

용융탄산염 연료전지 Anode 유로 채널에서의 가스 유동 분포에 관한 수치해석적 연구

조준현* · 하태훈* · 김한상** · 민경덕† · 박종훈*** · 장인갑*** · 이태원***
(2009년 4월 15일 접수, 2009년 9월 6일 수정, 2009년 9월 7일 심사완료)

Numerical Analysis of the Gas Flow Distribution Characteristics in the Anode Flow Channel of Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

Junhyun Cho, Taehun Ha, Han-Sang Kim, Kyoungdoug Min,
Jonghoon Park, Ingab Chang and Taewon Lee

Key Words: MCFC(용융탄산염 연료전지), CFD(전산 유체역학), Flow Channel(유로), Gas Flow
Distribution(유동 분포), Flow-Rate Uniformity(유량 균일도)

Abstract

A three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis is performed to investigate flow characteristics in the anode channels and manifold of the internal reforming type molten carbonate fuel cell (MCFC). Considering the computational difficulties associated with the size and geometric complexity of the MCFC system, the polyhedral meshes that can reduce mesh connectivity problems at the intersection of the channel and the manifold are adopted and chemical reactions inside the MCFC system are not included. Through this study, the gas flow rate uniformity of the anode channels is mainly analyzed to provide basic insights into improved design parameters for anode flow channel design. Results indicate that the uniformity in flow-rate is in the range of $\pm 1\%$ between the anode channels. Also, the mal-distributed inlet flow-rate conditions and the change in the size of the manifold depth have no significant effect on the flow-rate uniformity of the anode channels.

기호설명

Re : 레이놀즈 수
V : 속도 (m/s)
 ν : 동점성 계수 (Pa·s)

1. 서론

유가 급등과 더불어 환경 문제의 대두로 세계의 각 국가는 이에 대응하기 위해 환경 친화적 저탄소형 에너지 소비 시스템 구축과 에너지 수급 체계 구현을 위해 신재생에너지 기술 개발에 중점적으로 투자하고 있다. 특히 용융탄산염 연료전지(MCFC)를 이용한 발전은 에너지원의 다양화, 높은 효율 구현, 저공해라는 측면에서 신재생 발전 시스템으로 주목 받고 있다. MCFC의 경우 화석 연료의 변환 과정 중 발생하는 일산화탄소에 의한 피독 현상이 없어 천연 가스, 메탄올, 에탄올, 석탄 등 거의 모든 화석 연료

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : kadmin@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1661 FAX : (02)883-0179

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 두산중공업

들을 발전 시스템의 연료로 사용할 수 있으며 고온의 작동 환경으로 인해 높은 반응성, 낮은 제조 비용, 열병합 발전 등의 장점을 가진다.

발전용 MCFC는 그 규모가 크고 제작과 시험에 많은 비용이 소요되므로 여러 설계안을 직접 제작하여 시험하기 어렵다. 그러므로 이전 단계에서 시뮬레이션을 통한 연구가 필수적이다.

따라서 발전용 MCFC에 대한 해석 연구가 다양한 연구자들에 의해 진행되어 왔는데, Okada⁽¹⁾ 등은 200 kW급 내부 개질형 MCFC 스택 내부에서의 가스 분포 및 열전달 특성을 분석하였다. 200여개의 채널을 4개의 블록으로 분리하여 각 채널 간의 유동 균일도를 $\pm 1\%$ 로 유지할 수 있음을 수치적으로 계산하였다. Baranak⁽²⁾ 등은 화학적 반응 및 물질 전달이 고려된 단순화된 수치 모델을 개발하여 전지 성능 및 가스 유동의 형태를 분석하였다. Koh⁽³⁾ 등은 100 kW급 MCFC 스택의 몇 가지 설계 변수들을 결정하는 연구를 진행하였고, Kim⁽⁴⁾ 등은 내부 매니폴드를 가지는 MCFC 단위 전지 내의 3차원 열유동 해석 연구를 진행하였다. MCFC 발전 시스템은 그 규모가 수십 kW 이상으로 크기가 크기 때문에 전체 시스템을 화학 반응까지 고려하여 수치적으로 계산하는 것은 현재 컴퓨팅 환경에서는 매우 힘든 일이다. 따라서 스택의 화학 반응을 고려하여 성능을 계산하는 연구는 단위 전지의 일부 영역에 대해서만 계산을 수행하는 단계이고, 채널 간 공급 기체 분포 분석과 같은 연구는 화학 반응을 고려하지 않고 단순화하여 주로 진행되고 있다.

