

## 비다공성 분리막을 이용한 수용액 내 용존 산소 조절

정 현 규 · 안 효 성 · 송 인 호 · 전 현 수 · 정 동 재 · 이 용 택<sup>†</sup>

충남대학교 화학공학과  
(2007년 11월 19일 접수, 2007년 12월 17일 채택)

### Dissolution of Oxygen in Water by Nonporous Hollow Fiber Membrane Contactor

Heon-Kyu Jeong, Hyoseong Ahn, Inho Song, Hyunsoo Jeon, DongJae Jeong, and Yongtaek Lee<sup>†</sup>

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Chungnam National University, 220 Gung-dong, Youseong-gu,  
Daejeon 305-764, Korea

(Received November 19, 2007, Accepted December 17, 2007)

**요 약:** 비다공성 중공사막 접촉기를 이용하여 수용액 내 용존 산소의 농도를 조절하고자 하였으며, 용존 산소의 농도를 전산모사를 통하여 예측하였다. 공급 기체와 공급 수용액이 같은 방향으로 흐르는 병류 흐름 시스템에 대한 분리막 접촉기 공정 지배 미분 방정식을 5차 Runge-Kutta-Verner 법으로 해석하였다. Compaq Visual Fortran 6.6 소프트웨어로 용존 산소 농도 예측 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 사용하여 수치해석을 수행한 결과, 분리막 수가 16,000개로 일정하며 공급기체의 유속이 0.536 mol/sec이고 압력이 486 kPa이며 공급 수용액의 유속이 16.69 mol/sec이고 산소의 몰분율이 0.995으로 유지된 상태에서, 분리막의 길이가 0.4에서 1.2 m로 증가함에 따라 용존 산소는 30에서 64 ppm으로 증가하였음을 알 수 있었다. 분리막의 길이가 0.4 m일 때 공급수용액의 유속이 9.26에서 26.85 mol/sec로 증가함에 따라 용존 산소가 40에서 20 ppm으로 감소함을 알 수 있었다. 또한 공급 기체 압력이 298에서 847 kPa으로 증가함에 따라 용존 산소는 33에서 69 ppm으로 증가함을 알 수 있었다.

**Abstract:** A nonporous hollow fiber membrane contactor was used to control the concentration of oxygen dissolved in an aqueous solution, which was predicted along the hollow fiber membrane using a computer simulation. The governing ordinary differential equations were derived for the cocurrent flows of the feed aqueous solution and the feed gas mixture in a membrane contactor and they were numerically solved using the 5th Runge-Kutta-Verner method with a personal computer, where the program was coded utilizing a software of the Compaq Visual Fortran 6.6. It is found that the concentration of oxygen dissolved in water increases from 30 to 64 ppm as the length of the hollow fiber increases from 0.4 to 1.2 m when the membrane of fibers are equal to be 16,000; the flow rate of the feed gas is kept to be 0.536 mol/sec; its pressure is maintained to be 486 kPa; the flow rate of the water is 16.69 mol/sec. As the flow rate of the water increases from 9.26 to 26.85 mol/sec, the concentration of oxygen decreases from 40 to 20 ppm with the constant fiber length of 0.4 m. Finally, it is observed that the concentration of oxygen increases from 33 to 69 ppm as the pressure of the feed gas increases from 298 to 847 kPa.

**Keywords:** numerical analysis, membrane contactor, cocurrent flow, dissolution of oxygen

#### 1. 서 론

막분리 접촉기를 이용한 기술은 기존의 분리공정에 비해 에너지 소모가 적은 것이 특징으로 기존 공정 대비 공정 규모를 줄일 수 있다는 장점이 있어 분리막 용

매추출(membrane solvent extraction, MSX), 분리막 흡수(membrane absorption) 등 그 활용이 점차 확대되고 있다. 분리막 접촉기를 이용한 기체 흡수 기술은 기존 기체 흡수에 요구되었던 장치의 부피를 20배 이상, 액체 추출을 위해 요구되는 장비의 부피를 500배 이상 감소시킬 수 있을 만큼 경제적인 기술로 부상되었다[1].

