

## 수치해석에 의한 향류 흐름 중공사 분리막의 이산화탄소 분리 성능 해석

송인호·안효성·이영진·전현수·이용택<sup>†</sup>·김정훈\*·이수복\*

충남대학교 공과대학 화학공학과, \*한국화학연구원 신화학연구원  
(2006년 11월 3일 접수, 2006년 12월 8일 채택)

### Analysis of Carbon Dioxide Separation with Countercurrent Flow in Hollow Fiber Membrane by Numerical Analysis

Inho Song, Hyoseong Ahn, Youngjin Lee, Hyunsoo Jeon, Yongtaek Lee<sup>†</sup>, Jeong-Hoon Kim\*, and Soo-Bok Lee\*

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

\*Advanced Chemical Technology Division, Korea Research Institute of Chemical Technology 100 Jang-dong, Yuseong-gu,  
Daejeon, 305-343, Korea

(Received November 3, 2006, Accepted December 8, 2006)

**요약:** 배기가스로부터 폴리이서술폰 분리막을 이용하여 이산화탄소 분리 특성을 수치해석 방법으로 분석하였다. 공급 기체와 투과 기체가 서로 다른 방향으로 흐르는 향류 흐름 시스템에 대한 분리막 공정 지배 방정식을 유한 차분법으로 전개하였으며 Compaq Visual Fortran 6.6 소프트웨어를 이용 공정 모사하였다. 개발된 프로그램을 사용하여 수치해석을 수행한 결과 이산화탄소 투과특성에 영향을 주는 가장 중요한 인자로는 이산화탄소 투과 구동력과 체류시간임을 알 수 있었다. 동일한 조건에서 향류 흐름 공정모사에 의한 투과 측 이산화탄소 농도와 투과량은 병류 흐름 공정모사 결과보다 소폭 증가함을 확인하였다.

**Abstract:** A numerical analysis was performed for a separation process of carbon dioxide from a flue gas stream using polyethersulfone hollow fiber membranes. Countercurrent flow governing equations were regarded to be two point boundary-value problem and the nonlinear ordinary differential equation were simultaneously solved using the finite-difference method. A computer program was developed using the Compaq Visual Fortran 6.6 software. The carbon dioxide permeate driving force and the feed gas residence time at the inside of membrane were found to be very important factors affecting the permeation characteristics of carbon dioxide. The carbon dioxide concentration in the permeate and the flow rate of the permeate were found to be slightly larger by a few percent with a countercurrent flow analysis than those with a cocurrent flow analysis.

**Keywords:** Numerical analysis, countercurrent flow, carbon dioxide, polyethersulfone, hollow fiber membrane

#### 1. 서 론

이산화탄소는 지구의 생태계와 사회 경제적 분야에 영향을 미치는 온실가스로 현재 그 배출량을 줄이고자 국제사회는 1998년 UN총회 결의에 따라 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)에 “기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC)”을 설치하였고, 1992년 6월 유엔환

경개발회의(UNCED)에서 기후변화협약(UNFCCC)을 채택하였다. 기후변화협약의 주요 내용은 지구온난화 방지를 위하여 모든 당사국이 참여하되 온실가스 배출의 역사적 책임이 있는 선진국은 차별화하는 것을 기본 원칙으로 하며, 모든 당사국은 지구온난화 방지를 위한 정책 조치 및 국가 온실가스 배출통계가 수록된 국가보고서를 UN에 제출해야하는 의무사항을 지니고 있다. 우리나라는 1993년 기후변화협약에 가입하였다[1]. 따라서 화석연료를 에너지원으로 사용하는 발전소, 제

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

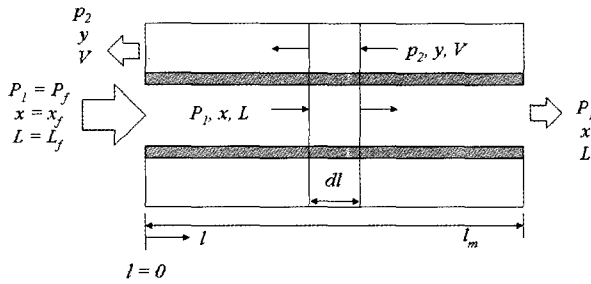


Fig. 1. A flow configuration for countercurrent flow.

