

바이오 에탄올 생산을 위한 Membrane-Aided Distillation에 의한 물-에탄올 분리공정에 관한 연구

정 헌[†], 최용석[†], 양대륙[†], 주오심, 정광덕*

한국과학기술연구원 청정에너지기술센터
136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

[†]고려대학교 화공생명공학과
136-701 서울시 성북구 안암동

(2008년 3월 19일 접수; 2008년 6월 17일 채택)

A Study on the Water-Ethanol Separation by Membrane-Aided Distillation in Bio-Ethanol Process

Heon Jung[†], Young-Seok Choi[†], Dae Rook Yang[†], Oh-Shim Joo, Kwang-Deog Jung*

Clean Energy Research Center, Korea Institute of Science and Technology
39-1 Hawolgok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

[†]Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University
Anam-dong Seongbuk-gu, Seoul 136-701, Korea

(Received for review March 19, 2008; Revision accepted June 17, 2008)

요 약

이축연신 나이론 막을 사용한 단일투과증발막 셀을 이용하여 공급액의 온도 및 농도에 따른 투과실험식을 구하고, 투과증발막 모듈을 사용하여 이 실험식의 적합성 및 투과시 소요되는 소비에너지를 산출하였다. 투과증발막 모듈을 이용해서 투과측의 압력이 2 mmHg와 20 mmHg의 경우 공급액의 에탄올 농도 90 wt%를 99.5 wt%로 농축시키는 경우, 투과측압력이 2 mmHg일 때가 20 mmHg일 때에 비해 동일조건에서의 에탄올 농축을 위한 막의 면적이 증가하였다. 각 압력의 조건에서 나이론 막을 이용한 membrane-aided distillation의 모사를 한 막의 투과속도 및 선택성에 대한 실험식을 도출하고 이를 이용하여 10 wt%의 에탄올 수용액을 99.5 wt%로 농축하는 membrane-aided distillation공정의 소비에너지를 구하였다. 그 결과 막의 투과량이 과다한 경우 다시 증류탑에서 재 농축을 해야하므로 막에 의한 에너지소비 절감효과가 상쇄될 수 있음을 보여주었다. 따라서 이 공정에 의해 에탄올을 농축하는 경우 효과적으로 에너지를 절약하기 위해서는 막의 선택성이 매우 중요하다는 것을 보여주었다.

주제어 : 투과증발막, 막분리, 에탄올-물 분리기술, 투과막증류

Abstract : Nylon membrane was used to separate ethanol-water by a pervaporation method. Experimental equations were derived to use the simulation of membrane-aided distillation using nylon. The increases in permeation pressure resulted in the decrease in selectivity and energy consumption. The energy cost to enrich ethanol from 94 wt% to 99.5 wt% was calculated to be 53.3 won/kg of ethanol with extractive distillation and 18.9 won/kg of ethanol with a pervaporation method. The saving energy by the pervaporation method is consumed by recycling the permeate residue into the distillation column in the membrane-aided distillation column. Therefore, membrane with the high selectivity to minimize the permeate residue recycle is required to effectively enrich ethanol in the membrane-aided distillation method.

Keyword : Membrane, Pervaporation, Water-ethanol separation, Membrane-aided distillation

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jkdc@kist.re.kr

1. 서 론

최근 바이오에탄올에 대한 기술개발이 국내외적으로 활발하게 수행되고 있다. 주요 관심사는 역시 셀룰로오즈계의 원료를 활용하는 것이지만 동시에 발효 후 생성되는 저 농도의 에탄올을 연료로 활용하기 위해 물이 함유하지 않는 에탄올로 농축하는 기술 또한 매우 중요하게 인식되고 있다. 10 wt% 전후의 에탄올 수용액을 99.5 wt% 이상의 에탄올로 농축하는 기술의 개발은 화석연료의 가격이 급등하는 시점에 항상 중요한 과제로 인식되어 왔고, 유가가 배럴당 100 달러에 달하는 지금, 바이오 에탄올은 매우 중요한 연료라고 할 수 있다[1-3].

물-에탄올은 약 95 wt%의 에탄올 농도에서 공비점을 형성하므로 단순한 증류법으로는 농축하기 어렵고, 공비증류를 한다고 해도 실제로 안정적인 운전이 어렵고, 에너지소비가 크므로 2015년 목표로 하는 에탄올 생산단가인 \$0.59~0.91/gallon을 달성하는데 큰 장애요소가 된다. 현재 상업적으로 공정의 안정적인 운전을 고려하여 제오라이트등의 흡습제를 이용하여 물을 흡습하고 재생하는 방법에 의해 무수 에탄올을 제조하고 있으나, 이것은 생산용량이 크지 않고 현재의 에탄올 생산단가인 \$2.5~5.0/gallon인 경우에만 가능한 공정이므로 대량의 에탄올 생산시 설계 및 운전 측면에서 매우 불리할 것으로 예상된다.

에너지를 절약하여 분리하는 공정으로는 역시 막분리기술 특히, 물-에탄올의 분리의 경우 투과증발막 기술이 매우 전망이 밝다고 할 수 있다[4]. 특히 투과증발막 분리기술은 많이 진보되어 물-에탄올 시스템에도 적용할 수 있는 막이 이미 개발이 되어 있고 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 활발히 수행되고 있다[5-9]. 다만 투과증발막에 의한 분리만으로 물-에탄올을 분리하는 경우에는 투과량을 다시 처리해야 하므로 고순도의 에탄올 생산에는 적합하지 않으므로 기존의 증류공정과 복합시스템을 구성하는 것이 보다 적절하다. 이러한 membrane-aided distillation 공정 구성에서 실제로 투과증발막에 대한 엔지니어링 자료를 구하고 에너지소비비용을 추산하는 방법론을 확립하는 것은 향후 이 막의 개발에 매우 중요하다[10].

본 연구에서는 나이론 막을 사용하여 평판형 투과증발막모듈을 제작하고 이에 대한 투과속도에 대한 실험식을 구하여 membrane-aided distillation에 의해 10 wt%의 에탄올 수용액으로부터 99.5 wt%의 에탄올을 농축하는 공정을 구성하여 소비되는 에너지비용을 추산하였다.

