

## 간접 내부 개질형 용융탄산염 연료전지 anode 채널에서의 압력 강하 및 온도 조건 변경에 따른 유량 균일도에 관한 수치 해석적 연구

\*조 준현<sup>1)</sup>, 하 태훈<sup>1)</sup>, 김 한상<sup>2)</sup>, \*\*민 경덕<sup>2)</sup>, 박 종훈<sup>3)</sup>, 장 인갑<sup>3)</sup>, 이 태원<sup>3)</sup>

### Numerical analysis of the gas flow-rate uniformity in the anode flow channel of indirect internal reforming molten carbonate fuel cell (MCFC) under different pressure drop and temperature conditions

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

**Abstract** : The uniform gas distribution between anode channels of the indirect internal reforming type molten carbonate fuel cell (MCFC) is crucial design parameter because of the electric performance and the durability problems. A three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis is performed to investigate flow characteristics in the anode channels and manifold under different pressure drop and channel temperature conditions. The combined meshes consists of hexadral meshes in the channels and polyhedral meshes in the manifold are adopted and chemical reactions inside the MCFC system are not included because of computational difficulties associated with the size and geometric complexity of the system. Results indicate that the uniformity in flow-rate is in the range of  $\pm 0.048$  % between the anode channels when the pressure drop of anode channel is about 150 Pa. A gas flow-rate uniformity decreases as the pressure drop of anode channels decreases and as the temperature difference between indirect internal reforming (IIR) channels and anode channels increases.

**Key words** : MCFC(용융탄산염 연료전지), CFD(전산 유체역학), IIR(간접 내부 개질), Flow-rate uniformity(유량 균일도), Pressure drop(압력 강하)

#### 1. 서 론

용융탄산염 연료전지(MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell)를 이용한 발전은 고온의 작동 조건으로 인해 저가형 금속 촉매사용을 통한 제조 원가 절감, 높은 반응성 그리고 열병합 발전 등의 장점을 가지고 있어 석유 에너지를 대체할 신재생에너지 원으로 최근 많은 연구가 진행되어 왔고 현재 상업화를 위한 scale-up 단계에 이르렀다. 규모가 큰 발전용 MCFC 시스템은 제작, 설치 및 시험에 많은 비용이 소요되므로 설계 단계에서 수치 해석적 연구가 필수적이다. MCFC 발전 시스템은 수

십 kW 이상으로 크기가 크고, 수 mm의 유로 채널이 수십개 이상 적층되어 있기 때문에 전체 시스템을 화학 반응까지 고려하여 수치적으로 계산하는 것은 현재 컴퓨팅 환경에서는 매우 힘든 일이다. 따라서 기존의 연구들에서도 단위 전지 수준에서 화학 반응과 유동 현상을 고려하여 성능을 계산하는 단계이고, 채널 간 공급 기체 분포 분석과 같은 연구는 화학 반응을 고려하지 않고 단순화하여 주로 진행되고 있다.

Marra<sup>1)</sup> 는 유한요소해석 모델을 이용하여 전류 집전판에서의 유동 마찰계수를 레이놀즈수에 따라 분석하였다. Baranak<sup>2)</sup> 등은 단순화된 수치 모델을 개발하여 물질 전달 및 화학 반응을 연계한 수치해석을 진행하여 전지 성능과 유동 분포의 형태를 분석하였다. Liu<sup>3)</sup> 등은 단위 전지에서 불균일한 입구 유량 분포가 셀 내부의 온도 분포 및 전류 밀도 분포를 저해시키는 현상에 대해 수치적으로 연구하였으며, Okada<sup>4)</sup> 등은 4개의 블록으로 분리된 200 여개의 유로 채널에서 각 채널

1) 서울대학교 대학원 기계항공공학부  
E-mail : gejjh01@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-8363 Fax : (02)874-2001  
2) 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : kadmin@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-1661 Fax : (02)883-0179  
3) 두산중공업 (주)  
E-mail : jonghoon1.park@doosan.com  
Tel : (042)712-2189 Fax : (042)712-2299

간의 유동 균일도를  $\pm 1\%$ 로 유지할 수 있음을 수치적으로 계산하였다. Kim<sup>5)</sup> 등은 내부 매니폴드를 가지는 MCFC 단위 전지 내의 3차원 열유동 해석 연구를 진행하였다.