철소, 시멘트 공장 및 일반 화학 공장 등의 국내 산업에 대하여 국제사회의 압력을 거세게 받을 것으로 예상된다.

현재 배기가스로 배출되는 이산화탄소를 저감시키는 기술은 사전 저감 기술과 사후 저감 기술로 나뉘어진다. 하지만 사전 저감 기술의 경우 당장 실현되기 어렵기 때문에 사후 저감 기술을 통한 이산화탄소의 저감이 현실적이라 할 수 있다[2,3]. 사후 저감 기술에는 흡착, 흡수 공정 및 분리막 공정 등이 있으며, 분리된 이산화탄소를 해양에 저장하거나 다른 화학물질의 제조 원료로 사용하는 연구가 진행 중에 있다.

기체 분리막 모듈의 운전 방식에는 공급 기체와 투과 기체 사이에서 연속적인 물질 이동을 하기 위해서 양쪽 기체가 분리막에 접촉하면서 반대 방향으로 흐르는 향류 흐름(countercurrent flow) 조작과 같은 방향으로 흐르는 병류 흐름(cocurrent flow) 조작이 있다. 병류 흐름은 분리막 입구에서의 물질 이동으로 투과 구동력이 최대에서 점차 감소해 출구에서 최소가 되는 반면 향류 흐름에서 투과 구동력은 분리막 내에서 비교적 균일하게 유지된다. 분리막을 이용한 기체 분리의 경우 투과 구동력과 운전의 용이성에 의하여 향류 흐름으로 설계되어 분리하는 경우가 대부분이다[4].

본 논문에서는 향류 흐름의 분리막 모듈 내부 이산화탄소 분리거동 및 공정 변수에 따른 이산화탄소 분리 특성을 컴퓨터 전산모사를 통해 예측하고, 병류 흐름과의 비교를 통해서 배기가스로부터 이산화탄소를 분리, 회수하는데 필요한 공정 설계 기술 자료를 제공하고자 하였다. 이산화탄소의 분리, 회수 분리막 공정의 전산모사를 위하여 Compaq Visual Fortran 6.6 소프트웨어를 사용하였으며 유한 차분법(finite difference method)을 이용하여 향류 흐름에서의 이산화탄소 분리거동 예측 프로그램을 개발하였다.

## 2. 이론적 고찰

향류 흐름에 대한 지배 방정식 유도에 필요한 가정은 병류 흐름에 사용한 가정을 동일하게 적용하였다[5].

Fig. 1은 이산화탄소 분리, 회수 시스템의 전체적인 개략도이다.  $x$ 와  $y$ 는 공급 기체와 투과 기체의 이산화탄소 농도,  $L$ 과  $V$ 는 공급 기체와 투과 기체의 몰 유속,  $P_1$ 과  $p_2$ 는 공급 기체와 투과 기체의 압력을 의미한다.  $l$ 은 분리막의 기체 공급 입구로부터의 거리,  $l_m$ 은 분리막의 전체 길이를 의미한다.

향류 흐름에서의 시스템 지배 방정식은 총괄 물질 수지식과 이산화탄소와 질소 미분 물질 수지식으로부터 유도하였고, 전산 모사를 위하여 병류 흐름에 사용했던 무차원군[5]을 이용하여 시스템 지배 방정식을 무차원화 하여 나타내면 다음 식과 같다[6].

