

투과증발 시스템 모사기 개발

장 재 화 · 유 제 강 · 안 승 호 · 이 규 현 · 류 경 옥*

선경건설(주) 연구소, *한양대학교 공과대학 화학공학과
(1997년 2월 5일 접수, 1997년 3월 27일 채택)

Development of Pervaporation System Simulator

Jae-Hwa Chang, Je-Kang Yoo, Seung-Ho Ahn, Kyu-Hyun Lee, and Kyong-Ok Yoo*

R&D Center, Sunkyoung Engineering & Construction Ltd., 192-18, Kwanhun-dong, Chongro-gu, Seoul, Korea

*Dept. of Chemical Engineering, College of Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received February 5, 1997, Accepted March 27, 1997)

요 약 : 유기물 탈수 공정에 적용되는 투과증발 시스템을 설계하기 위한 투과증발 시스템 모사기가 개발되었다. 모사기는 시스템 모델링 및 수치 해석 알고리즘과 관련된 Simulation engine과 모사기를 Windows 환경에서 쉽게 사용할 수 있도록 한 Graphical User Interface(GUI)로 구성되었다. 모사기 구조 및 사용 방법 등을 실규모 에탄올 탈수 공정 모사를 통하여 구체적으로 설명하였으며, 모사 결과를 실제 에탄올 탈수 Pilot test에 의한 실험 결과와 비교함으로써 모사기 성능이 우수함을 입증하였다.

Abstract: A simulator has been developed in order to simulate and to be used to design the pervaporation system for separating organic/water mixtures. This simulator is composed of simulation engine, which includes a modeling of pervaporation system and the numerical analysis, and Graphical User Interface(GUI), which enables us to operate the simulator more easily in the Windows environment. The structure and operation of simulator were clearly presented by demonstrating the full-scale ethanol dehydration process. The performance of simulator turned out to be fairly good through comparing the simulation results with the experimental data of ethanol dehydration pilot tests.

1. 서 론

투과증발 시스템은 막 분리 기술의 일종으로 이성분 이상의 액체 혼합물 중의 한 성분에 대해 친화적인 비다공성 막을 사용하여 그 성분을 선택적으로 투과시켜 혼합물을 분리하는 기술이다. 투과증발 시스템에서는 Feed가 비교적 높은 온도에서 액상 형태로 막의 Feed side에 공급되고 막을 투과한 물질(Permeate)은 Permeate side에서 진공 하에서 기화된 후 냉각기로부터 공급되는 Cold brine에 의하여 응축

되는데, 이는 투과증발막 투과 구동력이 각 성분의 증기압 차이이기 때문에 이를 크게 유지하기 위함이다. 투과증발 시스템의 적용 분야는 유기물 탈수, 폐수에서의 휘발성 유기성분 제거 및 유기혼합물 분리 등으로 현재 투과증발 시스템이 상업적으로 적용되고 있는 공정은 유기물 탈수 공정이다. 이 공정에서는 물에 대한 용해도 및 투과 속도가 우수한 친수성 막을 이용하여 유기물과 물의 혼합물로부터 물을 제거하여 유기물을 농축하며, 대표적인 유기물은 에탄올, Isopropyl alcohol (IPA), 아세톤, Methyl Isobutyl

Ketone (MIBK), Ethyl acetate, Tetra Hydrofuran (THF) 등의 중성 유기물이다. 현재 유기물 탈수에 사용되는 상용화된 투과증발막은 독일의 Deutsche Carbone GFT사가 개발한 PVA/PAN 복합막이며 모듈은 판틀형(Plate & Frame type)이 사용되고 있다[1]. 투과증발 시스템은 기존의 공비증류와 같은 분리 기술과 비교하여 에너지 사용량이 적고 환경친화적이며, Skid-mount 형태로 공급되어 공간 활용률이 높고 Scale-up이 용이한 장점을 갖는다[2].

