

투과추출용 실관형 막모듈의 최적 설계 및 아세트산의 투과추출 효과에 관한 연구

이 호 원*

A Study on the Optimum Design of Hollow Fiber Module for Perstraction and
the Perstraction Effects of Acetic Acid

Lee Ho-Won*

Summary

The purpose of this study is to design effective hollow fiber modules for perstraction and to clarify the effect of mass transfer in the perstraction of acetic acid. The perstraction experiments of acetic acid have been undertaken under various operating conditions and potting density changes. In these experiments tangential flow and cross flow hollow fiber modules potted with different hollow fiber were used. Epoxy resin (AY103 type) is most pertinent to potting of hollow fiber due to its suitable viscosity as well as good adhesion and solvent resistance. In the case of using cross hollow fiber module, it was possible to reduce dead zone in mass transfer area and the boundary layer resistance in aqueous phase. Perstraction process using hollow fiber module was not restricted by flooding and channeling, and showed an enhancement over conventional extractor in mass tranfer effect.

서 론

투과추출은 투과(permeation)와 추출(extraction)의 합성어로서 막을 사이에 두고 유기상과 수용상의 흐름을 분리 유지시켜 막의 세공(pore)을 통한 용질의 확산에 의해 추출 분리하는 조작이다(Matsumura, 1986). 즉 막에 의해 두상이 분리되

어 있기 때문에 분산상을 기계적으로 분산시키는 공정 및 추출 후 두상을 분리시키는 공정이 불필요하고 범람 및 편류 현상이 억제되며 동반흐름(entrainment)에 의한 용매의 유실을 막을 수 있다. 뿐만아니라 이러한 투과추출 공정에 실관형 막모듈을 사용할 경우 두 상간의 접촉면적을 크게할 수 있어 보다 큰 물질전달 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

* 공과대학 화학공학과(Dept. of Chemical Engineering, Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)

실관막은 내경이 1,000 μm 이하의 fiber를 일컬으며 다공성 지지부 내의 세공을 통하여 분리가 이루어진다. 실관막 및 실관형 막 모듈에 대한 연구 개발은 1963년 미국의 Saline Water사를 시작으로 다우케미칼(1966년) 및 듀폰사(1969년)등에서 진행되어 왔는 바, 이들의 대부분은 주로 역삼투용으로서 현재 순수용으로 시판되고 있다. 의용공학 분야에서의 실관형 모듈의 대표적인 응용 예는 인공 신장기를 들 수 있는데, 실관형 모듈이 개발되기 전의 인공 신장기는 평판형이었다. 즉, 1955년에 Watschinger와 Kolff는 두 개의 나란한 cellophane 튜브를 망 위에 놓고 그 사이에 투석액을 통과시키는 인공 신장기를 개발하였고, 1960년에 Kill은 cellophane막과 망을 교대로 놓고 그 사이에 혈액과 투석액을 교대로 흘려보낼 수 있도록 고안된 평판형 인공 신장기를 개발하였다. 이러한 인공 신장기는 부피가 크고 효율이 낮으므로 다우 케미칼에서는 실관형 막모듈을 개발하여 이를 실용화 시켰는 바, 이는 내경 200 μm 정도의 셀룰로스 계통의 실관막을 수천개 모아서 조립한 것으로서 표면적 1m²내외이고 혈액 체류량은 200mL이하이다(Cross et. al., 1971). 또한 실관형 막모듈은 Monsanto사의 Prism 공정에서 발생하는 폐가스에서 수소회수 공정등의 기초 분야와 효소, 미생물 및 동식물 세포등의 생물반응기등에도 응용되고 있으며, 앞으로 실관막 및 모듈의 개발 및 특성에 대한 연구가 활발히 진행됨에 따라 이의 적용 분야는 더욱 확대될 전망이다(McGregor, 1986).

한편 아세트산은 셀룰로오스 아세테이트, 초산 비닐, 합성고무, 섬유 및 의약품 등의 주요 원료로서 사용되며, 이러한 공정에서 발생하는 부산물 및 폐수 중에는 아세트산이 다량 함유되어 있다(Mark, 1978). 이러한 아세트산 혼합물로 부터의 아세트산 분리는 물과 아세트산의 낮은 휘발도로 인해 일반적인 증류법 보다는 용매추출, 공비 증류 및 추출 증류에 의한 방법이 더 적당하다. 특히 Eaglesfield(1953) 등의 아세트산 분리 방법에 대한 비용 평가결과에 의하면 아세트산 함유량이 35% (w/w)이하에서는 용매 추출에 의한 분리가 공비 증류 및 추출 증류에 의한 분리보다 매우 유리한 것으로 보고된 바 있어 일반적인 공정에서의 아세트산 분리는 용매 추출에 의한 방법이 가장 적당하

다.

따라서 본 연구에서는 투과추출용 실관형 막모듈 개발의 일환으로서 점선흐름 실관형 막모듈(tangential flow hollow fiber module, 이하 TFHFM) 및 교차흐름 실관형 막 모듈(cross flow hollow fiber module, 이하 CFHFM)을 고안 제작하여 이를 이용한 아세트산의 투과추출 실험을 행하였다. 이 실험 결과로부터 수용상 및 유기상의 유속 변화, 압력차 변화 및 포팅밀도(potting density) 변화에 따른 총괄물질전달 계수의 변화로서 물질전달 속도를 규명하였으며, TFHFM과 CFHFM을 이용한 투과추출 공정과 기존의 추출 공정의 물질전달 효과를 비교함으로써 실관형 막모듈을 이용한 투과추출의 물질전달 효과 및 추출속도 증진을 위한 기본 방향을 제시하였다.