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

$$\frac{dy}{dl^*} = -\frac{K_1}{V^*} \{ \alpha(\gamma_1 x - \gamma_2 y) - y\{\alpha(\gamma_1 x - \gamma_2 y) + \gamma_1(1-x) - \gamma_2(1-y)\} \} \quad (2)$$

$$\frac{dL^*}{dl^*} = -K_1 \{ \alpha(\gamma_1 x - \gamma_2 y) + \gamma_1(1-x) - \gamma_2(1-y) \} \quad (3)$$

$$\frac{dV^*}{dl^*} = -K_1 \{ \alpha(\gamma_1 x - \gamma_2 y) + \gamma_1(1-x) - \gamma_2(1-y) \} \quad (4)$$

$$\frac{d\gamma_1}{dl^*} = -K_2 \frac{L^*}{\gamma_1} \quad (5)$$

$L^*$ ,  $V^*$ ,  $l^*$ 는 각각 무차원화된 공급 기체와 투과 기체의 몰 유속, 입구로부터의 거리를 나타낸다.  $K_1$ 과  $K_2$ 는 방정식의 무차원화 과정에서 얻게 되는 무차원군이며,  $\alpha$ 는 이산화탄소의 선택도를 의미한다.  $\gamma_1$ 과  $\gamma_2$ 는 각각 무차원화된 공급측 압력과 투과측 압력을 나타낸다. 따라서 ' $\alpha(\gamma_1 \cdot x - \gamma_2 \cdot y)$ ' 항은 이산화탄소 투과 플럭스(flux)를 의미하며 ' $\gamma_1(1-x) - \gamma_2(1-y)$ ' 항은 질소 투과 플럭스를 의미한다. 식 (1)과 (2) 우변의 두 번째 항에 나타난 중괄호 "{ }" 전의 ' $x$ '와 ' $y$ '는 이산화탄소 물질 수지식을 미분하는 과정에서 발생된 항이다.

식 (2)는 분리막의 단위 길이( $dl^*$ ) 당 투과층 이산화탄소 농도 변화를 의미한다. 분리막 단위 길이가 증가하면 공급측 이산화탄소 농도는 공급 모듈입구로부터 멀어질수록 감소하고 이산화탄소 분압 차에 의한 이산화탄소 투과량도 감소하여 투과층의 이산화탄소량이 감소된다. 또한 질소 투과량은 분리막의 선택도에 의하여 이산화탄소 투과량보다 상대적으로 작기 때문에 투과층의 질소 감소량은 이산화탄소의 감소량에 비하여 상대적으로 작아 투과층 이산화탄소 농도가 감소하게 된다. 하지만 향류 흐름에서 투과층 출구는  $l^* = 0$ 인 지점이므로 최종 이산화탄소 유량은 병류 흐름보다 매우 큰 값을 나타내게 된다. 중공사 분리막 내부 압력 강하를 나타내는 식 (5)는 Hagen-Poiseuille 식을 사용하여 유도하였다.

이들 미분 수치식 중 식 (2)은  $l^* = 1$ 인 지점에서 우변의 분모 항이 0이므로 직접 사용이 불가능하다. L'Hopital rule과 이산화탄소의 십자흐름(cross flow)을 이용하여  $l^* = 1$ 인 지점에서 사용하면 다음 식 (6)을 얻을 수 있다[7,8].

$$\frac{dy}{dl^*} \Big|_{l^*=1} = \frac{\{\alpha x(1-y) - y(1-x)\} \frac{d\gamma_1}{dl^*} + \{\alpha\gamma_1(1-y) + \gamma_1 y\} \frac{dx}{dl^*}}{2\alpha(\gamma_1 x - \gamma_2 y) + 2\gamma_1(1-x) + \gamma_2(1-y)(\alpha-2) + \gamma_2 y} \quad (6)$$

식 (1) ~ (6)을 해석하기 위한 두 가지 경계 조건 중  $l^* = 0$ 인 지점에서의 공급측 변수들의 경계 값은 다음과 같다.

$$x = x_f \quad (7)$$

$$L = L_f \quad (8)$$

$$P_1 = P_f \quad (9)$$

$l^* = 1$ 인 지점에서의 투과층 변수들의 경계 값은 다음과 같다.