<sup>†</sup>주저자(e-mail : ytleee@cnu.ac.kr)

초순수 제조를 위한 산소 탈거와 의학용 혈액 산소 공급 등의 산업화된 분리막 접촉 기술과 준공장 규모로서 증기 올레핀과 파라핀 혼합물로부터 올레핀 분리에 관한 분리막 접촉 기술에 대하여 이미 보고된 바 있다 [2-4]. 또한 산소수를 찾는 사람들이 늘고 있다. 산소를 공기로 들이쉬는 것보다 물로 섭취하는 게 10배 이상 흡수율이 높다고 알려져 있기 때문이다. 보통 수돗물에는 6 ppm, 생수에는 8 ppm, 청정지역의 맑은 계곡수에는 10~12 ppm의 산소가 녹아 있다. 업계에선 이런 물보다 3~15배에 해당하는 산소가 녹아 있는 것을 산소수라고 규정하고 있다. 산소가 물에 잘 녹지 않고, 녹았다 해도 용존 상태를 유지해 유통시키는 것이 어렵다. 기술과 비용 때문에 이 같은 문제를 해결하기가 쉽지 않지만 많은 연구가 이루어지고 있다[5].

기존 산소 흡수에 사용된 흡수공정(absorption)의 경우 액상의 흡수제와 기체간의 접촉 면적을 최대화하기 위하여 충전제를 이용하여 기체는 하부로부터 그리고 흡수제는 탑의 상부로부터 공급되어 상호 접촉함으로써 산소가 흡수제에 흡수된다. 흡수 공정의 경우 기체에 의한 흡수제의 범람(flooding) 현상이나 편류(channeling) 현상 등의 기술적 단점이 존재한다. 최근에 이와 같은 단점을 최소화하기 위하여 분리막을 이용한 흡수 기술이 개발되기 시작하였다[6].

고분자 분리막은 다공성과 비다공성으로 나뉘어진다. 균일한 비다공성막에서의 기체 투과기구는 고압 측 막 계면에 기체 분자가 용해하고 용해한 기체 분자가 막 내부의 자유부피를 통하여 확산하여 저압 측의 반대계면에서 탈리되는 용해 확산 모델이 적용된다. 이러한 비다공성막은 다공성 막에 비해 투과도가 현저하게 떨어지는 단점이 있다. 하지만 기상과 액상의 압력을 동시에 고려해야 하는 다공성막보다 운전 조건을 조절하는 데 있어서 용이하다[7]. 비다공성 분리막을 사용하여 산소기체를 흡수제에 용해 시 산소 흡수는 산소 공급측과 산소 흡수측의 산소 압력차에 의하여 산소를 용이하게 흡수할 수 있다. 따라서 흡수탑과 같이 기체 주입 방향을 상하가 아닌 어떠한 방향에서든 가능할 뿐만 아니라 범람 현상과 편류 현상을 배제할 수 있기 때문에 운전 조건을 자유롭게 조절할 수 있는 장점이 있다. 또한 단위부피당의 접촉 면적도 조절이 가능하기 때문에 같은 흡수효율을 얻기 위하여 중공사 분리막 모듈의 크기도 조절할 수 있을 것으로 예상된다. 결과적으로 장

치비와 운전보수비 등의 경비도 절약할 수 있는 신기술로 생각된다.