실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략적 공정도를 Fig. 1에 나타내었다. 일정 온도(25 \pm 0.2 $^{\circ}\text{C}$)로 유지

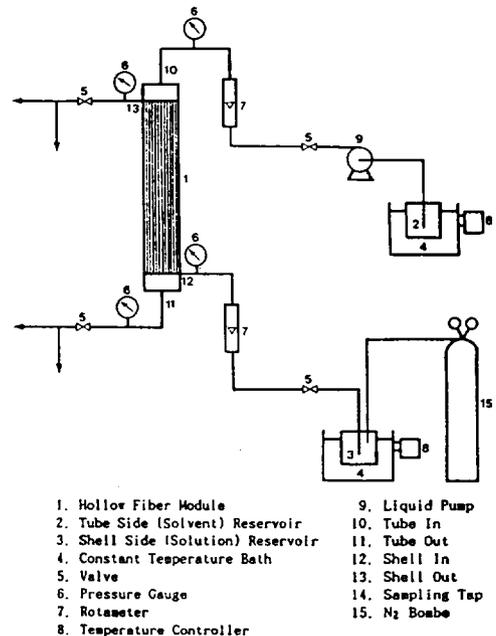


Fig. 1. Schematic diagram of a hollow fiber module and flow loop for perstraction.

된 아세트산 수용상 및 유기용매인 MIBK (methyl-isobutyl-ketone)는 일정 압력과 유량으로서 각각 질소 압력과 원심 펌프(Micro Pump Co., U.S. A.)에 의해 막모듈의 셸 측(shell side)과 튜브 측(tube side)으로 각각 도입된다. 이때 유기상 및 수용상의 미세 유량과 미세 압력은 막 추출기 양단에 있는 조류 밸브(throttle valve)와 압력 조절 밸브(model B-4H, Nupro Co., U.S. A.)로서 조절하였으며, 막모듈의 도입구 및 배출구에 압력계(0~206.8kPa, 정도 13.8 kPa, 우진기계, 한국)를 설치하여 막모듈 내의 압력을 측정하였다. 또한 막모듈 내로의 용액의 도입유량은 rotameter(0~100mL/min, 정도 5 mL/min, Tokyo Keiso Co., Japan)로서 측정하였으며, 실험장치의 모든 배관은 부식 방지를 위해 스테인레스 스틸 316 튜브로 하였다.

2. 실관막

본 연구에 사용된 막은 미국 Celanese사에서 제

조된 상업용 실관막으로서 세공률(porosity), 세공 크기(pore size) 및 내 외경이 서로 다른 Celgard X10-400 및 Celgard X20-240의 2종류 막을 사용하였다. 이 실관막은 모두 산, 알칼리 및 용매등에 내성이 뛰어난 폴리프로필렌 재질의 소수성 막으로서 막의 세공(pore)은 Fig. 2의 전자 현미경 사진에 나타난 바와 같이 타원형이며, X10-400 및 X20-240의 유효 세공 크기는 각각 0.05 μ m 및 0.065 μ m 이고 그 밖의 제조회사에 의해 제시된 특성값들을 Table 1에 나타내었다.

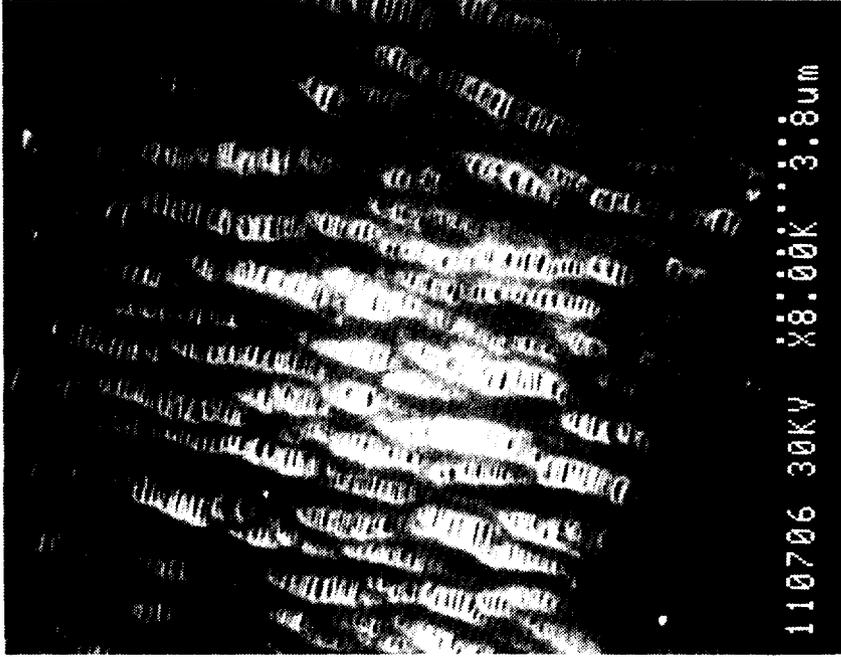
3. 분석

아세트산의 분석은 0.001N, 0.005N 및 0.01N NaOH용액으로 중화적정하여 측정하였는 바, 이때의 지시약으로는 phenolphthalein을 사용하였고 pH meter(DD-215, Dong Woo Medical System Co.)로 확인 분석하였다.

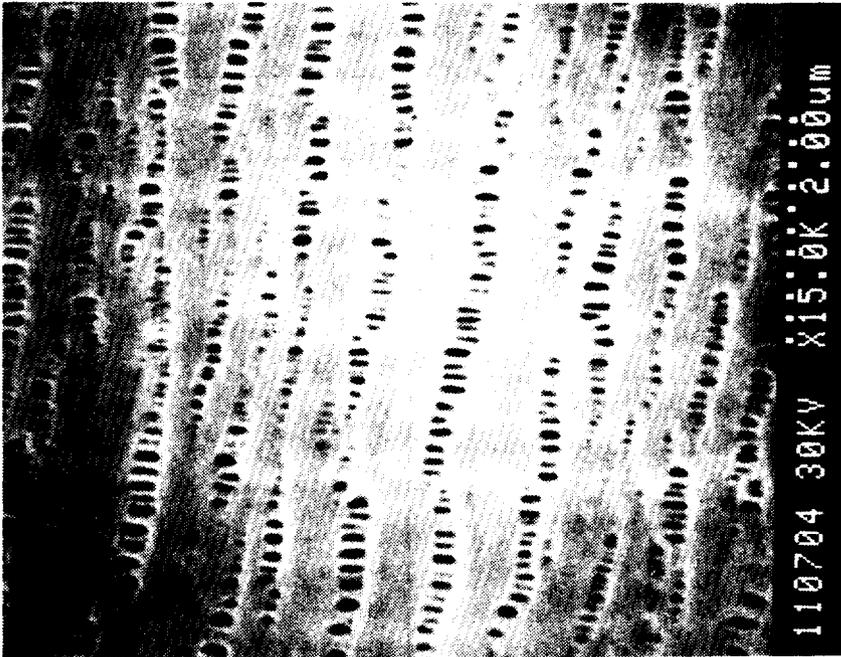
4. 분배계수의 측정

Table 1. Characteristics of microporous hollow fiber.

