

자연대류 불안정 흐름에 의해 투과량을 증가시킨 전량여과 막모듈의 설계

김기준·염경호[†]

충북대학교 공과대학 공업화학과
(2019년 6월 5일 접수, 2019년 6월 17일 수정, 2019년 6월 18일 채택)

Design of Dead-end Membrane Module with Increased Permeate Flux by Natural Convection Instability Flow

Gi-Jun Kim and Kyung-Ho Youm[†]

Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea
(Received June 5, 2019, Revised June 17, 2019, Accepted June 18, 2019)

요약: BSA 단백질 용액의 전량 막여과에서 상용(commercial) 막모듈의 경사각 변화에 따라 발생된 자연대류 불안정 흐름(NCIF)의 투과 플럭스 증가 효과를 측정된 결과, 막모듈의 경사각이 0°에서 180°로 증가하면 NCIF 발생이 커져 플럭스가 증가하였다. 그러나 상용 막모듈은 모듈 내에 존재하는 공기층을 완전히 제거해야 NCIF를 발생시킬 수 있다. 본 연구에서 설계 제작된 custom design 막모듈은 crossward 방향(90°)으로 막투과가 이루어져 모듈 상부에 공기층이 존재하더라도 항상 NCIF가 발생된다. Custom design 막모듈에서 BSA와 dextran 용액의 막여과 실험을 수행한 결과, NCIF의 발생으로 2시간 조작 시 BSA 용액의 경우 약 3.8배, dextran 용액의 경우 약 1.8배까지 투과 플럭스가 증가하였다. 또한 BSA 용액을 대상으로 한 20시간의 조작에서도 NCIF의 발생이 지속되어 플럭스가 약 7.5배까지 증가하였다. 본 연구에서 설계된 막모듈은 항상 NCIF가 발생되므로 막오염 형성 억제에 따른 투과 플럭스 증가를 기대할 수 있어 전량여과 막모듈로서의 활용성이 있음을 확인하였다.

Abstract: The permeate flux increments of a natural convection instability flow (NCIF) caused by the change of inclined angles (0~180°) to gravity of the commercial membrane module were tested in the dead-end membrane filtration of BSA protein solution. The NCIF are more generated as the inclined angle increased from 0° to 180°, and the occurred NCIF enhances permeate flux. However, the commercial module can only generate NCIF by completely removing the air gap in module. Since the custom design module designed in this study is permeated in a crossward direction (90°), NCIF is always generated even if there is the air gap in module. The results of membrane filtration of BSA and dextran solutions using a custom design module showed that the flux in the crossward direction is increased to about 3.8 times for BSA solution and 1.8 times for dextran solution after two hours of operation due to the occurrence of NCIF. Also, NCIF generation is continued during 20 hours filtration of BSA solution, increasing the permeate flux to about 7.5 times. Since the custom design module with a permeation in the crossward direction and NCIF is always generated within the module, so it is possible to expect an increase in permeate flux due to the suppression of fouling formation, and thus to be utilized as a superb dead-end membrane module.

Keywords: *dead-end membrane module, design of membrane module, fouling reduction, flux enhancement, natural convection instability flow (NCIF)*

[†]Corresponding author(e-mail: khyoum@cbnu.ac.kr <http://orcid.org/0000-0002-1724-543X>)

1. 서 론

막분리 공정에서 막에 의해 배제된 물질이 막표면에 누적되는 현상인 농도분극과 누적된 물질이 막과의 상호작용에 의해 막표면 또는 세공 내에 비가역적으로 침적되는 현상인 막오염이 발생하게 된다. 막오염은 막투과량(투과 플럭스, permeate flux)의 급속한 감소와 더불어 막의 분리성능을 저하시킨다. 따라서 막오염 형성 인자의 규명을 통해 막오염 발생을 효과적으로 억제 또는 제거시키는 방법에 대한 연구는 막분리 기술의 태동 이래 중요한 연구 주제이다[1].

막오염 발생을 억제시키는 효과적인 방법의 하나는 막모듈 유로 내의 유체 흐름을 난류상태로 유지시키는 것이다. 유체 흐름을 난류로 유지시키기 위해서는 공급액의 유량을 증가시키거나 유로 내에 난류흐름 발생을 유도하는 촉진물을 삽입시키는 방법이 널리 사용되고 있다[2]. 그러나 이들 방법은 공급액의 유량 증가에 따른 운전 동력비 상승과 단백질 및 효소가 함유된 용액의 경우에는 유량 증가에 따른 전단력에 의해 이들 물질의 변성이 일어날 수 있어 적절한 공급액 유량 결정이 필요하다. 또한 막모듈에 난류 촉진물을 삽입하는 것은 막 표면에 손상을 주거나 추가적인 압력강하를 유발시킨다는 문제가 있다[3].

