

제지공정 백수의 UF적용에 의한 Flux 효율 평가

김형진 · 서진호 · 권혁윤

국민대학교

1. 서 론

분리막 기술의 발전에 따라 여러 산업분야에서 ultrafiltration system의 적용이 활발히 이루어지고 있다. 실질적으로 음료 및 나노물질의 정제 등의 산업분야의 경우 설비투자액의 50%에 상당하는 비용이 분리공정에 사용되고 있으며, 여러 원료의 분리, 정제, 농축 기술이 핵심 기술로서 총 설비투자의 대부분을 점유하고 있다. 제지공정의 screen 및 cleaner system의 기본 원리도 분리 및 정제, 농축 과정에 의해 이루어지며, 최종 생산된 sheet의 품질을 향상시키기 위해서는 그 중요성을 간과할 수 없다. 일반적으로 막분리법은 상변화를 수반하지 않으며, 에너지 절약 관점에서도 우수하다. 또한, 대량의 분리대상 물질을 간단한 장치로 분리, 농축할 수도 있다.

제지공정의 백수는 재활용을 거듭하면서 약품의 효율을 떨어뜨리거나 공정상의 문제를 유발한다. 이를 극복하기 위해서는 새로운 분리, 농축 공정의 연구 및 응용기술의 접목이 절실히 필요하다. 따라서, 본 실험에서는 제지공정에서 발생하는 단위공정 백수를 ultrafiltration 처리하여 재활용을 증대를 위한 처리를 시도하여 제지공정 백수처리에 UF system이 적합한가에 대한 평가 및 UF 처리시의 flux 효율과 처리된 백수의 수질 특성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시 재료

2.1.1 백수

국내 A사 백상지 공정의 WRDF(Wrinkled Rotary Drum Filter)로부터 백수를 채취

하여 ultrafiltration 처리를 실시하였다. 기본적인 백수의 성상은 Table 1과 같다.

Table 1. 백수의 기본 성상

COD(mg/l, Mn)	Conductivity(uS/cm)	Turbidity(NTU)
1196	1622.3(17℃)	102.3

2.1.2 Membrane

실험에 사용한 membrane의 기본 재질은 PAN(Polyacrylonitrile)이며, 막 자체의 기본 성능은 Table 2와 같다.

Table 2. Membrane의 기본 물성

재 질	MWCO	내경/외경(mm/mm)	막면적(m ²)
Polyacrylonitrile	100,000	0.8/1.5	0.7037

* 순수투과도 측정 시 온도: 25℃, 후단압 P₂: 2kgf/cm²으로 설정하였으며 증류수(4L)로 각 3회 세척 후 측정하였음.

2.2 Ultrafiltration system

자동 물리 세정이 가능한 U/F system을 기본으로 하였으며 온도 및 압력등의 실험 인자를 조절하기 위하여 Fig 1에서와 같이 water bath, stirrer, 온도계 등을 설치하였다.

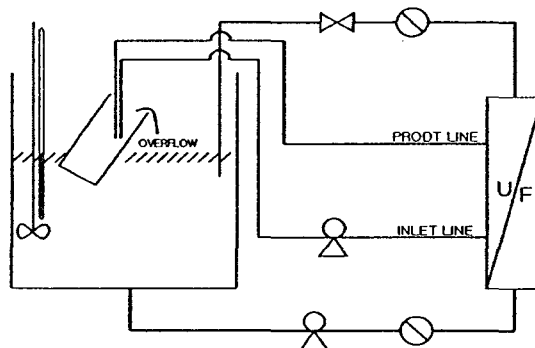


Fig 1. UF system 및 백수 처리계통도

연속식이 가능하도록 원액의 항온조 내에 투과조를 설치하였으며 투과액의 일부를 역세수로 사용하고 여액은 overflow되도록 함으로서 원액의 농도를 조절하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 White water의 ultrafiltration 처리

Membrane의 순수투과도를 측정한 후 U/F system에 장착하여 product time 30분, cleaning time 30초로 여과하였으며, 5분마다 1분씩 투과액을 측정하여 flux 효율을 평가하였다. 측정된 flux량을 이용하여 아래 식에서와 같이 초기 순수투과도에 대한 flux reduction값을 구하였다.

$$FR_t = \left(1 - \frac{J_{PF,t}}{J_{WF}}\right) \times 100$$

FR_t : flux reduction at time t after starting the experiment

$J_{PF,t}$: permeate flux at time t after starting the experiment

J_{WF} : water flux(pure water permeation flux) measured immediately before the ultrafiltration experiment

