

다공성 기체 확산 전극의 유효성인자

서성섭[†] · 노제승 · 주재백 · 남석우* · 임태훈* · 오인환* · 홍성안*

홍익대학교 공과대학 화학공학과

*한국과학기술연구원 화공연구부

(1994년 2월 8일 접수, 1994년 6월 28일 채택)

Effectiveness Factor for Porous Gas Diffusion Electrode

Sung-Sup Suh[†], Je-Seung Roh, Jeh-Beck Ju, Suk-Woo Nam*,
Tae-Hoon Lim*, In-Hwan Oh* and Seong-Ahn Hong*

Department of Chemical Engineering, Hongik University

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

(Received 8 February 1994; accepted 28 June 1994)

요 약

덩어리 모델(agglomerate model)로써 표현될 수 있는 다공성 기체 확산 전극의 유효성인자에 대해서 조사하였다. 유효성인자는 확산 저항이 있는 전극에서 실제로 생성되는 전류와 확산 저항이 없는 경우에 생성되는 전류의 비로 정의하였다. 반응 속도, 확산 계수와 덩어리 크기 등 시스템의 여러 가지 변수들을 세 개의 무차원 파라미터로 나타내었고 이들이 유효성인자에 미치는 영향을 살펴 보았으며 전극의 두께가 늘어나도 유효성인자가 더 이상 커지지 않는 지점이 존재함을 볼 수 있었다.

Abstract—Effectiveness factor which was defined as the ratio of the current produced by the electrode under diffusional resistance to that produced by the electrode without diffusional resistance was investigated for porous gas diffusion electrode described by agglomerate model. System variables including reaction rate, diffusion coefficient, and agglomerate size were combined into three dimensionless parameters, and their effects on effectiveness factor were studied. Effectiveness factor reaches a maximum value with a critical electrode thickness.

1. 서 론

다공성 전극에서는 전극 물질과 전해질 용액 및 기상의 접촉이 잘 되기 때문에 반응 속도를 크게 해 줄 수 있어서 널리 사용되고 있다. 다공성 기체 확산 전극의 특성을 나타내기 위해서 단순 기공 모델(simple pore model)[1-3], 박막 모델(thin film model)[1, 4, 5], 덩어리 모델(agglomerate model)[6-10] 등이 이용되고 있다. 모든 기공 안이 용액으로 완전히 잠기는 것으로

표현하는 단순 기공 모델에서는 전극의 특성 묘사가 간단하게 나타나므로 이용하기에는 편리한 반면 물질 전달저항에 의해 좌우되는 전류의 값이 너무 작게 예측되는 경우가 많다. 박막 모델에서는 원통형 기공 벽이 일정한 두께의 얇은 전해질 막으로 덮여 있으며 박막 내 기공 벽 근처에서만 반응이 진행되어 전류가 생성된다고 본다. 덩어리 모델에서는 전도성물질의 입자들이 덩어리를 이루고 있고 덩어리들 사이에는 거대기공(macropore)이 존재하며 덩어리 내부에 있는 작은 미

소기공(micropore)들에는 전해질이 가득 들어 차 있다. 이 때 덩어리 외부가 전조해 있다고 보는 경우와 덩어리 외부 표면이 얇은 전해질 막으로 덮여 있다고 보는 경우가 있다. 이러한 모델에서는 다공성 전극 내부에서 위치에 따른 농도 분포와 전위 분포가 존재하게 되며 물질수지식에 의해 이들 분포가 구해지게 된다. 즉 거대기공과 접한 덩어리 표면으로부터 전해질로 채워진 미소기공 내부로 분자가 확산해 들어감에 따라 반응물질 농도가 줄어들게 되고 이에 따라 반응속도가 떨어지며, 생성되는 전류와 전위도 구배가 나타나게 되는 것이다. 이러한 다공성 전극의 특성을 El-Anadouli와 Ateya[2]는 유효성인자(effectiveness factor)개념을 도입하여 표현하였다. 유효성인자는 다공성 전극에서 실제로 생성되는 전류와 확산이나 옴의 저항(ohmic resistance)이 없는 경우에 생성되는 전류의 비로 나타내어진다. 이들이 대상으로 한 전극은 1차원적 구조를 갖는 평판 형태 전극에서 반응물과 생성물이 한쪽 방향으로만 들어오고 나가며 농도 구배와 전위 구배가 모두 다 반응물과 생성물의 확산 방향을 따라서만 존재하는 경우이다. 그리고 전극 전체의 기공 구조가 균일하며 모든 기공안이 전해질로 채워져 있는 단순 기공 모델을 사용하였으며 전극 반응은 1차 반응으로 Tafel 관계식이 성립하는 경우를 대상으로 하였다. 본 연구는 El-Anadouli와 Ateya[2] 연구의 확장으로서 전극 구조가 덩어리 모델로 나타내어질 때 유효성인자가 시스템 변수에 의해서 어떻게 영향을 받는지 살펴보는 것을 목적으로 하였다.