막모듈 내 유체의 흐름을 난류로 유지시키는 대신 유체의 불안정 흐름을 유발시켜 막오염 발생을 억제시키는 연구들이 시도되고 있다[4-6]. 특히 막모듈 내에 자연대류 불안정 흐름(natural convection instability flow, NCIF)을 유발시키는 연구가 주목을 받고 있다[7,8]. NCIF는 막표면에 형성된 농도분극층에서의 용액의 밀도차를 이용하여 막모듈의 중력에 대한 방향을 변화시켜 밀도가 높은 용액을 밀도가 낮은 용액 위에 위치시키는 밀도역전(density inversion)을 통해 쉽게 발생시킬 수 있다.

Fig. 1(a)에서와 같이 통상의 막모듈에서는 일반적으로 막이 중력의 방향으로 위치하며 따라서 막투과 액은 하향(downward)으로 투과되고 농도분극 때문에 벌크(bulk) 용액으로부터 막표면 방향으로 용액의 농도가 높아지므로 중력 방향과의 밀도역전이 없어 NCIF가 발생하지 않는다. 그러나 Fig. 1(b)와 같이 막모듈을 180° 회전시켜 막의 위치를 중력의 반대방향으로 향하게 하면 막투과 액은 상향(upward)으로 투과되고 막모듈 내에서 농도

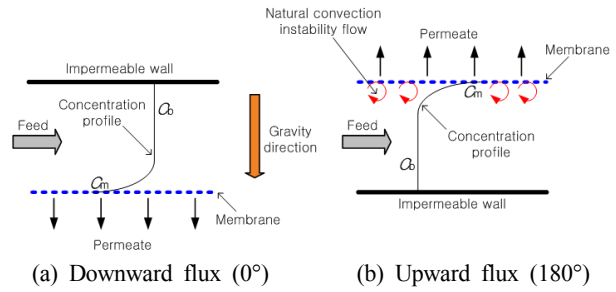


Fig. 1. Occurrence of natural convection instability flow in membrane module.



Fig. 2. Commercial dead-end membrane module (Millipore Co.).

가 높은 막표면 용액이 농도가 낮은 벌크(bulk) 용액 위에 위치하는 밀도역전이 일어나 이로 인해 NCIF가 발생된다. 이 NCIF는 막 표면으로부터 벌크 용액 방향으로의 용질 이동을 촉진시키므로 막표면과 세공에서의 막오염 발생을 억제시키게 된다. 본 연구팀에서는 다당류, 단백질 및 콜로이드 용액의 한외여과에 있어 막모듈의 중력에 대한 위치(경사각, inclined angle) 변화를 통해 밀도역전을 유도하여 발생된 NCIF가 농도분극과 막오염 형성 억제에 상당한 효과가 있음을 보고하였다[8-10].

Fig. 2에 나타낸 Millipore Co. (또는 Amicon Co.) 등의 기업에서 판매하고 있는 전량여과(dead-end filtration) 막모듈에서 분리막은 모듈 하부에 설치되고 막투과액은 중력방향인 하향(downward, 0°)으로 투과되므로 밀도역전이 없어 NCIF가 발생하지 않으며, 또한 모듈 상부에는 항상 공기층(air gap)이 존재하게 된다. 판매되고 있는 전량여과 막모듈 내에 NCIF를 발생시키기 위해서는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 막모듈을 회전시켜 중력

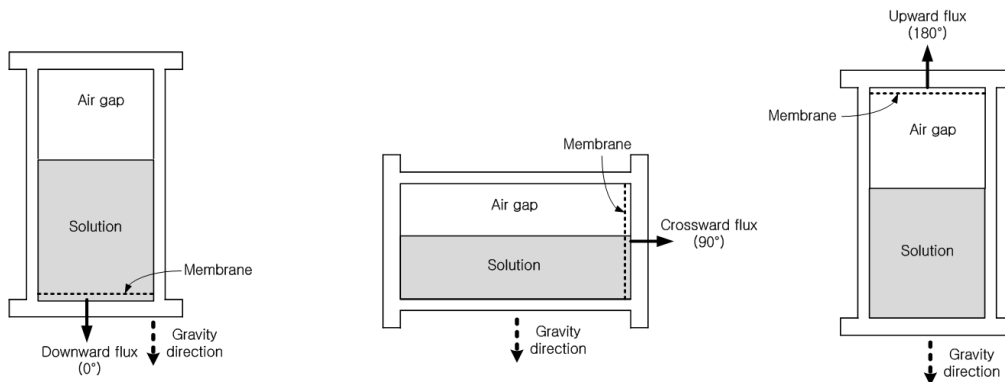


Fig. 3. Permeate directions of downward, crossward and upward in the commercial dead-end membrane module.

