

1축 회전판형 UF 모듈의 투과모델 및 Oil Emulsion 분리 특성

김 제 우 · 노 수 흥[†]

연세대학교 환경과학과

(1996년 2월 27일 접수, 1996년 4월 23일 채택)

Flux Model of One-shaft Rotary Disc UF Module for the Separation of Oil Emulsion

J.W. Kim and S.H. Noh[†]

Dept. of Environmental Science, Yonsei University, Won-ju, Korea

(Received February 27, 1996, Accepted April 23, 1996)

요 약 : 본 연구에서는 1축 회전판형 한외여과막 모듈의 순수 투과율 예측모델과 기름 에멀전의 분리 특성 및 투과율 예측모델을 유도하였다. 1축 RDM은 한외여과막(UOP사, 직경 0.22m)으로 제작된 회전판막을 장착하여 25℃에서 압력, 각속도(ω), 농도 변화에 따라 분리특성을 조사하였다. 회전판막의 각속도가 0에서 52.36rad/s로 증가할수록 회전판내 유체가 받는 원심력에 의한 압력 강하와 분리막 표면의 미끄럼 흐름에 의한 압력 강하로 순수 투과율은 최대 각속도에서 3.9% 감소하였다. 원심력과 미끄럼 흐름에 의한 압력 강하는 선속도(ωr)의 자승에 비례하였다. 회전판의 각속도가 52.36에서 2.62rad/s로 감소할 때 5% 절삭유의 투과율은 30.16% 감소하였고 농도가 낮을수록 막회전과 투과율에 미치는 영향은 적었다. 절삭유의 투과율(J ; $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)은 회전에 의한 압력 강하를 고려한 유효압력차(ΔP_T ; Pa), 벌크농도(C_B ; %), 선속도(ωr ; m/s) 등에 영향을 받으며 실험 결과에 저항 모델을 적용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$J = \frac{\Delta P_T}{R' m + \alpha(C_B)^\beta (\omega r)^\gamma (\Delta P_T)}$$

EC-50 절삭유의 투과율 실험에서 얻은 결과를 이용하여 $R' m = 1.12 \times 10^7 \text{m/s}$, $\alpha = 0.035$, $\beta = 0.735$, $\gamma = -0.456$ 을 구하였다. 모델에서 계산된 투과율은 농도 0.5~5%, 회전수 2.62~52.36rad/s 범위에서 실제 투과율에 가까이 접근하였다.

Abstract: Rotary disc ultrafiltration module(RDM) was developed for the separation of oil emulsions. This module was devised to reduce the gel polarization phenomenon by decoupling the operation pressure and the surface velocity of solution in ultrafiltration(UF) processes. The rotary disc membrane consists of 3mm-thick ABS plate covered with UF membrane(UOP, U.S.A.). When the angular velocity(ω) was increased, the pure water flux was slightly decreased due to pressure drop caused by centrifugal force and slip flow at the surface of membrane. The pressure drop was proportional to the square of linear velocity(ωr). When the angular velocity was changed from 52.36rad/s to 2.62rad/s, the flux decline for 5% cutting oil in one-shaft RDM at 25℃ and 0.1MPa was 30.16%. In the lower concentrations, angular velocity tends to give less effect on the flux. Flux(J ; $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) in a rotating disc module is mainly a function of the bulk concentration(C_B ; %), the linear velocity(ωr ; m/s) and the effective transmembrane pressure(ΔP_T ; Pa). Using a modified resistance-in-series model, the flux data of cutting oil experiments were fitted to give the following equation.

$$J = \frac{\Delta P_1}{R' m + \alpha(C_B)^\beta (\omega r)^\gamma (\Delta P_1)}$$

The values of $R' m$, α , β and γ were $1.12 \times 107 \text{ m/s}$, 0.035, 0.0735 and -0.456, respectively. The experimental data obtained were in good agreement with the flux calculated by the model equation.

1. 서 론

점도와 부유물질 농도가 높은 폐수 처리에 사용되는 십자흐름식 여과방식인 판틀형 또는 관형 모듈은 막표면 속도를 증가시키기 위해 큰 용량의 순환펌프가 사용되며 처리수량에 따른 에너지 비용이 많이 든다. 따라서, 막표면의 농도분극층을 적은 에너지를 사용하여 최소화할 수 있는 동력학적 여과기에 대한 연구의 필요성이 제기되었다[1].

동력학적 여과기는 유체 속에서 원통막을 회전시켜 Taylor 와류를 응용한 회전 원통형 모듈(RCM: rotating cylinder module)[2, 3]과 회전판막 또는 rotor를 회전시켜 전단응력(shear stress)을 증대시키는 회전판형 모듈(RDM: rotary disc module)[1, 4, 5, 6, 7] 등이 있다. 유입수에 압력을 걸어 주는 대신 막자체를 용액에서 회전시켜 높은 전단응력(shear stress)으로 난류(turbulence)를 형성시켜 농도분극 현상을 감소시킬 수 있다.

Margaritis 등에 의해 고안된 회전 원통형 모듈은 발효 공정에서 미생물의 농도를 높이기 위해 만들어졌으며, 소모되는 에너지량, 산소 전달 및 미생물의 농축 특성 등에 대하여 연구하였다[2]. 박진용은 RCM에서 실리카(silica) 슬러리의 투과 특성을 연구하였다. 막과 유체 사이의 상대속도 증가로 인한 막 표면에서의 압력 강하와 막의 회전속도가 증가할수록 시간에 따른 투과율 감소 둔화를 관찰하였고 케이크 저항 RC에 대한 새로운 모델식을 제시하였다[3]. 그러나, 이러한 RCM은 실용화할 때 막의 표면적을 증가시키기 위해서 부피가 커져야 하는 단점이 있으므로 발효 공정에서 제한적으로 사용되고 있다.