2. 실험방법

2.1. 단일셀을 이용한 투과증발막 시험

투과증발막으로는 SK(주)에서 생산하는 이축연신 나일론 필름을 사용하였다. 건조된 막을 사용할 경우 투과과정에서 팽윤에 의해 막이 훼손되지 않도록 하루 정도 증류수에 담그고 난 후 사용하였다.

실험에 사용한 단일셀의 실험장치의 개략도는 Figure 1 및 Figure 2에 나타내었다. Figure 1에 있는 셀의 직경은 15 cm로 막의 한쪽 면의 유효면적은 79 cm²이고 재질은 stainless steel이

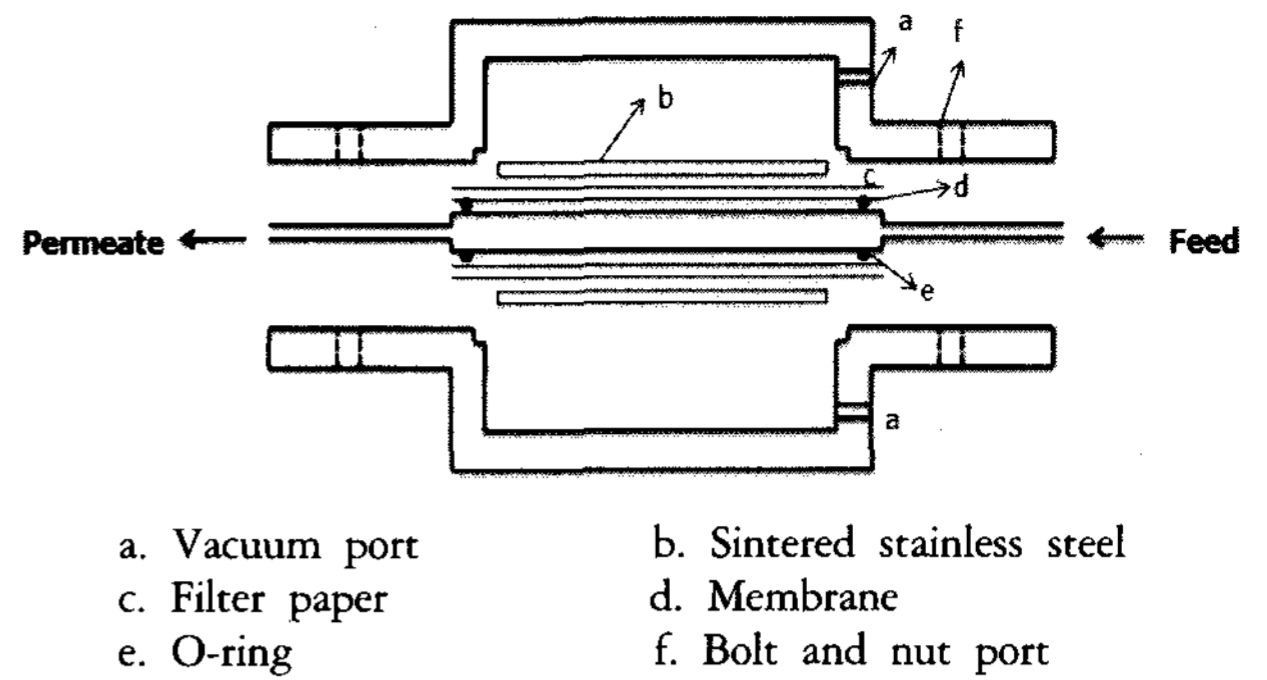


Figure 1. Schematic diagram of pervaporation unit cell.

다. Figure 2에 나타나 있듯이 3 L의 플라스크에 물-에탄올 용액을 넣고 펌프로 투과증발막 셀에 용액을 공급하였고 투과 측의 압력은 진공펌프 및 진공조절밸브를 사용하여 제어하였다. 투과셀의 온도는 water bath에 의해 제어하였고, 투과액은 액체질소로 냉각된 콜드트랩 g 에서 모두 포집하였다. 매시간 번갈아 가면서 콜드트랩 g 의 무게를 측정하여 투과량을 측정하였으며, 포집된 액의 농도는 가스 크로마토그래피로 측정하였다. 분석을 위한 GC 컬럼으로 Porapak Q를 사용하였다.

2.2. 투과증발막의 모듈실험

단일셀을 이용해 도출한 실험식의 적용성을 확인하기 위하여 처리용량을 크게 하여 실험을 수행하여 설계식의 적용가능성을 검토하였다. 한 개의 모듈당 378 cm²인 셀을 4개 제작하여 막의 면적이 총 1,512 cm²가 되도록 하였다. 각각의 모듈은 병렬로 연결하였고, 공급액은 모듈 하부에서 공급되어 모듈 상부에서 잔여액을 모으도록 구성함으로써 공급액이 각 모듈에 잘 분산 공급되도록 하였다. 잔여액은 가스 크로마토그래피로 농도분석을 하였다.

