

# 인산형 연료전지의 성능해석을 위한 스택내의 열전달 현상에 관한 연구

문덕용\*, 구자용\*, 서종철\*, 김 유\*\*

## A Study on Heat Transport Phenomena in Fuel Cell Stack for the Performance Analysis of Phosphoric Acid Fuel Cell

Duck-Yong Mun \*, Ja-Yong Gu \*, Jong-Chul Seo \*, Yoo Kim \*\*

### Abstract

The effect of various parameters, such as temperature, current density and operating voltage on the performance of phosphoric acid fuel cell stack was studied by using numerical analysis.

The utilization ratio of reaction gas, inlet condition of reaction air and cooling air, inlet condition of cooling air flow ratio were changed regularly.

The results showed good agreements with the existing results and experimental ones.

---

\* 충남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 충남대학교 공과대학 기계공학과 교수

## 1. 서 론

인산형 연료전지는 수소와 공기중의 산소를 전기화학적 반응을 통하여 직접 전기를 얻는 발전장치로서 에너지의 이용 효율이 매우 높고 천연가스나 메탄올과 같은 석유대체 연료를 사용하며 공해 배출요인이 아주 작아 미래의 발전방식으로 각광을 받고 있다.<sup>1),2)</sup> 연료전지는 현재의 기술수준으로는 전기효율이 화력발전과 비슷하나 전지내에서 발생하는 폐열을 이용할 경우 최대 83%의 이온발전효율을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

전기화학 반응에 의하여 생성되는 생성물을 거의 물 뿐이므로 무공해이며 장치가 상대적으로 소규모이므로 부지의 선정이 용이하여 한국실정에 잘 맞는 발전방식이라고 생각된다.

연료전지의 발전원리는 1839년 영국의 그로브경키이 물의 전기분해 실험중 수소와 산소가 결합하면 물과 전기가 얻어진다는 것을 밝히면서 알려졌으며 그후 계속적인 연구가 진행되어 왔으며 4) ~ 7) 미국과 일본등 선진기술국에서는 연료전지의 민수화를 위하여 많은 연구부자와 노력을 기울여 온바 현재는 제한적으로나마 연료전지의 실용화가 시작되었다.

한편 국내에서의 연료전지기술에 대한 연구 및 개발은 아주 초기단계이며 80년 중반부터 대체에너지의 중요성이 인식되면서 연료전지를 대상으로 연구개발이 점차 본격화 되어 가고 있다. 인산형 연료전지는 전해질의 특성상 전지의 평균온도는 180°C ~ 200°C내에서 작동해야 하고 온도분포도 균일하게 하는 것이 필요하다.

그러나 전지내 온도분포는 반응기체의 가스조성, 압력 온도등에 강하게 영향을 받으므로 전지내의 온도분포는 같지 않다. 이에 본 연구에서는 인산을 포화상태로 주입시켜 놓은 다공질 전해질 층을 중앙으로 단위전지와 냉각관이 교대로 주기적으로 적층되어 있다고 가정된 연료전지 스택을 대상으로 연료로 사용되는 수소가스와 반응에 필요한 공기이용률과 냉각기체 입구온도 및 유향등의 변화가 스택내에서의 정상상태 온도분포에 어떤 영향이 미치는지 알아보고 그밖의 중요한 변수들의 영향을 유한차분법으로 수치해석하여 고찰하였다.

## 2. 스택(Stack)의 구조와 반응과정

### 2.1 기하학적 구조

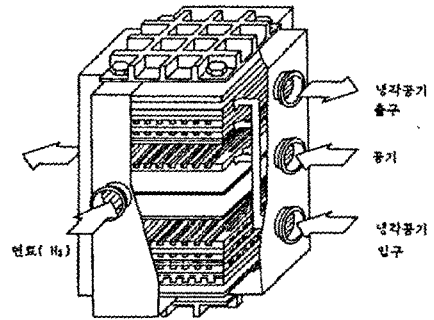


Fig.1 Configuration of cell stack geometry

연료전지에서 스택이라 함은 Fig.1에 나타난 것 같이 인산을 포화상태로 주입시켜 놓은 전해질층을 중앙으로 단위전지가 주기적으로 겹쳐져 있는 몸체 그 자체를 말하며 전극은 다공성 물체로 구성되어 있으며 연료와 공기는 유로를 통하여 직각으로 유입하게 된다.