고정된 막 사이에 rotor가 고속으로 회전하는 형태의 RDM은 Horikita 등이 발효 효소의 분리 및 농축 실험을 통하여 일반적인 십자흐름 여과방식의 투과율보다 1.7~5배의 투과율을 얻을 수 있었다[1]. 스웨덴의 ABB Flootek 회사는 이와 같은 RDM 제품을 상품화하였다.

막 자체가 회전하는 RDM은 1축 RDM의 기초 실

험으로부터 발전하였다. 일본의 Masuda 등은 1축 RDM을 사용하여 순수에서 회전에 따른 압력 강하를 관찰하고 Dextran, 실리카 용액, 활성슬러지의 분리 실험을 통하여 물질전달계수, k_d 값이 판틀형(Plate & Frame) 모듈보다 몇 배 더 큰 것을 밝혀 내었다[4]. Murase 등은 묽은 슬러리의 세라믹 필터에 의한 투과 특성에 의해 동력학적 여과계수 SR을 정의하고 기존의 모듈과 비교 연구하였다[5].

“Engaged type”의 2축 RDM은 1축 RDM이 발전된 형태로 housing의 부피에 대하여 막면적을 높일 수 있고 회전 방향을 엇갈리게 함으로써 유체의 상대속도를 증가시킨다. Masuda 등은 2축 RDM을 사용하여 도시 하수처리 공정 중 활성슬러지를 분리하고 안정된 투과율을 획득하였다[6]. 도시 하수처리 공정의 활성슬러지를 분리하기 위하여 Aqua Renaissance'90 프로젝트의 일환으로 도시 하수처리에 2축 RDM이 사용되었다[7].

그러나, RDM의 분리 특성에 관한 연구는 기초적인 연구 단계를 거쳐 도시하수 처리에서 활성슬러지 분리에 적용되고 있으나 실험적인 결과와 그 경향을 고찰하였을 뿐 체계적인 이론적 접근이 미약하였다. 특히, UF공정의 투과 모델의 연구는 아직 체계적으로 되어 있지 않다. 본 연구에서는 유체 속에서 막 자체를 회전시켜 높은 막표면 속도를 얻어 농도분극 현상을 감소시키는 1축 회전판형 한외여과막 모듈을 개발하여 1축 RDM의 기초 분리 특성을 규명하고 기름 에멀션의 분리 특성과 투과율 모델에 관한 연구를 수행하였다.

2. 투과모델

동력학적 막분리 공정에서 투과율은 여과기의 회전 속도에 의존하게 되며 회전이 증가할수록 농도분극층이 감소되어 투과율이 증가한다. 동력학적 여과의 투과 모델은 회전 원통형 막모듈(RCM: rotating cylinder membrane module)에서 연구하고 제시되었다[8]. 그러나, RDM에서 UF막의 투과율 예측모델은

아직 정립이 되어 있지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 제작된 1축 RDM으로 절삭유의 분리 실험을 수행하여 투과 모델식을 제시하였다. 동력학적 여과기의 투과율(J)은 일반적으로 유효압력차(ΔP_T), 벌크농도(C_B) 그리고 회전에 의한 선속도(ωr) 등에 의해 결정되어 진다.

2. 1. 회전에 의한 압력강하

회전관형 막모듈에서 유효압력차(ΔP_T)는 운전압력차(ΔP)에서 회전에 따라 회전관내 유체가 갖는 원심력에 의한 압력 강하(P_{Fc})[4]와 막표면과 유체와의 미끄럼(slip)흐름에 의한 압력 강하(P_{Slip})[9]를 제외하여 식 (1)로 표시한다.

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P - P_{net} \\ &= \Delta P - (P_{Fc} + P_{Slip}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $P_{net}(=P_{Fc} + P_{Slip})$ 는 회전에 의해 유체가 갖는 압력 강하이다.

회전하는 원판에서 임의의 반지름 r , 두께 dr 에서의 원심력(centrifugal force)은 Newton의 제 2법칙($F=ma$)을 적용하여($a=\omega^2 r$) 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$dF = \frac{\omega^2 r}{g_c} dm \quad (2)$$

여기서, 액체의 밀도가 ρ 이고 고리의 폭을 b 라 하면,

$$dm = 2\pi \rho r b dr \quad (3)$$

이고, dm 을 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$dF = \frac{2\pi \rho b \omega^2 r^2 dr}{g_c} \quad (4)$$

이 요소에서의 압력 변화는 액체 요소가 내는 힘을 고리의 넓이로 나눈 것과 같으므로 식 (5)로 표시한다.

$$dP = \frac{dF}{2\pi r b} = \frac{\rho \omega^2 r dr}{g_c} \quad (5)$$

고리 전체에서의 압력 강하는 밀도가 일정하다고 가정하고 적분하면 다음과 같다[10].

$$P_{Fc} = \frac{\rho \omega^2 r^2}{2 g_c} \quad (6)$$

그런데, 막표면과 유체와의 미끄럼 흐름에 의한 압력 강하는 회전관의 표면에서 유체가 받는 원심력에

의한 영향이므로 회전관의 가장자리 선속도(ωr)의 자승에 비례하여 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$P_{Slip} = b (\omega r)^2 \quad (7)$$

따라서, 회전관형 막모듈에서 유효압력차는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P - \left\{ \frac{\rho \omega^2 r^2}{2 g_c} + b (\omega r)^2 \right\} \\ &= \Delta P - \left(\frac{\rho}{2 g_c} + b \right) (\omega r)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, b 는 미끄럼 흐름에 의한 압력 강하에 대한 상수이다.

