

고분자 전해질 연료전지의 2차원 열전달 및 유동 해석

정혜미* · 양지혜* · 구자예** · 박정선**

A Two-Dimensional Analysis of Heat Transfer and Flow in Proton Exchange Membrane Fuel Cells

Hye-Mi Jeong, Ji-Hye Yang, Ja-Ye Koo and Jungsun Park

Key Words : PEMFC(고분자전해질형 연료전지), Steady-State Heat Transfer(정상상태 열전달), Operating Condition(작동조건), Pressure & Velocity Distribution(압력과 속도분포), Temperature Distribution(온도분포)

Abstract

Distributions of the parameters in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has been analyzed numerically under steady-state and isothermal conditions. The distributions of the crucial parameters (e.g., temperature and pressure) in a PEMFC have a major impact on its safe and efficient operation.

This paper predicts the performance of the model electrode plates by calculating the pressure and temperature distributions of working fluid. The calculated results of pressure and temperature at exit condition shows good agreement to experiments and gives details of flow pattern inside of electrode plates.

1. 서론

연료전지는 연료(수소) 및 산소가 가지고 있는 화학에너지를 전기화학반응에 의해 곧바로 전기 에너지로 변환시켜 주는 첨단 발전 방식이다. 현재 널리 쓰이고 있는 디젤 기관 발전, 증기가스 발전 등과는 달리 연소 과정이나 기계적 일이 필요 없는 직접변환방식, 즉 연료가 가지고 있는 자유에너지를 직접 이용하는 방식으로 전체 발전 효율이 최고 80% 정도로 매우 높다. 그리고 터빈과 같은 대형회전자가 없기 때문에 소음 요인이

아주 적다. 게다가 발전 시스템의 모든 구성품이 모듈형태로 제작되므로 대량 생산이 가능하고 신속한 조립설치가 가능하다. 그런 이유로 석유의 대체에너지로 우리나라를 비롯해 여러 나라에서 각종 연료전지의 개발이 이루어지고 있다.

특히 고분자 전해질 연료전지의 경우 짧은 시동시간에 고출력을 낼 수 있고, 일반 가솔린이나 디젤 자동차와 비교하여, NO_x 의 배출량은 1/500, SO_x 의 배출량은 1/10,000으로 환경 친화적인 고효율 발전 시스템이다. 이런 이유로 고분자 전해질 연료전지는 전 세계적으로 저공해 자동차 동력원으로서의 개발이 활발히 이루어지고 있다.^(1,2)

고분자 연료전지 발전시스템에서 연료전지 본체는 적층된 수 십장의 단위 전지들로 구성되어 있으며, 연료와 공기 등의 반응가스가 각 단위 전지에 공급되도록 설계되어 있다. 두 개의 전극

* 한국항공대학교 대학원

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

으로 구성된 단위 전지는 전극판 (electrode plate), 전해질 (electrolyte), 멤브레인 (membrane) 등으로 만들어져 있으며, 이론적으로 단위 전지는 1.23V 정도의 전압을 생성할 수 있다.

단위 전지에서 전극판은 양극과 음극을 연결시켜 주는 전도체의 역할을 한다. 전극판 내부에는 채널이 있어서 반응에 필요한 연료(수소) 및 산화제(공기 중 산소)를 공급해 준다. 이 경우 전극판 채널의 형태와 단면의 크기, 채널 내 유체의 속도 및 압력 분포, 반응열 전도에 의한 내부 온도 분포 등은 연료전지 전체 출력과 성능에 중대한 영향을 미치는 인자로 작용한다.

이에 본 연구에서는 전극판 내부의 채널에 대한 압력 및 속도 분포, 열전달 현상 해석을 통하여, 전극판 채널의 최적설계와 성능평가를 수행함에 있어서 상세한 정보를 제공하도록 하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 연료전지 본체에 대한 3차원 유동해석에 대한 기초 자료로서 활용될 수 있다.