본 연구에서는 비다공성 중공사 막 모듈을 이용하여 수용액 내 용존 산소 농도를 조절하고자 하였으며 용존 산소의 농도를 예측하기 위하여 시스템 지배방정식을 유도하고자 하였다. 지배방정식의 유도 시 시스템을 단순화하여 간단한 모델을 선정하였으며 이 모델을 근거로 유도된 시스템 지배방정식을 공정모사하기 위하여 무차원화하였으며 이러한 시스템 지배방정식을 Compaq Visual Fortran 6.6을 사용하여 전산 프로그램을 개발하였다. 이렇게 작성된 전산모사 프로그램을 이용하여 중공사 분리막 모듈의 산소 흡수 효율에 영향을 주는 공정 변수에 따른 산소의 용해 특성을 예측하고자 하였다. 수치 해석 변수로서 공급 기체의 조성, 공급 및 흡수측의 압력 및 유량 등을 변화시켰으며 이에 따른 용존 산소 농도 변화를 해석하고자 하였다.

## 2. 이론적 고찰

물이 중공사 분리막의 내부 공정으로 공급되고, 혼합 기체가 분리막 외부로 공급되는 분리막 접촉기 내의 물질전달을 예측하기 위하여 시스템을 단순화하였다. 시스템을 단순화하기 위하여 많은 가정을 도입하였으며 이러한 가정들을 차후 순차적으로 보다 현실성 있도록 개선하여 나가하고자 한다. 혼합 기체와 물은 같은 방향으로 흐르는 병류 흐름(cocurrent flow)이며, 중공사 분리막의 내부공정과 외부로 흐르는 유체는 모두 평류 흐름(plug flow)을 유지한다고 가정하였다. 축 방향 혹은 반경 방향의 혼합이 존재하지 않으며, 분리막 표면에서 농도 분극은 존재하지 않는다. 또한 산소의 흡수량이 증가하더라도, 물의 전체 유량은 증가하지 않고 일정하게 유지된다고 가정하였다. 혼합 기체는 압력 강하가 존재하지 않고 일정하게 유지되며, 분리막 내부와 외부의 압력차로 인한 분리막의 기계적 변화가 없다고 가정하였다. 그리고 공급 기체와 액체의 점도는 일정하게 유지된다고 가정하였다.

Fig. 1에 유체들이 병류 흐름으로 흐르는 산소 용해 분리막 접촉기의 전체적인 개략도를 나타내었다.  $x$ 와  $y$ 는 공급 기체와 물에 포함된 산소의 몰분율을 나타내며,  $L$ 과  $V$ 는 공급 기체와 물의 몰 유속,  $P_1$ 은 공급 기체의 압력을 의미한다.  $D_i$ 와  $D_o$ 는 분리막의 내경과

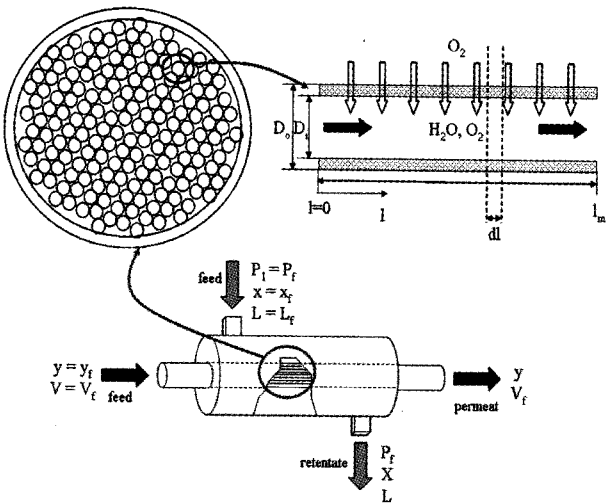


Fig. 1. A schematic of cocurrent flow in hollow fiber membrane contactor.

외경을 의미하며,  $l$  은 분리막 입구로부터의 거리,  $l_m$  은 분리막의 전체 길이를 나타낸다. 총괄 물질 수지식과 산소의 미분 물질 수지식으로부터 산소 용해 거동을 예측할 수 있는 시스템 지배 미분 방정식을 유도할 수 있다.

