

## 2축 회전판형 UF 모듈의 Oil Emulsion 분리 특성 연구

김 제 우 · 노 수 흥<sup>†</sup>

연세대학교 환경과학과

(1996년 9월 5일 접수, 1996년 11월 28일 채택)

### Study of Two-shaft Rotary Disc UF Module for the Separation of Oil Emulsion

J. W. Kim and S. H. Noh<sup>†</sup>

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

(Received September 5, 1996, Accepted November 28, 1996)

**요 약 :** 본 연구에서는 2축 회전판형 한외여과막 모듈의 순수투과율 예측모델과 1% 절삭유의 분리특성 및 투과율 예측모델을 유도하였다. 2축 RDM은 한외여과막(UOP사, 직경 0.22m)을 씌운 같은 크기의 회전판막 20개를 장착한 후 막간격과 각속도( $\omega$ )에 따른 분리특성을 조사하였다. 2축 RDM의 순수 투과율은 각속도가 41.89rad/s에서 9.95% 감소하여서 1축 RDM의 감소율 3.01%보다 높았다. 2축 RDM은 회전판막이 겹친 부분에서 난류의 발생으로 미끄럼 흐름에 의한 압력강하는  $(2.5\omega r)^2$ 에 비례하였다. 회전판막 간격이 3mm인 J/J<sub>0</sub>(절삭유의 투과율/순수 투과율)는 각속도가 31.42rad/s에서 2.62rad/s로 감소할 때 0.64에서 0.31로 감소하였고 간격이 7mm일 때의 J/J<sub>0</sub>는 0.64에서 0.27의 감소하여 비슷한 경향을 보였다. 1축 RDM에 사용된 투과율 예측모델식을 변형하여 유도된 2축 RDM의 모델식은 실험결과와 잘 일치하였다.

**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. Two-shaft engaged disc type RDM having 20 rotary disc membranes(UOP, USA) was operated under 85kPa vacuum at 25°C. The pressure drop due to slip flow in the two-shaft RDM was found to be proportional to  $(2.5\omega r)^2$ . The pure water flux of two-shaft RDM decreased by 9.95% at the angular velocity of 41.89rad/s compared to the decrease of 3.01% for one-shaft RDM at the same velocity. When the angular velocity was changed from 31.42rad/s to 2.62rad/s, the flux decline for 1% cutting oil in two-shaft RDM was 30.16% that is similar to that of one-shaft RDM. Disc gap of 3mm and 7mm did not show any significant differences in the flux for 1% cutting oil solution. A modified model for two-shaft RDM showed good agreement with the experimental results for the cutting oil solution.

### 1. 서 론

점도와 부유물질 농도가 높은 폐수처리에서 십자흐름식 여과방식인 판틀형 또는 관형모듈에서 막표면 속도를 증가시키기 위해 큰 용량의 순환펌프가 사용되고, 빈번한 세척이 요구되어 처리수량에 따른 전력

비와 유지비가 많이 든다[1]. 따라서, 막표면의 젤층과 농도분극층을 적은 에너지를 사용하여 최소화할 수 있는 회전판형 막모듈(RDM: rotary disc module)에 대한 연구의 필요성이 제기되었고, 도시하수 처리 등에 실용화를 추진 중이다.

회전판형 막모듈은 유입수에 압력을 걸어주는 대신

막자체를 용액속에서 회전시키므로서 높은 전단응력(shear stress)으로 난류(turbulence)를 야기시켜 겔층과 농도분극 현상을 감소시킬 수 있다[2].

“Engaged disc type”의 2축 RDM은 1축 RDM이 발전된 형태로 housing의 부피에 대한 막면적을 극대화시키고 회전방향을 엇갈리게 함으로서 난류를 발생시켜 막표면에서 유체의 걸보기속도를 증가시킨다. Masuda 등은 2축 RDM을 사용하여 도시하수처리공정 중 활성슬러지를 분리하고 운전시간에 대하여 안정된 투과율을 획득하였다[3]. 일본의 Hitachi 연구소는 도시하수처리 공정 중 활성슬러지를 분리하기 위하여 Aqua Renaissance'90 프로젝트의 일환으로 도시하수처리에 2축 RDM을 사용하였다[4].

“Engaged disc type”의 2축 RDM은 막의 충전밀도를 증대시킬 수 있고, 막표면에서 난류를 형성시키기 때문에 오랜 시간동안 화학적 세척없이 운전할 수 있다[1]. 또한 분리막을 housing에서 분리하여 직접 세척할 수 있고, 손상된 회전판막만 교체할 수 있기 때문에 관리가 용이하며 유지비가 적게 든다.