특히 스택 내부에서 수소를 생산하는 간접 내부 개질형 MCFC 시스템에서 각 anode 채널로 유입되는 기체의 유량 균일도는 각 단위 전지의 성능 분포 및 내구성을 결정하는 중요한 설계 변수이다. 간접내부개질(IIR: Indirect Internal Reforming) 채널에서는 흡열 반응이 일어나고 anode 채널에서는 발열 반응이 일어나며, 각 유로 채널에서는 채널 내부의 축매로 인해 다공성 성질을 가지게 되어 압력 강하가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 단순화시킨 3차원 해석을 통해 압력 강하 조건 및 온도 조건 변경에 따른 anode 채널 별 유량 균일도를 분석하여 설계 인자 변화가 유량 균일도에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 본 연구는 적은 비용으로 발전용 MCFC 개발에 필요한 중요 데이터와 최적화된 설계안을 확보하는 데 의미가 있다.

## 2. 해석 격자 및 경계 조건

### 2.1 해석 격자 생성

본 연구의 해석대상을 Fig. 1에 표시하였다. 300 kW급 간접 내부 개질형 MCFC의 적층된 anode 채널과 IIR 채널, 그리고 이 채널들이 모이는 매니폴드 전체 영역으로 중앙을 대칭평면으로 두어 한쪽만 계산 격자를 생성하고 Fig. 1에 표시한 단면을 Fig. 2에 표시하였다. 각 IIR 채널로 유입된 혼합 개질 가스가 매니폴드에서 모인 뒤 각 anode 채널들로 분배되어 나가는 형상으로 채널과 만나는 매니폴드 상단부에서 복잡한 유동 현상이 나타나게 되고, 이 영역은 각 채널의 유량 균일도에 영향을 미치는 중요한 역할을 하므로 많은 수의 계산 격자를 필요로 한다. 따라서 매니폴드에는 격자의 연결성이 좋은 다면체 격자(Polyhedral Mesh)로 제작하였다. 그리고 채널 부분은 벽 법칙을 모사 할 수 있도록 단면에 적절한 수의 계산 격자가 생성되어야 하므로 격자의 aspect ratio를 조절할 수 있어 전체 격자 수를 조절 할 수 있는 육면체 격자(Hexadral Mesh)로 제작하였다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 IIR 채널 단면에 8 개, anode 채널에 7 개의 격자 층을 각각 생성 하였으며, 매니폴드와 접하는 부분에서부터 aspect ratio를 2, 5, 20으로 격자를 생성하여 유동 변화가 크지 않은 부분에서 격자 수를 줄여 약 0.8 m × 1 m의 크기의 전체 채널에 생성되는 격자 수를 줄일 수 있도록 하였다. 복합적인 격자 생성을 위해 상용 CFD 프로그램인 CD-adapco사의 STAR-CD v.4.0과 STAR-CCM+ v.3.06을 사용