투과증발 시스템은 막/모듈 부분과 함께 투과 구동력을 제공하는 가열기(Heater), 냉각기, 진공 펌프 등의 주변 장치로 구성된다. 따라서 시스템을 Scale-up하는 경우 최적 시스템 설계를 통하여 투자비 및 운전비를 최소화하는 경제적인 최적 운전 조건을 구해야 하며, 시스템 설계를 최적화하기 위해서는 시스템 성능을 정확히 예측, 모사할 수 있는 시스템 모사가 필요하다. 현재 외국에서 개발된 투과증발 시스템 모사기로는 독일의 Aachen 공대에서 개발한 PVDESIGN 등이 있으나 실제 투과증발 시스템 설계에 이용되고 있지 않고 단지 공정의 기술적 타당성 및 경제성 등을 분석하는데 사용되고 있다[3].

본 연구에서는 실제 투과증발 시스템을 설계하는데 이용될 수 있는 Tool을 구축할 목적으로 투과증발 시스템 모사기를 개발하였으며, 이를 PVSIM(PerVaporation Simulator)이라 명명하였다. PVSIM 소프트웨어는 Microsoft FORTRAN 5.1에 의하여 시스템 모델링 및 수치 해석 알고리즘이 구현되었으며, Windows 환경에서 사용자가 쉽게 입, 출력할 수 있도록 하기 위하여 Visual C++ 1.5를 이용하여 GUI(Graphical User Interface) 환경을 구축하였다. 본 논문에서는 모사기 구조에 대한 설명과 함께 자동차 수송 연료로 이용되는 무수에탄올 생산을 위한 에탄올 탈수 공정을 예로 들어 사용자가 투과증발 시스템 모사기를 조작하는 방법을 제시한다. 아울러 모사 결과에 대한 해석 및 실제 실험 결과와 비교하여 모사기 성능을 입증한다.

2. PVSIM 모사기 구조

PVSIM을 이용하여 투과증발 시스템을 모사하는 과정은 Fig. 1에 제시되며, 그림에서 보듯이 Client에 의해 생성물 용량 및 조성 등의 Specification이 주어질 때 PVSIM은 시스템 모델 및 관련 Database 등

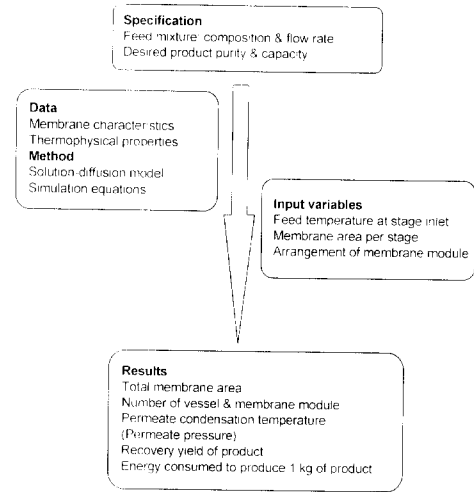


Fig. 1. Overall procedure for the simulation of per-vaporation system.

을 활용하여 필요한 막 면적 및 Permeate 응축 온도와 같은 운전 조건을 결정하고 아울러 시스템에 소비되는 에너지 사용량을 산출한다.

투과증발 시스템에서 혼합물 분리는 투과증발막에 의해 이루어지기 때문에 투과증발막/모듈에 대한 모델링이 필요하며, 시스템 모델링의 지배방정식(Governing equation)은 혼합물 전체 및 선택적인 투과 성분에 관한 물질 수지식과 Permeate의 기화 잠열 공급으로 인한 Feed의 온도 감소를 고려한 에너지 수지식으로 다음과 같이 표시된다[4-5].