2축 RDM의 분리특성에 관한 연구는 기초적인 연구단계를 거쳐서 도시하수 처리에서 활성슬러지 분리에 적용되고 있으나 체계적인 이론적 접근이 미약하였다. 본 연구에서는 2축 회전판형 한외여과막 모듈을 제작하여 기초 분리특성을 규명하고 기름에밀션의 분리특성과 투과율 모델에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 투과모델

동력학적 막분리공정에서 투과율은 여과기의 회전 속도에 의존하게 된다. 기존의 십자흐름식 여과장치와 달리 RDM에서는 막회전이 증가할수록 막의 경계층(boundary layer)에서 강한 전단응력(shear stress)이 발생하여 겔층과 농도분극층을 감소시키고 투과율을 증가시킨다. 본 연구에서는 1축 RDM에서 질삭유에 대한 분리실험에 의해 제시된 투과모델식[2]을 기초로 하여 2축 RDM에 대한 모델식을 유도하였다. 2축 RDM의 투과율(J)은 일반적으로 유효압력차( $\Delta P_1$ ), 벌크농도( $C_b$ ), 회전에 따른 걸보기속도( $a \times \omega r$ ), 막간격 등에 의해 결정되어진다.

### 2. 1. 회전에 의한 압력강하

RDM에서 유효압력차( $\Delta P_1$ )는 운전압력차( $\Delta P$ )에서 회전에 따라 회전판내 유체가 갖는 원심력에 의한

압력강하( $P_{1c}$ )와 막표면과 유체와의 미끄럼(slip)흐름에 의한 압력강하( $P_{slip}$ )를 제외하여 식 (1)으로 표시한다.

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= \Delta P - P_{net} \\ &= \Delta P - (P_{1c} + P_{slip}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $P_{net}(=P_{1c}+P_{slip})$ 는 회전에 의해 유체가 갖는 압력강하이다.

회전판의 임의의 반지름 r, 두께 dr 에서 원심력(centrifugal force)에 의한 압력강하는 25℃의 순수에 대하여 식 (2)과 같다.

$$P_{1c} = \frac{\rho \omega^2 r^2}{2 g} = 50.86 \times (\omega r)^2 \quad (2)$$

여기서,  $\omega$ 는 각속도(angular velocity;  $\omega=d\theta/dt$ )이다[2].

2축 RDM에서  $P_{slip}$ 은 회전판막의 선속도의 차에 비례하여 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$P_{slip} = b_2 \times (\omega r)^2 \quad (3)$$

여기서, 상수  $b_2$ 는 2축 RDM에서 25℃의 순수에 대하여 막회전이  $P_{slip}$ 을 유발하는 값이며 막 투과를 방해하는 값, 회전판막 사이의 간격, 회전판막이 겹친 면적 등의 영향을 포함한다.

$P_{slip}$ 은 회전판막이 유체와 접한 부분에서 막 회전에 따른 압력손실을 나타낸다. 1축 RDM에 있어서 회전판막의 선속도는 1축 RDM의 막표면에 근접한 유체에 속도를 부여한다. 즉, 회전에너지가 손실되지 않고 고액 경계면에 전달된다면 막표면의 유체는  $\omega r$ 의 선속도를 갖는다. 그런데, 2축 RDM에 있어서 회전판막은 겹친 부분에서 엇갈리게 돌아가며 각 회전판막이 근접한 유체에 속도를 부여하며 방향은 반대이기 때문에 막과 막사이에서 유체의 특성은 1축 RDM과 다르게 된다. 더욱이 이러한 2축 RDM에서 방향이 다른 유체가 부딪히는 경계에서는 난류가 발생하므로서 실제 유체의 흐름은 1축 RDM과 다른 특성을 나타낸다.

1축 RDM의  $b$ 는 25℃ 순수에 대하여 RDM에서 선속도에 의해 Pslip을 유발시키는 상수이며  $b_2$ 는  $b \times a'$ 이라 할 수 있다. 여기서,  $a'$ 은 막이 엇갈려 회전할 때 막 간격과 막이 겹친 부분의 면적 등의 영향으로  $P_{slip}$ 을 유발하는 값이다. 따라서,  $a'$ 은 막회전속도와 연결시켜  $a' = a^2$ 로 전환하여 선속도의 향으로

넣으면  $(a \times \omega r)^2$ 으로 표현할 수 있다.

