

원형 용융탄산염 단위 연료전지의 성능과 온도분포

김미현 · 정귀영 · 남석우* · 오인환* · 임태훈* · 홍성안*

홍익대학교 화학공학과, 한국과학기술연구원 화공연구부*

The Performances and Temperature Distributions of the Circular Molten Carbonate Unit Fuel Cell

Mi-Hyun Kim, Gui-Yung Chung, Suk-Woo Nam*, In-Hwan Oh*,
Tae-Hoon Lim* and Seong-Ahn Hong*

Department of Chemical Engineering, Hong-Ik University

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

요 약

원형 용융탄산염 단위 연료전지의 성능 및 온도분포가 수치모사를 통해 얻어졌다. 원형 단위전지내에서는 사각형 단위전지에 비해 비교적 균일한 온도분포가 얻어졌다. 전지의 바깥쪽으로 갈수록 가스 전환율이 커졌고 전류밀도도 크게 증가하였다. 운전전압이 감소할수록 각 가스들의 전환율은 커지고 전류밀도도 커졌다. 원형 전지에서의 평균전류밀도나 출력은 전압이 높을 때는 사각형 전지보다 작았고, 전압이 낮을 때는 더 컸다. 음극 및 양극 가스의 전환율도 마찬가지였다. 전압이 낮을 때 가스의 전환율이 커서 원형 전지의 효율성이 크게 나타났다.

Abstract—The performances and temperature distributions of the circular molten carbonate unit fuel cell were obtained by mathematical modeling. Temperature distributions were more uniform in the circular fuel cell than in the square fuel cell. The percentage of conversion and the current density increased toward outside from the center of the cell. As the operating voltage decreased, the conversion of each gas increased and the current density became higher. The average current density and the power in the circular unit cell were smaller at high cell voltages and bigger at low cell voltages than those in the square unit cell. The percentages of conversion of anode and cathode gases of the circular unit cell were similar. Since, at a low cell voltage, the percentages of conversion of gas were big and the efficiency of the circular cell was good.

1. 서 론

용융탄산염 연료전지는 수소와 산소를 결합시켜 전기를 얻는 직접발전 방식으로, 대기 오염이 적은 환경 친화적인 발전 시스템으로 부각되고 있다¹⁾. 현재까지 용융탄산염 연료전지의 형태는 사각형이 전부였고, 이 형태에 대한 수치모사가 주로 연구되고 있다. 그리고, 최근에 공급가스의 유량, 조성, 압력, 전지의 치수 등의 조작 변수를 변화시키는 것과 함께 다양한 모양의 전지가 연구 중에 있다^{2,3,4)}.

전지 내의 온도분포가 불균일하게 되면 불균일한 전

기화학반응, 열응력, 전해질의 증발, 재료의 부식 등으로 전지의 성능이 급격히 감소하게 되므로 전지내에 국부적으로 과열 부분이 없는 균일한 온도분포를 얻는 것이 중요하다⁵⁾. 그리고, 연료 가스인 음극 가스 중 수소의 농도는 반응 속도에 큰 영향을 미친다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 전지의 입구에서의 수소 농도가 높고 출구에서의 수소 농도가 낮음에 따른 불균일한 반응열을 제거하기 위한 방안으로 원형 용융탄산염 단위 연료전지에 대한 연구가 시도되었다.

원형 전지에서 음극 가스는 연료 가스로서 전지의 원형 바깥쪽에서 유입되어 방사형으로 원형전지 중심으로

홀러 가운데 원통형 출구를 통해 빠져나가고, 양극 가스는 산화제 가스로서 이 원형전지 중심의 원통형 입구를 통해 유입되어 중심에서 바깥쪽으로 방사형으로 홀러 빠져나간다. 출구에서의 수소 농도가 낮는데, 원형 전지에서는 출구에서의 면적이 입구보다 좁으므로 농도를 높히는 효과가 있는 것이다.

이외에 음극 gas와 양극 gas를 원형 전지의 θ 방향으로 공급해주는 방법이 있고, 위의 두 가지 방법을 혼합하여 사용할 수도 있다.

이전에 연구된 사각형 단위 연료전지에서의 식들을 토대로 물질수지 및 에너지수지가 세워졌다. 수치모사를 통해 일정한 전압하의 온도분포 및 가스의 전환율을 구하고, 전류밀도 변화에 따른 전압, 출력 변화 등 전지의 성능을 기존의 사각형 전지와 비교하였다.

