

## 판틀형 투과증발 막모듈내에서 feed 온도 분포 예측을 위한 모델링

원 장 목 · 염 충 균\* · 윤 석 원\*\* · 임 지원\*\* · 배 성 렬 · 하 백 현†

한양대학교 화학공학과 · \*한국화학연구소 고분자소재부 분리소재연구실 · \*\*한남대학교 화학공학과  
(1996년 1월 19일 접수, 1996년 3월 6일 채택)

### Modeling of Pervaporation Process: Prediction of Feed Temperature Distribution in A Frame and Plate Type of Membrane Module

Jang-Mook Won, Choong-Kyun Yeom\*, Seok-Won Yoon\*\*, Ji-Won Rhim\*\*  
Seong-Youl Bae, and Baik-Hyon Ha†

Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*Membranes and Separation Lab., Advanced Polymer Division, Korea Research  
Institute of Chemical Technology, P.O.Box 107, Yusong, Taejon 305-606, Korea

\*\*Department of Chemical Engineering, Han Nam University, 133 Ojung Dong, Taejon 300-791, Korea

(Received January 19, 1995, Accepted March 6, 1996)

요 약 : 평판형 모듈 설계의 최적화를 목적으로 feed 흐름 조건에 따른 feed 온도 및 유속 분포를 예측할 수 있는 모델식을 확립하였고 모델 모사를 통해 흐름 조건들이 온도 분포에 끼치는 영향들을 조사하였다. 모듈내의 유체의 Re 크기가 커지면 채널 두께방향으로의 유속 구배가 커질 뿐 아니라 투과물 증발을 위한 에너지원인 feed 흐름 속도가 커져 물질 및 열흐름이 증가하여 투과물 증발로 인한 feed 온도 강하가 줄어든다. 반면에 채널 간격이 작아지면 feed 흐름량이 상대적으로 작아져 급격한 온도 강하를 야기시킨다. Re 크기에 따른 feed 온도 변화는 실험결과와 일치함이 관찰되었다.

**Abstract:** For the purpose of the optimal design of a frame and plate type of pervaporation module, model equations which can predict the effects of feed flow condition on the temperature distribution of the feed developed in the module were established and the temperature distribution with feed flow condition was investigated through the model simulation. With increasing the Reynolds number of feed flow in the module, the flow velocity gradient in the channel height-direction as well as the volume rate of feed which acts as energy source for the evaporation of permeants on the permeate-side surface of a membrane increased to such an extent that both mass and heat flux in the channel height direction could increase and the temperature drop of feed due to the evaporation of the permeant could be reduced correspondingly. A decrease in channel height caused the temperature drop of feed because of decreasing feed flow in the module. It was observed that the simulation result on the effect of Re on the temperature distribution of feed in the module has an agreement with experiment.

#### 1. 서 론

분리막을 이용한 분리기술은 고순도, 고기능성 물

질의 제조와 지구 환경보호등의 사회적 요구에 따라서 간단한 실험적 규모로부터 산업분야의 대규모 공정에 이르기까지 폭넓게 연구되고 있다. 분리막 공정

은 기존의 에너지 다소비형 공정과 비교하여 약 70~80% 또는 그 이상까지도 에너지를 절감할 수 있다. 또한 그 원리 및 공정이 간단하므로 장치가 차지하는 공간이 작으며 시설비 투자를 줄일 수 있는 장점이 있다. 막분리 기술은 막의 소재를 개발하는 고분자등의 재료 분야, 개발된 막을 분리 공정에 응용할 수 있도록 housing화 시키는 막모듈 분야 그리고 모듈을 이용하여 실제 공정에 응용 또는 개발하는 system 분야로 대분할 수 있으며 이상의 각 분야가 유기적으로 결합하여 조화를 이룸으로 우수한 막분리 공정을 개발할 수 있다. 분리막용 신소재 분야는 분리 성능을 일차적으로 결정하는 매우 중요한 기술로써 지난 반세기 동안에 획기적인 고성능 분리막이 개발되어 오늘날 분리막이 보편화하게 되었다. 그러나 막분리 공정에서 불가피하게 동반되는 막표면에서의 여과물질의 분극화(concentration polarization) 현상과 막오염(fouling) 현상을 극복하기 위한 기술적인 해결 방안이 요구된다. 현재 미국, 일본, 유럽등 선진국들은 보다 우수한 분리막의 소재를 개발함은 물론 점차 확대 응용되는 막분리 공정을 뒷받침할 수 있는 다양한 막모듈 개발에도 많은 투자를 하고 있다.

이중 투과증발은 다른 막공정들에 비해 비교적 복잡한데 그이유는 다음 두가지 문제 즉, 투과증발 공정이 permeate 쪽의 압력강하에 민감하다는 것과 투과물 증발을 위해 에너지가 feed로부터 막으로 전달이 되어야 한다는 것 때문이다[1]. 전자의 문제를 최소화하기 위해서 중공사형 모듈(hollow fiber module)보다는 평판형 모듈을 채택하여 현재 상업화에 응용하고 있다. 한편 문제시되는 분극화 현상이나 막오염 현상이 투과증발 공정에서는 타 막분리공정에서 만큼 심각하지 않으나 투과물 증발때문에 막표면에서의 온도강하로 인한 막성능 저하를 야기시킬 수 있다. 투과증발 공정에서 투과물질의 막표면에서의 증발은 매우 중요한 단계들중 하나이며 이때 막표면에서 상변화를 위해서 필요한 증발열은 feed로부터 heat flux 형태로 공급되어진다[1,2]. 이때 feed의 흐름의 조건에 따라 열전달 속도가 결정된다. 열전달 속도가 충분치 않으면 feed쪽 막표면에서 온도강하가 심각하게 일어나는데 이경우 투과물의 막표면으로의 용해도가 떨어지며 또한 막의 고분자 사슬의 유동성을 저하시켜 투과속도 감소가 급격히 일어난다. 이와 같이 feed는 막의 용해(sorption) 및 확산(diffusion)