따라서, 2축 RDM에서 순수의 유효압력차( $\Delta P_f$ )는 식 (3)을 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_f [\text{Pa}] = \Delta P - \{50.86 + a^2 \times b\} \times (\omega r)^2 \quad (4)$$

2.2. 저항모델을 이용한 투과모델

경계층 저항모델에서 투과율(J)은 실제압력차 ( $\Delta P_f$ )에 비례하고 저항(R)에 반비례한다. 저항(R)은 막자체의 저항( $R_m$ ), 막오염에 의한 저항( $R_f$ ), 겔층과 농도분극에 의한 저항( $R_k$ ) 등을 포함한다. 경계층 저항모델식(resistance in-series model)에서  $R_m$ ,  $R_f$ 는 분리막 자체의 성질에 직접 영향을 주므로  $R'_m = R_m + R_f$ 로 표시될 수 있고, 겔층과 농도분극층의  $R_k$ 는 적용된 압력에 의해 형성되므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[5].

$$J = \frac{\Delta P_f}{R_m + R_f + R_k} = \frac{\Delta P_f}{R'_m + \Phi \Delta P_f} \quad (5)$$

여기서,  $\Phi$ 는 일정압력차에서 용액의 농도 및 조성과 같은 화학적 영향과 모듈에서 물리적 영향을 받는 인자이다. 용액의 농도가 증가되면 급격한 겔층과 농도분극층이 형성되어  $\Phi$ 가 증가되어 투과율이 저하된다.  $\Phi$ 는 2축 RDM에서 겔보기속도( $a \times \omega r$ )와 벌크농도(CB)에 대한 함수이므로 식 (6)으로 나타낼 수 있다[2].

$$\Phi = \alpha(C_B)^\beta (\omega r)^\gamma \quad (6)$$

2축 RDM에서 회전판막이 겹치는 부분에서 급격한 난류가 형성되어 1축 RDM보다 막표면의 유체의 겔보기속도는 증가한다. 1축 RDM의 투과모델식[2]을 기초로 하여 2축 RDM에서 막표면 유체의 겔보기속도를  $a \times \omega r$ 로 하고 식 (6)을 식 (5)에 대입하여 식 (7)과 같이 벌크농도, 겔보기속도, 유효압력차에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P_f}{R'_m + \alpha(C_B)^\beta (a \times \omega r)^\gamma (\Delta P_f)} \quad (7)$$

여기서,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 의 값은 RDM에서 겔층과 농도분극층의 영향을 주는 인자이며 변수의 영향을 계수화하여 표시하였다.  $\alpha$ 는 겔층과 농도분극층에 의한 저항에 관하여 용액의 농도, 선속도, 압력차에 대한 비례계

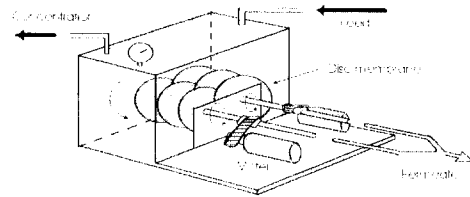


Fig. 1. A schematic diagram of two-shaft RDM.

수이며 전체적으로  $a$ 가 증가되면 겔층과 농도분극층의 두께가 커져서 투과율이 감소하게 된다. 용액의 농도와 같은 화학적 조성과 연관된  $\beta$ 가 양의 값을 갖고 증가되면, 그 용액은 분리막 표면에 대하여 두꺼운 겔층과 농도분극층을 형성하고 이 겔층과 농도분극층은 투과율에 대하여 반발력을 갖는다.

식 (7)을 통하여 2축 RDM에서  $\gamma$ 의 음의 값을 갖는다면, 일정한 선속도에서  $a$ 값이 클수록(=겔보기속도가 클수록) 겔층과 농도분극의 저항값은 작아져서 결국 투과율이 증가되는 경향을 보이게 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 2축 회전판형 막모듈

2축 회전판형 막모듈 실험장치의 개략적인 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 회전판막은 UOP사의 Polysulfone 한외여과막(MWCO 35,000~50,000)을 사용하여 직경 0.22m, 두께 3mm의 ABS판을 지지판으로 하여 제작하였다.