2. 구조 모델 및 가정들

전극의 구조는 Fig. 1과 같다. 미소기공을 갖는 덩어리는 두께가 $2L_y$ 인 평판 형태이며 덩어리들 사이는 기체의 확산이 일어나고 있는 거대기공으로 이루어져 있고 전극의 두께는 L_x 이다. x방향으로 일어나는 거대기공 내 기체 확산은 충분히 빨라서 거대기공 내부의 기체 농도 구배는 없다고 본다. 그러나 기체 분자가 전해질에 녹은 다음에 y방향을 따라 덩어리 내부로 침투해 들어갈 때에는 물질전달저항의 영향이 많이 나타나기 때문에 덩어리 내부에 농도 구배가 나타나게 된다. 덩어리 외부에는 전해질의 박막이 존재할 수도 있는데 그 두께가 덩어리 두께보다 훨씬 작아서 박막을 통과할 때의 물질전달 저항 보다 덩어리 내부 확산에 의한 물질전달 저항이 훨씬 크다고 본다. 또는 덩어리 외부가 거의 건조되어 있어서 박막이 존재하지 않는다고 본다. x와 y는 서로 수직방향을 이룬다. L_x 가 L_y 보다 훨씬 길기 때문에 전위 변화는 x 방향으로만 나타나며 y 방향의

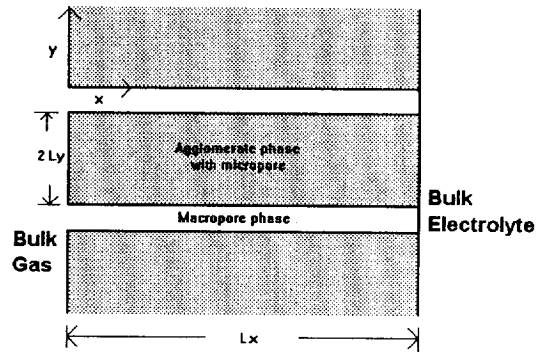


Fig. 1. Schematic representation of agglomerate porous gas diffusion electrode of two porosity.

전위 변화는 상대적으로 무시된다. 따라서 전류의 흐름도 x 방향으로만 나타난다.

3. 수식 전개

반응표면의 단위 면적당 생성되는 전류 i 와 과전압(overpotential) η 사이의 관계가 다음의 Tafel 관계식에 의해서 표현되는 경우를 고려한다.

$$\frac{i}{nF} = k' C \exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 k' 는 국부적인 반응속도 상수이고 α 는 transfer coefficient이다. 한편 촉매의 유효속도상수를 다음과 같이 정의한다.

$$k = k' A_v L_y \quad (2)$$

여기서 A_v 는 부피당 반응표면적이다. 덩어리 안에서의 물질수지식과 경계조건은,

$$\begin{aligned} D_a \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} &= \frac{i}{nF} A_v \\ \text{at } y=L_y, \quad \frac{\partial C}{\partial y} &= 0 \\ \text{at } y=0, \quad C &= C^* \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 D_a 는 덩어리 내부의 확산계수이고 C^* 는 계면에서 기상 성분에 대한 전해질 용액 속에서의 평형농도이다. 한편 실제 전류밀도 j 에 대해서는 다음 식이 성립한다.

$$\frac{dj}{dx} = \frac{A_v}{L_y} \int_0^{L_y} i dy \quad (4)$$

유효교환 전류밀도를 $j_0 = nFkC^*$ 로 정의하면 아래의 식으로 바꿔 쓸 수가 있다.

$$\frac{d(j/j_0)}{d(x/L_\alpha)} = \exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) \left(\frac{L_\alpha}{L_\gamma}\right) \int_0^{L_\gamma} \frac{C}{C^*} \frac{dy}{L_\gamma} \quad (5)$$

