

## 용융탄산염 연료 전지 스택의 성능 및 열전달 해석

### An Analysis on the Performance and the Heat Transfer of Molten Carbonate Fuel Cell Stack

구 자 용\*, 서 종 철\*, 김 유\*\*  
J. Y. Koo, J. C. Suh, Y. Kim

**Key words** : Molten Carbonate(용융탄산염), Fuel Cell(연료전지), Electrochemical Reaction(전기화학반응), Electrode Model(전극모델), Current Density(전류밀도), Numerical Analysis(수치해석)

#### Abstract

A numerical investigation has been carried out for the electrochemical reaction, mass and heat transfer characteristics of the Molten Carbonate Fuel Cell(MCFC) stack. The effects of cooling air channel and water gas shift reaction were taken into account.

The current density distribution of electrodes, the molecular fractions of reactant gasses and three dimensional temperature distribution can be calculated and shown by several lines of equivalent values. The results have been compared with the existing ones, and reasonable agreement has been obtained.

To examine the influence of changing parameters, such as the composition of reactant gases, the target average current density, the utilization of reactant gases, the cooling air inlet temperature and flow rates, the computer simulation has been done.

The analysis method and computer program developed in this study will be greatly helpful to design and verify the optimum operating condition of MCFC stack.

#### 기 호 설 명

<p><math>A</math> : 전열면적 [<math>\text{cm}^2</math>]</p> <p><math>C</math> : 비열 [<math>\text{cal/mol} \cdot \text{K}</math>]</p> <p><math>E</math> : 이론 발전 전압 [volt]</p> <p><math>F</math> : 파라데이 정수 [coulomb/equiv]</p> <p><math>j</math> : 국부 전력 밀도 [<math>\text{mA/cm}^2</math>]</p> <p><math>\dot{m}</math> : 질량유량 [<math>\text{mol/hr}</math>]</p> <p><math>\dot{q}</math> : 단위체적당 생성열 [<math>\text{cal/cm}^2</math>]</p>	<p><math>T</math> : 절대온도 [K]</p> <p><math>U</math> : 이용율</p> <p><math>V</math> : 전지 동작 전압 [volt]</p> <p><math>y</math> : 수증기 개질 반응에 관여한 기체의 몰수 [mol]</p> <p><math>Z</math> : 분극저항 [ohm]</p> <p style="text-align: center;">첨 자</p>
---	--

\* 충남대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 충남대학교 기계공학과

*an* : 음극  
*cath* : 양극

- c : 냉각공기
- f : 연료
- o : 산화제

## 1. 서 론

연료전지는 F.T.Bacon<sup>1)</sup>에 의해 KOH를 전해질로 사용한 알칼리 전지가 개발되어 실용화된 이후 1970년대의 에너지 파동을 겪으면서 에너지 절감 측면에서 민수 전력공급을 위한 연료전지 개발이 본격적으로 추진되었다. 연료에 포함된 수소와 공기중의 산소가 전기화학 반응에 의해 연소과정 없이 연속적으로 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 연료전지 발전은 Carnot 사이클에 의한 열역학적 효율제한을 받지 않고 소음과 유해 가스 배출이 거의 없어 환경 공해 측면에서 매우 유리하다. 또 반응기체 공급량의 조절로 전기 출력이 쉽게 제어되고 구성부품의 모듈화로 대량생산과 전력수요 변화에 신속한 대처가 가능하다.<sup>2)</sup>

현재 인산형 연료전지는 실용화 단계에 있는 제 1세대 연료전지로 11MW급의 발전소가 시험가동 중에 있어 곧 상업발전이 이루어 질 전망이다. 제 2세대 연료전지로 불리는 용융탄산염형은 현재 개발단계에 있기 때문에 이에 관한 연구가 절실히 요구된다. 용융탄산염 연료전지는 약 650°C의 고온에서 동작하므로 인산형과는 달리 반응을 위한 촉매가 필요없고, 전지내에서 직접 연료를 개질(reforming)하는 내부 개질방식이 가능하며 수소, 일산화탄소 및 메탄의 전기화학적 반응이 가능하기 때문에 천연가스나 석탄가스, 석유가스등 사용연료가 다양하다.<sup>3)</sup>

연료전지는 동작중에 전극에서의 전기화학 반응에 의한 발열등으로 내부온도가 상승하고 전지온도는 성능과 직접적인 관계가 있으며, 과도한 온도 상승은 전해질의 증발, 전극손상, 열변형에 의한 전해질 손실 등을 유발시켜 전지의 수명을 단축시키므로 여러 운전 조건에서 연료전지의 성능과 온도분포를 구하는 연구가 연료전지 개발에 필수적인 과제이다.