병류 흐름 분리막 모듈을 통과하는 기체에 대한 총괄 물질수지식은 식 (1)과 같다.

$$L_f = L + V_f(y - y_f) \tag{1}$$

여기서  $L_f$ 는 모듈 입구에서의 공급 기체의 몰유속을,  $V_f$ 는 공급 액체의 몰유속을,  $y_f$ 는 모듈 입구에서의 공급 액체에 함유한 산소의 몰분율을 나타낸다. 산소에 대한 총괄 물질수지식은 식 (2)와 같다.

$$L_f x_f + V_f y_f = Lx + V_f y \tag{2}$$

여기서  $x_f$ 는 모듈 입구에서의 공급 기체 내에 포함된 산소의 몰 분율을 의미한다. 분리막 접촉기 내 일정 지점에서의 미분 길이( $dl$ )에서 산소의 미분 물질수지식은 식 (3)과 같다.

$$d(V_f y) = \pi \overline{D_{LM}} dl \left( \frac{Q}{d} \right)_{O_2} (P_1 x - P_2^*) \tag{3}$$

여기서  $\overline{D_{LM}}$ 은 중공사막의 내경과 외경에 대한 로그평

균지름을 나타내며,  $(Q/d)_{O_2}$ 는 분리막을 통한 산소의 투과도(permeance)를 의미한다.  $P_1$ 은 공급 기체의 전체 압력을 나타낸다. 또한  $P_2^*$ 는 물속에 용해된 산소 몰농도에 상응하는 분압을 나타낸다.  $P_2^*$ 는 Henry의 법칙을 적용하여 물속에 용해된 산소의 몰 분율을 이용하여 나타낼 수 있다.  $P_2^*$ 를 Henry 상수와 몰 분율을 나타내어 식 (3)에 적용한 다음 양변을 미분 길이  $dl$ 로 나누어 정리하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\frac{d(V_f y)}{dl} = \pi \overline{D_{LM}} \left( \frac{Q}{d} \right)_{O_2} (P_1 x - H_{O_2} y) \tag{4}$$

식 (4)에서  $H_{O_2}$ 는 물에 용해된 기체의 Henry 상수이다. 산소의 Henry 상수는 온도에 따라 변화하는데 25°C에서의 Henry 상수는 44,380 bar이다[8-10]. 식 (4)에서  $V_f$ 는 일정하므로 단위 길이에 따른 물에 용해된 산소 농도( $y$ ) 변화는 다음과 같다.

$$\frac{dy}{dl} = \frac{1}{V_f} \pi \overline{D_{LM}} \left( \frac{Q}{d} \right)_{O_2} (P_1 x - H_{O_2} y) \tag{5}$$

총괄 물질수지식인 식 (1)을 단위 길이로 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dL}{dl} = - V_f \frac{dy}{dl} \tag{6}$$

식 (6)에 식 (5)를 대입하여 정리하면, 단위 길이에 따른 공급 기체 유량 변화( $dL$ )를 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{dL}{dl} = - \pi \overline{D_{LM}} \left( \frac{Q}{d} \right)_{O_2} (P_1 x - H_{O_2} y) \tag{7}$$

산소의 총괄 물질수지식인 식 (2)를 단위 길이로 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dx}{dl} = - \frac{1}{L} \left( x \frac{dL}{dl} + V_f \frac{dy}{dl} \right) \tag{8}$$

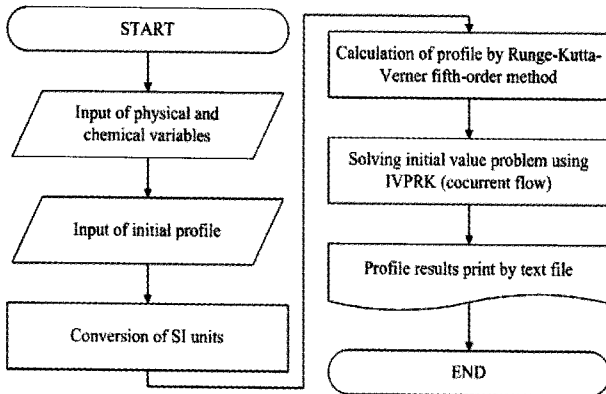
식 (8)에 식 (5)과 (6)을 대입하여 정리하면, 단위 길이에 따른 공급 기체 산소 농도 변화( $dx$ )를 다음 식과