각 회전축(shaft,  $\phi 20\text{mm} \times 500\text{mm}$ )에 회전판막을 최대 10개씩(총 20개) 끼워넣고 housing 안의 중앙에 수직으로 설치하였다. 회전판막의 간격은 20mm에서 최소 3mm까지 좁혀 조절할 수 있고, 축 거리를 조절하여 회전판막들을 겹쳐서 끼워넣는 형태(engaged disc type)로 제작하였다. 2축 RDM에서 회전축의 회전방향과 회전속도가 동일할 경우, 회전판막들이 겹친부분에서는 서로 엇갈리게 회전하므로 막표면에서 유체의 겔보기속도가 발생하고, 1축 RDM과는 다른 크기의 전단력이 발생하게 된다.

흡입펌프를 사용하여 순수와 oil emulsion을 회전속도와 막간격에 따라 분리하였다. 투과수는 회전판막을 통과하여 회전축으로 나오고, 일정시간 부피로 측정하였다. 투과수는 housing으로 보내어 농도를 일정하게 유지하였다. 온도는 housing에 냉각코일을 설

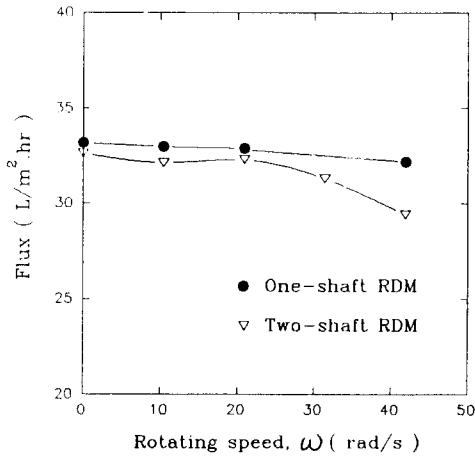


Fig. 2. Effect of rotating speed on pure water flux in RDM at  $\Delta P=0.1\text{MPa}$  and  $25^\circ\text{C}$ .

치하여  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 를 유지하였다.

배재율을 측정하기 위하여 TOC analyser(Dohrmann DC-85A)와 탁도기(2100P, Hach Co. USA)를 사용하였다. 그리고, BOD는 용존산소 측정기(YSI model 58)를 사용하였다.

3.2. 실험용액 및 방법

사용한 순수는 4차 증류수(Banstead, USA, conductivity; 18megohm-cm)를 사용하였다. 0.85MPa의 압력에서 각속도를 0에서 52.36rad/s로 증가시키며 순수 투과율을 조사하여 미끄럼흐름과 원심력에 의한 압력강하를  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 관찰하였다. 그리고, 1축 RDM의 실험결과와 비교하였다.

범우화학(주)의 수용성 EC-50 유백색 에멀션 절삭유를 사용하였다. 상업용 절삭유 EC-50을 1% 용액으로 희석 제조하여 막간격을 달리하고, 각속도를 31.42rad/s에서 2.62rad/s로 감소시키며 평균 투과율을 조사하였다. 그리고, 1축 RDM에서 동일 절삭유의 실험결과와 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 순수투과율 측정

2축 RDM에서 회전판막의 각 속도를 0에서 41.89 rad/s까지 바꾸어 가며 순수투과율의 변화를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 2에 1축 RDM의 결과와 비교

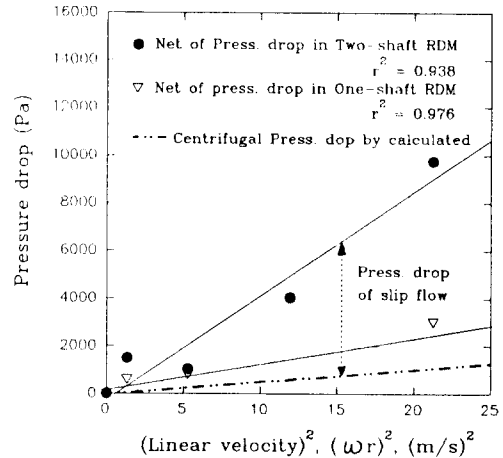


Fig. 3. Pressure drop versus square of the linear velocity( $\omega r$ ) in RDM.

