

## 용융탄산염 단위 연료전지 내의 에너지와 물질수지에 의한 온도분포의 예측과 운전변수의 영향

안영주 · 정귀영<sup>†</sup> · 주재백 · 남석우\* · 오인환\* · 임태훈\* · 홍성안\*

홍익대학교 공과대학 화학공학과

\*한국과학기술연구원 화공연구부

(1994년 4월 13일 접수, 1994년 9월 14일 채택)

## Prediction of Temperature Distributions from Mass and Energy Balances and Effects of Operating Parameters in Molten Carbonate Unit Fuel Cell

Young-Joo Ahn, Gui-Yung Chung<sup>†</sup>, Jae-Back Ju,  
Suk-Woo Nam\*, In-Hwan Oh\*, Tae-Hoon Lim\* and Seong-Ahn Hong\*

*Dept. of Chemical Engineering, Hong-Ik University*

*\*Division of Chemical Engineering, Korea Institute of Science and Technology*

(Received 13 April 1994; accepted 14 September 1994)

### 요 약

용융탄산염 단위연료전지의 전류밀도와 온도분포를 모사하기 위한 수학적 모델이 제시되었다. 이 모델에서 전기화학반응에 의한 가스의 전환율, 전도, 대류 및 복사 열전달, 반응에 의한 가스의 생성열과 소모열을 고려하여 흐름형태가 십자류와 평행류일 때 단위전지 내의 전류밀도분포와 온도분포를 구하였다. 이것을 기초로 가스의 유량과 양극가스 대 음극가스의 유량비 변화에 대한 전류밀도분포와 온도분포를 구하였다. 전류밀도분포는 음극가스, 온도분포는 양극가스의 영향을 많이 받았는데 전지 내에 균일한 온도분포를 유지하기 위해서는 입구에서의 양극가스 대 음극가스의 유량비가 0.25 정도되도록 흘러보내는 것이 바람직했다.

**Abstract**—A mathematical model is proposed to simulate the current density and the temperature distribution of molten carbonate unit fuel cell. In this model, conversion of gases, heat transfer by conduction, convection, and radiation, and heat generation by reaction were considered for the cross and the parallel flow type fuel cell. Additionally, the effects of the gas flow rate and the ratio of the flow rate of the cathode gas to that of the anode gas were studied. It was seen that the current density distribution was affected by the anode gas, while the temperature distribution by the cathode gas. It was also found that, in order to get an uniform temperature distribution, the ratio of the flow rate of the cathode gas to that of the anode gas should be around 0.25.

### 1. 서 론

유인 우주선의 전원으로 사용되었다는 것이 보도되면서 세상에 알려지기 시작한 연료전지는 알칼리 연료

전지, 인산 연료전지, 용융탄산염 연료전지, 고체산화물 연료전지 등의 여러 형태로 많은 발전을 이루어 왔다. 이 중 제 2세대 연료전지라 부르는 용융탄산염 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cell : MCFC)는 사용되는 연

료가 석탄, 메탄, 일산화탄소 등으로 다양하고, 고온작동형으로 값비싼 촉매를 사용하지 않고도 높은 발전 효율을 얻을 수 있으며 환경보존에도 유리하다는 장점 때문에 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

용융탄산염 단위 연료전지는 음극가스와 접한 분리판, 연료가스 유로, 음극전극, 전해질판, 양극전극, 산화제 가스 유로, 양극가스와 접한 분리판으로 구성되어 있다. 양극가스는 산화제로 사용되며 산소와 이산화탄소가 탄산이온을 생성한다. 이 탄산이온은 전해질을 통해 음극으로 확산해 간다. 음극가스는 연료가스로 사용되며 확산되어온 탄산이온에 의해 수소가 산화하여 이산화탄소와 물을 생성한다. 여기서 연료가스와 산화제가스의 상호 흐름방향에 따라 평행류(parallel flow), 향류(counter flow), 십자류(cross flow) 형태의 전지로 분류한다.

연료전지 내에서는 전기화학 반응과 전해질판 내의 이온이동, 전극 내 전자이동에 따른 저항에 의해서 발열이 생긴다. 그런데 전지 내의 온도분포가 불균일하게 되면 전극-전해질판에서의 불균일한 전기화학반응, 열응력, 전해질의 증발, 재료의 부식 등이 발생하여 전지의 성능이 급격히 감소하게 된다. 따라서 연료전지의 성능과 내구성을 유지하기 위해서는 불균일한 발열을 제거하여 전지 내에 가능한 한 균일한 온도분포가 유지되어야 한다. 균일한 온도분포를 얻기 위한 노력의 일환으로 먼저 전지 내의 온도분포가 얻어져야 하고 그 온도분포에 영향을 주는 인자가 연구되어야 한다. 본 연구에서는 수학적 모델링으로 전지내부의 온도분포를 얻기 위해 물질수지 및 에너지수지에 따른 전지 내의 동적 특성이 연구되었다.

용융탄산염 연료전지에 대한 연구는 확산과 전기화학 반응에 관한 물질수지 및 에너지수지, 다공성 전극, 그리고 실제로 scale-up이나 적층에 대한 에너지수지에 대한 연구 등으로 나눌 수 있다. Scale-up이나 적층시에는 전지 내 각 부분의 상이한 온도로 인하여 전기 화학반응에 의한 반응열에 차이가 커져서 전지 내에 국부전류밀도와 국부온도에 차이가 커진다. 그러므로 연료전지 내 온도분포에 대한 수치모사는 소규모 전지의 경우는 등온을 가정하여 계산하여도 큰 오차가 없지만, 전지의 크기가 커질수록 이러한 사항들이 고려되어야 한다.

이 전에 연구된 연료전지 내 온도분포에 대한 수치모사를 살펴보면 Eisenberg와 Baker[1], Gidaspow와 Baker[2] 등은 평행류 단위 전지 내에서 전기화학반응에 의한 발열과 저항에 의한 발열, 분극에 의한 발열 등을 고려하여 단위 단열전지에 대한 온도분포를 구한 후, 이 결과를 기초로 하여 연료가스와 산화제 가스의 대류와 3차원적인 전도 등을 고려하여 연료전지 내 온

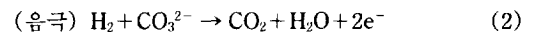
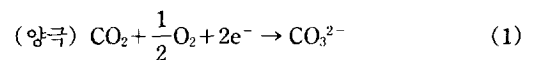
도분포를 연구하였다. Wolf와 Wilemski[3]는 십자류에서 전류밀도 분포와 온도분포에 대하여 연구하였다. 이들의 연구는 기존의 모델에 반응에 의한 가스소모와 분리판과 가스와의 열전달을 고려한 온도분포를 연구하였다. 수성가스 전이반응과 메탄의 반응은 무시하였고 사용기체의 열용량은 온도와 압력에 무관하다고 가정하고 923 K, 1 atm에서의 값을 사용하여 계산하였다. Kobayashi 등은 먼저 단위전지에 대해 전지 seal부와 각 부분의 접촉에 의한 열전도, 전기화학반응, 가스의 흐름 등을 고려한 해석 모델을 제안하여 해석 결과와 측정 결과를 비교 검토하였으며[4], 그런 후 12개로 구성된 적층전지에 대해 다양한 가스 흐름형태에서 전지의 밑바닥과 윗 덮개의 분리판에서의 열전달을 고려하여 전지의 적층시 성능과 온도변화에 대한 해석모델을 제안하여 해석 결과와 측정 결과를 비교 검토하였다[5]. Cao와 Masubuchi[6]는 전지의 부하가 급변화시 거리와 시간의 함수로 각 부분에서의 온도에 대한 동적 방정식을 유도하여 연료전지 내 온도분포를 구하였다.

본 연구에서는 전지가 등온이라고 가정할 때의 전류밀도에 따른 운전전압과 출력의 변화에 의해 전지의 성능변화를 연구하였다. 그리고 비등온 전지일 때의 전지 내의 발열, 전도, 대류, 복사, 주위와의 열손실, 생성·소모열 등을 고려하여 전류밀도분포와 온도분포를 구한 후, 가스의 유량변화와 단위전지의 기하학적 구조가 온도분포와 성능에 어떤 영향을 미치는가를 평행류와 십자류에 대해 연구하였다.

## 2. 물질수지 및 에너지수지

### 2-1. 용융탄산염 단위 연료전지

용융탄산염 연료전지 내의 작동 원리는 다음과 같다. 전극반응에 관여하는 전하 담체가 되는 것은 탄산이온( $\text{CO}_3^{2-}$ )이다.



양극에서 만들어진  $\text{CO}_3^{2-}$ 는 전해질을 통하여 음극쪽으로 확산, 전달되어 음극반응에 관여한다.