$$\frac{dQ}{dA} = -J_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_w^i}{dA} = \frac{J_i(C_w^i - C_w^p)}{Q} \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dA} = -J_i \frac{\Delta H}{Q \cdot k} \quad (3)$$

$$\text{경계 조건: i) } Q=Q \quad \text{at } A=0$$

$$\text{ii) } C_w^i = C_w^i \quad \text{at } A=0 \quad (4)$$

$$\text{iii) } T=T_0 \quad \text{at } A=0$$

식(1)-(4)는 비선형 연립 상미분 방정식으로 Runge-Kutta algorithm에 의해 수치적으로 적분, 계산된다. 이러한 모사식 및 수치 해석 알고리즘은 FORTRAN Language로 Coding되어 모사기의 Simulation

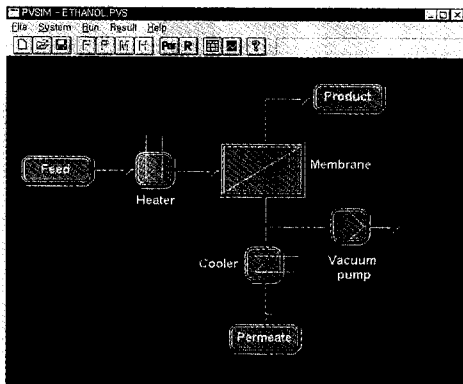


Fig. 2. Display of main window of PVSIM GUI.

engine을 구성한다.

PVSIM에 구축되는 Database는 크게 투과증발막 특성 Database와 혼합물에 대한 열역학 Database로 나눌 수 있으며, 투과증발막 특성 Database는 막의 소재 및 분리하고자 하는 혼합물의 종류에 따라 결정되는 것으로 각 성분의 Partial permeation flux, Arrhenius coefficient 등을 포함하며 이는 실험을 통하여 경험식의 형태로 결정된다. 열역학 Database는 각 성분의 기화 잠열, 열용량, 활동도 계수 등으로 문헌으로부터 구한다[6].

PVSIM은 생성물의 유량 및 농도에 대한 모사 결과가 Specification에서 요구하는 생성물의 유량 및 농도에 수렴하기 위하여 두 값 차이를 비교하여 Feed의 유량을 변화시킴으로써 원하는 결과를 얻는다. 이를 위해서 허용 오차 및 관련 Parameter 등이 PVSIM의 구성 요소의 하나로 주어지게 된다.

PVSIM은 Windows 환경에서 입, 출력이 용이하도록 구성된 User-friendly computing simulator로 초기 화면이 Fig. 2와 같이 구성되며 사용자가 PVSIM에 입력해야 하는 값들은 다음과 같다.

- Feed input data
- Product input data
- Membrane input data
- Heater input data
- Parameters for Run

Feed input data에서는 분리하고자 하는 이성분 혼합물의 성분을 제시하며 Feed의 유량, 농도, 온도 등을 각각 입력한다. Product input data는 Client가

Membrane input data	
Membrane Type	Vessel 1: PVA 1000
	Vessel 2: PVA 1000
	Vessel 3: PVA 1000
Membrane area per stage (M2)	100.0
Number of stages per vessel	Vessel 1: 7.0
	Vessel 2: 7.0
	Vessel 3: 7.0
Membrane area per vessel (M2)	Vessel 1: 700.0
	Vessel 2: 700.0
	Vessel 3: 700.0
Upper limit of total membrane area	2100.0
Feed temperature at module inlet, C	95.0
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Apply"/>	

Fig. 3. Display of window of membrane input data.

