

이온성고분자액추에이터의 전기화학적 지배방정식의 유한요소모델링

강 성 수†

(원고접수일 : 2008년 3월 28일, 원고수정일 : 2008년 6월 3일, 심사완료일 : 2008년 7월 9일)

Finite Element Modeling of Electrochemical Governing Equations for Ionic Polymer Actuators

Sung-Soo Kang†

Abstract : Bending deformation of an ionic polymer actuator(IPA) on applied low electric field across its thickness is dominated by electroosmosis of hydrated ions and self-diffusion of free water molecules. In the study by Popovic et al., two processes are assumed to occur sequentially in the way that fast electroosmosis is followed by self-diffusion and finite element formulation for the basic field equations are proposed. However, the motions of hydrated ions and water molecules occur at the same time. In this study, those two processes are considered simultaneously and finite element formulation is conducted for the basic field equations governing electrochemical response of an IPA. Some numerical studies for IPA are carried out in order to show the validity of the present formulation.

Key words : Finite element method(유한요소법), Ionic polymer actuator(이온성 고분자 액추에이터), Polymer materials(고분자 재료), Electrochemistry(전기화학)

1. 서 론

이온성 고분자 액추에이터(Ionic Polymer Actuator ; IPA)의 동작에 관한 전기화학적 모델링은, 이온성 고분자의 전기화학적 산화와 환원에 의해 신축하는 메커니즘에 관한 해명과 함께 이를 응용한 그림이나 인공 팔, 물고기 로봇, 인공심장 압축장치, 다이어프램 미니 펌프 등의 디바이스 개발을 위해 필수불가결하다⁽¹⁾.

이온성 고분자 액추에이터는 양이온이 물 분자를

옹기는 것에 의해, 음극 쪽의 함수율이 높아짐에 따라 늘어나기 때문에 일어나는 굴곡현상⁽²⁾에 기초하여, 전극접합법이나 수지재료가 개량되어, 고분자 액추에이터로서는 응답감도, 속도의 면에서 세계 최첨단의 성능을 갖고 있다. 이온성 고분자 액추에이터의 동작에 관한 실험적, 이론적 연구 예들을 정리하면 다음과 같다.

Kanno 등⁽³⁾은 이온성 고분자 겔 막 액추에이터의 선단부분에서의 변위를 얻기 위해, 제어공학의 입장에서 선형 동특성에 관한 블랙박스 모델링을

† 교신저자(전주대학교 기계자동차공학과, E-mail:sskang@jj.ac.kr, Tel: 063)220-3077)

실시하였다. Shahinpoor⁽⁴⁾는 인공근육 빔에 대한 전기화학 작용을 등가 회로 모델링을 실시하여, 빔 내부에 발생하는 굽힘 모멘트로부터 베르누이-오일러의 빔 이론에 기초하여 곡률을 결정함으로써, 정적 및 동적인 변형응답을 해석하였다. Nemat-Nasser 등^{(5),(6)}은 이온성 고분자 액추에이터의 전기화학적 반응이 고분자의 구조, 금속 전극 판의 전도율 및 형태, 알칼리 금속 양이온의 종류, 수화의 정도 등에 의존하고 있다는 점에 주목하여 마이크로메카닉스 이론과 실험을 통해 다양한 이온성 고분자 액추에이터의 단시간 응답 해를 얻고 있다. Popovic 등의 연구⁽⁷⁾에서는 먼저 수화 양이온의 이동이 아주 짧은 시간에 일어난 후, 물 분자의 이동이 느린 속도로 긴 시간 동안 순차적으로 나타난다고 가정하였다(이하, 축차모델이라고 함). 즉, 수화 양이온의 이동과 물 분자의 이동이라는 프로세스를 독립적으로 고려하고 있지만, 실제 이들은 동시에 일어나는 현상이기 때문에, 두 현상을 동시에 고려하는 것이 타당하다.

본 연구에서는, 이들 두 프로세스를 동시에 고려한 Tadokoro 등의 연구⁽⁸⁾(이하, 통합모델이라고 함)를 일반화하기 위해, 먼저 전기화학 반응을 지배하는 방정식에 대한 유한차분정식화와 유한요소정식화를 실시하여, 통합모델(Unified model)에 의한 해석결과를 축차모델(Sequential model)에 의한 해석결과⁽⁹⁾ 및 차분법에 의한 해와 비교하여 본 정식화의 유효성을 검증하였다.

