였다. 가로 길이 a , 세로 길이 b 인 직사각형 단면을 갖는 경우, 접수주변길이와 수력직경은 식 (1)-(2)과 같다. 본 논문에서는 식 (3)에서 계산된 Re 수가 임계

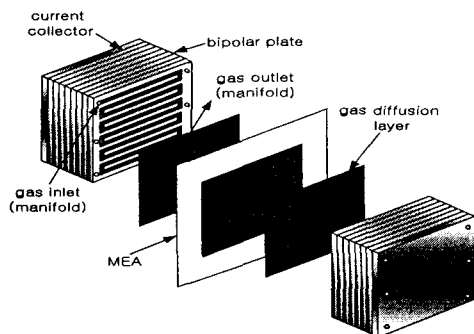


Fig. 1 Schematic diagram of a polymer electrolyte fuel cells (PEFCs) stack: exploded view to a unit cell

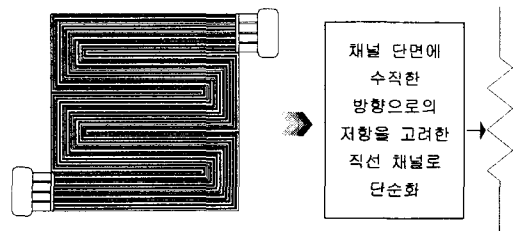


Fig. 2 A concept design of the simplified numerical model

Re 수(원형 관 유동의 경우 대략 2300)보다 작으면 층류, 크면 난류의 유동특성을 갖는다고 보았다.⁽³⁾

$$P_c = 2(a+b) \quad (1)$$

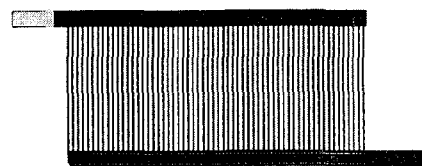
$$D_h = 4 \times \left(\frac{A_c}{P} \right) \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (3)$$

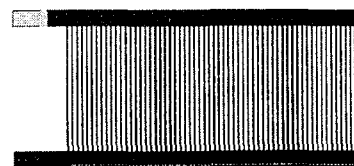
설계조건 및 채널 및 매니폴드 형상에 대한 정보는 Table 1과 같다. 매니폴드 및 채널의 내부유동이 층류인 경우에는 식 층류 지배방정식을 사용하였고, 난류인 경우에는 일반적인 난류 모델 해석에 많이 사용되는 Standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

해석모델은 기본적으로 입구와 출구의 경계조건을 갖는다. 매니폴드 공급관의 입구 경계조건은 주어진 유량으로부터 산출된 일정한 속도와 난류운동에너지, 난류 소산율을 주었다. 출구 경계조건은 각 값의 유동방향 구배가 "0" 라는 조건과 압력경계조건을 사용하였다.

식 (4)-(5)를 이용하여 각 단위 전지에 공급되는 반응 가스의 질량유량을 계산하였다.⁽²⁾



(a) Z-shape manifold



(b) U-shape manifold

Fig. 3 Schematic description of two different types of gas-flow pattern in a 60-cell stack.

Table 1 Specification of channel/stack and its standard operating conditions

Variable	Value
Nominal Power [kW]	1.2
Number of Cells	60
Gas-flow Type	U & Z Shape
Diameter of Supply Pipe	10.8 [mm]
Channel Width [mm]	1.0
Channel Depth [mm]	0.7 or 0.5
MEA thickness [μ m]	620
Number of Channels	3(anode), 12(cathode)
Reformed Fuel Input	H2 70% + CO2 30%
Oxidant Input [Air]	N2 79% + O2 21%
The Usage of H2 Gas	0.7
The Usage of O2 Gas	0.4
Active Area [mm \times mm]	100(W) \times 100(H)
Expected Current Density	600 mA/cm ²
Cell Voltage [V]	0.7
Operating Temperature [$^{\circ}$ C]	60
Operating Pressure [Pa]	101,325

$$\dot{m}_{H_2, cell} = (1.05 \times 10^{-8}) \times \frac{P_e}{V_c} \times \frac{1}{\xi_a} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{Air, cell} = (3.57 \times 10^{-7}) \times \frac{P_e}{V_c} \times \frac{1}{\xi_c} \quad (5)$$

이론식에 의해 계산한 질량유량과 공급부의 단면적을 이용하여 입구 경계조건을 결정하였다.