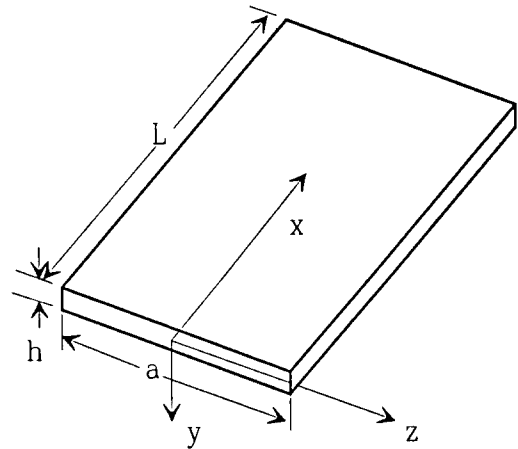


Fig. 1. Channel dimension in membrane module.

특성에 영향을 끼쳐 막성능을 결정할 뿐 아니라 투과물질의 증발을 위한 에너지를 제공하는등 중요한 역할을 한다. 그러므로 막모듈내에서 feed의 온도 및 유속 분포에 대한 정보는 모듈 설계시 필수적인 것이라 할 수 있다.

본연구에서는 평판형 모듈 설계의 최적화를 목적으로 feed 흐름 조건에 따른 모듈내 feed 온도 및 유속 분포를 예측할 수 있는 모델식을 확립하고 전산 모사(simulation)를 통해 흐름 조건들이 온도 분포에 끼치는 영향들을 조사하였으며 이들의 결과를 모듈설계에 반영하고자 한다. 또한 확립된 모델식의 타당성 확인을 위해 최소한의 실험을 행하여 실험치와 모델치와 비교하였다.

## 2. 판틀형 투과증발 모듈의 모델링 : 온도 분포에 대한 전산모사(Simulation)

### 2. 1. 모델 설정

모듈내 feed는 Fig. 1에 묘사된 직사각형 슬릿(slit)형태의 채널속을 흐른다고 생각할 수 있다. 채널은 x 방향으로 길이 : L, y 방향으로 두께 : h 그리고 z 방향으로 폭 : a인 사양을 갖고 있다.  $a \gg h$ 일 경우, z 방향의 흐름은 무시할 수 있기 때문에 x-y 이차원계로 단순화시킬 수 있는데 이경우 x 방향의 흐름은 채널의 입구와 출구의 압력차 때문에 발생하며 y 방향의 흐름은 채널 안과 밖의 압력차 즉 막을 통한 투과로 인하여 발생한다.

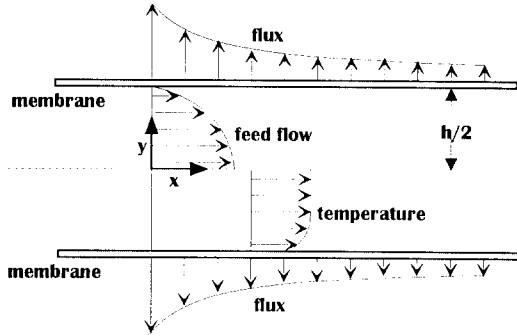


Fig. 2. Feed flow and Temperature profiles in membrane channel.

## 2. 2. 채널내에서의 열전달

투과증발 공정에서 막표면에서의 상변화를 위해서 필요한 증발열은 feed로부터 heat flux 형태로 공급되어진다. 만약 막을 통한 투과속도가 클 경우 더 많은 heat flux가 필요할 것이며 또한 막 양쪽 표면에서의 온도 차이가 클 것이다. 이와 동시에 모듈내부에서는 feed 흐름 방향과 막의 직각 방향으로 온도 및 유속구배가 발생하게 된다(Fig. 2). 이와 같이 feed의 온도는 막의 용해특성 뿐 아니라 막의 고분자 사슬의 유동성에 영향을 끼쳐 투과속도 및 투과도를 결정하고 또한 투과물질의 증발열을 제공하는 에너지원 역할을 한다. 막모듈내에서 feed의 온도 분포 계산은 heat flux 계산으로부터 시작되는데 여러성분으로 이루어진 feed 혼합물 투과경우 필요한 heat flux는 다음식[1]으로부터 계산할 수 있다.

$$q = \sum_{i=1}^n J_i (\Delta h_{vi} + c_{pi} \Delta \theta), \quad i=1,2,\dots,k \quad (1)$$

보통 높은 분리효율을 갖는 막 분리공정 경우 막을 통과한 투과물의 대부분은 선택적으로 투과되는 성분으로 이루어지므로 식(1)은 단일성분에 관한 식으로 단순화시킬 수 있다. 이경우 실험치와 이론치를 합한 관계식은 다음과 같다.

$$q = k_n \Delta \theta \quad (2)$$

$$\frac{1}{k_n} = \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} \quad (3)$$

실험치와 발표된 파라메타들의 수치[1]들을 사용하면 투과성분으로 적셔진 막의 열전도도인  $\lambda_M$ 을 구할 수 있다. 평판형 모듈내를 흐르는 feed 흐름이 laminar flow일 경우 온도변화는 수치적으로 계산이

가능하다. 또한 계산의 복잡성을 피하기위해 모델식 확립시 다음과 같은 사항들을 가정한다.