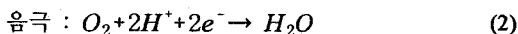
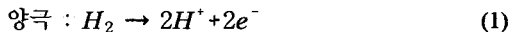
2. 이론적 배경 및 지배방정식

2.1 이론적 배경

2.2.1 연료전지의 구성 및 작동원리

고분자 연료전지 발전시스템은 연료전지 본체 (Fuel Cell Stack), 개질기 (Reformer), 직·교류변환기 (Inverter) 및 제어장치, 그리고 배열이용 시스템 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 연료전지의 구성을 간략하게 묘사하고 있다.

연료전지의 작동원리는 수소와 산소의 반응에 의하여 생성되는 전자의 이동으로 설명할 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 수소는 연료극을 통과하고, 산소는 공기극을 통과한다. 수소는 전기 화학적으로 산소와 반응하여 물을 생성하면서 전극에 전류를 발생시킨다.^(3,4,5)



본 연구에 사용한 전극판 내 채널의 형상은 Fig. 3과 같다. 이 전극판은 캐나다 Ballard Power Systems 에서 특허를 받은 것으로 실제 연료전지

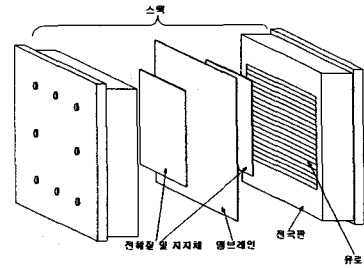


Fig. 1 Expanded View of a Basic Fuel Cell

자동차에 사용되고 있는 것이다. 현재 상용화가 되어 있는 전극판을 해석함으로써 그 응용성을 높일 수 있다.

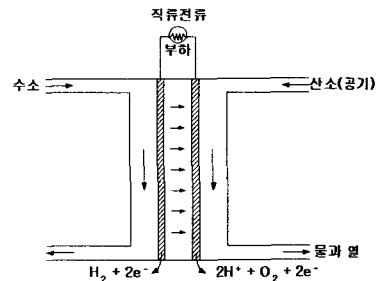


Fig. 2 Schematic of an Individual Fuel Cell

본 연구에서는 단위 전지의 전극판을 해석함에 있어서 Wolf & Wilemski의 모델⁽⁷⁾을 그 기초로 사용하였다. Wolf & Wilemski의 모델은 2차원, 정상상태의 가정을 도입하여 전체 단위전지에 대한 열전달 및 유동, 에너지 전달을 해석하고 있다. 이에 본 연구에서는 이를 근거로 하여 Fig. 3의 형상에 대한 유동 및 열전달 해석을 수행하였다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

연료전지의 지배방정식들은 반응기체의 특성, 전극표면에서의 기체의 반응률, 동작전압, 전류밀도, 온도분포 등이 동시에 고려된 편미분 방정식이다. 전지의 성능을 해석하기 위해서는 연속방정식, 운동량 방정식, 이온전달 방정식의 해를 동시에 구해야 한다. 본 연구에서는 아래와 같은 기본 가정들을 바탕으로 지배방정식을 단순화하여 사용하였다.

1. 고려하는 유동은 2차원, 비압축성, 층류유동이다.
2. 수소 및 공기는 이상기체이고, 냉각수는 비압축성이다.
3. 수소 및 공기의 화학반응을 고려하지 않았기 때문에 전 구간에 걸친 농도구배는 일정하다.
4. 채널은 적은 유량이 흐르는 비교적 작은 유로이므로 채널 내 흐름은 층류 유동으로 가정한다.