2. 전기화학 응답 방정식의 유한요소 정식화

Fig. 1과 같은 단위스텝전압을 Nafion 막·백금 전극 판에 가하면, 수화 양이온이 음극 쪽으로 급격히 이동함에 따라, 아주 짧은 시간대내에 양극 쪽으로 큰 굽힘 변형을 일으키게 된다. 이와 동시에, 자유물분자의 양극 쪽으로의 확산에 의해, 천천히 굽힘 변형을 회복하게 된다. 이러한 굽힘 변형과 회복반응을 동시에 고려한 모델인, 통합모델⁽⁸⁾을 지배하는 전기화학 방정식의 유한요소정식화에 대하여 서술한다.

2.1 수화 양이온의 이동

백금 전극 판에 단위스텝전압을 가함으로써, Nafion 막에 전장이 발생하고, 수화 양이온에 대한 음극 쪽으로의 전기력이 발생하게 된다. 반대방향으로, 양극 쪽으로의 점성 저항력과 수화 양이온에 대한 확산력 및 물 분자에 대한 확산력이 작용하여, 전기력과 평형을 이루게 된다. 즉, 식(1)로부터 전하량 $Q(x,t)$ 를 구할 수 있다. 초기조건과 경계조건은 각각 다음 식과 같다.

$$\eta_1 \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = kT \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} + \left\{ nkT \frac{\partial \ln w(x,t)}{\partial x} - \frac{e}{\epsilon S_x} \left(\int i(\tau) d\tau + Q(x,t) - Q(x,0) \right) \right\} \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} \quad (1)$$

$$Q(x,0) = N_a e S_x c_0 x \quad (2)$$

$$Q(0,t) = 0, Q(d,t) = N_e e S_x c_0 d \quad (3)$$

Table 1에 이러한 식을 풀기 위해 필요한 변수들의 값을 나타내고 있다. 여기서 $c_0 = c(x,0) = 1000 \text{ mol/m}^3$ 이며, $w_0 = w(x,0) = 15500 \text{ mol/m}^3$ 이다. 전전하량이 계산되면, 전하밀도 $c(x,t)$ 는 다음 식에 의해 구해진다. 경계조건으로 제로구배를 가정한다.

$$Q(x,t) = N_a e S_x \int c(\xi,t) d\xi \quad (4)$$

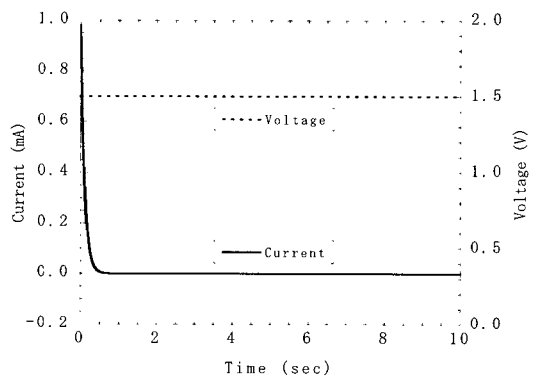


Fig. 1 Input unit step voltage and current profile

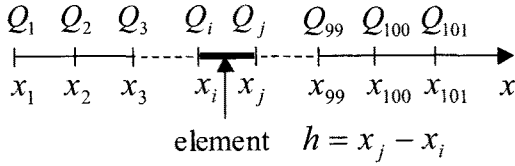


Fig. 2 One-dimensional mesh subdivision

Fig. 2는 전전하량 $Q(x,t)$ 를 미지 절점량으로 한 1차원 요소 분할도이며, 각 요소내의 $Q(x,t)$ 가 식 (5)와 같이 좌표 x 에 대하여 선형적으로 변한다고 가정한다.

Table 1 Parameters for ionic motion

Coefficient of viscosity for hydrated Na^+ moving through membrane	$\eta_1 = 1.18 \times 10^{-11} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$
Coefficient of viscosity for free water molecules	$\eta_2 = 11.6 \times 10^{-11} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$
Boltzman constant	$k = 1.380 \times 10^{-23} (\text{N} \cdot \text{m}/\text{K})$
Absolute temperature	$T = 293 (\text{K})$
Elemental charge	$e = 1.6 \times 10^{-19} (\text{C})$
Dielectric constant of hydrated Nafion membrane	$\epsilon_e = 2.8 \times 10^{-3} (\text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2)$
Time interval	$\Delta t = 5 \times 10^{-4} \text{s}$
Space interval	$h = 1.8 \mu\text{m}$
Cross section area	$S_x = 2.0 \times 10^{-6} (\text{m}^2)$
Avogadro number	$N_a = 6.02 \times 10^{23} (\text{1/mol})$

