

## Nanofiltration linear and helical module들의 막투과 성능 비교

이 광 현, Georges Belfort\*

동의대학교 공과대학 화학공학과, \* Rensselaer 공대 화학공학과

### A Study on Performance with Nanofiltration Linear and Helical Modules

Kwang Hyun Lee and Georges Belfort\*

Dept. of Chemical Engineering, Donggeui University, Pusan 614-714, Korea

\*Howard P. Isermann Department of Chemical Engineering, Rensselaer  
Polytechnic Institute, Troy, New York 12180-3590, U.S.A.

#### 1. 서 론

압력-구동 막공정을 분리공정에 응용시 커다란 장애는 막표면과 내부에 용존 및 부유물질들의 성장과 침착현상이다. 지난 수년 동안에 여러 연구자들이 유체의 불안정성을 이용하여 농도분극과 오염현상을 효과적으로 제거할 수 있음을 보였다[1].

Vortices를 생성하는 회전모듈을 이용한 여러 장치들이 개발되었으나[2,3] 회전 막모듈에 기초한 장치는 본질적으로 정지계보다 훨씬 많은 에너지를 요구하고, 회전계에서의 복잡한 구조 및 밀폐의 어려움 때문에 대규모로의 상업화에 걸림돌이 되고 있다.

이러한 어려움을 극복하기 위한 노력으로, 잘 제어된 원심력에 의한 불안정성-Dean vortices를 형성하는 새로운 모델을 개발하게 되었다. 이들 vortices들은 굽은 경로를 따라 흐르는 유체에서의 원심력에 의해 생성되며, 굴곡반경과 Reynolds number에 좌우된다.

Nanofiltration에서 새로운 기하학-굽은 관에서의 Dean vortices가 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. Nanofiltration은 흔히 느슨한 역삼투(loose reverse osmosis)라고 불리며 이는 일가염은 막을 투과할 수 있으나 다가염은 투과할 수 없음을 기인한다. 또한 nanofiltration은 역삼투보다 훨씬 낮은 압력을 요구한다.

본 연구에서 사용된 모듈set는 선형 hollow fiber들로 구성되는 모듈과 나선형 hollow fiber들로 구성되는 vortex생성 모듈의 두 가지 형태로 구성되었다.

본 연구에서는 선형 중공사 막을 미리 active layer를 형성시킨 후 봉주위로 감은 형태의 첫 번째 모듈set와 선형중공사막을 봉주위로 감은 후에 active layer를 형성시킨 두 번째 모듈set사이의 성능변화를 비교하여 그 차이점을 검토, 분석함으로써 나선형 모듈에 적합한 active layer 성형법의 선택및 모듈 설계에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 이론

점성 유체가 굽은 관을 통해 흐를 때 최대 유속 부위는 원심 작용에 의해 바깥쪽으로 작용하고, 벽에 보다 느리게 움직이는 층들은 내부쪽 즉 굴곡의 중심을 향해서 작용한다.

원심력에 의한 곡선 유로내에서의 이차 흐름은 흔히 Dean vortices라 불리는 한 쌍의 반대-회전 vortices로 구성된다. 바닥과 꼭대기 가까이에 있는 유체는 내부쪽으로 움직이고, 중심부에 있는 유체는 바깥쪽으로 움직인다. 이러한 문제가 Dean에 의해서 1927/28년에 처음으로 연구되었다[4,5]. 굽은 관내에서 관의 중심선에 평행한 주된 azimuthal 흐름이 이차흐름에 중첩되었다. 전체적으로 유체의 거동은 개략적으로 screw거동과 흡사하다. 주(축방향) 속도는 이차적인 흐름 때문에 bend의 바깥쪽으로 휘게 된다[6].

본 연구에서, Dean number, De는 다음과 같이 정의된다.

$$De = Re\sqrt{\frac{a}{R_c}} \quad (3)$$

a는 관의 내부 직경,  $R_c$ 는 굴곡의 평균 반경, Re는 Reynolds number이다.

## 3. 실험

막오염과 농도분극을 감소시키기 위한 Dean vortices의 잠재력을 조사하기 위해서 서로 다른 농도의  $MgSO_4$ 용액을 사용하여 각각의 모듈set들의 나선형과 선형 모듈을 동시에 시험하였다. 변화하는 축방향 유속과 용질 농도의 효과가 측정되었다. 각각의 모듈의 성능이 막면적당 유사한 에너지 소모량에 기초하여 비교되었다. 에너지 소모는 축방향 압력 강하와 부피 유량의 곱으로써 정의된다. 기술적인 관점에서 나선형의 성능이 동등한 에너지 소모하에서 선형모듈보다 뛰어나야만 한다.

막들의 순수 투과계수를 측정하기 위하여 초순수로서 수행되었다. 공급액 농도변화가 각 모듈에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 서로 다른 농도의  $MgSO_4$ 용액들로 같은 transmembrane pressure와 막 면적당 에너지 소모하에서 실험하였다. 실험을 시작하기전에 공급액 탱크는 6 - 10ℓ의 초순수로서 채워졌고,  $MgSO_4$ 의 무게는 Sartorius balance로 측정되었다.  $MgSO_4$ 를 물에 넣은 후 용액은 완전히 혼합되었다. 염농도와 전도도 meter로 측정된 전도도값으로부터

calibration curve를 얻었다.