1960년대초 W.E.Simon<sup>4)</sup>은 아폴로 우주선의 연료전지 작동에 관한 기본 연구에서 Bacon 형에 대한 이론을 정립하고 부하 변동에 따른 시스템 성능

변화를 계산하였으며 1960년대 말에는 Y.Bayazitoglu<sup>5)</sup>가 KOH를 전해질로 사용한 순수 수소-산소 계통의 연료전지에 대하여 열역학적 해석 모델을 세우고 수치해를 구하여 기존의 실험결과와 비교하였다. K.A.Alkasab와 C.Y.Lu<sup>6)</sup>는 인산형 연료전지에 대해 성능과 온도분포를 구하였으며 오진훈<sup>7)</sup>은 인산형에서 기체유동중의 압력 손실과 확산을 고려한 해석 모델을 만들어 여러가지 유동 형태에 대해 시뮬레이션하였다.

용융탄산염형에 대한 이론적 연구는 D.Gidaspow<sup>8)</sup>가 전극과 전지에 대한 일반적인 수학 모델을 제시한 이후 G.Wilemski와 T.L.Wolf<sup>9)</sup>가 단순기공 전극 모델로 전기 화학반응 과정을 취급하여 온도분포와 성능을 수치해석으로 계산하였으며 J.R.Selman<sup>10)</sup>은 분극 저항에 대한 계산식을 구하였고 최근에 일본의 전력 중앙연구소에서도 실험에 의해 분극저항을 나타낼 수 있는 상관관계식을 발표한 바 있다. 한편 국내에서는 KIST를 중심으로 용융탄산염 연료전지의 요소기술과 단위전지 제작을 위한 연구가 진행되고 있으나<sup>11)</sup> 성능모델에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 논문에서는 60cm×60cm 크기의 단위전지 5장마다 냉각공기 채널이 들어 있는 용융탄산염 연료전지 스택을 대상으로 연료와 산화제의 소모량에 따른 전지판에서의 전류 밀도 분포 및 동작 전압을 계산하고 수증기 개질반응(water gas shift reaction)이 평형 상태를 유지한다고 가정한 상태에서 내부 발열에 의한 3차원 스택내의 온도 분포를 유한차분법(FDM)으로 수치해석하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 스택의 구조

연료전지의 전기 출력은 고전류와 저전압이기 때문에 요구전압을 얻기 위해서는 단위전지를 적층하는데 이를 스택이라 한다. 전지 동작에 필요한 연료와 산화제가 각 단위전지로 균등하게 흐르도록 매니폴드(manifold)를 잘 설계하여야 하는데 Fig.1은 일반적으로 많이 사용되는 외부 매니폴딩 방식을 채택한 MCFC 스택의 구성도로 용융탄산염과 세라믹 성분이 50 : 50인 전해질 판을 중심으로 음극과 양극 및 분리판이 적층되어 있고 연료와 산화제의

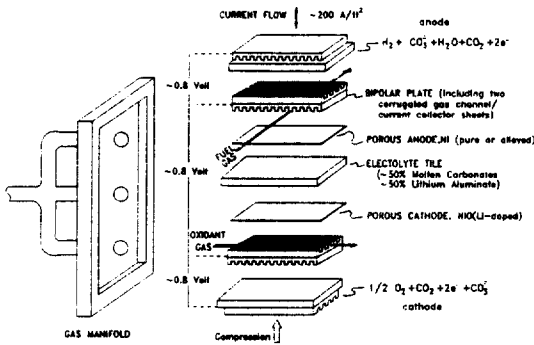
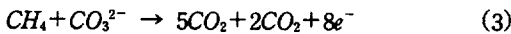
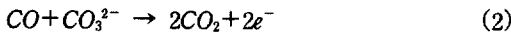
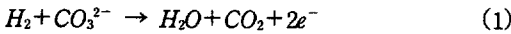


Fig. 1 Schematic of MCFC stack

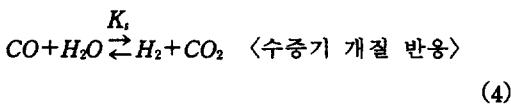
유동형태는 직교류(cross flow)이다.

2.2 전기-화학 반응

반응에 의해 전기가 생성되는 전기-화학반응은 음극에서 일어나며 MCFC의 경우 연료의 종류에 따라 다음의 3가지 반응이 있을 수 있다.

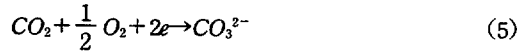


위의 세 반응 중 주된 고려 대상은 수소의 산화반응인 (1)식이 되며 (2) 과정은 반응속도가 느리고 (3) 과정은 일반적으로 사용되는 연료중 메탄의 농도가 낮기 때문에 무시한다. 전기-화학 반응외에 CO가 수증기와 결합하여 수소를 생성하는 수증기 개질 반응이 일어나는데 본 연구에서는 전지 전체에 걸쳐 이 반응이 평형상태에 있는 것으로 간주하여 각 기체 성분의 몰 분율을 계산하였다.



반응의 평형상수  $K_p$ 는 온도의 함수로 표시되며 925 K에서 1.98이다.