원하는 용량, 순도 등의 Specification을 제공한다. Membrane input data 화면(Fig. 3)을 구성하는 요소를 살펴보면 우선 Vessel이 있음을 볼 수 있는데 이는 막/모듈이 설치된 진공 Vessel을 의미하며 대규모 투과증발 플랜트에서는 공정에 소요되는 운전비를 감소하고 Permeate의 결빙 현상 등을 방지하기 위해 농도 범위에 따라 Permeate의 응축 온도를 달리할 필요가 있기 때문에 Vessel을 Splitting해서 설치하는 경우가 발생한다[7]. 이 경우 PVSIM에서는 각 Vessel에 설치되는 막/모듈 수 및 막의 종류를 달리하여 제시할 수 있도록 프로그램화되어 있다. 또한 Membrane input data에서는 막의 최대 면적 및 막/모듈 각 Stage 입구에서의 Feed 온도를 사용자가 입력하도록 되어 있으며, 후자의 경우에는 막의 내열성이 보장된 범위 내에서의 최대 온도를 일반적으로 운전 조건으로 하며 이는 온도가 높을수록 막을 투과하는 속도가 증가하기 때문이다. 일반적으로 실규모 투과증발 플랜트에서는 Heating source가 대부분이 Steam이고 이러한 Steam의 사용량이 공정에 필요한 에너지 사용량과 관련된다. 따라서 Heater input data 화면에서는 Saturated steam의 온도를 선택하면 이에 따른 압력 및 Steam 단위 질량 당 에너지량이 결정되고 Membrane input data에서 막/모듈 각 Stage 입구에서의 Feed 온도가 Heater의 출력 온도로 자동적으로 주어진다. 프로그램 실행에 필요한 Data 입력이 완료되면 실행에 필요한 인자값들을 설정하고, 이를 Parameters for Run 화면에 입력한다. Step

size, tolerance 등의 인자들이 Calculation category 에 입력되고 Product 유량 및 순도의 수렴에 필요한 인자들이 설정되어야 한다.

상기한 입력 화면들에서 입력된 값들이 PVSIM의 모사식에 필요한 Data를 구성하면 프로그램은 실행이 시작되고 실행 결과 및 출력 형태에 대해서는 다음절의 투과증발 시스템에 의한 실규모 에탄올 탈수 공정 모사 결과에서 설명한다.

3. PVSIM을 이용한 에탄올 탈수용 투과증발 시스템 모사

연료용 알코올로써 그 활용 가치가 높은 고순도 에탄올을 생산할 때 에탄올과 물의 혼합물은 에탄올 95.7wt.%에서 78.15℃의 끓는점을 갖는 공비혼합물을 형성한다. 따라서 에탄올 농축을 위한 증류탑의 상부에서는 공비점 근처의 농도를 갖는 에탄올/물 혼합물이 얻어지며 이를 투과증발, 공비증류, 흡착 등의 방법으로 에탄올 탈수 공정을 거쳐 고농도 에탄올을 얻게 된다[8].

에탄올 탈수 공정을 PVSIM의 Simulation Case로 선택하면 모사에 필요한 입력값들은 다음과 같다.

- Feed : 에탄올/물 이성분 혼합물
 유량 : 5400kg/h (Guessing value)
 농도 : 93wt.% 에탄올, 7wt.% 물
 온도 : 60℃
- Product : 유량 : 5000kg/h
 농도 : 99.5wt.% 에탄올, 0.5wt.% 물
- Membrane :
 Type : PVA 복합막(Pervap-1000)
 Stage당 막면적 : 100m²
 Vessel당 Stage수 : 7
 Vessel당 막면적 : 700m²
 Stage 입구에서의 Feed 온도 : 95℃
- Heater : Saturated steam
 압력 : 1.523 bar, 온도 : 112℃
 Heater 출구에서의 Feed 온도 : 95℃
- 프로그램 실행 Parameter :
 Step size : 0.1, Tolerance : 1 × 10⁻⁷
 Screen output interval : 10
 Allowable deviation for satisfying the product specification : 1 × 10⁻³

Increasing value per calculation for product specification : 0.5

상기한 값들을 입력하여 모사를 실행하면 DOS Window에서 막면적에 따른 Feed 유량, 농도, 온도 및 Permeate 농도 등이 출력되며 Run 과정을 보여 준다. 모사 결과가 원하는 Product의 용량 및 농도에 수렴하면 모사는 완료되고 다음의 Screen에서 출력 값들이 저장된다.