2. 2. 저항모델을 이용한 투과모델

경계층 저항모델에서 투과율(J)은 실제압력차(ΔP_T)에 비례하고 저항(R)에 반비례한다. 저항(R)은 막자체의 저항(R_m), 막오염에 의한 저항(R_f), 겔층 및 농도분극에 의한 저항(R_g) 등을 포함한다. 경계층 저항 모델식(resistance in-series model)은 다음과 같이 식 (9)로 표현한다.

$$J = \frac{\Delta P_T}{R} = \frac{\Delta P_T}{R_m + R_f + R_g} \quad (9)$$

겔층 및 농도분극층의 R_g 는 적용된 압력에 의해 형성되므로 식 (10)으로 표시하면

$$R_g = \phi \Delta P_T \quad (10)$$

이고, 식 (10)을 식 (9)에 대입하면 저항모델식은 식 (11)로 된다.

$$J = \frac{\Delta P_T}{R_m + R_f + \phi \Delta P_T} \quad (11)$$

R_m , R_f 는 분리막 자체의 성질에 직접 영향을 주므로 $R'_m = R_m + R_f$ 로 표시될 수 있다. R_f 가 상대적으로 작고 $R'_m < R_g$ 라 가정하면 투과율은 압력 증가에 무관하고 임계값($1/\phi$)에 도달한다[11]. ϕ 는 식 (10)에서와 같이 일정압력차에서 용액의 농도 및 조성과 같은 화학적 영향과 모듈에서 선속도 등의 물리적 영향을 받는 인자이다. 용액의 농도가 증가되면 급격한 겔층과 농도분극층이 형성되어 투과율이 저하되어 ϕ 가 증가되고 결국 R_g 이 증가되어 투과율이 감소된다. 모듈에서 선속도가 증가되면 분리막 표면의 농도분극층의 두께가 줄어들어 ϕ 가 감소되고 결국 R_g 이 감소

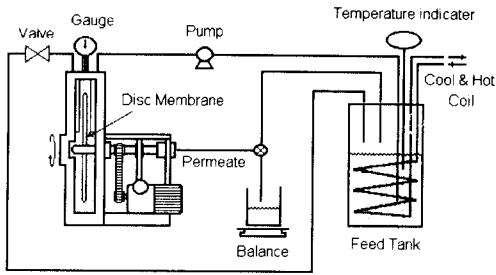


Fig. 1. A schematic diagram of one-shaft RDM.

되어 투과율이 증가된다. 저항모델의 식 (11)의 역수를 취하면, 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{J} = \frac{R'_m + \phi \Delta P_T}{\Delta P_T} = \frac{R'_m}{\Delta P_T} + \phi \quad (12)$$

ϕ 는 선속도(ωr)와 벌크농도(C_B)에 대한 함수이므로 식 (13)으로 나타낼 수 있다. 여기서, ω 는 각속도 (angular velocity, $\omega = d\theta/dt$)이고 r 은 회전반경이다.

$$\phi = \alpha(C_B)^\beta (\omega r)^\gamma \quad (13)$$

회전 여과기에서 겔층과 농도분극층의 저항은 식 (13)을 식 (10)에 대입하여 식 (14)와 같이 벌크농도, 선속도, 유효압력에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_g = \alpha(C_B)^\beta (\omega r)^\gamma (\Delta P_T) \quad (14)$$

동력학적 여과기에서는 선속도의 증가에 따라 압력 강하가 약간 발생하나, 겔층과 농도분극층의 저항은 급격히 감소한다. 식 (14)를 식 (9)에 대입하면 식 (15)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P_T}{R_m + R_f + \alpha(C_B)^\beta (\omega r)^\gamma (\Delta P_T)} \quad (15)$$

여기서, α , β , γ 의 값은 회전판형 막모듈에서 겔층과 농도분극층에 여러 가지 영향을 주는 인자이며 식 (14)에서 변수의 영향을 계수화하여 표시하였다. α 는 농도분극층에 의한 저항에 관하여 용액의 농도, 선속도, 압력차에 대한 비례계수이며 전체적으로 α 가 증가되면 농도분극층의 두께가 커져서 투과율이 감소하게 된다. 용액의 농도와 같은 화학적 조성과의 연관된 β 가 양의 값을 갖고 증가되면, 그 용액은 분리막 표면에 대하여 두꺼운 겔층과 농도분극층을 형성하여 투과율에 대하여 반발력을 갖는다. 이와 반대로 모듈

에서 선속도와 연관된 γ 가 음의 값을 갖고 증가되면, 선속도에 대하여 겔층과 농도분극층의 두께를 효과적으로 감소시켜 투과율의 증가를 가져온다. 식 (15)는 다음과 같은 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P_T}{R'_m + \alpha(C_B)^\beta (\omega r)^\gamma (\Delta P_T)} \quad (16)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1. 1축 회전판형 막모듈

1축 회전판형 막모듈 실험 장치의 개략적인 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 회전판막은 UOP사의 Poly-sulfone 한외여과막(MWCO 35,000~50,000)을 사용하여 직경 0.22m, 두께 3mm의 ABS판을 지지판으로 하여 제작하였다. 제작된 회전판막은 오염 물질을 효과적으로 제거시키기 위해 housing의 중앙에 수직으로 설치하였다. 회전판막과 housing 사이에 방패판을 설치하여 난류를 유도하였다.

housing안에 회전판막을 회전축에 직각으로 설치하였으며 축은 모터(0~500rpm)에 의해 회전한다. housing과 회전축 사이에 mechanical seal을 설치하여 1.5MPa의 압력에서도 용액이 housing 외부로 새지 않고 회전할 수 있도록 만들었다.