에 대한 위치를 90° 또는 180° 의 각도로 변화시켜야만 한다. 그러나 전량여과 막모듈을 회전시켜 중력에 대한 위치를 90° 또는 180° 의 각도로 변화시키면 막모듈 내 존재하는 공기층이 분리막의 일부(90° 의 경우) 또는 전체(180° 의 경우)를 덮게 되어 막여과 운전이 불가능해진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 막모듈 내에 용액을 가득 채워 공기층을 모두 제거시킨 후 중력에 대한 위치 각도(경사각)를 변화시켜야만 NCIF를 발생시킬 수 있다. 그러나 막모듈 내에 용액을 가득 채워 공기층을 모두 제거하는 선행 작업은 실제로는 매우 번거로운 일로서 상당한 작업시간이 소요된다.

이에 본 연구에서는 전량여과 막모듈 내에 공기층이 존재하더라도 항상 NCIF를 발생시킬 수 있는 새로운 형태의 전량여과 막모듈을 설계하여 NCIF 발생에 의해 막오염 형성을 저감시킴으로써 투과량을 증가시킬 수 있도록 하였다. 이 custom design 막모듈은 모듈 상부에 공기층이 존재하더라도 항상 NCIF가 발생될 수 있도록 crossward 방향(90°)으로 막투과가 이루어지게 된다. 설계된 전량여과 막모듈에서 NCIF 발생에 따른 투과량 증가 효과를 한외여과 막여과 실험을 통해 실증하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료 및 장치

전량 막여과 실험에 사용된 막은 polyethersulfone (PES) 재질의 상용 평판막으로서 분획분자량(MWCO)이 30,000 Dalton인 Biomax PBGC (미국, Millipore Co.) 한외여과 막을 사용하였다. 막여과 실험의 분리대상 물질로는 대표적인 막오염 모의 물질인 BSA (bovine serum albumin) 단백질(분자량 68,000 g/mol, Sigma Co.)과 dex-

tran 다당류(평균 분자량 500,000 g/mol, Pharmacia Co.)의 두 가지 종류를 사용하였다.

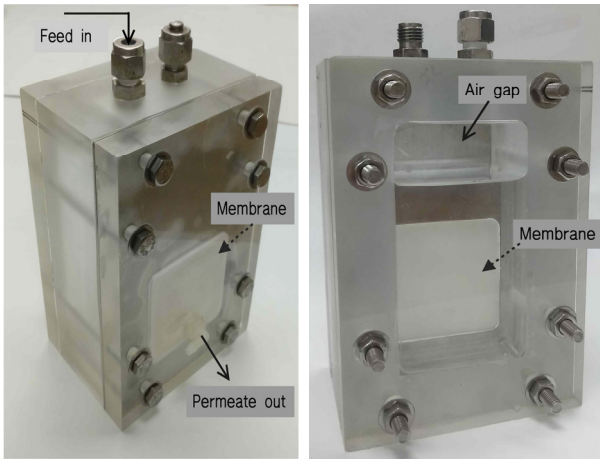
막모듈로는 Fig. 2에 나타난 Millipore Co.에서 시판하고 있는 commercial 막모듈(내용적 130 mL, 유효 막면적 15.2 cm^2)과 본 연구에서 직접 설계한 Fig. 4에 나타난 custom design 막모듈(내용적 280 mL, 유효 막면적 28.8 cm^2)을 사용하였다. Custom design 막모듈은 투명한 아크릴로 제작하였으며, 분리막을 모듈 하단부에 수직방향으로 설치하여 막투과가 crossward 방향(90°)으로 이루어지고, 모듈 상단부의 공기층이 막과 접촉되지 않도록 하였다. 따라서 custom design 막모듈에서 분리막은 항상 용액과 접하게 되고 동시에 crossward 방향(90°)으로의 막투과가 이루어지므로 NCIF 발생에 따른 투과량 증가 효과를 기대할 수 있다.

막여과 실험에 사용된 장치 구성도를 Fig. 5에 나타내었다. 막모듈을 스테인레스 스틸로 제작된 경사판(angled plate)에 부착시켜 막모듈의 중력에 대한 위치(경사각)를 변화시킬 수 있도록 하였다. 막모듈의 용액 도입부와 투과부에 압력전달계(Pressure Transducer; 독일, Labom Co., Model CB 1020)를 설치하여 도입부와 투과부의 압력을 PC에 실시간으로 저장시켜 막간 압력차(ΔP , transmembrane pressure)를 측정하였다. 막모듈 투과부에서의 투과액량은 일정한 시간간격으로 전자저울(일본, AND Co., Model FX-3000)로 측정하여 PC에 실시간으로 저장하고 이로부터 투과 플럭스를 계산하였다.