- Feed output results : Feed 유량, 조성 및 온도
- Product output results : Product 용량, 순도 및 용제 회수율
- Membrane output results : 전체 막면적 및 Stage, Vessel당 막면적
- Heater output results : Stage, Vessel당 Heat duty 및 Total heat duty
- Permeate output results : Permeate 유량, 조성 및 응축 온도
- Cooler output results : 응축 온도 및 Cooling power

모사 결과를 토대로 투과증발 Process flow diagram을 구성하면 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 결과에서 보듯이 농도 93wt.% 에탄올, 유량 5391kg/h의 에탄올/물 혼합물을 탈수하여 99.5wt.% 에탄올 5003kg/h를 얻기 위해서는 전체 면적 1800m²의 투과증발막이 필요하며 에탄올은 99.3%의 높은 회수율을 보인다

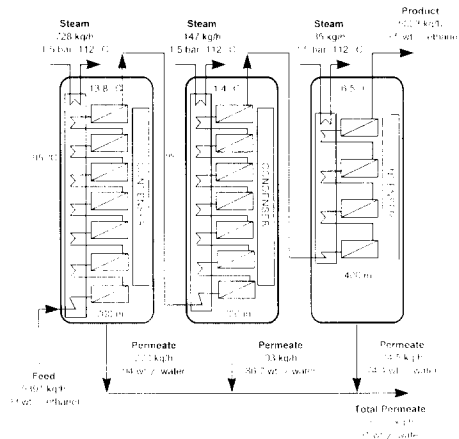


Fig. 4. Process flow diagram of pervaporation system simulated by PVSIM.

Fig. 5. Display of window of result table.

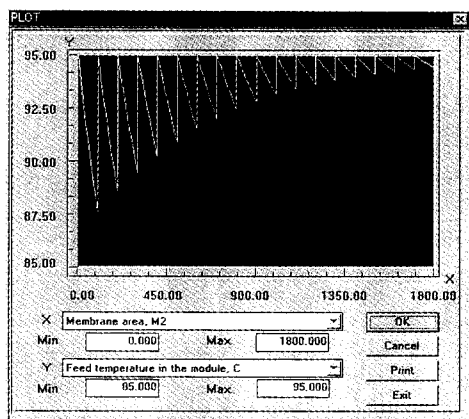


Fig. 6. Display of window of result plot.

다. 본 모사에서는 18 Stage로 구성된 막을 3개의 Vessel에 나누어 배치함으로써 각 Vessel에서 배출되는 Permeate의 결빙을 막을 수 있었으며, Cooling에 소요되는 에너지를 효과적으로 줄일 수 있다. 1개의 Vessel을 사용하여 모사한 결과는 전체 막면적은 동일하나 Permeate 응축 온도가 -5°C , Permeate 조성이 89.1wt.% 물로써 이 조건에서는 Permeate가 결빙될 뿐더러 Permeate 응축에 사용되는 Cooling power가 매우 높기 때문에 높은 에너지 소비량에 의한 운전비 증가를 예상할 수 있다. 막을 투과한 Permeate는 각 Vessel별로 그 농도 및 유량이 다르며 이는 함께 모아 투과증발 시스템 전 단계인 에탄올 농축 공정의 Feed로 재순환될 수 있으며, 이러한 재순환이 이루어지면 공정내 에탄올 손실은 거의 없다고 할 수 있다.