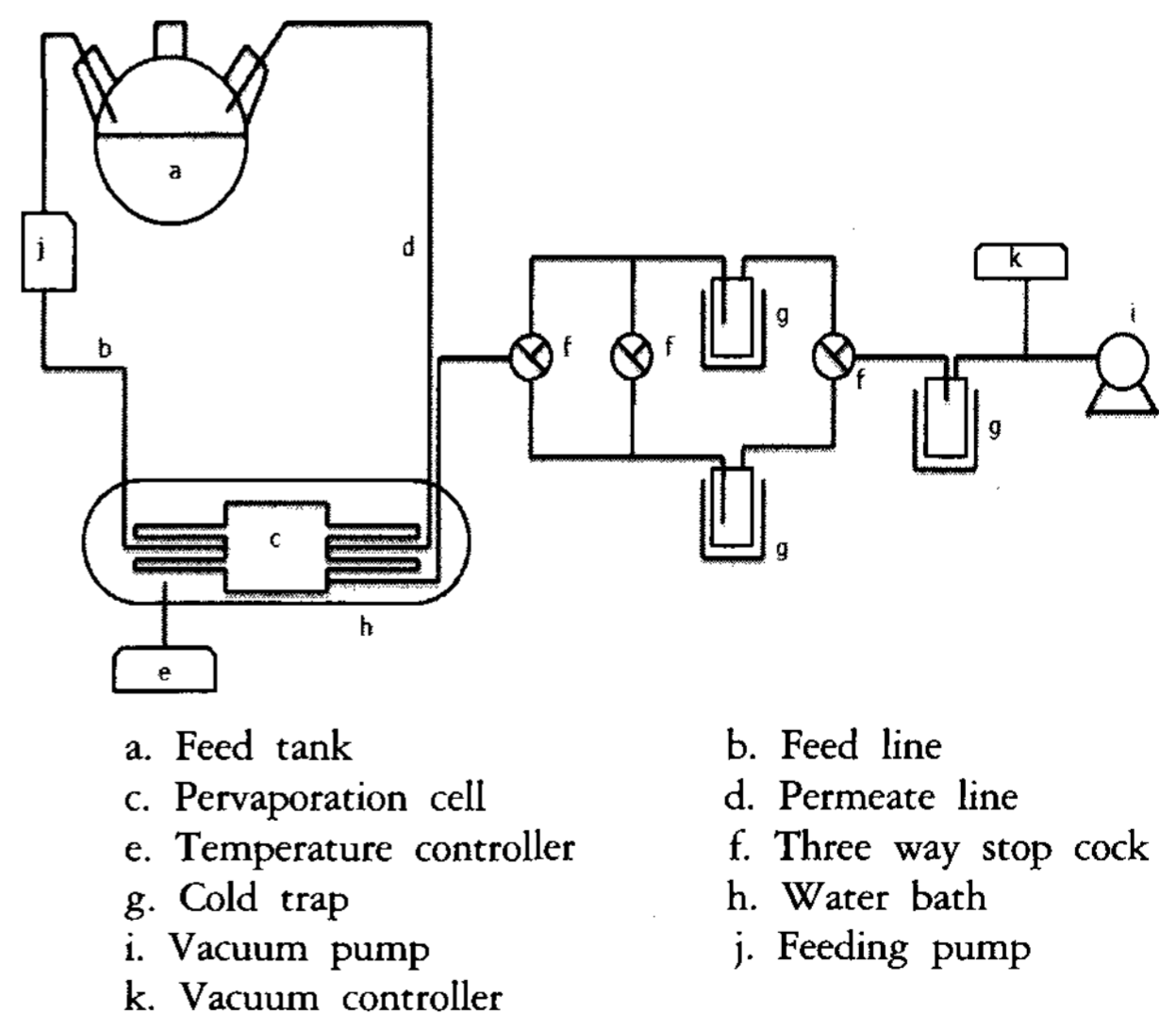


Figure 2. Schematic diagram of experimental apparatus for pervaporation.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 나이론 막에서의 물-에탄올 투과특성

Figure 3에 순수한 물 및 에탄올 각각의 투과측 압력에 따른 투과속도를 나타내었다. 투과측의 압력이 10^{-3} mmHg인 진공상태에서 순수한 물의 투과속도는 4.6×10^{-7} kg · m/m² · h (Figure 3(b))이었고, 순수한 에탄올의 투과속도는 1.1×10^{-7} kg · m/m² · h (Figure 3(a))로 나타났다. 순수한 물 또는 에탄올의 투과 현상은 Figure 3에 나타난 바와 같이 투과속도가 투과측의 압력이 증가함에 따라 투과속도는 선형으로 감소하지 않음을 보여주고 있다. 이는 확산계수가 막내부의 농도의 변화에 따라 다르기 때문이다. 이러한 현상을 설명하기 위해서 최근까지 확산계수와 막에서의 농도의 함수를 나타내기 위한 많은 모델들이 제시되어 왔으나, 아직 물-에탄올의 시스템에 적용할 만한 모델식이 개발되지 않고 있다. Figure 4에 투과측의 압력이 2, 5, 10, 20, 30, 40 mmHg로 변화했을 때 투과되는 물 및 에탄올의 투과속도를 각각 나타내었다. 투과 측의 압력이 증가할수록

물의 투과속도는 Figure 3(a)와 유사하게 감소하지만 에탄올의 투과속도는 투과 측의 압력과 상관없이 일정하게 투과되는 것을 보여주고 있다. 선택도는 에탄올 투과속도에 대한 물의 투과속도로 표현할 수 있다. 따라서 Figure 4는 투과 측의 압력을 증가시킬수록 막의 선택성이 감소한다는 것을 의미한다. 앞에서 언급한 바와 같이 공정을 설계하기 위해 많은 모델식이 제안되었으나 - 실제로 비극성용매에 대해서는 잘 활용되었다 - 물-에탄올 시스템에 대해서는 적합한 모델식이 제안되지 못한 상태이다[11-15]. 따라서 실제로 membrane-aided distillation에 대한 실증실험을 수행하고 이를 적용하기 위해서 설계를 위한 실험식을 도출하여 적용하기로 하였다.

3.2. 투과증발막 모듈에서의 물-에탄올 분리

일반적으로 투과증발막의 설계는 이론적인 투과속도식에 의해 수행된다. 그러나 아직까지 물-에탄올 시스템에 적합한 모델식이 도출되지 못하였으므로 실험식에 기초한 Neel의 설계방법[16]이 비교적 적합하다고 할 수 있다.