수소가스의 소모량과 전기화학 반응에 따라 발생하는 전류 사이에는 다음과 같은 Faraday법칙의 화학 양론식이 성립한다.

$$i = -nF \left( \frac{d\phi_H}{dx} \right) = nF \phi_H^o \left( \frac{d\lambda_H}{dx} \right) \quad (3)$$

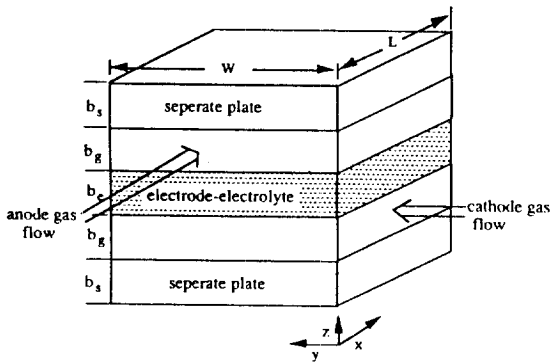


Fig. 1. Schematic diagram of the fuel cell used in the numerical analysis.

기타 다른 반응가스의 생성되거나 소모되는 양은 수소 가스의 소모량과 전지 내의 전기화학반응식인 식 (1), (2)에 따른 양론관계로부터 구해진다.

전지 내에서 발생하는 열은 전기화학 반응, 전해질판 내의 이온이동과 전극 내 전하이동에 따른 저항, 분극 등에 의하여 발생한다. 이 때, 단위면적당 생성되는 열  $q$ 는 전류밀도, 전압, 전지온도에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$q = i \left\{ \frac{-T\Delta S_{H_2O}}{nF} + (E - V) \right\} = -i \left( \frac{\Delta H_{H_2O}}{2F} + V \right) \quad (4)$$

여기서 우변의 첫째항은 전기화학반응에 의한 발열이고 둘째항은 저항과 분극에 의한 발열이다. 이 식에서 전지 내에서 발생하는 열이 가역적이고 평형상태에 있다면 개로전압  $E$ 는 영이 되고  $T\Delta S$ 는  $\Delta H$ 가 된다. 이렇게 생성된 열이 연료전지 내에서 전달되는 것은 전극-전해질판 내와 분리판 내의 전도에 의한 열전달, 전극-전해질판과 가스간, 분리판과 가스간, 분리판과 전지외부간의 대류열전달, 분리판과 전극-전해질판간의 복사열 전달 등에 의해서이다.

## 2-2. 가정

본 논문의 수치모사에 사용된 모형도는 Fig. 1과 같다. 연료전지의 치수는 길이  $L$ , 폭  $W$ , 분리판의 두께  $b_s$ , 가스유통로의 두께  $b_g$ , 전극-전해질판의 두께  $b_e$ 로 규정되었다. 실제 연료전지 가스유통로에서는 gas channel이 있지만 본 모델에서는 channel이 무시된 단면이 직사각형인 가스유통로로 가정되었다. 가스의 부피유속으로 실제 연료전지와 같은 값이 사용되었으므로 channel이 무시되었을 때의 선형유속은 실제보다 느린 속도가 사

용되었다. 음극전극, 전해질판, 양극전극을 하나의 동일한 열전도를 가진 전극-전해질판으로 간주하였다. 여기서 전극-전해질판의 열전도도  $k_e$ 는 Fourier 법칙에서 연속된 접촉면에 적용되는 총괄저항의 형태로 다음과 같이 계산되었다.

$$\frac{b_e}{Ak_e} = \frac{b_{ea}}{Ak_{ea}} + \frac{b_{em}}{Ak_{em}} + \frac{b_{ec}}{Ak_{ec}} \quad (5)$$

여기서  $A$ 는 연료전지의 단면적이다. 본 연구에서는 음극가스는  $x$ -방향으로, 양극가스는  $y$ -방향으로 흐르는 십자형 흐름과 양극과 음극가스 모두  $x$ -방향으로 흐르는 평행류 흐름에 대하여 연구되었다.

에너지 및 물질수지식을 위하여 다음과 같은 사항들이 가정되었다. 연료전지는 정상상태하에서 가동하고 있다고 가정하며 음극가스와 양극가스는 완전발달흐름 (fully developed flow)으로 가스유통로에서 channel의 두께방향으로는 조성이 일정하다고 가정한다. 가스유통로에서의 가스 내의 열전달은 대류에 의한 열전달이 가스의 전도에 의한 열전달보다 크므로 가스 흐름방향을 따른 대류만 고려하였다. 전지 내의 발열은 전기화학 반응이 일어나는 전극-전해질판 내에서 발생한다. 가스 유통로, 전극-전해질판, 분리판의 두께는 전지의 길이와 폭에 비해 매우 얇으므로 두께방향( $z$ -)의 온도기울기는 무시하였다. 마찬가지로 연료전지 측면을 통한 열 전달은 무시하였고, 분리판과 전극-전해질판간에 전달되는 복사에너지중에서 가스에 의해 흡수되는 복사에너지는 무시하였다.

## 2-3. 물질수지

정상상태하에서 음극가스인 수소와 양극가스인 이산화탄소의 물질수지식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{P}{RTW} \phi_g^o X_H^o \frac{\partial \lambda}{\partial x} = \frac{i}{2F} \quad (6)$$

$$\frac{P}{RTL} \phi_c^o X_C^o \frac{\partial \mu}{\partial y} = \frac{i}{2F} \quad (7)$$

여기서  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 각각 음극에서의 수소와 양극에서의 이산화탄소의 입구로부터 그 지점까지의 전환율을 나타낸다.

$$\lambda = \frac{\text{총 소모된 수소의 몰수}}{\text{입구에서의 수소의 몰수}} = \frac{\phi_H^o X_H^o - \phi_H X_H}{\phi_H^o X_H^o} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\text{총 소모된 이산화탄소의 몰수}}{\text{입구에서의 이산화탄소의 몰수}} \\ &= \frac{\phi_C^o X_C^o - \phi_C X_C}{\phi_C^o X_C^o} \end{aligned} \quad (9)$$

음극에서의 수소의 전환율  $\lambda$ , 양극에서의 이산화탄소의 전환율  $\mu$ 와 입구에서의 가스의 조성  $X^o$ 를 이용하여 연료전지 임의의 지점에서의 수소와 이산화탄소의 조성을 나타내면 다음과 같다.

$$X_H = \frac{(1-\lambda)X_H^o}{1+\lambda X_H^o} \quad (10)$$

$$X_{CO} = \frac{(1-\mu)X_{CO}^o}{1-\frac{3}{2}\mu X_{CO}^o} \quad (11)$$

나머지 가스의 연료전지 임의의 지점에서의 조성은 수소의 전환율과 이산화탄소의 전환율을 이용하여 반응식으로부터의 양론관계에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$X_{CO_2} = \frac{X_{CO}^o + \lambda X_H^o}{1 + \lambda X_H^o} \quad (12)$$

$$X_{H_2O} = \frac{X_{H_2}^o + \lambda X_H^o}{1 + \lambda X_H^o} \quad (13)$$

$$X_O = \frac{X_O^o - \frac{1}{2}\mu X_{CO}^o}{1 - \frac{3}{2}\mu X_{CO}^o} \quad (14)$$

최대 전류밀도란 음극가스인 수소가 100% 전환되어 전류밀도가 전체 전지 내에 균일하게 분포되어 있을 때 얻어지는 전류밀도로서 다음과 같이 표현된다[8].

$$i_{max} = \frac{2F\phi_H^o X_H^o}{RTLW} \quad (15)$$

물질수지식 (6), (7)식을 무차원 전류밀도  $J(=i/i_{max})$ 와 무차원 길이  $\varepsilon(=x/L)$ 와  $\kappa(=y/W)$ 를 이용하여 무차원화시키면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \varepsilon} = J \quad (16)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial \kappa} = \frac{J}{S} \quad (17)$$

여기서  $S$ 는 입구에서의 음극가스 중의 수소량과 양극가스 중의 이산화탄소량의 비( $X_{CO}^o \phi_H^o / (X_H^o \phi_{CO}^o)$ )이다.

국부 전류밀도  $i$ 는 전지의 기전력  $V$ 와 다음과 같은 관계가 있다[11].

$$V = (V_{CN} - V_{aN}) - iR_{ohm} + \eta_c - \eta_a \quad (18)$$

여기서 음극, 양극전위  $V_{aN}$ 과  $V_{cN}$ 은 Nernst식에 의해 다음과 같이 얻어진다[11].

$$V_{aN} = V_a^o + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{X_{aC} X_H^o}{X_H} \right) \quad (19)$$

$$V_{cN} = V_c^o + \frac{RT}{2F} \ln (X_{cC} X_O^{1/2}) \quad (20)$$

여기서  $V_a^o$ 와  $V_c^o$ 는 표준전극전위이고  $X_i$ 는 각 성분의 조성을 의미한다. 전류와 과전압의 선형관계에 의해 양극과 음극에서의 과전압은 다음과 같이 전류와 분극저항의 곱으로 표시된다.

$$\eta_a = i_a Z_a = i Z_a \quad (21)$$

$$\eta_c = i_c Z_c = -i Z_c \quad (22)$$

여기서 음극과 양극에서의 분극저항값( $Z_a, Z_c$ )은 가스의 조성 및 반응온도의 함수로써 구해졌다[7].