- 채널(channel)내 feed 흐름방향에서의 열전달이 오직 대류(convection)에 의해서만 이루어진다.
- 채널내의 유체흐름은 수력학적(hydrodynamic)으로 완전히 전개된 흐름이다.
- 막을 통한 투과는 채널내의 유체흐름 형태에 영향을 주지 못한다.
- 모듈내의 유체의 온도는 투과물의 증발에 의해서만 영향받는다.

이경우 에너지 수지식은 다음과 같이 된다.

$$v_i \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\lambda_i}{\rho_i c_{pi}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (4)$$

각 위치에서의 유속  $V_x, V_y$ 은 질량, 모멘텀 수지식들로부터 다음과 같이 유도된다.

$$v_x = \frac{3}{2} v_{ax} \left[ 1 - 4 \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$v_x = v_{ax} - 2 \int_0^x \frac{3}{2} \frac{J}{\rho_i h} dx \quad (6)$$

$$v_y = 3 \frac{J}{\rho_i h} \left( \frac{y}{h} \right) \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right] \quad (7)$$

식 [5-7]들은 유체가 흐르는 채널(channel) 양쪽면에 막을 장착한 평판형 모듈에 적용될 수 있으며 식 (4),(5),(7)들을 결합하면 다음과 같이 무차원식으로 만들수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial y^{*2}} = \frac{3}{2} Re Pr \frac{h}{L} v_{ax}^* (1 - 4 y^{*2}) \frac{\partial \theta}{\partial x^{*2}} + 3 Re Pr \frac{J}{v_{ax} \rho_i} = (1 - \frac{4}{3} y^{*2}) \frac{\partial \theta}{\partial y^{*2}} \quad (8)$$

여기서 각 무차원 파라메타들은 다음과 같이 표현된다.

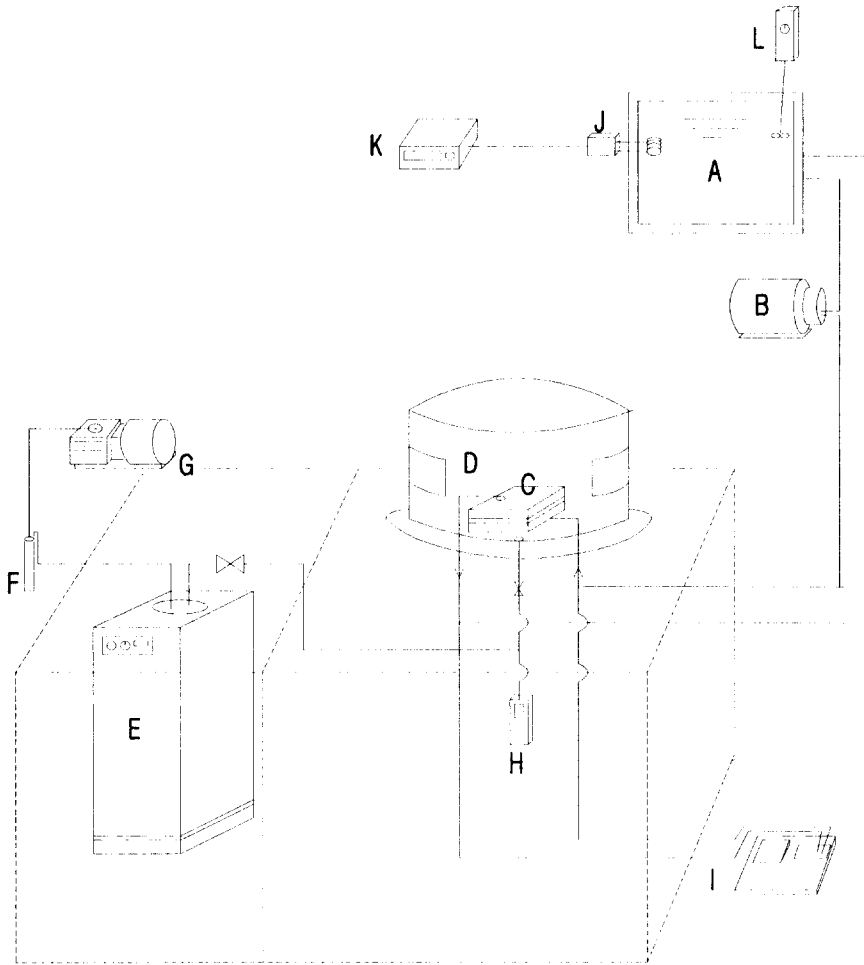
$$x^* = \frac{x}{L}, \quad y^* = \frac{y}{n}, \quad v_{ax}^* = \frac{v_{ax}}{v_{ax}}, \quad \theta^* = \frac{\theta}{\theta_o},$$

$$Re = \frac{\rho_i v_{ax} h}{\eta_i}, \quad Pr = \frac{\eta_i c_{pi}}{\lambda_i}$$