2. 이 론

단면이 원형인 단위전지의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 전지의 가운데에 원통형 유입구가 있어서 가스들이 유입·유출되는데, 전극-전해질판에는 원통형 유입구가 없는 형태이다. 양극 gas와 음극 gas의 흐름은 방사형이며, 서로 반대 방향으로 흐른다.

기존 사각형 연료전지에서 사용된 가정이 원형 전지에서도 그대로 적용되었다⁹⁾. 연료전지는 정상 상태하에서 가동한다. 가스유로, 전극-전해질판 및 분리판의 두께는 전지의 길이와 폭에 비해 매우 얇으므로 두께 방향의 온도 기울기는 무시하였고, 가스 유통로에서 channel의 두께 방향으로 조성이 일정하다고 가정하였다. 분리판과 전극-전해질판간에 전달되는 복사 에너지 중에서 가스에 의해 흡수되는 복사 에너지는 무시하였다. 연료전지 측면은 단열을 가정하였다⁹⁾.

음극에서의 수소와 양극에서의 이산화탄소의 원형 연

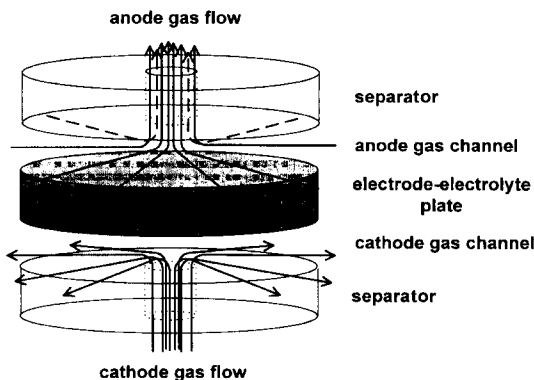


Fig. 1. Schematic diagram of the circular fuel cell.

료전지의 중심으로부터 임의의 r -지점 사이에서의 전환율 λ 와 μ 가 포함된 물질수지식이 Faraday 법칙에 의해 구해진다⁹⁾.

$$\text{Anode: } \frac{Pb_g R_o v_{ra} X_H^0}{RT} \frac{1}{r} \frac{\partial \lambda}{\partial r} = -\frac{i}{2F} \quad (1)$$

$$\text{Cathode: } \frac{Pb_g R_i v_{rc} X_{CC}^0}{RT} \frac{1}{r} \frac{\partial \mu}{\partial r} = \frac{i}{2F} \quad (2)$$

여기서, R_i 는 원형 단위전지의 내부 반지름으로 중심에 위치한 원통형 유입구의 반지름이고, R_o 는 전지의 외부 반지름이다. R 은 기체상수이다. 양극 gas와 음극 gas의 흐름 방향이 서로 반대이기 때문에 물질 수지식은 서로 반대의 부호를 갖는다.

위의 물질수지식이 무차원 길이 $\xi(= (r - R_i)/(R_o - R_i))$, 무차원 전류밀도 $J(= i/i_{max})$ 를 이용하여 무차원화되었다.

$$\text{Anode: } \frac{1}{\xi + \frac{R_o - R_i}{R_i}} \frac{\partial \lambda}{\partial \xi} = -J \quad (3)$$

$$\text{Cathode: } \frac{1}{\xi + \frac{R_o - R_i}{R_i}} \frac{\partial \mu}{\partial \xi} = \frac{J}{S} \quad (4)$$

극부 전류밀도 i 는 전지의 기전력 V 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$V = (V_{cN} - V_{aN}) - iR_{ohm} + \eta_c - \eta_a \quad (5)$$

여기서 음극 전위와 양극 전위(V_{aN} 과 V_{cN})는 Nernst식에 의해 얻어진다⁹⁾. 음극과 양극에서의 과전압(η_a 와 η_c)은 전류와 분극저항(Z_a 와 Z_c)의 곱으로 얻어지고, 분극저항 값은 가스의 조성과 반응온도의 함수로서 얻어진다⁹⁾. 분극저항은 Selman⁹⁾이 제시한 식을 실험치와 잘 일치시키기 위해 2배한 값을 사용하였다⁹⁾. 또한, ohmic 전지 저항값 R_{ohm} 은 온도의 함수로서 계산된다¹⁰⁾. 자세한 계산 과정은 본 연구팀에 의해 발표된 논문에서 설명되어 있다^{2,3)}.