### 2.2 반응과정

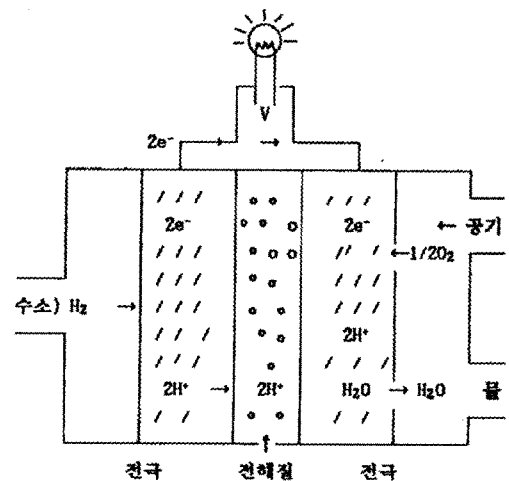
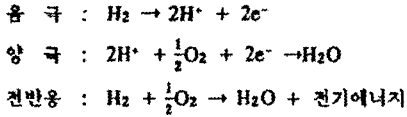


Fig.2 Reaction mechanism in cell stack

Fig.2에 나타난 것 같이 전극을 통한 반응과정은 연료에 포함된 수소는 다공성의 전극을 통과하여 촉매처리된 전극표면에서 수소 양이온(H<sup>+</sup>)과 전자(e<sup>-</sup>)로 분리되며 양이온은 전해질을 통하여 산소(O<sub>2</sub>)가 공급되는 전극으로 움직이며, 이는 전극에 연결된 외부회로를 통하여 산소측 전극으로

르면서 전기가 발생되며 전과정을 통하여 반응열이 발생되어 전기와 열을 동시에 이용할 수 있다. 반응과정을 화학식으로 나타내면 다음과 같다.



### 3. 지배방정식

연료전지는 Fig.3에 나타난 해석모델에서 전극은 고체 전해질은 액체 반응물질은 기체이므로 이들이 스택내에서 상호간 잘 접촉한다는 것은 매우 어려운 일이며 동시에 연료전지의 구조상 가장 어려운 점이기도 하다. 또한 전기화학반응에 의하여 반응열이 발생하게 되고 이때 반응열을 균일하게 냉각시키지 못하면 스택내 온도구배가 생기게 되어 연료전지 성능에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

스택내에서의 확산효과, 전류밀도분포 및 각종 손실들과의 상호관계를 스택 한계를 대상으로 에너지 및 물질균형을 취하면 다음과 같은 식을 얻는다.

#### i) 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

#### ii) 운동량 방정식

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \Gamma \quad (2)$$

#### iii) 에너지 방정식

$$\rho \frac{DH}{Dt} = (k\nabla^2 T) + S \quad (3)$$

#### iv) 물질전달 방정식

$$\nabla N_j + \frac{\partial \rho_j}{\partial t} = R_j \quad (4)$$

연료전지 스택의 성능을 해석하기 위해 전달현상을 지배하는 방정식을 동시에 푼다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- 1) 전지의 스택은 단위전지가 대칭으로 적층되어 있다.
- 2) 연료 및 공기의 흐름은 이상기체 층류 흐름이다.
- 3) 전지내 압력은 일정하다.
- 4) 전지의 끝은 단열이다.
- 5) 전도열전달과 대류열전달 외는 무시한다.
- 6) 연료 및 공기의 농도구배는 일정하다.

7) 연료 및 공기유로의 폭과 깊이는 일정하다.

8) 절성력과 관성력 이외의 힘의 효과는 무시한다.

상기 가정을 적용하면 지배방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

#### i) 운동량 방정식

$$\mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial z^2} \quad (5)$$

#### ii) 에너지 방정식

$$\rho C_p [U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y}] = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_r \quad (6)$$

여기서  $k_x, k_y$ 는 단위두께당 평균 열전도율,  $q_r$ 는 전지내의 단위시간당 단위면적당 열발생율을 나타내며 화학반응에 의한 엔탈피 변화량과 전류의 비가역성에 따른 열발생의 총합을 말한다.