그러므로, ohmic 전지저항과 분극저항의 합인 전지의 유효저항  $Z$ 는 다음과 같이 표시된다[8].

$$Z = R_{ohm} + \frac{\eta_a}{i} - \frac{\eta_c}{i} \quad (23)$$

식 (19), (20), (23)을 식 (18)에 대입하면 다음과 같은 무차원전류밀도  $J$ , 각 가스성분의 초기조성  $X^o$ , 전환율  $\lambda$ 와  $\mu$ 의 식이 얻어진다.

$$\frac{V + V_a^o - V_c^o}{RT/2F} - \ln \left( \frac{X_{cC}^o (X_H^o)^{1/2} X_H^o}{X_H X_{aC}^o} \right) = \ln \left\{ \frac{(1-\mu) \left( 1 - \frac{1}{2} \mu \frac{X_{CO}^o}{X_O^o} \right)^{1/2} (1-\lambda) (1+\lambda X_H^o)}{\left( 1 - \frac{3}{2} \mu X_{CO}^o \right)^{3/2} (\lambda X_H^o) \left( 1 + \lambda \frac{X_H^o}{X_{CO}^o} \right)} \right\} - \frac{J Z i_{max}}{RT/2F} \quad (24)$$

## 2-4. 에너지수지

전지 각 부분에서의 에너지수지식은 다음과 같이 얻어진다.

상분리판과 하분리판:

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} = \frac{h_{ms}}{b, k_s} (T_s - T_c) + \frac{h_{sk}}{b, k_s} (T_s - T_b) \quad (25)$$

경계조건:

$$\text{at } x=0 \text{ and } x=L, \text{ all } y: \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \quad (26)$$

$$\text{at all } x, y=0 \text{ and } y=W: \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0 \quad (27)$$

여기서 좌변은 분리판 내의 x-와 y-방향의 전도에 의한 열전달을 나타내고, 우변은 분리판과 전극-전해질판간의 복사열교환, 분리판과 가스간의 대류열교환, 분리판과 연료전지 외부사이의 대류열교환을 각각 나타낸다.

음극가스유로:

$$\frac{\partial(m_e C_{pa} T_{ga})}{\partial x} = Wh_{ga}(T_e - T_{ga}) + Wh_{ga}(T_s - T_{ga}) + \Sigma G_{ai} C_{pai} T_{ga} \quad (28)$$

경계조건:

$$\text{at } x=0, \text{ all } y: T_{ga} = T_i \quad (29)$$

양극가스유로:

$$\frac{\partial(m_c C_{pc} T_{gc})}{\partial y} = Lh_{gc}(T_e - T_{gc}) + Lh_{gc}(T_s - T_{gc}) + \Sigma G_{ci} C_{pci} T_{gc} \quad (30)$$

경계조건:

$$\text{at all } x, y=0: T_{gc} = T_i \quad (31)$$

식 (28)과 (30)의 좌변은 가스의 흐름에 의한 에너지 변환을 나타내고 우변은 전극-전해질판과 가스간 그리고 분리판과 가스간의 대류열교환, 반응에 의해 생성, 소모되는 각 성분에 의한 에너지 변환을 나타낸다.

전극-전해질판:

$$\frac{\partial^2 T_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial y^2} = \frac{h_{re}}{b_r k_e} (T_e - T_s) + \frac{h_{ge}}{b_r k_e} (T_e - T_{ga}) + \frac{h_{gc}}{b_r k_e} (T_e - T_{gc}) + \frac{q}{b_r k_e} \quad (32)$$

경계조건:

$$\text{at } x=0 \text{ and } x=L, \text{ all } y: \frac{\partial T_e}{\partial x} = 0 \quad (33)$$

$$\text{at all } x, y=0 \text{ and } y=W: \frac{\partial T_e}{\partial y} = 0 \quad (34)$$

마찬가지로 좌변은 전극-전해질판에서의 x-와 y-방향의 열전도를 나타내고 우변은 전극-전해질판과 분리판간의 복사열교환, 전극-전해질판과 음극가스간의 대류열교환, 전극-전해질판과 양극가스간의 대류열교환, 단위면적당 단위시간당 반응에 의해 발생하는 열을 각각 나타낸다.

윗 식들 중의 열전달계수 h는 밀폐된 유로에서의 무차원수 Nu와 Gz의 관계식에서 구해졌다[12].

$$Nu = 2Gz^{1/3} \quad (35)$$

**Table 1. Thermal conductivities of gases and parts of the fuel cell used in the numerical analysis(k[J/cm hr k] at 923 k)**

Parts of the fuel cell[3]		
separate plate(stainless steel)	(k <sub>p</sub> )	792
anode electrode(Ni)	(k <sub>an</sub> )	2808
cathode electrode(NiO)	(k <sub>cc</sub> )	32
electrolyte plate(LiAlO <sub>2</sub> )	(k <sub>em</sub> )	72
Gases[12]		
H <sub>2</sub>	(k <sub>H</sub> )	15.1
CO <sub>2</sub>	(k <sub>C</sub> )	2.0
H <sub>2</sub> O	(k <sub>W</sub> )	2.3
O <sub>2</sub>	(k <sub>O</sub> )	2.4
air	(k <sub>A</sub> )	1.7

**Table 2. Heat capacities of gases as a function of temperature used in the numerical analysis[12]: C<sub>p</sub> [J/gmol k] = (a + bT)R**

Gas	a	b
H <sub>2</sub>	3.249	0.422 × 10 <sup>-3</sup>
CO <sub>2</sub>	5.427	1.045 × 10 <sup>-3</sup>
H <sub>2</sub> O	3.470	1.450 × 10 <sup>-3</sup>
O <sub>2</sub>	3.639	0.506 × 10 <sup>-3</sup>

이 때 필요한 가스의 열용량(C<sub>p</sub>) 값들은 온도의 함수로서 이상기체의 값을 이용하였다. 가스와 전지 구성요소들의 열전도도는 Table 1에, 그리고 가스의 열용량 계산을 위한 변수의 값이 Table 2에 나타나 있다.

### 3. 계산과정

본 연구에서는 온도가 일정할 때 전류밀도와 전압을 구하는 경우와 전압이 일정할 때 온도분포와 전류밀도를 구하는 두 가지 경우에 대해서 연구되었다. 첫째 온도가 일정할 때 전류밀도와 전압을 구하는 경우는 모든 온도를 일정하게 두고 임의의 전류밀도에서 운전전압 V, 수소와 이산화탄소의 전환율이 식 (16), (17), (24)에서 얻어졌다. 둘째로 전압이 일정할 때 온도분포와 전류밀도를 구하는 경우 무차원 전류밀도 J가 각 가스성분의 전환율로부터 구해졌고 전류밀도로부터 연료전지 내 어느 지점에서의 수소와 이산화탄소의 전환율과 가스의 조성(X<sub>H</sub>, X<sub>CA</sub>, X<sub>W</sub>, X<sub>CC</sub>, X<sub>O</sub>)이 구해졌다. 이 때 필요한 h, C<sub>p</sub>, k 등의 값은 가스의 조성과 온도로부터 계산되어졌다. 경계 조건은 연료전지측면에서는 단열조건을, 분리판 외부의 온도는 일정온도 650°C를 사용하였으며, 음극, 양극가스의 입구에서의 온도를 540°C로 일정하게

**Table 3. Dimensions of parts of the fuel cell used in the numerical analysis**

Length (L)	10 cm
Width (W)	10 cm
Thickness :	
separate plate ( $b_s$ )	0.2 cm
gas channel ( $b_g$ )	0.2 cm
anode electrode ( $b_{ae}$ )	0.07 cm
electrolyte plate ( $b_{em}$ )	0.1 cm
cathode electrode ( $b_{ce}$ )	0.06 cm

**Table 4. Flow rates and compositions of anode and cathode gases**

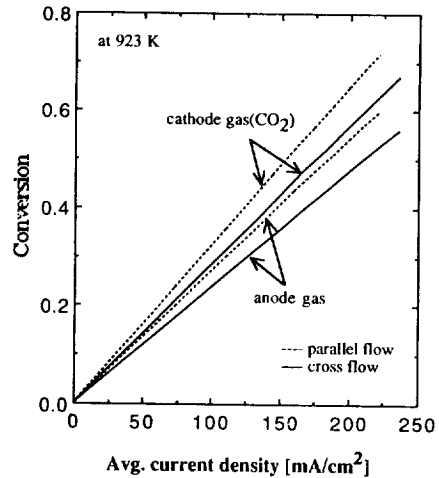
	Flow rates( $\phi$ , cm <sup>3</sup> /hr)	Compositions
anode gas	24000	H <sub>2</sub> 0.669
		CO <sub>2</sub> 0.088
		CO 0.106
		H <sub>2</sub> O 0.137
cathode gas	24000	O <sub>2</sub> 0.33
		CO <sub>2</sub> 0.67

두었다. 용융탄산염 연료전지 내 온도분포를 얻기 위한 수치모사에서 사용된 변수값들은 Table 1부터 5에 나타나 있다. 이 모델링에서 수성가스 전이반응은 포함되지 않았다. 즉 Table 4의 가스조성이 모델링에 직접 사용되었다.