스택 내부에서 수소를 생산하는 내부 개질형 MCFC 시스템에서 각 anode 채널로 유입되는 기체의 유량 균일도는 각 단위 전지의 성능 분포 및 내구성을 결정하는 중요한 설계 변수이다. 따라서 본 연구에서는 단순화시킨 3차원 해석을 통해 anode 채널별 유량 균일도를 분석하고, 입구 유량을 불균일하게 가정했을 때와, 매니폴드의 깊이를 50 %로 하였을 때 유동 해석을 수행하여 설계 인자 변화가 유량 균일도에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구는 적은 비용으로 발전용 MCFC 개발에 필요한 중요 데이터와 최적화된 설계안을 확보하는 데 의미가 있다.

2. 해석 격자 및 경계 조건

2.1 다면체 격자 생성

본 연구의 해석 대상은 25 kW급 내부개질형

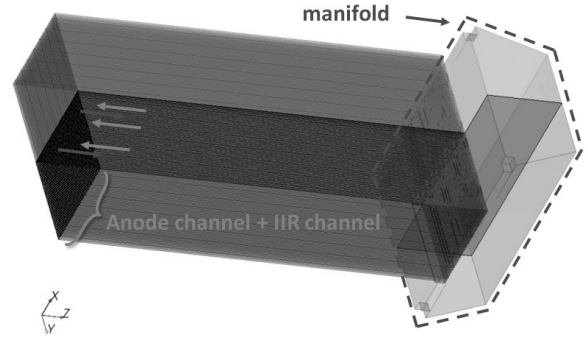


Fig. 1 The target region of calculation

MCFC의 적층된 간접내부개질(Indirect Internal Reforming: IIR) 채널과 anode 채널, 그리고 이 채널들이 모이는 매니폴드 전체 영역이다. Fig. 1에 계산 영역을 표시하였다. 본 해석 대상에서는 IIR 채널을 통과하여 나온 기체들이 매니폴드로 모이고, 다시 anode 채널들로 나누어지게 되는데, 채널과 매니폴드의 접합 부분에서 복잡하고 급격한 유동 변화가 나타나고 이 유동 현상은 각 anode 채널 유량 균일도에 영향을 미치는 중요한 영역이 된다. 따라서 채널과 매니폴드의 접합부에서는 많은 해석 격자가 필요하게 된다.⁽⁵⁾ 일반적으로 사용하는 육면체 격자(hexahedral mesh)는 작은 격자와 큰 격자가 연결되는 경우, 임의의 접합법(arbitrary couple method)을 사용하기 때문에 격자의 연결성(connectivity)을 해친다. 본 해석 대상과 같이 길이가 수 mm로 작은 여러 개의 채널과 수백 mm 길이의 매니폴드가 접합하는 구조에서 격자의 연결성을 확보하고 자연스러운 격자의 생성을 가능하게 하기 위해 본 연구에서는 다면체 격자(polyhedral mesh)를 적용하였다. 이를 위해 상용 CFD 프로그램인 CD-adapco사의 STAR-CCM+ v.2.10.012를 사용하여 해석 격자를 생성하고 계산을 수행하였다. Fig. 2에 Fig. 1에 표시된 단면에서 생성된 격자를 표시하였다.

하지만 다면체 격자를 사용하게 됨에 따라 필요한 격자의 수가 많아지고 계산 시간이 길어지는 단점이 발생한다. 따라서 해석 수행 시 채널 단면에서 격자의 수를 일정 수 이상 확보해야 좁은 채널에서의 유동 현상을 제대로 파악할 수 있으므로 최적화된 격자를 생성하는 것이 중요한 문제이다. 본 연구에서는 이의 해결을 위하여 매니폴드와 접합하는 채널을 30 mm만 생성하여 다면체 격자를 생성한 후 이를 돌출(extrude)시켜 총 길이 약 1 m 내외의 전체 채널 형상을 완성시키는 방법을 사용하였다. 또한 매니폴드의