PVSIM은 필요에 따라 출력 형태를 표나 그림으로 나타낼 수 있으며, 표에서는 투과증발막 각 Stage 입,

출구에서의 Feed, Retentate의 유량, 농도, 온도 및 Permeate의 유량 및 농도를 나타낸다. 또한 PVSIM은 모사 결과를 Graphic 처리하였으며 사용자가 X, Y 축을 선택함으로써 원하는 결과를 Graph의 형태로 볼 수 있게 하였다. Fig. 5는 에탄올 탈수 공정 모사 결과표를 화면에 Display한 것으로 Stage가 증가함에 따라 Feed(Retentate) 물 농도 감소로 인한 투과 유량의 감소를 확인할 수 있으며, Permeate 농도는 에탄올이 농축되면서 물 함량이 감소됨을 알 수 있다. Fig. 6은 출력 Graph 중의 하나로 각 Stage에서의 막의 Feed side의 온도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 Feed side에서의 온도는 각 Stage마다 감소됨을 볼 수 있으며, 이러한 온도 감소는 단열 조건하에서 Permeate의 기화 잠열이 Feed의 현열에 의해 공급되기 때문으로 Permeate의 투과 유량이 증가할수록 온도 손실은 크게 나타나게 된다.

4. 모사와 실험 결과의 비교

4. 1. 투과증발 실험

모사 결과를 검증, 해석하기 위하여 실제 에탄올 탈수 실험이 투과증발 Pilot unit에 의해 진행되었다. 사용된 막은 Deutsche Carbone GFT사(독일)로부터 공급받은 상용화된 PVA 복합막(Pervap-1000)이고 모듈은 판틀형(Plate & Frame)으로 전체 막면적은 2m^2 이다. Pilot unit은 온도, 진공 압력, Level 등의 운전 Data가 수 초 단위로 A/D converter를 통해 PC에 입력되며 Permeate discharge를 위한 Valve의 On/off control을 자동화한 시스템으로 본 연구팀에서 직접 설계, 제작하였다. Feed로 사용된 에탄올은 화학 합성에 의해 생산된 것으로 한국알콜산업(주)로부터 구매하였다.

실험은 Feed 농도 및 운전 조건을 달리하여 연속식으로 진행되었으며 Feed, Product 및 Permeate 농도는 Porapak-Q Column과 Thermal Conductivity Detector(TCD)를 이용한 가스 크로마토그래프(Shimadzu GC-14B gas chromatograph)로 분석하였다.

4. 2. 고찰

Table 1은 PVSIM 입력값과 PVSIM에 의해 모사한 출력값을 나타내고 있으며, 입력값은 Feed 유속 및 농도, 운전 온도, 막면적 등으로 구성되는데 이는 실험 조건을 바탕으로 입력되었으며 이러한 값들이

Table 1. Input/output Values of Pilot-scale Ethanol Dehydration Simulation with PVSIM

		Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
Input values	Feed flow rate (kg/h)	24	19.56	14.81	27.1	17.9
	Feed concentration (wt.% ethanol)	96.4	96.52	95.2	93.67	94.31
	Membrane area per stage (m ²)	1	1	1	1	1
	Number of stage	2	2	2	2	2
	Feed temperature at 1st stage inlet (°C)	90	90	90	90	80
	Feed temperature at 2nd stage inlet (°C)	90	90	90	90	80
Output values	Feed temperature at 1st stage outlet (°C)	83.3	82.44	77.35	79.43	69.3
	Feed temperature at 2nd stage outlet (°C)	84.9	84.5	81.36	81.51	71.6
	Product flow rate (kg/h)	23.59	19.2	14.37	26.38	17.45
	Product concentration (wt.% ethanol)	97.9	98.2	97.9	96.1	96.6
	Permeate flow rate (kg/h)	0.41	0.36	0.44	0.72	0.45
	Permeation flux (kg/m ² -h)	0.205	0.18	0.22	0.36	0.225
	Permeate concentration (wt.% water)	92.7	92.2	93.7	95.2	95.7
	Permeate pressure (mbar)	9.1	8	9	15.66	9.3
	Permeate condensation temperature (°C)	2.5	0.6	2.5	9.7	3.3

Table 2. Experimental Conditions and Results of Continuous Mode Pervaporation Pilot Test