물질수지와 에너지수지의 모든 식들을 무차원 식으로 바꾼 후 유한차분법으로 계산되었다. x-, y-방향으로 각각 20등분으로 나누어 계산되었고, 계산에 의해 정상상태의 연료전지 내 운전전압, 전류밀도, 온도분포, 출력들을 얻을 수 있었다.

#### 4. 결과 및 고찰

연료전지의 온도분포 및 전류밀도 계산시 실제 연료전지 가스유통로의 기하학적 구조를 단순화하여 계산하였다. 가스 유통로에 channel이 포함되지 않은 경우 분리판과 전극-전해질판 사이의 열전달은 가스를 통한 대류열전달과 복사열전달이 포함되나 channel이 포함되는 경우 분리판과 전극-전해질판이 접촉되어 있는 부분에선 고체 내 열전도와 주위와의 자연대류 현상이 고려되어야 할 것이다. 전극-전해질판과 분리판 사이의 열전달을 생각할 때 channel을 포함하지 않은 형태에서의 대류에 의한 열전달과 channel을 포함한 형태에서의 대류와 전도에 의한 열전달을 비교해보면 channel이 포함된 경우가 약 1.1배 정도 열전달 속도가 컸다.


**Fig. 2. Changes of the conversion of gases with the average current density in the cross and the parallel flow type fuel cell at the fixed temperature 923 k.**

그러므로 channel을 고려하지 않고 계산하여도 실제 연료전지 내의 온도분포와 거의 일치할 것으로 보인다.

물질수지와 에너지수지식에 Table 1부터 5의 값들을 대입하여 계산한 결과는 다음과 같다. 계산시 미지변수는 연료전지 내 각 부분의 온도( $T_s$ ,  $T_{ga}$ ,  $T_{gc}$ ,  $T_e$ ), 운전전압( $V$ ), 전류밀도( $J$ ), 음극전환율( $\lambda$ ), 양극전환율( $\mu$ ) 등 8개이며, 한편, 계산에 사용되어지는 식은 7개[식 (16), (17), (24), (25), (30), (32), (34)]이다. 그러므로 자유도가 1이 되어 보통의 계산시에 전류밀도, 운전전압, 온도 중 한 개의 변수가 고정된다. 본 연구에서는 연료전지 내 온도를 고정시킴으로써 전류밀도 및 운전전압이 얻어졌고 운전전압을 고정시킴으로써 온도분포 및 전류밀도분포가 얻어졌다.

##### 4-1. 등온하의 연료전지의 전류밀도와 전압

연료전지의 일반적인 작동경향을 파악하기 위해서 등온하에서 연료전지의 평균전류밀도와 전압이 구해졌다. 연료전지의 작동온도가 650°C (즉 923 K)이기 때문에 일정온도 923 K이 선택되었다. 연료전지 내 모든 온도가 일정하게 되면 에너지수지로부터의 온도에 관한 식들이 불필요하게 된다. 그러므로 시스템을 푸는 방정식은 식 (16), (17), (24)의 세 식으로 이 때의 미지수가 4개( $V$ ,  $J$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$ )이므로, 이 중에 한 변수가 고정되면 나머지 세 변수가 구해진다. 그리하여 평균전류밀도를 고정하였을 때 얻어지는 전환율의 그래프가 Fig. 2이고 그에 따른 평균전압과 출력의 그래프가 Fig. 3과 4이다.

연료전지 내의 반응온도가 923 K로 일정하게 유지될

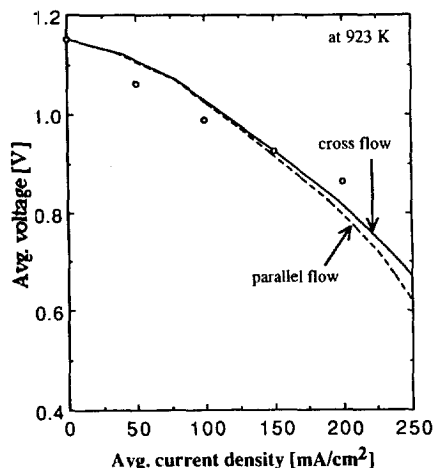


Fig. 3. Changes of the average voltage with the average current density in the cross and the parallel flow type fuel cell at the fixed temperature 923 K.

---, theoretical calculation for the parallel flow; —, theoretical calculation for the cross flow; o, experimental data for the cross flow[13].

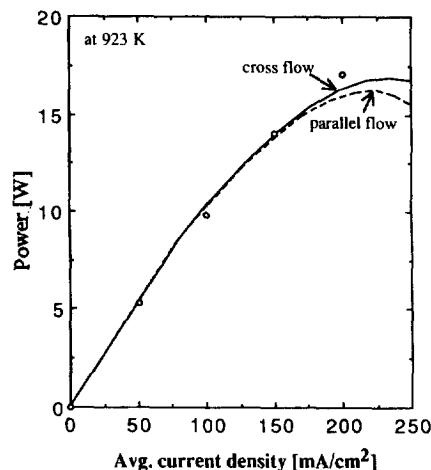


Fig. 4. Changes of the power with the average current density in the cross and the parallel flow type fuel cell at the fixed temperature 923 K.

---, theoretical calculation for the parallel flow; —, theoretical calculation for the cross flow; o, experimental data for the cross flow[13].

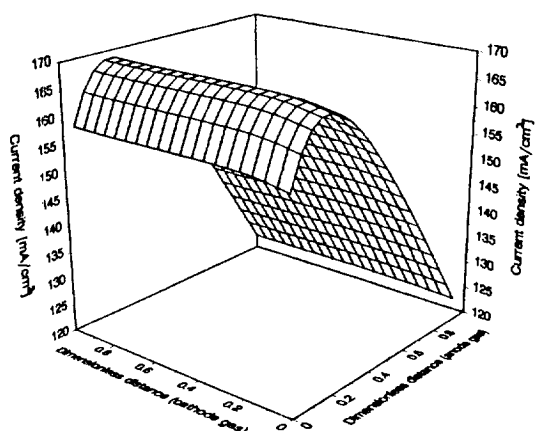
경우 Fig. 2에 나타나 있듯이 평균전류밀도가 증가한다는 것은 더 많은 가스가 반응했다는 것을 의미한다. 또한 Fig. 3에 나타나 있듯이 평균전류밀도의 증가로 인해 분극효과에 의한 과전압이 커짐으로 전지의 전압은 감소하게 되는 것이다. 그에 반해 Fig. 4에는 전류밀도가 증가함에 따라 출력은 증가하다가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 다음과 같이 설명될 수 있다. 연료전지의 출력은 전압과 전류밀도의 곱으로 표시된다. 그런데 Fig. 3에 나타나 있듯이 평균전압은 평균전류밀도의 일차함수로 표시된다고 가정하면 전압과 전류의 곱인 출력은 전류의 이차 함수로 표시된다고 생각할 수 있다. 그러므로 Fig. 4에서와 같은 극점을 가진 포물선이 얻어지는 것이다. 전지의 출력이 처음에 증가한다는 것은 평균전류밀도의 증가율이 전압의 감소율보다 크다는 것을 의미하고, 나중에 출력이 감소하는 것은 그 역을 의미한다.

