

Microfiltration Helical Module들에서 Hollow Fiber의 Diameter와 Curvature 및 Turn수의 변화에 따른 성능변화에 관한 연구

이 광 현

동의대학교 공과대학 화학공학과
(1997년 6월 3일 접수, 1997년 6월 30일 채택)

The Effect of the Variation of Hollow Fiber Diameter and Curvature and Turn Number on Performance for Microfiltration Helical Modules

Kwang Hyun Lee

Dept. of Chemical Engineering, Donggeui University, Pusan 614-714, Korea
(Received June 3, 1997, Accepted June 30, 1997)

요 약 : Hollow fiber의 diameter와 curvature 및 turn 수 등의 변화에 따른 첫번째 모듈 set와 두번째 모듈 set 사이의 성능비교가 이루어졌다. 모든 실험들은 같은 transmembrane pressure와 막면적당 에너지 소모하에서 수행되었다. 첫번째 모듈 set에 대해서 Dean vortices에 의한 농도분극과 막오염현상의 감소시키는 효과가 매우 작음을 알 수 있었다. 두번째 모듈 set에 대해서 115%의 투과 flux 향상값(투과 flux 증분 $\times 100$ /선형 모듈의 투과 flux)을 보였다. 이로부터 두번째 모듈 set가 yeast suspension에 의한 농도분극과 막오염현상의 감소에 훨씬 효과적임을 알 수 있었다.

Abstract: The performances of both module sets made by different methods for helical module were compared. All experiments were conducted simultaneously at the same transmembrane pressure and energy consumption per membrane area. The effects of Dean vortices for reducing concentration polarization and fouling were low for the first module set. The increase of 115% for permeate flux improvement(permeate flux difference $\times 100$ /permeate flux of linear module) was measured. The second module set was more effective in reducing concentration polarization and fouling.

1. 서 론

분리를 위해 압력구동 막공정을 사용함에 있어서 심각한 제한은 막표면과 막표면 가까이에서의 용존 및 부유 용질의 성층과 침착현상이다. 이러한 현상들을 각각 농도분극 및 막오염이라고 불린다. 지난 몇 년 동안 여러 연구자들에 의해 유체의 불안정성이 농도분극과 막오염을 경험한 막들에 대해서 효과적으로 탈분극화 및 세척에 이용될 수 있음을 보였다[1].

혼합과 vortices를 생성하는 회전체를 이용한 여러 모듈들이 개발되었으나[2, 3] 회전 장치에 기초한 어떠한 설계도 본질적으로 정지계보다 더 많은 에너지를 요구하고, 회전계에서의 복잡한 구조 및 밀봉의 어려움 때문에 대규모 상업화로써의 개발에 걸림돌이 되고 있다. 많은 연구자들은 또 다른 유체의 불안정성-Dean vortices가 농도분극을 감소시킬 수 있고 따라서 압력구동 막공정의 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 보였다.

Mockros와 Weissman[4]은 나선형으로 감긴 투과성의 관들을 사용하여 생리현상에 의한 개스가 모듈을 따라서 층류로 흐르는 괴로 전달되는 것을 조사하였다. 그들은 유도된 2차흐름 때문에 기체전달 속도에서 큰 향상이 있음을 실험적 및 이론적으로 증명하였다. Srinivasan과 Tien[5]은 굽은 관형막 관에서 역삼투공정의 물질전달 특성에 대하여 해석적인 연구를 수행하였다. 이전의 여러 연구자들에 의해 개발된 속도 profile에 기초해서, 굽은 관형막 관에서의 2성분 염의 농도 분포가 얻어졌다. 그들은 관의 굴곡 때문에 막을 통한 물질전달 속도에 있어서 큰 증가가 있게됨을 알았다.

Nunge와 Adams[6]은 부분적으로 투과성이기도 하며 또 부분적으로 비투과성인 분할 막을 사용하여 굽은 관계에서의 역삼투를 위한 새로운 막설계를 하였다. Bend의 바깥쪽에는 효과적인 염-배제막을, 내부에는 상대적으로 낮은 염-배제막이 사용되었다. 그들은 2차흐름이 내부 가까운 곳이라기 보다는 bend의 바깥 가까이에서 상대적으로 훨씬 강도가 있다는 사실을 이용하였다. Winzeler[1]는 평관형 합성막위에서 Dean vortices를 활용하기 위하여 나선형의 교체벽으로 이루어진 반쪽 관에 근거한 실험실용 막모듈을 설계하였다. 이 모듈과 불안정성이 없는 표준 평관형 교차흐름 모듈이 비교되었다. 비슷한 유량과 TMP하에서 불안정성이 있을 때의 성능이 불안정성이 없을 때보다 약 5배 정도 더 높았다.

Brewster 등[7, 8]은 연속적으로 임계 Dean number 이상의 streamwise 흐름이 유지되도록 나선형 모듈을 설계하였고 또한 특허화 하였다. 흐름은 다공성 벽으로 된 나선형 통로를 통과하게 되어 있으며 결과적으로 굽은-통로 Poiseuille 흐름은 불안정하게 된다. 최적 나선형 경로는 narrow-gap 이론에 대해서는 해석적으로 구해졌다. Wall Re number의 함수로서 일정한 벽흐름에 대한 wide-gap 경우에는 수치해석적으로 최적 나선형 통로 배위를 얻었다. Chung 등[9]은 180° 곡선주위로 흐름의 결과로서 Dean vortices를 생성하기 위한 굽은 통로관을 설계 및 제작한 후 사용하였다. 그들은 광학적 반사와 자기공명 영상을 사용하여 굽은 영역에서와 뒤 이은 평평한 영역에서 이들 vortices가 존재한다는 증거를 나타내었다. 시험 막영역을 평평한 영역에 둬으로써, vortices가 없는 순수한 교차흐름과 비교했을 때 약한 Dean vortices의 존재하에서도 투과량이 증가(30

%까지)되었음을 보고하였다. Chung 등[10]은 역시 교체벽으로 이루어진 180° 굽은 관내에 물을 흘려줌으로써 야기된 Dean vortices 내에서의 속도 등고선 profile을 정량적으로 측정하였다. 그들은 vortices를 얻기 위하여 2 혹은 3차원 자기 공명 흐름 영상을 사용하였다. 실험 측정치는 세 개의 축방향 유속에 대한 Navier-Stokes와 연속 방정식의 해로부터 구한 모사와 비교되었다. 수치 해들은 굽은 관 Poiseuille flow에 대해 유한 부피법으로부터 구했다.