연료전지의 임의의 지점에서의 음극 gas 및 양극 gas의 조성은 사각형 전지에서 전환율과 무차원 변수를 이용하여 구한 식들을 그대로 사용하였다. 이렇게 구해진 V_{aN} , V_{cN} , R_{ohm} , η_a 와 η_c 를 식(5)에 대입하면 다음과 같은 무차원 전류밀도 J , 온도 T , 전압 V , 전환율 λ 와 μ 를 포함하는 식이 얻어진다.

$$\frac{V + V_a^0 - V_c^0}{RT/2F} - \ln \left(\frac{X_{CC}^0 (X_{O_2}^0)^2 X_H^0}{X_W^0 X_{aC}^0} \right)$$

$$= \ln \left[\frac{(1-\mu) \left(1 - \frac{1}{2} \mu \frac{X_{cC}^o}{X_O^o} \right)^{\frac{1}{2}} (1-\lambda)(1+\lambda X_H^o)}{\left(1 - \frac{3}{2} \mu X_{cC}^o \right)^{\frac{3}{2}} \left(1 + \lambda \frac{X_H^o}{X_W^o} \right) \left(1 + \lambda \frac{X_H^o}{X_{aC}^o} \right)} \right] - \frac{JZi_{max}}{RT/2F} \quad (6)$$

전지 각 부분에서의 에너지수지 식들이 사각형 연료 전지에서와 마찬가지로 원주좌표계에서 구해졌다. 여기서 가스들은 전지의 원형 주변과 가운데 원통형 입구 또는 출구를 통해 같은 양이 역방향으로 r-방향의 방사형으로 유입 또는 배출되므로 θ-방향으로의 열전달은 없다.

전지의 각 부분에서의 에너지 수지식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\text{Separate plate: } \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} = \frac{h_{res}}{b_s k_s} (T_s - T_c) + \frac{h_{sg}}{b_s k_s} (T_s - T_g) + \frac{h_{sb}}{b_s k_s} (T_s - T_b) \quad (7)$$

$$\text{b.c.: at } r = R_i; q_r = h_{sg}(T_{g,h} - T_{s,R_i}) \quad (8)$$

$$\text{at } r = R_o; \frac{\partial T_s}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

$$\text{Anode gas: } -\frac{1}{r} \frac{\partial (r m_a C_{pa} T_{ga})}{\partial r} = h_{cga} (T_c - T_{ga}) + h_{sga} (T_{sa} - T_{ga}) + \sum G_{ai} C_{pai} b_g T_{gu} \quad (10)$$

$$\text{b.c.: at } r = R_o; q_{in,a} = c2\pi R_o b_g v_{ra,i} C_{pai} T_{ga,i} \quad (11)$$

$$\text{Cathode gas: } \frac{1}{r} \frac{\partial (r m_c C_{pc} T_{gc})}{\partial r} = h_{cgc} (T_c - T_{gc}) + h_{sgc} (T_{sc} - T_{gc}) - \sum G_{ci} C_{pci} b_g T_{gc} \quad (12)$$

$$\text{b.c.: at } r = R_i; q_{in,c} = c\pi R_i^2 v_{rc,i} C_{pci} T_{gc,i} \quad (13)$$

여기서, q_{in} 은 외부에서 유입되는 가스가 전지내로 갖고 들어가는 단위 시간당의 에너지로 유입되는 가스의 엔탈피이다.

가스의 유입 및 배출을 위해 연료전지의 중앙 casing에 원통구가 있으나, 전극-전해질판은 원통구가 없는 원판형으로 여기서의 에너지 수지식은 다음과 같다.

Electrode-electrolyte:

$$\frac{\partial^2 T_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_e}{\partial r} = \frac{h_{res}}{b_e k_e} (T_e - T_{sa}) + \frac{h_{ega}}{b_e k_e} (T_e - T_{ga}) + \frac{h_{resc}}{b_e k_e} (T_e - T_{sc}) + \frac{h_{egc}}{b_e k_e} (T_e - T_{gc}) - \frac{q}{b_e k_e} \quad (14)$$

Table 1. Parameter values used in the system.

inner radius	(R _i)	: 1.00 cm
outer radius	(R _o)	: 5.64 cm
thickness:		
separator	(b _s)	: 0.2 cm
gas channel	(b _g)	: 0.2 cm
electrode+electrolyte	(b _{ea} +b _{em} +b _{ec})	: 0.23 cm
entering gas temperature	(T _i)	: 813 K
surrounding temperature	(T _b)	: 923 K
working pressure	(P)	: 1 atm
anode gas flow rate		: 24,000 cm ³ /hr
cathode gas flow rate		: 24,000 cm ³ /hr

$$\text{b.c.: at } r = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (15)$$

$$\text{at } r = R_o; \frac{\partial T_e}{\partial r} = 0 \quad (16)$$

여기서, q 는 단위부피당 생성되는 에너지이다. 또한, 음극 가스와 양극 가스의 원통형 입구나 출구에서의 에너지수지식은 다음과 같이 구해진다.

