J. of Korean Ind. & Eng. Chemistry,
Vol. 9, No. 5, October 1998, 768-773

# 금속수소 전극의 방전기구에 대한 수학적 모델

신 치 범† · 홍 정 호 · 윤 경 석* · 조 병 원* · 조 원 일* · 전 귀**

아주대학교 화학공학과, *한국과학기술연구원 화공연구부, **동양 중앙연구소
(1998년 6월 11일 접수, 1998년 6월 29일 채택)

# A Mathematical Model for the Discharge Mechanism of a Metal Hydride Electrode

Chee Burm Shin†, Jung Ho Hong, Kyung Suk Yun*, Byung Won Cho*, Won Il Cho*, and Gui Jeon**

Department of Chemical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea
*Division of Chemical Engineering, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea
**Tongyang Central Laboratories, Yongin 449-910, Korea
*(Received June 11, 1998; Accepted June 29, 1998)*

요 약: 금속수소 전극의 방전시 일어나는 방전과정을 설명할 수 있는 방전반응기구에 대한 수학적 모델을 제시하였다. 유한요소법을 이용하여 방전도중의 전극전위의 변화와 금속수소 입자내의 수소농도분포를 계산할 수 있는 전산모사 프로그램을 개발하였다. 방전전류의 세기, 금속수소 입자의 크기, 금속수소입자 내에서의 수소의 확산계수 및 전극의 공극률 등을 변화시키면서 해석을 실시한 바에 의하면, 이러한 인자들이 복합적으로 작용하여 금속수소전극의 방전특성을 결정하고 금속수소 입자내의 수소의 이용율에 영향을 미침을 알 수 있었다. 따라서 고율방전을 하면서도 금속수소 입자내의 수소의 이용율을 높임으로써 금속수소 전극의 방전특성을 향상시키기 위해서는 전극설계인자들의 최적화가 필요함을 확인할 수 있었다.

**Abstract:** A mathematical model of discharge mechanism of metal-hydride (MH) electrode was presented. A computer simulation program was developed in order to predict the variation of electrode potential and the distribution of hydrogen concentration within MH particles during discharge. By investigating the effects of the discharge current density, the size of MH particle, the diffusivity of hydrogen in MH particle, and the porosity of the electrode, it was found that these factors exerted a collective effect on the discharge characteristic of the electrode and the utilization of hydrogen in the MH particle. It was confirmed that an optimization of design factors of an MH electrode is necessary in order to execute a high-rate discharge and to improve the utilization of hydrogen in MH particle.

***Key words:*** *Metal Hydride, Discharge Mechanism, Mathematical Model*

## 1. 서 론

니켈-금속수소 (Ni-MH, MH는 metal hydride의 약자) 전지는 기존의 니켈-카드뮴 (Ni-Cd)전지에서 카드뮴 음극을 수소저장합금으로 대체한 전지로서 방전전압면에서 니켈-카드뮴전지 (1.2 V)와 비견될만하며 보다 높은 에너지밀도와 긴 수명을 가진다. 따라서 Ni-MH전지는 카드뮴의 공급부족과 환경오염이라는 문제점을 안고 있는 Ni-Cd전지를 많은 응용분야에서 대체하고 있다. 또한 자동차 배기가스에 의한 대기오염을 감소시킬 목적으로 개발되고 있는 전기자동차에 사용될 수 있다는 가능성으로 인하여 Ni-MH전지는 많은 연구자들의 관심 대상이 되고 있다[1-6].

현재까지 Ni-MH전지의 개발연구는 주로 합금의 조성비 또는 전극의 형태를 변형시키는 것과 같은 시행착오법에 근거하여 진행되어 왔다. 그러나 이 경우 연구개발에 소요되는 시간 및 비용이 막대하다는 문제점이 있다. 따라서 적절한 이론적 방법에 근거하여 연구개발에 필요한 시간 및 비용을 절감할 필요가 있다.

MH전극의 방전과정은 MH격자내에 있는 수소가 전극표면으로 이동하는 확산과 전극표면에서 수소가 전기화학적으로 수산이온과 반응하여 산화되는 전하전달반응, 생성된 전자가 금속입자들을 통하여 집전체 (current collector)로 이동하는 전도 및 반응에 참여할 수산이온들의 전극내부로의 이동 등으로 이루어져있다. 이러한 방전과정은 MH전극의 종류에 따라서 반응속도가 다르게 나타나며, 이러한 특성이 전지의 방전특성을 좌우하게 된다. 본 연구에서는 MH전극의 방전기구에 관한 수학적 모델을 제시하고, 전극의 최적설계를 위하여 수학적 모델에 근거한 전산모사를 수행함으로써 MH전극의 방전특성을 해석하고자 한다.