#### 4. 결과 및 토론

순수로써 여러시간동안 두 가지 서로 다른 모듈set을 차례로 조작하고 난 후에 두 모듈set들은 순수투과계수로써 시험되었다. 서로 다른 주입 압력들(150, 180, 200, 230, 250 psi)과 공급액 유량변화시 평균 transmembrane pressure에 대한 순수 투과 flux들을 도식화하였다(Fig. 1, 2).

첫 번째 모듈set에서는 두 모듈의 기울기 즉 투과계수는 비슷하고, 낮은 주입 압력에서 나선형 모듈에 대한 데이터를 제외하고는 TMP와 모듈들의 유량과 기하학에 무관한 것으로 나타났다. 높은 주입 압력들에 대해 유사한 투과계수를 보이는 것은 두 모듈다 같은 중공사 막들임을 보여준다. 주입압력 150 psi에서 나선형 모듈의 낮은 flux에 대한 이유는 낮은 주입 압력에서는 중공사들이 모두 다 사용되지 않았기 때문이다.

두 번째 모듈set에서는 선형모듈과 나선형 모듈의 기울기 즉 투과계수는 다른 값을 보이고 있으며 특히 선형 모듈의 투과계수가 나선형모듈에비해 약 150%높은 값을 나타내었다. 이는 hollow fiber들을 둥근 막대주위로 감은 후에 active layer를 성층하게 되면 active layer의 두께가 두꺼워짐으로 인해 투과 플럭스가 감소하게 된 것으로 사료된다. 주입압력 180 psi에서 나선형 모듈의 flux들이 같은 선상에 놓이는 것은 이 압력하에서는 중공사들이 모두 활용되었기 때문이다.

용질농도 변화실험은 같은 TMP 및 막면적당 에너지 소모하에서  $MgSO_4$ 용액으로써 수행되었으며, 첫 번째 모듈 set에 대해서 농도가 증가함에 따라 직선형에 대한 나선형 모듈의 투과계수 비가 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 농도가 증가하면 삼투압과 농도분극현상 때문에 투과계수는 감소한다. 농도 증가에 따른 나선형 모듈에서의 투과계수의 감소에 비해 직선형 모듈에서의 투과계수의 감소가 훨씬 큰 것으로 나타났으며 이로부터 Dean vortex의 효과를 확인할 수 있었다.

두 번째 모듈set에 대해서는 첫 번째 모듈set에서와 같이 두 모듈사이의 투과계수비 대신  $L_p/L_p'$ (각 모듈의 용액에 대한 투과계수/ 순수 투과계수)값을 사용하였다. 왜냐하면 두 번째 모듈 set의 선형과 나선형모듈의 막들이 완전히 다른 순수 투과계수를 보이기 때문이다. 매우 높은 농도(약 28000ppm)에서는 나선형 모듈의  $L_p/L_p'$ 값이 선형모듈에 비해 높으나 그 이하에서는 낮았다.

첫 번째 모듈 set에 대해서 두 모듈에서의 용질 flux 대 공급액 농도에 관하여 도식화되어 있다(Fig. 3). 나선형 모듈에서의 염 flux는 선형모듈에 대한 것보다 훨씬 빨리 증가한다. 이 것이 나선형모듈에서의 보다 낮은 배제율에 대한

설명이 될 수 있고 부피 투과 flux가 선형 모듈에서보다 훨씬 더 높은 값을 보였다. 나선형 모듈이 선형모듈과 비교되었을 때 염 flux들은 약간 더 높았고 배제율은 약간 더 낮은 값으로 나타났다. 두 번째 모듈set에 대해서 용질 flux 대 공급액농도의 관계를 살펴보면(Fig. 4) 첫 번째 모듈set의 결과와는 달리 선형모듈의 염 flux는 나선형모듈에 대한 것보다 큰 값을 가지며 농도가 20000ppm까지는 계속 증가하다가 농도가 더욱 크지면 용질 flux가 감소하는 현상을 보이고 있다. 나선형 모듈의 경우, 농도가 8400ppm까지는 용질 flux가 서서히 증가하다가 그 이상의 농도에서는 거의 일정한값을 보였다. 이는 나선형 모듈의 중공사에 성층된 활성층이 상대적으로 두꺼워져 부피 투과 flux가 감소했기 때문이다.

## 5. 참고 문헌

1. Winzeler, H.B. and Belfort, G., *Journal of Membrane Science*, 80, 35(1993).
2. Lopez-Leiva, M., "Ultrafiltration in a rotary annular filter", PhD Thesis, Department of Food Engineering, Lund University, Sweden(1979).
3. Liebher, J., "Scherfiltration", PhD Thesis, ETH Zürich, Switzerland(1978).
4. Dean, W.R., *Philosophical Magazine*, 4, 20, 208(1927).
5. Dean, W.R., *Philosophical Magazine*, 5, 30, 673(1928).
6. Alder, M., *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, 14, 257(1934).
7. Dravid, A.N., Smith, K.A., Merrill, E.W. and Brian, P.L.T., "The Effect of Secondary Fluid Motion on Laminar Flow Heat Transfer in Helically Coiled Tubes", *68th National AIChE Meeting*, Houston, Texas(1971).
8. Srinivasan, S. and Tien, C., *Desalination*, 9, 127(1971).
9. Nunge, R.J. and Adams, L.R., *Desalination*, 13, 17(1973).