Characteristics	Specification		Test Method
	X10-400	X20-240	
Material	Polypropylene	Polypropylene	
Property	Hydrophobic	Hydrophobic	
Porosity	30 %	40 %	ASTM D-2873
Pore Dimensions	0.05 × 0.15 μ m	0.065 × 0.19 μ m	S. E. M.
Effective Pore Size	0.05 μ m	0.065 μ m	S. E. M.
Tensile Break Strength	200 g/filament	380 g/filament	ASTM E96-66
Resistance to Air Flow	20~60 Gurley Sec.	10~40 Gurley Sec.	ASTM D-729(B)
Shrinkage, Axial Direction (Unrestrained)	2.5 % Maximum	2.5 % Maximum	ASTM D-1204 60 Min., 90 $^{\circ}$ C
Internal Diameter	400 μ m	240 μ m	HCSPD Method
Wall Thickness	30 μ m	30 μ m	HCSPD Method
Outer Diameter	460 μ m	300 μ m	HCSPD Method



X20-240 HF



X10-400 HF

Fig. 2. Outside surface view of hollow fiber.

순수한 유기 용매와 일정 농도의 수용액을 각각 50mL씩 취하여 플라스크에 넣고, 완전 밀봉 후 25℃로 향온한 채 자석교반기로 24시간 교반하였다. 교반 후 고속 원심 분리기 (20PR-52D, Hitachi, Japan)를 이용하여 4000RPM으로 15분 동안 회전시킨 후, 두상을 정제, 분리하고 각 상의 농도를 측정하여 분배계수를 구하였는 바, 측정된 아세트산의 분배계수는 0.5mol/L 이하의 농도에서 0.488로 일정하였다.

5. 추출 실험

실험의 진행은 먼저 유기상이 실관막과 접촉하기 전에 수용상을 실관형 막모듈의 셀측 도입구를 통하여 보낸 후 유기상을 수용상과 향류 방향으로 보내면서 각 상의 압력과 유속을 조절하였으며, 이때의 막 내외부의 압력차는 34.5~206.8kPa로 유지하였는 바, 이러한 조작은 실관막의 세공을 통해서 유기상이 누출함으로써 생기는 에멀전 현상을 방지하기 위해 반드시 필요하다.

수용상과 유기상의 유속과 실관막 내외의 압력을 고정시킨 뒤, 4~5분 정도의 시간 간격을 두어 정상상태를 유지한 후 각 상의 시료를 채취하여 농도를 분석하였다.

모듈의 설계 및 제작

1. Cell의 설계

접선 흐름 실관형 cell은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 수용상의 흐름이 실관막의 접선 방향으로 흐르게 되며, 유로의 직경은 10mm인 원형으로 하였고 유로의 길이는 240mm 되게 튜라늄으로 제작하였다. 이때 막 추출기에서 실제로 추출이 행해지는 부분은 유기용매의 도입구 및 배출구의 포팅 부분을 제외한 용매 도입구 및 배출구로부터 30mm 떨어진 부분으로 하였다.

한편 수용상의 흐름이 실관막을 교차하여 흐르도록 함으로써 수용상 측의 물질전달 저항을 감소시키기 위하여 Fig. 4와 같은 교차흐름 실관형 cell을 고안 제작하였는 바, 유로의 너비 및 높이를 각각 6mm 및 13.09mm로 하여 유로면적을 접선흐름 실

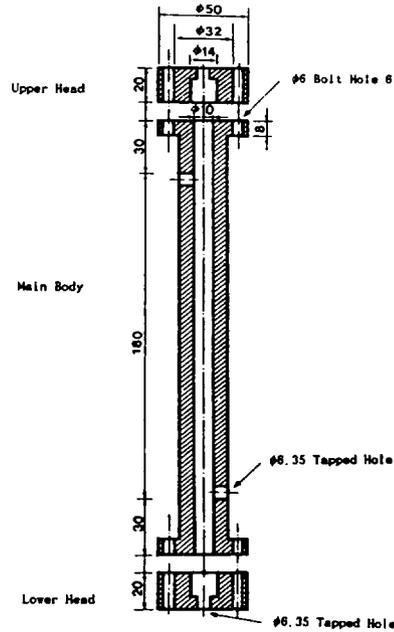


Fig. 3. Schematic diagram of tangential flow hollow fiber module.

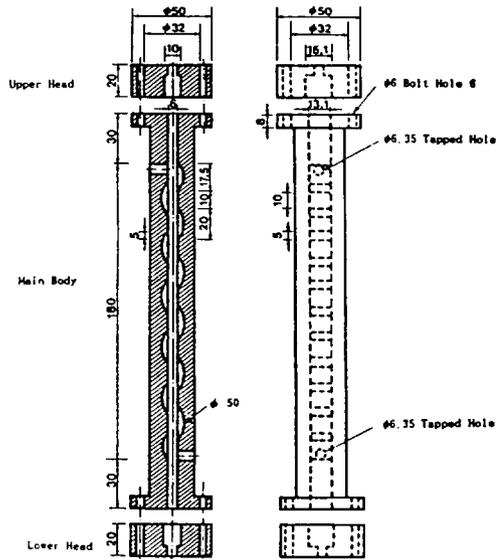


Fig. 4. Schematic diagram of cross flow hollow fiber module.