Anode gas in the outlet hole:

$$c2\pi R_i b_g v_{ra,R_i} C_{pa,R_i} T_{ga,R_i} - c\pi R_i^2 v_{ra,h} C_{pa,h} T_{ga,h} + \pi R_i^2 h_{ega} (T_{e,h} - T_{ga,h}) + 2\pi R_i b_s h_{sga} (T_{sa,R_i} - T_{ga,h}) + \pi R_i^2 \sum G_{ai,h} C_{pai,h} (b_g + b_s) T_{ga,h} = 0 \quad (17)$$

Cathode gas in the inlet hole:

$$c\pi R_i^2 v_{rc,i} C_{pc,i} T_{gc,i} - c2\pi R_i b_g v_{rc,h} C_{pc,h} T_{gc,h} + \pi R_i^2 h_{cgc} (T_{e,h} - T_{gc,h}) + 2\pi R_i b_s h_{sgc} (T_{sc,R_i} - T_{gc,h}) + \pi R_i^2 \sum G_{ci,h} C_{pci,h} (b_g + b_s) T_{gc,h} = 0 \quad (18)$$

위의 물질수지 및 에너지수지의 모든 식들을 무차원 식으로 바꾼 후 유한차분법으로 계산하였다. 원형 전지의 수치모사에 사용된 변수값들이 Table 1에 나타나 있다. 사각형 전지와 성능을 비교하기 위해 원통형 전지의 운전 조건들을 동일하게 주는 한편, 전지의 외부 반지름 R_o는 5.642 cm로 두어 전극-전해질판의 단면적이 사각형 전지와 같게 약 100 cm²가 되게 하였다. 전지의 내부 반지름 R_i은 임의로 1.0 cm로 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 원형 단위전지에 대한 수치모사를 수행하여 온도분포, 전류밀도 분포 및 전지 성능을 예측하였다. 그리고, 흐름이 십자류인 동일한 단면적을 가진 사각형 단위전지와 전지 성능을 비교하였다.

3-1. 일정 운전전압하의 온도분포

기존의 사각형 단위 전지에서처럼 운전전압을 0.93 V로 일정하게 놓았을 때 원형 전지의 각 부분에서의 온도분포가 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2의 가로축은 단위 전지의 r-방향의 무차원 거리를 나타내며, -0.2부터 0.0까지가 전지의 원형 중심의 원통형 가스의 출구 또는 입구 부분이다.

음극 가스인 수소의 온도분포는 기존의 사각형 단위 전지와 거의 같은 경향을 보였다. 즉, 가스의 흐름 방향을 따라 음극 가스의 유입구인 전지의 바깥쪽에서는 온도가 상승하다가 가운데 원통형 가스 출구 방향으로 가면서 완만하게 낮아졌다. 입구에서는 음극 가스인 수소의 농도가 높아 전기화학반응이 많이 일어나 많은 열이 발생하기 때문에 온도가 상승하다가 전지의 내부에서 거의 일정하게 온도가 유지된다. 전지의 중심의 원통형 유입구 가까이에서는 유입되는 양극 가스의 낮은 온도의 영향으로 약간 감소함을 보였다. 원통형 유입구 부근은 음극 가스의 출구로서 반응이 진행된 후의 적은 양의 수소가 좁은 영역에 있게 되므로 온도가 많이 감소하는 것을 줄일 수 있는 것이다. 이것은 원형 연료전지에서 목적하는 바이기도 하다.

양극 가스는 원통형 유입구 부근에서는 좁은 단면적에 많은 양이 있게 되므로 적은 양의 음극 가스에도 불구하고 반응열이 많아 온도가 높게 되었다가, 양극 가스 진행 방향으로 단면적이 커지고 농도도 낮아져 온도가 다시 감소하고 있다. 그러나, 역방향으로 흐르는 음극 가스의 영향으로 다시 약간 증가하는 것을 볼 수 있다.