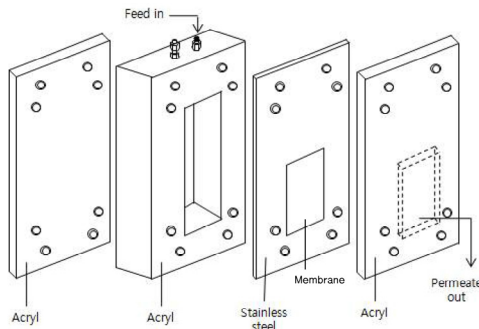
2.2. 실험방법

2.2.1. 순수 투과 플럭스와 용질 배제도 측정

Millipore Co.의 commercial 막모듈 및 본 연구에서 제작한 custom design 막모듈에 Biomax PBGC 막을 설



(a) Assembled view



(b) Exploded view

Fig. 4. Custom designed dead-end membrane module.

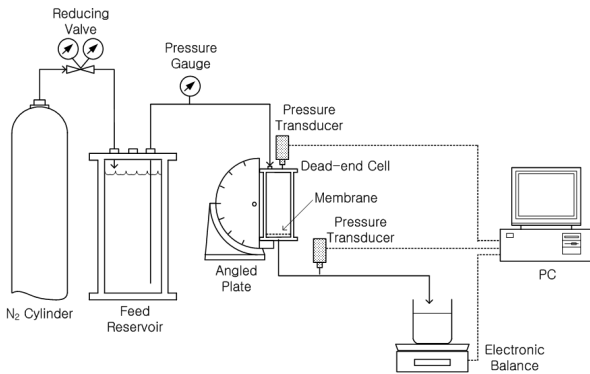


Fig. 5. System setup for the dead-end membrane filtration experiment.

치한 후 순수를 사용하여 실험 최대 막간 압력차인 200 kPa보다 높은 300 kPa에서 약 2시간 동안 막을 압밀화 (compaction) 시켜 투과량의 변화가 없는 상태에 도달한 후 압력차 200 kPa 상태에서 막의 순수 투과 플럭스를 측정하였다.

또한 압밀화가 완료된 막을 대상으로 막여과 실험에 사용된 두 가지 용질(BSA와 dextran)의 배제도(rejection)를 측정하였다. 용질 배제도는 농도 1 g/L의 용액을 사용하여 200 kPa의 압력차에서 1시간 동안 막여과 실험을 수행하고 투과액의 용질 농도를 BSA의 경우 Bradford 법[11]을 사용하여 UV/Vis 분광광도계(미국, Kontron Co. Model UVICON 860)로 파장 595 nm에서 측정하였으며, dextran의 경우에는 전유기탄소 측정기(TOC, 미국 O.I. Analytical Co., Model 525)로 측정하여 아래의 식 (1)로서 계산하였다.

$$\text{Solute rejection (\%)} = \left[1 - \left(\frac{C_p}{C_b} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

Where, C_b : solute concentration in feed (g/L)

C_p : solute concentration in permeate (g/L)

2.2.2. Commercial 막모듈의 경사각에 따른 막여과 실험

Millipore Co.의 commercial 막모듈을 대상으로 중력에 대한 막모듈의 위치(경사각) 변화에 따른 투과 플럭스를 측정하였다. Commercial 막모듈을 사용하여 경사각 변화에 따른 NCIF 발생 막여과 실험을 수행하기 위해서는 모듈 내의 공기층을 실험 전에 모두 제거해야 한다. 막모듈 내 공기층을 완전히 제거한 후 먼저 commercial 막모듈의 경사각 변화에 따른 NCIF 발생의 플럭스 증가 효과를 즉시적으로 알아보기 위해 200 kPa의 막간 압력차에서 농도 1 g/L인 BSA 용액을 사용하여 막모듈의 경사각을 각 30분 간격으로 0°에서 180°로 30°씩 연속적으로 증가시키면서 한외여과 막여과 실험을 수행하였다. 다음으로 압력차 200 kPa 조건에서 1 g/L의 BSA 용액을 사용하여 막모듈의 경사각을 0, 45, 90, 135 및 180°로 일정하게 유지한 상태에서 2시간 동안 막여과 실험을 수행하였다. 이때 투과액의 질량을 매 2분 간격으로 전자저울로 측정하고, 이를 순수의 투과액 부피로 환산한 후 유효 막면적으로 나누어 아래의 식 (2)로서 투과 플럭스를 계산하였다.