$$V = 0 \quad (10)$$

$l^* = 1$ 에서의 마지막 경계 조건인  $y$ 는 CO<sub>2</sub>의 십자흐름에 의해서 형성된 농도로 가정할 수 있다. “투과층

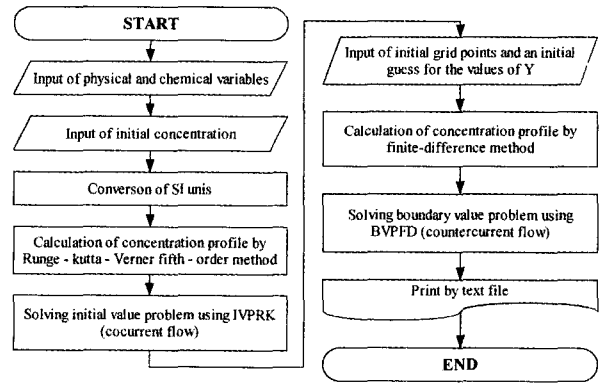


Fig. 2. Flow diagram to solve nonlinear ordinary differential equations.

몰분율 = CO<sub>2</sub> 투과량/전체 투과량”으로 정의[7,8]되므로 다음과 같은 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$y = \frac{(\alpha-1)(\gamma_2 + \gamma_1 x) + \gamma_1 - \sqrt{\{(\alpha-1)(\gamma_2 + \gamma_1 x) + \gamma_1\}^2 - 4\gamma_2(\alpha-1)(\alpha\gamma_1 x)}}{2\gamma_2(\alpha-1)} \quad (11)$$

향류 흐름과 병류 흐름 지배 방정식을 동일한 무차원 균을 이용하여 무차원화된 지배 방정식을 비교한 결과 [5] 단위 길이당 투과층 몰 분율과 몰 유속의 부호가 반대로 바뀐 것을 확인할 수 있는데, 이는 향류 흐름과 병류 흐름의 투과층 출구가 서로 반대 방향이기 때문에 발생한 결과이며 이로 인하여 투과층 이산화탄소 분리 거동은 병류 흐름과 매우 다른 성향을 가질 것으로 생각된다.

### 3. 전산모사

향류 흐름 지배 방정식을 유한 차분법으로 수치해석하였고, 유한 차분법에 필요한 경계 조건과 이웃하는 절점(Node)과의 관계는 병류 흐름 지배 방정식에서 사용하였던 방법을 그대로 이용하였다. 전산모사는 Compaq Visual Fortran 6.6 프로그램을 사용하여 코딩작업을 수행하였으며 프로그램 코딩을 위한 순서도는 Fig. 2와 같다.

본 전산모사는 공급 기체와 투과 기체의 흐름방향에 따른 이산화탄소의 분리 거동을 확인하기 위하여 병류 흐름에 사용한 동일한 소재 분리막과 공정 변수로 전산모사를 실행하였다. 향류 흐름의 전산모사는 양쪽 끝 경계면 값을 만족하는 해를 구하여야 하기 때문에 병류 흐름의 전산모사와 많이 다르다. 즉 초기 값을 만족

**Table 1.** Characteristics of Polyethersulfone Hollow Fiber Module

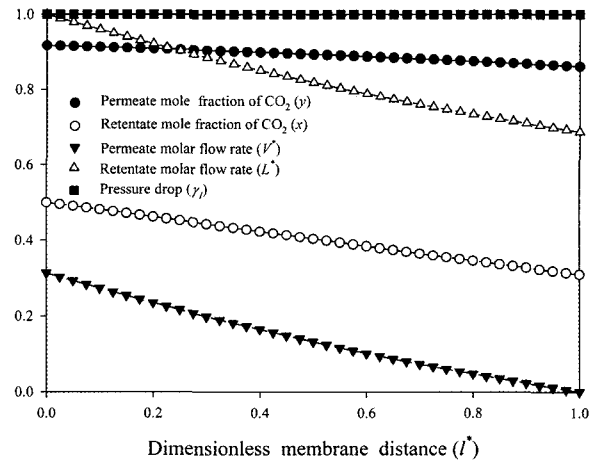
Permeance of carbon dioxide (mol/m <sup>2</sup> · sec · Pa)	2.01 × 10 <sup>-8</sup>
Selectivity	25
Hollow fiber O.D. (μm)	400
Hollow fiber I.D. (μm)	200
Number of hollow fibers (ea)	4,000
Effective thickness (μm)	0.1
Effective length (m)	0.45
Effective membrane area (m <sup>2</sup> )	2.26