하여 나타내었다. 2축 RDM에서 순수의 투과율은 회전판막의 각속도가 0에서 41.89rad/s로 증가할수록 회전판내 유체가 받는 원심력에 의한 압력강하( $P_{fc}$ )와 분리막 표면의 미끄럼 흐름에 의한 압력강하( $P_{slip}$ )로 최대각속도에서 9.95%까지 감소하여 1축 RDM의 감소율 3.01%보다 높았다. 이는 2축 RDM에서 회전축의 회전방향이 동일할 경우, 회전판막들이 겹친부분에서는 서로 엇갈리게 회전하여 막표면에서 유체의 겉보기속도가 증가되기 때문이다. 겉보기속도의 증가는  $P_{slip}$ 를 증가시켜 순수투과율을 감소시켰다.

2축 RDM에서  $P_{slip}$ 는 Fig. 2에서 보여주듯이 막표면에서 유체의 겉보기속도가 증가하면 미끄럼 흐름에 의한 압력강하가 1축 RDM보다 많이 생긴다. 또한 유체가 막을 통과할 때의 분리막 자체에 의한 압력강하를 포함하고 있으므로 다음과 같은 식 (8)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{Slip, 2} = P_{Pass} + P_{Flow at one} + P_{F, slip at two} \quad (8)$$

Fig. 3은 선속도( $\omega r$ )의 증가에 따른 압력강하를 보여준다. 순수 투과율은 압력에 비례하므로 회전에서 따른 순수 투과율의 차이를 측정함으로써 압력강하를 계산할 수 있다[2]. 2축 RDM에서 선속도에 따른 유효 압력차( $\Delta P_1$ )는 실험 결과로부터 식 (9)와 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta P_1 [\text{Pa}] = \Delta P - 433.48 \times (\omega r)^2 \quad (9)$$

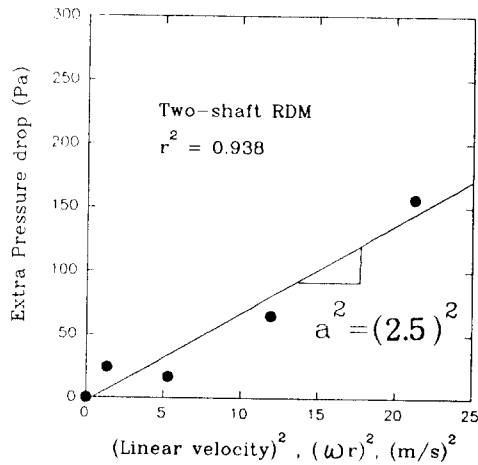


Fig. 4. Extra pressure drop of accordance of increased relative velocity in Two-shaft RDM.

여기서,  $433.48 \times (\omega r)^2$ 은  $P_{m1}$ 를 나타낸다.

막표면과 유체와의 미끄럼 흐름에 의한 압력강하는 회전에 의한 전체 압력강하에서 계산된 회전판내 유체가 갖는 원심력에 의한 압력강하를 제외한 값이다. 따라서, 미끄럼 흐름에 의한 압력강하는 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{slip} [Pa] = b_2 \times (\omega r)^2 = 382.62 \times (\omega r)^2 \quad (10)$$

여기서,  $b_2$ 는 2축 RDM에서 분리막 자체에 의한 압력강하를 포함하고 막 회전의 증가에 따른 미끄럼 흐름에 의한 압력강하의 비례상수이다.

대체로 1축 RDM에서 막표면과 유체와의 미끄럼 흐름에 의한 압력강하는  $62.40(\omega r)^2$ 이었고 분리막에 대한 일정한 비례상수라고 가정하였다[2]. 따라서, 식 (10)을 통하여 2축 RDM에서 미끄럼 흐름에 의한 압력강하는 1축 RDM의 약 6.13배이다. 위의 결과로부터 2축 RDM에서 회전방향과 각속도가 같을 경우, 회전판막에서 유체의 미끄럼 흐름에 의한 압력강하를 식 (11)과 같이 표시할 수 있다.

$$P_{slip} [Pa] = b_1 (a \times \omega r)^2 = 62.40 (2.5 \times \omega r)^2 \quad (11)$$

여기서,  $b_1$ 은 유체가 막을 통과할 때의 분리막 자체에 의한 압력강하를 포함하고 있다.