본 연구에서는 잘 제어된 원심력에 의한 불안정성-Dean vortices를 형성하는 새로운 정밀여과용 나선형 모듈들을 설계하였으며, 이러한 vortices가 성능향상에 미치는 효과를 yeast broth solution을 사용하여 평가하였다.

본 연구에서는 직경이 상대적으로 큰 막 하나를 붓을 사용하지않고 자체적으로 6번 감은 형태의 나선형 모듈을 포함하는 첫번째 모듈 set(선형과 나선형)와 직경이 아주 작은 6개의 선형중공사막을 붓주위로 감은 형태의 나선형 모듈을 포함하는 두번째 모듈 set(선형과 나선형) 사이의 성능을 비교하여 그 차이점을 검토, 분석함으로써 보다 우수한 나선형 모듈의 선택 및 모듈 설계에 필요한 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 이 론

2.1. Microfiltration

Microfiltration은 ultrafiltration과 reverse osmosis와 함께 압력구동 막공정이다. Microfiltration계의 조작압력은 ultrafiltration계보다 낮은 값이고 100kPa (15psi)부터 300kPa(45psi)의 범위내에서 조작된다 [11]. 전형적인 microfiltration 막재료로는 PTFE, PVDF, PP, PE, PC, CA와 다공성 유리[12]가 사용된다. Microfiltration 막들은 구조에 있어서 비대칭 혹은 대칭의 다공성 막들이다. 그러나, 비대칭 microfiltration 막들은 상대적으로 드물다[13]. 비대칭막은 배제율에 관계되는 활성층과 다공성의 지지층으로 구성된다. 대칭막들은 활성층과 지지층의 역할을 모두 갖는 단지 하나의 층으로 구성되어 있다. Microfiltration 막의 MWCO는 매우 높으므로 보편적으로 microfiltration 막을 특성화하기 위하여 다른 유용한 변수들이 사용된다. 세 가지의 가장 중요한 매개변수들은 기공크기, 여과능력, 제거 효율이다

[12].

기공크기는 최대치 기공크기, 평균 기공크기 혹은 기공분포로 표현된다. 최대치 기공크기를 측정하기 위해 여러 가지의 기술들이 사용될 수 있으며, 가장 보편화된 방법은 액체가 미세기공을 통과하는 데 필요한 힘이 측정가능하며 기공들은 모세관이라고 가정 한 bubble-point법이다[12, 13]. 물과 에탄올이 각각 친수성과 소수성막들에 대해 용액으로서 사용된다. 최대치 기공크기는 다음식으로부터 계산될 수 있다.

$$p = -\frac{2\pi r_m \cos\theta}{r_m} \quad (1)$$

이 식으로부터 만약 기공의 크기가 매우 크면 적용되는 압력은 매우 작은 값이 됨을 알 수 있다. 따라서, 압력은 기공에 대한 측정값이다. 이러한 기술의 단점은 단지 최대치 기공만 결정될 수 있다는 것이다.

기공 분포와 평균 기공 크기의 측정은 공기흐름법에 의해서 구할 수 있다[12]. 막을 통과하는 공기 flux와 공급되는 공기압 사이의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$r = \frac{-2 \tau}{p} \quad (2)$$

공기흐름으로부터 기공들중의 단지 동일한 크기의 수를 직접 측정한다. 기공크기 분포는 SEM이나 TEM을 사용해서 각 기공의 크기를 측정함으로써 직접 결정될 수 있다[12]. SEM을 사용해서 10nm보다 더 큰 기공들을 측정할 수 있고, TEM의 기공 크기 범위는 1nm부터 10nm까지이다. 이러한 방법들은 막이 비대칭이라면 활성층에서의 서로 다른 기공 크기들 때문에 유용하다. 이러한 기술을 대칭막에 사용하기는 어렵다. 왜냐하면 기공들이 일정한 직경을 가지고 있는 모세관들이 아니며 모세관의 가장 작은 직경이 막표면이 아닌 막내에 존재하기 때문이다.

여과능력은 주어진 transmembrane pressure하에서 막을 투과하는 부피 flux로 알 수 있다.

제거효율을 측정하기 위한 2가지의 방법이 있다. 첫번째는 박테리아 투과법을 사용한다. 이러한 기술은 매우 복잡하고 파괴적이다. 알고 있는 크기의 박테리아, 예를 들면 22 μ m의 막기공직경에 대해서는 pseudomonas diminuta를 0.45 μ m의 기공 직경에 대해서는 serratia marcescens를 포함하는 수용액을 박

테리아 이동과 막이 무균 조건을 유지할 수 있는지를 관찰하기 위하여 막을 통과시켰다. 두번째 방법은 공급액 내에 균일화된 latex를 사용하는 것이며 흔히 latex 여과법이라고 불린다.