음극에서 일어나는 반응은 이산화탄소가 산소와 결합하여 탄산이온을 생성하는 전기-화학 반응으로



로 표시되며 생성된 탄산이온은 전해질을 통해 음극으로 전달되고 음극에서 방출되는 전자는 외부 회로를 통해 양극으로 이동하여 반응에 사용된다. 전체적으로 보면 음극에서 1 mol의 이산화탄소가 생기고 양극에서 같은 양의 이산화탄소가 사용되므로 전해질 내의 탄산이온 농도를 유지하려면 음극에서 생긴 이산화탄소를 양극으로 공급하여 사용하는 것이 바람직하다.

2.3 기체소모량과 전류밀도

전지내에서 소모되는 반응기체의 양은 수소와 이산화탄소의 이용율  $U_{H_2}$ 와  $U_{CO_2}$ 에 의해 정의된다.

$$U_{H_2} = \frac{\text{전지내에서 사용된 수소량}}{\text{유입 연료중 수소량}} = \frac{(\dot{m}_{H_2})^i - \dot{m}_{H_2}}{(\dot{m}_{H_2})^i} \quad (6)$$

마찬가지로

$$U_{CO_2} = \frac{(\dot{m}_{CO_2})^i - \dot{m}_{CO_2}}{(\dot{m}_{CO_2})^i} \quad (7)$$

여기서 상첨자  $i$ 는 입구측의 유입량을 의미한다.

전기-화학 반응에 의해 발생하는 전류는 Faraday 법칙과 이용율의 정의에 의해

$$\frac{\partial U_{H_2}}{\partial x} = \frac{j}{2F(\dot{m}_{H_2})^i} \quad (8)$$

$$\frac{\partial U_{CO_2}}{\partial y} = \frac{j}{2F(\dot{m}_{CO_2})^i} \quad (9)$$

여기서

- $x$  : 연료의 유동방향
- $y$  : 산화제의 유동방향

$j$  : 국부 전류 밀도(mA/cm<sup>2</sup>)  
 $F$  : Faraday constant(Coulomb/equiv)

2.4 전극 모델

전지의 동작전압  $V$ 는 이론 발전 전압인 Nernst 포텐셜  $E$ 에서 각 전극의 분극저항 및 내부저항에 의한 전압 손실을 뺀 값으로 표시된다. 즉

$$V = E - j(Z_{an} + Z_{cath} + R_{ir}) \quad (10)$$

$Z_{an}$ ,  $Z_{cath}$  : 음극 및 양극에서의 분극저항

$$R_{ir} : \text{내부저항} = A_r \exp\left(\frac{-\Delta H_r}{RT}\right) \quad (11)$$

$A_r$  : 내부저항 빈도계수

$\Delta H_r$  : 내부저항 활성화 에너지

본 연구에서는 Selman 이 제시한 분극저항 계산식을 사용하였다.<sup>10)</sup>

$$Z_{an} = 0.4567 \times 10^{-7} (H_2)^{-1.801} (CO)^{1.533} (CO_2)^{-1.480} \exp\left(\frac{13140}{T}\right) \quad (12)$$

$$Z_{cath} = 7.504 \times 10^{-6} (O_2)^{-0.43} (CO_2)^{-0.09} \exp\left(\frac{9361}{T}\right) \quad (13)$$

2.5 에너지 방정식

전기-화학 반응과 수증기 개질 반응에 의해 발생하는 열은 냉각공기와 연료 및 산화제에 의해 외부로 방출되고 에너지 방정식은

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S = 0 \quad (14)$$

으로 표시되며 여기서  $S$ 는 단위체적당 열발생율이다.

전기-화학 반응열  $Q_c$ 는

$$Q_c = j \left[ \frac{\Delta H_{H_2O}(T)}{2} + V \right] \quad (15)$$

수증기 개질 반응열  $Q_s$ 는

$$Q_s = \frac{d \dot{m}_{co}}{dx} \Delta H_s(T) \quad (16)$$

전지판과 반응기체(연료 및 산화제) 사이의 열전달  $Q_r$ 는

$$Q_r = A_r h_r (T - T_f) + A_o h_o (T - T_o) \quad (17)$$

냉각판과 냉각공기사이의 열전달  $Q_c$ 는

$$Q_c = A_c h_c (T - T_c) \quad (18)$$

여기서

$A_f$ ,  $A_o$ ,  $A_c$  : 연료, 산화제, 냉각공기의 전열면적  
 $h_f$ ,  $h_o$ ,  $h_c$  : 연료, 산화제, 냉각공기의 대류 열전달 계수

$T_f$ ,  $T_o$ ,  $T_c$  : 연료, 산화제, 냉각공기의 온도  
 각 유동기체의 온도 분포는 다음식에서 구한다.

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{h_r A_f}{\dot{m}_f C_f} (T - T_f)$$

$$\frac{\partial T_o}{\partial y} = \frac{h_o A_o}{\dot{m}_o C_o} (T - T_o)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial x} = \frac{h_c A_c}{\dot{m}_c C_c} (T - T_c)$$

경계 조건은 다음과 같다.