$$\{Q^{(e)}(x,t)\} = [N]\{Q^{(e)}\} = \left[1 - \frac{x}{h} \quad \frac{x}{h}\right] \begin{Bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서, Q_i 와 Q_j 는 절점에서의 전전하량, $[N]$ 은 형상함수이며, h 는 요소 길이이다. 식(1)에 대해 Galerkin법^[10]에 의한 유한요소정식화를 실시하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\int [N]^T \left(\frac{kT}{\eta_1} \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} \frac{nkT}{\eta_1} \frac{\partial \ln w(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} \frac{e}{\eta_1 \epsilon_e S_x} \right) \times \left[\int i(\tau) d\tau + Q(x,t) - Q(x,0) \right] dx = 0 \quad (6)$$

식(5)를 식(6)에 대입하면, 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & - \int [N^*]^T \frac{kT}{\eta_1} \frac{\partial Q_b(x,t)}{\partial x} dx \\ & + \int \frac{kT}{\eta_1} \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]\{Q^{(e)}(x,t)\}}{\partial x} dx \\ & + \int [N]^T [N]\{\dot{Q}^{(e)}(x,y,t)\} dx \\ & + \int [N]^T \frac{\partial [N]\{Q^{(e)}(x,t)\}}{\partial x} \frac{e}{\eta_1 \epsilon_e S_x} \times \\ & \left[\int i(\tau) d\tau + [N]\{Q^{(e)}(x,t)\} - [N]\{Q^{(e)}(x,0)\} \right] dx \\ & - \int [N]^T \frac{\partial [N]\{Q^{(e)}(x,t)\}}{\partial x} \frac{nkT}{\eta_1} \times \\ & \frac{\partial [N] \ln \{w^{(e)}(x,t)\}}{\partial x} dx = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $[N^*]$ 은 요소 경계상의 형상함수이며, $Q_b(x,t)$ 는 요소 경계에서의 전전하량이다. 식(7)을 상미분방정식으로 나타내면, 다음과 같다.

$$[A^{(e)}]\{\dot{Q}^{(e)}(x,t)\} + [B^{(e)}]\{Q^{(e)}(x,t)\} + \{C^{(e)}\} = 0 \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [A^{(e)}] &= \int [N]^T [N] dx \\ [B^{(e)}] &= \frac{kT}{\eta_1} \int \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} dx \\ &+ \frac{e}{\eta_1 \epsilon_e S_x} \times \left[\int i(\tau) d\tau \right] \int [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial x} dx \\ &+ \frac{e}{\eta_1 \epsilon_e S_x} \int [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial x} \times [N]\{Q^{(e)}(x,t)\} - \{Q^{(e)}(x,0)\} dx \\ &- \frac{nkT}{\eta_1} \int [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial x} \times \frac{\partial [N] \ln \{w^{(e)}(x,t)\}}{\partial x} dx \\ \{C^{(e)}\} &= - \frac{kT}{\eta_1} \int [N^*]^T \frac{\partial Q_b(x,t)}{\partial x} dx \end{aligned}$$

형상함수 $[N]$ 의 구체적인 형태를 대입하여, Euler법에 의한 시간적분을 실시하면 다음 식을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} A_{11}^{(e)} & A_{12}^{(e)} \\ A_{21}^{(e)} & A_{22}^{(e)} \end{bmatrix} \{Q^{(e)}(x, t + \Delta t)\} = \begin{bmatrix} B_{11}^{(e)} & B_{12}^{(e)} \\ B_{21}^{(e)} & B_{22}^{(e)} \end{bmatrix} \{Q^{(e)}(x, t)\} + \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} A_{11}^{(e)} & A_{12}^{(e)} \\ A_{21}^{(e)} & A_{22}^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h}{3} & \frac{h}{6} \\ \frac{h}{6} & \frac{h}{3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} B_{11}^{(e)} & B_{12}^{(e)} \\ B_{21}^{(e)} & B_{22}^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta kT}{\eta_1 h} + \frac{h}{3} + \frac{\Delta te}{2\eta_1 \epsilon_e S_x} \left[\int i(\tau) d\tau \right] + X_1 + Y_1 & \frac{\Delta kT}{\eta_1 h} + \frac{h}{6} + \frac{\Delta te}{2\eta_1 \epsilon_e S_x} \left[\int i(\tau) d\tau \right] + X_3 + Y_3 \\ \frac{\Delta kT}{\eta_1 h} + \frac{h}{6} - \frac{\Delta te}{2\eta_1 \epsilon_e S_x} \left[\int i(\tau) d\tau \right] + X_2 + Y_2 & -\frac{\Delta kT}{\eta_1 h} + \frac{h}{3} - \frac{\Delta te}{2\eta_1 \epsilon_e S_x} \left[\int i(\tau) d\tau \right] + X_4 + Y_4 \end{bmatrix}$$