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

Feed mole fraction of carbon dioxide	0.10 ~ 0.90
Permeate pressure (kPa)	10 ~ 101
Feed pressure (kPa)	400 ~ 1,500
Area of hollow fiber membrane module (m <sup>2</sup> )	2.26 ~ 22.6
Feed flow rate at STP condition (m <sup>3</sup> /sec)	100 ~ 1,500

시키는 병류 흐름의 해법은 거리가 증가함에 따라 바로 전 단계의 값으로부터 다음 값을 구할 수 있다. 그러나 향류 흐름의 경우 이렇게 구한 값이 출구 쪽의 경계 값과 일치함을 확인하여야 하며, 일치하지 않으면 다시 계산하여야 한다. 따라서 거리에 따른 전 변수의 값을 계산 초기 값으로 대입하여야 하며, 초기 값으로 병류 흐름으로 구한 값을 사용하였다. 그 다음은 거리의 함수로 구한 모든 변수 값을 초기 값으로 대입하여 다음 단계의 변수 값을 구하고 일정한 수렴 값에 도달하면 계산을 멈추게 된다. 폴리에서술폰 분리막의 기본적인 특성은 Table 1과 같다.

공정 변수의 기본적인 조건은 다음과 같다. 2.26 m<sup>2</sup>의 막 면적을 지닌 모듈에 공급압력을 607.95 kPa, 투과측과 분리막 내부의 압력비는 0.167로 유지된 상태에서 298.15 K의 혼합가스 100 cm<sup>3</sup>/sec를 분리막 모듈에 공급하며, 분리 특성에 영향을 줄 수 있는 공정 변수 변화에 따른 이산화탄소 분리 특성을 해석하였다. 공정 변수 변화는 Table 2와 같다.



**Fig. 3.** Performance of membrane module in countercurrent flow.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 분리막 길이에 따른 이산화탄소 분리거동

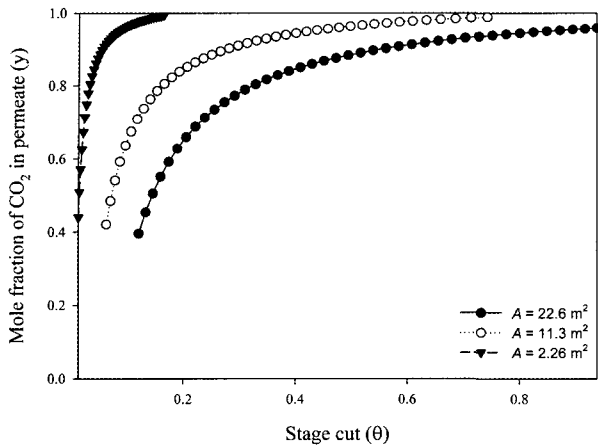
Fig. 3은 2.26 m<sup>2</sup>의 막 면적을 지닌 모듈에 공급압력 607.95 kPa, 투과측과 분리막 내부의 압력비 0.167로 유지한 상태에서 298.15 K의 이산화탄소 농도 0.50인 혼합가스 100 cm<sup>3</sup>/sec를 분리막 모듈에 공급하였을 때의 전형적인 분리막 길이에 따른 공급측 및 투과측의 이산화탄소 농도와 물 유량변화 및 분리막 내부의 압력 변화를 나타낸 그래프이다.