## 2. 수학적 모델

Figure 1은 본 연구에서 고려된 MH전극의 개략도이다. MH전극은 전해질속에 잠겨 있고 MH전극의 입자들은 표면에 다른 금속층이 없는 순수한 금속수소물질로 이루어져 있다고 가정한다. 이 때 금속은 분말의 형태이므로 전극은 원형의 입자들로 구성되고 이 입자들은 서로 접하고 있어서 집전체와 전기적인 연결을 가능하게 한다. 전극의 공극은 전해질로 채워져 있고 집전체 (nickel screen)는 전극의 중앙, 즉 x = d에 위치한다. 따라서 MH전극의 전체 두께는 2d이다.

† 주 저자 (e-mail: cbshin@madang.ajou.ac.kr)

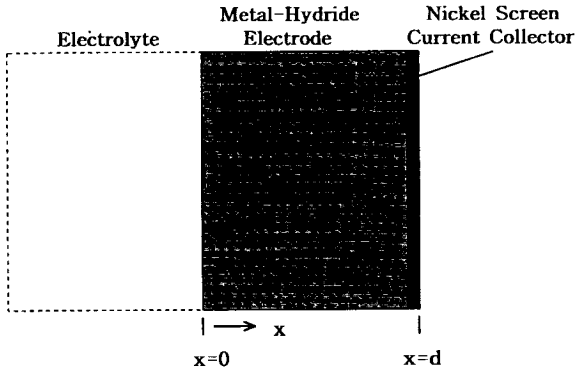


**Figure 1.** Schematic of the metal-hydride electrode.

### 2.1. 전기화학반응

방전하는 동안 MH전극에서 일어나는 반응은 흡착된 수소와 전해질로부터 나온 수산이온이 결합하여 물을 형성하는 산화반응이다[7]. 이러한 경우 전하의 전달은 금속수소입자의 표면에서 일어나고 전체반응은 다음과 같다:

$$MH_{ads} + OH^- \xrightarrow{\text{discharge}} M + H_2O + e^- \tag{1}$$

### 2.2. 지배방정식 및 경계조건

반응 (1)에 의하면 한 개의 수산이온이 한 개의 전자를 발생시킨다. 따라서 이온의 흐름으로 발생한 전류의 변화량은 전자에 의하여 발생한 전류의 변화량과 크기는 같고 방향은 반대이다[8]. 즉,

$$\frac{\partial i^{(l)}}{\partial x} = -\frac{\partial i^{(s)}}{\partial x} \quad \text{i.e.} \quad i^{(l)} + i^{(s)} = \text{constant} = i_{cell} \tag{2}$$

이다. 여기서 $i^{(l)}$와 $i^{(s)}$는 각각 이온의 흐름과 전자의 흐름으로 발생되는 전류 [A]이다. 음이온과 전자는 집전체를 향하여, 즉 x축 방향으로 이동하므로 전류는 반대방향으로 흐르게 된다. 이때 $i_{cell}$은 전지전극에서 적용되는 전류밀도 [A/cm$^2$]이다.

이온의 이동에 기인한 전류와 전위의 관계식은 Ohm의 법칙으로부터 다음과 같이 주어진다:

$$i^{(l)} = -\overline{k_l}\frac{\partial \phi^{(l)}}{\partial x} \tag{3}$$

여기서 $\phi^{(l)}$ [V]는 전해질에서의 전위이고 $\overline{k_l}$ [S/cm]는 전해질의 유효전기전도도이다. 이와 유사하게 전자의 이동에 기인한 전류도 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$i^{(s)} = -\overline{k_s}\frac{\partial \phi^{(s)}}{\partial x} \tag{4}$$

여기서 $\phi^{(s)}$ [V]는 전극 물질에서의 전위이고 $\overline{k_s}$는 금속분말의 유효전기전도도 [S/cm]이다.

전압 $\phi^{(l)}$과 $\phi^{(s)}$는 거리 x와 시간 t의 함수이다. 전위가 시간에 따른 변화는 시간이 지나면서 금속표면에 있는 수소의 농도가 변하고 농도는 반응속도에 영향을 주며 이어서 반응속도와 관련이 있는 전위를 변화시킨다는 사실에 기인한다.