**Table 1.** Specification of Membrane Module

Permeance of O <sub>2</sub> (GPU, 1 GPU = 10 <sup>-6</sup> Ncm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> · sec · cmHg)	0.346
Inside diameter of hollow fiber (μm)	220
Outside diameter of hollow fiber (μm)	400
Effective thickness (m)	0.1 × 10 <sup>-6</sup>
Number of hollow fiber membrane	16,000

**Table 2.** Operating Conditions for Numerical Analysis

O <sub>2</sub> mole fraction in the feed gas	0.4~0.995
Flow rate of gas (mol/sec)	0.536
Concentration of oxygen in feed water (ppm)	8
Flow rate of water (mol/sec)	9.26~26.85
Pressure of the feed gas (kPa)	298~847
Length of the membrane (m)	0.4~1.18



**Fig. 2.** Schematic flow diagram of computer program.

같이 얻을 수 있다.

$$\frac{dx}{dl} = -\frac{1}{L}(1-x) \left[ \pi \overline{D_{LM}} \left( \frac{Q}{d} \right)_{O_2} (P_1 x - H_{O_2} y) \right] \quad (9)$$

이상과 같이 유도한 시스템 지배 방정식 식 (5), (7), (9)를 수치 해석하기 위하여 식 (10)과 같이 정의된 무차원군을 사용하면 식 (11)~(13)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_1 &\equiv \frac{P_1}{P_f}, \quad \gamma_2 \equiv \frac{H_{O_2}}{P_f}, \quad l^* \equiv \frac{l}{l_m}, \\ L^* &\equiv \frac{L}{V_f}, \quad K_1 \equiv \pi \overline{D_{LM}} \frac{l_m}{V_f} \left( \frac{Q}{d} \right)_{O_2} P_f \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{dy}{dl^*} = K_1 (\gamma_1 x - \gamma_2 y) \quad (11)$$

$$\frac{dL^*}{dl^*} = -K_1 (\gamma_1 x - \gamma_2 y) \quad (12)$$

$$\frac{dx}{dl^*} = -\frac{1}{L^*} (1-x) K_1 (\gamma_1 x - \gamma_2 y) \quad (13)$$

식 (11)은 단위 길이 ( $dl^*$ ) 증가에 따른 물에 용해된 산소 농도 변화를 나타낸 미분 방정식이고, 식 (12)는 단위 길이 증가에 따른 공급 기체의 산소 농도 변화를 나타낸 미분 방정식이다. 마지막으로 식 (13)은 단위 길이 증가에 따른 공급 기체 유량 변화를 나타낸 미분 방정식이다.

위에서 얻은 식 (11)~(13)을 해석하기 위한 초기 조건(initial condition)은 다음과 같다.

$$y_1 = y_f, \quad x = x_f, \quad L^* = \frac{L_f}{V_f}, \quad @ l^* = 0 \quad (14)$$

### 3. 전산모사

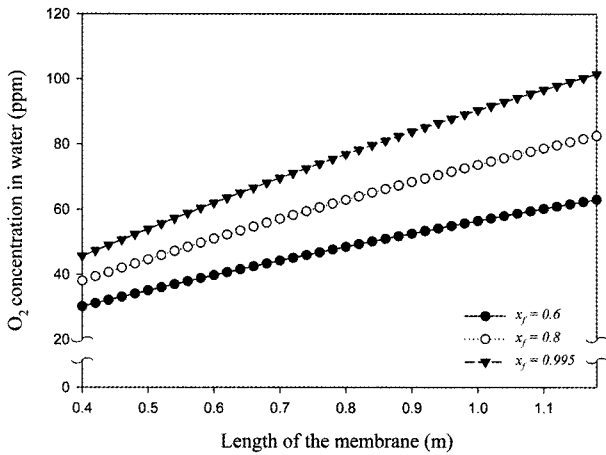
분리막 접촉기에 사용된 비다공성 분리막의 기본 규격은 Table 1과 같다. 산소 용해 거동 방정식을 해석하기 위하여 개발된 프로그램의 순서도는 Fig. 2와 같다.