I) 단열가정 :  $x=0$  ;  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ,  $y=0$  ;  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$

$$x=Lx : \frac{\partial T}{\partial x} = 0,$$

$$y=Ly : \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

II) 대칭조건 :  $z=0; \frac{\partial T}{\partial z} = 0,$

$z=Lz; \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

III) 입구조건 :  $x=0; T_o=T_{oi}, x=L; T_c=T_{ci}$

$y=0; T_f=T_{fi}$

3. 수치해석

3.1 해석대상의 단순화

해석 대상을 단위전지 5층마다 냉각판이 1층씩 주기적으로 적층된 MCFC 스택으로 하였으며 다음과 같이 단순화 하였다.

- 1) CO에 의한 수증기 개질 반응은 평형상태를 유지한다.
- 2) 격자로 분할된 미소전지내에서 각 기체의 조성, 전류밀도 및 온도는 일정하다.
- 3) 스택의 끝은 단열되어 있다.
- 4) 전지판내의 전도에 의한 열전달과 유로와 유동기체와의 대류 열전달이외의 열전달은 무시한다.
- 5) 전지내에서의 동작전압은 일정하다.
- 6) 기체의 유로는 유동방향으로 폭과 깊이가 일정하다.

7) 기체의 조성은 유로의 깊이에 관계없이 일정하다.

8) 기체의 흐름은 2차원, 이상기체, 층류유동이고 비압축성 유체이다.

9) 유동기체의 온도분포와 속도분포는 충분히 전개된 형태이다.

수치해석을 위해 Fig.2와 같이 x, y방향으로는 12×12의 격자로 나누고 z방향은 전지판과 냉각판의 갯수대로 구분하였으며 Tridiagonal Matrix Algorithm(TDMA)을 사용하고 시행오차법에 의해 반복 계산하였다.

3.2 물질 균형식의 차분화

전지판내의 전류밀도는 반응기체의 물분율과 밀접한 관계가 있으며 Fig.3과 같이 연료와 산화제가 직교류로 흐르는 경우 미소전지(i, j, k)에서 각 반응기체의 유량과 전류밀도와의 관계는 Faraday 법칙으로부터 아래와 같이 나타낼 수 있으며 반응에 사용된 기체의 mol수가 계산되면 전극모델식에서 전류를 계산할 수 있다.

I) 연료기체의 차분화된 물질균형식

$$\dot{m}_{in}(i, j+1, k) = \dot{m}_{in}(i, j, k) - \frac{j(i, j, k)A(i, j, k)}{2F} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{co2}(i, j+1, k) = \dot{m}_{co2}(i, j, k) + \frac{j(i, j, k)A(i, j, k)}{2F} \quad (20)$$

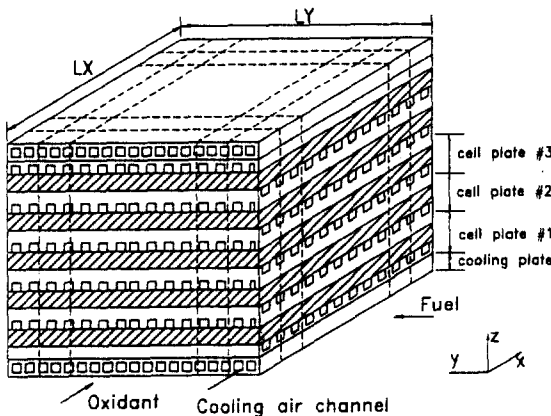


Fig.2 Geometric model for FDM analysis  
Fuel Oxidant Cooling air channel

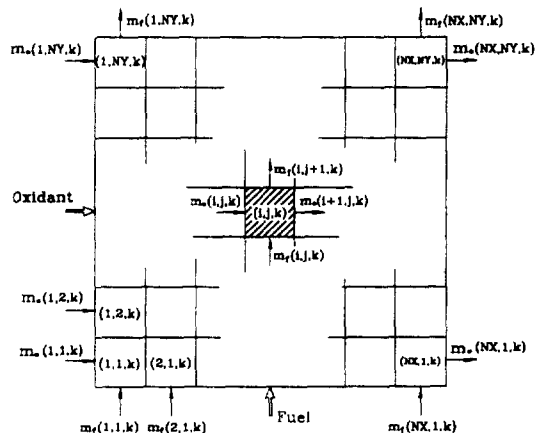


Fig.3 Finite difference model for mass balance

$$\dot{m}_{H_2O}(i,j+1,k) = \dot{m}_{H_2O}(i,j,k) + \frac{j(i,j,k)A(i,j,k)}{2F} \quad (21)$$

II) 산화제 기체의 차분화된 물질 균형식

$$\dot{m}_{CO_2}(i+1,j,k) = \dot{m}_{CO_2} - \frac{j(i,j,k)A(i,j,k)}{2F} \quad (22)$$

$$\dot{m}_{CO_2}(i+1,j,k) = \dot{m}_{CO_2}(i,j,k) - \frac{j(i,j,k)A(i,j,k)}{2F} \quad (23)$$

연료기체중에 CO가 있을 경우 수증기 개질 반응을 고려하여야 하며 이때의 평형 조건식은 다음과 같다.

$$K_r = \frac{((H_2) + y)((CO_2) + y)}{((H_2O) - y)((CO) - y)} \quad (24)$$

여기서 y는 수증기 개질 반응에 관계하는 각 기체성분의 몰분율을 나타낸다.