전극-전해질판에서는 전지의 바깥쪽에서 음극 가스의

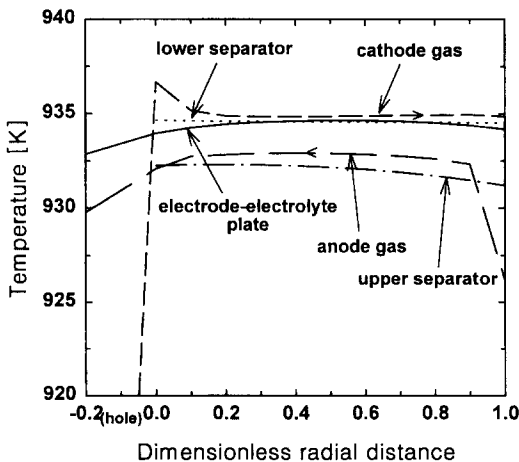


Fig. 2. Temperature distributions of each part of the circular fuel cell along the dimensionless radial distance of the cell (operating voltage=0.93 V).

영향으로 온도가 약간 증가하다가 전지의 중심부로 갈수록 서서히 감소하였다. 사각형 연료전지에 비하여 비교적 균일한 온도분포가 얻어졌다. 상분리판의 온도는 음극 가스의 영향을 받아 전지 내부로 갈수록 온도가 약간씩 증가하나, 하분리판은 양극 가스의 영향을 많이 받고 또한 음극 가스의 영향을 받아 전지내에서 대체로 고른 온도분포를 보였다.

3-2. 운전전압의 변화에 따른 전지 성능

운전전압을 변화시켰을 때의 각 가스들의 전환율과 전류밀도분포 및 온도분포가 얻어졌다. 운전전압을 변화시켰을 때 반지름 방향의 무차원 거리에 따른 음극 가스 및 양극 가스의 전환율이 Fig. 3에 나타나 있다. 운전전압이 낮을 때보다 운전전압이 높을 때에 가스들의 전환율이 낮고 평균전류밀도가 낮게 나타났다. 그래프에서 보면 전지의 가운데 양극가스 입구 가까이에서는 전환율의 증가율이 완만하다가 전지의 바깥에 가까워질수록 전환율의 증가율이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 수소가 유입되는 전지의 바깥쪽에서의 반대쪽 음극판상의 수소 농도가 커서 전환율의 변화가 크게 나타나는 것이다.

Fig. 4에 나타난 반지름 방향으로의 전류밀도분포도 같은 경향을 보였다. 원형 전지의 바깥쪽으로 갈수록 전환율의 변화량이 커지기 때문에 전류밀도가 전지의 바깥쪽으로 갈수록 크게 증가함을 보였다. 그리고, 운전전압이 감소할수록 전류밀도는 높아졌다. 전압이 낮을수록 전지의 바깥쪽에서 전류밀도가 높는데 반하여 원통형 유입구 부근에서는 전압이 낮아짐에 따라 전류밀도가 증가하다가 낮아지고 있다. 이는 전압이 낮아질 때 수소 가스

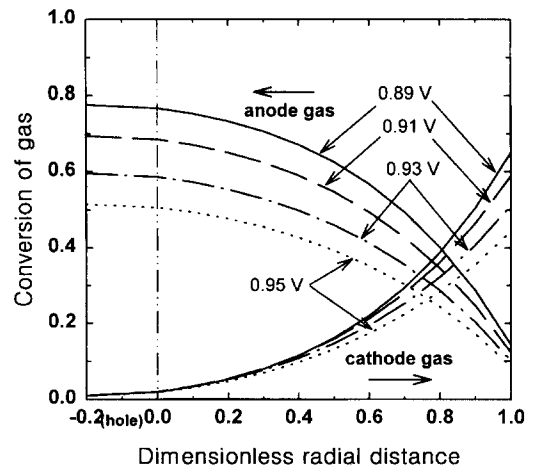


Fig. 3. Conversion of anode and cathode gases along the dimensionless radial distance of the circular fuel cell at different voltages.

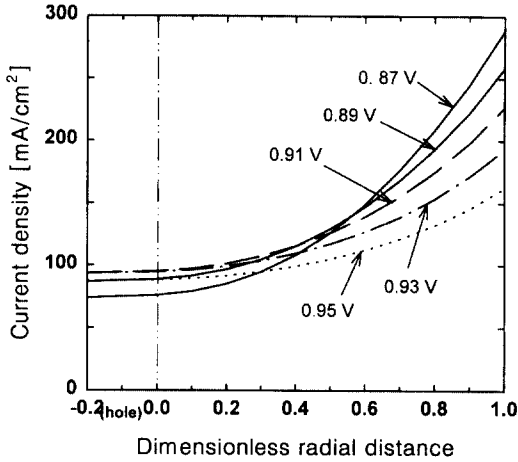


Fig. 4. Current density distributions along the dimensionless radial distance of the circular fuel cell at different voltages.