$$X_1 = \frac{\Delta te}{\eta_1 \epsilon_e S_x} \left[\frac{1}{3} (Q_i^{(e)}(x, t) - Q_i^{(e)}(x, 0)) + \frac{1}{6} (Q_j^{(e)}(x, t) - Q_j^{(e)}(x, 0)) \right]$$

$$X_3 = \frac{\Delta te}{\eta_1 \epsilon_e S_x} \left[\frac{1}{6} (Q_i^{(e)}(x, t) - Q_i^{(e)}(x, 0)) + \frac{1}{3} (Q_j^{(e)}(x, t) - Q_j^{(e)}(x, 0)) \right]$$

$$X_2 = -X_1, \quad X_4 = -X_3$$

$$Y_1 = \frac{\Delta mkT}{2h\eta_1} [\ln w_i^{(e)}(x, t) - \ln w_j^{(e)}(x, t)]$$

$$Y_2 = \frac{\Delta mkT}{2h\eta_1} [-\ln w_i^{(e)}(x, t) + \ln w_j^{(e)}(x, t)]$$

$$Y_3 = Y_1, \quad Y_4 = Y_2$$

$$\begin{Bmatrix} C_{11}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} \end{Bmatrix} = \frac{kT}{\eta_1} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial Q_{bi}^{(e)}(x, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial Q_{bj}^{(e)}(x, t)}{\partial x} \end{Bmatrix}$$

다음으로, 전전하량과 전하밀도의 관계를 나타내는 식(4)에 대하여, Galerkin법에 의한 유한요소 정식화를 식(10)과 같이 행한다.

$$\int_0^L [N]^T \left(\frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} - N_a e S_x c(x, t) \right) dx = 0 \quad (10)$$

식(5)를 식(10)에 대입하면, 다음 식을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} D_{11}^{(e)} & D_{12}^{(e)} \\ D_{21}^{(e)} & D_{22}^{(e)} \end{bmatrix} \{c^{(e)}(x, t)\} = \begin{bmatrix} E_{11}^{(e)} & E_{12}^{(e)} \\ E_{21}^{(e)} & E_{22}^{(e)} \end{bmatrix} \{Q^{(e)}(x, t)\} \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} D_{11}^{(e)} & D_{12}^{(e)} \\ D_{21}^{(e)} & D_{22}^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_a e S_x h}{3} & \frac{N_a e S_x h}{6} \\ \frac{N_a e S_x h}{6} & \frac{N_a e S_x h}{3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E_{11}^{(e)} & E_{12}^{(e)} \\ E_{21}^{(e)} & E_{22}^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

2.2 물 분자의 이동

자유 물 분자가 양극 쪽으로 천천히 확산하는 현상이 나타난다. 식(12)로부터 물 분자 수 $W(x, t)$ 를 계산할 수 있다. 초기조건과 경계조건은 각각, 식(13)과 식(14)와 같이 주어진다.

$$\frac{\partial W(x, t)}{\partial t} = \frac{kT}{\eta_2} \frac{\partial^2 W(x, t)}{\partial x^2} \quad (12)$$

$$W(x, 0) = NeS_x w_o \quad (13)$$

$$\frac{\partial W(0, t)}{\partial x} = NeS_x w_o, \quad \frac{\partial W(d, t)}{\partial x} = NeS_x w_o \quad (14)$$

물 분자 수가 계산되면, 물 분자의 밀도는 다음 식으로 계산되며, 경계조건으로 체포구배를 가정한 다.

$$W(x, t) = NeS_x \int_0^L w(\xi, t) d\xi \quad (15)$$

식(12)에 대하여, Galerkin법에 의한 유한요소 정식화를 실시하면, 다음 식을 얻게 된다.

$$\int_0^L [N]^T \left(\frac{kT}{\eta_2} \frac{\partial^2 W(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial W(x, t)}{\partial t} \right) dx = 0 \quad (16)$$

식(5)를 식(16)에 대입하면, 식(17)을 얻게 된다.

$$\begin{aligned}
 & -\int_0^h [N^*]^T \frac{kT}{\eta_2} \frac{\partial W_b(x,t)}{\partial x} dx + \int_0^h [N]^T [N] \{\dot{W}^{(e)}(x,t)\} dx \\
 & + \int_0^h \frac{kT}{\eta_2} \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} \{W^{(e)}(x,t)\} dx = 0 \quad (17)
 \end{aligned}$$