옴의 저항이 x방향을 따라서 일정하다면 이온의 흐름은 옴의 법칙에 의해서

$$\begin{aligned} j &= \kappa \frac{d\eta}{dx} \\ \text{at } x=0, \quad \frac{d\eta}{dx} &= 0 \\ \text{at } x=L_\alpha, \quad j &= j_{total} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 κ 는 유효전도도이다. 위의 식들을 무차원 식으로 바꾸기 위해서 무차원 전위 μ 와 무차원 교환 전류밀도 J 및 무차원 거리 변수들을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\alpha n F \eta}{RT} = \frac{\eta}{b} \\ J &= \frac{j}{j_0} \\ X &= \frac{x}{L_\alpha} \\ Y &= \frac{y}{L_\gamma} \end{aligned} \quad (7)$$

무차원으로 바꿔진 식들을 풀고 정리하면 다음의 식들이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2\mu}{dX^2} &= \beta \gamma^2 e^\mu \frac{\tanh(\lambda e^{\mu/2})}{\lambda e^{\mu/2}} \\ \text{at } X=0, \quad \frac{d\mu}{dX} &= 0 \\ \text{at } X=1, \quad J_{total} &= \frac{1}{\beta \gamma} \frac{d\mu}{dX} \end{aligned} \quad (8)$$

λ , β , γ 는 전극 및 반응 물질에 관련된 물성치들로 표현되는 무차원 파라미터이다.

$$\lambda = \sqrt{\frac{kL_\gamma}{Da}} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\alpha(nF)^2 k L_\gamma C^*}{\kappa RT} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{L_\alpha}{L_\gamma} \quad (11)$$

λ 는 불균일촉매에서 유효성인자를 표현하기 위해서 일

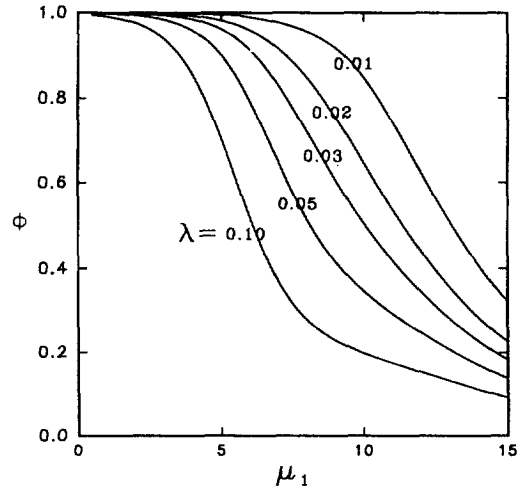


Fig. 2. Effect of λ on μ_1 - ϕ relations. $\beta = 1 \times 10^{-7}$, $\gamma = 100$.

반적으로 사용되는 Thiele modulus와 같은 의미를 가지며, 덩어리 내부로의 확산에 관련된 파라미터이다. β 에는 옴의 저항이 포함되며, γ 는 전극의 두께와 덩어리 두께의 비를 나타낸다. 유효성인자는 다음과 같이 정의되며 상미분방정식을 포함하는 위의 식들로부터 수치계산에 의해 구해진다.

$$\phi = \frac{J_{total}}{J_{total}^0} \quad (12)$$

여기서 J_{total} 은 덩어리 안에서 확산 저항이 존재하는 실제 경우에 전극의 끝인 $x=L_\alpha$ 지점에서 나타나는 η 값에 대한 것이며, J_{total}^0 은 덩어리 안에서 확산 저항이 전혀 없어서 덩어리 내부까지 균일한 농도로 되어 있을 때의 J_{total}^0 값이다. 따라서 J_{total}^0 은 $\lambda=0$ 인 경우에 구해진 J_{total} 값이 된다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2-7에 μ_1 과 ϕ 사이 관계가 나와 있다. μ_1 은 $X=1$ 에서 μ 값이다. $\mu_1 \approx 0$ 에서는 ϕ 가 1에 접근하며 μ_1 이 증가함에 따라 ϕ 가 감소하는 모습이 나타난다. 즉 과전압이 거의 없는 상태에서는 실제의 전류가 전극에서 최대를 얻을 수 있는 전류에 접근하며, 과전압이 증가함에 따라 확산 저항이 있을 때 전극에서 실제로 얻을 수 있는 전류와 확산 저항이 없을 때 전극에서 최대를 얻을 수 있는 전류의 상대적인 비가 줄어들음을 볼 수 있다. 과전압이 증가하면 확산 저항없이 얻어지는 전류밀도가 급속히 크게 증가하는 반면 확산 저항 하에서는 전극