$$\text{Permeate flux (LMH, } l/m^2 \cdot hr) = Q/(A \times \Delta t) \quad (2)$$

Where, Q : permeate volume of pure water (l)

A : effective membrane area (m²)

Δt : time difference (hr)

2.2.3. Custom design 막모듈에 의한 막여과 실험

본 연구에서 제작한 custom design 막모듈은 commercial 막모듈과는 다르게 실험 전에 모듈 내의 공기층을 제거하지 않아도 공기층이 분리막을 덮지 않고 crossward 방향(90°)으로 막투과가 이루어지므로 항상 NCIF가 발생되게 된다. Custom design 막모듈을 사용한 한외여과 막여과 실험은 1 g/L 농도의 BSA와 dextran 용액을 대상으로 50, 100, 200 kPa의 막간 압력차에서 2시간 동안 수행하였다. 이때 막모듈의 중력에 대한 경사각은 custom design 막모듈의 통상의 운전 방향인 crossward 방향으로 막투과가 이루어지는 90° 경사각과 플릭스 비교를 위해 막모듈을 회전시켜서 downward 방향으로 막투과가 이루어지는 0° 경사각의 두 가지 모듈 위치에 대해 실시하였다.

또한 장시간의 막여과 운전에서도 NCIF 발생에 의한 플릭스 증가 효과가 지속되는지를 확인하기 위해 BSA 용액의 막여과 실험을 압력차 200 kPa에서 crossward 방향(90°)과 downward 방향(0°)의 두 가지 경사각에 대해 20시간 동안 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 순수 투과 플릭스와 용질 배제도

막여과 실험에 사용된 Biomax PBGC 막을 압밀화 시킨 후 200 kPa에 측정된 순수 투과 플릭스는 평균 205 LMH이었으며, 막에 의한 BSA와 dextran의 배제도는 0.96 이상으로 사용된 두 가지 분리대상 물질 모두는 Biomax PBGC 막을 거의 투과하지 못하였다.

3.2. Commercial 막모듈의 경사각에 따른 투과 플릭스

Commercial 막모듈의 경사각 변화에 따라 발생된 NCIF의 투과 플릭스 증가 효과를 즉시적으로 알아보기 위해 막모듈의 경사각을 각 30분 간격으로 0°에서 180°로 30°씩 연속적으로 증가시키면서 압력차 200 kPa에서 농도 1 g/L의 BSA 용액을 대상으로 한외여과를 수행하여 얻은 투과 플릭스 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

이 결과 막여과 실험 시작 초기 막모듈의 경사각을 0°로 유지시킨 30분 동안에는 막오염이 급격하게 형성되어 플릭스가 크게 감소하였으나, 30분 이후 막모듈의 경사각을 30분 간격으로 30°씩 증가시키기에 따라 플릭스가 점차 증가하였으며, 경사각 180°에서의 플릭스 값이 가장 크게 나타났다. 이는 막모듈의 경사각이 0°에

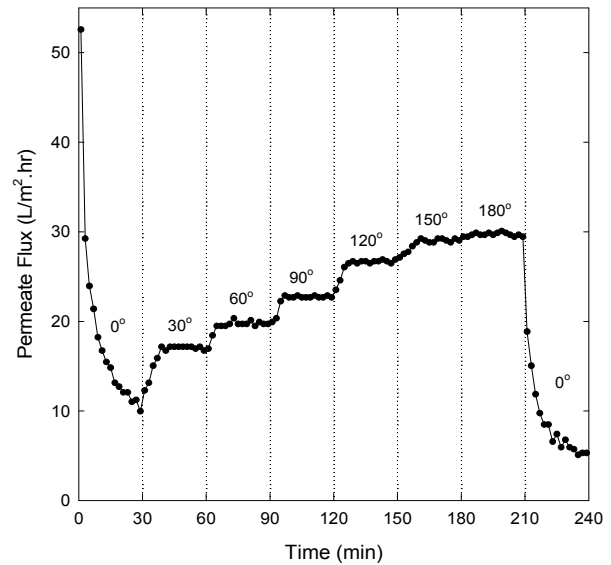


Fig. 6. Flux-time profiles for the dead-end filtration of BSA solution during successive change of the inclined angles of a commercial module [$\Delta P = 200$ kPa, BSA concentration = 1 g/L].