용액은 펌프에 의해 feed tank에서 housing으로 보내지고 housing으로부터 용액이 나오는 배관에 밸브를 설치하여 압력을 조절하였다. 온도는 feed tank에 냉각 코일을 설치하여 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 를 유지하였다. 투과수는 회전막을 통하여 회전축에 모아져 나온다. 투과량은 일정 시간 무게로 측정하였고 투과수와 농축수는 feed tank로 보내어 feed tank의 농도를 일정하게 유지하였다.

제작된 회전판막의 투과 특성을 비교 조사하기 위하여 stirred batch cell장치(Amicon사, model 8400)를 이용하였다. 동일 분리막을 사용하여 1축 회전판막형 모듈의 순수 투과율과 stirred batch cell 장치에서의 순수 투과율을 동일 압력에서 측정하고 비교하였다.

3.2. 실험용액 및 방법

사용한 순수는 4차 증류수(Banstead, U.S.A, conductivity; 18megohm-cm)를 사용하였다. 제조된 회전판막의 순수 투과율을 0.78MPa까지 압력을 증가

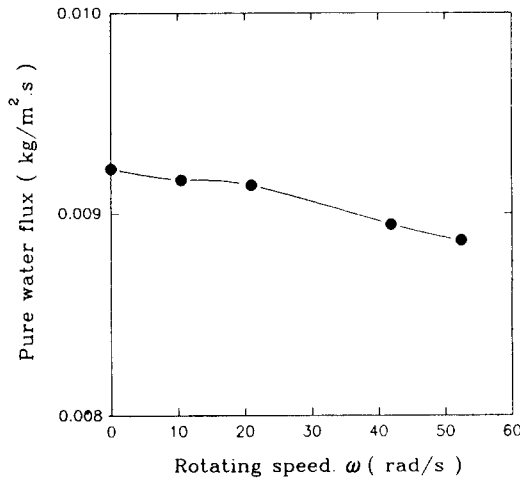


Fig. 2. Effect of rotating speed on pure water flux in RDM at $\Delta P=0.1\text{MPa}$ and 25°C .

시키며 측정하였다. 그리고, 0.1MPa의 압력에서 각 속도를 0에서 52.36rad/s로 증가시키며 순수 투과율을 조사하여 미끄럼 흐름과 원심력에 의한 압력 강하를 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 에서 관찰하였다.

범우화학(주)의 수용성 EC-50 유백색 에멀션 절삭유를 사용하였다. 상업용 절삭유 EC-50을 0.5~5% 용액으로 희석 제조하여 0.1MPa의 압력에서 각 속도를 52.36rad/s에서 2.62rad/s로 감소시키며 평균 투과율을 조사하였다. 그리고, 각속도를 20.94rad/s와 10.47rad/s로 고정하고 압력을 0.78MPa까지 증가시켜 평균 투과율과 한계 투과율(limiting flux)을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4. 1. 순수 투과율 측정

1축 RDM에서 순수 투과율은 0.1MPa의 운전압력차(ΔP)에서 $9.45 \times 10^{-3} \pm 0.28 \times 10^{-3} \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 로 Amicon cell에서 같은 UF막을 사용하여 얻은 $9.47 \times 10^{-3} \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 와 거의 비슷하여 막 접촉 상태는 양호한 것으로 판명되었다.

1축 RDM에서 회전판막의 각속도를 0에서 52.36rad/s까지 바꾸어 가며 순수 투과율의 변화를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 1축 RDM에서 순수 투과율은 회전판막의 각속도가 0에서 52.36rad/s로 증가할수록 회전판내 유체가 받

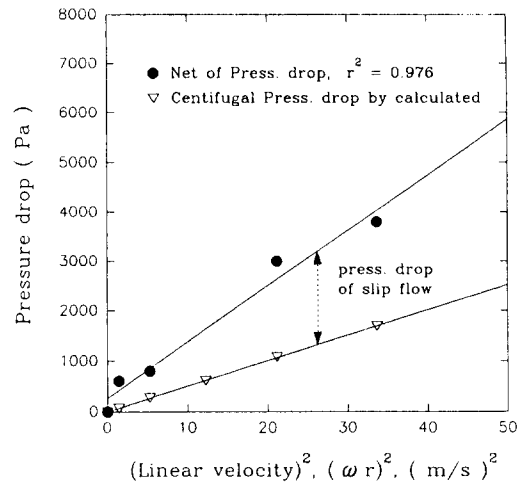


Fig. 3. Pressure drop versus square of the linear velocity(ωr) in one-shaft RDM.

는 원심력에 의한 압력 강하(P_{fc})와 분리막 표면의 미끄럼 흐름에 의한 압력 강하(P_{slip})로 최대 각속도에서 3.9%까지 감소하였다.