본 계산에 사용된 질량, 운동량 보존 방정식은 Navier-Stokes 방정식을 단순화하여 사용하였다. Navier-Stokes 방정식을 직교 좌표계의 텐서표현법으로 쓰면 아래 식과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j) = s_m \quad (3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_j - \tau_{ij}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + s_i \quad (4)$$

위의 식에서 하첨자가 붙어 있는 항은 다음과 같은 함을 의미한다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = \frac{\partial (\rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial (\rho u_2)}{\partial x_2} \quad (5)$$

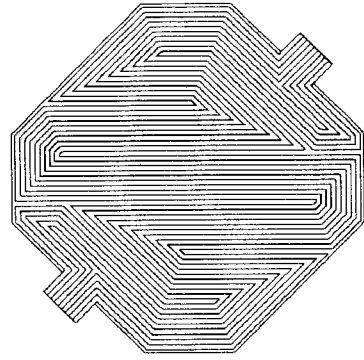
열전달에 관한 계산은 엔탈피 보존식을 사용하였으며, 식(6)과 같이 정의된다. 여기서 h 는 정적 엔탈피를 나타내며 식(7)과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j h - F_{hj}) = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}P) + u_j \frac{\partial P}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_j \quad (6)$$

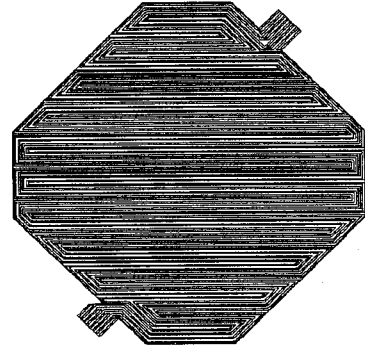
$$h = \tilde{c}_p T - c_p^0 T_0 + \sum m_m H_m = h_t + \sum m_m H_m \quad (7)$$

위의 질량, 운동량 보존방정식과 엔탈피 보존 방정식을 사용하여 수치적 계산을 수행하는데 있어서 경계조건은 Table 1과 같다.

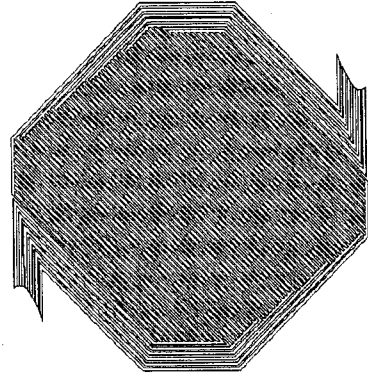
본 연구에서는 모든 전극판에서 출구압력을 기준으로 전체 압력 손실을 동일하게 해주어야 연료전지의 성능이 향상되므로 공기, 수소, 물의 입구 압력을 동일하게 1기압으로 하였다. 그리고 냉각판의 경우 내부 화학반응을 고려하지 않았기



(a) Electrode plate of Air



(b) Electrode plate of hydrogen



(c) Electrode plate of cooling

Fig. 3 Schematic of electrode plates

때문에 임의의 열원을 주고 계산하였다.

냉각수가 순환되지 않고 연료전지 본체의 냉각수가 그대로 열교환기로 들어가 냉각되는 경우, 실제 열교환기에서의 온도 감소폭을 고려하여 다음의 식 (8)을 이용하여 연료전지 본체의 열량을 계산하였다.⁽⁴⁾

Table 1 Inlet boundary conditions

냉각판	$\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$	$\dot{m} = 3.824 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$
공기판	$\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$	$\dot{m} = 2.678 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$
수소판	$\rho = 0.0812 \text{ kg/m}^3$	$\dot{m} = 4.511 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$

$$Q = P_e \left(\frac{1.25}{V_c} - 1 \right) \quad (8)$$

본 연구에서는 전극판 개채널의 압력, 속도 분포 및 열전달 해석을 수행함에 있어서 범용 전산 유체 해석코드인 STAR-CD를 이용하였다. 그리고 계산격자 구성을 위한 전처리에는 ICEM-CFD의 DDN을 사용하였음을 명시한다.