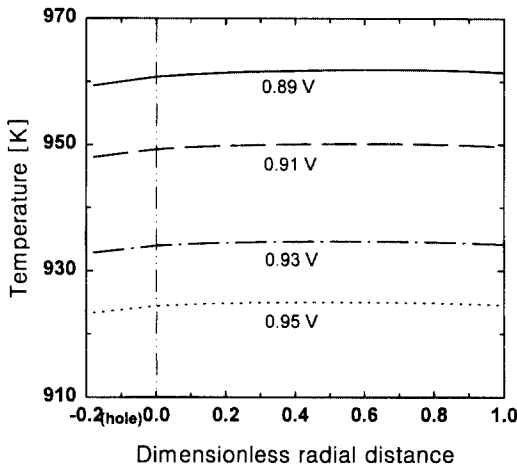


Fig. 5. Temperature distributions of the electrode-electrolyte plate along the dimensionless radial distance of the circular fuel cell at the different voltages.

의 전환율이 커져서 전류밀도가 증가하다가 전압이 더 낮아지면 원통형 유입구 부근에서 음극 가스중 수소의 농도가 너무 낮기 때문에 전류밀도가 감소한 것이다.

여러 전압에서의 전극-전해질판의 온도 분포가 Fig 5 에 나타나 있다. 전압이 증가할수록 온도가 낮는데, 이것은 전압이 증가할수록 가스의 전환율이 적어 생성열이 작기 때문이며 따라서, 출력도 적게 된다.

3-3. 원형과 사각형 단위전지의 성능 비교

원형 전지와 흐름이 십자류인 사각형 전지의 성능이 비교되었다. 원형 전지에서는 음극 가스와 양극 가스가

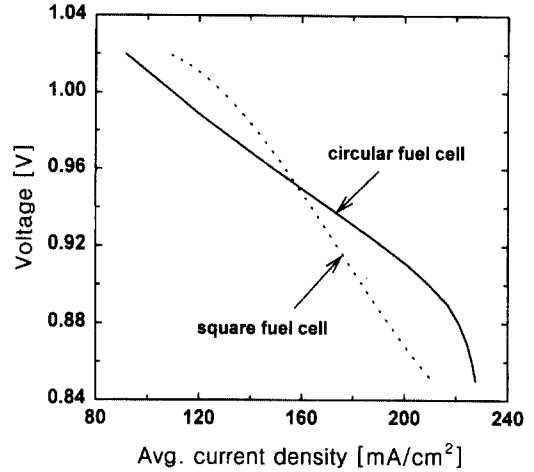


Fig. 6. Changes of the voltage with the average current density in the circular and the square fuel cells.

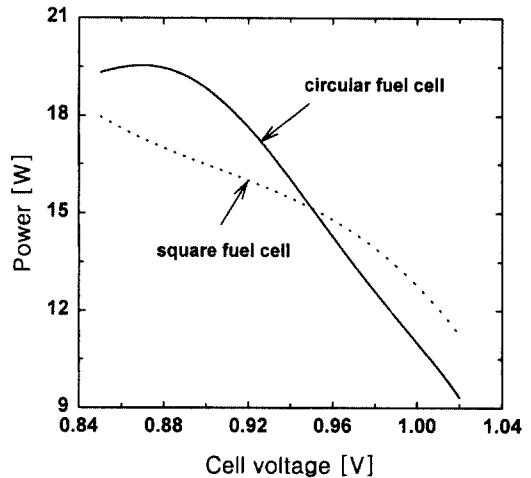


Fig. 7. Changes of the power with the cell voltage in the circular and the square fuel cells.

역방향으로 흐르나 사각형 전지에서는 가스의 흐름이 십자류로서 정확하게 일치하지는 않으나 차이점이 성능 비교에 큰 영향을 주지 않을 것으로 사료된다¹²⁾.

Fig. 6과 7에서는 십자류 사각형 전지와 원형 전지에서의 평균전류밀도의 변화에 따른 전압의 변화와 전지 전압의 변화에 따른 출력의 변화가 비교되었다. Fig. 6에서 보듯이 전류밀도가 증가함에 따라 전해질의 ohmic 저항에 의한 전압 손실의 증가로 전압은 평균전류밀도에 대해 거의 선형적으로 감소하고 있다. 높은 전압에서는 원형 전지보다 사각형 전지에서의 평균전류밀도가 더 크게 나타나지만, 낮은 전압에서는 원형 전지에서의

평균전류밀도가 더 크게 나타났다. 전압이 낮은 경우에는 Fig. 3에서 보듯이 가스의 전환율이 높아 음극 가스의 출구에서 수소 농도가 매우 낮는데, 원형 전지에서 목적하는 바와 같이 적은 양의 수소가 좁은 면적에 모이게 되므로 전기화학 반응속도를 높일 수 있는 것이다. 그리하여 원형 연료전지에서 사각형 연료전지에서 보다 더 높은 전류밀도가 얻어지는 것이다.