### 3.3 에너지 방정식의 차분화

에너지 방정식(14)에서의 S는 전기화학 반응에 의한 발생열과 대류에 의한 열손실의 차이로서 전지판의 경우와 냉각판의 경우로 나누어 차분화하면 다음과 같이 표시된다.

I) 전지판의 경우

$$S = \dot{q} - \dot{m}_o C_o \frac{T_o(i,j,k) - T_o(i-1,j,k)}{\Delta x} - \dot{m}_f C_f - \dot{m}_f C_f \frac{T_f(i,j,k) - T_f(i,j-1,k)}{\Delta y} \quad (25)$$

II) 냉각판의 경우

$$S = \dot{m}_c C_c \frac{T_c(i,j,k) - T_c(i-1,j,k)}{\Delta x} \quad (26)$$

여기서

- $\dot{q}$  : 단위체적당 열 발생량
- $\dot{m}_f, \dot{m}_o, \dot{m}_c$  : 연료, 산화제, 냉각공기의 유량
- $C_f, C_o, C_c$  : 연료, 산화제, 냉각공기의 비열

반응기체의 온도를 차분화된 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_r(i,j,k) = T_r(i,j-1,k) + [T_r(i,j-1,k) - T_r(i,j-1,k)]$$

$$\left[ 1 - \exp\left(\frac{h(i,j,k)A_f}{\dot{m}_f C_f} \Delta y\right) \right] \quad (27)$$

$$T_o(i,j,k) = T_o(i-1,j,k) + [T_o(i,j,k) - T_o(i-1,j,k)]$$

$$\left[ 1 - \exp\left(\frac{h(i,j,k)A_o}{\dot{m}_o C_o} \Delta y\right) \right] \quad (28)$$

$$T_c(i,j,k) = T_c(i-1,k) + [T_c(i,j,k) - T_c(i-1,j,k)]$$

$$\left[ 1 - \exp\left(\frac{h(i,j,k)A_c}{\dot{m}_c C_c} \Delta x\right) \right] \quad (29)$$

### 3.4 수치해석 절차

스택내의 전류밀도와 온도를 구하기 위한 계산 절차는 다음과 같다.

- 1) 초기조건으로부터 입구에서의 가스조성, 유량 및 칫수를 설정한다.
- 2) 초기온도 및 전류밀도를 가정한다.
- 3) 전압-전류 계산식에서 전류밀도가 수렴할 때까지 반복 계산한다.
- 4) 냉각기체와 반응기체의 몰분율과 해석에 관련된 물성치를 계산한다.
- 5) 에너지 방정식에 의해 온도분포를 계산한다.
- 6) 전지내에서의 발생열과 방출열을 계산한다.
- 7) 계산결과가 수렴조건을 만족할 경우 그 결과를 출력한다.

수렴조건은 발생열과 방출열을 계산하여 그 차이가 1% 이내, 전지 온도변화는 0.1°C 이하로 정하였다.

## 4. 해석결과 및 고찰

### 4.1 기존 연구결과와의 비교

용융탄산염 연료전지의 성능을 모델링하기 위한 기존 연구중에서 본 논문 내용과 비교가 가능한

연구로는 G.Wilemski와 T.L.Wolf에 의한 2차원 해석과 일본 Hitachi사의 연구팀이 개발한 3차원 해석이 있으며 본 연구와 해석조건을 비교하면 아래 Table 1과 같다.

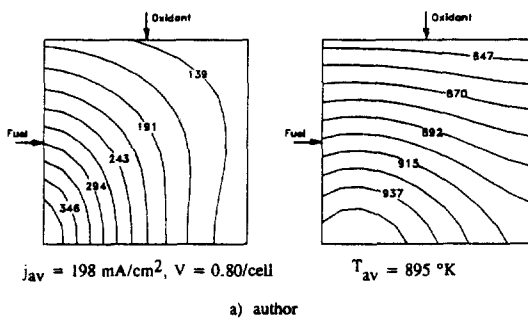
단위전지에 대한 2차원 해석 결과와 본 연구 결과를 비교하면 Fig4에서 보는 것같이 평균 전지온도와 발전전압이 거의 같고 온도나 전류밀도 분포가 연료입구와 산화제 출구의 교차점에서 가장 높게 나타난 점도 서로 일치한다. 전류밀도의 변화폭이 서로 다른 것은 전극 모델의 차이에서 나

타난 현상이며, G.Wilemski의 경우 연료 입구쪽 전지의 온도를 연료 온도와 같도록 가정하였기 때문에 이 부근의 온도 곡선이 급하게 변화하는 것으로 나타났다.

