

**세라믹 한외여과막으로 제지폐수 처리시
막오염 문제의 해결전략; 2. 알루미나 분리막 사용시
유량 및 막간압력차의 영향**

한 승 환, 송 지 은, 박 진 용
한림대학교 생명과학부

**Strategy to solve the fouling problem in paper
wastewater treatment using a ceramic ultrafiltration
membrane; 2. Effects of flow rate and
transmembrane pressure for a alumina membrane**

Seung Hwan Han, Ji Eun Song and Jin Yong Park
Division of Life Science, Hallym University

1. 서론

세라믹막을 포함한 대부분의 분리막이 해결해야할 과제가 막 오염에 의한 처리효율의 감소로서 막오염에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다[1, 2]. 본 연구에서는 알루미나 세라믹막을 한외여과로 폐수를 여과 할 경우 유량과 막간압력차(TMP)등의 분리막 모듈의 운전조건에 기인하는 막 오염을 최소화 할 수 있는 최적의 조건을 찾아내고자 한다.

세라믹 분리막은 고온에서도 분리막의 미세구조가 크게 변형되지 않을 뿐만 아니라 내화학적 및 열충격 저항성등이 우수하고 수명이 길기 때문에 비용절감의 효과도 얻을 수 있다. 세라믹막의 제조는 먼저 이들 물질을 졸-겔공정 또는 소결(Sintering)시켜 세공크기가 수십 μm 에 이르는 다공성 막을 제조한 후, 이 막의 표면에 세라믹 미세 분말을 반복적으로 도포하여 능동층을 형성시켜 완성한다. 세라믹 막의 능동층 소재로는 일반적으로 알루미나(Alumina) 및 지르코니아(Zirconia)가 가장 널리 사용되고 있다[3].

2. 이론

압력차를 추진력으로 하는 막분리 공정에서 발생하는 여과저항과 투과선속(Permeate flux, J)은 직렬 여과저항 모델(Resistance-in-series model)에 의해서 다음식과 같이 표현될 수 있다[4].

$$J = \frac{\Delta P}{(R_m + R_b + R_f)} \quad (1)$$

여기서, ΔP 는 막간압력차(TMP), R_m 은 막자체의 고유저항, R_b 는 경계층에 의한 저항, R_f 는 오염에 의한 저항이다.

순수(Pure water)를 대상으로한 분리막의 경우에는 R_b 와 R_f 는 존재하지 않으므로 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{R_m} \quad (2)$$

순수의 투과선속 J 값을 식 (2)에 대입하여 R_m 을 구하였다.

또한 $R_b + R_f$ 에 대해 식(1)를 정리하면 다음과 같다.

$$R_b + R_f = \frac{\Delta P}{J} - R_m \quad (3)$$

식(3)을 이용하여 구한 $R_b + R_f$ 값을 시간에 대하여 도시한 후, 여과초기에 시간에 대하여 그 값이 선형적으로 증가하는 구간에서 최적 직선식을 구하였다. 구한 직선식을 연장하여 $t=0$ ($R_f=0$)에서의 값이 R_b 가 된다. 이렇게 구한 R_b 를 $R_b + R_f$ 에서 빼주면 시간변화에 따른 R_f 를 구할 수 있었다.

3. 실험

본 실험에서는 우유팩을 재생하여 화장지를 생산하는 제지공장의 방류수를 사용하였다. 실험 중 발생하는 막 표면의 농도 분극을 억제하기 위하여 한외여과 투과수로 주기적인 역세척을 수행하였다. 실험에 사용한 알루미늄 분리막의 재원은 Table 1과 같다. 본 실험에 사용한 방류수의 수질은 유량변화의 영향을 살펴본 실험과 TMP의 영향 조사시 수질로 구분하여 Table 2에 정리하였다.

3-1. 유량의 영향

유량을 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75 l/min로 변화시키면서 TMP 1.55 kg/cm², 역세척 압력 1.0 kg/cm²로 유지하였다. 역세척 주기는 본 연구실에서 조사한 결과[5] 최적주기인 역세척 시간(BT, Backflushing Time) 3초, 여과시간(FT, Filtration Time) 30초(BT/FT=0.1)의 조건으로 실험을 수행하였다.

3-2. TMP의 영향

TMP는 1.0, 1.55, 2.0, 2.50 kg/cm²로 변화를 주어 실험하였다. 유량변화 실험과 마찬가지로 역세척 주기는 BT/FT = 0.1과 역세척 압력 1.0 kg/cm², 유량 0.5 ml/min의 조건에서 실험하였다.