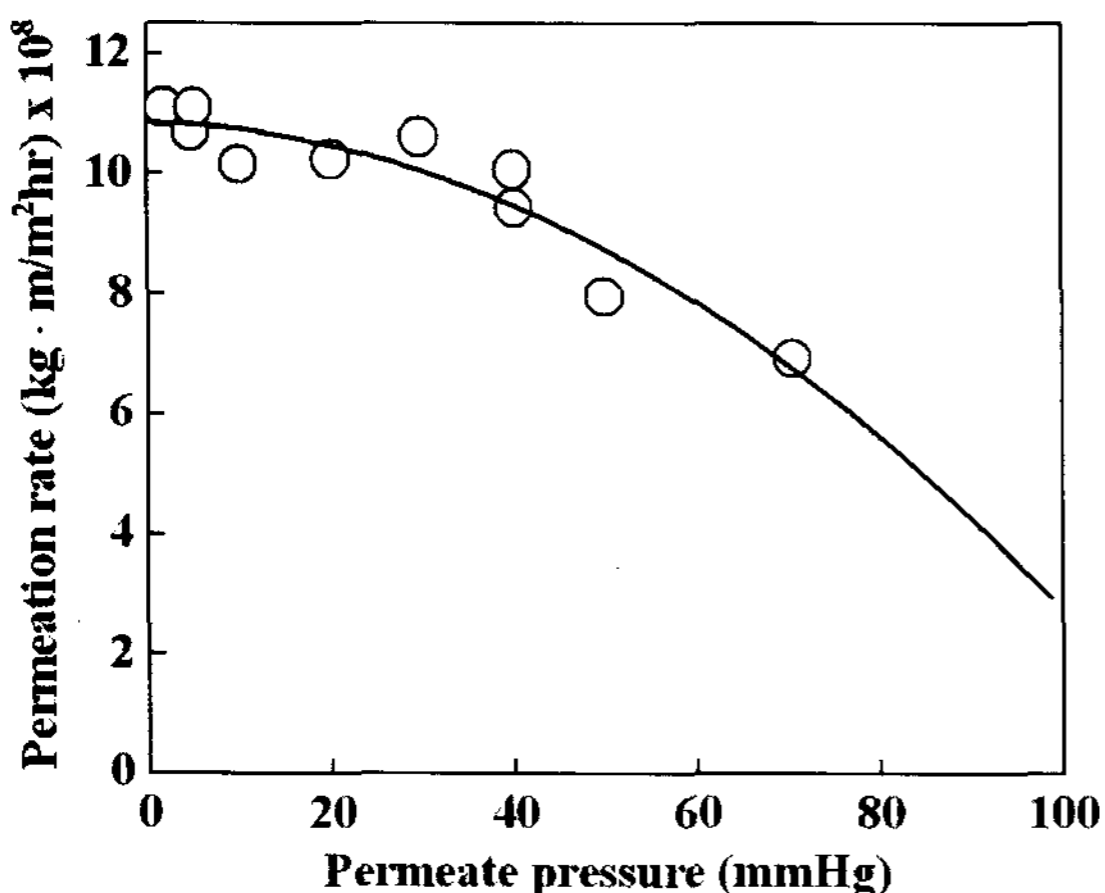
$$\beta = \frac{\text{Concentration of Permeation Sol. } (C_L)}{\text{Concentration of Supply Sol. } (C_o)} \quad (1)$$

여기서 정의되는 농도 C (wt%)는 물을 기준으로 하였다. 공급액의 속도를 F (kg/h) 라고 하고, 막의 면적을 A (m²), 투과속도를 J (kg/m² · h)라고 하면 아래와 같은 물질수지식을 세울 수 있다.

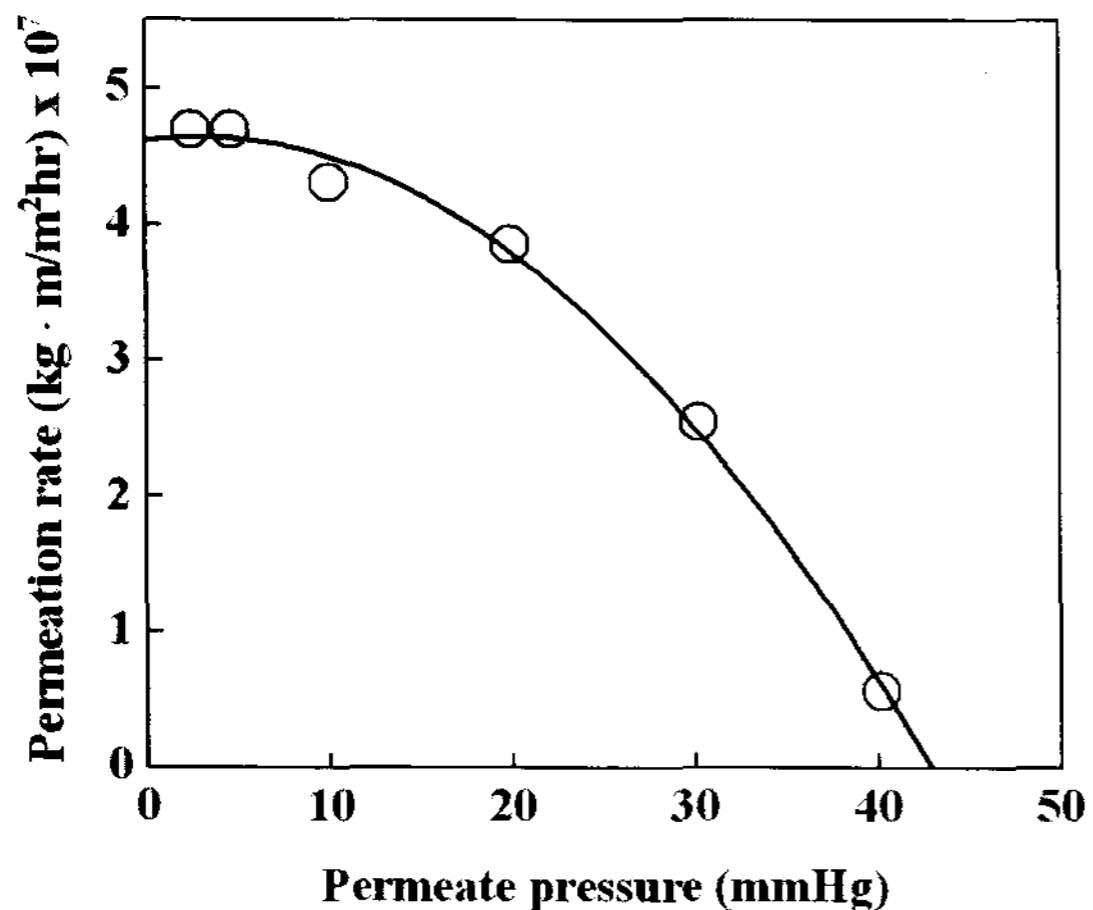
$$-dF = J(C, T) dA \quad (2)$$

이때 물만의 물질수지식을 세우면,

$$-d(F \cdot C) = C \cdot \beta(C) \cdot J(C, T) dA \quad (3)$$



(a)



(b)

Figure 3. Permeation rate with respect to permeation pressure at 35°C : (a) water only and (b) ethanol only.