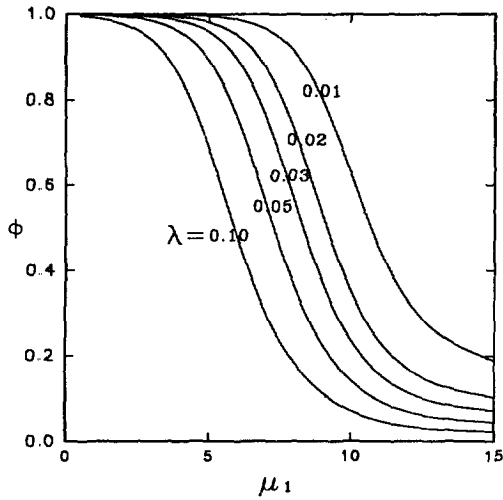


Fig. 3. Effect of λ on μ_1 - ϕ relations. $\beta = 1 \times 10^{-9}$, $\gamma = 100$.

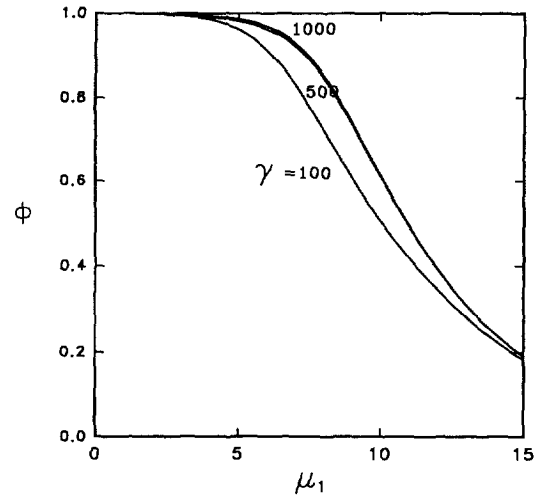


Fig. 5. Effect of γ on μ_1 - ϕ relations. $\beta = 1 \times 10^{-7}$, $\lambda = 0.03$.

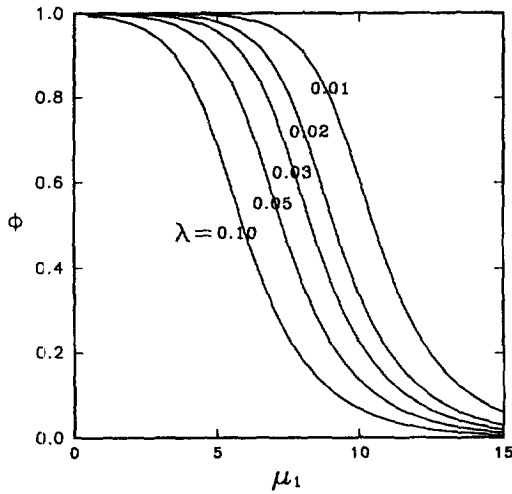


Fig. 4. Effect of λ on μ_1 - ϕ relations. $\beta = 1 \times 10^{-11}$, $\gamma = 100$.

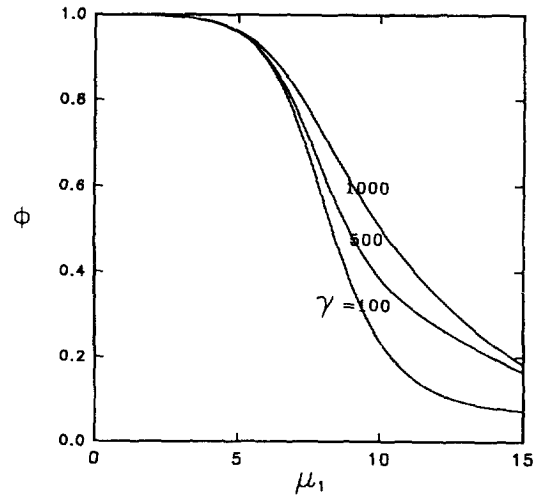


Fig. 6. Effect of γ on μ_1 - ϕ relations. $\beta = 1 \times 10^{-9}$, $\lambda = 0.03$.

안에서 용해된 기체가 덩어리 안으로 천천히 전달되어 들어가 전류밀도의 증가하는 폭이 둔화되기 때문이다.