3. 실험

3.1. Module design

본 연구에 사용된 두 모듈 set는 각기 다른 회사에 의해서 제조되었다. 첫번째 모듈 set를 구성하는 두 개의 서로 다른 정밀여과용 모듈들, 선형모듈과 나선형 모듈이 본 연구에 적절하도록 A/G Technology Corporation(101 Hampton Avenue, Needham, MA 02194-2628, U.S.A.)에 의해서 제조되었다. 나선형 정밀여과 모듈은 nanofiltration모듈[14]과 같이 봉 주위에 코일형태로 감긴 것이 아니라 단지 정밀여과 막 자체가 6번 감겨있는 형태이다(Fig. 1). 이러한 설계의 장점은 back-pulsing의 가능성을 포함하고 있다는 점이다. 정밀여과막들은 polysulfone으로 이루어져 있고 화학적 내성이 우수하다. 제조회사는 수용성 무기산, 알칼리, 염용액, 대부분의 알코올, 지방족 탄화수소, 대부분의 세제 등에 저항력이 있음을 명시하였다.

두번째 모듈 set 역시 우리의 설계도에 따라서 Millipore Co.(80 Ashty Road, Bedford, MA, 01730-2271, U.S.A.)에 의해서 제작되었다. 나선형 관 모듈은 직경 d_{out} =6.35mm의 봉 1개를 포함하고 있으며, 6개의 중공사막들은 봉주위에 감겨있다. 중공사막들과 봉은 플라스틱으로 된 바깥쪽 shell에 밀봉되어 있다. 막재질은 첫번째 모듈 set에서와 같은 polysulfone이다.

첫번째 모듈 set 중의 helical 모듈의 경우 직경이

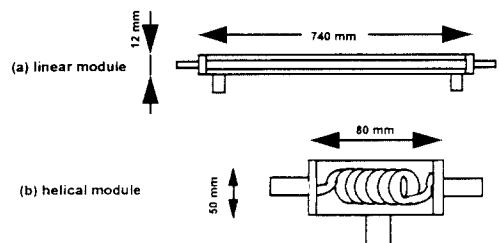


Fig. 1. a) linear microfiltration module, b) helical microfiltration module.

Table 1. Specifications of the Microfiltration Membranes and Modules

	microfiltration membrane	
manufacturer :	A/G Technology Corporation	Millipore Corporation
membrane material :	polysulfone	polysulfone
pore size :	0.1 μ m	0.1 μ m
max. feed pressure :	35 psig	35 psig
transmembrane pressure :	25 psig	25 psig
max. temperature :	50 $^{\circ}$ C	50 $^{\circ}$ C
pH range :	2 to 13	2 to 13
inner diameter d_{ip} :	3 mm	0.97 mm
outer diameter d_{op} :	4 mm	1.52 mm
connecting ports :	1/4"	1/4"

아주 큰 막 하나를 봉을 사용하지않고 자체적으로 6 번 감은 형태이며, 두번째 모듈 set 중의 helical 모듈의 경우 직경이 아주 작은 6개의 선형중공사막을 봉주위로 감은 형태로서 막의 diameter와 curvature 및 감은 횟수가 가장 큰 차이점이라고 할 수 있다.

사용된 정밀여과막들에 대한 보다 상세한 기술적인 데이터는 Table 1에 나타내었다.

첫번째 모듈 set의 경우, 선형 정밀여과모듈은 약 700mm의 유효 막길이를 가지므로 6,597mm²의 표면적에 해당된다. 나선의 내직경은 약 31mm, 정밀여과 중공사의 직경은 3mm이다.

평면에서의 감긴관에 대한 자료로부터 굴곡반경 R_c 는

$$R_c = \frac{d_{int}}{2} + \frac{d_o}{2} = 17.5\text{mm} \quad (3)$$

코일형태로 감긴 각 막관들이 서로 맞닿아 있으므로, $m=1$ 로부터, p 는

$$P = \frac{m}{2\pi} d_o = 0.637\text{mm} \quad (4)$$

p 와 R_c 로부터 나선형에 대한 굴곡반경 r_c 는 다음 식으로부터 구해진다.

$$r_c = \frac{(R_c^2 + p^2)}{R_c} = 17.52\text{mm} \quad (5)$$

Dean number, De 에 관한 정의

$$De = Re \sqrt{\frac{a}{R_c}} \quad (6)$$

와 임계 Dean number, $De_c \approx 13$ [15, 16]로부터 임

계 Reynolds number, $Re_c = 44.4$ 이다.

임계 속도 v_c 는

$$v_c = \frac{Re_c \cdot \nu}{d} = 0.0128\text{m/s} \quad (7)$$

여기서 25 $^{\circ}$ C 물에 대한 동점도 ν 는 $8.65 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$

Dean vortices가 생성되기 시작하는 임계 축방향 유량은 임계유속과 중공사의 단면적의 곱이다.

$$Q_c = \frac{\pi}{4} d^2 v_c = 5.43\text{ml/min} \quad (8)$$

Q_c 는 나선형 모듈에서 임계부피흐름이다. 흐름이 이 값보다 적을 때는 어떠한 vortices도 발생하지 않는다. Dean number 비, D 는 다음과 같이 정의된다.

$$D = \frac{De}{De_c} = \frac{Re}{Re_c} = \frac{v}{v_c} = \frac{Q}{Q_c} \quad (9)$$

여기서 $De_c \approx 13$

두번째 모듈 set에 대해서도 위와 같은 방법으로 계산하였다.

3. 1. 1. System Design

정밀여과계(Fig. 2)는 같은 실험조건하에서 두 모듈을 동시에 조작할 수 있도록 설계되었다. 25 ℓ 의 polypropylene 용기인 공급액 탱크는 온도조절을 위하여 항온조내에 놓였다.