Fig. 4는 2축 RDM에서 회전판막 가장자리의 선속도 증가에 따라 1축 RDM에 추가되는 압력강하(=겉보기속도 증가에 따른 압력강하)를 보여준다. 여기

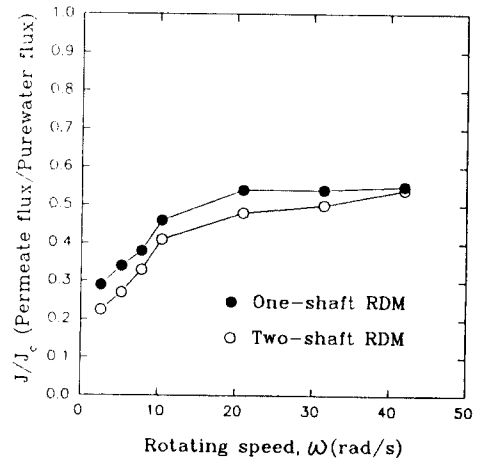


Fig. 5. Relationship of  $J/J_c$  ratio of 1% cutting oil emulsion with rotating speed for one-shaft RDM and two-shaft RDM at  $\Delta P=0.1MPa$  and  $25^\circ C$ .

서, 기울기가 식 (11)의  $a^2$  값에 해당된다. 따라서, 식 (11)과 Fig. 4를 통하여 2축 RDM의 회전판막에서 실제 유체가 접하는 겉보기속도는 선속도의 약 2.5배임을 알 수 있다.

## 4.2. 절삭유 분리

### 4.2.1. 회전에 따른 영향

Fig. 5에 1% 절삭유에 대한 1축과 2축 RDM의 회전수에 따른 평균 투과율을  $J/J_c$  비(절삭유의 투과율/순수 투과율)로 나타내었다. 2축 RDM은 회전판막의 간격이 3mm, 회전축의 간격이 120mm이었다. 1축 RDM은 회전판막과 방해판의 간격이 3mm이었다. RDM에서 각속도를 31.42rad/s에서 2.62rad/s의 순서로 분리실험을 하고 각각의 각속도에서는 안정된 투과율을 얻은 후 평균값을 취하였다. 1축 RDM과 2축 RDM의 투과율은 대체로 회전에 따라서 비슷한 투과율을 보였다. 각속도의 증가에 따라 점차로 투과율이 증가하는 경향을 보이며 대개 20rad/s 이상에서는 회전에 영향을 받지 않고 일정한 투과율이 측정되었다. 따라서, 투과율이 각속도의 증가와 무관한 영역이 존재하며 단지 용액의 농도에만 의존함을 알 수 있다.

### 4.2.2. 막간격에 따른 영향

1% 절삭유를 2축 RDM에서 회전판막의 간격을

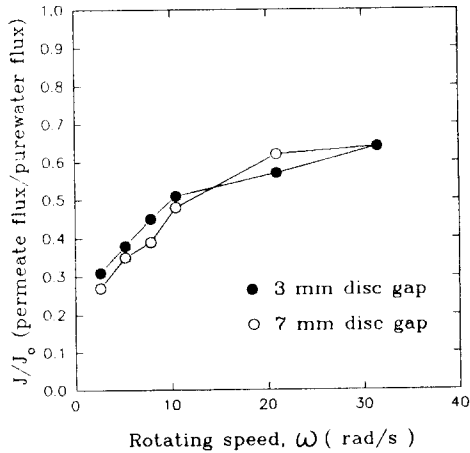


Fig. 6. Effect of disc gap on  $J/J_0$  ratio for 1% cutting oil emulsion with rotating speed in two-shaft RDM at  $\Delta P=0.1\text{MPa}$  and  $25^\circ\text{C}$ .

달리하고 각속도를 31.42rad/s에서 2.62rad/s의 순서로 분리실험을 수행하고  $J/J_0$  비로 Fig. 6에 나타내었다. 2축 RDM에서 회전판막의 간격이 투과율에 미치는 영향은 각속도가 31.42rad/s에서 2.62rad/s로 감소할 때 회전판막의 간격이 3mm인  $J/J_0$  (절삭유의 투과율/순수 투과율)가 0.64에서 0.31로 감소하여 간격이 7mm일 때의 0.64에서 0.27의 감소와 거의 비슷하였다. 따라서, 본 실험에서는 막간격이 7mm 이하인 범위에서 난류발생에 따른 막표면에서 유체의 걸보기속도의 차이는 미미하였다. 이는 Masuda 등이 2축 RDM을 활성슬러지의 분리에 적용한 결과와 비슷하였다. Masuda 등은 막간격을 조정하고 실험하여 선속도가 증가하면 어느정도의막간격 범위에서 일정이상의 선속도는 막간격과 무관하게 투과율이 동일함을 밝혀내었다[3].