Table 1 Analysis conditions

Temperature (°C)	550	
Inlet velocity (m/s)	1.392	
Mass fraction	CH ₄	0.235294
	H ₂ O	0.264706
	CO	0.411765
	H ₂	0.088235

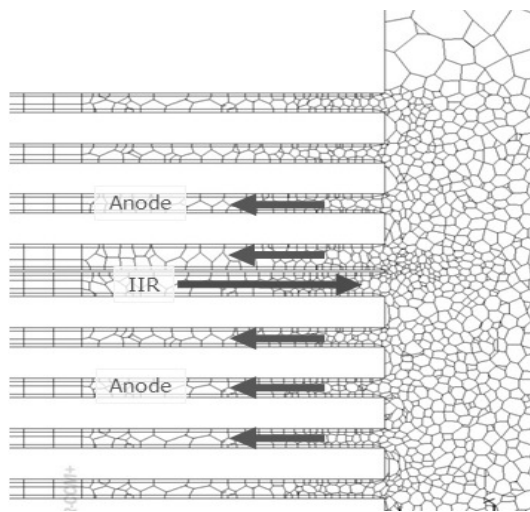


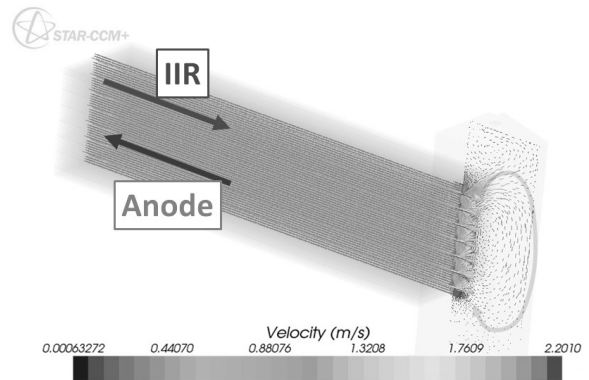
Fig. 2 The plane section view of polyhedral volume mesh

채널과 접하지 않는 외곽 부분은 큰 유동 변화가 없으므로 격자 크기를 크게 조절하여 전체 격자의 수를 효과적으로 줄이도록 하였다. 생성된 총 격자수는 520 만개이다.

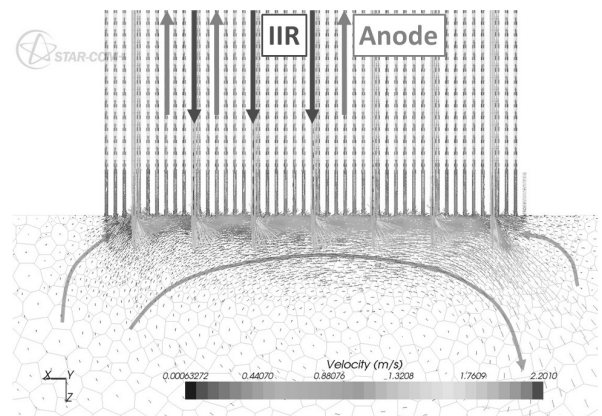
2.2 해석 조건

본 연구에서는 컴퓨팅 환경 하에서 단위 전지가 아닌 스택에서 IIR 채널로 유입되는 가스가 anode 채널로 유입될 때 각 채널별 유량 균일도 파악에 중점을 두어 3차원 수치해석을 진행하므로 해석 시간과 비용을 고려하여 IIR 채널과 anode 채널에서의 화학 반응은 고려하지 않았다.

계산 조건은 Table 1에 표시한 바와 같이 개질 반응에 참여하는 CH₄, H₂O, CO, H₂의 혼합 가스가 각각의 IIR 채널 끝단에서 각각 0.1768, 0.7148, 0.0924, 0.0158의 질량분율(mass fraction)을 가지고 1.392 m/s 의 속도로 유량이 유입되는 조건을 기본 case로 하였다. 내부 열 발생은 고려하지 않고 550 °C 의 온도 조건을 부여하였으며,



(a)



(b)

Fig. 3 Velocity field in the calculation domain (a) overall view and (b) enlarged view

anode 채널 끝단은 압력 경계 조건을 지정하였으며 층류 유동 모델로 계산을 수행하였다.