### 4. 수치해석

스택내 전달현상을 지배하는 방정식들은 대부분 비선형, 비계차, 비정상상태 편미분 방정식들로 표시되며 이론적으로 쉽게 푼다는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 전지란 반응기체 유로등의 기하학적 형상이 균일하고 대칭으로 적층되어 있다고 보고 유한차분 알고리즘을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

#### 4.1 수치해석 모델

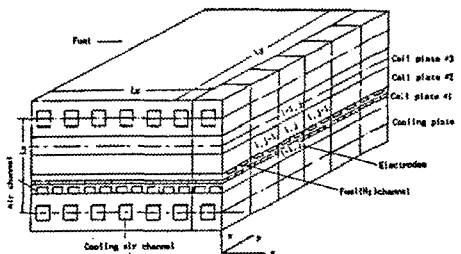


Fig.3 Geometry of a strip of element for the thermal analysis

Fig.3을 참조하여 수치해석을 수행하기 위하여 에너지방정식 (6)식을 전지판과 냉각판 사이에 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

1) 반응공기와 전지판간의 에너지 전달

$$t \cdot k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=t} - k_x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x - \frac{C_p \cdot m_p}{P_p} \frac{\partial T_p}{\partial y} = -(V^* - v)I \quad (7)$$

2) 냉각기체와 냉각판간의 에너지 전달

$$t' \cdot k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + 2k_x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=t'/2} - \frac{C_c \cdot m_c}{P_c} \frac{\partial T_c}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

3) 반응공기 유통로의 에너지 전달

$$m_p \cdot C_p \frac{dT_p}{dy} = h_p \cdot S_p (T - T_p) \quad (9)$$

4) 냉각공기 유통로의 에너지 전달

$$m_c \cdot C_c \frac{dT_c}{dy} = h_c \cdot S_c (T - T_c) \quad (10)$$

여기서, P : 반응공기

C : 냉각공기

5) 경계조건

$$x = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad : \text{대칭조건}$$

$$y = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad : \text{단열가정}$$

$$x = L_x, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad : \text{대칭조건}$$

$$y = L_y, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad : \text{단열가정}$$

$$y = 0, T_p = T_p \quad : \text{inlet}$$

$$y = 0, T_c = T_c \quad : \text{inlet}$$

본연구에서는 반응공기와 냉각공기의 유입방향을 y방향으로 잡고 연료의 유입방향을 z방향으로 잡아 z, y방향의 절점의 수를 12구간으로 나누어 수치해석을 수행하였다.

## 5. 결과 및 고찰

### 1) 이용율과 전지평균온도와의 관계

이용율 증가에 따라서 전지내 평균온도는 증가하는 경향을 나타냈다. Fig.4에 이용율을 점점 변화시켰을때의 전지내 평균온도의 변화를 나타냈다. 이용율을 점차 증가시켰을때 전지내 평균온도는 완만하게 증가하고 이용율 증가에 따른 평균온도의 증가는 거의 직선적이다.

### 2) 이용율과 온도분포와의 관계

Fig.5에 이용율 변화에 대한 전지판내의 온도분포 해석결과를 나타냈다.

이용율이 점점 증가함에 따라 전지판의 온도는 증가하는 경향에 있으나 전지판 상부와 하부의 온도차이는 심하지 않으며 대략 3°C ~ 5°C 간격으로 일정하게 분포되어 있으며 입구측에서 최저, 출구측에서 최고가 됨을 알 수 있다.

### 3) 냉각기체 입구온도의 영향

냉각기체 입구온도를 110°C ~ 150°C까지 10°C 간격으로 변화시켰을때 냉각기체 입구온도가 전지평균온도에 미치는 영향을 해석하였으며 그 결과를 Fig.6에 나타냈다. 전지내 평균온도는 입구온도에 비례해서 증가하는 경향을 나타내고 평균온도의 증가는 직선적이다. 따라서 전지내 평균온도를 200°C 이내로 유지하기 위한 냉각기체 입구온도의 범위는 120 ~ 140°C가 적절한 것으로 판단된다.

### 4) 반응공기 입구온도의 영향

반응공기 입구온도를 140 ~ 180°C까지 10°C 간격으로 변화시켰으며 이때 전지내 평균온도의 변화를 Fig.7에 나타냈다. 그림에 나타났듯이 반응공기 입구온도의 상승과 함께 전지내 평균온도는 증가하나 증가의 폭은 작으며 완만하다.