Fig. 3은 선속도(ωr)의 증가에 따른 압력 강하를 보여준다. 순수 투과율은 압력에 비례하므로 회전에 따른 순수 투과율의 차이를 측정함으로써 압력 강하를 계산할 수 있다. 선속도에 따른 유효압력차(ΔP_T)는 실험 결과로부터 식 (17)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P - P_{fc} - P_{slip} \\ &= \Delta P - 113.22 \times (\omega r)^2 \end{aligned} \quad (17)$$

1축 RDM에서 선속도 증가에 따른 회전판내 원심력에 의한 압력 강하를 식 (6)에 적용하고 계산한 값을 식 (18)로 나타내었다.

$$\begin{aligned} P_{fc} &= (\rho \omega^2 r^2 / 2 g_c) \\ &= 50.86 \times (\omega r)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

막표면과 유체와의 미끄럼 흐름에 의한 압력 강하는 회전에 의한 전체 압력 강하에서 계산된 회전판내 유체가 갖는 원심력에 의한 압력 강하를 제외한 값이므로 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{slip} = 62.40 \times (\omega r)^2 \quad (19)$$

식 (17), (18), (19)를 비교하면, 대체로 1축 RDM에서 막표면과 유체와의 미끄럼 흐름에 의한 압력 강하는 회전판내 유체가 갖는 원심력에 의한 압력 강하

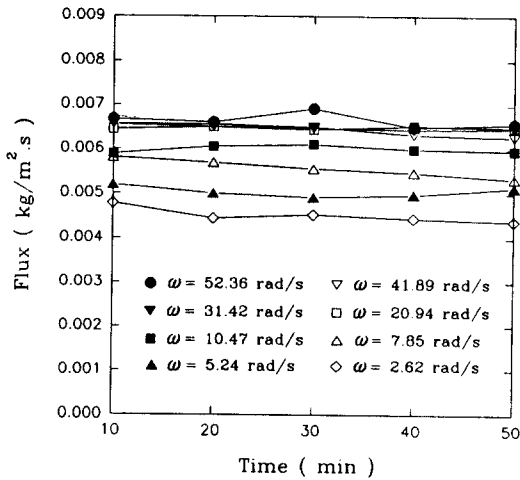


Fig. 4. Effect of rotating speed on flux decline for 0.5% cutting oil emulsion in one-shaft RDM at $\Delta P=0.1\text{MPa}$ and 25°C (Pure water flux = $9.61 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$).

와 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 위의 결과로부터 회전에 의한 전체 압력 강하는 원심력에 의한 압력 강하의 약 2배임을 알 수 있다.

4.2. 절삭유 분리

4.2.1. 회전에 따른 영향

1축 RDM에서 수용성 EC-50 절삭유(0.5, 1, 5%)를 사용하여 분리막과 방해판과의 간격을 3mm, 0.1MPa의 운전압력차(ΔP)로 고정하고, 각속도의 변화에 따른 투과율을 운전 시간에 따라 측정하였다. Fig. 4에 0.5% 절삭유의 실험 결과를 나타내었다. 각속도가 클수록 투과율은 높고 운전 시간에 따라 일정하였으나, 작을수록 투과율은 적고 점차로 감소하였다.

절삭유를 0.1MPa의 운전압력차(ΔP)에서 각속도와 농도 변화에 따른 분리 실험을 수행하고 평균 투과율의 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 각속도가 52.36rad/s에서 2.62rad/s로 감소할수록 투과율은 농도 0.5%일 때 6.53×10^{-3} 에서 $4.5 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 감소하였다. 1%일 때 5.37×10^{-3} 에서 $2.74 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 감소하고, 5%일 때 3.78×10^{-3} 에서 $1.14 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 감소하였다. 대체로 농도가 낮을수록 막회전의 영향은 크지 않았다. 막회전의 증가에 따라 점차로 투과율이 증가하는 경향을 보이며 대개 각 속

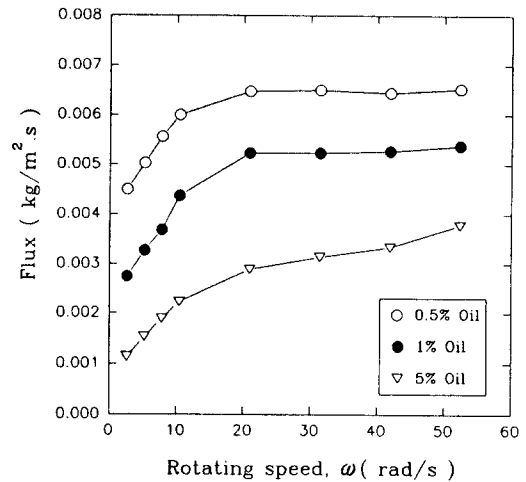


Fig. 5. Effect of rotating speed on flux for cutting oil emulsion in one-shaft RDM at $\Delta P=0.1\text{MPa}$ and 25°C .

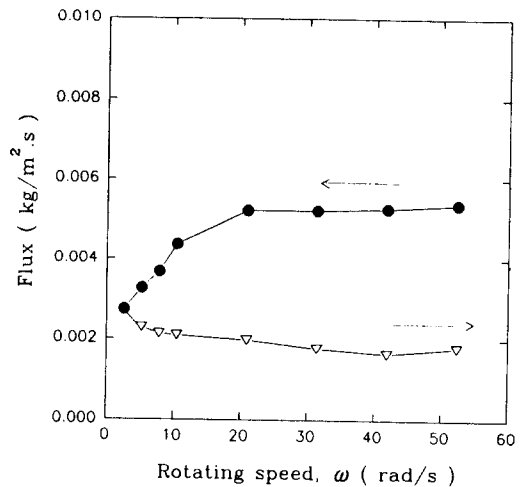


Fig. 6. Effect of operating sequence on flux for 1% cutting oil emulsion in one-shaft RDM at $\Delta P=0.1\text{MPa}$ and 25°C (Pure water flux = $9.58 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$).

도 ω 가 20.94rad/s 이상에서는 회전이 증가함에도 불구하고 일정한 투과율이 측정되었다. 이는 각속도의 증가와 무관한 영역이 존재하며 단지 용액의 농도에만 의존함을 알 수 있다. 막회전이 빨라질수록 투과율이 증가하는 현상은 막 표면에서 유체의 선속도가 증가하여 전단응력이 농도분극층의 일부를 벌크(bulk)로 확산하기 때문이다.