Fig. 2-4에서는 λ 의 변화에 따른 ϕ 변화를 볼 수 있다. λ 가 0인 경우가 $\phi=1$ 에 해당되며 λ 가 증가함에 따라 덩어리의 두께, 즉 확산 거리 L_2 에 대해 확산 계수 D_a 가 상대적으로 줄어들어 농도 구배가 심해지므로 덩어리 내부에서 농도가 낮아지고 반응속도가 떨어지게 되어 생성되는 전류의 양도 줄어들게 된다. 즉 ϕ 가 줄어들게 된다. 한편 유효교환전류밀도가 작아지는 경우, 전해질 유효전도도가 커지는 경우, 반응속도 상수가 작아지는 경우, 온도가 높아지는 경우들은 모두 다 무차원 파라

미터인 β 가 작아지는 결과로 나타난다. Fig. 2-4 각각에 해당하는 $\beta=1 \times 10^{-7}$, 1×10^{-9} , 1×10^{-11} 인 세 가지 경우들을 비교해 보면 μ_1 과 ϕ 사이 관계를 나타내는 그림의 형태는 비슷하게 유지되면서 β 감소에 따라 ϕ 가 줄어들고 있음을 볼 수 있다.

다른 파라미터들은 변하지 않으면서 γ 가 커짐에 따라 ϕ 가 증가하는 모습은 Fig. 5-7에서 보여진다. γ 는 전극의 두께 L_x 와 덩어리의 두께 L_2 의 비로서 전극을 만드는 과정에서 조절될 수 있다. L_x 는 γ 에만 포함되어 있지만 L_2 는 λ 와 β 에도 모두 포함되어 있다. 따라서 λ 와 β 가 고정되어 있는 상태에서 γ 값만 커진다는 것은 전극 내

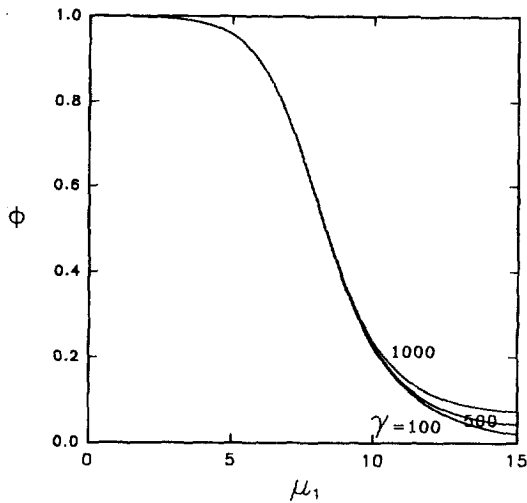


Fig. 7. Effect of γ on μ_1 - ϕ relations. $\beta = 1 \times 10^{-11}$, $\lambda = 0.03$.

부의 미세구조(microstructure)는 일정하면서 전극의 두께만 두꺼워진다는 것이다. 전극 내부의 미소기공 크기, 공극율, 덩어리 크기 등의 미세구조는 전극의 재료로 사용되는 입자, 바인더 등에 의해 결정되어 고정되어 있으며 전극의 두께는 제조할 때에 원하는 두께로 임의로 만들어 줄 수 있다. 고정된 L_p 에서 전극의 두께 L_e 가 두꺼워져 γ 가 커지게 되면 전극에서 얻을 수 있는 최대 전류밀도가 증가하게 되고, 확산 저항에 영향을 주는 L_p 는 고정된 상태이므로 실제 얻어지는 전류밀도는 더 민감하게 크게 늘어나면서 ϕ 가 커지게 된다. 한편 Fig. 5에서 보면 γ 가 어느 정도 값 이상이 되면 γ 증가의 효과가 한계에 도달하는 지점이 있음을 알 수 있다. 즉 $\beta = 1 \times 10^{-7}$ 이고 $\lambda = 0.03$ 인 경우에는 $\gamma = 500$ 이상으로 L_e 를 증가시킬 필요는 없을 것이다. 그러나 이러한 두께 변화의 한계점은 다른 파라미터들 값에도 관계된다. Fig. 6에 보이는 $\beta = 1 \times 10^{-9}$ 인 경우에는 $\gamma = 500$ 과 1000사이에서 뚜렷한 차이가 나타나고 있으며 한계점 γ 값은 더 큰 값이 된다. 또한 β 값이 더욱 작아져서 1×10^{-11} 인 경우에는 Fig. 7에서 보이듯이 과전압이 10이하인 영역에서는 γ 의 영향을 거의 안 받는 것으로 나타나고 있다. 이러한 사실들로부터 효율적인 조업을 위한 전극의 두께는 전극의 여러 가지 물리적, 화학적 성질을 동시에 고려해서 정해져야 함을 알 수 있다. 최적의 전극 두께는 주어진 시스템 상황을 적용시켜 해석하면서 본 연구에서 제시한 형태의 그래프들을 그려봄으로써 예측되어질 것이다.