여기서, $W_b(x,t)$ 는 요소경계상의 물 분자 수이며, 식(14)의 경계조건으로부터, 식(17)의 제1항은 영이 된다. 식(17)을 상미분방정식으로 나타내면, 다음과 같이 된다.

$$[A^{(e)}] \{\dot{W}^{(e)}(x,t)\} + [F^{(e)}] \{W^{(e)}(x,t)\} = 0 \quad (18)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 [A^{(e)}] &= \int_0^h [N]^T [N] dx \\
 [F^{(e)}] &= \frac{kT}{\eta_2} \int_0^h \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} dx
 \end{aligned}$$

형상함수 $[N]$ 의 구체적인 형태를 대입하고, Euler법에 의한 시간적분을 실시하면, 다음 식이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} A_{11}^{(e)} & A_{12}^{(e)} \\ A_{21}^{(e)} & A_{22}^{(e)} \end{bmatrix} \{W^{(e)}(x,t + \Delta t)\} = \begin{bmatrix} F_{11}^{(e)} & F_{12}^{(e)} \\ F_{21}^{(e)} & F_{22}^{(e)} \end{bmatrix} \{W^{(e)}(x,t)\}$$

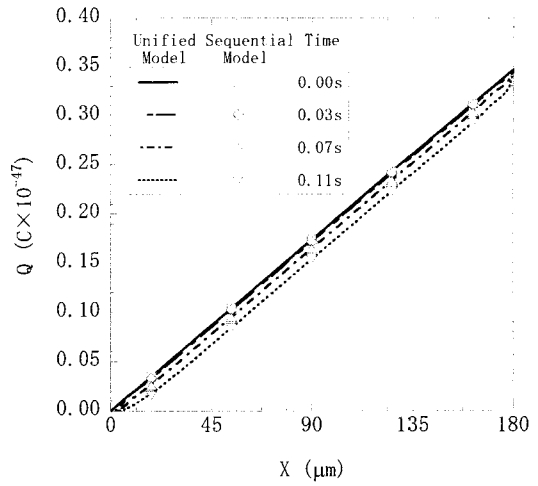
여기서,

$$\begin{bmatrix} A_{11}^{(e)} & A_{12}^{(e)} \\ A_{21}^{(e)} & A_{22}^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h}{3} & \frac{h}{6} \\ \frac{h}{6} & \frac{h}{3} \end{bmatrix} \quad (19)$$

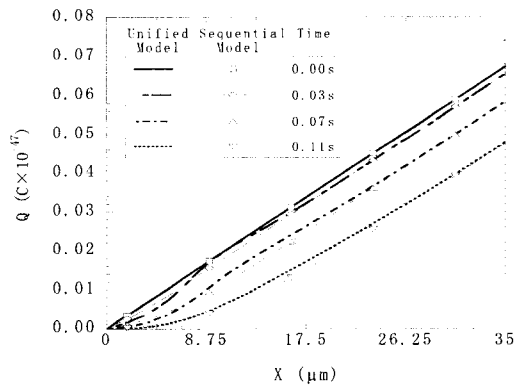
$$\begin{bmatrix} F_{11}^{(e)} & F_{12}^{(e)} \\ F_{21}^{(e)} & F_{22}^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h}{3} - \frac{\Delta tkT}{h\eta_2} & \frac{h}{6} + \frac{\Delta tkT}{h\eta_2} \\ \frac{h}{6} + \frac{\Delta tkT}{h\eta_2} & \frac{h}{3} - \frac{\Delta tkT}{h\eta_2} \end{bmatrix}$$

다음으로, 물 분자 수와 물 분자 밀도 $w(x,t)$ 의 관계를 나타내는 식(15)에 대하여, 유한요소 정식화를 실시하면, 다음 식을 얻게 된다.

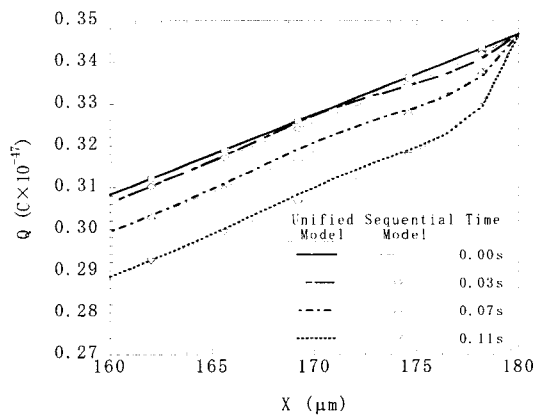
$$\int_0^h [N]^T \left(\frac{\partial W(x,t)}{\partial x} - N_o e S_x w(x,t) \right) dx = 0 \quad (20)$$