관형 cell의 유로 면적과 같게 0.7854cm²으로 하였으며, 유로의 길이 또한 포팅 부분을 제외한

180mm로 하여 두 모듈의 성능을 비교할 수 있도록 제작하였다. 두 cell은 모두 윗판 및 아래판을 보울트로서 본체와 고정시킬 수 있게 하였고, 완전한 밀착을 위해 본체와 판 사이에 Teflon 재질의 o-ring을 삽입하였다.

2. 포팅화합물 (potting compound)

실관막의 포팅은 실관형 cell이 추출기로서의 기능을 갖기 위해서는 중요하고도 필수적인 조작이며, 따라서 포팅화합물의 선택 또한 대단히 중요한바, 추출용 실관형 모듈의 포팅 화합물은 막과 cell의 접착성 뿐만 아니라 내용매성이 강한 것이어야 하며 포팅하기에 적당한 점도를 갖고 있어야 한다.

포팅화합물의 접착성과 내용매성에 대한 성능 평가를 행하여 그 결과를 Table 2에 요약하여 나타내었다. 에폭시 수지 계열의 화합물, 그 중에서도 AY103 및 AW136이 다른 접착제에 비해 접착성 및 내용매성이 우수하였으나 AW136의 경우 고 점도성 (35,000~40,000cp)으로 인해 모듈 내에 고르게 포팅하기 어려운 단점이 있었으며, AY103의 경우에는 접착성 및 내용매성이 클 뿐만 아니라 포팅하기에 적합한 점도(600~950cp)를 갖고 있어 AY103이 추출용 실관형 막 모듈의 포팅화합물로서 가장 적합하였다.

한편 포팅화합물의 접착성에 대한 테스트 결과 폴리프로필렌 재질의 평판막은 어떠한 포팅화합물이라도 강한 접착력을 보이지 않았으나 폴리프로필렌 재질의 실관막에 대해서는 강한 접착력을 나타내었는바, 이는 평판막과 실관막의 기하학적 구조의 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

3. 실관막의 포팅

실관막의 포팅은 주로 원심력을 이용하여 포팅 화합물을 cell내로 보내주는 장치를 많이 이용하나, 이러한 방법으로는 각 실관막의 반경방향으로의 위치를 일정하게 하는 것이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 각 실관막을 반경 방향에 따라 균일하게 포팅하기 위하여 아래와 같은 방법을 사용하였는바, 그 절차는 다음과 같다.

- 1) 각 실관막을 길이가 약 28cm 정도 되게 자른 후, 반경방향에 대한 각 실관막의 위치가 일정하도록 Fig.5와 같이 접착 tape위에 실관막을 나란히 붙여 감는다.
- 2) 실관막 bundle을 모듈 본체에 넣고 포팅용 head에 molding용 PTFE spray (Dow Corning, Germany)를 뿌린 후 이를 본체와 결합시킨다.
- 3) 에폭시 수지와 경화제를 무게비로 100대 18로 충분히 섞은 후, 주사기로 모듈의 셀측 도입구

Table 2. The performance of potting compound.

Type	Source	Adhesive	Weight Mix Ratio (Resin/Hardner)	Work Life	Cure Time	Adhesion	Solvent Resistance	Physical strength
Epoxy	Ciba-Geigy	AY103	10/1.8	2.5 Hours	3 Days at 23°C	Good	Good	Moderate
Epoxy	Ciba-Geigy	AW136	5 : 2	30~60 Min.	1 Day at 23°C	Good	Good	Hard
Epoxy	Ciba-Geigy	LY554	5 : 1	3 Hours	2-4Days at 23°C	Good	Good	Moderate
Urethane	Bison	Colle Polyurethan	5 : 1	30~60 Min.	1 Day at 20°C	Good	Poor	Moderate
Urethane	H. B. Fuller	UR-2187	2 : 1	60 Min.	7 Days at 25°C	Poor	Poor	Moderate
Plastic-Adhesive	3M	Scotch-Grip4693	None	—	—	Good	Poor	Soft

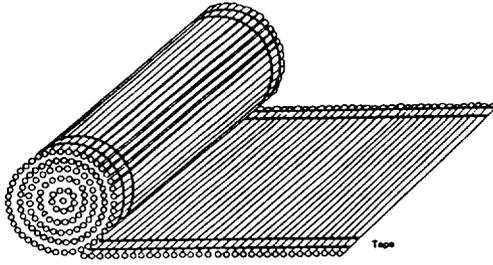


Fig. 5. Representation of winding hollow fiber into a roll.

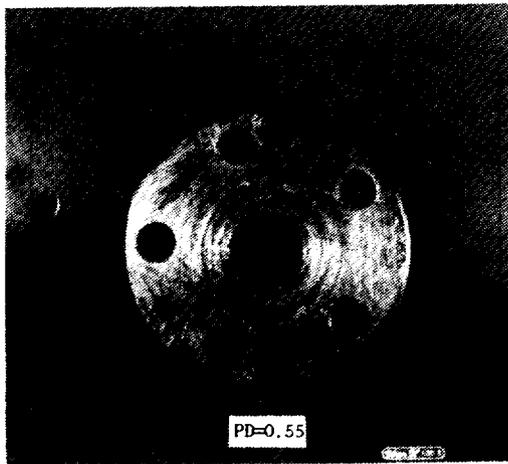
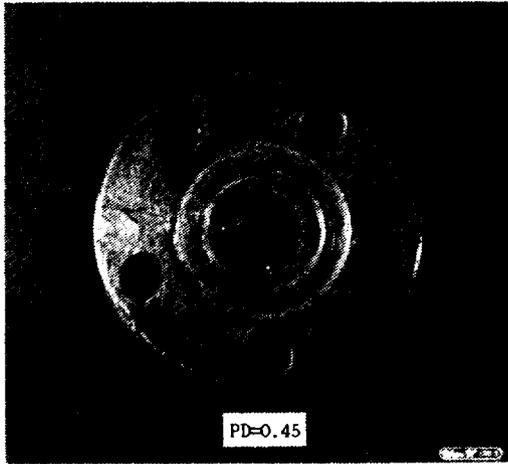


Fig. 6. Photographs for X10-400 hollow fiber bundle surface.