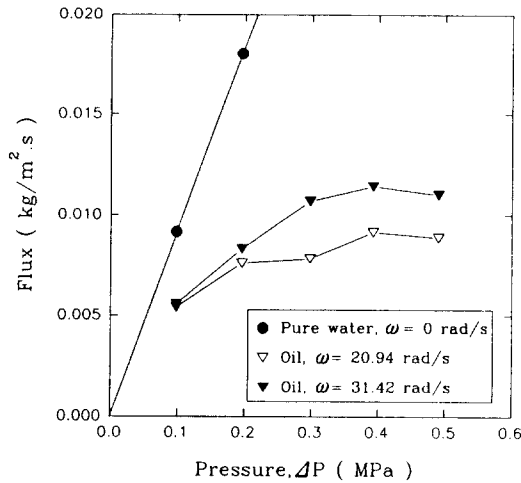


Fig. 7. Effects of transmembrane pressure(ΔP) and rotating speed(ω) on flux for 1% cutting oil emulsion in one-shaft RDM at 25°C.

Fig. 6에 1축 RDM을 각속도를 52.36에서 2.62rad/s로 점차로 감소시키며 운전한 후 다시 52.36rad/s까지 증가하며 측정된 평균 투과율을 나타내었다. 투과율이 초기의 값으로 회복되지는 않았으며 급격한 투과율 감소는 없었다. 막세공이나 표면이 한번 기름 성분으로 오염되면 선속도를 증가시켜도 투과율이 회복되지 않으며 막세척에 의해서만 투과율을 회복할 수 있었다.

4. 2. 2. 압력증가에 따른 영향

1% 절삭유를 1축 RDM에서 각속도(ω)를 20.94rad/s, 31.42rad/s로 고정시키고 운전 압력차(ΔP)의 증가에 따른 투과율을 조사하여 Fig. 7에 나타내었다. 투과율은 낮은 압력에서는 압력에 거의 비례하나, 압력의 증가에 따라 겔층이 두꺼워짐으로써 결국 압력 증가에 무관하게 한계 투과율에 도달하였다. 한계 투과율(limiting flux)은 분리막 표면의 선속도와 농도에 따라 달라진다. 1% 절삭유의 한계 투과율은 0.39MPa의 운전 압력차(ΔP)에서 각속도가 31.42rad/s일 때 $1.14 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 20.94rad/s의 $9.15 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 보다 $2.28 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 가 더 컸다. 압력을 한계 투과율 이상 증가시키면 압력에 의해 겔층이 두꺼워져 오히려 투과율이 약간 감소되었다.

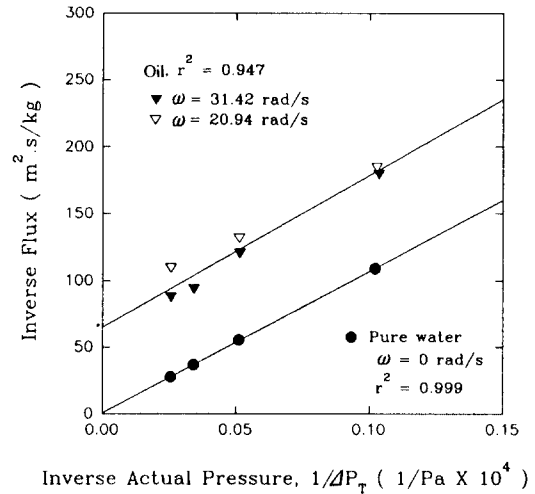


Fig. 8. Inverse flux versus $1/\Delta P_T$ in one-shaft RDM of 1% cutting oil are replotted according to eqn.(12) at 25°C.

4. 2. 3. 절삭유의 투과모델 해석

Fig. 7의 결과를 식 (17)에 적용하여 유효압력차(ΔP_1)에 해당되는 투과율로 환산하고, 식 (12)에 따라 투과율과 압력에 역수를 취하여 Fig. 8에 나타내었다. 식 (12)에 따르면, Fig. 8에서 기울기는 R'_m 에 해당되고 Y절편은 Φ 에 해당된다. 계산된 1% 절삭유의 평균 R'_m 과 Φ 는 각각 $1.12 \times 10^7 \text{m/s}$, $66.22 \text{m/s} \cdot \text{Pa}$ 이었다. 그리고, 순수에 대한 막의 저항(R_m)은 $1.06 \times 10^7 \text{m/s}$ 이므로 1% 절삭유의 오염 물질에 의한 저항($R_i = R'_m - R_m$)은 $6.09 \times 10^5 \text{m/s}$ 이었다. 여기서, $R'_m = R_m + R_i$ 이고 R_m 이 R_i 보다 매우 크기 때문에 $R'_m \approx R_m$ 라고 볼 수 있다. 위의 결과로부터 1축 RDM을 사용하여 절삭유를 분리할 때, 막이 회전할 경우 투과율은 막오염 물질에 의존하기보다는 겔층과 농도분극층에 영향을 크게 받을음을 알 수 있다.