3. 해석 결과

3.1 유동 속도 분포

Fig. 3에 단면에서의 유동 속도 분포를 표시하였다. Fig. 3(a)에서 전체적인 채널 유동장을 표시하였고 채널과 매니폴드 접합부를 자세히 나타내기 위하여 시계 방향으로 회전시켜 확대한 속도장을 Fig. 3(b)에 표시하였다. 유동장 형태 분석을 통해 IIR 채널로부터 들어온 유체들이 위쪽 방향의 anode 채널들로 빠져 나가면서 매니폴드 내부에서 시계 방향의 유동 흐름이 나타나는 사실을 확인할 수 있다.

우선 최고 속도를 고려하여 레이놀즈 수(Reynolds number)를 계산하여 층류 유동임을 확인하였다. 주어진 온도 조건과 혼합 가스의 조성 조건에서 동점성 계수(dynamic viscosity)는 $\nu = 1.2635 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ 이

고, 해석 조건에서 최고 속도가 나타나는 곳, 즉 가장 작은 anode 채널의 너비 2.4 mm와 해석 결과에서 얻은 최고 속도 2.22 m/s 값을 대입하여 레이놀즈 수를 산정하면 $Re = \frac{VD}{\nu} \cong 418$ 로 층류 조건임을 확인할 수 있다. 채널 및 매니폴드 내부에서 0.0001 m/s ~ 2.22 m/s 정도의 속도 분포를 보이고 있으며 IIR 채널과 매니폴드가 만나는 부분에서 속도가 가장 빠르고 양 끝 anode 채널로 빠져나가는 유동의 속도가 가장 느린 것으로 나타났다.

IIR 채널과 인접해 있는 anode 채널 쪽으로 유동이 휘어지고 전체적으로 위쪽(Fig. 3(b)에서 오른쪽)으로 휘어진 후 매니폴드 영역을 회전하여 다시 아래쪽(Fig. 3(b)에서 왼쪽)으로 들어가는 유동 형태를 나타내고 있다. 이는 채널 배치의 비대칭성과 채널 간격의 비대칭성에 의하여 나타나는 것으로 이해할 수 있다. IIR 채널의 아래보다 위에 있는 anode 채널이 IIR 채널과 더 가까이 위치해 있으며 IIR 채널을 나온 유체가 보다 가까운 출구(낮은 압력)가 있는 위쪽으로 향하게 된다. 다른 IIR 채널 후단 유동도 모두 위쪽으로 향하게 되어 가장 위쪽에 위치한 anode 채널 입구 부분은 유량이 커지고 가장 아래쪽에 위치한 anode 채널 입구 부분에는 유량이 다소 작아져 두 부분 사이의 유량 균형을 맞추기 위한 큰 회전 유동이 발생하는 것으로 파악된다.

3.2 유량 균일도 평가

IIR 채널로 들어온 유체가 여러 개의 anode 채널들로 나누어져 나갈 때 각각의 채널에서 유량의 차이가 일정한 설계값 내에 있어야 한다. 각 채널에서 유량이 일정해야 연료전지 스택 내의 각 단위 셀에서 전기화학 반응이 일어나기 위한 유체의 화학 양론비가 일정하게 유지될 수 있고 이는 셀 간 성능 편차를 줄이는 가장 기본적인 필요조건이 된다.

Fig. 4에 anode 채널로 유입되는 유량의 평균을 구하고 각 채널의 유량과 평균 유량 값의 편차를 평균 유량 값 대비 백분율로 구해 비교하여 나타내었다. 각 채널 간 유입 유량의 차이를 비교하면 IIR 채널 위쪽에 근접한 anode 채널로는 상대적으로 많은 양이 유입되지 못하며 멀어질수록 (혹은 IIR 채널의 아래쪽에 가까워질수록) 많은 양이 유입되는 것을 알 수 있다. 앞서 분석한 바에 따르면 IIR 채널로 들어온 유체는 위쪽으로