	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
Membrane area per stage (m ²)	1	1	1	1	1
Number of stage	2	2	2	2	2
Total membrane area (m ²)	2	2	2	2	2
Feed temperature at 1st stage inlet (°C)	89.9	89.9	90.6	89.5	80.3
Feed temperature at 1st stage outlet (°C)	78.6	77	72.4	78.8	70.1
Feed temperature at 2nd stage inlet (°C)	90.2	90.4	90	90	80.1
Feed temperature at 2nd stage outlet (°C)	79.5	78.1	73.9	80.1	71.4
Feed flow rate (kg/h)	24	19.56	14.81	27.1	17.9
Product flow rate (kg/h)	23.6	19.2	14.4	26.46	17.5
Permeate flow rate (kg/h)	0.4	0.36	0.41	0.64	0.4
Feed concentration at 1st stage inlet (wt.% ethanol)	96.4	96.52	95.2	93.67	94.31
Feed concentration at 1st stage outlet (wt.% ethanol)	97.2	97.32	96.5	94.9	95.4
Product concentration : Feed concentration at 2nd stage outlet (wt.% ethanol)	97.8	97.98	97.65	95.8	96.28
Permeation flux (kg/h-m ²)	0.2	0.18	0.205	0.32	0.2
Permeate concentration (wt.% water)	86.2	82	90.5	94.5	91.9
Permeate pressure (mbar)	10	10	11	17	11
Permeate condensation temperature (°C)	1	0	2	8	3

Pilot test 운전 조건 및 Feed specification 등을 구성한다. 특히 PVSIM은 투과증발 시스템에서 두 가지 중요한 운전 조건 가운데 하나인 막모듈 입구에서의 온도가 입력값으로 주어지고 나머지 운전 조건인 응축 온도는 모사 결과의 하나로 구해지기 때문에 모

사에 의해 결정된 응축 온도가 실제 pilot test를 실시할 때 설정되어야만 모사와 실험 결과의 비교가 정확하게 이루어진다. Table 2는 Pilot test 실험 조건 및 결과를 나타내고 있으며 막모듈 각 Stage 입, 출구에서의 Feed 온도는 운전 시간 전체에 걸쳐 평균

한 값을 나타내고 있다.

Table 1과 2에서 보듯이 Feed 유속, 온도 등의 운전 조건과 농도 등을 다양하게 변화시킨 실험 조건하에서 모사 결과는 실험 결과와 잘 일치됨을 볼 수 있다. 다만 실험에서 구한 막의 선택도가 모사 결과보다 떨어짐을 Permeate 농도에서의 물 농도의 감소로 알 수 있는데, 이는 모사에 사용된 막특성 Data가 실험실에서 구한 Data이기 때문에 막면적의 Scale-up에 기인한 것으로 해석된다. 또한 실험실에서는 Permeate를 -30°C 의 냉각 온도에서 응축, 결빙함으로써 Permeate 압력이 매우 낮은 상태에서 투과 Flux, 선택도 등의 막특성 Data를 구하는 반면, Pilot test에서는 Permeate 압력이 실험실 조건보다 높아 투과증발막의 Permeate side에 응축 온도에 해당되는 증기 압력만큼 Permeate가 미량 존재하게 된다. 따라서 이러한 현상은 투과증발막의 팽윤 등에 영향을 미칠 수 있으며 이러한 팽윤은 선택도 저하의 결과를 낳을 수 있다[9]. Feed 유속과 에탄올 농도 변화의 관계로부터 에탄올 농도 증가율은 Feed 유속 변화를 변화시키므로써 조절될 수 있음을 보여주는데, 이는 에탄올 탈수를 위한 실규모 투과증발 Plant에서도 에탄올 용도에 따라 유속을 조절하여 실제 운전되고 있다 [7].