평행류일 때가 십자류보다 Fig. 2에서 가스의 전환율은 약간 높지만 Fig. 3과 4에서 전지의 전압과 출력은 낮게 된다. 평행류에서 높은 전환율이 얻어지는데 이는 평행류에서는 양극가스와 음극가스가 서로 같은 방향으로 흘러가므로 십자류보다 높은 농도의 양극, 음극가스가 접촉하여 반응하기 때문이다. 십자류일 때에는 흐름방향을 따라 양극가스가 음극가스의 높은 농도에서 낮은 농도까지 접하게 되므로 전체 평균전환율이 평행류전지보다 낮아진다. Fig. 2에서처럼 평행류전지의 가

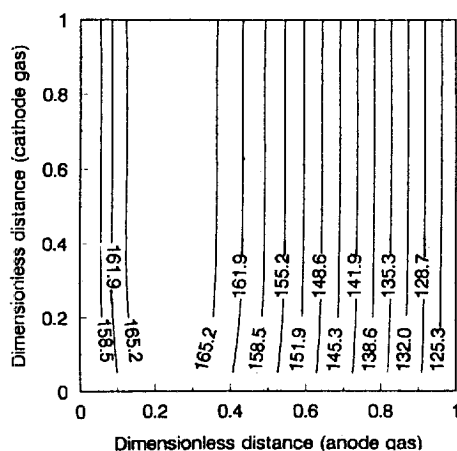
스의 전환율이 높은데도 불구하고 Fig. 3에서처럼 운전 전압이 낮아지는 것은 분극저항에 의한 과전압으로 인하여 발생하는 것이다. 그리고 평행류전지의 낮은 전압이 Fig. 4에서처럼 십자류전지보다 적은 출력을 주고 있는 것이다. 이론적인 계산은 실험치[13]와 잘 일치하였다.

#### 4-2. 비등온하의 연료전지의 전류밀도분포와 온도분포

이미 설명된 바와 같이 미지수 8개 중에서 한 변수를 고정시키면 다른 변수의 값이 구해질 수 있는데 여기서는 운전전압을 고정시킨 후 전류밀도분포와 온도분포가 얻어졌다. 이 때의 전류밀도분포가 Fig. 5에 나타나 있다. 음극가스의 흐름방향을 따라 전류밀도가 입구부근에서 증가하다 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 입구부근에서 수소의 농도가 높기 때문에 전환되는 양이 많으므로 일어나는 현상인데 입구에서 전류밀도가 낮은 것은 입구에서의 가스온도가 낮기 때문에 그 영향이 미치지 않는 부분까지는 증가하게 되는 것이다. 양극가스의 흐름방향을 따라서는 별로 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있으므로 전류밀도는 음극가스의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 전류밀도 등고선그래프에서도 전류밀도는 음극가스의 흐름방향을 따라 증가하다 감소하는데 반해 양극가스의 흐름방향을 따라서는 거의 변화가 없는 것을 보여준다.



(a)

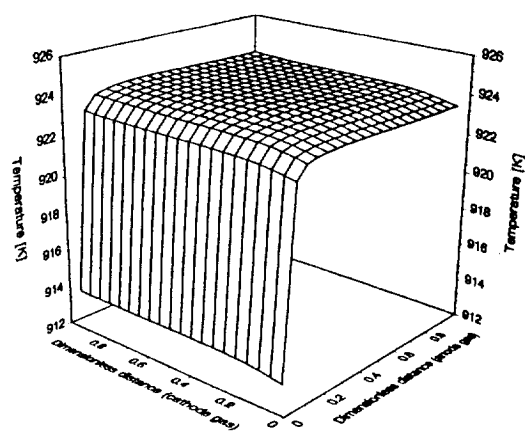


(b)

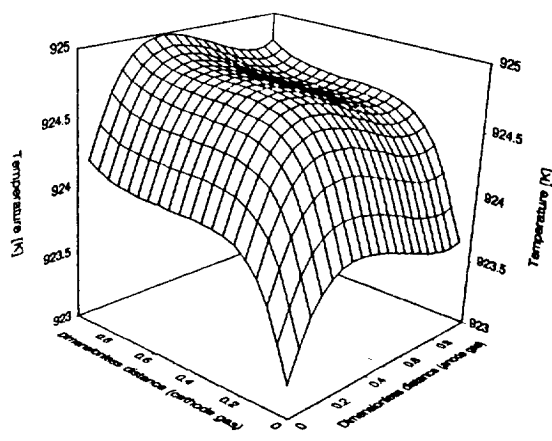
Fig. 5. Current density distributions in the cross flow type fuel cell at the reference conditions.

(a) 3-dimensional graph (b) contour graph (operating voltage = 0.92 V).

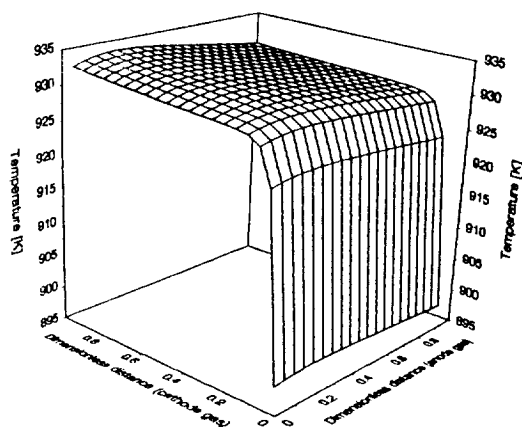
Fig. 6은 흐름 형태가 십자류이고 양극가스 유속 대 음극가스 유속이 1:1에서 가스흐름방향에 따른 연료 전지 내의 온도분포를 보여 주고 있다. Fig. 6(a)에서 흐름 방향을 따라 음극가스는 입구부분에서 온도가 증가하다 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 입구 부분에서 수소의 농도가 높아 이산화탄소와 물로 많이 전환되어 많은 열을 발생하기 때문에 생기는 현상이다. 십자류형 연료전지에서는 양극가스와 음극가스의 방향이 서로 교차하고 있다. 그러므로 음극가스를 생각할 때 양극가스의 입구부분과 만나는 곳 보다는 출구부분과 만나는 곳이 온도가 더 높게 나타나는 것이다. Fig. 6(c)에서 양극가스는 흐름방향을 따라 입구부분에서 온도가 많이 증가한 후 점점 느리게 단조증가하는 것을 볼 수



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. 3-Dimensional graphs of the temperature distribution of each part in the cross flow type fuel cell at the reference conditions.

(a) in the anode gas (b) in the electrode-electrolyte (c) in the cathode gas.



있는데, 이는 흐름방향을 따라 반응이 진행되어 유체의 질량이 줄기 때문이다. 유체의 질량이 줄어들므로써 Gz 수가 줄어들고 따라서 식 (35)에서 Nu가 줄어 열전달 계수가 감소하고 또 온도가 증가하면서 평균열용량이 증가함에도 불구하고, 양극가스의 질량은 흐름방향을 따라 감소하므로 똑같이 전달되는 에너지에 의해서도 높은 온도를 나타내게 된다. 또한 마찬가지로 양극가스를 생각할 때 음극가스의 입구부분과 만나는 곳 보다 출구부분과 만나는 곳이 온도가 더 높게 나타난다. 최대온도 구간은 음극가스는 음극가스의 흐름 방향을 따라 입구부분, 양극가스는 양극가스의 흐름방향을 따라 출구부분에서 형성된다. Fig. 6(b)의 전극-전해질판의 온도분포는 음극가스와 양극가스의 온도분포에 따라 변화하고 있다. 음극가스의 흐름방향을 따라선 음극가스의 영향을 지배적으로 받아 증가하다 감소하고 있고 양극가스의 흐름방향을 따라선 양극가스의 영향으로 단조 증가하고 있다.

위와 같이 전지 내 가스의 온도가 균일하지 않고 비등온인 것은 가스의 대류열전달과 불균일한 전류밀도에 기인하는 것이다. 전지 내의 국부온도 증가는 개로전압의 감소에도 불구하고 국부전류밀도를 증가시킨다. 이와 같은 국부전류밀도와 국부온도의 상호의존성 때문에 전지는 비등온 시스템이 된다. 즉 국부온도가 높아지면 전환율의 증가로 전류밀도가 상승하게 되는데, 흐름방향을 따라 가스의 양이 감소하므로 흐름방향을 따라 국부전류밀도는 감소하게 된다. 가스의 흐름방향을 따라 국부전류밀도가 감소한다는 것은 전환되는 양이 적어진다는 것이므로 반응에 의한 발열량이 감소하므로 국부온도는 낮아지게 되는 것이다.

Fig. 7은 Fig. 6(a)-(c)의 온도분포의 등온선 그래프이다. 이들 그래프에서도 Fig. 6에서 설명된 것과 같은 현상을 볼 수 있다. 즉 음극가스는 흐름방향을 따라 입구에서 급격히 상승했다가 천천히 감소하고 있는 것을 볼 수 있고, 양극가스는 흐름방향을 따라 처음에 급격히 상승했다가 나중에는 완만히 상승하는 것을 보여준다.

Fig. 8은 같은 조건에서 흐름 형태가 평행류일 때 양극가스의 온도분포에 대한 그래프이다. 양극가스와 음극가스의 흐름방향이 같으므로 양극가스의 온도분포는 처음에 증가하다가 최대 온도분포구간이 형성된 후 감소하는 형태로 나타남을 알 수 있다. 음극가스의 온도분포는 수소의 농도에 크게 의존하므로 양극가스의 온도분포처럼 농도가 높은 입구부분에서 급격히 증가했다가 흐름방향을 따라 완만히 감소했다. 전류밀도도 수소의 농도에 크게 의존하므로 Fig. 5(a)의 십자류의 경우와 비슷한 모양을 나타냈다.