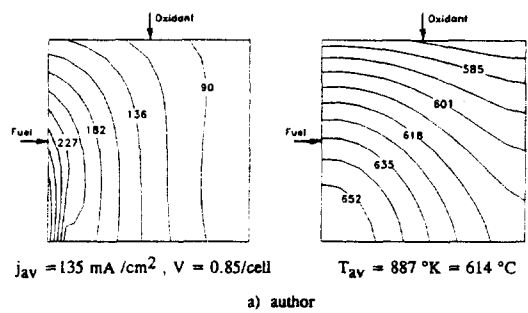
Fig.5는 목표전류 밀도를 135A/cm<sup>2</sup>으로 했을 경우 Hitachi사의 연구결과와 비교한 것으로 전류밀도는 분포양상이 서로 거의 같으나 전지의 평균온도가 본 연구결과에서 높게 나타난 이유는 수증기 개질 반응에 의한 발열 때문으로 생각된다. Fig4와 Fig5에서 본 논문의 온도분포가 고르게 나타났는데 이는

Table 1 Comparison of analysis condition

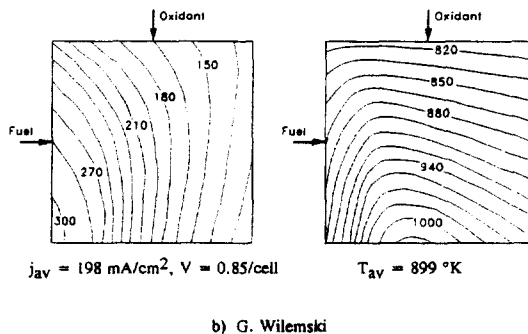
Analysis Condition	Author	G.Wilemski&T.L.Wolf <sup>9)</sup>	Hitachi Co. <sup>12)</sup>
Water gas shift reaction	Considered	Considered	Not considered
Dimensional	3-D	2-D	3-D
Electrode model	Selman's model	Porous electrode model	Thin film model
Cell type	Stack	Single cell	Stack
Cooling	1 cooling plate per every 5 cells	No cooling plate	No cooling plate



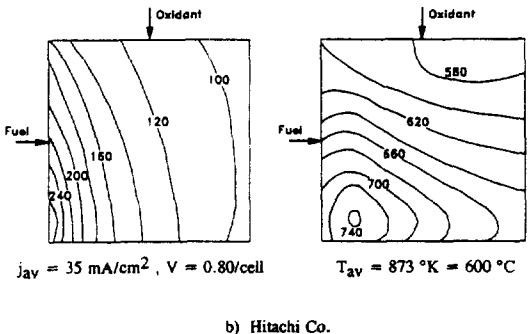
a) author



a) author



b) G. Wilemski



b) Hitachi Co.

Fig.4 Comparison between G.Wilemski and author

Fig.5 Comparison between Hitachi Co. and author

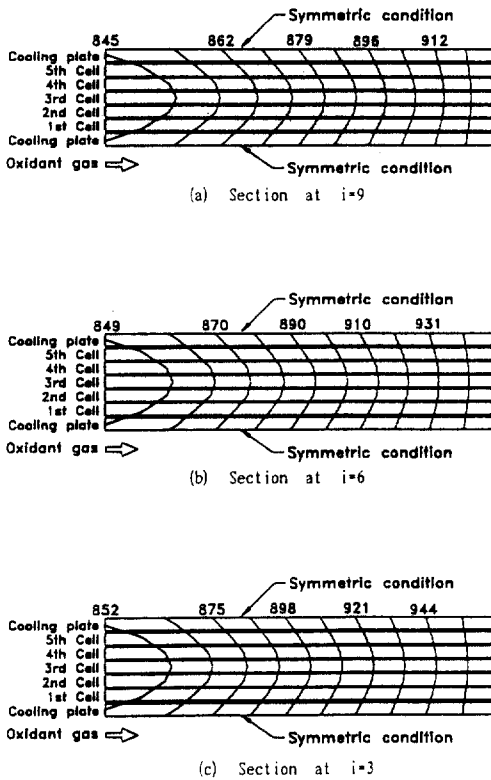


Fig.6 Temperature distribution in stacking direction

냉각판에 의한 냉각효과 영향 때문이다.

본 연구에서의 계산결과로부터 적층단면에 대한 온도분포를 나타내면 Fig.6과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 온도분포는 산화제 유동방향과 밀접한 관계가 있는데 이는 연료에 비해 산화제의 유량 및 열용량이 크기 때문이다.

#### 4.2 연료 및 산화제 종류의 영향

수소의 물분율이 높은 연료(high Btu fuel)와 물분율이 낮은 연료(low Btu fuel)인 석탄가스와 연료 및 이산화 탄소와 산소의 농도를 높인 정제된 산화제(noble oxidant)와 그렇지 않은 표준 산화제(standard oxidant)에 대해 계산한 결과 Fig.7에서 보는 것처럼 High-Noble 조합의 경우가 Low-Standard 조합의 경우보다 온도와 전류밀도 분포가 고르며 출력도 2.16KW, 1.44KW로 약 1.5배 정도 높게 나타났다.