맥동 감쇠기(pulsation dampner)는 흐름에서의 맥동을 감소시키기 위하여 diaphragm pump 바로 뒤에 놓였다. Bypass line은 needle valve와 온도계를 꽃을 부분으로 이루어져 있다. 각 모듈에는 on/off

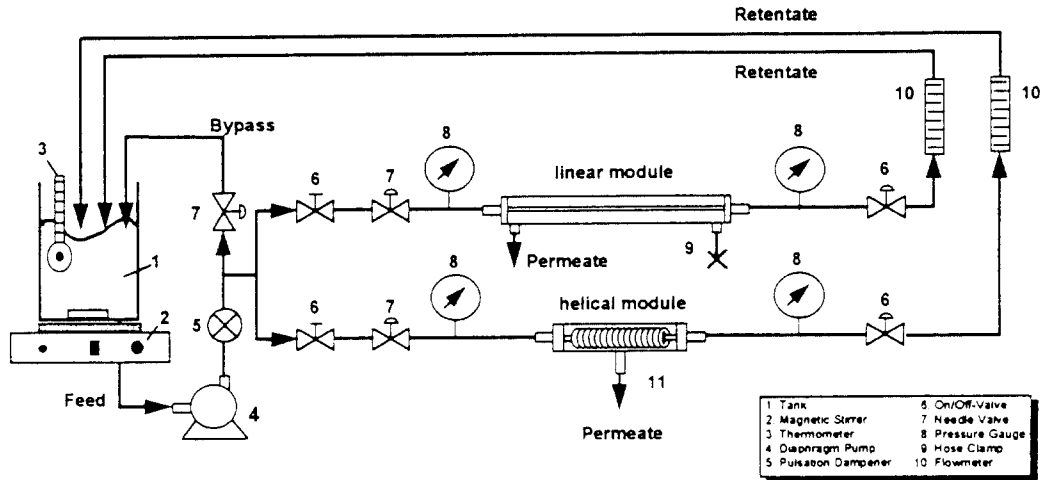


Fig. 2. Flow diagram of microfiltration apparatus.

valve, 주입 valve 그리고 압력게이지가 모듈 전후에 설치되었다. 배출압력은 모듈 뒷부분에 있는 또 다른 needle valve에 의해서 조절되고, digital 압력 게이지로써 측정되었다. 측방향 유량은 각 line에 설치된 유량계에 의해서 측정되었으며, 배제액은 공급액 탱크로 순환된다. 투과액 흐름들은 투과 유량을 측정하기 위하여 유량계를 통과하고, 농축액 흐름과 함께 공급액 탱크로 순환된다.

정밀여과 실험들은 나선형과 선형모듈을 비교할 수 있도록 설계되었다. 첫번째 모듈 set에 대해 정밀여과계는 2 l/min의 최대 측방향유량으로써 설계되었다. 왜냐하면 선형모듈에 대한 측방향 유량은 나선형모듈에 비해 약간 더 크기 때문이다. Diaphragm pump(F301010110, Flowjet)의 최대유량은 7 l/min이다. 맥동 감쇠기는 아래쪽 부분에 하나의 port가 있는 plastic cylinder이다. 계가 작동되기 시작할 때 dampner는 자동적으로 물로써 채워지고 물표면위의 공기를 압축하게되어 압축공기의 압력이 제압력과 동일하게 된다. Cylinder 위의 공기방울이 실험중에 맥동을 감소시킨다. On-off valve(SS-43S6, Swagelok)의 25psi에서의 최대 흐름은 28.5 l/min이다($c=1.5$). 모든 needle valve(SS-1RS4, Swagelok)들은, back-pulsing 계에서의 valve들을 제외하고, 똑같이 $c=1.5$ 의 흐름계수값을 보였다. 이것은 25psi에서 7 l/min의 유량과 동일하다.

모든 valve 형태의 최대 압력은 약 2500psi(17,000 kPa)이고, 압력 게이지들(68920-36, PSItronix)은 0에서 60psi(0~400kPa)까지의 psi 눈금으로 되어 있다. 측방향 유량에 대한 유량계(tube size 14, Gilmont)는 서로 다른 유량범위를 위한 plastic float와 stainless float로 사용할 수 있다. Plastic float를 사용할 경우 범위는 10에서 850ml/min이고, stainless float로써는 21에서 1,820ml/min 범위를 갖는다.

3.2. Yeast Broth Solution

20 l plastic 용기를 준비하고 여기에 순수 10 l를 채운 다음 50g KH_2PO_4 , 20g $(NH_4)_2SO_4$, 4g $MgSO_4$ (crystal), 30g yeast extract, 1000g glucose를 더한다. 이 후에 yeast(Fleischmann's active dry yeast) 1g을 넣고 약 12시간 동안 일정한 온도(25 °C)하에서 magnetic stirrer를 이용하여 천천히 교반시켜준다. Yeast broth solution의 농도를 일정하게 유지하기 위해서 cyclohexamide를 가하여 yeast를 죽인 다음 MF계의 side stream valve를 이용하여 turbidity가 일정하게 될 때까지 순환시켰다. 제조된 yeast broth solution의 pH는 H_3PO_4 와 NaOH를 이용하여 4.5로 조절되었다. 농도는 turbidity meter (Model 2100 A, Hach Instruments, Ames, IA)를 이용하여 측정하였다.

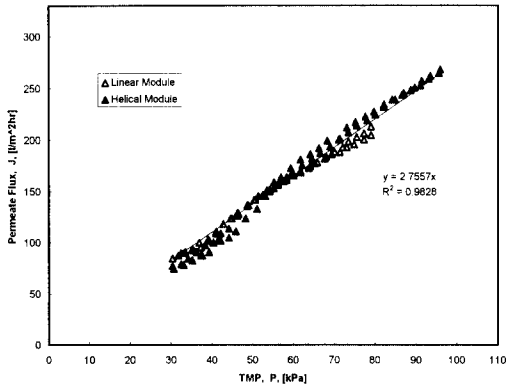


Fig. 3(a). Pure water flux versus transmembrane pressure for the 1st module set.