Fig. 9와 10은 십자류전지와 평행류전지의 가스유통

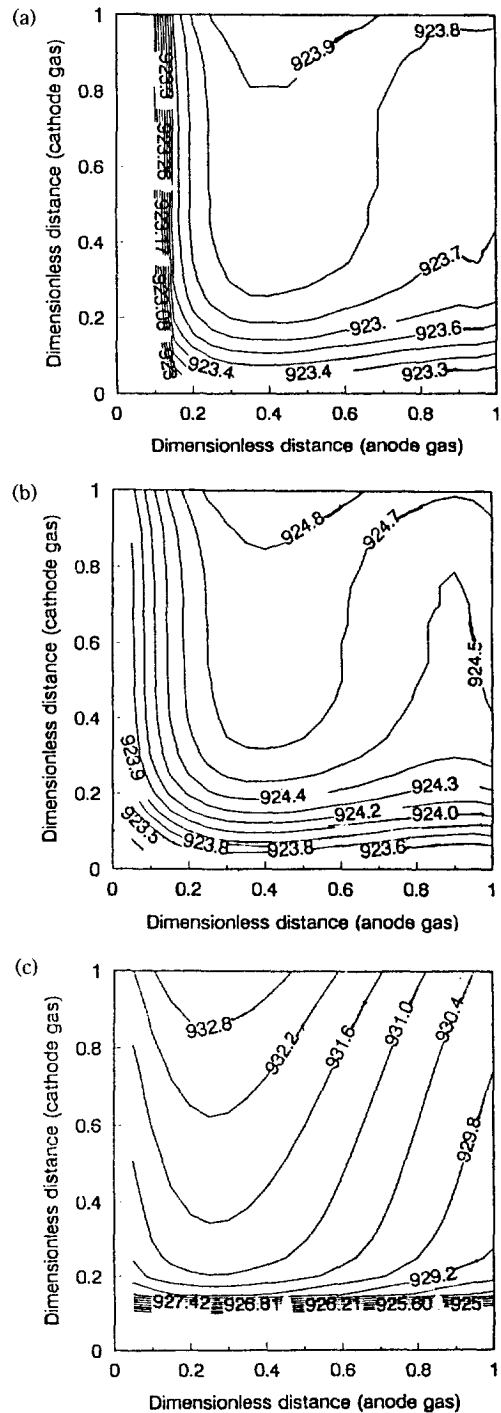


Fig. 7. Contour graphs of temperature distribution of each part in the cross flow type fuel cell at the reference conditions.

(a) in the anode gas (b) in the electrode-electrolyte (c) in the cathode gas.

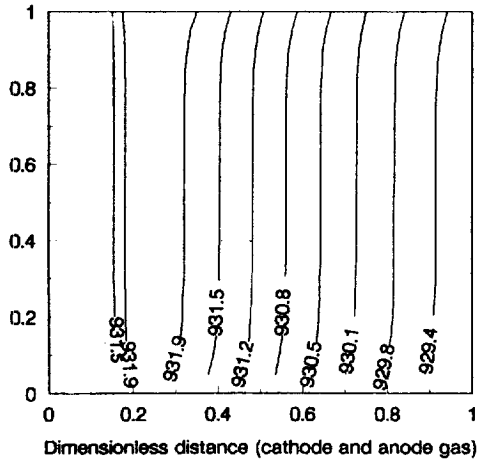


Fig. 8. Contour graph of the temperature distribution of the cathode gas in the parallel flow type fuel cell at the reference conditions.

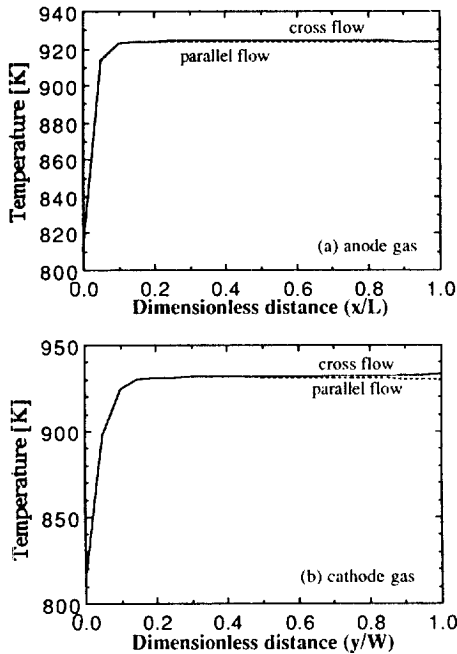


Fig. 9. Changes of gas temperature along the direction of the gas flow at the center of the cross section in the cross and the parallel flow type fuel cell at the reference conditions.  
(a) in the anode gas (b) in the cathode gas.

로의 중심부분에서의 온도분포와 전류밀도분포를 비교한 것이다. 온도분포와 전류밀도분포는 십자류일 때가 평행류일 때보다 약간 큼을 볼 수 있다.

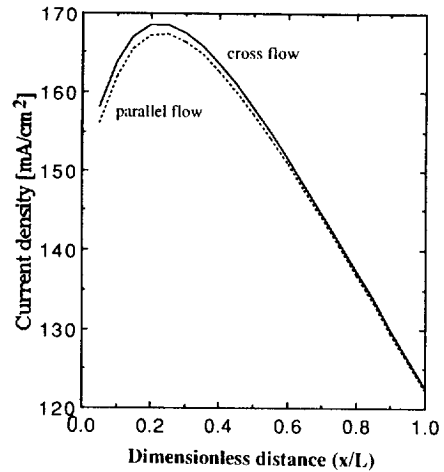


Fig. 10. Changes of the current density along the direction of the anode gas flow at the center of the cross section in the cross and the parallel flow type fuel cell at the reference conditions.

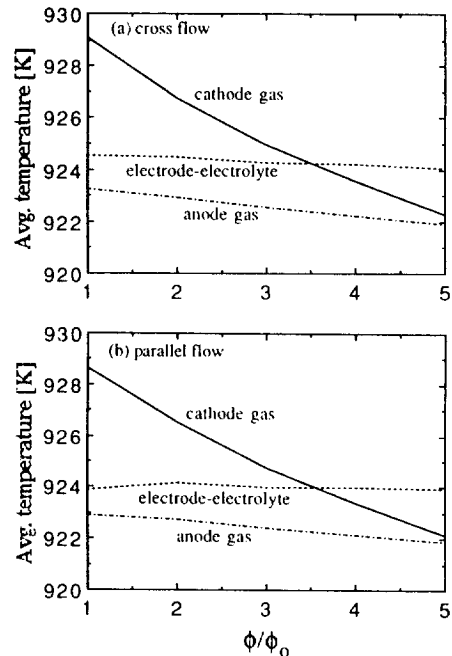


Fig. 11. Changes of the average temperature of each part with the gas flow rate in the cross and the parallel flow type fuel cell.

#### 4-3. 비등온하의 연료전지에서 변수들의 영향

##### 4-3-1. 가스의 유량변화

Fig. 11, 12는 양극가스 대 음극가스의 비율 1:1로 유지하면서 각 가스의 유량을 동시에 증가시킬 때 전

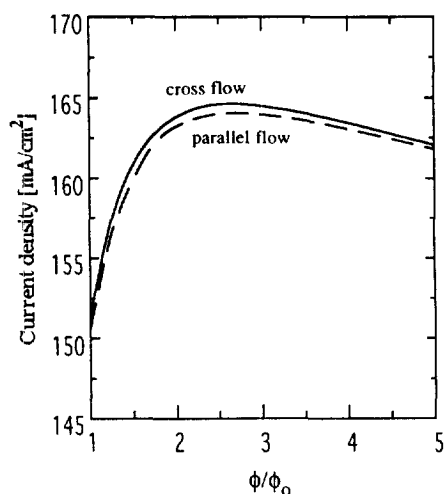


Fig. 12. Changes of the average current density with the gas flow rate in the cross and the parallel flow type fuel cell.