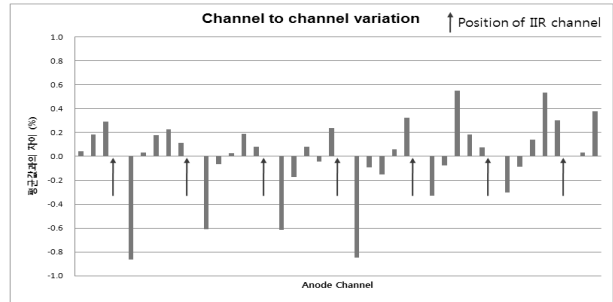


Fig. 4 Flow-rate uniformity of the anode channels

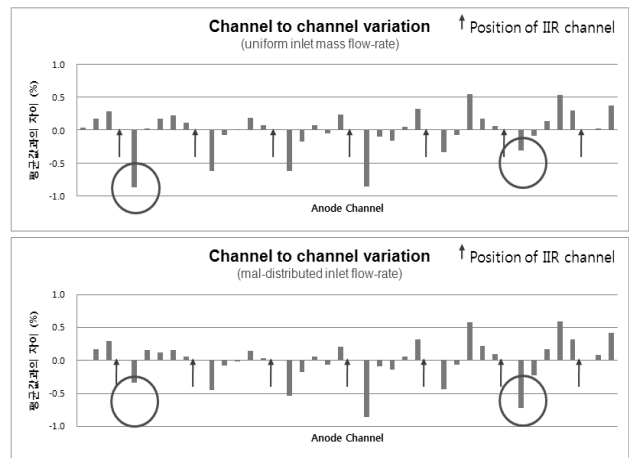


Fig. 5 Flow-rate uniformity of the anode channels under mal-distributed inlet flow-rate condition

꺼어져 흐르게 되는데 채널을 타고 흐르며 발생한 관성으로 인해 급격한 각도로 꺾이지 못하여 오히려 먼 곳의 채널로 많은 양이 유입되는 것으로 보인다. 전체적인 유량 차이를 분석하면 최대치는 약 ±1 %임을 알 수 있다.

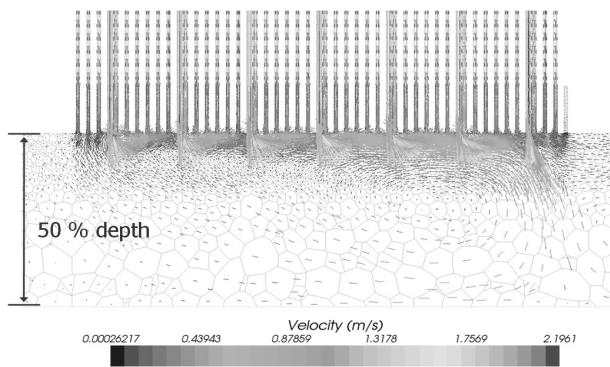
4. 추가 유동 해석

4.1 불균일한 유입 유량 조건에서 유동 특성

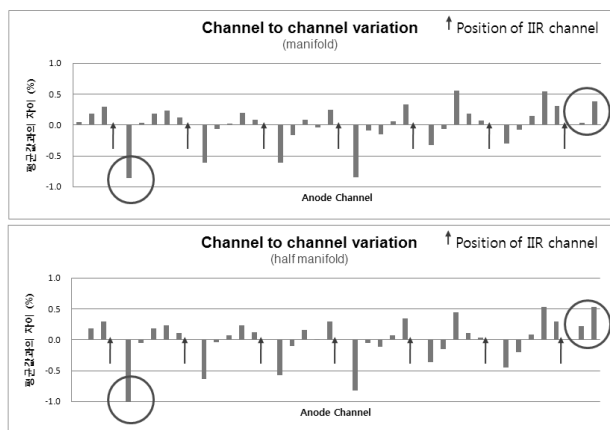
실제로 IIR 채널에서 개질되는 수소 및 잔류 가스의 양이 채널 별로 차이가 있을 수 있으므로 IIR 채널로 유입되는 유량이 채널 별로 차이가 존재할 때 유동 특성을 알아보기 위하여 가장 아래쪽 채널에 90 %의 유량이, 가장 위쪽 채널에 110 %의 유량이 유입되도록 경계 조건을 지정하고 계산을 수행하여 유량 균일도를 평가하고 이를 Fig. 5에 Fig. 3의 결과와 비교하여 나타내었다. 가장 작은 유량이 유입되는 하단(좌측) 채널 사이의 IIR 옆의 채널에서 유량이 증가하고, 보다 많은 유량이 유입되는 상단(우측) 채널 사이의

IIR 옆의 채널에서 유량이 감소하는 모습을 확인할 수 있다. 이는 IIR로 유입되는 유량이 많아질수록 유동의 관성이 커져 옆 채널로 쉽게 꺾여 이동하지 못하고 반면에 IIR로 유입되는 유량이 작아질수록 유동의 관성이 작아져 옆 채널로 쉽게 꺾여 이동이 가능하기 때문이다. 유량 변화량은 크지 않지만 이러한 결과는 내부 개질형 MCFC에서 IIR 채널 내부의 유량에 따라 각 anode 채널로의 유량이 달라져 셀 간 성능 차이를 가져올 수 있는 가능성을 시사한다.