4.3.3. 2축 RDM의 투과율 예측

1% 절삭유를 2축 RDM에서 막간격을 달리하여 회전에 따른 실험을 결과를 모델식에 예측된 투과율과 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 예측된 투과율은 1축 RDM의 모델식을 기초로 하여 계산된 값을 사용하였다[2]. 단지, 2축 RDM에서 회전축의 회전방향과 각속도가 동일할 경우, 회전판막들이 겹친부분에서는 서로 엇갈리게 회전하므로 회전판막에서 실제 유체가 접하는 걸보기속도는 증가되기 때문에 식 (11)

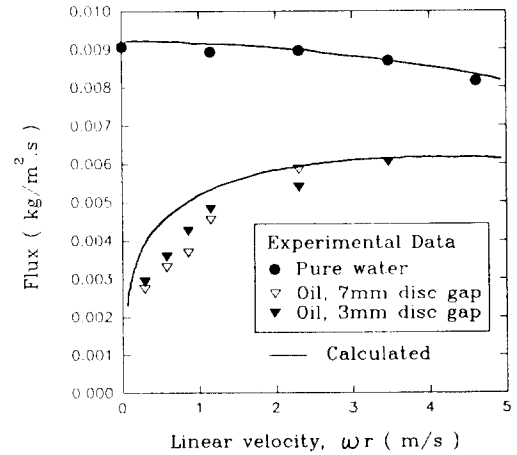


Fig. 7. Effect of rotating speed on flux compared with predictions by eqn.(22) for 1% cutting oil emulsion in two-shaft RDM at  $\Delta P=0.1\text{MPa}$  and  $25^\circ\text{C}$ .

과 Fig. 4를 참고로 하여 식 (7)의 걸보기속도( $a \times \omega r$ )에 관한 항을  $2.5\omega r$ 로 취급하였다. 식 (12)에 1% 절삭유에 대하여 선속도( $\omega r$ )가 3.46m/s이하인 2축 RDM의 모델식을 나타내었다.

$$J = R'_{m} + \frac{\Delta P_1}{117.94(C_{11})^{0.76}(2.5\omega r)^{0.47}(\Delta P_1)} \quad (12)$$

여기서,  $R'_{m}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 의 값은 동일 분리막과 절삭유를 사용하여 1축 RDM에서 얻은 값이다. 평균  $R'_{m}$ ,  $R_{m}$ ,  $R$ 는 각각  $1.12 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ,  $1.06 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ,  $6.09 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 이었다. 2축 RDM에서 사용한 절삭유의 성분 및 농도, 회전판막의 종류 및 크기, 운전온도는 1축 RDM과 동일하므로 1축 RDM의 모델식에 동일한  $R'_{m}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 값을 사용하고 2축 RDM의 유체특성이 1축 RDM과 비교하여 겔층과 농도분극층에 끼치는 영향을 평가하였다.

1축 RDM의 모델식을 기초로 하여 유도한 2축 RDM 모델식에서 예측된 투과율은 막간격 7mm이하에서 막간격에 관계없이 실제 투과율에 가까이 접근하였다. Fig. 7에 보여지듯이 1% 절삭유에 대하여 선속도가 2m/s 이상에서는 모델식이 실제 투과율에 잘 일치하나, 선속도 2m/s 이상에서는 모델식이 실제 투과율보다 높게 나타났다. 이는 막분리 실험의 순서가 초기 31.42rad/s의 각속도 단계에서 투과율

이 안정될 때까지 운전하고 분리막의 초기 상태로 회복하지 않은 상태에서 각속도를 낮추어 운전을 하며 2.62rad/s까지 운전하였기 때문이다.

식 (12)에서 보여지듯이 RDM에 있어서 높은 투과율의 확보는  $R_g$ 를 상쇄시키는 것인데, 모델식의 유도 과정에서 막오염을 상수로 가장하고, 가역적인 겔층과 농도분극의 저항만을 고려하여 전개하였다. 식 (5)에서 막오염에 의한 저항은 시간에 무관하고 일정한 값을 갖는 상수로 취급하였고 겔층과 농도분극층에 의한 저항보다 미미한것으로 가정하였다. 그러나, 일반적으로 막오염은 막표면에 접하는 용액의 농도와 운전시간 등의 함수이며 겔층과 농도분극층의 두께가 증가될수록 막오염의 가능성이 크다. 또한 물질전달계수(k)가 막회전이 감소할 때 급격히 감소하며 투과율을 감소시킨다. 따라서 운전 시간의 경과에 따라 각 단계에서 막에 비가역적 오염에 의한 점진적인 투과율 저하현상을 보여주었다. 이러한 막오염은 세척에 의해서만 제거될 수 있다.