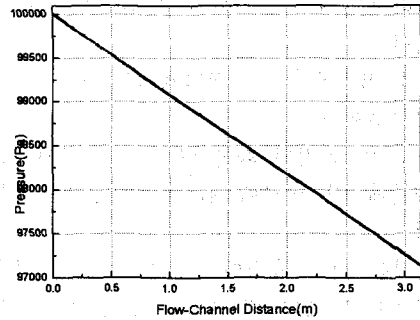
3. 계산결과 및 고찰

3.1 전극판 채널의 유동계산 결과

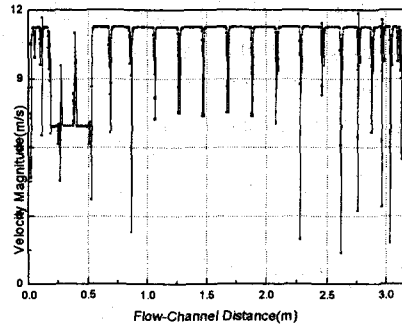
전극판의 유로 채널에 있어서 중요한 점은 전체 활성면적을 통해 균일한 유량공급과 균일한 압력 유지가 되도록 하여, 채널 길이 방향으로 균일한 전기화학반응이 일어나게 하는 것이다.

유동장이 균일하지 않을 경우 전류분포와 온도 분포도 불균일하여 국부적으로 전기 및 열적으로 과부하 상태가 될 수 있으며, 이 경우 전지의 효율저하는 물론 수명도 단축될 수 있다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 전극판 채널의 입구부터 출구까지의 길이에 비례하여 동일한 압력 강하가 일어나도록 유도해 주어야 한다. 이에 본 연구에서는 전극판 채널의 유동해석을 열전달 해석의 기초 자료로 사용하기 위하여 먼저 계산하였다.

Fig. 4는 전극판 중에서 연료(수소)극의 채널 길이에 따른 압력 분포 계산 결과를 보여주고 있다. 수소는 분자량이 작기 때문에 약간의 압력차에 의해서도 빠른 속도로 운동할 수 있고, 이상 기체에 가깝기 때문에 계산결과와 오차가 적다. 위의 계산 결과를 살펴 보면 입구와 출구의 압력 차이는 대략 2,870 Pa이다. 수소판의 경우 유로의 꺾임이 적기 때문에 압력강하가 급격히 변화하는 구간이 없다. 그리고 채널 길이에 따른 속도분포를 살펴보면 꺾임이 있는 부분에서의 급격한 변화를 제외한 대부분의 영역에서 유속이 대



(a) Pressure distribution along hydrogen channel



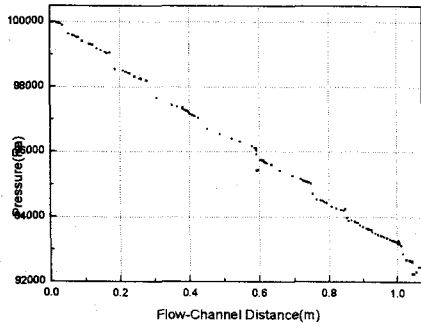
(b) Velocity profile along hydrogen channel

Fig. 4 Distribution of pressure and velocity in hydrogen electrode plate

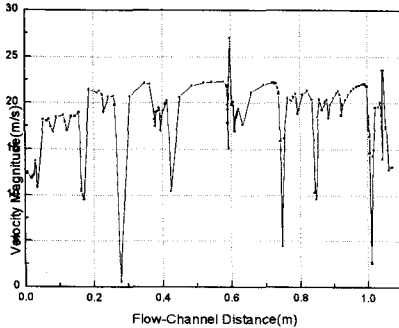
략 9~10 m/s로 일정함을 알 수 있다.

Fig. 5는 공기판의 채널 길이에 따른 압력 분포 및 속도분포의 계산결과를 보여주고 있다. 공기판의 경우 수소의 60배 정도의 유량이 채널을 통과하며, 전극판의 두께도 수소판에 비해 0.2~0.3 mm 정도 크다. 공기판 채널을 흐르는 대량의 공기는 화학반응에서 생성되는 수증기의 배출을 원활하게 하고, 이론당량비 상태로 반응이 일어날 수 있도록 도와주는 역할을 한다. 이를 위해 공기판 채널의 폭 또한 수소판에 비해 넓게 설계되어 있음을 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 계산 결과 공기판의 입구와 출구의 압력 차이는 8,860 Pa으로 다른 판과 비교해 볼 때 내부 압력강하가 큰 편이다. 이 압력강하는 공기판의 유로가 꺾여지는 부분에서 주로 발생하며, 이 값들이 합쳐져서 출구의 압력에 영향을 주게 된다. Fig. 5의 압력분포와 속도분포를 비교해서 살펴보면 압력변동에 따른 속도의 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 6은 냉각판의 채널 길이에 따른 압력 및