를 통하여 미리 계산된 양의 에폭시 수지를 넣는다. 이때 에폭시 수지가 실관막의 열려진 입구를 통하여 들어가 실관막이 막히는 것을 방지하기 위하여 실관막의 입구를 실리콘 수지 또는 파라핀을 사용하여 미리 막아야 한다.

4) 3~4시간 경과후 나머지 반대 방향에 대해서도 3)과 같은 방법으로 포팅한다.

5) 3~4일 경과후 에폭시 수지가 충분히 굳으면 포팅된 부분만을 액체질소에 넣어 경도를 높인 후, 끝이 날카로운 칼로 잘라내어 bundle 표면을 고르게 한다.

6) 모듈의 튜브측과 셸측에 각각 종류수를 보내서 누수가 생기는가를 확인한다. 위의 방법으로 제작된 bundle의 단면은 Fig. 6과 같으며, bundle 내에서 실관막의 반경 방향으로의 위치는 거의 일정한 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 실관형 막모듈은 실관막의 종류, 포팅밀도 및 흐름 형태에 따라 12가지로서 이에 대한 단위부피당의 막 표면적은 Table 3과 같다.

Table 3. Hollow fiber module details.

Module No.	Membrane	Potting Density	No. of Fiber	Surface Area per Unit Volume(cm^2/cm^3)	Flow Type
1	X10-400	0.1	47	8.65	TF
2	X20-240	0.1	111	13.32	TF
3	X10-400	0.25	118	21.71	TF
4	X10-400	0.35	165	30.36	TF
5	X10-400	0.45	213	39.19	TF
6	X10-400	0.55	260	47.84	TF
7	X10-400	0.35	165	30.36	CF
8	X10-400	0.45	213	39.19	CF
9	X20-240	0.35	389	46.68	TF
10	X20-240	0.45	500	60	TF
11	X20-240	0.35	389	46.68	CF
12	X20-240	0.45	500	60	CF

* Flow type의 TF는 tangential flow, CF는 cross flow를 의미함.

실험 결과 및 고찰

1. 물질전달속도

일정한 수용상 및 유기상 유속에서 각 상의 압력

차 변화에 대한 총괄물질전달계수의 영향을 조사하여 이를 Fig. 7에 나타내었다. 34.5~206.8kPa까지의 압력차 변화에 대하여 총괄물질전달계수의 변화는 없었으며, 이 결과로부터 임계압력 이내에서의 막 세공내의 물질전달속도는 용질의 확산에 의해서만 영향 받음을 알 수 있다.

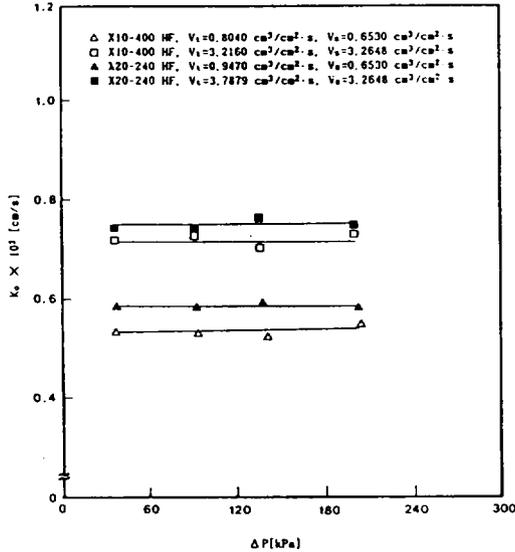


Fig. 7. Effect of applied pressure difference on overall mass transfer coefficient. (PD=0.35)

또한 총괄물질전달계수에 대한 포팅밀도와 유기상 및 수용상 유속의 영향을 살펴보기 위해서 수용상의 유속을 일정하게 유지하고 유기상의 유속을 0.2551~11.238cm/s로 변화시켰을 때의 총괄물질전달계수의 변화를 Fig. 8에 나타내었고, Fig. 9에는 일정 유기상 유속에서 수용상 유속을 0.1415~4.7161cm/s로 변화시켰을 때의 총괄물질전달계수의 변화를 각각 나타내었다. 그 결과 유기상 유속 및 수용상 유속의 증가에 따라 총괄물질전달계수는 비선형적으로 증가하였는 바, 이는 각 상 경계층에서의 물질전달저항이 각 상 유속의 증가에 따라 감소하기 때문이며, 수용상 유속보다는 유기상 유속 변화에 대하여 더 큰 변화를 보임을 알 수 있다. 또한 포팅밀도의 증가에 따라 총괄물질전달계수는 감소하였는 바, 이는 포팅밀도가 증가함에 따라 실관막 간의 접촉으로 인한 사각 면적의 증가와 모듈내에 정체되는 수용상이 증가하기 때문으로 사료된다.