2축 RDM의 투과율 모델식과 실제 실험치를 비교한 결과, 비가역적인 막오염에 의해 모델식이 계산값과 약간의 오차를 보였다. 높은 회전수에서는 비가역적 오염의 영향이 적었으나 낮은 회전수에서는 예상보다 심한 비가역적인 막오염 현상으로 모델식에서 제시한 값보다 실제 투과율이 낮았다.

## 5. 결 론

1. 회전관막의 각속도가 0에서 41.89rad/s로 증가할수록 회전관내 유체가 받는 원심력에 의한 압력강하와 분리막 표면의 미끄럼 흐름에 의한 압력강하로 순수 투과율은 최대 각속도에서 9.95% 감소하여 1축 RDM의 감소를 3.01%보다 높았다. 원심력과 미끄럼 흐름에 의한 압력강하는  $(\omega r)^2$ 에 비례하였다. 2축 RDM에서 미끄럼 흐름에 의한 압력강하는 1축 RDM에 비교하면  $(2.5\omega r)^2$ 에 비례하여 회전관막에 유체가 접하는 길보기속도는 약  $2.5\omega r$ 이었다.

2. 2축 RDM에서 회전관막의 간격이 투과율에 미치는 영향은 각속도가 31.42rad/s에서 2.62rad/s로 감소할 때 회전관막 간격이 3mm인  $J/J_0$  (절삭유의 투과율/순수 투과율)가 0.64에서 0.31로 감소하여 간격이 7mm일 때의 0.64에서 0.27의 감소와 거의 비슷하였다.

3. 1축 RDM의 모델식을 기초로하여 유도한 2축

RDM 모델식에서 예측된 투과율은 막간격 7mm와 3mm에서 실제 투과율에 가까이 접근하였다.

## 감 사

본 연구는 통상산업부의 에너지기술개발사업의 연구지원으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

## 사용기호

- a : Coefficient of specific fluid velocity of eqn(7)
- $b_1$  : Coefficient of pressure drop due to slip flow at 1 RDM
- $b_2$  : Coefficient of pressure drop due to slip flow at 2 RDM
- $C_{B1}$  : Bulk concentration of the rejected solute[%]
- J : Permeate flux[ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  or  $\text{l}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ]
- $J_0$  : Pure water flux without rotating speed [  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  or  $\text{l}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$  ]
- $\Delta P$  : Operating pressure[Pa]
- $\Delta P_T$  : Effective transmembrane pressure[Pa]
- $P_{1c}$  : Pressure drop of centrifugal force[Pa]
- $P_{1slip}$  : Purely pressure drop of slip flow[Pa]
- $P_{1str}$  : Extra pressure drop of accordance of increased specific velocity in Two-shaft RDM[Pa]
- $P_{net}$  : Net pressure drop by rotating speed[Pa]
- $P_{slip}$  : Pressure drop of slip flow including  $P_{pass}$  in RDM[Pa]
- $P_{slip,1}$  : Pressure drop of slip flow in one-shaft RDM [Pa]
- $P_{slip,2}$  : Pressure drop of slip flow in two-shaft RDM[Pa]
- $P_{pass}$  : Pressure drop of passing the clean membrane[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 concentration polarization[m/s]

그리스 문자

$\alpha, \beta, \gamma$  : Values of eqn.(7)

$\Phi$  : Coefficient of eqn.(5)[m/s·Pa]

$\omega$  : Angular velocity[rad/s]

### 참고 문헌

1. Ohkuma N., *Water Quality International '94*, "Performance of Rotary Disk Modules in a Collected Human Excreta Treatment Plant", 1(1994).
2. 김제우, 노수홍, *J. of Membrane*, 6(2), "1축 회전 관형 UF 모듈의 투과모델 및 Oil Emulsion 분리 특성", 86(1996).
3. N. Ohkuma, h. Masuda and N. Mori, *Abstract of ICOM '93*, "Appilication of rotary disk membrane type ultrafiltration module to the activated sludge process", 408(1987).
4. M. Ohnishi, et. al., Abstract of ICOM '90, Vol.Ⅱ, "Performance of activated sludge filtration by rotary disk type UF module", 1103(1990).
5. Munir Cheryan, "Ultrafiltration Handbook", Technomic Pub. Co., Pennsylvania(1984).