본 해석은 앞서 기술한 경계조건을 이용하여 SIMPLE 해법의 순서에 따라 해를 얻었다. 즉, 연속 및 운동량 지배방정식의 무차원화된 잔차가 10^{-5} 이하의 수렴조건을 만족시킬 때까지 반복계산을 수행하여 정상 해를 구하였다.

3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 매니폴드와 채널 간 유동특성을 분석하기 위해서 Fig. 4와 같이 단위전지가 적층된 전체 스택에 대한 해석을 수행하였다.

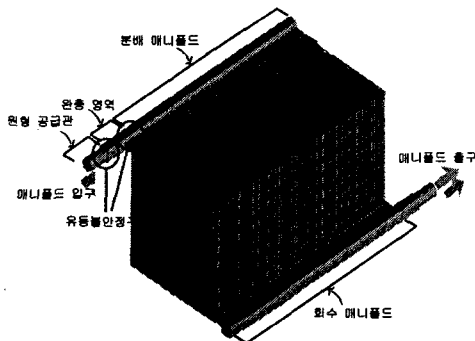


Fig. 4 Three-dimensional views on the manifold geometry of a PEFC stack

3.1 단위전지의 채널 내 압력강하 및 유량분배

연료전지 스택의 매니폴드 유동을 해석하기에 앞서 Fig. 2의 다중 사행 형상의 채널에 대하여 각 채널 당 압력강하와 유량분배의 균일성을 검증하기 위한 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 공기극을 위주로 계산을 수행하였다.

Fig. 5의 해석 결과로부터 단독으로 단위 전지의 채널을 해석하는 경우, 채널 당 유량 분배는 매니폴드의 형상(U자형과 Z자형)과는 무관함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 채널에 대한 정상 상태의 유동 해석을 수행하는 과정에서 유동 발달 구간인 매니폴드의 길이를 유동 안정화에 필요한 입구길이 만큼 증가시켜 주었기 때문인 것으로 사료된다. 본 해석 결과로부터 매니폴드가 채널의 유동장에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 독립적인 채널에 대한 유동 해석이 아닌 전체 스택에 대한 유동 해석이 필요함을 알 수 있다.

3.2 스택의 유동 해석 및 설계

Fig. 6은 매니폴드의 형상과 원충 영역의 길이가 각 단위 전지 당 유량 분배율에 미치는 영향을 보여주고 있다. 이 경우 채널의 깊이는 0.7mm로 설정하였고, 원형 공급관은 매니폴드의 하부에 위치해 있는 것으로 설정하였다.

Fig. 6의 유량 분배 편차는 전체 공급 유량과 스택을 구성하고 있는 단위 전지의 개수를 이용하여 계산한 기준 유량에 대한 해석 결과의 차이를 비교한 것으로, (+) 부호는 기준 유량에 비해 적은 유량이 공급되는 것을 의미하고, (-) 부호는 기준 유량에 비해 많은 유량이 공급되는 것을 나타낸다. 해석 결과로부터 원충 영역의 길이와 무관하게 스택의 전단 부분 즉, 매니폴드의 입구 부분과 인접한 위치에 있는 단위 전지에 공급되는 유량이 평균 유량에 비해 2% 정도 적다는 것을 알 수 있다.

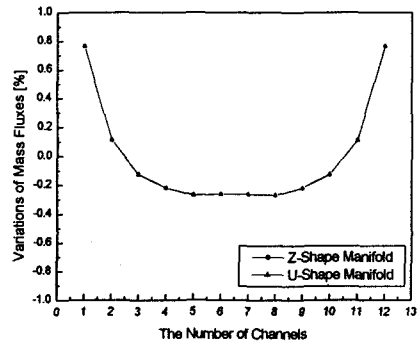


Fig. 5 Comparison of mass flux distribution from the inlet manifold to channels in Z-shape and U-shape manifolds