위 편미분방정식을 풀기위한 경계조건은

$$x^* = 0; \theta^* = 1 \quad (9)$$

$$y^* = 0; \frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} = 0 \quad (10)$$



A : Feed Tank B : Circulation Pump C : Module D : Vessel E : Cold Trap F : Cold Trap G : Vacuum Pump H : Vacuum Gauge I : Thermometer J : Heater K : Thermo Controller L : Mechanical Stirrer

Fig. 3. Schematic presentation of pervaporation apparatus with a frame and plate module.

$$y^* = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} + Re Pr \frac{J}{\rho_l \cdot v_{avo}} K_1 \theta^* = -Re Pr \frac{J}{\rho_l \cdot v_{avo}} K_2 \frac{1}{\theta_0} \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{c_{pv} J c_{pl} [\exp(C_M \delta_M) - 1] + \lambda_M C_M}{c_{pl} J c_{pv} [\exp(C_M \delta_M) - 1] + \lambda_M C_M} - 1$$

$$K_2 = \frac{\Delta h_{vo}}{c_{pl}} \cdot \frac{c_{pv}}{c_{pl}} \cdot \frac{J \Delta h_{vo} [\exp(C_M \delta_M) - 1]}{J c_{pv} [\exp(C_M \delta_M) - 1] + \lambda_M C_M}$$

$$C_M = \frac{J c_{pl}}{\lambda_M}$$

식 (11)은 확산(-λ ∂θ/∂y) 뿐아니라 대류(J c<sub>pl</sub> θ) 에너지전달을 고려한 막을 통한 에너지수지식으로부터 얻어진다.

### 2. 3. 수치 해석

위에 기술한 방정식들은 주어진 경계조건을 이용한 implicit 유한차분법[3]에 의하여 풀어졌다. 편미분 방정식은 각 차분점을 둘러 싸고 있는 제어 면적에 대하여 각 차분점 사이들의 종속변수들(x 속도, y 속도)을 내삽(interpolation) 함수를 이용하여 적분하

였다. 여기에 Tridiagonal matrix algorithm이라는 반복법(Iterative technique)을 사용하였다. 채널 간격  $h=0.0005, 0.001, 0.002m$ ,  $Re=500, 1000, 1500, 2000$ , 초기 feed 온도  $=80^{\circ}C$ , feed 용액  $=90wt. \%$  에탄올 농도의 에탄올-물 혼합물, 막두께  $=28\mu m$ 의 조건들에 대해 각각 전산 모사가 이루어졌다.

### 3. 실험

#### 3. 1. 모듈 투과성능 실험장치

실험장치는 크게 feed 공급 부분, 모듈부분, 투과 속도 측정부분 그리고 응축부분으로 나뉜다(Fig. 3). 우선 feed를 공급하기 위해서 10 liter 용량의 단열재로 감싼 sus재질의 feed tank가 있다. 외부에서 유량을 측정하기 위해 옆에 유량 측정용 튜브가 수직으로 달려있고 위에는 용액의 증발을 막기 위한 콘덴서가 장착되어 있다. 용액의 온도 조절은 온도 조절기(TH-1500 Thermo controller, EYELA)를 사용하여 내부에 장치한 1000W 용량의 heater에 전력을 공급하여 이루어지며 이때 내부의 온도는 feed tank에 설치한 온도계를 통해 직접 확인할 수 있다. 또한 내부의 용액의 양이 많은 관계로 교반기(Mazela Z Mechanical stirrer, EYELA)를 사용하여 용액을 계속 교반해 주었다. 이렇게 하여 일정한 온도에 이르면 펌프(Pro-spense Circulation Pump, Cole-Parmer) 의해 용액을 모듈로 보내며 이 펌프는 자체의 모터 속도를 조절할 수 있어 유속조정이 용이한 장점이 있다. 모듈을 감싸고 있는 dome형태의 뚜껑은 5T의 sus판 위에 3T의 sus로 제작하였으며 좌우에 내부를 관찰할 수 있는 10T의 PMMA판으로 된 창이 있고 밑으로는 각종관이 연결되어 있다. 이 때 펌프를 통한 용액이 모듈의 입구와 출구에 온도 센서(6 Channel Thermometer, Yokogawa)들이 연결되어 각 온도를 측정할 수 있다. 진공펌프(Rotary Vacuum Pump, ULVAC) 의해 dome형태의 용기에 낮은 permeate 압력이 유지되었으며 진공 게이지(68980 Vacuum Gage, Cole-Parmer) 의해 용기내부의 진공도를 측정하였으며 이를 이용한 간접적인 투과속도 변화관찰이 가능하였다. 이중 냉각 응축기(Freezer UT-50, Capacity=0.9 liter, EYELA) 의해 증기상의 투과물을 응축시켰다. 모듈의 재질은 sus로 이루어졌고 두장의 막( $30 \times 30cm$ )을 장착할 수 있으며 이들 막사이에 feed가 흐를 수 있도록 두랄루민 재질

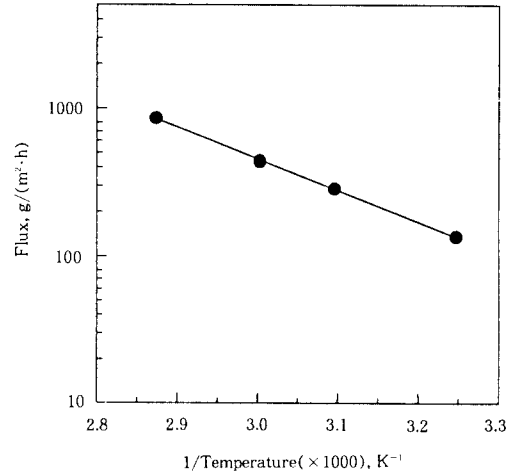


Fig. 4. Arrhenius plot of flux through crosslinked chitosan membrane against temperature : feed composition = 90wt.% ethanol content.