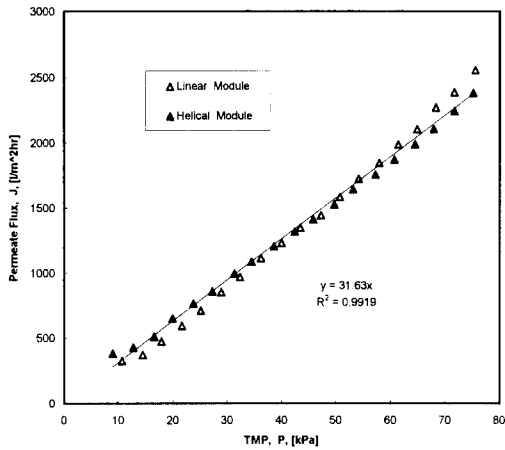


Fig. 3(b). Pure water flux versus transmembrane pressure for the 2nd module set.

4. 결과 및 고찰

4. 1. Water Permeability

Microfiltration계에 대한 첫번째 실험은 각 모듈 set의 선형과 나선형 모듈로서 수행되었다. Microfiltration 모듈들을 에탄올을 이용하여 사전 처리한 후에 축방향 압력강하와 막성능에 관한 정보를 얻기 위하여 두 모듈의 순수 투과계수를 측정하였다.

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 투과액 flux를 transmembrane pressure의 함수로서 도식화 하였을 때 각 모듈 set의 선형과 나선형모듈에 대한 직선의 기울기에 해당되는 순수 투과계수를 나타내었다. 투과

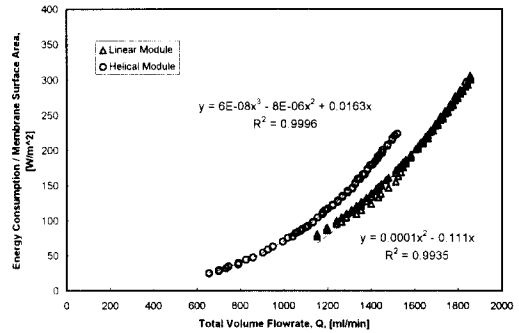


Fig. 4(a). Energy consumption per membrane area versus feed flow rate for pure water(1st module set).

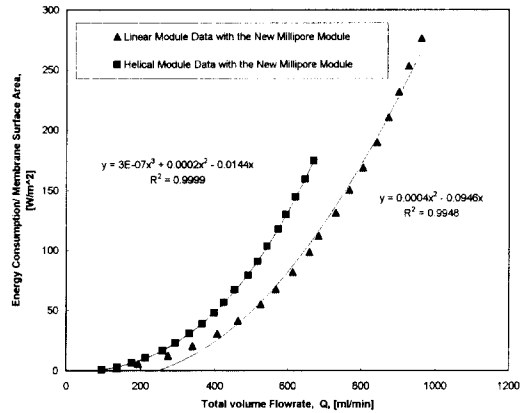


Fig. 4(b). Energy consumption per membrane area versus feed flow rate for pure water (2nd module set).

flux가 막표면적당 투과유량을 나타내고, 모듈들에는 같은 막이 사용되었으므로 모듈들로부터 얻은 데이터는 같은 선위에 있어야만 한다. 또한 모듈들에는 순수를 사용하였기 때문에 막오염이나 농도분극과 같은 효과는 없다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)로부터 두번째 모듈set의 투과계수는 첫번째 모듈 set의 투과계수에 비해 약 11배 정도 높은 값을 나타내었다. 이는 명목상의 기공크기가 같은 값으로 주어졌지만 첫번째 모듈 set의 막의 기공크기 분포가 균일하지 못한 것으로 사료된다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 각 모듈 set의 선형과 나선형에 대한 축방향 유량 대 막면적당 에너지 소모사이의 관계를 나타내었다. 이 들로부터 나선형모듈은

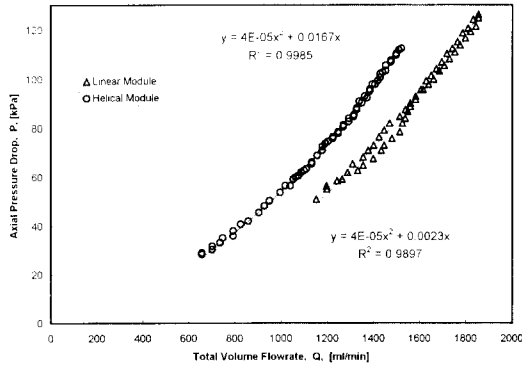


Fig. 5(a). Axial pressure drop versus feed flow rate for pure water(1st module set).

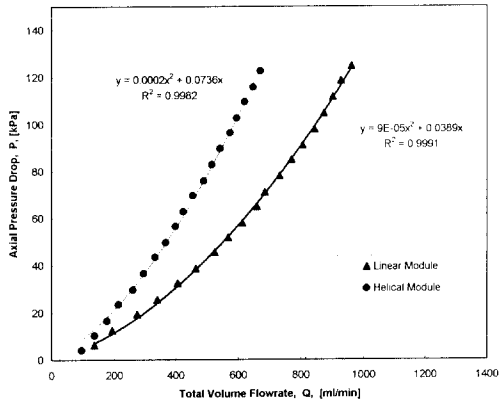


Fig. 5(b). Axial pressure drop versus feed flow rate for pure water(2nd module set).