서 180°로 증가함에 따라 막표면 근방에서의 밀도역전이 커져 NCIF 발생이 점차 증가하며, 발생된 NCIF가 막표면에 형성된 BSA 단백질 오염층을 벌크 용액 쪽으로 역수송(back transport) 시켜 막오염을 감소시키기 때문이다[8,12]. 특히 Fig. 6에서 주목할 것은 마지막 30분 동안(210분에서 240분까지)의 플릭스 결과로서 경사각을 180°에서 0°로 바꾸었을 때 투과 플릭스가 급속하게 감소하였는데, 이는 180° 경사각에서 가장 크게 발생하였던 NCIF가 경사각이 0°로 바뀌면서 소멸되어 막오염이 다시 빠르게 형성되기 때문이다. 또한 실험 시작 30분 후 막모듈의 경사각을 초기 0°에서 30°로 변화시켰을 때의 플릭스 증가율이 다른 구간의 경사각 변화 시(30° → 60°, 60° → 90°, ..., 150° → 180°의 변화) 보다 크게 나타났다. 즉, 막모듈의 경사각을 0°에서 30°로 조금만 변화시켜도 밀도역전에 의한 NCIF가 발생되어 막오염 형성을 상당히 억제시킬 수 있음을 알 수 있다.

Commercial 막모듈의 경사각에 따른 투과 플릭스 증가율을 정량적으로 나타내기 위해 막간 압력차 200 kPa에서 농도 1 g/L의 BSA 용액을 대상으로 막모듈의 경사각 0, 45, 90, 135, 180°에서 2시간 동안 막여과 실험을 수행하여 측정된 투과 플릭스 변화를 Fig. 7(a)에 나타내었으며, 이 결과를 경사각 0°에서의 플릭스 값(J_0)에 대한 경사각 45, 90, 135, 180°에서의 플릭스 값(J_i)의

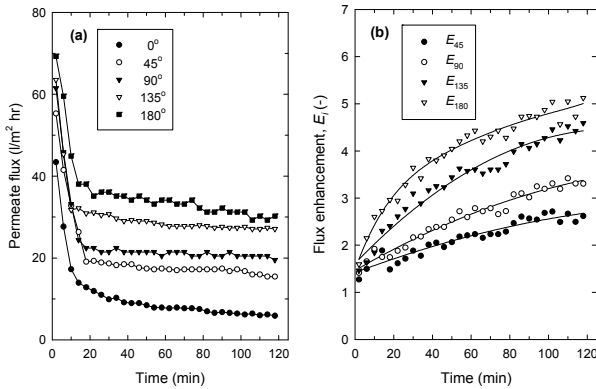


Fig. 7. Trends of (a) flux and (b) flux enhancement for the dead-end filtration of BSA solution at different inclined angles of a commercial module [$\Delta P = 200$ kPa, BSA concentration = 1 g/L].

비인 플릭스 향상성(flux enhancement $E_i = J_t/J_0$)으로 정량화하여 Fig. 7(b)에 나타내었다.

Fig. 7(a)의 결과에서 보면 막표면 근방에서 밀도역전이 없어 NCIF가 발생되지 않는 경사각 0°와 밀도역전이 일어나 NCIF가 발생하는 경사각 45, 90, 135 및 180°의 투과 플릭스는 큰 차이를 나타내었다. 경사각 0°에서 막여과 운전시간에 따른 투과 플릭스가 가장 낮았으며, 경사각이 증가함에 따라 밀도역전이 커지면 NCIF의 발생이 증가하여 플릭스가 증가하며 NCIF 발생이 최대가 되는 경사각 180°에서 플릭스가 가장 크게 나타났다. Fig. 7(b)에 나타난 플릭스 향상성 E_i 의 결과에서 보면 막모듈의 경사각이 클수록 NCIF 발생이 크게 일어나 E_i 값이 증가하며, 경사각 90°인 경우 2시간 경과 후의 플릭스는 0°인 경우에 비해 약 3.3배, 경사각 180°인 경우는 약 5.2배 증가하였다. 이 결과로부터 막모듈의 경사각이 클수록 막표면 근방에서의 밀도역전이 더 커지고 따라서 유발된 NCIF도 증가하여 막오염 발생이 억제되어 투과 플릭스가 증가함을 알 수 있다.