한편 유기상 및 수용상 유량 변화에 따른 교차흐름 실관형 모듈에서의 총괄물질전달계수 변화를 점선흐름 실관형 모듈에서의 결과와 비교하여 Fig. 10 및 Fig. 11에 나타내었다. 이 결과 교차흐름 실관형 모듈에서의 경우 점선흐름 실관형 모듈에서의 경우와 같이 유기상 및 수용상 유량이 증가함에 따라 물질전달저항의 감소로 인해 물질전달속도는 증가하였고, 수용상 유량 보다는 유기상 유량의 변화에

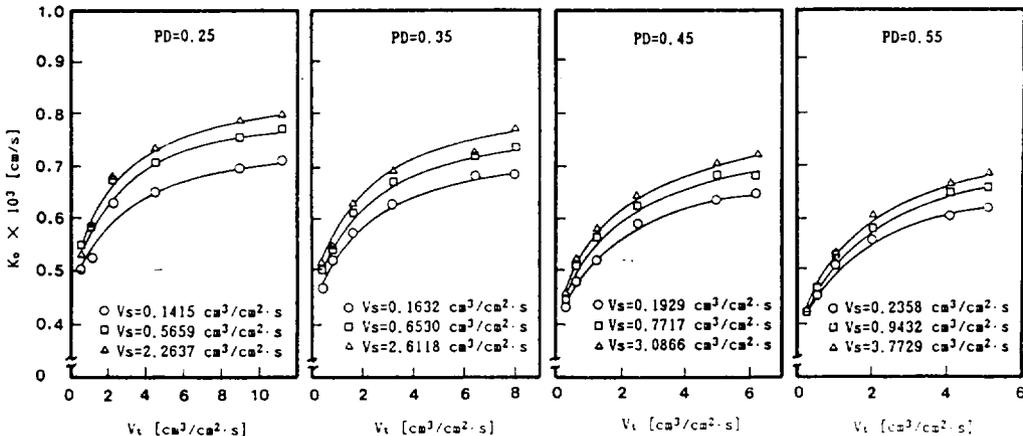


Fig. 8. Effect of organic phase velocity on overall mass transfer coefficient. (X10-400 hollow fiber, $\Delta P=68.8 \text{ kPa}$)

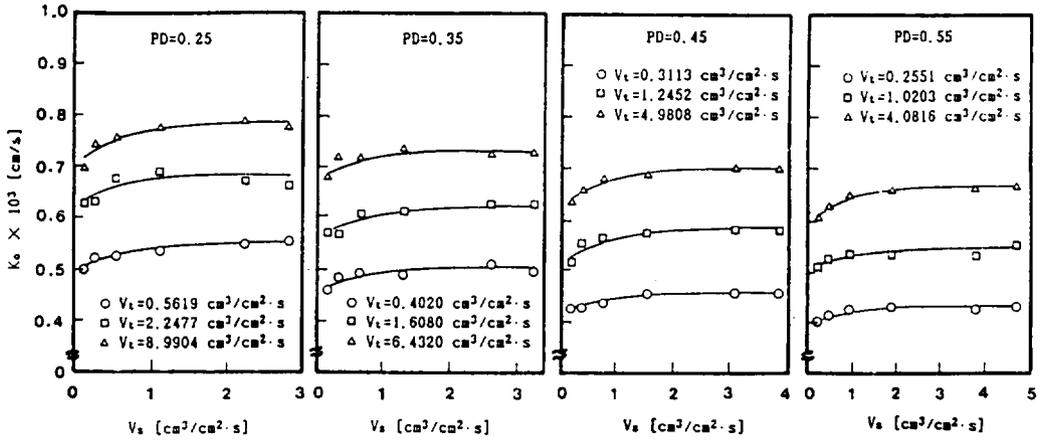


Fig. 9. Effect of aqueous phase velocity on overall mass transfer coefficient, (X10-400 hollow fiber, $\Delta P=68.9\text{kPa}$)

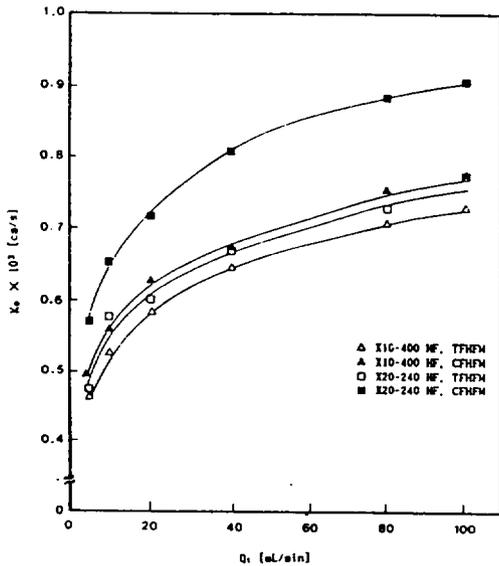


Fig. 10. Comparison of overall mass transfer coefficient in CFHF with that in TFHF. (PD=0.45, $Q_t=80\text{mL/min}$)

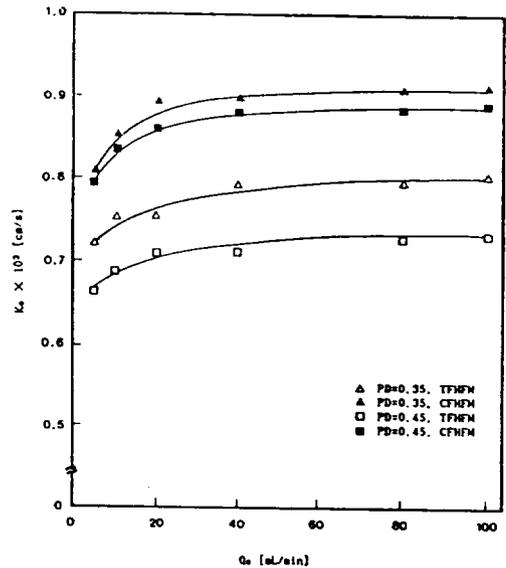


Fig. 11. Comparison of overall mass transfer coefficient in CFHF with that in TFHF. (X20-240 hollow fiber, $Q_t=80\text{mL/min}$)

따라 물질전달속도는 더 큰 변화율 보여 물질전달 저항은 수용상에서보다 유기상에서 더 큼을 예측할 수 있으며, 동일한 조건하에서 교차흐름 실관형 모듈에서의 물질전달속도는 접선흐름 실관형 모듈의 경우보다 빠른 것으로 나타났다. 이는 교차흐름에 의한 사각 면적 및 수용상 경계층 저항의 감소로 설명될 수 있는 바, 그림에 나타난 바와 같이 포팅

된 실관막의 수가 증가할수록 두가지 형태 모듈간의 물질전달속도 차가 커지는 것으로 부터 후자의 이유보다 전자의 이유에 의한 효과가 더 큼을 예측할 수 있다.