투과 기체가 출구로 도달할수록( $l^*$ 가 1에서 0으로 감소) 투과되는 농도는 0.8615에서 0.9170으로 점차 증가하였고, 물 유량은 0.3134로 점차 증가하였다. 이로 인하여 공급 기체가 출구로 도달할수록( $l^*$ 가 0에서 1로 증가) 배출되는 분리막 내부 농도는 0.50에서 0.3097로 물 유량은 1에서 0.6866으로 점차 감소하였다. 분리막 내부의 압력은 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

##### 4.2. 총 투과 분율에 따른 투과측 이산화탄소 농도의 영향

공급 총 기체 유량 대비 투과된 총 기체 유량 비율 총 투과 분율(stage cut,  $V^*$ )이라 하는데 이를 통해 공정 변수인 공급 기체 내 이산화탄소 농도, 공급압력, 투과측과 분리막 내부의 압력비, 분리막의 면적변화에 따른 투과측 농도에 미치는 영향을 살펴보았다.

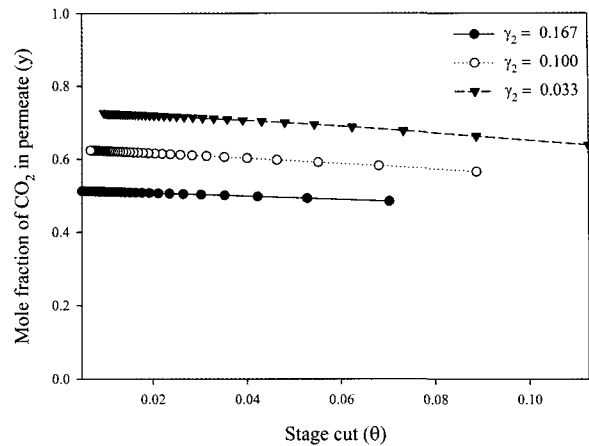
Fig. 4에 공급 기체 이산화탄소 농도와 분리막 면적 변화가 투과측 이산화탄소 농도와 총 투과 분율에 미치는 영향을 나타내었다. 공급 기체 이산화탄소 농도가



**Fig. 4.** Effect of feed mole fraction on membrane performance with different membrane areas:  $L_f = 500 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $T = 298.15 \text{ K}$ ,  $P_f = 607.95 \text{ kPa}$ ,  $\gamma_1 = 0.167$ .

0.1에서 0.9로 증가하고 분리막 면적이  $2.26 \text{ m}^2$ 인 경우 총 투과 분율은 0.0130에서 0.164로,  $11.3 \text{ m}^2$ 인 경우 총 투과 분율은 0.0629에서 0.7432로,  $22.6 \text{ m}^2$ 인 경우 총 투과 분율은 0.4439에서 0.9941로 모두 증가하는 것을 확인하였다. 이것은 공급 기체 내의 이산화탄소 농도 증가가 투과 구동력을 증가시켜 나타나는 현상으로 생각되며, 총괄 물질 수지식에 의하여 투과측 이산화탄소 농도는 감소된다. 분리막 면적  $2.26 \text{ m}^2$ 를 기준으로 투과측 이산화탄소 농도와 투과량을 비교해 보면 분리막 면적이  $11.3 \text{ m}^2$ 인 경우 투과측 이산화탄소 농도는 약 3% 감소하지만, 투과량은 약 4배 증가하며, 분리막 면적이  $22.6 \text{ m}^2$ 인 경우 투과측 이산화탄소 농도는 약 7% 감소하지만, 투과량은 약 7배 증가함을 확인하였다.

Fig. 5에 공급기체 몰 유속과 투과측과 분리막 내부의 압력비 변화가 투과측 이산화탄소 농도와 총 투과 분율에 미치는 영향을 나타내었다. 공급 기체 몰 유속이  $100 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 에서  $1,500 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 로 증가하고 투과측



**Fig. 5.** Effect of feed molar flow rate on membrane performance with different pressure ratios:  $x_f = 0.12$ ,  $T = 298.15 \text{ K}$ ,  $A = 2.26 \text{ m}^2$ ,  $P_f = 607.95 \text{ kPa}$ .