전해질에서의 전류밀도를 x방향으로 미분한 것은 전극의 단위 부피당 활성접촉면적 $a$ [cm$^{-1}$]와 전기화학반응에 의해 발생한 전류밀도 j [A/cm$^2$]를 곱한 것과 같은데 이 식은 다음과 같다:

$$\frac{\partial i^{(l)}}{\partial x} = -\frac{\partial i^{(s)}}{\partial x} = a\ j \tag{5}$$

윗 식에 (3)과 (4)를 대입하면

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{k_l}\frac{\partial \phi^{(l)}}{\partial x}\right) = -a\ j \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{k_s}\frac{\partial \phi^{(s)}}{\partial x}\right) = a\ j \tag{7}$$

과 같이 변형된다. 이 때 $\phi^{(l)}$과 $\phi^{(s)}$가 집전체가 위치한 지점에서 만족해야 할 경계 조건은

$$\phi^{(s)} = 0 \qquad \text{at} \quad x = d \tag{8}$$

$$-\overline{k_l}\frac{\partial \phi^{(l)}}{\partial x} = 0 \qquad \text{at} \quad x = d \tag{9}$$

이다. 첫 번째 경계 조건은 이 지점에서 전극의 전위를 영으로 하여 기준으로 삼겠다는 것을 나타내고, 두 번째 경계 조건은 이온의 흐름이 없으므로 이온에 의한 전류가 영이라는 것을 나타낸다. 또 전극과 전해질이 접하고 있는 지점에서의 경계 조건은

$$-\overline{k_l}\frac{\partial \phi^{(l)}}{\partial x} = i_{cell} \qquad \text{at} \quad x = 0 \tag{10}$$

$$-\overline{k_s}\frac{\partial \phi^{(s)}}{\partial x} = 0 \qquad \text{at} \quad x = 0 \tag{11}$$

이다. 첫 번째 경계 조건은 이 지점을 통하여 흐르는 전류가 $i_{cell}$로 일정하다 (일정전류방전일 경우)는 것을 나타내고, 두 번째 경계 조건은 전자에 의한 전류가 영인 것을 나타낸다.

### 2.3. 전류밀도와 전위차의 관계식

반응 (1)에 의한 전류밀도는 Butler-Volmer의 식으로 표현된다고 가정할 때

$$j = j_{0,ref}\left\{\left(\frac{C_{H,s}}{C_{H,ref}}\right)\exp\left[\frac{\alpha F}{RT}(\phi^{(s)} - \phi^{(l)} - U_{eq,ref})\right] - \exp\left[\frac{-(1-\alpha)F}{RT}(\phi^{(s)} - \phi^{(l)} - U_{eq,ref})\right]\right\} \tag{12}$$

이다. 여기서 $j_{o,ref}$는 기준 교환전류밀도 (exchange current density) [A/cm$^2$], $C_{H,s}$는 금속입자 표면에서의 수소농도 [mol/cm$^3$], $C_{H,ref}$는 기준 수소농도 [mol/cm$^3$], $\alpha$는 대칭인자 (symmetry factor), F는 Faraday상수 [C], R은 기체상수 [J/mol · °K], T는 온도 [°K], $U_{eq,ref}$는 표준 칼로멜전극 (standard Calomel electrode; SCE)에 대한 기준 평형전위 [V]이다.

### 2.4. 금속입자에서의 수소 확산

금속입자내에서 수소의 확산은

$$\frac{\partial C_H}{\partial t} = \frac{D}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial C_H}{\partial r}\right) \qquad \text{for} \quad 0 < r < r_o \tag{13}$$

와 같이 표현된다. 여기서 $C_H$는 금속입자에서의 수소농도 [mol/cm$^3$]고 D는 수소의 확산계수 [cm$^2$/s]이며, $r_o$는 금속입자의 반경 [cm]이다. 이때 적용되는 경계조건은 입자의 중심에서는 농도대칭에 의하여

$$\frac{\partial C_H}{\partial r} = 0 \qquad \text{at} \quad r=0 \tag{14}$$

이다. 입자의 표면에서 수소는 반응 (1)에 의하여 전기화학적으로 전해질과 반응한다. 따라서 수소의 플럭스는 반응속도와 같고 입자 표면에서의 경계조건은

**Table 1.** Parameter Values and/or Equations Used to Get the Values of Parameters

| Parameter | value/equation |
|---|---|
| $\overline{k_l}$ | $\varepsilon^n k$ |
| $\overline{k_s}$ | $\sigma_{MH}^{(s)}(1-\varepsilon)$ |
| $a$ | $3(1-\varepsilon)/r_o$ |
| K | $C_{OH}\exp(5.57-6.15C_{OH}^{1/2}+13.4C_{OH}-1080\,C_{OH}^{2/3})$ |
| COH | $6.0\times10^{-3}$ mol/cm$^3$ |
| $\sigma_{MH}^{(s)}$ | 41505 S/cm |
| $C_{H,ref}$ | $11.2\times10^{-3}$ mol/cm$^3$ |
| $j_{o,ref}$ | $1.25\times10^{-6}$ A/cm$^2$ |
| $U_{eq,ref}$ | -1.2 V |
| $\alpha$ | 0.1 |
| F | 96,485 C |
| R | 8.314 J/mol · K |
| T | 298 K |

$$-D_H\frac{\partial C_H}{\partial r}=\frac{j}{F} \quad \text{at } r=r_o \tag{15}$$

와 같이 표현될 수 있다. 초기에는 수소 농도가 입자전체에서 일정하므로

$$C_H = C_{H,i} \tag{16}$$

이며, $C_{H,i}$는 초기의 수소농도 [mol/cm$^3$]를 나타낸다.