시스템 지배 방정식은 초기값 문제(initial-value problem)의 비선형 상미분 방정식(nonlinear ordinary differential equation)으로서, 5차 Runge-Kutta-Verner법으로 해석하였다. 산소 용해 공정 변수에 따른 용존 산소 농도를 예측하기 위하여 사용한 조건은 Table 2와 같다.

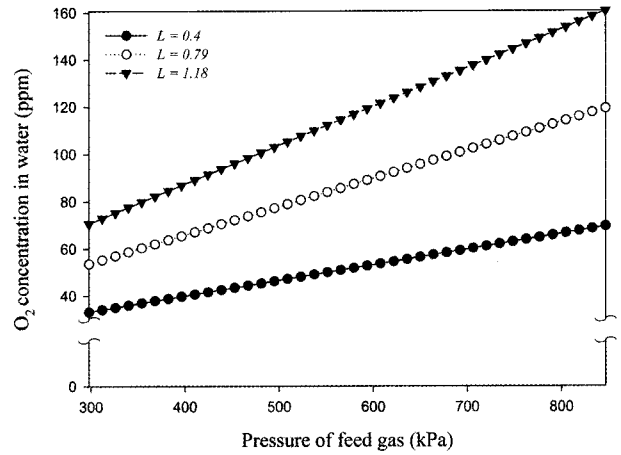
### 4. 결과 및 고찰

물에 산소를 용해시키는 분리막 접촉기 공정에서 공급 기체의 산소 몰분율, 압력과 공급 기체의 유량, 분리막의 길이, 공급 수용액의 유속 변화에 따른 수용액 내 용존 산소 농도 변화를 예측하였다.

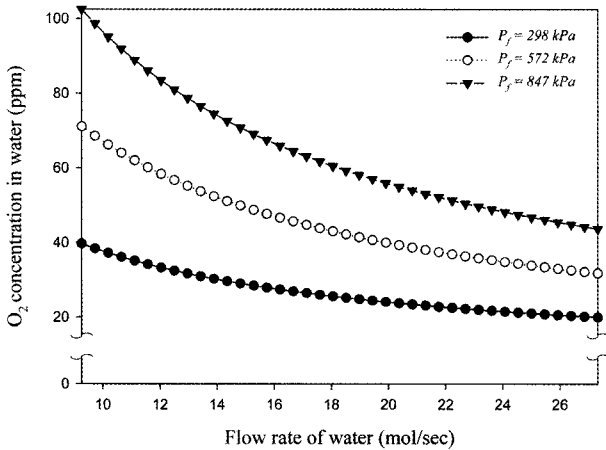
첫째, 분리막의 길이에 따른 수용액 내 용존 산소 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 분리막 수가 16,000개로 일정하며 공급 기체의 유속이 0.536 mol/sec이고 압력이 486 kPa이며 공급 수용액의 유속이 16.69 mol/sec로 유



**Fig. 3.** O<sub>2</sub> concentration in water vs. length of the membrane:  $L_f = 0.536$  mol/sec,  $V_f = 16.69$  mol/sec,  $P_f = 486$  kPa.