전지 작동전압의 변화에 따른 출력의 변화인 Fig. 7에서도 이러한 영향이 나타나고 있다. 전압이 증가함에 따라 출력은 감소하는데 이것은 전류밀도 제곱의 감소율이 전압의 증가율보다 크다는 것을 의미한다. 전압이 낮을 때에는 사각형 전지보다 원형 전지에서 출력이 더 큰 값을 보였고, 전압이 높을 때에는 사각형 전지에서의 출력이 더 큰 값으로 나타났다. 이것도 전환율이 클 때에 원형 전지의 효율성이 증가함을 보여주는 것이다.

Fig. 8에는 사각형 전지와 원형 전지에서의 음극 가스 및 양극 가스의 전환율 변화에 따른 전압의 변화를 나타내었다. 전환율에 따른 전압의 변화도 평균전류밀도에 따른 전압의 변화와 마찬가지로의 경향을 보였다. 낮은 전압에서는 원형전지에서 음극 및 양극 가스의 전환율이 큰 반면, 높은 전압에서는 사각형 전지에서 가스의 전환율이 크게 나타났다. Fig. 3에서도 알 수 있듯이 원형 단위전지에서는 음극 가스인 수소가 바깥쪽에서 유입될 때 반응이 활발히 일어나고, 출구쪽에서는 수소의 양이 적을 때에 좁은 영역에 모이므로 농도가 높아져 반응속도가 빨라지고 전환율이 커지게 된 것이다. 원형 전지의 가운데 원통형 유입구로 유입되는 양극 가스는 음극 가스의 원통형 출구 부근에서 반응하는 수소의 양

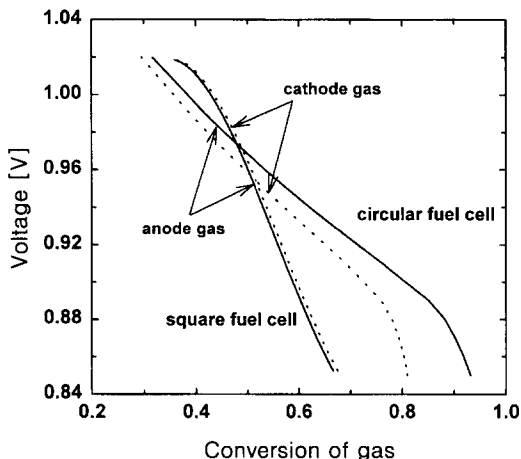


Fig. 8. Changes of the voltage with the conversion of anode and cathode gases in the circular and the square fuel cells.

이 상대적으로 적기 때문에 음극 가스보다 입구에서의 전환율이 작고, 전체적인 전환율도 음극 가스보다 적게 나타난다. 반면에 사각형 전지에서는 전압 변화에 따른 음극 가스와 양극 가스의 전환율의 차이가 크지 않았다. 이는 사각형 전지에서의 가스 흐름이 십자류이었기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

원형 단위전지에 대한 수치모사를 수행하여 전지의 성능, 온도 및 전류밀도 분포를 얻었고, 동일한 면적을 가진 십자류 흐름의 사각형 단위전지와 전지 성능을 비교하였다.

전지 각 부분에서의 온도분포는 사각형 연료전지에 비해 대체로 고른 온도분포를 보였다. 음극 가스는 입구인 전지 바깥쪽에서 온도가 상승하다가 전지의 내부에서 거의 일정하게 온도가 유지되었다. 전지의 중심 원통형 유입구 가까이에서는 유입되는 양극 가스의 낮은 온도의 영향으로 음극 가스의 온도는 감소하는데, 반응 후 남은 적은 양의 수소가 좁은 영역에 있게 되므로 온도가 크게 감소하는 것을 피할 수 있었다. 양극 가스는 원통형 입구 부근에서 온도가 높다가 감소하는데, 출구쪽에서 음극 가스와의 반응량 증대의 영향으로 다시 약간 증가하였다.