(a) over the entire thickness

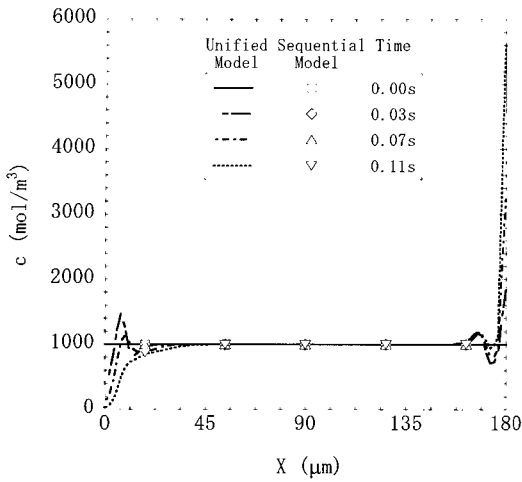


(b) enlarged portion near anode

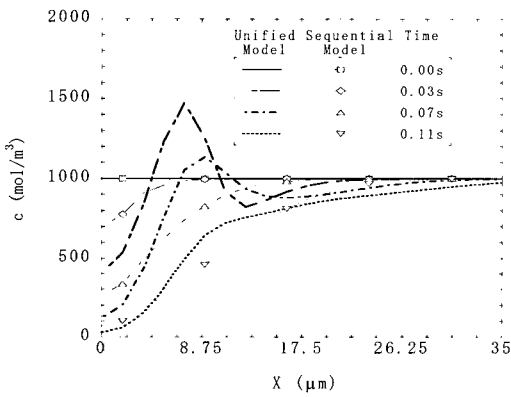


(c) enlarged portion near cathode

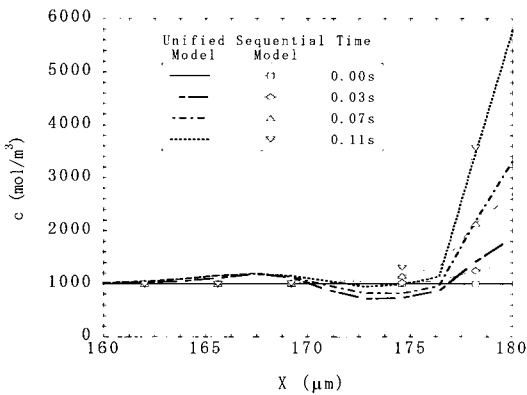
Fig. 3 Total charge distribution in membrane



(a) over the entire thickness

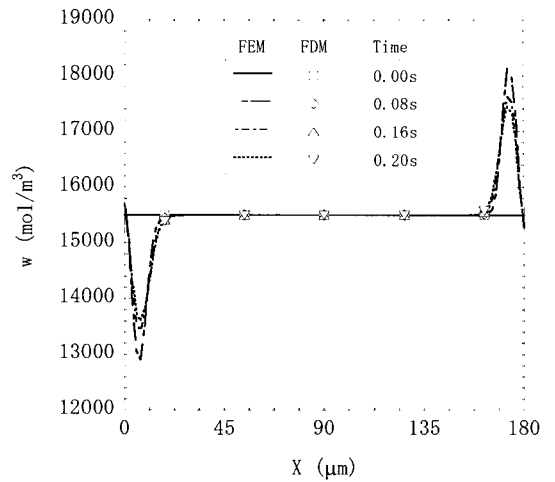


(b) over the entire thickness

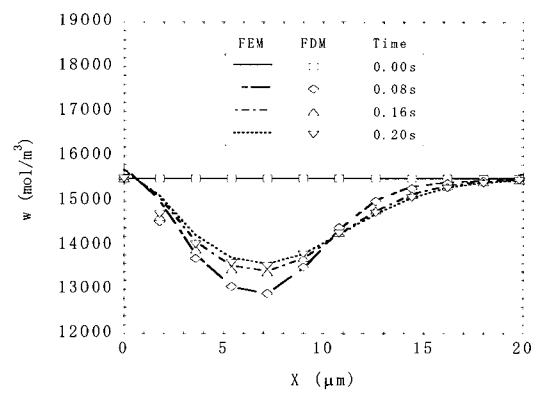


(c) enlarged portion near cathode

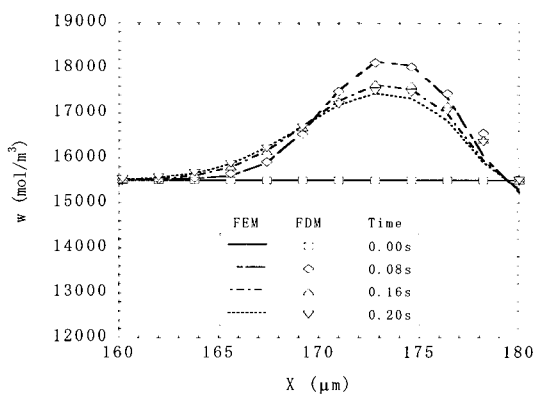
Fig. 4 Charge concentration distribution in membrane