이상에서 살펴본 유효성인자에 미치는 물성치 변수들의 영향은 전극 내부에서의 과전압 분포를 살펴보면

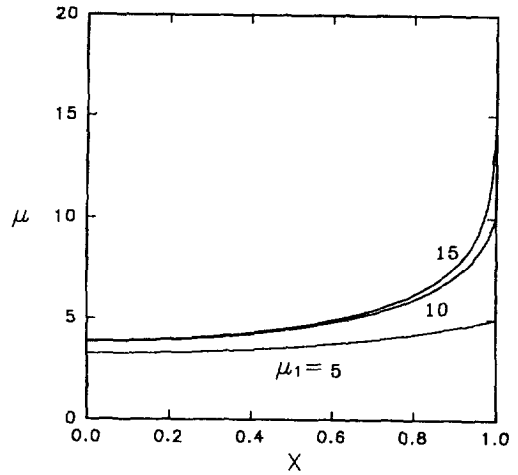


Fig. 8. Effect of polarization on overpotential profiles. $\lambda = 0$, $\beta = 1 \times 10^{-7}$, $\gamma = 1000$.

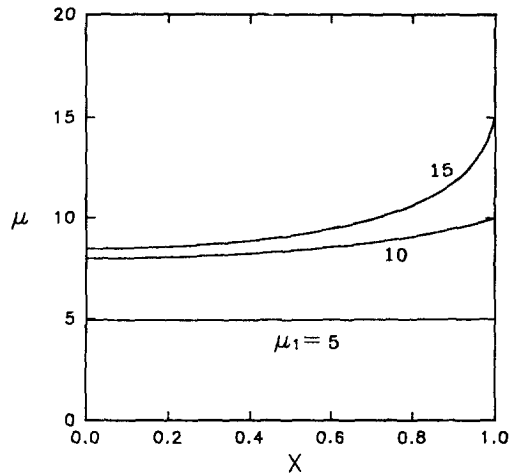


Fig. 9. Effect of polarization on overpotential profiles. $\lambda = 0$, $\beta = 1 \times 10^{-9}$, $\gamma = 1000$.

이해에 도움이 된다. Fig. 8-12에서는 전극의 길이 방향(X)으로의 과전압 분포를 보여주고 있다. Fig. 8에 보면 덩어리가 전해질 용액과 닿은 지점인 $X=1$ 에서의 μ_1 값이 커질수록 과전압변화가 X방향으로 크게 나타남을 알 수 있다. 즉 반응이 불균일하게 진행되는 것이며 대부분의 반응이 덩어리 아래 쪽에서만 일어나는 것이다. 이러한 경우의 β 는 상당히 큰 값에 해당되며 유효교환 전류밀도가 크고 전해질 유효전도도가 작을 때에 이런 상태를 보이게 된다. β 가 더 작아진 Fig. 9와 10을 보면 과전압 분포가 균일해지는 방향으로 변화되고 있음을 볼 수 있다. 즉 반응이 덩어리 전체에서 골고루 진행되어

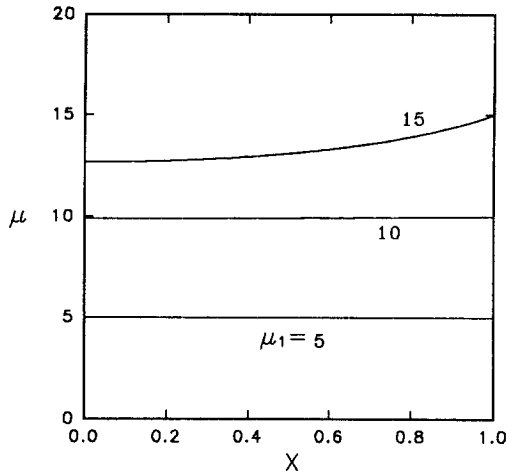


Fig. 10. Effect of polarization on overpotential profiles. $\lambda=0$, $\beta=1 \times 10^{-11}$, $\gamma=1000$.

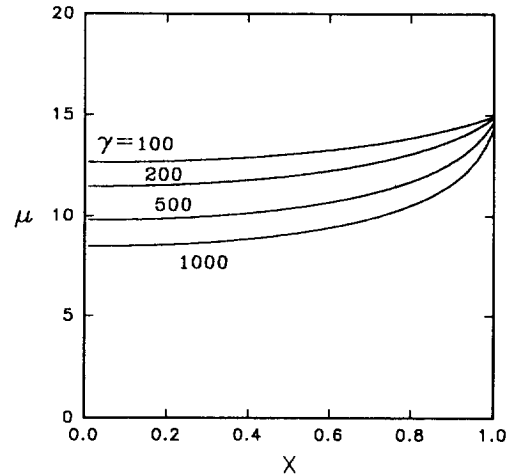


Fig. 12. Effect of γ on overpotential profiles. $\mu_1=15$, $\lambda=0$, $\beta=1 \times 10^{-9}$.