Table 5. Reference operating conditions of the fuel cell

Entering gas temperature ( $T_i$ )	810 k
Surrounding temperature ( $T_b$ )	923 k
Pressure (P)	1 atm
Operating voltage (V)	0.92 V
Standard anode voltage ( $V_m$ )	-0.828 V(vs. NHE)
Standard cathode voltage ( $V_n$ )	0.401 V(vs. NHE)

지의 평균온도, 평균 전류밀도에 대한 변화를 보여주고 있다. 양극가스와 음극가스의 유량을 변화시켰을 때 가스유로의 온도분포는 Table 4와 5의 표준운전조건에서 얻어진 것과 비슷한 형태로 Fig. 11에서 얻어졌다. 유량을 증가시키면 체류시간이 적어짐에 따라 가스의 전환율은 감소하나 반응되는 가스의 절대량은 Table 6에 나타난 바와 같이 증가하다 감소한다. 이는 유량이 증가함에 따라 전지의 온도가 감소하는 것에 기인한다. 즉 유량이 증가함에 따른 유량 증가효과가 전지온도 감소효과보다 크면 상대적인 음극가스의 전환량은 증가하게 되고, 역으로 전지온도 감소효과가 더 크게 되면 유량이 증가해도 낮은 반응성때문에 전환되는 양이 줄어들게 되는 것이다. 그러므로 전지 각 구성요소의 평균온도가 감소하는 것은 반응가스의 유량증가로 인한 발열량의 증가가 주는 온도증가 효과가 가스질량 증가로 인한 온도 감소효과에 미치지 못하기 때문이다. 음극가스와 전극-전해질판의 온도는 유량이 증가함에 따라 주위 전기로의 온도 값에서 거의 일정했다.

십자류와 평행류의 경우 모두 양극가스의 평균온도가

Table 6. Changes of the conversion and the reacted amount of hydrogen with the ratio of the flow rate of gas to the reference value of Table 4 in the cross flow type fuel cell

$\phi/\phi_0$	ref.	2	3	4	5
Conversion of $H_2$	0.49	0.27	0.18	0.13	0.11
Absolute amount of reacted $H_2$ ( $cm^3/hr$ )	7900	8540	8580	8520	8450
Avg. current density( $mA/cm^2$ )	151.4	163.8	164.5	163.4	162.1
Ratio* w.r.t. reference value	1.00	1.08	1.09	1.08	1.07

\*: ratio of absolute amount of reacted  $H_2$  and average current density.

유량이 표준값의 3배가 될 때까지는 음극가스의 평균 온도보다 높게 나타났고 전극-전해질판의 온도는 양극가스 온도와 음극가스 온도 사이의 값을 나타내었다. 그 이유는 반응이 진행됨에 따라 양극가스 내의 이산화탄소와 산소가 소모되어 양극가스의 질량이 줄고, 반면에 음극가스는 반응이 진행됨에 따라 수소가 소모되긴 하지만 이산화탄소와 물이 생성되어 오히려 질량이 늘게 되기 때문이다. 그리하여 동일한 열원과 접하고 있을 때 적은 질량의 양극가스 온도가 많은 질량의 음극가스 온도보다 높게 나타나는 것이다.

유량이 증가함에 따라 양극가스의 온도강하가 음극가스의 온도강하보다 심한데 그 이유는 다음과 같다. 연료전지가 작동하는 주변의 전기로의 온도가 923 k인데, 음극가스와 이 온도의 차이는 적고 양극가스와 이 온도의 차이는 크므로 양극가스의 경우 유량증가에 의해서 연료전지 주위의 온도인 전기로의 온도로 크게 강하하는 것이다. 유량이 표준상태값의 5배가 될 때 전지 각 구성요소의 온도차가 가장 적게 일어남을 볼 수 있었다.

Fig. 12에서 전지의 평균전류밀도는 유량이 증가함에 따라 증가하다가 감소하고 있는 것을 보여주고 있다. 전지의 출력과 평균전류밀도는 음극가스의 전환되는 양과 매우 밀접한 관계가 있다. 유량이 증가함에 따라 Table 6에 나타나 있듯이 전환되는 음극가스의 절대량이 유량증가 효과와 반응온도와의 상관관계에 의해서 증가하다 감소하고 있으므로 전지의 출력과 평균전류밀도는 증가하다 감소하게 되는 것이다. 평균전류밀도 증가율은 반응된 수소의 증가율과 정확히 일치함을 Table 6에서 볼 수 있었다. 유량변화에 따른 전체적인 출력의 변화도 평균전류밀도 증가율과 정확히 일치하였다. 이는 출력이 전류와 전압의 곱인데 전압이 일정

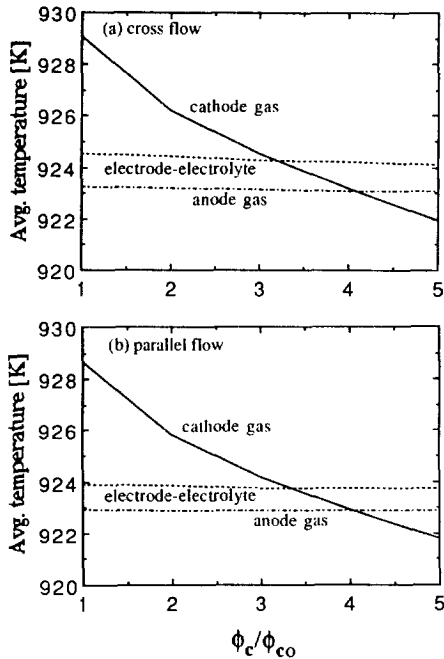


Fig. 13. Changes of the average temperature of each part with the ratio of the flow rate of cathode gas to that of the reference conditions in the cross and the parallel flow type fuel cell.

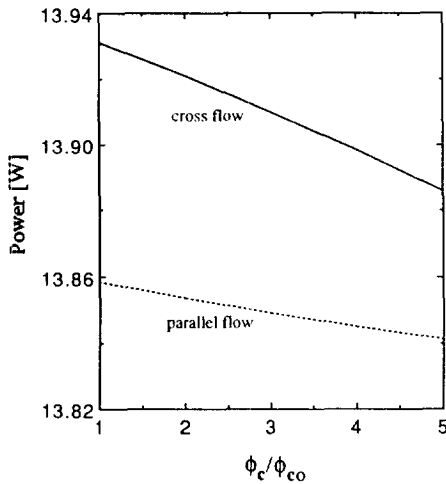


Fig. 14. Changes of the power with the ratio of the flow rate of cathode gas to that of the reference conditions in the cross and the parallel flow type fuel cell.

하므로 출력의 변화는 전류의 변화를 따르게 되는 것이다.

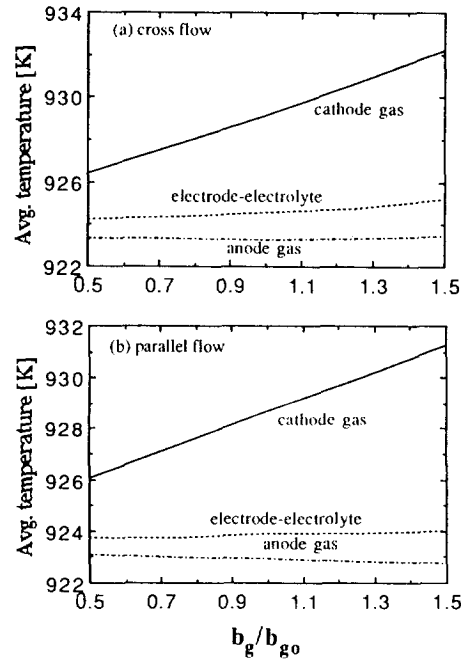


Fig. 15. Changes of the average temperature of each part with the thickness of gas channel in the cross and the parallel flow type fuel cell.

결론적으로 유량을 증가시키면 전지의 온도가 균일하게 되지만 출력과 전류밀도가 증가하다 감소하게 되고 또한 전환율이 상대적으로 너무 낮아지므로 미 반응 가스의 양이 증가하는 것이 큰 문제점이라 할 수 있겠다.

#### 4-3-2. 양극가스의 유량비의 변화

Fig. 13과 14는 음극가스의 유량을 고정하고 양극가스의 유량을 증가시킬 때 평균온도, 출력에 대한 변화를 보여주고 있다. 양극가스의 유량을 증가시킴에 따라 전지의 평균온도가 감소하고 있는데, 양극가스 유량이 음극가스 유량의 4배 정도가 되면 전지 각 구성요소간의 온도차가 비교적 적어짐을 보여주고 있다. 양극가스의 유량이 증가할 때 양극가스의 온도가 급격히 낮아지는데 양극가스의 냉각효과[10]를 보여주는 것이라 하겠다. 전지의 출력 변화는 Fig. 14에서처럼 음극가스의 전환량과 밀접한 관계가 있기 때문에 양극가스의 유량변화에는 미세하게 감소하는 경향이 있으나 거의 변화가 없었다.

#### 4-3-3. Channel 두께의 영향

Fig. 15는 기준 운전조건에서 가스 유통로의 두께를 변화시킬 때 즉 유속을 변화시킬 때의 평균온도변화에 대한 그래프이다. 십자류에서는 가스 유통로 두께가 증가하면서 즉 유속이 느려지면서 전환율의 증가로 온

**Table 7. Changes of avg. temperature, avg. current density and power with the operating voltage**

	Operating voltage(V)		
	0.89	0.92	0.95
Avg. current density(mA/cm <sup>2</sup> )	167	151	136
Avg. temperature(k)	926.4	924.5	923.8
Power(W)	14.9	13.9	13.0

도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 평행류에서는 가스 유통로 두께가 증가하면서 양극가스의 온도는 증가하나 십자류전지와 마찬가지로 전극-전해질판과 음극가스의 온도는 거의 일정하였다.