3.3. Custom design 막모듈에 의한 막여과 결과

Commercial 막모듈과는 달리 본 연구에서 설계 제작된 custom design 막모듈은 모듈 내의 공기층을 제거하지 않고도 crossward 방향(90°)으로 막투과가 이루어지므로 막여과 시 항상 NCIF가 발생되므로 플릭스 증가를 기대할 수 있다. Custom design 막모듈을 사용한 막여과 실험은 1 g/L 농도의 BSA와 dextran 용액을 대상으로 200 kPa의 압력차에서 2시간 동안 crossward 방향

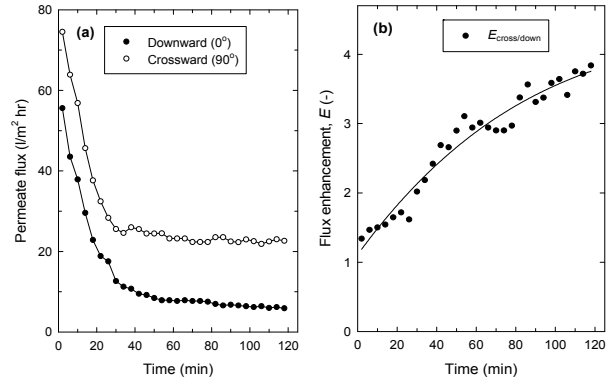


Fig. 8. Trends of (a) flux and (b) flux enhancement for the dead-end filtration of BSA solution at downward and crossward directions of a custom design module [$\Delta P = 200$ kPa, BSA concentration = 1 g/L].

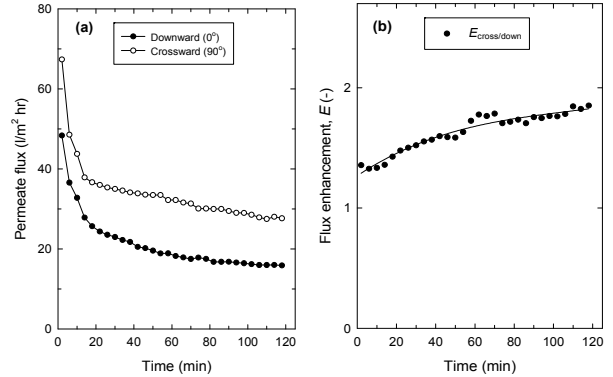


Fig. 9. Trends of (a) flux and (b) flux enhancement for the dead-end filtration of dextran solution at downward and crossward directions of a custom design module [$\Delta P = 200$ kPa, dextran concentration = 1 g/L].

(90°)과 비교를 위해 downward 방향(0°)의 두 가지 모듈 위치에 대해 수행하였다. BSA 용액의 투과 플릭스 결과와 플릭스 향상성을 Fig. 8에 나타내었으며, dextran 용액에 대한 결과를 각각 Fig. 9에 나타내었다.

이 결과 custom design 막모듈에서의 조작시간에 따른 투과 플릭스는 Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)에 나타난 것과 같이 BSA와 dextran 용액 모두에 대해 막표면 근방에서 밀도역전이 일어나 NCIF가 발생하는 crossward(90°) 방향으로의 투과 플릭스는 밀도역전이 없어 NCIF가 발생되지 않는 downward(0°) 방향으로의 투과 플릭스보다 증가하였다. 조작시간에 따라 Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)에 나타난 downward 플릭스에 대한 crossward 플릭스의 비인 플릭스 향상성($E_{cross/down}$)은 BSA 용액의 경우 2시간

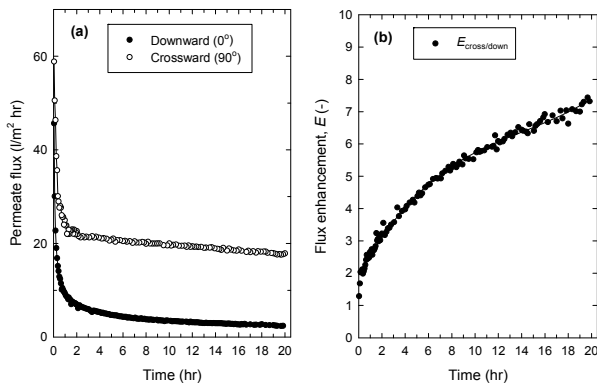


Fig. 10. Long-term trends of (a) flux and (b) flux enhancement for the dead-end filtration of BSA solution at downward and crossward directions of a custom design module [$\Delta P = 200$ kPa, BSA concentration = 1 g/L].

경과 후 약 3.8배까지 증가하였으며, dextran 용액의 경우에는 약 1.8배까지 증가하였다. 일반적으로 막여과 시 단백질은 다당류보다 막오염을 잘 발생시키는 것으로 알려져 있으며, 따라서 dextran 용액에 비해 막오염을 크게 형성시키는 BSA 용액의 막여과에서 밀도역전에 의한 NCIF 발생이 더 커서 플럭스 향상성이 더 증가한 것으로 판단된다[8].