**Fig. 5.** O<sub>2</sub> concentration in water vs. pressure of feed gas:  $X_f = 0.995$ ,  $V_f = 16.69$  mol/sec.



**Fig. 4.** O<sub>2</sub> concentration in water vs. flow rate of water:  $X_f = 0.995$ ,  $L = 0.4$  m.

지된 상태에서, 산소의 몰분율이 0.995일 때, 분리막의 길이가 0.4에서 1.2 m로 증가함에 따라 용존 산소의 농도가 30에서 64 ppm으로 증가하였다. 이는 공급 수용액과 공급 기체의 속도가 일정하고 분리막의 길이가 증가함에 따라 분리막 접촉 면적이 증가하고, 결과적으로 공급 수용액의 체류 시간이 증가하기 때문에 용존 산소 농도가 증가하는 것으로 사료된다. 분리막의 길이가 0.4 m로 일정할 때, 공급측 산소의 몰분율이 0.6에서 0.995로 증가함에 따라 용존 산소는 30에서 46 ppm으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 공급측 산소의 압력 증가로 산소 전달 구동력이 커지고 따라서 전달된 산소량이 증가하며 그 결과 공급 수용액 내의 용존 산소 농도가 증가한 것으로 판단된다.

둘째, 수용액의 유속 변화에 따른 배출된 수용액 내에 용존된 산소 농도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 분리막의 길이가 0.4 m이고, 공급기체의 유속이 0.536 mol/sec이며 기체 내 산소의 몰분율이 0.995로 유지된 상태에서 공급 기체 압력이 298 kPa일 때, 공급 수용액의 유속이 9.26에서 26.85 mol/sec로 증가함에 따라 용존 산소가 40에서 20 ppm으로 감소하였다. 이는 공급 수용액의 유속 증가에 따라 분리막 내부에서 공급 수용액의 체류 시간이 감소한다. 그러나 분리막을 통하여 전달되는 산소의 양은 거의 일정하므로 용존 산소 농도가 감소하는 것으로 사료된다. 동일한 공급 수용액의 유속에서 공급 측 산소 분압이 증가함에 따라서 용존 산소 농도가 증가함을 알 수 있다. 산소 투과 구동력이 공급 측과 투과 측의 산소 분압차로 정의되므로, 공급 기체 압력이 증가하면 공급 측 산소 분압이 증가하고 따라서 산소의 투과 구동력이 증가하게 되고 결과적으로 전달되는 산소량이 증가하고 이로써 산소 농도가 증가하는 것으로 판단된다.

마지막으로 공급 기체 압력 변화에 따른 배출되는 수용액 내의 용존 산소 농도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 공급 수용액의 유속이 16.69 mol/sec이고 공급기체의 유속이 0.536 mol/sec이며 산소의 몰분율이 0.995로 유지된 상태에서 분리막의 길이가 0.4m로 일정할 때 공급 기체 압력이 298에서 847 kPa로 증가함에 따라 용존 산소는 33에서 69 ppm으로 증가하였다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 산소의 투과 구동력의 증가에 의한 것으로 설명할 수 있다.

5. 결 론

기체와 수용액이 병류 흐름으로 흐르는 비다공성 중공사막 접촉기를 이용하여 수용액 내의 용존 산소 농도 변화를 예측하기 위한 시스템 지배 방정식을 유도하였다. 이 방정식들을 5차 Runge-Kutta-Verner 방법을 사용하여 해석하였으며 공정모사 컴퓨터 프로그램을 Compaq Visual Fortran 6.6 소프트웨어를 사용하여 개발하였다. 용존 산소 농도의 거동에 공정변수가 미치는 영향을 전산모사하였으며 그 결과, 분리막 수가 16,000개로 일정하며 공급기체의 유속이 0.536 mol/sec이고 압력이 486 kPa이며 공급 유체의 유속이 16.69 mol/sec이고 산소의 몰분율이 0.995로 유지된 상태에서, 분리막의 길이가 0.4에서 1.2 m로 증가함에 따라 용존 산소는 30에서 64 ppm으로 증가하였고, 분리막의 길이가 0.4 m일 때 공급유체의 유속이 9.26에서 26.85 mol/sec로 증가함에 따라 용존 산소가 40에서 20 ppm으로 감소하였다. 또한 공급 기체 압력이 298에서 847 kPa으로 증가함에 따라 용존 산소는 33에서 69 ppm으로 증가함을 알 수 있었다. 따라서, 용존 산소 농도를 공정 변수들을 적절히 변화함으로써 조절할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감 사

본 연구는 산업자원부의 산업기술 개발 사업-공통핵심사업과 충남대학교 교원 연구력 강화 사업 및 BK21 에너지 환경소재 혁신 인력양성사업의 지원으로 수행하였으며 이에 감사드립니다.