과 분리막 내부의 압력비가 0.167인 경우 총 투과 분율은 0.07024에서 0.0049로, 0.100인 경우 총 투과 분율은 0.0887에서 0.0067로, 0.033인 경우 총 투과 분율은 0.1125에서 0.0096으로 모두 감소하는 것을 확인하였다. 이것은 공급기체 몰 유속의 증가가 혼합기체 체류 시간을 감소시켜 나타나는 현상으로 생각되며, 이에 따라 투과측 이산화탄소 농도는 증가하고 총 투과 분율은 감소된다. 투과측과 분리막 내부의 압력비 0.167을 기준으로 투과측 이산화탄소 농도와 투과량을 비교해 보면 투과측과 분리막 내부의 압력비가 0.100이면 투과측 이산화탄소 농도는 약 21% 증가하고, 투과량은 약 35% 증가한다. 투과측과 분리막 내부의 압력비가 0.033이면 투과측 이산화탄소 농도는 약 40% 증가하고, 투과량은 약 89% 증가한다.

이와 같은 결과를 바탕으로 향류 흐름에서 이산화탄소 투과 특성에 영향을 주는 가장 중요한 인자는 병류 흐름에서와 마찬가지로 투과 구동력과 체류시간임을

**Table 3.** Comparisons of the Membrane Performance of Countercurrent Flow with Cocurrent Flow

	Countercurrent flow		Cocurrent flow	
	inlet	outlet	inlet	outlet
Permeate mole fraction of $\text{CO}_2$ ( $y$ )	0.8615	0.9170	0.9458	0.9150
Retentate mole fraction of $\text{CO}_2$ ( $x$ )	0.5000	0.3097	0.5000	0.3148
Permeate molar flow rate ( $V^*$ )	-	0.3134	-	0.3086
Retentate molar flow rate ( $L^*$ )	1.0000	0.6866	1.0000	0.6914
Pressure drop ( $\gamma_1$ )	1.0000	0.9996	1.0000	0.9996

확인하였고, 투과측 이산화탄소 농도와 투과량은 서로 반비례함을 확인하였다.

#### 4.3 향류 흐름과 병류 흐름의 비교

투과측과 분리막 내부의 압력차에 의해 이산화탄소 분리, 회수하는 분리막의 경우 일반적으로 향류 흐름으로 공정을 설계하여 분리하는 경우가 대부분이다.

Table 3은 2.26 m<sup>2</sup>의 막 면적을 지닌 모듈에 공급압력 607.95 kPa, 투과측과 분리막 내부의 압력비 0.167로 유지한 상태에서 298.15 K의 이산화탄소 농도 0.50인 혼합가스 100 cm<sup>3</sup>/sec를 분리막 모듈에 공급할 때 향류 흐름과 병류 흐름의 입구와 출구에서 공급측과 투과측의 이산화탄소 농도 및 몰 유량 그리고 분리막 내부의 압력강화를 나타내었다. 향류 흐름으로 자작하는 경우 병류 흐름으로 조작하는 경우보다 출구에서의 투과측 이산화탄소 농도는 0.22%, 투과량은 1.56% 증가하였고, 분리막 내부에서 배출되는 이산화탄소 농도는 1.62%, 투과량은 0.69% 감소하는 것을 확인하였다. 이는 병류 흐름의 경우 투과 구동력이 입구에서 최대이며 출구로 이동할수록 감소하지만 향류 흐름의 경우 투과 구동력이 분리막 내에서 비교적 균일하게 유지되므로 생긴 결과로 사료된다. 따라서 동일한 공정변수에서 향류흐름이 더 유리하다는 것을 확인하였다.