(a) Pressure distribution along air channel



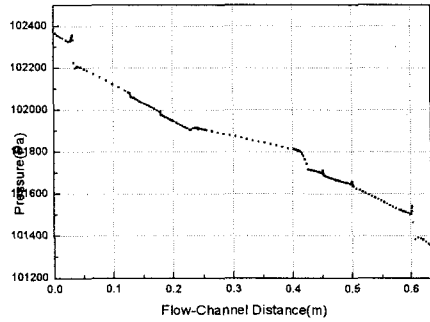
(b) Velocity profile along air channel

Fig. 5 Distribution of pressure and velocity in air electrode plate

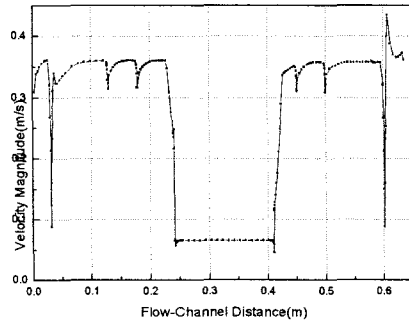
속도 분포의 계산 결과이다. 계산결과를 보면 입구와 출구의 압력 차이는 1,500 Pa 정도이다. 유로 입구에서 0.3 m, 0.6 m, 되는 지점에서 압력의 급격한 변동을 관찰할 수 있는데 이 지점은 한 개의 유로가 열 개의 유로로 분기되는 지점이기 때문에 이와 같은 현상을 보이게 된다. 냉각판의 속도분포를 살펴보면 입구와 출구 부분의 꺾임이 심한 부분에서의 속도변화가 있기는 하지만 다른 판과 맞닿는 부분에서의 속도는 거의 일정함을 알 수 있다. 출구에서의 속도는 대략 0.03m/s 이다.

3.2 냉각판의 열전달 및 유동해석

본 연구에서는 연료전지가 상온, 상압에서 구동된다고 가정하였으며, 연료전지 본체 내의 온도는 80°C 정도로 유지된다는 실험 결과를 이용해서 열량을 계산하였다. 그리고 전극판의 고체와 냉각수 (유체) 의 인접 부근에서의 열전달 현상을 해석하기 위해서 에너지보존의 원리를 이용하였



(a) Pressure distribution along cooling channel



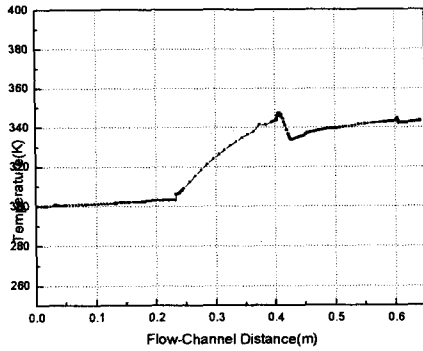
(b) Velocity profile along cooling channel

Fig. 6 Distribution of pressure and velocity in cooling electrode plate

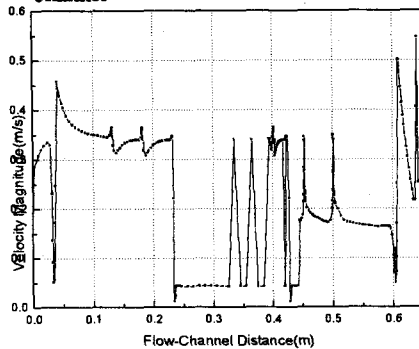
다.