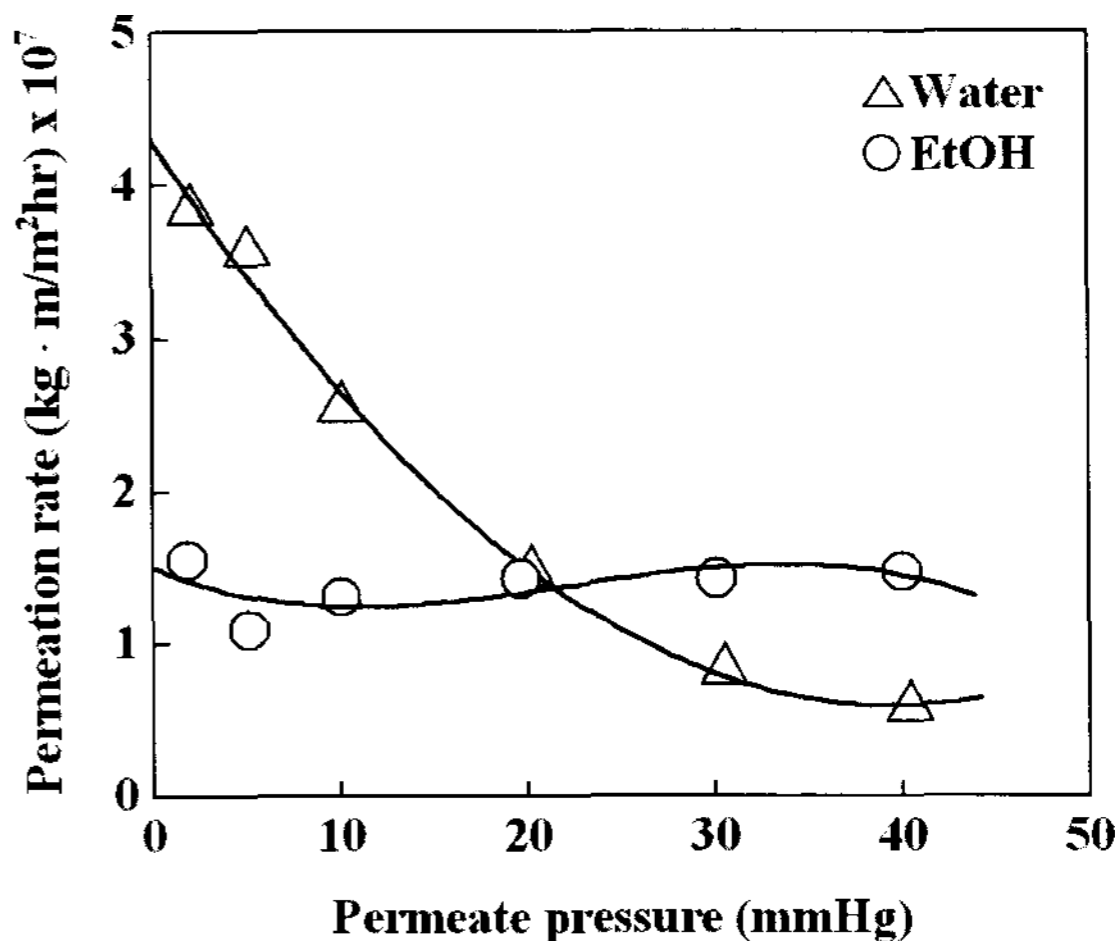


Figure 4. Effect of permeation pressure on the permeation rate with 90 wt% ethanol feed composition.

Table 1. Equations of permeation rate and β of nylon membrane

$E_a = 11.44 \text{ kcal/mol} \cdot \text{K}$
$P_L = 2 \text{ mmHg}$
$J = (1.04 + 51.86 C - 85.73 C^2 + 40.56 C^3) / 150$
$\beta = 9.21 - 26.43 C + 21.98 C^2$
$P_L = 20 \text{ mmHg}$
$J = (0.66 + 27.86 C - 25.79 C^2) / 150$
$\beta = 6.62 - 17.74 C + 14.68 C^2$

C : water concentration (wt%)
 J : $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$

(2)와 (3)식을 결합하면

$$-FdC = [\beta(C) - 1] C \cdot J(C, T) dA \quad (4)$$

이 된다. 이식으로부터 물 및 에탄올 각각의 투과량을 계산하기 위해서는 $J(C, T)$ 및 $\beta(C)$ 의 농도의 함수를 구해야 한다. 이를 위해서 소형 투과증발장치를 사용하여 온도 35°C 및 투과 측 압력 2 및 20 mmHg에서 공급액의 농도 C를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 여기서 얻은 결과를 내삽하여 β 및 J에 대한 공급액 농도의 함수를 구하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

한 개의 투과증발막 면적이 약 378 cm^2 인 모듈을 네 개를 연결하여 총 막의 면적이 약 1,512 cm^2 인 장치를 제작하여 온도를 35°C로 유지시킨 항온조에 넣고 일정한 온도를 유지하였다. 공급액의 물의 농도가 약 20 wt%인 경우와 10 wt% 인 경우에 각각 유량을 16.6 g/h 및 23.7 g/h로 공급을 하고 투과측 압력이 2 mmHg인 경우 생성액 및 투과측의 유량 및 농도를 Table 2에 나타내었고, 또한 Table 1의 J 및 β 를 이용하여 식 (4)로부터 계산된 결과와 비교하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 실험에 의한 결과와 식 (4)에 의한 계산결과가 매우 잘 일치하는 것을 보여주고 있다.