BSA 용액을 대상으로 crossward 방향으로의 막여과 시 발생한 NCIF가 장시간의 운전에서도 지속적으로 그 효과가 지속되는지를 실험한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 결과 20시간의 막여과 운전 동안 NCIF의 발생이 지속되어 crossward 방향의 투과 플럭스는 항상 downward 방향의 플럭스보다 증가하므로 플럭스 향상성이 계속적으로 증가하여 20시간 경과 후 약 7.5배까지 증가하였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 설계한 custom design 막모듈은 commercial 막모듈과는 달리 모듈 내에 존재하는 공기층을 제거하지 않은 상태에서 공기층의 방해 없이 crossward 방향(90°)으로 막투과가 이루어져 막여과 시 항상 NCIF가 발생되므로 막오염 형성 억제에 의한 투과 플럭스 증가를 기대할 수 있다.

4. 결 론

BSA 단백질 용액의 전량 막여과에서 commercial 막모듈의 중력에 대한 경사각 변화에 따라 발생된 자연대류 불안정 흐름(NCIF)의 막오염 형성 억제에 따른 투과

플럭스 증가 효과를 측정된 결과, 막모듈의 경사각이 0°에서 180°로 증가할수록 NCIF 발생이 커져 투과 플럭스가 증가함을 확인하였다. 그러나 commercial 막모듈에서 NCIF를 발생시키기 위해서는 모듈 내에 존재하는 공기층을 완전히 제거해야 하는 조작상의 문제가 있다. 본 연구에서 제작한 custom design 막모듈은 모듈 상부에 공기층이 존재하더라도 항상 NCIF가 발생될 수 있도록 crossward 방향(90°)으로 막투과가 이루어지게 설계하였다. Custom design 막모듈을 사용한 BSA 및 dextran 용액의 막여과 실험을 수행한 결과 crossward 방향의 투과 플럭스는 NCIF의 발생으로 2시간 조작 시 BSA 용액의 경우 약 3.8배, dextran 용액의 경우 약 1.8배까지 증가하였다. 또한 BSA 용액을 대상으로 한 20시간의 장시간 막여과 운전 시에도 NCIF의 발생이 지속되어 투과 플럭스가 약 7.5배까지 증가하였다. 본 연구에서 설계된 막모듈은 crossward 방향으로 막투과가 이루어져 항상 모듈 내에 NCIF가 발생되므로 막오염 억제에 따른 투과 플럭스 증가를 기대할 수 있어 전량여과 막모듈로서의 활용성이 있음이 확인되었다.

Acknowledgements

이 논문은 2017학년도 충북대학교 연구년제 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was financially supported by the Research Year of Chungbuk National University in 2017).

Reference

1. W. Guo, H. H. Ngo, and J. Li, "A mini-review on membrane fouling", *Bioresour. Technol.*, **122**, 27 (2012).
2. C. Williams and R. Wakeman, "Membrane fouling and alternative techniques for its alleviation", *Membr. Technol.*, **2000**, 4 (2000).
3. K. H. Youm, H. Y. Lee, and Y. C. Shin, "Water treatment using separation membranes", pp. 25-30, p. 83, Sin-A Publishing, Jeju, Korea (2011).
4. K. Y. Chung and G. Belfort, "Performance test for membrane module using Dean vortices", *Membr. J.*, **2**, 104 (1992).

5. H. B. Winzeler and G. Belfort, "Enhanced performance for pressure-driven membrane processes: The argument for fluid instabilities", *J. Membr. Sci.*, **80**, 35 (1993).
6. J. Y. Park, H. W. Kim, and C. K. Choi, "Experimental study and modelling on membrane fouling in Taylor vortex flow microfiltration", *Membr. J.*, **13**, 88 (2003).
7. T. J. Hendricks, J. F. Macquin, and F. A. Williams, "Observation on buoyant convection in reverse osmosis", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **14**, 166 (1975).
8. K. H. Youm, A. G. Fane, and D. E. Wiley, "Effects of natural convection instability on membrane performance in dead-end and cross-flow ultrafiltration", *J. Membr. Sci.*, **116**, 229 (1996).
9. Y. J. Cho and K. H. Youm, "Improvement of membrane performance by natural convection instability flow in ultrafiltration of colloidal solutions", *Membr. J.*, **21**, 84 (2011).
10. Y. J. Kim and K. H. Youm, "Analysis of membrane fouling reduction by natural convection instability flow in membrane filtration of protein solution using blocking filtration model", *Membr. J.*, **29**, 18 (2019).
11. M. M. Bradford, "A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding", *Anal. Biochem.*, **72**, 248 (1976).
12. F. S. Julio, R. B. Francisco, S. D. Raquel, and G. A. Pedro, "Buoyancy effects in dead-end reverse osmosis: Visualization by holographic interferometry", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **46**, 1794 (2007).