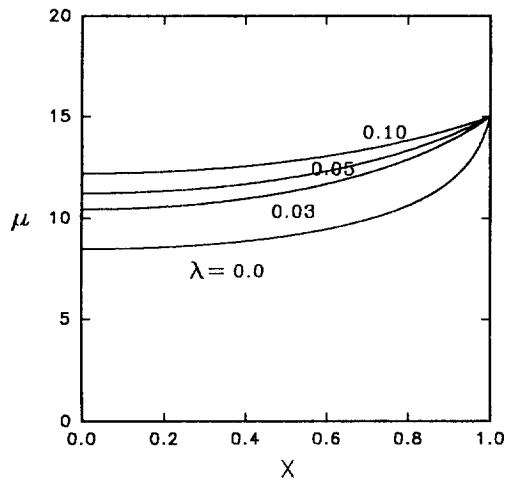


Fig. 11. Effect of λ on overpotential profiles. $\mu_1=15$, $\beta=1 \times 10^{-9}$, $\gamma=1000$.

결과적으로 전극에서 얻게 되는 전류밀도가 커지게 되는 것이다.

덩어리 내부로의 확산이 과전압 분포에 미치는 영향은 Fig. 11에 나타나 있다. 확산 계수가 충분히 커서 확산에 대한 저항이 거의 없는 $\lambda=0$ 인 경우에 비하여 확산에 대한 저항이 커짐에 따라서 덩어리 내부에서의 농도가 떨어지고 반응속도가 줄어들게 된다. 그리고 과전압의 분포가 완만해지게 되고 똑같은 μ_1 을 갖는 전극에서 얻어지는 전류밀도가 더 작아지게 된다. 한편 전극의 두께가 두꺼워져 γ 가 커짐에 따라 Fig. 12에 보듯이 X방향으로 과전압 구배도 당연히 커지게 된다.

본 연구(case I)의 결과와 El-Anadouli와 Ateya[2] (case II)가 균일한 구조의 기공에 전해질이 채워져 있는 정지된 전극(stationary electrode) 경우에 대해서 조사하여 보여 주었던 유효성인자의 특성을 비교해 보기로 하겠다. Case II에서는 두 개의 무차원 파라미터가 사용된 반면 case I에서는 세 개의 무차원 파라미터가 사용되었다. Case II는 전극의 구조가 균일한 다공성 전극의 형태이므로 길이에 대한 파라미터는 전극의 두께만 등장하게 되는 반면 case I은 두 가지의 공극율로 이루어지는 전극이기 때문에 전극의 두께와 덩어리의 두께가 동시에 고려되기 때문이다. 따라서 전극의 두께와 덩어리의 두께의 비를 나타내는 무차원 파라미터가 도입되어야 했다. μ_1 값의 변화에 따른 ϕ 의 변화를 비교해 보면 두 경우 모두 다 μ_1 이 커짐에 따라 ϕ 가 단조 감소하며, 특히 μ_1 증가에 따라 ϕ 가 급격히 줄어드는 영역을 지나 μ_1 이 어느 정도 이상 커지면 ϕ 의 감소 속도가 완만해지면서 0을 향해 줄어드는 경향이 두 경우에 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 μ_1 이 작을 때에는 전혀 다른 형태가 나타난다. Case I에서는 어떠한 λ 나 γ 값에 대해서도 μ_1 이 0 근처에서 감소함에 따라 ϕ 가 완만히 증가하여 1에 접근해 간다. 반면 case II에서는 μ_1 이 0에 접근해 감에 따라 ϕ 가 급격히 증가하지만 μ_1 이 거의 0이 되어도 ϕ 가 1에 도달하지 못한다. Case I에서는 덩어리 주위에 거대기공이 존재하며 거대기공 내에서는 물질 전달 저항 없이 농도가 균일하다고 가정하였다. 그러나 case II에서는 한 종류의 기공만이 존재하며 물질의 확산 방향, 즉 농도의 구배와 같은 방향으로 전위 구배가 생성되기 때문이다. 따라서 특히 과전압이 작은 경우에

two-porosity 전극이 one-porosity 전극보다 더 큰 유효성인자를 나타내어 유리하다고 보겠다.