### 5) 냉각기체 유량의 영향

냉각기체 유량의 변화에 대한 전지내 평균온도의 변화를 Fig.8에 나타냈다. 냉각기체 유량이 증가하면 전지내 평균온도는 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이것은 냉각기체 유량이 증가하므로서 전지로부터 흡수하는 열량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그림에 나타났듯이 전지의 평균온도를 200°C이내로 유지하기 위해서는 냉각기체 유량의 배수 Qc가 25 이상이 되어야 200°C 안으로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 단위전지의 냉각판이 주기적으로 적층되어 있는 연료전지 스택을 대상으로 최적성능조건을 얻기 위해 연료 및 공기의 이용율, 냉각기체 입구온도, 반응공기 입구 온도, 냉각기체 유량 등르 변화시키면서 스택내의 온도분포 및 그밖의 관련 변수들의 영향에 대하여 해석해 보았다. 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 연료전지의 한 스택에 대하여 수치해석을 수행한 결과로서 기존의 연구결과 및 실험결과와 잘 일치하였으며 스택의 성능해석 및 설계자료로 이용될 수 있으리라 판단된다.

(2) 연료 및 공기이용율이 증가하면 평균온도는 거의 선형적으로 증가했다. 연료이용율 60% 공기이용율 40% 일때가 전지의 성능이 가장 우수했다.

(3) 냉각기체 입구온도가 증가하면 평균온도는 거의 직선적으로 증가했다. 냉각기체 입구온도를 기준 이상으로 높이면 전해질의 내구성이 약화되므로 전지의 성능에 맞추어 결정되어야 한다.

(4) 냉각기체 유량이 증가하면 평균온도는 선형적으로 감소했다. 이는 냉각기체 유량이 증가하므로써 전체 전지판내의 열을 흡수했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 전지내 동작온도와 부하의 변동에는 냉각기체 유량의 조절에 의하여 제어할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 최수현의 9인, "소출력 연료전지 발전기 개발(1)", 과학기술처, 1986. 6.
- [2] Archie W. Culp, Jr. "Principles of energy conversion", McGraw-Hill, 4th ed, pp7-11, 1987.
- [3] W.R. Grove, Philos. Mag. (1839) 3, 14, 127.
- [4] C. Westphal, DRP at 22393, (1880).
- [5] W. Ostwald, Zeitschr. f. electrochemie 1, (1984).

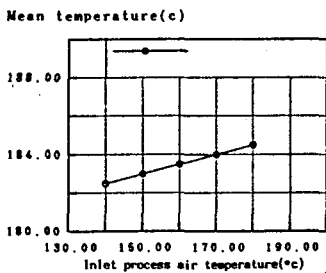


Fig. 7 Relation between inlet process air temperature and mean temperature

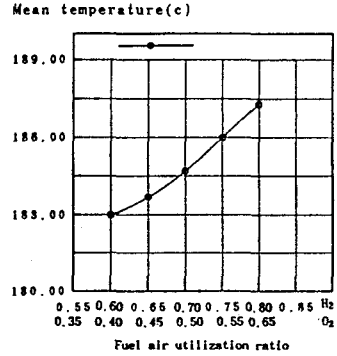


Fig. 4 Relation between utilization ratio and mean temperature

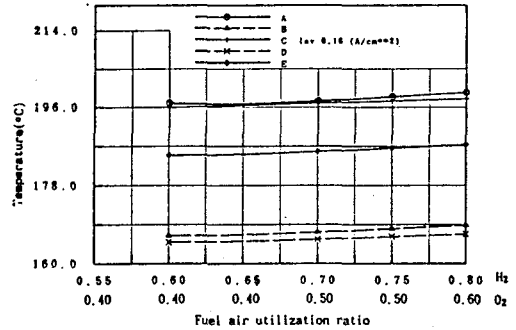


Fig. 5 Relation between utilization ratio and temperature distribution

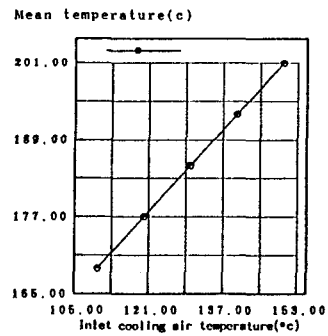


Fig. 6 Relation between inlet cooling air temperature and mean temperature

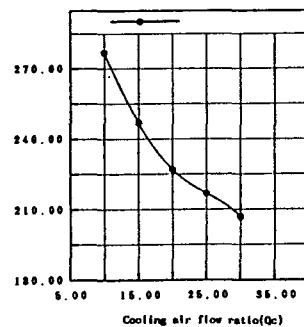


Fig. 8 Relation between cooling air flow ratio and mean temperature