3.3. 공비증류법과 투과증발막의 소비에너지 비교

공비증류법과 투과증발막의 에너지소비를 비교할 경우 발효에서 나오는 에탄올을 공비점까지 (에탄올 약 94.0 wt%) 농축하는 과정은 동일하다고 가정하였고 그 이후 벤젠을 사용하는 공비증류와 투과증발막에 의해 99.5 wt%까지 농축하는 경우의 에너지 소비량을 비교하였다. SRI report에서의 공비증류에 대한 설계결과를 요약하여 보면 Feed 조건으로 에탄올 18,990 kg/hr, 물 1,194 kg/hr 이고 distillation 탑의 탑하부에서 얻어지는 성분은 에탄올 17,701 kg/hr, 물 86 kg/hr 이다. 이때 리보일러의 열량은 12.97 MKcal/hr 이고 컨덴서에서의 열량은 -8.45 MKcal/hr 이다. 두 번째 distillation 탑 하부의 성분은 에탄올 1,883 kg/hr, 물 1,522 kg/hr 이며 이때 리보일러의 열량은 0.4 MKcal/hr 이다[18].

막을 통해 에탄올 용액이 투과될 때 잠열이 손실되므로 이에

Table 2. Comparison of experimental and calculated values in pervaporation modules

Method	Feed rate (g/hr)	Feed conc (wt.%)	Prod. rate (g/hr)	Prod. conc (wt.%)	Perm. rate (g/hr)	Perm. Conc (wt.%)
Exp.	16.60	80	9.27	98.5	7.33	50.5
Calc			9.90	99.7	6.70	50.9
Exp.	23.68	90	17.99	98.3	5.69	60.4
Calc			17.67	99.4	5.99	63.2

Concentration: Ethanol concentration (wt%)
 Permeate pressure : 2 mmHg
 Membrane area : 0.15 m^2

대한 열수지식을 다음과 같이 세울 수 있다.

$$dh = J(C, T) \cdot L(C_L) dA = F \cdot k(C) dT \quad (5)$$

여기서 L (kcal)은 잠열을 k (kcal/kg · °C)는 열용량을 나타낸다. 여기서는 이들 값의 농도의 영향을 아래와 같이 산술평균값으로 계산하였다.

$$L(C_L) = C_L \cdot L_w + (1 - C_L) \cdot L_e \quad (6)$$

$$k(C) = C \cdot k_w + (1 - C) \cdot k_e \quad (7)$$

여기서 아래첨자 e는 에탄올을 w는 물을 나타낸다.

따라서 식 (5)를 정리하면 투과증발과정에서의 온도의 변화는 아래와 같이 정리된다.

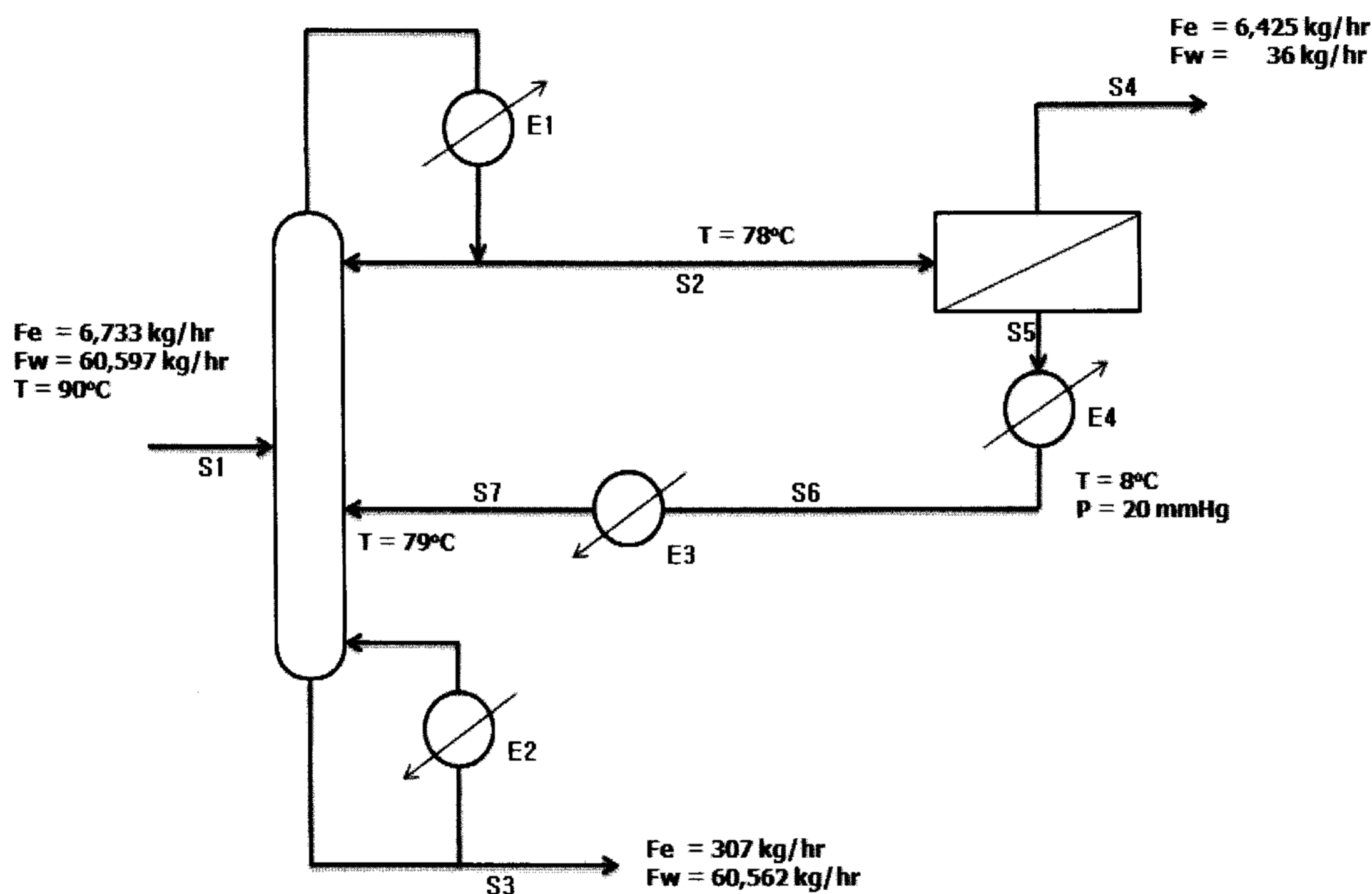
$$dT = \frac{J(C, T) \cdot L(C) dA}{F \cdot k(C)} \quad (8)$$

따라서 Table 1의 실험식과 식 (2), (3), (8) 식으로부터 모듈에서의 투과속도, 농도, 온도변화를 구할 수 있게 된다.