## 3. 전산모사

지배방정식 (6), (7)과 경계조건 (8)~(11)을 만족하는 $\phi^{(s)}$와 $\phi^{(l)}$ 및 금속수소 입자내에서의 수소확산방정식 (12)와 경계조건 및 초기조건 (14)~(16)을 만족하는 $C_H$를 구하기 위하여 Galerkin 유한요소법[9]을 채택하였다. 본 모델에서 전기화학반응속도식으로 Butler-Volmer의 식을 채택함으로써 야기되는 비선형성 (nonlinearity)과 시간에 따라 변화하는 전위 및 수소농도분포 변화를 추적하기 위하여 predictor-multicorrector법[10]을 사용하였다. x방향과 r방향으로 각각 29개의 linear element (30 nodes)를 사용하여 계산을 수행하였으며, HP 715/50 workstation에서 한 time-step을 계산하는데 소요되는 CPU time은 0.6초였다.

전산모사를 수행하기 위하여 공통적으로 사용된 parameter의 값들은 Table 1에 나타내었다[11]. 한편 금속입자, 금속입자내의 수소확산계수 및 다공성 전극의 공극률 (porosity)의 기본값으로는 0.001 cm, $5\times10^{-11}$ cm$^2$/s, 0.3을 각각 사용하였으며, 다른 값을 사용하여 계산을 수행한 경우는 그 값들을 별도로 언급하였다.

## 4. 결과 및 토의

아래의 그림들에서 보여진 전극전위는 x = d (집전체의 위치)에서의 금속수소의 전위와 x = 0인 위치에서의 전해질의 전위와의 차이이며 다음과 같이 계산된다:

$$\text{Electrode potential} = \phi^{(s)}|_{x=d} - \phi^{(l)}|_{x=0} \tag{13}$$

본 연구에서는 한국과학기술연구원 전기화학연구실에서 제조한

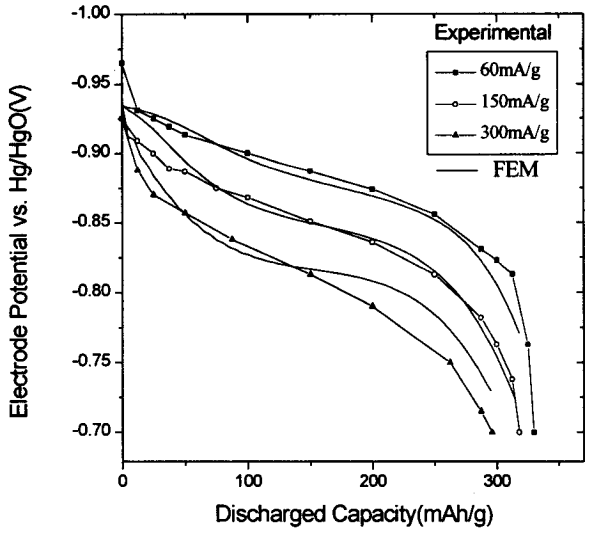


**Figure 2.** Comparison between the experimental and predicted electrode potential curves versus SCE for various rates of discharge.

$Zr_{0.5}Ti_{0.5}V_{0.6}Ni_{1.2}Co_{0.2}$ 합금전극을 해석의 대상으로 하였다. Figure 2는 이 전극의 방전전류밀도의 변화에 따른 방전특성의 변화를 나타낸 실험치와 유한요소법에 근거하여 예측된 이론치를 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있는 방전특성은 방전전류밀도가 커질수록 과전압이 커져서 방전용량이 감소하고 SCE에 대한 전극전위의 절대값도 작아진다는 것이다. 이러한 현상은 고율방전시 금속수소입자의 표면에서 수소가 더 빠르게 고갈되기 때문이며, 이러한 사실로부터 금속수소입자 내부로부터의 수소의 확산속도가 입자의 표면에서 일어나는 전기화학반응의 속도보다 느리다는 것을 유추할 수 있다. 표면에서의 수소의 고갈은 입자내에 있는 수소 전부가 반응에 참여하기 전에 전극의 전위를 강하시키는 원인이 된다. 그림에서 보는 바와 같이 실험에서 측정한 방전곡선과 본 연구에서 제시한 수학적 모델에 의하여 예측된 방전곡선이 방전전류밀도 60 mA/g과 150 mA/g에서는 매우 잘 일치하며, 방전전류밀도 300 mA/g에서는 방전후기에 이르게 되면 이론적으로 구한 방전곡선이 낮은 방전전류의 경우와 비교할 때 실험에 의한 방전곡선으로부터 벗어나는 정도가 커지나 전반적인 방전특성의 경향성은 잘 보여주고 있다. 이로써 본 연구에서 제시한 수학적 모델이 타당하다는 것을 부분적으로 확인할 수 있다.