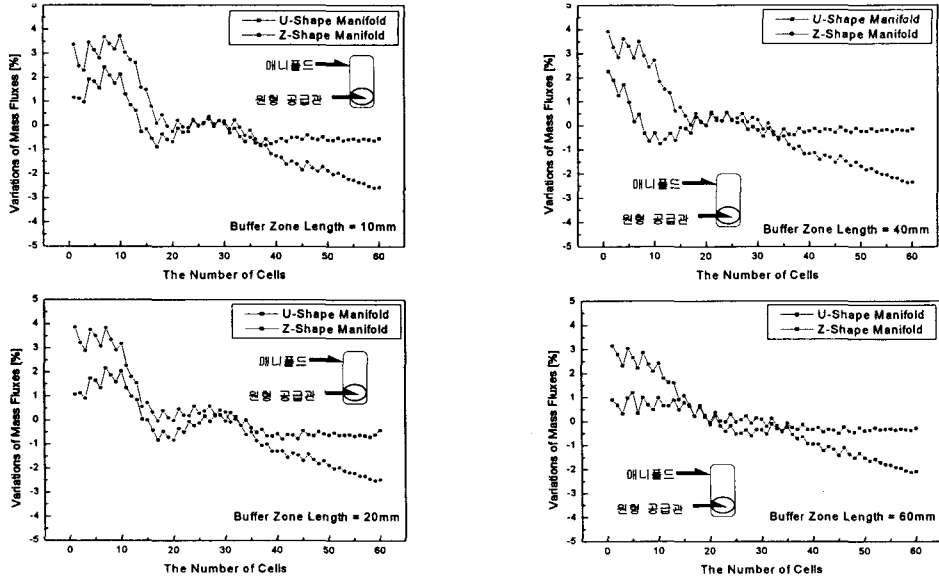


Fig. 6 Comparison of variations of flow rate to cells in U-shape and Z-shape gas flow pattern for 60-cell stacks. (Channel Depth = 0.7mm)

3.3 스택의 냉각채널 내 유동 해석 및 설계

단순히 효과적인 스택 냉각을 위한 냉각수 공급량과 스택 단위에서의 개략적 온도 분포만을 전산 해석의 대상으로 간주하는 경우에는 단순화된 모델로도 충분한 정보를 얻을 수 있다고 본다. 본 연구에서는 냉각 분리판을 제외한 영역을 단순화된 열생성원으로 취급하였으며 전산 해석의 적용단계에서는 냉각분리판의 제어 체적면에 균일한 열유속을 적용하는 방식으로 모델링하였다.

Fig. 7은 스택 규모로 확대한 스택 전체에서의 온도 분포를 보여준다. 스택의 매니폴드에서는 빠른 냉각수 유속으로 인하여 냉각수 도입부와 배출부에서의 온도구배는 거의 존재하지 않으며, 대부분의 온도 구배는 스택 냉각과정에서의 열교환로 인하여 단위 냉각채널에서 확연함을 알 수 있다.

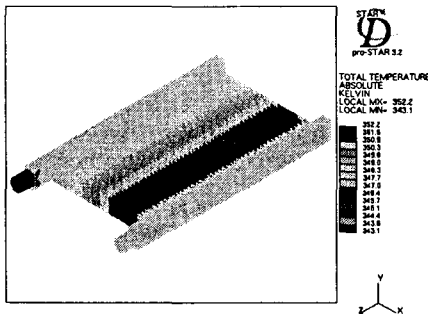


Fig. 7 Temperature distribution in a 60 cells PEFC stack

4. 결론

본 연구로부터 스택의 유동 특성은 공급 관과 매니폴드 연계 부분의 기하학적 형상에 따라 변한다는 사실을 확인할 수 있었다. 본 해석모델에 대해서는 U자형 매니폴드가 Z자형 매니폴드에 비해 균일 유량 분배 측면에서 50% 이상 성능이 우수하다는 사실을 알 수 있었다.

이러한 스택 유동 특성 연구와 더불어 본 연구에서는 단순화된 열전달 모델을 적용한 스택 내 온도 분포에 대한 수치적 모델을 개발하였다. 온도 구배를 고려한 경우, 매니폴드로부터 채널로의 유동분배 편차가 줄어들음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) EG & G Service Parsons, Inc. Science Application International Corporation, 2000, *Fuel Cell Handbook*, 5th Edition, U. S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, West Virginia.
- (2) Larminie, J. E. and Dicks, A., 2000, *Fuel Cell System Explained*, John Wiley & Sons, Chichester, England.
- (3) Frank M., White, 2000, *Fluid Mechanics*, 4th Edition, McGraw-Hill, Inc.