기 호 설 명

$\overline{D_{LM}}$	Log mean diameter of hollow fiber [m]
$d_i$	Inside diameter of hollow fiber [m]
$d_o$	Outside diameter of hollow fiber [m]
$K_1$	Dimensionless parameter as defined in Eq. (10)
$L$	Flow rate of feed [mol/sec]
$L_f$	Flow rate of feed in module entrance [mol/sec]
$L^*$	Dimensionless flow rate of feed

$l$	Distance [m]
$l_m$	Total effective length of membrane [m]
$l^*$	Dimensionless distance as defined in Eq. (10)
$P_f$	Pressure of feed side in module entrance [atm]
$P_1$	Pressure of feed side [atm]
$(Q/d)_{O_2}$	Permeance of oxygen in hollow fibers [ $Ncm^3 \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1} \cdot cmHg^{-1}$ ]
$V$	Flow rate of permeate [mol/sec]
$V_f$	Flow rate of permeate in module entrance [mol/sec]
$x$	Mole fraction of oxygen in feed
$x_f$	Mole fraction of oxygen in module entrance
$y$	Mole fraction of oxygen in permeate
$y_f$	Mole fraction of oxygen in module entrance
$\gamma_1$	Pressure ratio as defined in Eq. (10)
$\gamma_2$	Pressure ratio as defined in Eq. (10)

참 고 문 헌

1. Q. Zhang and E. L. Cussler, "Microporous hollow fibers for gas absorption: I. Mass transfer in the liquid", *J. Membr. Sci.*, **23**, 321 (1985).
2. R. D. Noble and S. A. Stern, "Membrane Separations Technology: Principles and Applications", pp. 467-498, Elsevier Science B. V., Amsterdam, The Netherlands (1995).
3. P. H. M. Feron and A. E. Jansen, "CO<sub>2</sub> separation with polyolefin membrane contactors and dedicated absorption liquids: performances and prospects", *Separation and Purification Tech.*, **27**, 231 (2002).
4. H. Kreulen, C. A. Smolders, G. F. Versteeg, and W. P. M. van Swaaij, "Determination of mass transfer rates in wetted and non-wetted microporous membranes", *Chem. Eng. Sci.*, **48**, 2093 (1993).
5. [http://www.koreao2.com/information/info\\_intro.html](http://www.koreao2.com/information/info_intro.html), November 13 (2007).

6. 박유인, 이기섭, 연순화, 서봉국, 임지원, 이규호, “분리막 접촉기용 Poly(vinylidene fluoride) 중공사막 제조 및 투과특성”, *공업화학*, **14**(6), 707 (2003).
7. 김동원, 김홍구, 엄기연, 김상호, 이인선, 박종수, 이신근, “Cu Reflow를 이용한 Pd-Cu-Ni 합금 수소분리막 특성”, *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(2), 160 (2006).
8. J. A. Dean and N. A. Lange, “Lange’s Handbook of Chemistry”, 15th ed, p. 10-5, McGraw- Hill, New York, NY (1999).
9. D. R. Lide, “CRC Handbook of Chemistry and Physics: a Ready-reference Book of Chemical and Physical Data”, 83th ed., p. 8-87, CRC, Boca Raton, FL (2002).
10. J. M. Smith, H. C. Van Ness, and M. M. Abbott, “Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics”, 7th ed., p. 357, McGraw-Hill, New York, NY (2005).