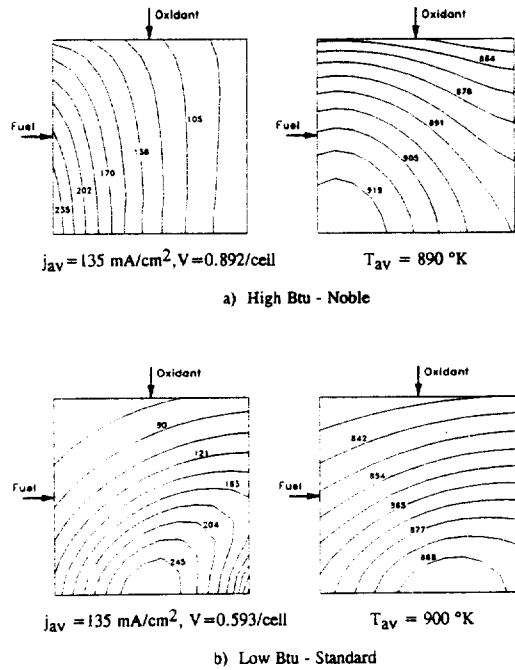


Fig.7 Current and temperature distribution on different fuel and oxidant gas

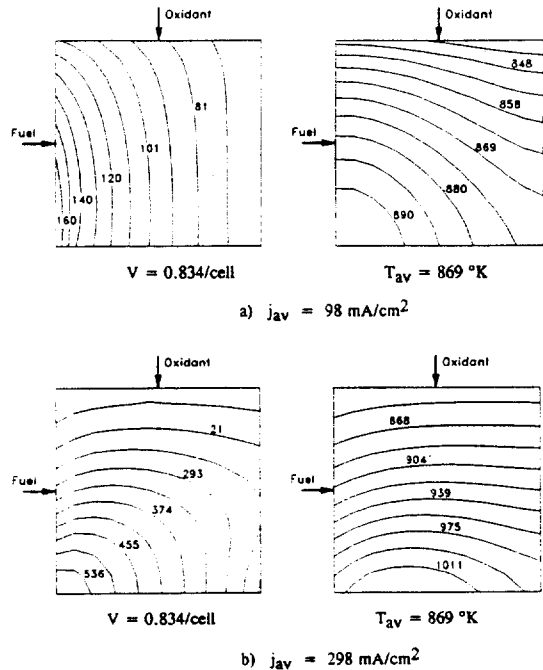


Fig.8 Effect of target current density change



4.3 목표 전류 밀도 영향

목표 전류밀도값을 증가시키면 동작전압은 감소하고 연료와 산화제 공급량은 늘어나며 평균온도와 온도차는 증가한다. 전류밀도의 차이가 커져서 Fig.8에서와 같이 연료입구와 산화제 출구의 교차지역에서 부분적으로 전류밀도와 온도가 과다하게 상승하는 구역이 발생한다.

4.4 이용율의 영향

연료의 이용율을 75%와 50%, 산화제의 이용율이 50%, 25%, 10%인 각 경우에 대해 계산한 결과는 다음 Table 2와 같고 성능면에서만 고려할 때 가장 적합한 것으로 판단되는 연료 50%, 산화제 50%인 경우의 전류밀도와 온도 분포는 Fig.9와 같다.

연료와 산화제의 이용율이 모두 50%인 경우 출

력이 제일 높고 Fig.9에서와 같이 전류밀도 분포도 가장 균일하다. 연료의 이용율이 높으면 경제적으로 유리하지만 전류밀도 분포가 고르지 못하게 되어 전지 수명을 단축시키게 되고 산화제의 이용율을 낮출수록 평균온도와 온도차이가 낮아져 운전에 유리하다.

4.5 냉각공기의 영향

냉각채널로 유입되는 공기의 온도를 낮추면 동작전압이 감소하고 전류밀도와 온도 분포가 불균일해진다. Table 3의 계산결과를 보면 843K의 경우는 전지 평균온도가 높기 때문에 813K가 적당한 것으로 판단된다.

냉각공기 유량은 Table 4에서 보는 바와 같이 시간당 3,000mol 이상의 유량이면 충분한 것으로 보인다.

Table 2 The effects of utilization change

Utilization of Fuel	75%			50%		
	50%	25%	10%	50%	25%	10%
Utilization of Oxidant						
Output Voltage(V)	3.76	3.62	3.30	3.84	3.69	3.37
Output Power(KW)	2.68	2.58	2.35	2.74	2.63	2.40
Mean Temp(K)	935	905	865	923	896	862
Max Temp.(K)	980	966	911	964	950	902
$\Delta T_{max}(K)$	113	127	87	109	116	78
Mean C.D.(mA/cm <sup>2</sup> )	198	198	198	198	198	198
Max C.D.(mA/cm <sup>2</sup> )	317	362	329	246	288	287
$\Delta j_{max}(mA/cm^2)$	196	249	203	116	174	158
Fuel Flow Rate(mol/hr)	148	148	148	222	222	222
Oxidant Flow Rate(mol/hr)	457	914	2280	457	914	2280