5. 결 론

다공성 기체확산 전극을 덩어리 모델로 나타낼 때 다공성전극에서 실제로 생성되는 전류와 물질전달저항이 없는 경우에 생성되는 전류의 비로 정의한 유효성인자에 대해서 조사하였다. 평판 형태의 덩어리와 Tafel 관계식이 성립함을 가정했을 때에 확산 계수, 반응 속도, 덩어리 두께, 전기전도도, 전극의 두께 등 여러 가지 물성치들이 세 개의 무차원 파라미터들로 표현될 수 있었다. 전극 끝에서의 μ_1 증가에 따라 유효성인자 ϕ 가 감소하였으며 Thiele modulus인 λ 가 증가하면 확산저항의 영향이 커져서 일정한 μ_1 값에서 ϕ 가 감소하였다. 거대기공 내에서는 기체의 농도가 균일하기 때문에 전극의 두께와 덩어리의 두께의 비인 γ 가 증가하면 ϕ 가 증가하였다. 그러나 γ 가 증가하여도 ϕ 가 거의 변하지 않는 영역이 존재함이 드러났고 γ 의 영향이 작게 나타나는 영역은 다른 물성치들에 의해서 좌우되는 것으로 나타났다. 전극의 길이 방향(X)으로의 과전압 분포를 살펴본 결과, 유효교환 전류밀도가 크고 전해질 유효전도도가 작을 때에 반응의 대부분이 주로 덩어리 아래쪽에서 일어나게 되어 과전압변화가 X방향으로 크게 나타남을 알 수 있었다. 한편 확산 계수가 작아지게 되면 덩어리 내부에서의 농도가 떨어지고 반응속도가 줄어들기 때문에 과전압의 분포가 완만해지는 것이 보여졌다.

사용기호

A_v	: catalyst surface area per unit volume [cm^{-1}]
b	: RT/anF [V]
C	: local reactant concentration [mol/cm^3]
C^*	: reactant concentration at bulk gas interface [mol/cm^3]
D_a	: diffusion coefficient in agglomerate [cm^2/sec]
F	: Faraday's constant [96487 Coul/equiv]
i	: local current density [amp/cm^2]
J	: reduced exchange current density, j/j_0
j	: ionic current density [amp/cm^2]
j_0	: effective exchange current density [amp/cm^2]
k	: effective rate constant [cm/sec]
k'	: local rate constant on catalyst [cm/sec]

L_x	: thickness of electrode [cm]
L_y	: thickness of agglomerate [cm]
n	: number of electrons in overall reaction
R	: gas constant [$\text{J}/(\text{K mol})$]
T	: temperature [K]
X	: dimensionless distance along macropore, x/L_x
x	: distance along macropore [cm]
Y	: dimensionless distance into agglomerate, y/L_y
y	: distance into agglomerate [cm]

그리스 문자

α	: transfer coefficient
β	: dimensionless parameter defined by eq. (10)
γ	: dimensionless parameter defined by eq. (11)
η	: overpotential [V]
κ	: effective conductivity [$\text{ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$]
λ	: dimensionless parameter defined by eq. (9)
μ	: reduced potential, η/b
μ_1	: terminal potential at $X=1$
ϕ	: effectiveness factor

참고문헌

1. Austin, L. G., Ariet, M., Walker, R. D., Wood, G. B. and Comyn, R. H.: *Ind. & Eng. Chem. Fund.*, **4**(3), 321(1965).
2. El-Anadoul, B. E. and Ateya, B. G.: "Modeling of Batteries and Fuel Cells", Edited by R. E. White et al., Electrochemical Society, Inc., 1(1991).
3. Newman, J. S.: "Electrochemical Systems", 2nd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ(1991).
4. Srinivasan, S. and Hurwitz, H. D.: *Electrochimica Acta*, **12**, 495(1967).
5. Wilemski, G.: *J. Electrochem. Soc.*, **30**(1), 117(1983).
6. Grens II, E. A.: *Ind. & Eng. Chem. Fund.*, **5**(4), 542(1966).
7. Burshtein, R. C., Markin, V. X., Pshenichnikov, A. G., Chismadzev, V. A. and Chirkov, Y. G.: *Electrochimica Acta*, **9**, 773(1964).
8. Giner, J. and Hunter, C.: *J. Electrochem. Soc.*, **116**, 1124(1969).
9. Yuh, C. Y. and Selman, J. R.: *J. Electrochem. Soc.*, **131**(9), 2062(1984).
10. Kunz, H. R., Bregoli, L. J. and Szymanski, S. T.: *J. Electrochem. Soc.*, **131**(12), 2815(1984).