Figure 3~5는 방전전류밀도가 각각 60 mA/g, 150 mA/g, 그리고 300 mA/g일 때 금속수소입자 내부의 수소농도분포가 시간에 따라 변화하는 양상을 나타낸 그림이다. 세 경우 모두 수소가 전기화학적으로 수산이온과 반응하여 소모되는 입자의 표면으로 갈수록 수소농도가 감소하게 됨을 보여준다. 방전이 진행될수록 금속수소 내부에 존재하는 수소의 절대 농도는 감소하게 된다. 방전후기에는 표면의 수소농도가 영에 가까운 값에 접근하게 되고, 이에 따라 전극 전위의 절대값은 급격히 줄어들게 된다. Figure 5에서 보는 바와 같이 고율 방전의 경우는 금속수소입자 표면의 수소 농도와 입자 내부의 수소 농도의 차이가 심하고, 방전후기에 이르러도 금속수소입자 내부에는 소모되지 않은 수소가 상당량 남아있게 된다. 그러나 Figure 3에서 알 수 있는 것처럼 저율방전시에는 입자 내부와 표면과의 수소농도 차이도 적고, 방전후기에 이르게 되면 입자내부에 남아 있는 수소의 양도 고율방전시와 비교할 때 훨씬 줄어들게 된다. Figure 4는 Figure 3과 Figure 5의 중간에 해당하는 경우로서