같은 축방향 유량에서 선형모듈보다 막면적당 에너지 소모가 훨씬 높은 값을 보였다. 같은 축방향 유량하에서 두번째 모듈 set의 막면적당 에너지 소모가 첫번째 모듈 set에 비해 큰 것을 확인할 수 있었으며 이는 두번째 모듈 set의 막직경이 첫번째 모듈의 막직경에 비해 1/3 정도인 관계로 상대적으로 큰 압력강하가 발생하였고, 2배가 되는 감긴횟수로 인해 마찰 저항이 커졌기 때문이다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)은 각 모듈 set의 선형과 나선형 모듈에서 축방향 유량과 축방향 압력강하의 관계를 보여준다. 같은 축방향 유량에서 나선형 모듈의 축방향 압력강하는 결국 때문에 선형모듈보다 훨씬 더 높다. 같은 축방향 유량하에서 두번째 모듈 set의 압력강하가 첫번째 모듈 set에 비해 큰 것을 관찰할

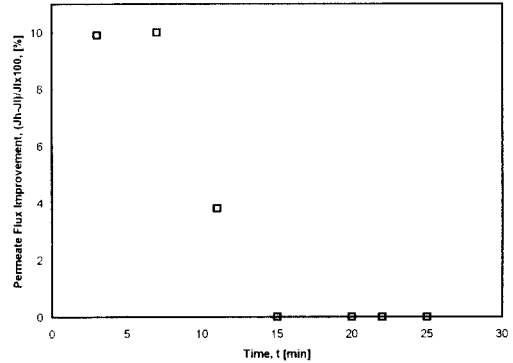


Fig. 6. Permeate flux improvement versus elapsed time of 1st module set at TMP=80kPa, E=150W/m².

수 있었으며 이는 막직경이 작고 막길이가 길기 때문이다.

두 가지 모듈 set에 대하여 같은 막면적당 에너지 소모와 TMP하에서의 조작조건은 Fig. 3(a), 3(b)로부터 최소 및 최대 TMP의 범위, Fig. 4(a), 4(b), 5(a), 5(b)로부터 축방향 압력강하 자료를 구한 후 TMP에 대한 식과 축방향 압력강하에 관한 정의를 사용하여 결정하였다. 정밀여과 막모듈은 nanofiltration 막모듈의 경우와는 달리 선형 모듈과 나선형 모듈 모두 TMP로서 P_{inlet}과 P_{outlet}의 산술평균값을 취하였다.

4. 2. Yeast Experiments

MF계에 대한 두번째 실험은 yeast broth 용액을 사용하여 각 모듈 set의 선형과 나선형 모듈의 성능을 측정하는 것이다. Yeast broth 용액 실험들에서 선형과 나선형 모듈 모두 같은 막면적당 에너지소모와 TMP하에서 수행되었다. 먼저, yeast(Fleischmann's active dry yeast)broth 용액이 잘 정의된 조건하에서 만들어졌고, 이를 이용하여 TMP 및 막면적당 에너지 소모변화에 따른 투과계수를 비교하였으며, 온도는 25℃로 고정되었다. Yeast 농도는 0.2dry wt%로 고정하였다.

첫번째 모듈 set에 대한 결과를 살펴보면, 정상상태에서의 선형과 나선형 모듈에 대하여 일정한 TMP (=80kPa)와 막면적당 에너지 소모(=150W/m²)하에서 시간에 따른 투과 flux 향상(투과 flux 증분 × 100/선형 모듈의 투과 flux)을 Fig. 6에 나타내었다.

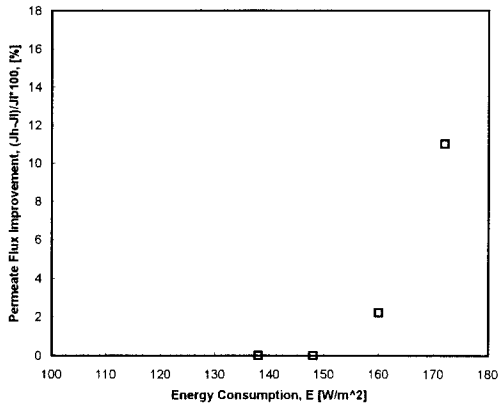


Fig. 7. Permeate flux improvement versus energy consumption of 1st module set at TMP=100kPa.

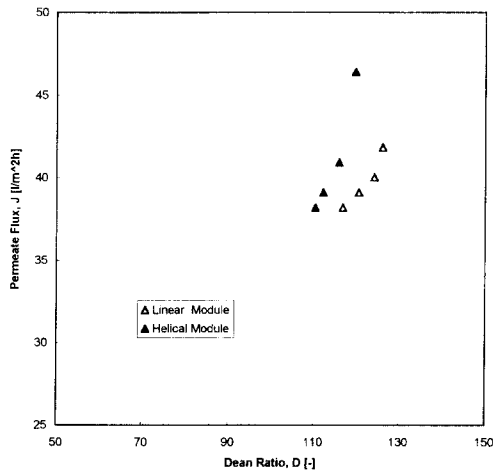


Fig. 8. Permeate flux versus Dean ratio of 1st module set at TMP=100kPa.

조작시간 7분 정도까지는 약 10%의 투과 flux 향상이 관찰되었지만 그 이후는 투과 flux 향상은 급격히 감소하여 조작시간이 15분이 경과한 후에는 더 이상의 투과 flux 향상은 보이지 않았다. 이는 yeast broth 용액의 순환에 의한 농도분극과 막오염현상에 기인한다.