투과증발막은 공급액의 온도가 65°C와 35°C인 경우로 나누고, 각각에 대하여 투과 측 압력이 2 mmHg 와 20 mmHg 인 경우로 나누어 모두 네 가지 경우에 대해 실험하였다. 첫 막 모듈에 공급되는 에탄올용액의 온도가 막을 투과 시 30°C 로 감소하면 다시 초기의 공급온도로 승온시켜 두 번째 모듈로 공급하였다. Table 1의 실험식 및 식 (2), (3), (8)들을 사용하여 계산하여 에탄올 용액의 생성물의 농도가 99.5 wt%가 될 때까지 필요한 잠열 및 현열에 의한 소비에너지 및 막 면적을 계산하였다. Table 3에 따르면 공급액의 온도 또는 막의 투과온도를 높게 유지할수록 필요한 막의 면적이 매우 감소하며 투과측의 압력이 감소할수록 필요한 막의 면적이 감소하는 것을 보여주고 있다. 열량의 측면에서 보면 투과측 압력이 감소할수록 필요한 소비열량이 감소함을 보여주고 있다. 투과증발공정에 투입되는 에너지에는 잠열 및 현열에 의한 소비에너지 외에 냉동기 사용에 의한 소비에너지 및 진공펌프 사용에 의한 소비에너지가 있

Table 3. Calculation results of pervaporation module to enrich ethanol from 94 to 99.5 wt%
(Feed flow basis : 100 kg/hr)

Perm. Pressure (mmHg)	Feed Temp. (°C)	Energy (kcal/kg)	Prod. rate (kg/hr)	Productivity (kg/m ² hr)	Treat capacity (kg/m ² hr)	Ave. flux (kg/m ² hr)	Recovery (%)	Area (m ²)
2	65	27.6	74.11	0.083	0.112	0.029	77.6	894.2
	35	63.15	74.12	0.032	0.043	0.011	77.6	2352.7
20	65	28.08	64.62	0.034	0.052	0.019	67.7	1909.6
	35	86.48	64.62	0.014	0.022	0.008	67.7	4569.4



<Stream Description>

Stream Name	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Phase	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid
Temperature (°C)	90	78.122	99.443	78.121	78.121	8	78
Pressure (mmHg)	760	760	760	760	760	780	780
Flow Rate (kg · mol/hr)	3509.818	238.137	3368.313	141.338	96.799	96.799	96.632
Total Mass Rate (kg/hr)	67330.4	10000.1	60869.5	6461.0	3539.1	3539.1	3539.1
Composition (mole fraction)							
ETHANOL	0.042	0.855	0.002	0.987	0.661	0.661	0.663
WATER	0.958	0.145	0.998	0.013	0.339	0.339	0.337
Composition (weight fraction)							
ETHANOL	0.1	0.9377	0.0051	0.9950	0.8330	0.8330	0.8344
WATER	0.9	0.0623	0.9949	0.0050	0.1670	0.1670	0.1656

Heating/Cooling Unit	E1	E2	E3	E4
Heat Load (×10 ⁶ · kcal/hr)	-13.3488	13.8700	0.1703	-0.1708

Figure 5. Flow conditions of membrane-aided distillation equipment to enrich ethanol from 10 to 99.5 wt%.

Table 4. Comparison of consumption energy between extractive distillation and pervaporation process

Energy and Its Cost	Extractive distillation		PV1 process ^{*1)}		PV2 process ^{*2)}	
	Quantity /kg EtOH	Cost /kg EtOH	Quantity /kg EtOH	Cost /kg EtOH	Quantity /kg EtOH	Cost /kg EtOH
Steam (30 won/kg)	1.6 kg (steam)	48.0 won	0.055 kg (steam)	1.7 won	0.056 kg (steam)	1.7 won
Cooling water (50 won/MT)	105.8 kg (c.w.)	5.3 won	-	-	-	-
Refrigerator (61 won/kwh)	-	-	0.43 kwh	26.2 won	0.23 kwh	14.0 won
Vacuum pump (61 won/kwh)	-	-	0.053 kwh	3.2 won	0.053 kwh	3.2 won
Total		53.3 won		31.1 won		18.9 won

1) Nylon, permeate pressure = 2 mmHg, Feed Temp. = 65°C

2) Nylon, permeate pressure = 20 mmHg, Feed Temp. = 65°C

* Steam: 500 kcal/kg

다. 이 소비에너지는 Jung[17]에 의한 계산방법에 따라 계산하였다(Table 4). 이 표에서 보면 어느 공정의 소비에너지가 저고 많음은 전기료와 steam의 가격에 달려 있다는 것을 알 수 있다. 투과막공정의 경우 투과측 압력이 낮을수록 에너지소비가 작지만, 그 만큼 넓은 막 면적을 필요로 하므로 투자비와 운전비와의 관계를 고려해서 결정해야 할 것으로 판단된다.

예로서 10 wt%의 에탄올 수용액을 99.5 wt%의 에탄올로 농축하기 위해 나이론막을 사용한 membrane-aided distillation 공정, 물질수지 및 소비열량을 Figure 5에 나타내었다. 이 공정 모사에서 증류탑의 이론단수는 고유가 시대의 추세에 따른 단수에 여유분을 주는 경향에 따라 30단으로 하여 10 wt%의 에탄올 rich 수용액은 탑저로부터 18단째에서, 투과증발막에 의해 투과된 액은 12단째에서 공급하도록 하였다. 또한 본 연구는 소비되는 에너지를 추산하는 것을 그 목적으로 하였기 때문에 탑의 단수에 관계없이 환류비를 통상적인 값인 1.5 전후에서 수렴되는 조건으로 공정모사를 수행하였다. 증류공정의 계산은 Pro-II를 사용하였고 상평형식은 NRTL을 사용하였다. 이들로부터 구한 membrane-aided distillation 공정에서 에탄올 1 kg 을 생산하기 위한 에너지비용은 190 won/kg of ethanol로 추산되었다. 이 경우 막의 선택성이 높지 않아 투과된 용액을 다시 농축하기 위해 증류탑에 도입되므로 총 환류비가 증가하여 비교적 높은 에너지 비용이 추산되었다. 즉, 94 wt%에서 99.5 wt%로 농축하기 위한 에너지비용은 절감되었으나 증류탑의 환류비가 증가하게 되어 증류탑의 리보일러의 에너지소비량이 증가하여 오히려 에너지소비비용이 기존의 공비증류에 비해 증가하였다. 기존 공비증류에 의한 에너지 소비비용은 약 124 won/kg of ethanol로 추산된다[18]. 따라서 막분리에 의해 에너지를 절약하기 위해서는 환류량을 최소화하기 위해 높은 선택성을 갖는 막의 개발이 매우 중요하다는 것을 알 수가 있다.