4.2 50 % 깊이의 매니폴드 적용 시 유동 특성
 매니폴드의 깊이를 50 %로 축소할 경우의 유동을 해석하여 속도장과 유량 균일도를 Fig. 6에 표시하였다. Fig. 6(a)에서와 같이 매니폴드 깊이를 다르게 했을 때 전체적인 유동 형태는 큰 변화가 없음을 확인할 수 있으며 Fig. 6(b)에서와



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Velocity field and (b) flow-rate uniformity under 50 % depth manifold height condition

같이 각 anode 채널 간 유량 균일도도 가장 하단(좌측)과 상단(우측)에서 약 0.2 % 정도의 미소한 차이만 발생할 뿐 전체적인 유량 균일도에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 현재 설계된 매니폴드보다 매니폴드 사이즈를 다운사이징(downsizing) 하여 설계함이 원가 절감 및 전체 매니폴드 부피 최소화에 유리할 것이라는 사실을 알 수 있다.

5. 결론

내부 개질형 MCFC의 anode 채널 및 매니폴드에 대한 단순화 3차원 CFD 유동 해석을 수행하여 채널 내부의 유동 형태와 anode 채널 간 유량 균일도를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) IIR 채널을 통해 매니폴드로 유입되는 가스 유동은 채널 끝단에서 위쪽 방향의 anode 채널로 휘어 들어가고 전체적으로 매니폴드 내부에서 시계 방향의 큰 유동이 생기는 특성을 보이며, 이는 IIR 채널과 인접한 anode 채널 간격의 비대칭성에서 기인하는 것으로 판단된다.

(2) Anode 채널 간 유량의 평균을 구하고, 각 채널의 유량과의 편차를 유량 균일도로 설정하여 분석한 결과 채널 간 유량 편차는 $\pm 1\%$ 범위에 있음을 알 수 있었다.

(3) IIR 채널에서 개질되는 가스의 양이 균일하지 않은 상황을 가정하여 입구 유량 조건을 변경한 경우, 불균일한 입구 유량 조건이 유량 균일도에 미치는 영향은 크지 않으나 기체 유동은 입구 유량이 많은 쪽의 IIR 채널에서 증대된 유동 관성 때문에 인접한 anode 채널로 쉽게 이동하지 못함을 알 수 있었다.

(4) 매니폴드의 크기 축소는 채널의 유량 균일도에는 큰 영향을 주지 않음을 확인하였으며 이로부터 매니폴드 다운사이징의 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 신재생에너지 프로젝트형 기술개발 사업의 “MCFC 스택 시스템에 대한 단순화 CFD 해석을 통한 유동 특성 고찰” 과제의 일환으로 진행되었습니다.

참고문헌

- (1) Okadaa, T., Matsumoto, S., Matsumura, M., Miyazak, M. and Umedab, M., 2006, "Gas Distribution In Molten-Carbonate Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 162, pp. 1029~1035.
- (2) Baranak, M. and Atakul, H., 2007, "A Basic Model for Analysis of Molten Carbonate Fuel Cell Behavior," *Journal of Power Sources*, Vol. 172, pp. 831~839.
- (3) Koh, J-H., Kang, B-S. and Lim, H. C., 2001, "Design of a 100 kW MCFC Stack and Power Generation System," *Trans. of the KSME(D)*, pp. 146~151.
- (4) Kim, H. S. and Choi, D. H., 2006, "An Improved 3D Heat & Fluid Flow Analysis for the MCFC Unit Cell with Internal Manifolds," *Trans. of the KSME*, pp. 1764~1770.
- (5) McGarry, M. and Grega, L., 2006, "Effects of Inlet Mass Flow Distribution and Magnitude on Reactant Distribution for PEM Fuel Cells," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 3, pp. 45~50.