Fig. 7은 일정한 TMP(=100kPa)하에서 막면적당 에너지소모의 변화에 따른 투과 flux 향상을 나타내었으며 막면적당 에너지소모가 약 170W/m²일 때 11%의 투과 flux 향상을 보였다. 이 것은 TMP(=

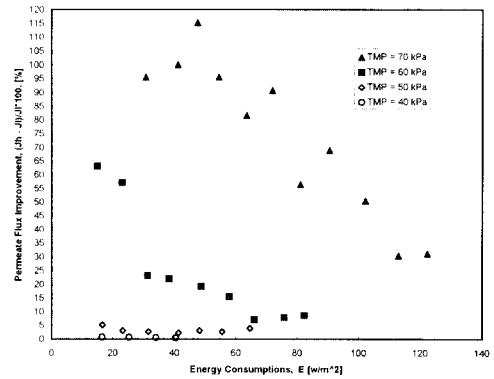


Fig. 9. Permeate flux improvement versus energy consumption of 2nd module set at TMP=40, 50, 60, 70kPa.

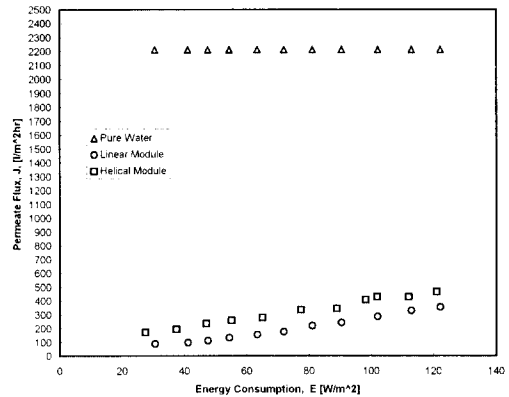


Fig. 10. Permeate flux versus energy consumption of 2nd module set at TMP=70kPa.

80kPa)와 막면적당 에너지 소모(=150W/m²)하에서의 투과 flux와 비슷한 값을 보였다.

Fig. 8은 일정한 TMP(=100kPa)하에서 Dean number ratio의 변화에 따른 투과 flux를 나타내었으며 Dean number ratio가 증가함에 따라 나선형 모듈의 투과 flux가 선형모듈에 비해 증가폭이 큰 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 첫번째 모듈 set의 경우, 나선형모듈이 Dean vortices에 의한 농도분극과 막오염현상을 감소시키는 효과가 매우 작음을 알 수 있었다. 이로서 3배 정도 큰 막내부 직경, 1/2 이하의 감긴회수, 약 2배의 굴곡 차이 등이 Dean vortices의 생성정도에 관련되어 있으며 이들 변수들은 나선형 모듈의 중요한 설계인자임을 확인할 수 있

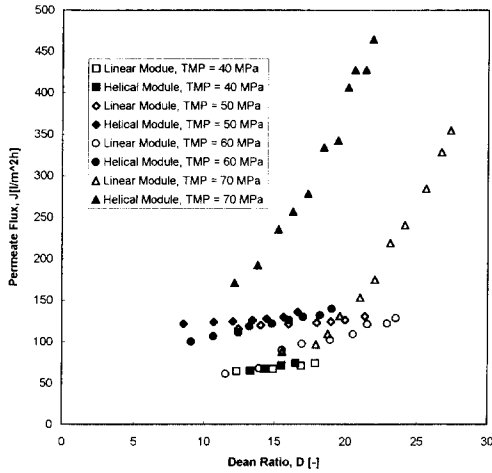


Fig. 11. Permeate flux versus Dean ratio of 2nd module set at TMP=40, 50, 60, 70kPa.

었다.

Fig. 9는 TMP를 40, 50, 60, 70kPa로 증가시켰을 때 막면적당 에너지소모에 따른 투과 flux의 향상을 나타낸 것으로 TMP가 증가할수록 투과 flux 향상도 같이 증가하는 경향을 보였으며, TMP가 70kPa하에서 막면적당 에너지소모가 약 48W/m²일 때 115% 정도의 투과 flux 향상값을 보였다.

Fig. 10은 일정한 TMP(=70kPa)하에서 막면적당 에너지소모의 변화에 따른 투과 flux를 나타낸 것으로 낮은 막면적당 에너지소모의 경우 나선형 모듈의 투과 flux는 순수에 비해 순수의 8%, 선형모듈의 투과 flux는 4%에 해당되었으며 높은 막면적당 에너지소모의 경우 나선형 모듈의 투과 flux는 순수의 21%, 선형모듈의 경우는 16% 수준이었다. 이로부터 일정한 TMP하에서 막면적당 에너지 소모가 커짐에 따라 투과 flux가 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 11은 Dean number ratio의 변화에 따른 투과 flux를 나타내었으며 낮은 TMP하에서는 Dean ratio가 증가함에 따라 나선형의 투과 flux가 선형과 거의 차이가 없으며 높은 TMP하에서는 Dean ratio의 증가에 따라 나선형의 투과 flux가 선형에 비해 크게 향상되었음을 알 수 있었다.

두번째 모듈 set의 결과로부터 나선형에 대한 투과 flux는 선형모듈에 비해서 높은 값을 보였다.

Dean vortices에 기인한 투과 flux의 향상으로부터

Dean vortices가 나선형 모듈에서의 농도분극 및 막 오염을 감소시킴을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서 직경이 상대적으로 큰 막 하나를 봉을 사용하지않고 자체적으로 6번 감은 형태의 나선형 모듈을 포함하는 첫번째 모듈 set와 직경이 아주 작은 6개의 선형중공사막을 봉주위로 감은 형태의 나선형 모듈을 포함하는 두번째 모듈 set 사이의 성능 비교가 이루어졌다. 모든 실험들은 같은 transmembrane pressure와 막면적당 에너지 소모하에서 수행되었다.

실험결과로부터 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

〈첫번째 모듈 set〉

1) 일정한 조작시간(=15분)후에는 더 이상의 투과 flux 향상은 보이지 않았다. 이는 yeast broth 용액의 순환에 의한 농도분극과 막오염에 기인된 현상이다.