4. 결 론

바이오매스로부터 에탄올을 생산하는 공정 중 발효공정에 의해 생산되는 저농도의 에탄올을 분리하기 위한 membrane-

aided distillation 공정의 소비에너지를 평가하기 위해 이축연신한 나이론 막을 사용하여 투과증발법에 의해 투과속도에 대한 실험식을 구하고, 이로부터 한 개의 투과증발막 면적이 약 378 cm² 인 모듈을 네 개를 연결하여 막의 면적이 총 1,512 cm² 인 장치를 제작하여 투과증발막에서의 소비에너지를 추산하였다. 이러한 실험자료를 기반으로 나이론 막을 이용한 membrane-aided distillation를 모사하여 구한 에탄올 생산 시 분리공정에 필요한 운전비는 190 won/kg of ethanol로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 한국과학기술연구원의 연구비로 지원된 기관고유 과제로 수행되었습니다.

참고문헌

- Quintero, J. A., Montoya, M. I., Sánchez, O. J., Giraldo, O. H., and Cardona, C. A., "Fuel Ethanol Production from Sugarcane and Corn: Comparative Analysis for a Colombian Case," *Energy*, **33**(3), 385-399 (2008).
- Chang, M. C. "Harnessing Energy from Plant Biomass," *Curr. Opin. Chem. Biol.*, **11**(6), 677-684 (2007).
- Lavigne, A., and Powers, S. E., "Evaluating Fuel Ethanol Feedstocks from Energy Policy Perspectives: A Comparative Energy Assessment of Corn and Corn Stover," *Energ. Policy*, **35**(11), 5918-5930 (2007).
- Namboodiri, V. V., and Vane, L. M., "High Permeability Membranes for the Dehydration of Low Water Content Ethanol by Pervaporation," *J. Membr. Sci.*, **306**(1-2), 209-215 (2007).
- Verhoef, A, Figoli, A., Leen, B., Bettens, B., Drioli, E., and Bruggen, B., "Performance of a Nanofiltration Membrane for Removal of Ethanol from Aqueous Solutions by Pervaporation," *Sep. Purif. Tech.*, **60**(1), 54-63 (2008).

6. Sato, K., Sugimoto, K., and Nakane, T., "Synthesis of Industrial Scale NaY Zeolite Membranes and Ethanol Permeating Performance in Pervaporation and Vapor Permeation up to 130°C and 570 kPa," *J. Membr. Sci.*, **310**(1-2), 161-173 (2008).
7. Vane, L. M., Namboodiri, V. V., and Bowen, T. C., "Hydrophobic Zeolite-Silicone Rubber Mixed Matrix Membranes for Ethanol-Water Separation: Effect of Zeolite and Silicone Component Selection on Pervaporation Performance", *J. Membr. Sci.*, **308**(1-2), 230-241 (2008).
8. Sun, H., Lu, L., Chen, X., and Jiang, X., "Pervaporation Dehydration of Aqueous Ethanol Solution Using H-ZSM-5 Filled Chitosan Membranes," *Sep. Purif. Tech.*, **58**(3), 429-436 (2008).
9. Jiang, L. Y., Chung, T., and Rajagopalan, R., "Dehydration of Alcohols by Pervaporation Through Polyimide Matrimid[®] Asymmetric Hollow Fibers with Various Modifications," *Chem. Eng. Sci.*, **63**(1), 204-216 (2008).
10. Gomez, M.T., Klein, A., Repke, J., and Wozny, G., "A New Energy-Integrated Pervaporation Distillation Approach," *Desalination*, **224**, 28-33 (2008).
11. Tajalasia M.M., Barakat and Sørensen, E., "Simultaneous Optimal Synthesis, Design and Operation of Batch and Continuous Hybrid Separation Processes," *Chem. Eng. Res. Des.*, **86**(3), 279-298 (2008).
12. Ghoreyshi, A. A., Jahanshahi, M., and Peyvandi, K., "Modeling of Volatile Organic Compounds Removal from Water by Pervaporation Process," *Desalination*, **222**(1-3), 410-418 (2008).
13. Kujawski, W., Staniszewski, M., and Nguyen, T. Q., "Transport Parameters of Alcohol Vapors Through Ion-Exchange Membranes," *Sep. Purif. Tech.*, **57**(3), 476-482 (2007).
14. Gómez, P., Aldaco, R., Ibáñez, R., and Ortiz, I., "Modeling of Pervaporation Processes Controlled by Concentration Polarization," *Comput. Chem. Eng.*, **31**(10), 1326-1335 (2007).
15. Schaetzel, P., Vauclair, C., Nguyen, Q. T., and Bouzerar, R., "A Simplified Solution-Diffusion Theory in Pervaporation: The Total Solvent Volume Fraction Model," *Membr. Sci.*, **244**(1-2), 117-127 (2004).
16. Neel, J., "Fundamentals and General Chemical Engineering Aspects of Chemical Engineering," Proceedings of 1st International Conference on Pervaporation Process, Atlanta, Feb., 10-40 (1986).
17. Jung, K. S., "Status and Problems of Pervaporation Method," 1st ed., Chemical Engineering of Japan, 1988, pp. 23-33.
18. SRI international, "Ethanol for Gasohol", SRI report No. 149 (1982).