본 연구는 고체와 유체의 인접 부위에서의 열전달 현상을 계산함에 있어 다음과 같은 경계조건을 설정해 주었다. 냉각판의 밑부분을 열원으로 보고 이 부분의 온도를 주었다. 그리고 냉각판의 윗부분은 열이 인접한 주위로 전달된다고 보고 Conduct Resistance 값을 주어 열전달이 일어나도록 유도하였다. 앞선 계산에서와 마찬가지로 유동현상도 함께 계산하였는데 이는 순수한 유동현상만이 있는 경우와 열전달을 동반한 경우의 유동현상의 차이를 비교해 보기 위함이다.

이에 대한 계산 결과는 Fig. 7와 같다. 이 경우 유로판 내부의 유체의 유동만 있는 경우와는 계산 결과에 많은 차이가 있음을 확인할 수 있다. 채널 내 유체의 온도는 입구 쪽에서는 상온으로 대략 300K 정도였는데, 냉각수로의 열전달에 의해 대략 350~370K 의 온도로 상승한다. 물의 속도가 어느 정도 빨라지면 이러한 냉각 효과는 더욱 분명히 나타낼 것으로 사료된다. 냉각판의 속



(a) Temperature distribution along cooling channel



(b) Velocity profile along cooling channel

Fig. 7 Distribution of temperature and velocity in cooling electrode plate

도분포를 살펴보면 그 결과는 순수 유동장만을 해석했을 때와는 약간 다른 양상을 보이고 있다. 이것은 열전달에 의해 냉각수의 운동에너지가 증가하였기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서 고분자 전해질 연료전지의 초기 압력이 1기압(상압)인 경우 연료전지 본체 내부의 공기관, 수소관, 냉각관의 압력 및 속도 분포가 내부 화학 반응이 균일하게 일어날 수 있는 조건임을 알 수 있었다. 공기관, 수소관, 냉각관 해석 결과 유로관내의 비교적 잘 설계되었다고 볼 수 있다. 세 개의 관중에 가장 압력 강하가 큰 것은 공기관인데 그 압력강하도 0.05atm 정도로 크지 않은 값이기 때문에 많은 문제가 되지는 않는다. 그러나 꺾어지는 부분에서의 꺾임각 변화가 급격하게 나타나기 때문에 거기에 따른 압력손실과

속도의 불안정성이 뒤따르게 된다. 좀더 나은 연료전지의 효율향상을 위해서는 이에 대한 개선책이 많이 도출되어야 하며, 이와 더불어 전극판 채널의 최적 설계에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다. 고분자형 연료 전지의 효율을 향상시키기 위해서는 저온 (대략 80℃) 상태로의 열 제어가 중요한 부분을 차지하는데, 스택 내에서 이를 담당하는 역할을 냉각관이 하므로 전체 해석을 위해서 냉각효과는 중요하다. 이에 관해 본 연구는 유동 및 열전달 해석에 필요한 충분한 기초 자료를 제공하고 있다.

후기

본 연구는 한국에너지기술연구소 연료전지 연구센터의 지원에 의해서 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김창수, 2000, 재생고분자 연료전지, 한국에너지기술연구소 에너지 기술 정보지, 제10호, pp.4~5.
- (2) K.V. Kordesch, 1971, "City Car with H₂-Air Fuel Cell and Lead Battery," 6th Inter-society Energy Conversion Engineering Conference, SAE Paper NO.719015.
- (3) A.J. Appleby, F.R. Foulkes, 1989, *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY.
- (4) Mark C. Williams, 2000, *Fuel Cell Handbook*, EG & G Services Parsons, Inc. Science Application International Corporation.
- (5) J.H. Lee, T.R. Lalk, 1998, "Modeling Fuel Cell Stack Systems," Los Alamos National Laboratory Los Alamos, NM 87545, U.S.A.
- (6) 3. F. Standaert, K. Hemmes and N. Woudstra, 1996, "Analytical Fuel Cell Modeling," *Journal of Power Sources*, Vol. 63, pp. 221~234.
- (7) G. K. Wilemski, A. Gelb, 1985, *Molten Carbonate Fuel Cell Performance Model Update : Final Report*, Physical Sciences, Reserch Park, Andover, MA. U.S.A.