(a) over the entire thickness



(b) enlarged portion near anode



(c) enlarged portion near cathode

Fig. 5 Water concentration distribution in membrane

식(5)를 식(20)에 대입하면, 식(21)을 얻게 된다.

$$[D^{(e)}]\{w^{(e)}(x,t)\} = [E^{(e)}]\{W^{(e)}(x,t)\} \quad (21)$$

여기서, $[D^{(e)}]$ 와 $[E^{(e)}]$ 는 식(11)과 같다.

식(9)와 식(11), 식(19)와 식(21)을 영역내의 전 요소에 대해 계산하여 조합하면, 전체 계에 대한 다원연립 1차 방정식을 얻게 된다.

3. 전기화학 반응의 유한요소 해석 결과

본 장에선, 2장에서 행한 IPA의 전기화학응답에 관한 지배방정식의 유한요소정식화에 따라, 수치계산을 실시하여, 통합모델에 의한 해석결과를 축차모델에 의한 해석결과^[9] 및 차분법에 의한 해와 비교한다.

3.1 수화 양이온의 이동

식(9)로부터 계산한 전전하량의 분포는 Fig. 3과 같다. 전압을 가함에 의해 Nafion 막 내부에 전장이 발생하고, 양극 쪽에서는 전전하량의 구배가 점차 작아지고, 음극 쪽에서는 점차 커지고 있는 것을 알 수 있다. 그 결과, Fig. 4와 같이 양극 쪽에서의 전하밀도가 급격하게 감소해 가는데 비해, 음극 쪽에서는 급격히 증대한다. Fig. 4로부터 통합모델에 의한 해석결과(선)와 축차모델에 의한 해석결과(마크와 선)는 양호하게 일치함을 알 수 있다.

Fig. 3(b)와 Fig. 3(c), Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 각각 양극 쪽과 음극 쪽 근방에서의 전전하량과 전하밀도 분포를 확대하여 보여주고 있다. 전기장을 가한 직후 전하의 이동을 유발하는 전기력에 비해 물 분자의 이동을 일으키는 확산력이 매우 작지만, 전하의 이동 방향과 반대 방향으로 물 분자의 이동이 일어나므로 인해 축차모델에 비해 통합모델에 의한 전전하량과 전하밀도의 변화가 늦어지게 된다는 것을 확인할 수 있다.

통합모델에 의한 해석결과는 축차모델에 의한 해석 결과와 비교하여, 전장의 발생 시점으로부터 잠시 동안 해가 불안정한 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 4(b)와 같이 축차모델에선 모든 시간대에서 전하밀도가 ϵ_0 보다 작은 값을 나타내고 있음에 비해, 통합모델에선 전기장을 가한 직후의 시간대에 있어서 물분자의 영향이 고려됨으로 인해 전하밀도가 ϵ_0 보다 큰 값을 나타내기도 하며 그래프 개형의 변화가 많다가, 시간이 지남에 따라 점차 축차모델에 의한 결과와 비슷해짐을 알 수 있다. 이는 통합모델의 지배방정식 중 식(8) 중에 물 분자의 밀도가 영향을 미치고 있는 것에 비해, 축차모델의 경우 영향을 미치지 않고 있음에 기인한다. 축차모델의 구체적인 내용에 대해 문헌[7]에 기술되어 있으며, 수화 양이온의 이동에 관한 식(1)에서 $w(x,t)$ 항이 빠진 경우가 축차모델에 관한 전기화학적 반응에 관한 지배방정식이 된다.