2. 기존의 추출 공정과의 비교

액액 추출과 관련된 여러 문제점들로 인해 많은 추출장치들이 꾸준히 개발되어 왔으며 그 중에서도 가장 많이 사용되는 추출장치로는 층전탑. 다만 맥동탑 및 mixer-settler를 들 수 있다. 이러한 추출장치를 이용한 추출 공정과 실관형 막모듈을 이용한 투과추출 공정을 비교하기 위해서는 먼저 범람(flooding), 편류(channeling) 및 부하(loadings) 등의 조작 인자에 대한 언급이 필요하다(Perry, 1973).

범람은 탑내에 하나의 상만이 과잉으로 축적되는 현상으로, Crawford와 Wilke(1951)에 의하면 두 유체간의 밀도차, 물질전달 면적 및 충전물질 등이 범람에 영향을 준다고 보고된 바 있으나, 범람을 억제하는 가장 확실한 방법은 유속을 감소시키는 것이므로 범람에 의해 조작 유속이 큰 제약을 받는다. 그러나 실관형 막모듈을 이용한 투과추출에서는 두 상이 막에 의해 분리되어 있기 때문에 기존의 재래식 추출장치에 비해 40~300배 정도의 큰 유속으로도 조작이 가능하다(Takahashi, 1974).

편류는 범람과 반대로 유속이 낮은 경우에 일어나고, 부하는 편류와 범람의 전이 영역상에 존재하는 최적의 조작조건으로서 일반적으로 범람조건 50~75%사이에서 일어난다. 그러나 실관형 모듈을 이용한 투과추출에서는 두 상이 막에 의해 분리되어 있어 기존의 추출장치에 비해 낮은 유속에서도 편류현상 없이 조작이 가능하고, 40~300배 정도의 큰 유속으로도 범람 현상 없이 조작이 가능하기 때문에 부하의 범위가 기존의 추출장치에 비해 대단히 크다.

또한 기존의 추출장치와의 비교인자로서 중요한 것은 추출장치의 효율이다. 추출장치의 효율은 다음의 식(1) 및 식(2)로서 정의되는 HETS(height equivalent to a theoretical stage)와 VE(volumetric efficiency)로서 비교할 수 있다(Tojo, 1980).

$$HETS = \frac{V_t}{K_o a} \ln \frac{\Lambda}{\Lambda - 1} \quad (1)$$

$$VE = \frac{V_t + V_s}{HETS} \quad (2)$$

여기서 Λ 는 V_t/mV_s 로 정의 되는 추출인자이다.

HETS와 VE는 식에 나타난 바와 같이 유기상 및 수용상 유속의 함수이며, 유속변화에 따른 HETS 및 VE의 변화를 고찰하기 위하여 점선흐름 실관형 모듈 및 교차흐름 실관형 모듈에서의 유기상 유속 및 수용상 유속 변화에 따른 HETS 및 VE의 변화를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었는 바, 이때 교차흐름 실관형 모듈에서의 수용상 유속은 다음과 같은 식으로 부터 계산된 평균값을 사용하였다.

$$V_s = \frac{Q_s}{(\text{total working volume} / \text{height of module})} \quad (3)$$

그 결과 유기상 및 수용상 유속 증가에 따라 HETS는 비선형적으로 증가하나 VE는 거의 선형적으로 증가하였으며, 교차흐름 실관형 모듈의 경우가 점선흐름 실관형 모듈의 경우보다 HETS는 낮고, VE는 높아 보다 효과적임을 알 수 있다.

한편, 실관형 막모듈과 다른 기존의 추출장치의 추출효율을 비교하여 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 이 결과 실관형 막모듈이 층전 추출탑, 맥동 추출탑 및 왕복판 추출기 등의 기존 추출장치에 비

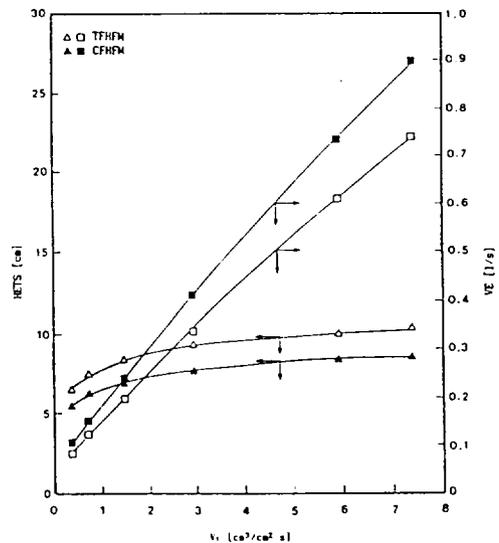


Fig. 12. Height equivalent to theoretical stage and volumetric efficiency as function of organic phase velocity. (X20-240 hollow fiber, PD=0.45, $V_s=0.0129\text{cm}^1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

Table 4. Comparison of column performance for MIBK-HAc-water system.

Type of Column	Column Dia. [cm]	$V_t + V_m$ [cm/s]	Minimum HETS [cm]	VE [1/s]	Authors (Reference)
Hollow Fiber Extraction Module (Tangential Flow)	1	0.93	7.38	0.126	This Work
Hollow Fiber Extraction Module (Cross Flow)	1	0.93	6.18	0.156	This Work
Hollow Fiber Extraction Module (Tangential Flow)	1	3.14	25	0.339	This Work
Hollow Fiber Extraction Module (Cross Flow)	1	3.14	7.62	0.412	This Work
Pulsed Sieve-Tray	4.0	0.16	10.0	0.016	Chantry
Pulsed Packed	4.0	0.17	13.0	0.013	Chantry
Pulsed Sieve-Plate	5.1	0.46	11.9	0.039	Smoot et. al (Tojo, 1980)
Pulsed Spray	3.9	0.88	27.9	0.032	Billerbeck et. al.
Multystage Vibrating Disk	5.0	1.01	14.0	0.072	Kakuji et. al.
Multystage Vibrating and Rotating Disk	5.0	1.09	11.9	0.092	Kakuji et. al.
Reciprocating Plate	7.6	1.92	19.7	0.098	Karr & Lo
Reciprocating Plate	7.6	2.07	19.1	0.108	Karr & Lo
Reciprocating Wire Mesh Packed	7.6	2.18	29.1	0.075	Welleck (Tojo, 1980)
Recoprocating Wire Mesh Packed	7.6	2.94	24.9	0.118	Welleck (Tojo, 1980)
Controlled-Cycling Sieve Plate	5.1	2.55	36.6	0.070	Szabo et. al (Tojo, 1980)