Fig. 5의 결과를 식 (17)과 식 (12)에 적용하여 각 농도별 회전수에 따른 Φ 를 계산하였다. 여기서 R'_m 은 Fig. 8에서 얻은 값을 사용($R'_m = 1.12 \times 10^7 \text{m/s}$)하였다. Φ 는 막회전에 영향을 받으므로 Φ 와 선속도($\omega \times r$)와의 관계를 수식화하기 위하여 각각에 대하여 대수를 취한 값들을 Fig. 9에 나타내었다. Table 1에 대응되는 B와 $(\omega r)^\gamma$ 의 값을 나타내었다.

$$\Phi = B(\omega r)^\gamma \tag{20}$$

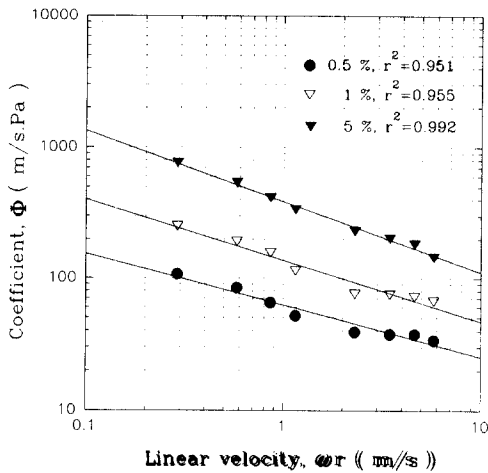


Fig. 9. A correlation between Φ and ωr for cutting oil emulsion in one-shaft RDM at 25°C.

Table 1. Coefficients of α , β , γ , B According to Eqn. (19) for EC-50 Cutting Oil in RDM at 25°C

Bulk concentration C_B (%)	α	β	B	γ
0.5	117.94	0.76	62.56	-0.39
1			137.02	-0.47
5			385.31	-0.54
Average				-0.47

여기서, γ 값은 각 농도에 대하여 대체로 일정한 값을 나타내었고 B는 벌크농도에 영향을 받았다. Fig. 10에 B의 값과 벌크농도(C_B)와의 관계를 수식화하기 위하여 각각에 대하여 대수를 취한 값들을 나타내었다. Table 1에 대응되는 α 와 β 의 값을 나타내었다.

$$B = \alpha(C_B)^\beta \quad (21)$$

지금까지 계산된 값을 정리하여 식 (16)에 적용하면 다음과 같은 모델식을 얻을 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P_T}{R'_m + 117.94(C_B^{0.76})(\omega r^{-0.47})(\Delta P_T)} \quad (22)$$

여기서, J = 막투과율(kg/m²·s)

R'_m = 막자체에 직접 영향을 주는 저항 (R_m+R_f: m/s)

C_B = 벌크용액의 농도(%)

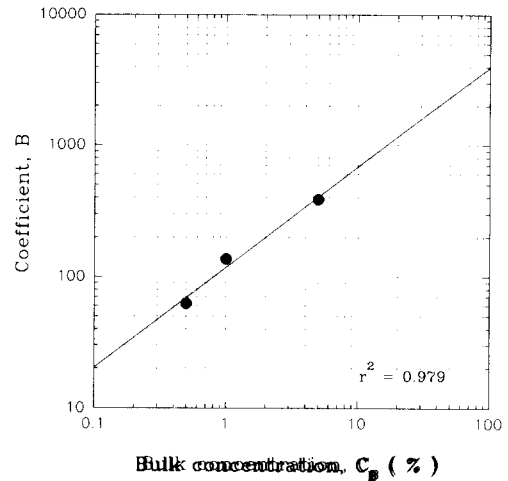


Fig. 10. A correlation between B and C_B for cutting oil emulsion in one-shaft RDM at 25°C.

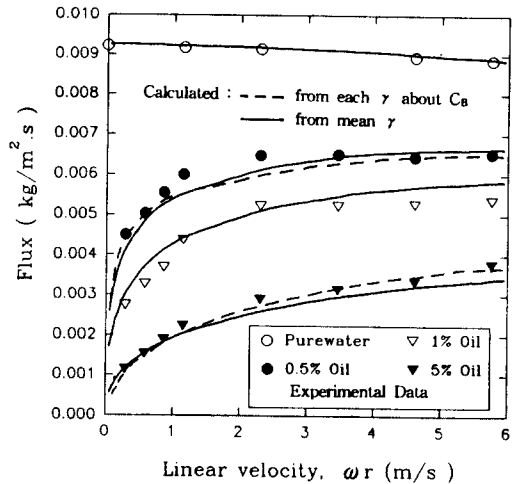


Fig. 11. Effect of rotating speed on flux compared with predictions by eqn.(22) for cutting oil emulsion in one-shaft RDM at $\Delta P=0.1$ MPa and 25°C.

ωr = 회전판막의 선속도(m/s)

ΔP_T = 유효압력차(Pa)

식 (22)를 적용하여 계산된 값을 실험 결과와 비교하여 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11은 일정한 운전압력에서 절삭유 농도와 각속도에 따른 실험 및 모델식에 의해 계산된 투과율을 나타내었다. 모델에서 계산된 투과율은 농도 0.5~5%, 회전수 0

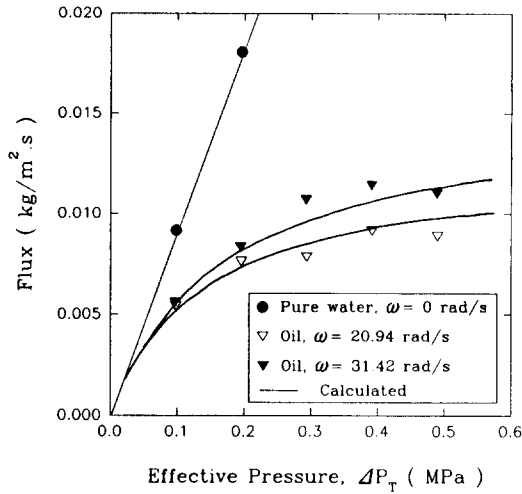


Fig. 12. Effect of effective transmembrane pressure (ΔP_T) compared with predictions by eqn. (22) for cutting oil emulsion in one-shaft RDM at 25°C.