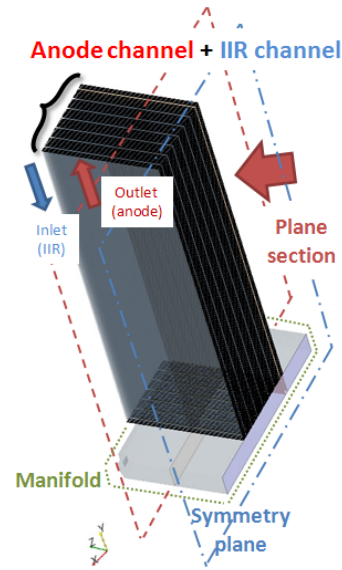


Fig. 1 The target region of calculation

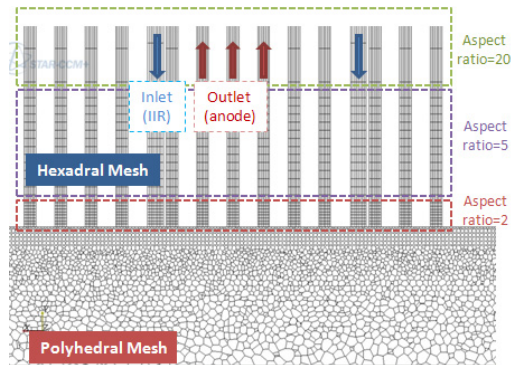


Fig. 2 The plane section view of volume mesh 하여 해석 격자를 생성하고 계산을 수행하였다. 생성된 총 격자 수는 860 만개이다. 또한 IIR 채널과 anode 채널은 다공성 물질(porous medium)로 격자를 생성하여 압력 강하 조건을 반영할 수 있도록 설정하였다.

### 2.2 해석 조건

Table 1 Analysis Conditions

Boundary	IIR 채널		Anode 채널	
	압력강하량 (Pa)	온도 (°C)	압력강하량 (Pa)	온도 (°C)
Case1	1-1	24	9	550
	1-2	222	84	
	1-3	222	148	
Case2	2-1	222	430	148
	2-2		470	
	2-3		550	

본 연구에서는 컴퓨팅 환경 하에서 단위 전지가 아닌 스택에서 다공성 성질의 IIR 채널로 유입되는 가스가 다공성 성질의 anode 채널로 분배될

때 압력 강하량 및 온도 조건 변화에 따라 각 채널별 유량 균일도 파악에 중점을 두어 3차원 수치 해석을 진행하므로 해석 시간과 비용을 고려하여 IIR 채널과 anode 채널에서의 화학 반응은 고려하지 않았다. 따라서 유입 되는 가스는 개질반응에 참여하는 CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, H<sub>2</sub>의 혼합 가스가 각각의 IIR 채널 끝단에서 각각 0.1768, 0.7148, 0.0924, 0.0158의 질량분율(mass fraction)을 가지고 550 °C의 온도로 일정 유량이 유입되는 조건을 기본 case로 하였다.

먼저 압력 강하량의 영향을 분석하기 위하여 채널에 다공성 성질을 부과하지 않은 case를 기본으로 하여 anode 채널의 압력 강하량이 약 90, 150 Pa이 되도록 시행착오법을 거쳐 채널의 다공성 성질 특성을 부과하였다. 또한 채널 온도 조건의 영향을 분석하기 위하여 IIR 채널과 anode 채널 벽면에 heat flux 경계 조건을 부과하여 IIR 채널의 온도를 430, 470, 550 °C가 되도록 설정하여 해석을 진행하였다. 이를 Table 1에 표시하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 절 유동 속도 분포

기준 case인 case 1-1의 속도 벡터장을 Fig. 3에 표시하였다. IIR 채널로 유입된 유체가 매니폴드와 만나는 부분에서 약 1.63 m/s의 최고 속도를 나타내고 있고, 관성에 의해 매니폴드 깊이의 약 40 % 깊이까지 침투(penetration)한 후 강한 와류(vortex)를 형성하면서 양 옆의 인접한 anode 채널들로 유체가 분배되는 유동 형태를 보이고 있다. 특히 최외곽 anode 채널 하단부에서 매니폴드 외곽을 회전한 유동이 발달하여 강한 와류가 발생