#### 5. 결 론

이산화탄소에 대한 분리 투과 특성이 우수한 폴리에서술폰 중공사 분리막을 사용하는 향류 흐름 공정의 이산화탄소의 분리 거동 특성을 예측하기 위한 시스템 지배 방정식을 유도하였다. 공정모사 프로그램은 Compaq Visual Fortran 6.6 소프트웨어와 유한 차분법을 이용하여 개발하였다. 개발된 프로그램을 사용하여 이산화탄소 투과거동에 공정변수가 미치는 영향을 전산모사 하였으며 그 결과 이산화탄소 분리 공정의 중요한 인자로 공급 이산화탄소 분압, 이산화탄소 투과측과 분리막 내부의 압력비 그리고 공급 기체가 분리막 내부에 머무르는 체류 시간임을 알 수 있었다. 공급되는 이산화탄소 농도가 증가하거나 압력비가 감소할수록 투과측 이산화탄소 농도와 총 투과 분율 그리고 이산화탄소 회수율은 증가하며, 체류시간이 증가하면 총 투과 분율과 회수율이 증가하는 반면 농도는 감소함을 확인하였다. 또

한 향류 흐름과 병류 흐름의 성능을 비교한 결과 향류 흐름일 경우 분리막을 투과한 이산화탄소 농도와 투과량은 약간 증가하는 것을 확인하였다. 대용량의 배기 가스를 처리 하는 경우 향류 흐름보다 유리하다는 것을 확인하였다.

#### 감 사

본 연구는 에너지·자원기술개발사업 청정에너지 연구개발비 지원(2003-C-CD02-P-04-3-020)으로 수행되었습니다.

#### 사 용 기 호

$A$	: Effective membrane area [m <sup>2</sup> ]
$K_1$	: Dimensionless constants
$K_2$	: Dimensionless constants
$l$	: Active length of hollow fiber [m]
$l_m$	: Total length of hollow fiber [m]
$l^*$	: Dimensionless length of hollow fiber
$L$	: Local feed molar flow rate [mol/sec]
$L_f$	: Initial feed molar flow rate to the permeator [mol/sec]
$L^+$	: Dimensionless local feed molar flow rate
$P_f$	: Inlet feed pressure [kPa]
$P_1$	: Pressure of feed stream [kPa]
$p_2$	: Pressure of permeate stream [kPa]
$V$	: Local permeate molar flow rate [mol/sec]
$V^+$	: Dimensionless local permeate molar flow rate
$x$	: Local mole fraction of the more CO <sub>2</sub> on the feed side
$x_f$	: Mole fraction of CO <sub>2</sub> at the feed entry
$y$	: Local mole fraction of the more CO <sub>2</sub> on the permeate side
$\alpha$	: Ideal selectivity
$\gamma_1$	: Feed pressure ratio
$\gamma_2$	: Permeate pressure ratio

## 참 고 문 헌

1. <http://www.gihoo.or.kr/challenge/global.asp#01>, November 8 (2006).
2. 김정훈, 손우익, 최승학, 이수복, “온실기체 분리용 폴리이서설폰 비대칭 중공사 막의 제조”, *Membrane J.*, **12**(2), 147 (2005)
3. H. A. Rangwala, “Absorption of carbon dioxide into aqueous solution using hollow fiber membrane contactors”, *J. Membr. Sci.*, **122**, 229 (1996).
4. 화학공학대사전 편찬위원회, “화학공학대사전”, pp. 353, 도서출판 집문사, 서울 (1996)
5. 송인호, 안효성, 이영진, 전현수, 이용택, 김정훈, 이수복, “병류흐름의 중공사 분리막에 의한 이산화탄소 분리 수치 해석”, *Membrane J.*, **16**, 204 (2006).
6. N. Boucif, A. Sengupta, and K. K. Sirkar, “Hollow fiber gas permeator with countercurrent or cocurrent flow : series solutions”, *I&EC Fundam.*, **25**, 217 (1986).
7. A. Sengupta and K. K. Sirkar, “Ternary gas mixture separation in two-membrane permeators”, *AIChE J.*, **33**, 529 (1987).
8. M. Sidhoum, A. Sengupta, K. K. Sirkar, “Asymmetric cellulose acetate hollow fibers : studies in gas permeation”, *AIChE J.*, **34**, 417 (1988).