의 간격관을 사용하여 1mm의 막사이의 간격을 만들었다. 이 모듈은 독일의 GFT사의 평판형 막모듈을 수정보완하여 feed의 수력학(hydrodynamic)적 흐름을 개선한 것으로 상세한 모듈 구조에 대한 설명은 생략하기로 한다.

#### 3. 2. 투과증발 모듈 성능 실험

사용된 막은 한외여과용 폴리설폰막위에 키토산을  $28\mu m$  두께로 코팅한 복합막인데 코팅된 키토산막을 0.01wt.% 글루탈알데하이드 가교용액에서 50분 표면 가교시켰으며 두장의 유효 막면적은  $0.18m^2$ 이다. feed 용액으로는 90wt.%의 에탄올 농도의 수용액이고 조업온도는  $90^{\circ}C$ 로 유지시켰다. 모듈내의 유체의 흐름은 레이놀즈 계수(Reynolds number) 기준으로 500, 1000, 1500, 2000으로 유지시켰는데 이들은 laminar 흐름을 갖는 유속들이다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4. 1. 실험결과

Fig. 4은 온도에 따른 투과속도를 Arrhenius 도식한 것으로 좋은 직선성을 보이고 있다. 여기서 구한 Arrhenius 관계식은 다음과 같다.

$$J = 1.14 * 10^9 \exp\left(\frac{-9.755 \text{ kcal/mol}}{RT}\right) \text{ [g/(m}^2\text{.h)]}$$

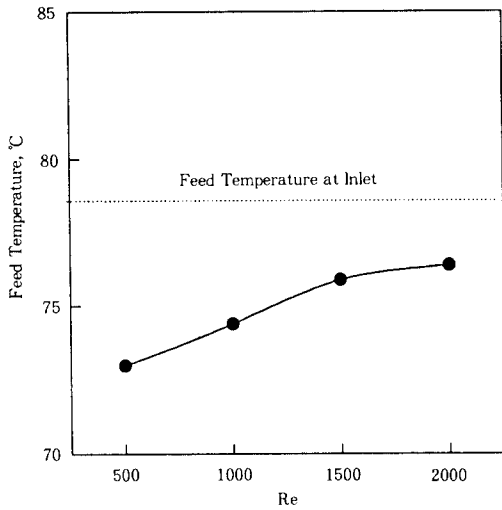


Fig. 5. Experimental feed temperature at the outlet of membrane module with 0.001 m of channel height.

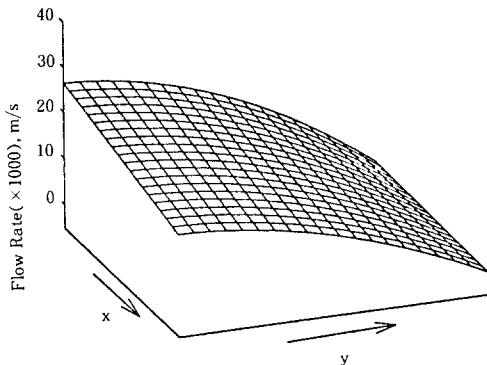


Fig. 6. Velocity distribution of feed flow in membrane module : Re = 500, channel height = 0.001m.

여기서 기울기에 해당하는 9.755 kcal/mol은 투과 활성화에너지(permeation activation energy)이며 윗식은 온도 변화에 대한 투과속도  $J$ 의 일반식으로 모델링에 사용하였다. Fig. 5은 모듈내의 feed의 유속 즉 레이놀즈 계수 Re 크기에 따른 모듈의 출구에서의 feed의 온도변화를 나타낸 것이다. Re 크기가 커질수록 모듈의 입구와 출구의 온도차이가 줄어들는데 이는 모듈내에 유입되는 에너지원인 feed 유입속도가 커지기 때문이다.

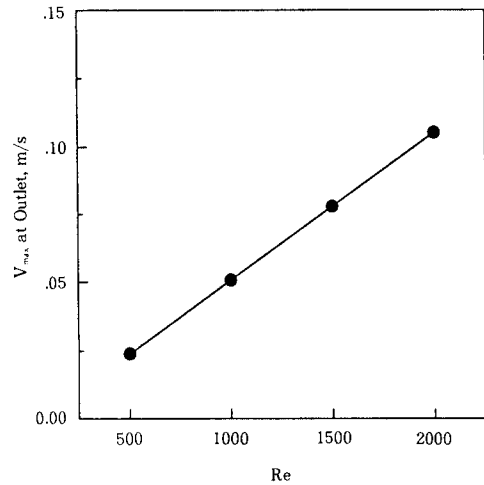


Fig. 7. Feed flow rate at  $y=0$  in the outlet of membrane module with 0.001m of channel height.