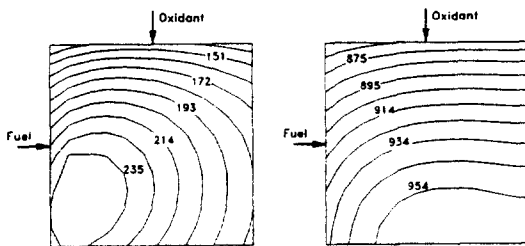


Fig.9 Current density and temperature distribution at  $U_f=50\%$ ,  $U_{oxi}=50\%$

Table 3 Effect of cooling temperature

Inlet Temp	843K	813K	783K	753K
Output Voltage(V)	3.73	3.62	3.49	3.34
Output Pwr.(KW)	2.66	2.58	2.48	2.38
Mean Temp.(K)	915	903	891	880
Max. Temp.(K)	965	966	971	980
$\Delta T_{max}(K)$	103	127	155	187
Mean C.D.(mA/cm <sup>2</sup> )	198	198	198	198
Max C.C.(mA/cm <sup>2</sup> )	334	362	403	465
$\Delta j_{max}(mA/cm^2)$	210	249	305	389

Table 4 Effect of cooling air flow rate

Air Flow Rate(mol/hr)	100	3000	6000	9000	12000	15000
Output Voltage(V)	3.72	3.63	3.62	3.62	3.62	3.61
Output Owr.(KW)	2.65	2.59	2.58	2.58	2.58	2.57
Mean Temp.(K)	954	906	903	902	901	901
Max. Temp.(K)	1080	975	966	963	961	960
$\Delta T_{max}(K)$	237	135	127	124	123	122
Mean C.D.(mA/cm <sup>2</sup> )	198	198	198	198	198	198
Max C.D.(mA/cm <sup>2</sup> )	488	375	362	357	355	353
$\Delta j_{max}(mA/cm^2)$	392	263	249	244	242	240

### 5. 결 론

본 연구의 결과로 용융탄산염 연료전지 Stack의 성능 및 열전달 해석을 위한 3차원 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며 이를 이용한 해석으로 다음의 결론을 얻었다.

- 1) MCFC 스택의 온도 분포는 산화제 가스 흐름에 영향을 크게 받는다.
- 2) 연료 입구와 산화제 출구의 교차점 부근이 온도와 전류밀도 분포가 가장 높다.
- 3) 고급의 개질 연료와 정제된 산화제를 사용할 경우 전기 출력이 가장 높고 온도와 전류밀도 분포도 고르게 나타났다.
- 4) 목표 전류 밀도를 높일수록 전지 평균 온도와 동작전압이 높아진다.
- 5) 냉각공기 채널을 설치할 경우 온도와 전류 밀도 분포가 균일해진다.
- 6) 냉각공기 입구 온도는 813K, 유량은 3,000 mol/hr 이상이면 충분하다.

본 연구에서 적용된 해석방법과 컴퓨터 프로그램은 MCFC 스택의 설계 제작이나 최적 운전조건을 규명하는데 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

1. Bacon, F.T., 1960, "High Pressure Hydrogen-Oxygen Fuel Cell", in G.J.Young(ed.), Fuel Cell, Vol. 1, Van Nostrand Reinhold, NY.
2. 최수현, 1991, "연료전지 발전기술의 현황과 전망", 대한기계학회지 Vol. 31, No. 9, pp. 772

3. 홍성안, 오인환, 임희천, 1993, "연료전지 기술 개발현황 및 전망", 화학공업과 기술, Vol. 11, No. 2, pp. 65
4. Simon, W.E., 1962, "Transient thermodynamic analysis of fuel cell system", NASA
5. Bayazitoglu, Y., 1974, "Heat and mass transfer analysis of Bacon-type hydrogen-oxygen fuel cells", Ph.D.Thesis, University of Michigan
6. Alkasab, K.A., Lu, C.Y., 1984, "Phosphoric acid fuel cell power plant performance model and computer program", NASA CR-174638
7. 오진훈, 1989, "リン酸型 燃料電池 セル特性に及ぼす冷却氣體の影響に関する研究", 博士學位論文, 日本大學
8. Gidaspow, D., 1980, "Critical survey of mathematical modeling and experimental work in phosphoric acid and molten carbonate fuel cells", BNL 51274
9. Wilemski, G., Wolf, T.L., 1983, "Molten Carbonate Fuel Cell Performance Model", J.Electrochem. Soc, Vol. 130, No. 1, pp. 48-55
10. Selman, J.R., 1988, "Performance Models for Molten Carbonate Fuel Cells", Molten Salt Committee of the Electrochemical Society of Japan
11. 홍성안, 1992, "용융탄산염 연료전지 기본 기술 개발(IV)", 한국전력공사 기술연구원
12. Kobayashi, N., Fujimura H., and Ohtsuka, K., 1989, "Heat and mass transfer in a molten carbonate fuel cell", JSME International Journal Series II, Vol. 32, No. 3, pp. 420-427