2) 일정한 TMP하에서 막면적당 에너지소모가 약 170W/m²일 때 11%의 투과 flux 향상을 보였으므로 나선형모듈이 Dean vortices에 의한 농도분극과 막오염현상을 감소시키는 효과가 매우 작음을 알 수 있었다. 이로서 3배 정도 큰 막내부 직경, 1/2 이하의 감긴회수, 약 2배의 굴곡 차이 등이 Dean vortices의 생성정도에 관련되어 있으며 이들 변수들은 나선형 모듈의 중요한 설계인자임을 확인할 수 있었다.

3) 일정한 TMP(=100kPa)하에서 Dean number ratio가 증가함에 따라 나선형 모듈의 투과 flux가 선형모듈에 비해 증가폭이 큰 것으로 나타났다.

〈두번째 모듈 set〉

1) 일정한 TMP(=70kPa)하에서 막면적당 에너지 소모의 변화에 따른 투과 flux 향상을 나타낸 것으로 막면적당 에너지소모가 약 48W/m²일 때 115% 정도의 투과 flux 향상값을 보였다.

2) 낮은 TMP(=40, 50kPa)하에서는 Dean number ratio가 증가함에 따라 나선형의 투과 flux가 선형과 거의 차이가 없으며 높은 TMP(=70kPa)하에서는 Dean number ratio의 증가에 따라 나선형의 투과 flux가 선형에 비해 크게 향상됨을 알 수 있었다.

3) 일정한 TMP하에서 막면적당 에너지 소모가 커짐에 따라 투과 flux가 증가함을 알 수 있었다.

4) 굽은 관주위의 흐름으로부터 생성되는 Dean vortices는 정밀여과 공정에서 yeast broth 용액과 같은 foulants가 존재할 때 농도분극과 막오염현상을 감소시켜 투과 flux를 향상시키는 데 있어서 효과적인 임을 확인할 수 있었다.

이상의 결론으로부터 2가지 서로 다른 형태로 제조된 microfiltration용 모듈 set 중 두번째 모듈 set가 yeast suspension에 의한 농도분극과 막오염현상의 감소에 훨씬 효과적임을 알 수 있었다.

감 사

이 논문은 한국과학재단에서 지원한 '95년도 후반 기 해외 Post-Doc. 연수내용 중의 일부로서 이에 감사드립니다.

기 호 설 명

- a : inner tube radius[mm]
- d_o : outer diameter of the tube[mm]
- d_{rod} : diameter of the rod[mm]
- D : Dean number ratio[-]
- De, De_c : Dean number, critical Dean number[-]
- E : energy consumption per membrane area [W/m²]
- J_v : volume permeate flux[ℓ/m² · h]
- J_s : solute flux[g/m² · h]
- K : Dean's parameter
- L_p : permeability[ℓ/m² · h · kPa]
- p : pitch of a helix[mm]
- p : initial gas bubble forming pressure[Pa]
- P : pressure[kPa]
- r : pore radius[mm]
- r_m : maximum pore size[mm]
- r_c : radius of curvature in a helix[mm]
- R : rejection[-]
- R_c : radius of curvature for a coiled tube in a plane[mm]
- R_n, R_{nc} : Reynolds number, critical Reynolds number[-]
- TMP : transmembrane pressure[kPa]

v_m : mean azimuthal velocity[m/s]

그 리 이스 문 자

- κ :curvature of a helix[m⁻¹]
- λ :friction factor for a helical tube[-]
- λ_s :friction factor for a straight tube[-]
- ν :kinematic viscosity[m²/s]
- π :osmotic pressure[kPa]
- τ :torsion[m⁻¹]
- τ :surface tension of the liquid[N/m²]
- θ :contact angle of the liquid on the membrane surface[°]

참 고 문 헌

1. H. B. Winzeler and G. Belfort, *Journal of Membrane Science*, **80**, 35(1993).
2. M. Lopez-Leiva, "Ultrafiltration in a rotary annular filter", Ph. D. Thesis, Department of Food Engineering, Lund University, Sweden(1979).
3. J. Liebher, "Scherfiltration", Ph. D. Thesis, ETH Zürich, Switzerland(1978).
4. M. H. Weissmann and L. F. Mockros, *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, 94, EM3, 857(1968).
5. S. Srinivasan and C. Tien, *Desalination*, **9**, 127 (1971).
6. R. J. Nunge and L. R. Adams, *Desalination*, **13**, 17(1973).
7. M. E. Brewster, K. Y. Chung, and G. Belfort, *Journal of Membrane Science*, **81**, 127(1993).
8. G. Belfort, M. E. Brewster, and K. Y. Chung, "Curved Channel Membrane Filtration", United States Patent # 5,204,002(Apr. 20, 1993).
9. K. Y. Chung, R. Bates, and G. Belfort, *Journal of Membrane Science*, **81**, 39(1993).
10. K. Y. Chung, G. Belfort, W. A. Edelstein, and X. Li, *AIChE Journal*, **39**, 1592(1993).
11. R. Rautenbach, "Membranverfahren, Kap. 7", Umdruck zur Vorlesung Membranverfahren der RWTH Aachen(1990).
12. Y. Osada and T. Nakagawa, "Membrane Sci-

- ence and Technology”, Marcel Dekker, Inc. (1992).
13. E. Staude, “Membranen und Membranprozesse”, VCH(1992).
 14. M. Schmidt, The Performance of Spiral Tubular Nanofiltration Project Work, Department of Chemical Engineering, RPI, Troy, U.S.A. (1994).
 15. W. R. Dean, *Philosophical Magazine*, 5, **30**, 673 (1928).
 16. M. Alder, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, **14**, 257(1934).