Table 1. Specification of ceramic membrane used in this study

Material	Alumina
Pore size (μm)	0.02
Outer diameter (mm)	11
Inner diameter (mm)	7
Length (mm)	250
Surface area (cm ²)	55

Table 2. Water quality of source used in this study

		Range	Average
Flow rate	TDS (ml/l)	276~321	309.7
	Turbidity (NTU)	15.5~21.5	18.6
	COD (mg/l)	27~62	43.3
TMP	TDS (ml/l)	95~129	119.3
	Turbidity (NTU)	19.4~20.3	19.8
	COD (mg/l)	97~101	99

4. 결과 및 고찰

세라믹 한외 여과막으로 제지폐수를 처리할 경우 막오염의 문제를 해결하기 위해 유량 및 TMP를 변화시켜가면서 막 오염에 미치는 유량 및 TMP의 영향을 알아보았다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 유량이 1.75 l/min일 때 초기 투과선속(J₀)에 대해 최종 투과선속(J)이 가장 높게 유지되었다. 이것은 유량이 많을 때 난류가 형성되어 막 표면에서 오염물질이 탈착되는 현상이 발생하였기 때문인 것으로 생각된다.

운전시간에 따른 J/J₀를 나타낸 Fig. 2를 보면 30분까지 J/J₀는 모든 TMP에서 급격한 감소를 나타내었다. 그러나 30분 이후 TMP 2.50에서는 급격한 감소 없이 높은 J/J₀를 나타내었다. 최종 J/J₀ 값도 TMP 2.50에서 가장 높게 유지되었다. 따라서 본 연구의 최적 TMP는 2.50임을 알 수 있었다.

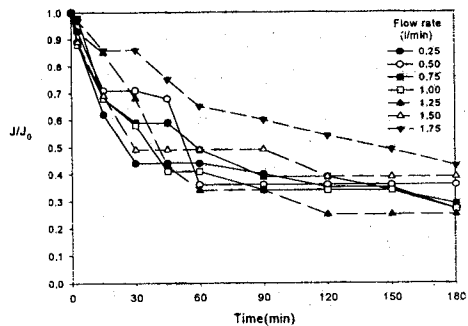


Fig. 1. Change of dimensionless permeate flux according to Flow rate.

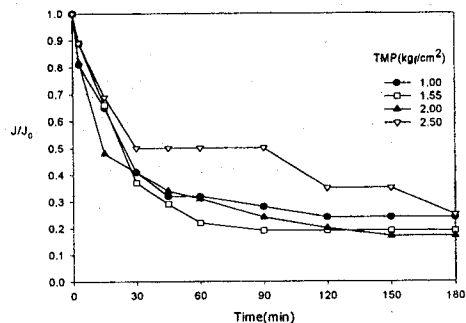


Fig. 2. Change of dimensionless permeate flux according to TMP.

유량 및 TMP와 여과저항과의 관계는 Table 3에 정리하였다. R_m 은 유량 및 TMP의 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 가졌다. R_b 는 유량과 TMP가 증가할수록 커짐을 알 수 있다. R_f 는 유량이 커질수록 감소하는 경향을 보였고, TMP가 커질수록 증가하였다.

Table 3. Change of Initial Permeate and filtration resistance

	Flow rate (ℓ/min)							TMP (kg/cm ²)			
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	1.00	1.55	2.00	2.50
$R_m \times 10^{-9} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$	1.04	0.98	1.07	1.09	0.98	0.98	1.11	0.62	0.66	0.72	0.61
$R_b \times 10^{-9} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$	3.40	2.58	3.83	2.31	3.27	3.95	4.31	2.01	3.05	3.70	7.38
$R_f(180) \times 10^{-9} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$	12.27	6.43	11.81	9.15	12.46	7.62	6.68	8.28	16.30	21.41	24.29
J_0	34.24	42.60	31.03	44.67	35.71	30.79	28.02	37.22	40.99	44.36	30.66

5. 결론

막 분리공정의 성공여부를 결정하는 막오염 문제를 해결하기 위해서, 주기적 역세척을 수행하면서 세라믹 한외여과막으로 제지폐수를 처리하였다. 그 결과로부터 여과저항 및 초기투과선속으로 무차원화한 투과선속(J/J_0)을 구하여 최적의 여과조건을 조사하였다. 유량의 영향을 살펴본 결과 1.75 ℓ/min에서 막오염의 진행속도가 가장 느린 것을 알 수 있었다. 한편, TMP의 영향에서는 2.50 kg/cm²에서 초기투과선속에 대한 최종투과선속이 가장 높게 나타났다.

6. 참고문헌

- 1) J.Y. Park, C.K. Choi and J.J. Kim, *J. Membrane Sci.*, 157권, 177 ~ 187 (1999).
- 2) 장인성, 이정학, 대한환경공학회지, 22권 1호, 324 (1999).
- 3) 한국막학회 편, "막분리의 기초", 자유아카데미 (1996).
- 4) Bamesh R. Bhawe, "Inorganic membranes synthesis, characteristic and application", Van Nostrand Reinhold, New York, (1991)
- 5) 박진용, *Membrane Journal*, 9권 3호, 181~184 (1999).