#### 4-3-4. 운전전압의 영향

비등온하의 연료전지의 온도분포와 전류밀도분포를 구하기 위해서는 운전전압을 고정시키는데 이 운전전압의 고정되는 값을 증가시켰을 때의 효과가 Table 7에 나타나 있다. 고정 운전전압을 증가시키에 따라 평균 전류밀도, 전지의 평균온도, 출력이 감소하고 있다. 운전전압이 증가한다는 것은 과전압이 감소하는 것으로 이는 반응이 적게 일어난다는 것을 의미한다. 그러므로 평균전류밀도가 감소하고 또한 평균온도, 출력이 감소하게 된다.

## 5. 결 론

용융탄산염 연료전지 내의 온도분포를 얻기 위해 물질 및 에너지수지식을 세우고 운전조건 및 전지의 치수를 변화시키면서 연료전지 내의 온도분포, 전류밀도분포, 출력 등을 얻었다. 전지 각 부분의 온도, 전류밀도, 운전전압 중에서 한 변수를 고정시킨 후에 다른 변수의 값들이 얻어질 수 있었다. 본 연구에서는 정온하에서와 일정 운전전압하에서의 두 가지 경우에 대해 연구되었다.

등온전지에서는 평균전류밀도를 증가시킬 때 반응성의 증가로 가스 각 성분의 전환율은 증가하였고, 과전압이 증가하므로 평균전압은 감소하였다. 전류밀도와 전압의 곱인 출력은 평균전류밀도가 증가할 때 증가하다가 감소한다.

비등온인 경우에 전류밀도분포는 십자류, 평행류 모두 입구부근에서의 수소의 농도가 높기 때문에 음극가스의 진행방향을 따라 증가하다 감소하였다. 반면에 십자류에서 음극가스 입구부근에서 수소의 농도가 높아 반응이 많이 일어나므로 가스의 진행방향을 따라 음극가스 온도가 증가하다가 감소하고, 양극가스는 가스의 진행방향을 따라 열전달계수는 감소하고 가스의 질량이 감소

하므로 그 온도가 단조 증가하였다. 평행류의 온도분포는 양극, 음극가스 모두 십자류전지의 음극가스의 경우와 마찬가지로 입구부근에서 증가하다가 감소했다. 온도분포는 양극가스에 의해, 전류밀도분포는 음극가스에 의해 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다.

가스의 유량을 변화시켰을 때 유량의 증가에 따라 전환율은 감소하지만 반응되는 가스의 절대량이 증가하므로 전류밀도와 출력은 증가하다 감소하고 미반응 가스의 양이 증가하므로 온도는 감소했다. 음극가스의 유량을 고정시키고 양극가스의 유량비를 변화시키면 양극가스의 냉각작용 효과에 의해 전지의 온도는 양극가스 유량증가에 따라 감소하였다. 그리고, 양극가스 유량의 증가에 따라 반응온도의 감소에 의해 음극가스의 전환율이 약간 감소하므로 출력과 전류밀도는 약간 감소했다. 가스 유통로의 두께가 증가함에 따라 체류시간이 길어져 전환율이 증가하므로 십자류에서는 온도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 반면에 평행류전지는 양극가스의 온도는 증가하지만 전극-전해질판과 양극가스의 온도는 일정하였다. 고정되는 운전전압의 증가에 따라 반응이 적게 일어나므로 평균전류밀도, 평균온도, 출력이 감소하였다.

위의 결론으로부터 Table 1-5의 운전조건에서 양극가스 대 음극가스의 유량비가 0.25 정도일 때 가장 효율적이고 균일한 온도분포를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

## 감 사

이 연구는 과학기술처 지원 G7 project의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 주신 한전기술연구원, 에너지자원기술지원센터에 감사드립니다.

## 사용기호

- A : cross-sectional area of the fuel cell [cm<sup>2</sup>]
- b : thickness [cm]
- C<sub>p</sub> : heat capacity [J/gmol·k]
- E : open-circuit voltage [V]
- F : Faraday's constant, 96501 C/equiv. [26.8 A·hr/mol]
- G : mole of generation and consumption per unit width [gmol/cm]
- h : heat transfer coefficient [J/cm<sup>2</sup>·hr·k]
- H : molar enthalpy [J/mol]
- i<sub>a</sub> : anodic current density, (>0) [mA/cm<sup>2</sup>]
- i<sub>c</sub> : cathodic current density, (<0) [mA/cm<sup>2</sup>]
- J : dimensionless current density [i/i<sub>max</sub>]

$k$  : thermal conductivity [ $\text{J}/\text{cm}\cdot\text{hr}\cdot\text{K}$ ]  
 $L$  : length of the fuel cell [ $\text{cm}$ ]  
 $m$  : molar flow rate [ $\text{gmol}/\text{hr}$ ]  
 $n$  : number of electrons transferred  
 $P$  : pressure [ $\text{atm}$ ]  
 $q$  : heat generation per unit cell area [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]  
 $R$  : gas constant,  $82.06 \text{ cm}^3\cdot\text{atm}/\text{gmole}\cdot\text{K}$  [ $8.314 \text{ J}/\text{gmol}\cdot\text{K}$ ]  
 $R_{ohm}$  : ohmic cell resistance [ $\Omega$ ]  
 $S$  : molar entropy [ $\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ ]  
 $T$  : temperature [ $\text{K}$ ]  
 $V$  : cell operating potential [ $\text{V}$ ]  
 $V_{aN}$  : equilibrium potential at the anode in Eq. (19) [ $\text{V}$ ]  
 $V_{cN}$  : equilibrium potential at the cathode in Eq. (20) [ $\text{V}$ ]  
 $V_a^o$  : standard anode potential [ $\text{V}$ ]  
 $V_c^o$  : standard cathode potential [ $\text{V}$ ]  
 $W$  : width of the fuel cell [ $\text{cm}$ ]  
 $X_i$  : mole fraction of the gas component  $i$   
 $x$  : distance in the direction of anode gas [ $\text{cm}$ ]  
 $y$  : distance in the flow direction of cathode gas [ $\text{cm}$ ]  
 $Z$  : effective cell resistance [ $\Omega\cdot\text{cm}^2$ ]

#### 그리스 문자

$\varepsilon$  : dimensionless distance [ $x/L$ ]  
 $\eta_a$  : anodic overpotential ( $<0$ ) [ $\text{V}$ ]  
 $\eta_c$  : cathodic overpotential ( $>0$ ) [ $\text{V}$ ]  
 $\kappa$  : dimensionless distance ( $y/W$ )  
 $\lambda$  : conversion of hydrogen  
 $\mu$  : conversion of carbon dioxide  
 $\phi$  : total flow rate of gas [ $\text{cm}^3/\text{hr}$ ]

#### 상첨자

$o$  : value at the entrance

#### 하첨자

$a$  : anode

$c$  : cathode  
 $e$  : electrode-electrolyte  
 $ga$  : anode gas  
 $gc$  : cathode gas  
 $H$  : hydrogen  
 $i$  : arbitrary component  
 $O$  : oxygen  
 $o$  : value at reference conditions  
 $s$  : separate plate  
 $W$  : water

#### 참고문헌

1. Eisenberg, M. and Gidaspow, D.: *Electrochem. Technol.*, **2**, 258(1964).
2. Gidaspow, D. and Baker, B. S.: *AIChE J.*, **11**, 825 (1965).
3. Wolf, T. L. and Wilemski, G.: *J. Electrochem. Soc.*, **130**, 48(1983).
4. Kobayashi, N., Fugimura, H. and Ohtsuka, K.: 일본기계학회논문집(B), **54**(505), 2568(1988).
5. Kobayashi, N., Fugimura, H. and Ohtsuka, K.: 일본기계학회논문집(B), **57**(535), 825(1991).
6. Cao, G. and Masubuchi, M.: 일본기계학회논문집(B), **37**, 535(1991).
7. Selman, J. R.: Molten Salt Committee of the Electrochemical Society of Japan, (1988).
8. Sampath, V. and Sammels, A. F.: *J. Electrochem. Soc.*, **127**, 79(1980).
9. Wilemski, G.: *J. Electrochem. Soc.*, **130**, 117(1983).
10. Watanabe, K. and Nikai, I.: 일본기계학회논문집(B), **52**(481), 3335(1986).
11. Appleby, A. J. and Foulkes, F. R.: "Fuel Cell Handbook", 539(1989).
12. Incropera, F. P. and Dewitt, D. P.: "Introduction to Heat Transfer", 825(1989).
13. 임태훈, 이갑수, 남석우, 오인환, 홍성안, 임희천 : 화학공학, **32**, 498(1994).