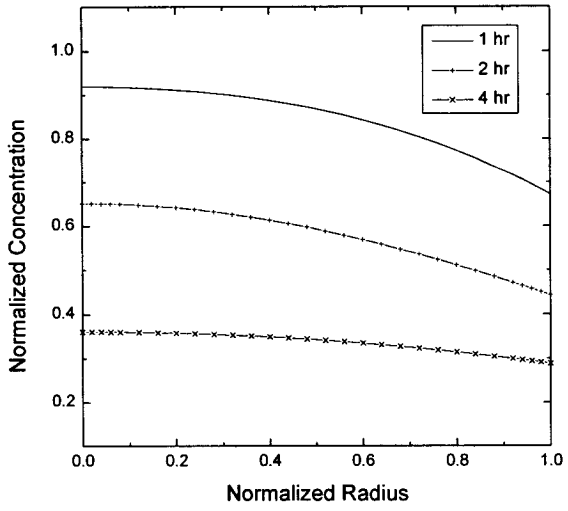


**Figure 3.** Hydrogen concentration distribution inside the metal-hydride particle for the discharge rate of 60 mA/g.

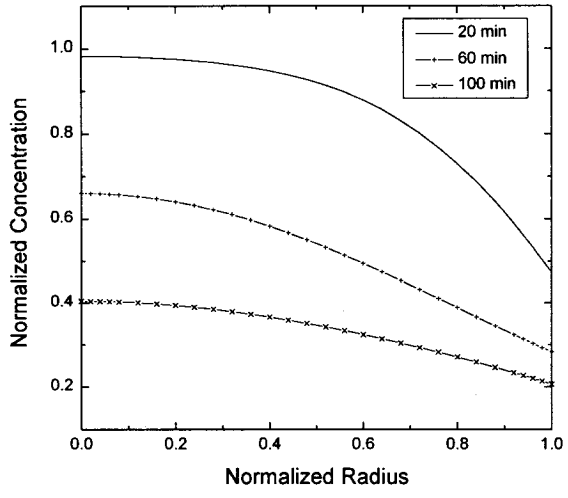


**Figure 4.** Hydrogen concentration distribution inside the metal-hydride particle for the discharge rate of 150 mA/g.

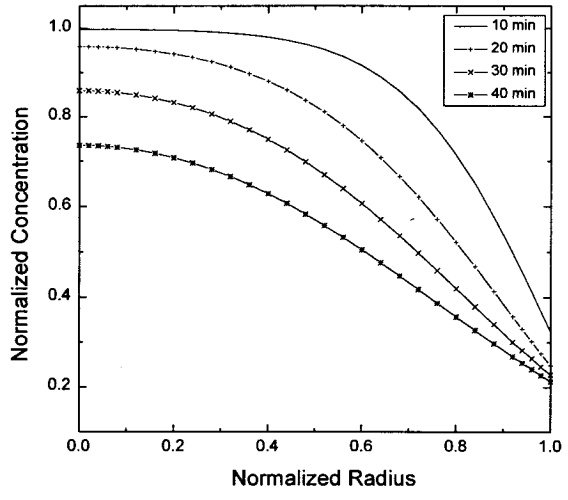


**Figure 5.** Hydrogen concentration distribution inside the metal-hydride particle for the discharge rate of 300 mA/g.

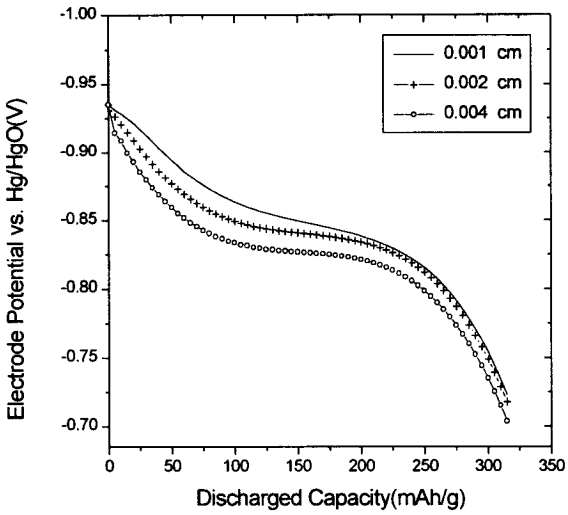


**Figure 6.** Electrode potential versus SCE for various radii of metalhydride particle for the discharge rate of 150 mA/g.

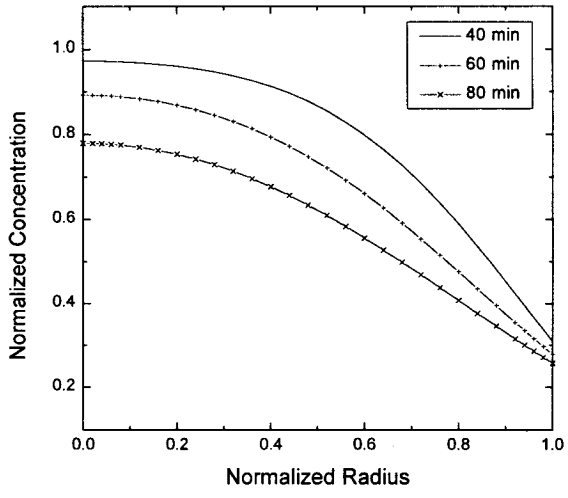


**Figure 7.** Hydrogen concentration distribution inside the metal-hydride particle for the particle radius of 0.002 cm.

Figure 3의 경우에 비하여는 수소의 농도분포가 더 불균일하나, Figure 5보다는 더 균일함을 알 수 있다.

Figure 6은 150 mA/g으로 방전시 금속수소입자의 크기변화가 방전특성에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 입자크기를 증가시키면 방전속도를 증가시킨 것과 유사한 효과가 나타난다. 이것은 입자내부의 수소가 확산하여 입자의 표면으로 이동하는 확산경로의 길이가 길어졌기 때문이다. 같은 방전속도로 방전할 때 입자의 입경이 큰 경우 입자표면의 수소농도는 입경의 작은 경우보다 더 빨리 감소하게 되고 따라서 전극전위도 더 빨리 강하하게 만든다. Figures 7과 8은 금속입자의 반경을 각각 0.002 cm와 0.004 cm로 변화시켰을 때 입자 내에서의 시간에 따른 농도분포를 나타내는 그림이다. 이 그림들을 Figrue 4와 비교하면 입자의 크기가 커질수록 수소농도의 분포는 불균일해지며, 방전 후기에 이르러도 금속수소입자의 내부에 상당량의 수소가 남아 있게 됨을 확인할 수 있다.

Figure 9는 150 mA/g으로 방전하였을 때 금속수소입자 내에서의 수소의 확 산계수의 크기에 따른 방전곡선의 변화를 나타낸다. 여기서 확산계수의 값이 커질수록 방전속도를 줄인 것과 같은 효과가 나타나는데 이것은 입자의 크기가 같은 경우 표면전기화학반응에