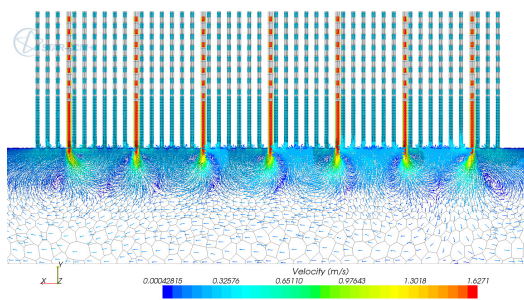


Fig. 3 Velocity vector field of case 1-1

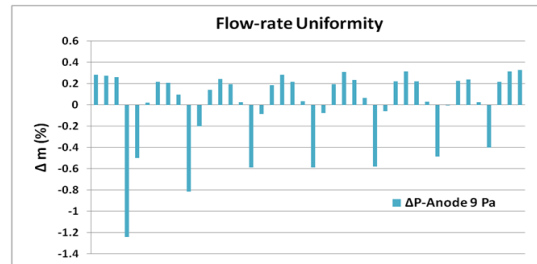
하고 이로 인해 최외곽 IIR 채널로 유입된 유체는 중앙 쪽 anode 채널로 유입 되는 경향을 보이고 있다.

#### 3.2 절 압력 강하량에 따른 유량 균일도 분석

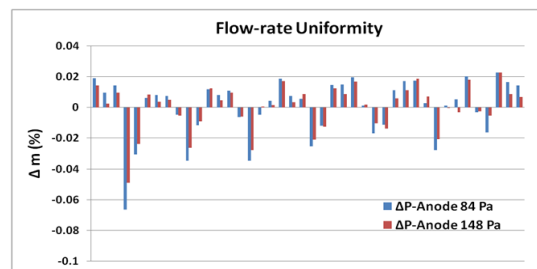
전체 anode 채널의 평균 유량과 각각의 채널의

유량의 편차의 백분율로 표시하여 유량 균일도로 Fig. 4와 같이 표시하였다. Anode 채널의 다공성 성질을 부과하지 않은 Fig. 4-(a)의 결과의 경우, anode 채널에서 9 Pa의 압력강하가 나타나고 좌측에서 첫번째 IIR 채널에 인접한 anode 채널의 유량이 가장 작게 나타난 사실을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 3의 벡터장에서 확인할 수 있듯이 IIR 채널을 통과하여 매니폴드로 유입된 유체는 그 관성에 의해 유동이 바로 휘어지지 못해 인접한 anode 채널로 유체가 유입되지 못하기 때문이다.

Anode 채널의 압력 강하량이 9 Pa인 경우 유량 균일도가  $\pm 1.24$  % 이내, Fig. 4-(b)에서 압력 강하량이 84 Pa인 경우 유량 균일도가  $\pm 0.066$  % 이내, 압력 강하량이 148 Pa인 경우 유량 균일도가  $\pm 0.048$  % 이내로 나타나는 것을 알 수 있다. 위의 결과로 미루어 보아 anode 채널의 압력 강하가 크면, 즉 anode 채널에서 porous medium에 의한 저항이 있으면 유체 관성에 의한 유동이 억제되어 모든 채널로 고르게 유동이 유입되어 유량 균일도가 향상되는 것을 볼 수 있다. 유로의 저항



(a) Case 1-1



(b) Case 1-2, 1-3

Fig. 4 Flow-rate uniformity of anode channels when pressure drop condition of anode channels is (a) 9 Pa (b) 84 and 148 Pa

이 없는 case 1-1에 대비하여 porous 설정이 추가된 case1- 2, 1-3에서 유량 균일도가 0.1 % 이하로 급격히 향상되는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.3 절 채널 온도 조건에 따른 유량 균일도 분석