5. 결 론

유기물/물 혼합물 분리 공정에 적용되는 투과증발 시스템 설계에 활용되는 투과증발 모사기(PVSIM)를 개발하였다. PVSIM은 시스템 모델링 및 수치 해석 알고리즘 구현 등의 Simulation engine은 FORTRAN Language로, GUI 환경 구축을 위해서는 Visual C++ Language로 각각 구성되어 있다.

자동차 수송 연료로 이용되는 무수에탄올 생산을 위한 에탄올 탈수 공정 모사를 통해 PVSIM 구조, 입력, 출력 및 사용 방법 등에 대해 설명하였으며, 실제 에탄올 탈수 Pilot test 결과와 비교함으로써 모사기의 성능을 입증하고 시스템 성능에 미치는 운전 조건 등의 영향에 관하여 고찰하였다.

투과증발 공정에서 중요한 운전 조건 및 설계 Data는 막모듈 입구에서의 Feed 온도, Permeate 응축 온도, 필요한 막면적 및 진공 Vessel내 막모듈의 배열 등이며, PVSIM은 Permeate 응축 온도와 막면적을 결정하며 나머지는 입력값으로 주어지게 된다. 또한

PVSIM에서는 Feed 가열에 필요한 Steam 사용량 및 Permeate 응축에 필요한 Cooling power 등을 산출함으로써 에너지 사용량을 결정할 수 있으며 이는 플랜트 운전비와 직접 관련된다. 그러나 플랜트 운전비와 함께 투자비 등을 고려하여 공정을 최적 설계하기 위해서는 진공 Vessel 수 및 각 Vessel에 배치되는 막 Stage 수 등을 최적화할 필요가 있으며 이는 앞으로 본 연구팀에서 향후 진행할 계획이다.

감 사

본 연구는 통상산업부 에너지자원기술개발지원센터(RaCER)의 에너지절약 연구기술개발 자금의 지원으로 수행되었기에 감사 드립니다.

사용 기호

A	: Membrane area [m^2]
C_w^f	: Weight fraction of water in the feed [-]
$C_{w,0}^f$: Initial weight fraction of water in the feed [-]
C_w^p	: Weight fraction of water in the permeate [-]
ΔH	: Latent heat of vaporization [J/kg]
J_t	: Total permeation flux [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{hr}$]
k	: Liquid heat capacity [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$]
Q	: Feed flow rate [kg/hr]
Q_m	: Feed flow rate at the membrane entrance [kg/hr]
T	: Temperature [$^{\circ}\text{C}$]
T_m	: Temperature at the membrane inlet [$^{\circ}\text{C}$]

참고 문헌

1. G. F. Tusel and H. E. A. Bruschke, *Desalination*, **53**, 327(1985).
2. H. L. Fleming, *Chemical Engineering Progress*, **46** (1992).
3. R. Rautenbach and J. Vier, *Proceedings of Seventh International Conference on Pervaporation Processes in the Chemical Industry*, Reno, Nevada, 70(1995).
4. K.-H. Lee, J.-K. Yoo, J.-H. Chang, and S.-H.

- Ahn, *Abstract of The Membrane Society of Korea*, 38(1995).
5. J.-H. Chang, J.-K. Yoo, S.-H. Ahn, and K.-H. Lee, *Proceedings of 96 KICHe Spring Meeting*, 289 (1996).
 6. T. E. Daubert and R. P. Danner, "Physical and Thermodynamic properties of pure chemicals: Data Compilation, Design Institute for physical property data", *AIChE*, Hemisphere Publishing Corporation(1991).
 7. J. L. Rapin, *Proceedings of Third International Conference on Pervaporation Processes in the Chemical Industry*, Englewood, NJ, 364(1988).
 8. J. L. Humphrey and A. F. Seibert, *Chemical Engineering Progress*, 32(1992).
 9. T. Q. Nguyen, *AIChE Symposium Series*, 82(148), 1(1986).