#### 4. 2. 모사 결과

실험치와 발표된 문헌치[1]를 사용하여 식 (1)-(3)으로부터 막내부의 열전도  $\lambda_m$  ( $=0.0616 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ) 및 다른 파라메타들을 구하였다. 모사한 결과들이 주로 격자식(grid) 형태의 그래프로 도시되어 있는데  $x$  축이 시작하는 부분이 모듈 입구이며 끝나는 부분이 모듈 출구이다.  $y$  축이 시작하는 부분이 해당  $x$  위치에서 모듈 채널간격의 중간이며 끝나는 부분이 막표면에 해당하는 부분이다. Fig. 6은  $Re=500$ ,  $h=0.001\text{m}$  조건에서 모듈내에서의 유속분포이다. 이는 모듈내에서의 대표적인 형태의 유속 분포인데 주어진 위치  $x$ 에서  $y$  방향으로 유속이 감소되는 유속구배(velocity gradient)가 형성되어 이것이  $y$  방향으로 질량 및 열 전달을 위한 driving force의 역할을 한다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 Re 크기가 클수록  $y=0$ 인 부분의 유속이 커져 곡률이 큰 유속 분포의 격자가 되는데 이때문에  $y$  방향으로의 driving force가 커져 질량 및 열전달 속도가 커질 수 있다는 것을 짐작할 수 있다.

Fig. 8는 채널내에 흐르는 feed의 Re 크기에 따른 온도분포 변화를 모사한 것인데 Re 크기가 작을수록 위치에 따른 온도변화가 심하게 일어나는 것을 보여주고 있다. 특히 모듈의 출구로 갈수록 막부근의 feed의 온도 강하가 심하게 일어나는 것을 보여주고 있는데 이는 작은 Re 크기하에서는 에너지원인 feed 공급속도가 작을 뿐 아니라 유속구배가 작아 막표면에

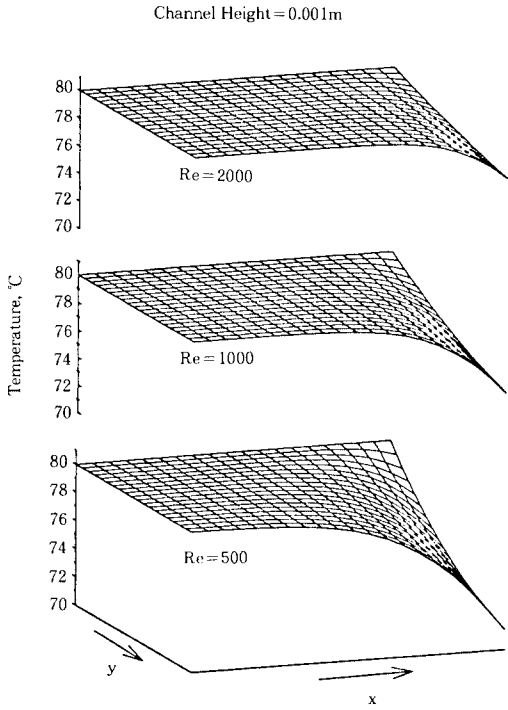


Fig. 8. Temperature distribution of feed in membrane module at various Re : channel height = 0.001m.

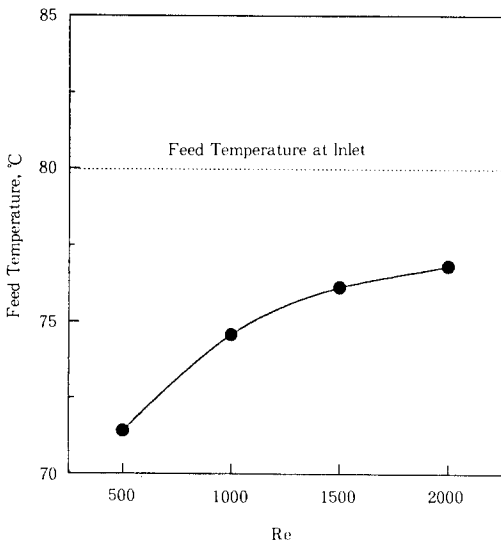


Fig. 9. Feed temperature at membrane surface in the outlet of membrane module with Re : channel height = 0.001m.

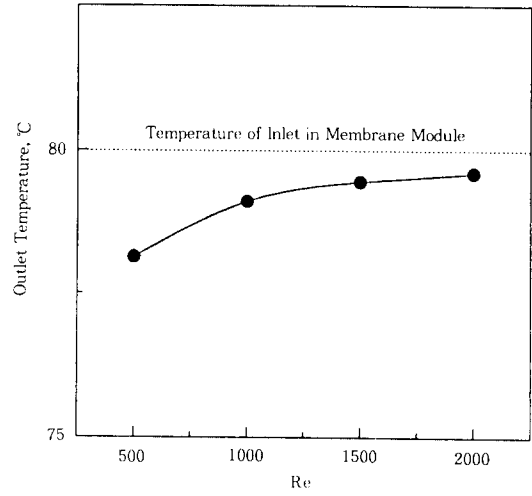


Fig. 10. Feed temperature at the outlet of membrane module with Re : channel height = 0.001m.