IIR 채널의 온도 조건이 다른 경우의 유량 균일도를 분석한 결과를 Fig. 5에 표시하였다. 모든

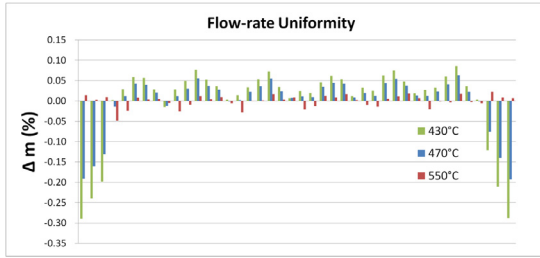
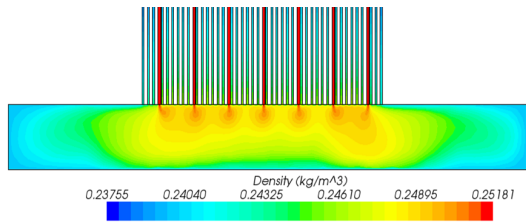
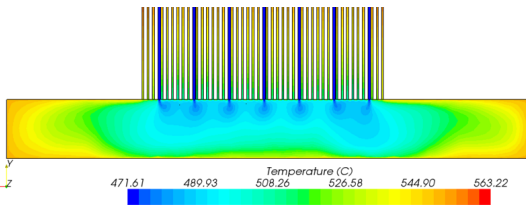


Fig. 5 Flow-rate uniformity of anode channels when temperature condition of IIR channels is 430, 470 and 550 °C (Case2)



(b)

Fig. 6 Temperature field (a) and density field (b) of case 2-2



(a)

부분의 온도가 550 °C로 같은 경우에 대비하여 IIR 채널 온도와 anode 채널 간의 온도차가 존재할 때 유량균일도가 저해되는 결과를 확인할 수 있다. IIR 채널의 온도가 470 °C인 경우 유량 균일도는  $\pm 0.19\%$ , 430 °C인 경우  $\pm 0.29\%$ 로 온도가 낮아질수록 유량 균일도가 저해되는 사실을 알 수 있다. 그리고 온도 경계조건이 달라짐에 따라 유량 분포 양상이 달라지게 되는데 Fig. 6의 온도장에서 확인할 수 있듯이 IIR 채널의 온도가 낮아짐에 따라 유체의 밀도가 높아지게 되고, 이는 동일 유량에서 유체의 속도 감소를 일으키며 결국 유체의 관성력이 감소되어 인접한 anode 채널들로 유입이 쉬워지기 때문이다. 또한 고온의 매니폴드 및 외부와 만나는 최외곽 anode 채널 하단부에서는 강한 와류가 발생하고 있으므로 주위보다 밀도가 낮은 유체가 와류에 의해 중앙으로 집중되면서 최외곽 채널로 유입되는 양이 작아지게 되어 유량 균일도가 저해된다.

## 4. 결론

간접내부 개질형 MCFC 스택 시스템 중 anode manifold에 대한 단순화 3차원 CFD 유동 해석을 수행하여 채널에서의 압력 강하량 및 온도 조건에 따른 anode 채널의 유량 균일도에 대하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Anode 채널의 다공성 성질이 커질수록 유로 채널에서 저항에 의한 압력 강하량이 커지게 되고 유량 균일도가 향상 된다.

(2) IIR 채널 온도와 anode 채널 온도 및 매니폴드 온도 차이가 커질수록 유량 균일도가 저해 된다.

본 연구를 통하여 적은 비용으로 규모가 큰 MCFC 연료전지 스택의 중요한 설계인자인 유량 균일도를 분석하였고 이는 시스템 설계 시 중요한 데이터로서 의의가 있다.

## 후기

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

## References

- [1] D. Marra, 2008, "Gas distribution inside an MCFC", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 3173-3177.
- [2] M. Baranak, H. Atakul, 2007, "A basic model for analysis of molten carbonate fuel cell behavior", Journal of Power Sources, Vol. 172, pp. 831-839.
- [3] S-F. Liu, H-S. Chu, P. Yuan, 2006, "Effect of inlet flow maldistribution on the thermal and electrical performance of a molten carbonate fuel cell unit", Journal of Power Sources, Vol. 161, pp. 1030-1040.
- [4] T. Okada, S. Matsumoto, M. Matsumura, M. Miyazaki, M. Umeda, 2006, "Gas distribution in molten-carbonate fuel cells", Journal of Power Sources, Vol. 162, pp. 1029-1035.
- [5] H. S. Kim, D. H. Choi, 2006, "An improved 3D heat & fluid flow analysis for the MCFC unit cell with internal manifolds", Trans. of the KSME, pp. 1764-1770, KSME.