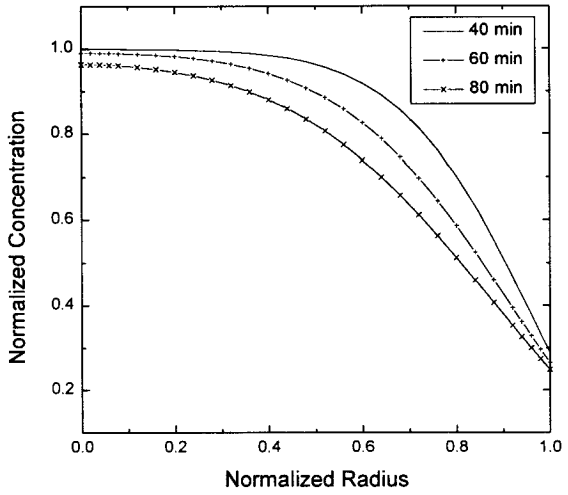


**Figure 8.** Hydrogen concentration distribution inside the metal-hydride particle for the particle radius of 0.004 cm.

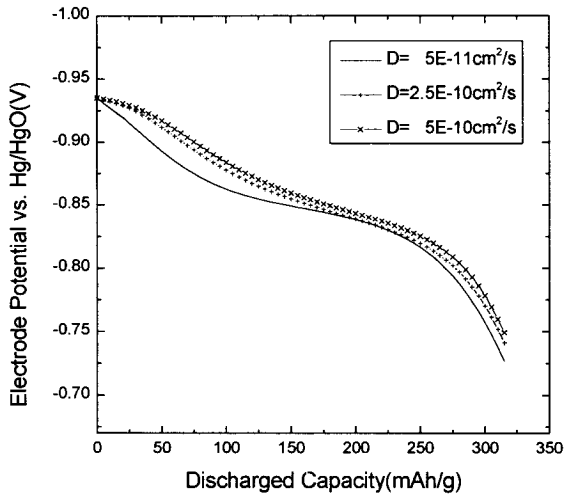


**Figure 9.** Electrode potential versus SCE for various diffusion coefficient of metal-hydride particle for the discharge rate of 150 mA/g.

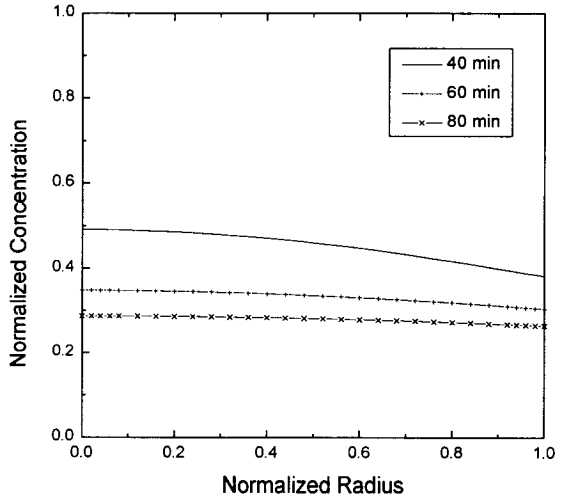


**Figure 10.** Hydrogen concentration distribution inside the metal-hydride particle for the diffusion coefficient of $2.5\times10^{-10}$ $cm^2/s$.

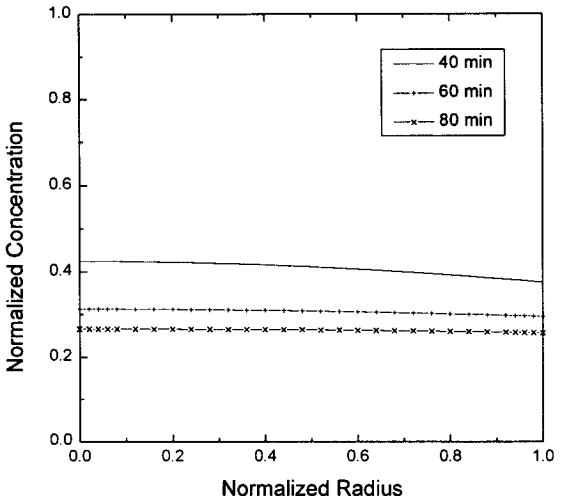


**Figure 11.** Hydrogen concentration distribution inside the metal-hydride particle for the diffusion coefficient of $5\times10^{-10}$ $cm^2/s$.