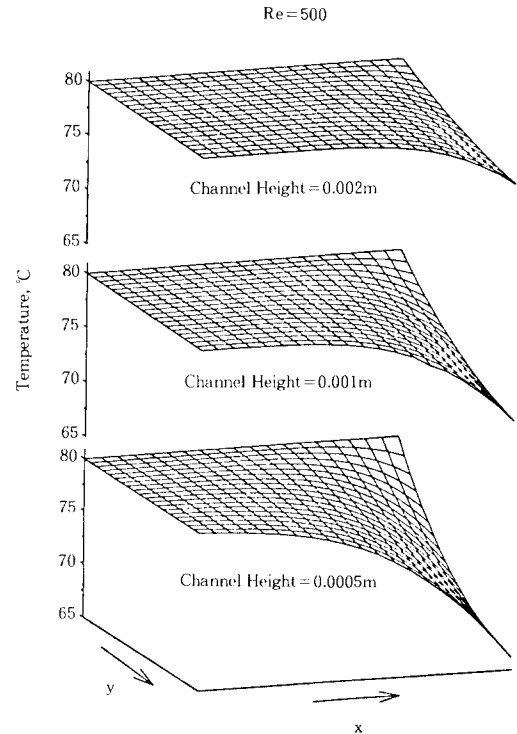


Fig. 11. Temperature distribution of feed in membrane module with different channel height at Re = 500.

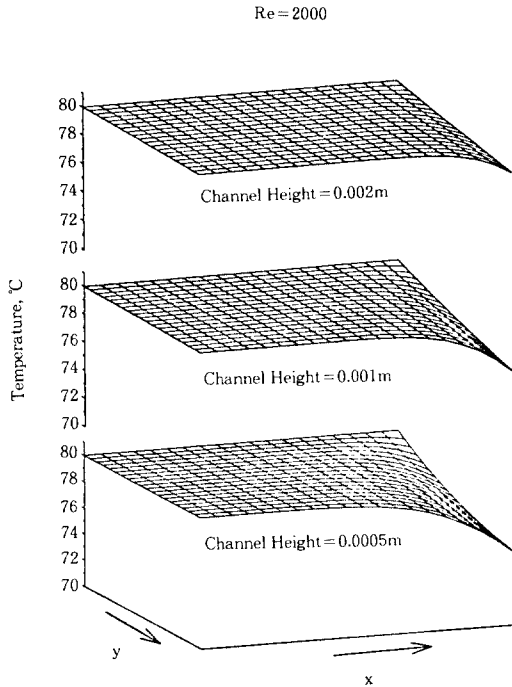


Fig. 12. Temperature distribution of feed in membrane module with different channel height at  $Re=2000$ .

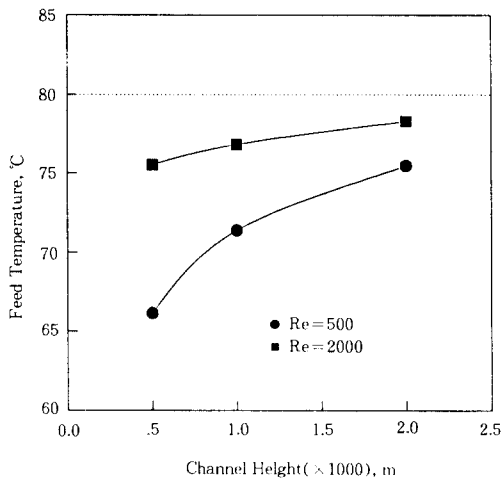


Fig. 13. Feed temperature at membrane surface in the outlet of membrane module with channel height at different  $Re$ .

서의 투과물 증발을 위한 에너지 흐름이 충분치않아

서 증발열로 인해 빼앗긴 열이 충분히 보충이 되지 않아 막 부근으로 갈수록 feed 온도가 급격히 떨어지게 된다. 그 결과 Fig. 9에 나타낸 바와같이  $Re$  크기에 따른 출구쪽 막표면에서의 유체의 온도는 변화하며 출구를 나가는 유체온도는 실험결과에서 얻은 바와 같은 경향을 보인다(Fig. 10). 그러나 실험에서 얻은 출구의 온도가 모사치보다 낮는데 그이유는 모델링에서는 막모듈에서 모듈외부 즉 공기중으로의 열흐름을 포함시키지 않았는데 실체는 모듈외부로의 열흐름이 있기 때문이다. 그러나 이는 feed 흐름 조건에 따른 온도 분포 변화를 관찰하는데는 큰영향을 끼치지 않을 것으로 사료된다.

Fig. 11, 12는 일정한  $Re$  조건하에서 채널 간격에 따른 모듈내에서의 유체의 온도 분포의 변화를 나타낸 것이다. 이들 그림들에서 볼 수 있듯이 채널 간격에 따른 온도분포의 변화는  $Re$ 에 따른 변화에 못지않게 현저하다. 각 채널에서 모듈의 출구쪽으로 갈수록 막표면부근에서의 온도 강하가 뚜렷이 일어나며 특히 채널 간격이 작아질수록 온도 변화가 심해지는 것을 알 수 있다. 주어진  $Re$  크기하에서 채널간격이 작아진다는 것은 모듈내에서의 feed의 유속은 큰 변화없으나 투과물 증발을 위한 에너지원인 feed의 흐름량이 상대적으로 작아짐을 의미한다. 그리하여 에너지원의 크기가 작아지므로 유속이 작은 막표면 근처 feed에서 온도 강하가 시작되어 채널 중심부로 급격히 퍼져나가 채널내의 온도 강하가 심해진다.  $Re$  크기가 클 경우 채널 간격크기에 따른 온도분포 변화가 덜 심해진다. 이는 높은  $Re$ 하에서는 앞에서도 언급한 바와 같이 채널내의 유속이 빨라질 뿐 아니라 feed의 공급속도도 커져  $y$  방향으로의 에너지 흐름이 용이해지므로 채널 간격크기 차이에 따른 유체의 온도변화가 완화되기 때문이다. 결과적으로 모듈 출구쪽 막표면에서의 feed 온도와 출구 feed 온도는 채널 간격이 작아짐에 따라 떨어지며  $Re$  크기가 작아질 경우 이들 온도 강하가 더욱 현저하게 일어남을 Fig. 13, 14에서 알 수 있다.