3.2 물 분자의 이동

식(19)와 식(21)로부터 물 분자의 수와 물 분자의 밀도를 계산할 수 있다. 그 결과, Fig. 5에 보이는 바와 같이, 상대적으로 밀도가 낮은 양극 쪽으로 자유 물 분자의 확산이 일어나기 때문에, 양극 쪽에서의 물 분자의 밀도는 천천히 증가하고, 음극 쪽에서의 물 분자의 밀도는 그만큼 감소한다. Fig. 5로부터, 유한요소해석결과(선)는 차분법에 의한 계산 결과(마크)와 전체적으로 양호하게 일치하지만, 특히 전극 쪽에서 약간의 차가 있다. 이는 식(19)로부터 전체 계에 대한 다원 연립차방정식을 풀 때, 차분법에서는 식(14)의 경계조건을 중심차분으로 고려하고 있음에 비해, 유한요소법에서는 전전차분으로 고려하고 있음에 기인한다.

4. 결 론

본 연구에서는 이온성고분자액추에이터의 설계를 지원하기 위한 시스템의 개발을 목표로, 이를 위해 Tadokoro 등에 의해 개발된 일차원 전기화학 반응에 관한 지배방정식(통합모델)에 대한 유한

요소정식화를 실시하여 해석 결과를, Popovic 등에 의한 축차모델 해석결과 및 유한차분법에 의한 계산 결과와 비교하여, 본 유한요소정식화를 검증하였다.

수화 양이온의 이동에 관한 해석 결과, 양극 쪽에서 전하밀도의 구배가 점차 작아지고, 음극 쪽에서 점차 커지고 있는 것을 알 수 있었다. 이로 인해, 양극 쪽 전하밀도가 급격하게 감소해 가는데 비해, 음극 쪽에서는 급격히 증대하였으며, 통합모델에 의한 해석결과가 축차모델에 의한 해석결과와 비교하여 반응 속도는 약간 늦지만 전체적으로 양호하게 일치함을 알 수 있었다.

물 분자의 이동에 관한 해석 결과, 상대적으로 밀도가 낮은 양극 쪽으로 자유 물 분자의 확산이 일어나기 때문에, 양극 쪽 물 분자의 밀도는 천천히 증가하고, 음극 쪽에서의 물 분자의 밀도는 그만큼 감소하게 됨을 확인할 수 있었다.

해석결과에 대한 실험적 검증 및 전기화학 반응에 대한 지배방정식의 고차원화 등이 앞으로의 과제이다.

후 기

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00012).

참고문헌

- [1] M. Shahinpoor and K. J. Kim, "Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications", *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, pp.197-214, 2005.
- [2] K. Oguro, Y. Kawami and H. Takenaka, "Bending of an Ion-Conducting Polymer Film-Electrode Composite by an Electric Stimulus at Low Voltage", *Journal of Micromachine Society*, Vol. 5, No.1, pp.27-30, 1992.
- [3] R. Kanno, S. Tadokoro, M. Hattori, T. Takamori and K. Oguro, "Modeling of ICPF(Ionic Conducting Polymer Gel Film) Actuator(1st Report, Fundamental characteristics and Black-Box Modeling)", *JSME(C)*, Vol. 62, No. 598, pp.2299-2305, 1996.
- [4] M. Shahinpoor, "Electromechanics of Iono-electric Beams as Electrically Controllable Artificial Muscles", *SPIE Conference on Electroactive Polymer Actuators and Devices*, Vol. 3669, No. 12, pp.109-121, 1999.
- [5] S. Nemat-Nasser, J.Y. Li, "Electrochemical response of ionic polymer-metal composites", *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, No.7, pp.3321-3331, 2000.
- [6] S. Nemat-Nasser, Y. Wu, "Comparative experimental study of ionic polymer-metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms", *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, No.9, pp.5255-5267, 2003.
- [7] S. Popovic and M. Taya, "Experimental and Theoretical Studies of Nafion Actuator", *Mechanics and Materials Summer Conference*, UCSD, 2001.
- [8] S. Tadokoro, S. Yamagami, T. Takamori and K. Oguro, "An actuator model of ICPF for robotic applications on the basis of physicochemical hypotheses", *Proc. Of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA '00)*, Vol.2, pp.1340-1346, 2000.
- [9] Y. Toi and S. Kang, "Finite element analysis of two-dimensional

electrochemical-mechanical response of ionic conducting polymer-metal composite beams”, *Computers and Structures*, Vol. 83, No. 31, pp.2573-2583, 2005.

- [10] B. A. Finlayson, “The Method of Weighted Residuals and Variational Principles”, Academic Press, 1972.

저 자 소 개



강성수(姜成洙)

1972년 9월생. 1998년 부산대학교, 기계설계공학과 졸업(학사), 2000년 동경대학교대학원 환경해양공학과 졸업(석사), 2003년 동경대학교대학원 환경해양공학과 졸업(박사), 현재 전주대학교 기계자동차공학과 조교수