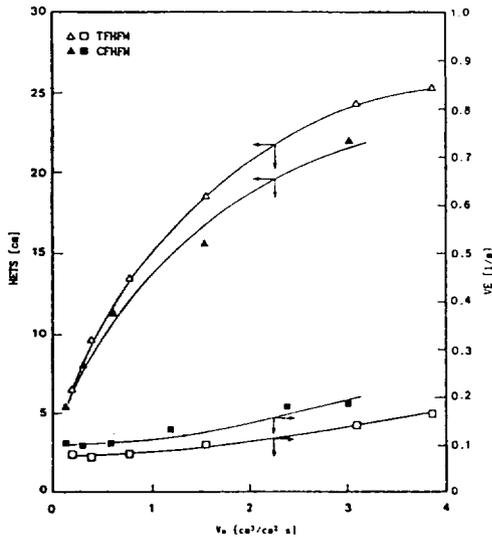


Fig. 13. Height equivalent to theoretical stage and volumetric efficiency as function of aqueous phase velocity, (X20-240 hollow fiber, PD=0.45, $V_f=0.3684\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

해 낮은 HETS 및 높은 VE를 나타내고 있는 바, 이는 다른 추출장치에 비해 단위 부피당의 표면적이 매우 크기 때문에 생기는 결과이다.

따라서 실관형 모듈을 이용한 투과추출 공정은 막에 의해 두 상이 분리되어 있다는 점과 단위 부

피당의 표면적이 크다는 점으로 인해 범람 및 편류 등에 의한 조작조건의 제한이 없고, 보다 큰 물질 전달 효과를 얻을 수 있다.

적 요

본 연구는 투과추출용 실관형 막모듈의 최적 설계 및 이를 이용한 아세트산의 투과추출 효과를 규명하기 위한 연구로서, 세공률과 두께가 서로 다른 폴리프로필렌 재질의 실관막을 포팅한 접선희름 및 교차흐름 실관형 막모듈을 이용하여 아세트산의 투과추출 실험을 행하였다.

이 결과 실관막의 포팅화합물로서는 AY103 type의 에폭시 수지가 우수한 접착성 및 내용매성 뿐만 아니라 적절한 점도를 갖고 있어 투과추출용 막모듈의 포팅화합물로서 가장 적합하였다.

한편, 접선희름 실관형 막모듈을 이용한 경우 포팅밀도의 증가에 따라 물질전달속도는 감소하였으며, 교차흐름 실관형 막모듈의 경우에는 교차흐름에 의한 사각면적 및 수용상 경계층 저항의 감소로 인해 보다 큰 물질전달속도를 나타내었다. 또한 실관형 막모듈을 이용한 투과추출 공정은 다른 기존의 추출 공정과 비교해 범람 및 편류 등에 의한 조작조건의 제한이 없었고, 보다 큰 물질전달 효과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- Billberk, C. J., J. Farquhar, R. C. Reid, J. D. Bresee and A. S. Hoffman, 1956. Performance of a Pulsed Spray column, *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 48(2), pp. 183-193.
- Chantry, W. A., R. L. Von Berg and H. F. Wiegandt, 1955. Application of Pulsation to Liquid-Liquid Extraction, *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 47(6), pp. 1153-1161.
- Crawford, J. W. and C. R. Wilke, 1951. Limiting Flows in Packed Extraction Columns, *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 47(8), pp. 423-433.
- Cross, R. A., W. H. Tyson and D. S. Cleveland, 1971. Assymmetric Hollow Fiber Membranes for Dialysis, *Trans. Amer. Soc. Artif. Int. Organs.*, Vol. 17, pp. 279-288.
- Eaglesfield, P., B. K. Kelly and J. F. Short, 1953. Recovery of Acetic Acid from Dilute Aqueous Solutions by Liquid-Liquid Extraction -Part 2, *Ind. Chem.*, Vol. 29, pp. 243-353.
- Karr, A. E. and T. C. Lo. 1972. Development of a Laboratory Scale Reciprocating Plate Extraction Columne, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 11(4), pp. 495-503.
- Mark, H. F. et. al., 1978. Kirk-Othmer En-

- cyclopedia of Chemical Technology : Vol. 8, Wiley-Interscience.
- Matsumura, M. and H. Märkl, 1986, Elimination of Ethanol Inhibition by Perstraction, *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 28, pp. 534-545.
- McGregor, W.C., 1986, Membrane Separations in Biotechnology, Marcel Dekker, Inc..
- Perry, R.H. and T. H. Chilton, 1973, Chemical Engineer's Handbook, 5th ed., McGraw-Hill.
- Prasad, R., A. Kiani, R. R. Bhave and K. K. Sirkar, 1986, Further Studies on Solvent Extraction with Immobilized Interfaces in Microporous Hydrophobic Membrane, *J. Memb. Sci.*, Vol. 26, pp. 79-97.
- Takahashi, T., Y. Akagi, K. Fujita and T. Kishimoto, 1974, Flooding Velocities of Gas-Liquid and Liquid-Liquid Contactors of Column Type, *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 7(3), pp. 223-234.
- Tojo, K., K. Miyamoto and T. Yano, 1980, Design Method and Performance Characteristics of a Multistage Vibrating Disk Column Extractor, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 19(3), pp. 459-465.