이상과 같이 모듈내의 채널간격, feed 유속이 모듈내에서의 feed 온도분포에 끼치는 영향을 모델 모사를 통해 살펴보았는데 채널간격이 클수록 혹은 feed 유속이 클수록 모듈내 feed 온도 강하가 작아짐이 관찰되었다. 모듈의 채널간격이 커지면 상대적으로 많은 량의 feed를 공급해야하며 단위 부피의 feed당 막 표면적이 작아지는 문제점이 있다. 반면에 주어진 채



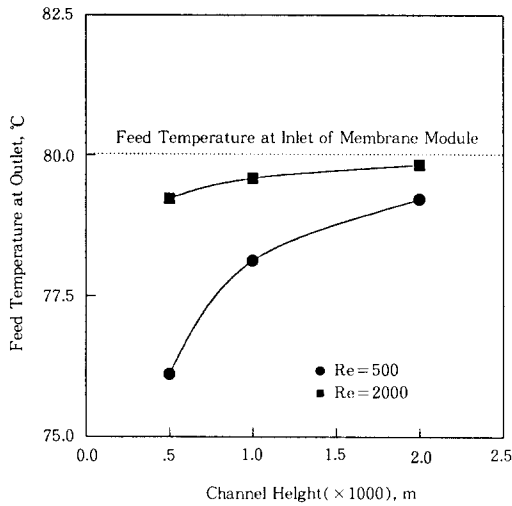


Fig. 14. Feed temperature at the outlet of membrane module with channel height at different Re.

널 간격내에서 feed 유속이 어느정도 이상 커지면 내부압력이 심각하게 증가하게 되며 수송을 위한 에너지 소비량도 증가하게 된다. 그러므로 모듈 설계시 주어진 처리량에 적합한 이들 변수 결정을 위한 최적화 작업이 필요하다.

## 5. 결론

본연구에서는 평판형 모듈내에서 feed 흐름 조건에 따른 모듈내 feed 온도 및 유속 분포를 예측할 수 있는 모델식을 확립하였고 모델 모사를 통해 모듈내의 채널 간격, Re 크기가 모듈내에서의 feed 온도 및 유속 분포에 끼치는 영향을 살펴보았다. Re 크기가 증가할수록 채널 간격 중앙부분에서의 유속이 증가하여 y 방향 즉 채널 두께방향으로의 유속구배가 커져 물질 및 열전달 속도가 커져 그결과 투과물 증발로 인한 feed의 온도변화가 작아진다. 반면에 채널 간격이 작아지면 투과물 증발을 위한 에너지원인 feed 흐름량이 상대적으로 작아져 모듈내의 feed의 온도가 강해진다. 또한 Re 크기에 따른 feed 온도 변화의 경향이 실험에서 얻은 결과와 일치함이 관찰이 되어 모델의 타당성이 확인되었다. 결론적으로 모듈내의 feed 온도강하를 최소화하기 위해 feed 흐름을 증가

시키거나 혹은 채널 간격을 증가시켜야 한다.

## 기호설명

- $c_p$  : specific heat capacity [J/kg-K]
- $\Delta h_v$  : evaporation enthalpy [J/kg]
- $h$  : channel height [m]
- $J$  : permeate flux [kg/m<sup>2</sup>-sec]
- $k$  : number of components in feed
- $k_n$  : heat transfer coefficient [m/sec]
- $L$  : channel length [m]
- $Pr$  : Prandtl number
- $q$  : heat flux [W/m<sup>2</sup>]
- $Re$  : Reynolds number
- $T$  : feed temperature [K]
- $v$  : velocity [m/sec]
- $\delta M$  : membrane thickness [m]
- $\eta$  : viscosity [N-sec/m<sup>2</sup>]
- $\theta$  : temperature [°C]
- $\lambda$  : thermal conductivity [W/m-K]
- $\rho$  : density [kg/m<sup>3</sup>]

## 첨자

- $i$  : component in feed
- $L$  : liquid
- $M$  : membrane
- $o$  : initial state
- $V$  : vapour

## 참고문헌

1. R. Rautenbach and R. Albrecht, *J. of Membrane Sci.*, **25**, 25(1985).
2. K. Kalantzi, M. Marin and H. Gibert, "Proceedings of 4th International Conference on Evaporation Processes in the Chemical Industry" R. Bakish Ed., Bakish Materials Co. Englewood, NJ 1989, pp.234-249.
3. S. C.Chapra and R.P.Canale, "Numerical Methods for Engineers", McGraw-Hill, 2nd Ed., NY, NY(1990).