전지에서는 운전전압이 낮을 때에 가스들의 전환율이 높고 평균전류밀도도 높게 나타났다. 그리하여 전압이 낮을 때에 음극 가스 즉 연료 가스인 수소가 가스 유통로를 통과하면서 소모되어 적은 양이 되었을 때 좁은 영역에 모이게 하는 원형 전지의 효율성이 컸다. 전압이 낮을수록 전지의 바깥쪽에서 전류밀도가 높는데 반하여 원통형 유입구 부근에서는 전압이 낮아짐에 따라 전류밀도가 증가하다가 낮아지고 있다. 이는 전압이 낮아질 때 수소 가스의 전환율이 커져서 전류밀도가 증가하다가 전압이 더 낮아지면 원통형 유입구 부근에서 음극 가스중 수소의 농도가 너무 낮기 때문에 전류밀도가 감소한 것이다.

일정한 전압에서 얻어지는 원형과 사각형 단위전지의 평균전류밀도나 출력을 비교할 때, 높은 전압에서는 사각형 전지에서 더 크게 나타났지만 낮은 전압에서는 원형 전지에서 더 크게 나타났다. 또한, 음극 및 양극 가스의 전환율도 마찬가지로였다. 이는 원형 전지에서 출구쪽에서 음극 가스인 수소의 양이 적을 때에 좁은 영역에 모이므로 농도가 높아져 반응속도가 빨라지고 전환율이 커지게 된 것이다. 즉, 작동 전압이 낮을 때 가스의 전환율이 커서 원형 전지의 목적하는 바가 잘 나타난 것이다.

사용기호

b	thickness, cm
c	concentration of gas, gmol/cm ³
C _p	heat capacity, J/gmol · K
F	Faraday's constant, 96501 C/equiv., 26.8 A · hr/mol
G	gmoles of gas generated and consumed per unit width, gmol/cm
h	heat transfer coefficient, J/cm ² · hr · K
i	current density of the cell, mA/cm ²
J	dimensionless current density, i/i_{max}
k	thermal conductivity, J/cm · hr · K
\dot{m}	molar flow rate, gmol/cm · hr
P	pressure, atm
q	heat of generation per unit cell area, J/cm ²
R	gas constant, 82.06 cm ³ · atm/gmole · K, 8.314 J/gmol · K
R _i	radius of the hole, cm
R _c	radius of the cell, cm
R _{ohm}	ohmic cell resistance, Ω
r	radial distance, cm
T	temperature, K
V	cell operating potential, V
V _N	equilibrium potential in equation (5), V
V ^o	standard potential, V
v	linear velocity of gas, cm/hr
X _i	mole fraction of the gas component i
Z	effective cell resistance, cm ²

Greek symbols

η_a	anodic overpotential (<0), V
η_c	cathodic overpotential (>0), V
κ	conductivity of the bulk electrolyte, ($\Omega \cdot \text{cm}$) ⁻¹
λ	conversion of hydrogen
μ	conversion of carbon dioxide
ξ	dimensionless distance in the radial direction ($(r-R_i)/(R_c-R_i)$)

하첨자

a	anode
c	cathode
C	Carbon dioxide
e	electrode-electrolyte
g	gas
H	hydrogen
h	hole
i	value at the inlet of the gas
O	oxygen
r	radial direction
s	separator
W	water

상첨자

o	value at the entrance
---	-----------------------

참고문헌

- Hirschenhofer, J.H. and Stauffer, D.B.: Fuel Cells A Handbook (1994).
- 안영주, 정귀영, 주재백, 남석우, 오인환, 임태훈, 홍성안: 화학공학, **32**(6), 830 (1994).
- 김태진, 안영주, 주재백, 정귀영, 남석우, 오인환, 임태훈, 홍성안: 에너지 공학, **4**(3), 354 (1995).
- 안영주, 정귀영, 주재백, 남석우, 오인환, 임태훈, 홍성안: 화학공학, **33**(4), 479 (1995).
- Leo, J.M., Bolmen, J. and Mugerwa, M.N.: "Fuel Cell System", Plenum Press, 345 (1992).
- 안영주: 석사논문, "용융탄산염 단위 연료전지내의 에너지와 물질수지에 의한 전지성능과 온도분포에 관한 연구", 홍익대학교 (1994).
- Sampath, V. and Sammels, A.F.: J. Electrochem. Soc., **127**, 79 (1980).
- Appleby, A.J. and Foulkes, F.R.: "Fuel Cell Handbook", 539 (1989).
- Selman, J.R.: Molten Salt Committee of the Electrochemical Society of Japan (1988).
- Wolf, T.L. and Wilemski, G.: J. Electrochem. Soc., **130**, 48 (1983).