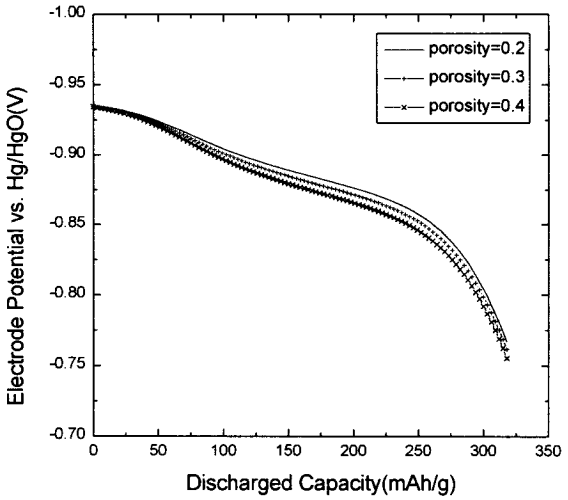


**Figure 12.** Electrode potential versus SCE for various porosity for the discharge rate of 60 mA/g.

의한 수소 소실속도는 일정하지만 확산계수의 값이 커짐에 따라 수소의 전달속도는 빨라지기 때문이다. 그러나 확산계수의 크기차수(order of magnitude)가 어느 한계이상으로 커지게 되면 확산으로 인한 방전곡선의 변화를 기대하기 어렵다. Figure 9의 결과에 의하면 확산계수의 값이 $2.5\times10^{-10}$ $cm^2/s$보다 큰 영역에서는 확산계수의 변화가 방전특성에 큰 영향을 미치지 않고 있다. Figures 10과 11은 확산계수의 값을 Figure 4의 경우보다 각각 5, 10배로 증가시켰을 때 입자 내에서의 수소의 농도분포이다. Figures 10과 11을 Figure 4와 비교하면, Figure 4의 경우에 비하여 Figure 10의 경우가 수소의 농도분포가 더 균일하고, Figure 11의 경우는 보다 더 균일해짐을 알 수 있다. 그러나 그 차이는 방전후기로 갈수록 줄어들게 된다. 따라서 확산계수의 값이 어느 한계이상으로 증가하면, 방전특성에 미치는 확산계수의 영향도 줄어들게 됨을 알 수 있다.

Figure 12는 60 mA/g으로 방전시 공극률 (porosity)의 변화가 방전특성에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. Figure 12에서 공극률의 변화가 다른 인자들에 비하여 방전특성에 미치는 영향이 크지 않음을 관찰할 수 있다. 공극률의 감소는 입자들의 반응활성 표면적을 증가시켜주고 전해질의 유효전기전도도를 감소시킨다. 그러나 두 요소들의 영향은 반대로 나타난다. 먼저 활성표면적의 증가는 국부

전류밀도를 감소시키고 따라서 반응에 의한 과전위 (overpotential)를 감소시킨다. 이와는 반대로 유효전기전도도의 감소는 Ohmic 손실을 증가시킨다. 따라서, 공극률이 전체적으로 방전특성에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

금속수소전극의 방전반응기구에 대한 수학적 모델을 제시하였다. 방전 전류의 세기, 금속수소입자의 크기, 금속수소입자 내에서의 수소의 확산계수, 전극의 공극률 등을 변화시키면서 유한요소법에 근거하여 방전도중의 전극 전위의 변화 및 금속수소 입자내의 수소농도분포의 변화에 대한 해석을 실시함으로써 다음과 같은 결론들이 도출되었다.

방전전류밀도의 증가는 입자내의 수소농도분포를 불균일하게 함으로써 금속수소에 저장된 수소의 이용율을 저하시킨다. 금속입자의 크기를 감소시키고, 수소의 확산계수를 어느 선까지 증가시킴으로써 입자 내에서의 수소의 농도분포를 균일하게 하여 방전후기에 이르러도 입자내에 남아있는 수소의 농도를 최대한 줄임으로써 방전효율을 높일 수 있음이 발견되었다. 그리고 공극률의 변화는 상이하게 작용하는 요소들로 인하여 다른 설계인자들에 비하여 방전특성에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 금속수소 전극의 설계인자들이 전극의 방전특성에 미치는 영향을 정량적으로 예측함으로써 전극설계의 최적화에 효과적으로 활용될 수 있다.

## 감 사

본 논문은 1996년도 한국전력공사 지원자금으로 시행한 기술개발사업의 기술개발 결과의 일부입니다.

## 참 고 문 헌

1. N. Furukawa, *J. Power Sources*, **51**, 45(1994).
2. K. Petrov, A. A. Rostami, A. Visintin, and S. Srinivasan, *J. Electrochem. Soc.*, **141**, 1747(1994).
3. Y. Sakamoto, K. Kuruma, S. Hirano, and M. Hirata, *ibid.*, **141**, 1747(1994).
4. B. V. Ratnakumar, B. Otzinger, S. Di Stefano, and G. Halpert, JPL D-11161, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA (1993).
5. M. A. Fetcenko, S. Venkatesan, and S. R. Ovshinsky, in Hydrogen Storage Materials, Batteries, and Electrochemistry, D. A. Corrigan and S. Srinivasan, Editors., PV 92-5, p. 141, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (1992).
6. T. Sakai, K. Muta, H. Miyamura, N. Kuriyama, and H. Ishikawa, ibid., p. 59.
7. P. H. L. Notten and P. Hokkeling, *J. Electrochem. Soc.*, **138**, 1877(1991).
8. M. Viitanen, *ibid*, **140**, 936(1993).
9. T. J. R. Hughes, "The Finite Element Method," Prentice-Hall (1987).
10. T. J. R. Hughes, K. S. Pister, and R. C. Taylor, *Comput. Mech. Appl. Mech. Eng.*, **17/18**, 159(1979).
11. P. De Vidts, J. Delgado, and R. E. White, *J. Electrochem. Soc.*, **142**, 4006(1995).