~52.36rad/s 범위에서 실제 투과율에 가까이 접근 하였으나, 5% 절삭유에서 계산된 투과율이 선속도가 2m/s 이상에서는 실제 투과율보다 약간 낮았다. 이는 식 (22)를 유도함에 있어서 상수 γ 의 평균값을 사용하였기 때문으로 여겨진다. 식 (16)에 따르면 γ 이 음의 값을 갖고 절대값이 클수록 계산되어지는 투과율은 크다. 그러나, Table 1에서 보여지듯이 농도가 높아질수록 γ 의 절대값이 약간 커지는데 그 값이 대체로 일치하므로 본 모델식 (22)의 유도에서는 그 평균값을 사용하였다. 이에 5%에서는 계산되는 투과율이 실제 투과율보다 약간 낮고, 0.5%에서는 계산되는 투과율이 실제 투과율보다 약간 높았다. 절대값 γ 의 평균값에서 표준편차가 0.075이고, 표준오차가 0.043이다.

Fig. 12에서는 1% 절삭유를 사용하여 각속도를 고정하고 유효압력차를 증가시킨 실험 및 모델식에 의해 계산된 투과율을 나타내었다. 대체로 실제 투과율에 가까이 접근하였다. 위의 실험의 결과, 회전판형 UF 막모듈을 사용하여 절삭유의 한계 투과율을 완전히 극복할 수는 없으나, 막회전을 통하여 유체의 선속도를 증대시켜 한계 투과율을 높일 수 있었다.

5. 결 론

1. 1축 RDM에서 순수 투과율은 0.1MPa에서 $9.45 \times 10^{-3} \pm 0.28 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 Amicon cell에서 같은 UF막을 사용하여 얻은 $9.47 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 와 비슷하여 막 접촉 상태는 양호한 것으로 판명되었다.

2. 회전판막의 각속도(ω)가 0에서 52.36rad/s로 증가할수록 회전판내 유체가 받는 원심력에 의한 압력 강하(P_{Fc})와 분리막 표면의 미끄럼 흐름에 의한 압력 강하(P_{Slip})로 순수 투과율은 최대 각속도에서 3.9%까지 감소하였다. 원심력과 미끄럼 흐름에 의한 압력 강하는 선속도의 자승(ωr)²에 비례하였다.

3. 1축 RDM에서 5% 절삭유의 투과율은 0.1MPa의 압력에서 각속도가 52.36에서 2.62rad/s로 감소할 때 30.16% 감소하였고, 농도가 낮을수록 회전수의 영향은 크지 않았다. 1% 절삭유의 한계 투과율은 0.39MPa의 압력에서 각속도가 31.42rad/s일 때 $1.14 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 20.94rad/s보다 19.74% 더 컸다.

4. 회전판형 막모듈에서 절삭유의 투과율은 저항모델을 적용하여 회전에 의한 압력 강하를 고려한 실제 압력차, 벌크농도 그리고 선속도 등의 함수로 유도될 수 있다. 모델식에서 계산된 투과율은 농도 0.5~5%, 회전수 2.62~52.36rad/s 범위에서 실제 투과율에 가까이 접근하였다.

감 사

본 연구는 통상산업부의 에너지기술개발사업의 연구지원으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

사용 기 호

- B Coefficient of eqn.(20)
- C_b Bulk concentration of the rejected solute [%]
- J Permeate flux [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]
- m Mass of particle [kg]
- ΔP Operating pressure [Pa]
- ΔP_T Effective transmembrane pressure [Pa]
- P_{Fc} Pressure drop of centrifugal force [Pa]
- P_{Slip} Pressure drop of slip flow [Pa]
- P_{net} Net pressure drop by rotating speed [Pa]
- r Radius of rotary disc membrane [m]
- R Resistance of membrane separation [m/s]

- R_m Resistance of membrane[m/s]
 R_f Resistance of fouling[m/s]
 R_g Resistance of gel and concentration polarization[m/s]

그리스 문자

- α, β, γ Values of eqn.(16)
 ϕ Coefficient of eqn.(11)[m/s·Pa]
 ω Angular velocity[rad/s]

참고문헌

- Horikita H., *Abstract of the 6th WFC*, Nagoya, p.306(1993).
- Margritis A and Wilke, C.R., *Biotechnology & Bioengineering*, p.727(1978).
- 박진용, “회전막 여과기를 사용한 실리카 슬러리의 동력학적 분리에 대한 연구”, 박사학위 논문, 서울대학교, 서울(1992).
- H. Masuda, N. Ohkuma and N. Mori, *Abstract of ICOM'87*, Tokyo, p.395(1987).
- T. Murase, et al., *J. of Membrane Sci.*, **62**, p.187 (1991).
- N. Ohkuma, H. Masuda, and N. Mori, *Abstract of ICOM'93*, “Application of rotary disk membrane type ultrafiltration module to the activated sludge process”, p.408(1987).
- M. Ohnishi, et al., *Abstract of ICOM'90 Vol. II*, “Performance of activated sludge filtration by rotary disk type UF module”, p.1103(1990).
- Georges Belfort, Joseph M. Pimbley, Anthony Greiner, and Kun Yong Chung, *J. of Membrane Sci.*, **77**, p.1(1993).
- A. S. Jonsson, *J. of Membrane Sci.*, **79**, p.93 (1993).
- Warren L. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriott, “Unit operations of chemical engineering, Fifth edition”,(1995).
- Munir Cheryan, “Ultrafiltration Handbook”, Technomic Pub. Co., Pennsylvania,(1984).