2.3.2 공정수의 특성 분석

원액과 투과액, 백수의 특성을 비교하기 위하여 HACH DR/2500 Spectrophotometer를 이용하여 COD를 측정하였고, HACH 2100P Turbidimeter를 이용하여 탁도를 측정하였다. 또한, ORION model 120 Conductivity meter를 이용하여 전도도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig 2는 압력차에 따른 flux 효율을 나타낸 그래프이다. 압력이 상승함에 따라 flux 또한 상승하는 경향을 보였으며, 안정화에 다다르기까지의 시간이 감소하는 경향을 나타냈다. $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 경우 안정화된 flux 값이 $43\text{L}/\text{m}^2\text{hr}$ 로 나타났고, $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 경우 $51\text{L}/\text{m}^2\text{hr}$ 를 나타냈다. $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 조건을 주었을 때 초기값은 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 조건에 비해 초기값보다 적었으나 이는 초기순수 투과도의 차이에 의한 것으로 보여지며 안정화된

flux값은 $60\text{L}/\text{m}^2\text{hr}$ 으로 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 조건보다 크게 상승하는 것을 볼 수 있었다. 압력이 상승함에 따라 pore를 투과할 수 없던 물질들이 pore를 통과하게 되면서 flux 효율을 상승시킨 것으로 보여진다. Fig 3은 압력차에 따른 flux reduction 값이다. 막의 순수투과도와 차를 이용한 flux reduction 값은 초기 순수투과도와 관계없이 UF의 처리조건에 따른 효율비교에 사용할 수 있다. Fig 3에서 나타낸 바와 같이 압력에 따라 안정화된 flux reduction값은 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 71%, $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 72%, $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 54%로 나타났으며, 압력이 커질 경우 flux reduction값이 감소하는 것을 알 수 있었다.

Fig 4는 온도차에 따른 flux효율을 측정한 그래프로써 안정화된 flux값은 20°C 에서 $36\text{L}/\text{m}^2\text{hr}$, 25°C 에서 $51\text{L}/\text{m}^2\text{hr}$ 로 나타났다. 온도가 상승함에 따라 flux 효율도 상승하는 경향을 보였다. 이는 백수의 온도가 상승함에 따라 membrane의 pore size가 증가하였기 때문으로 사료되어진다. Fig 5는 온도에 따른 flux reduction 값으로 역시 온도가 증가함에 따라 flux reduction값이 감소하는 경향을 보였다.

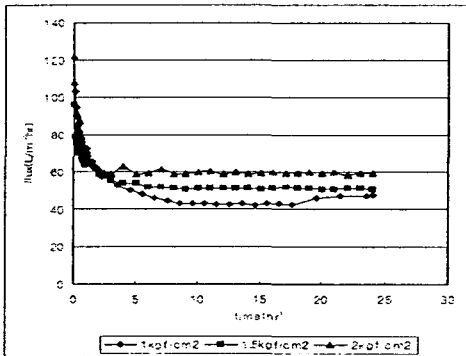


Fig 2. 압력차에 따른 flux 효율

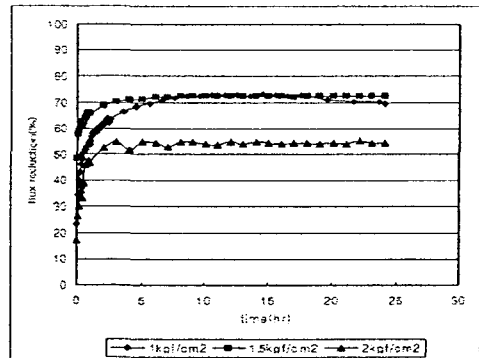


Fig 3. 압력차에 따른 flux reduction

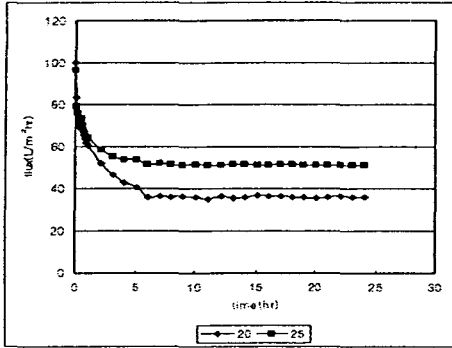


Fig 4. 온도에 따른 flux 효율

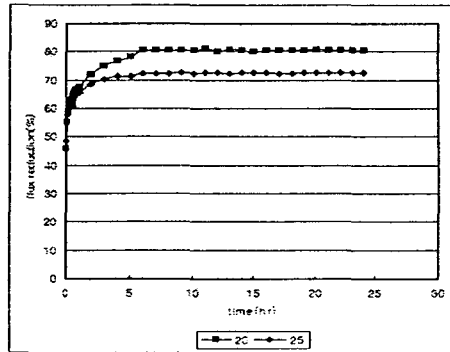


Fig 5. 온도에 따른 flux reduction

Fig 6은 압력조건에 따른 UF처리 후의 COD 값을 비교한 결과이다. 원수의 COD 값에 대하여 53%, 52%, 51%의 COD 감소율을 나타냈다. 낮은 압력 조건에서 제지 공정 백수의 UF처리 시 압력과 COD 저감 효율은 큰 상관성을 보이지 않았으나, 압력이 커질수록 감소율은 저하되는 결과를 보였다. flux 효율과 비교하였을 때 큰 변화를 보이지 않았으며 모든 압력 조건하에서 유사한 저감 효율을 나타냈다. Fig 7에 나타난 온도에 의한 COD 저감 효율은 45%, 52%, 33%로 감소율을 보였으며 25°C에서 가장 큰 효율이 나타났다. Fig 8에 나타난 압력조건에 따른 conductivity 감소율은 2.4%, 6.4%, 10%의 효율을 보였다. 압력이 상승함에 따라서 감소율이 증가하는 경향을 보였으나 전체적으로 10%이하의 낮은 효율을 나타냈다. Fig 9는 온도에 따른 conductivity 감소율을 나타낸 것으로 20°C에서 5.7%, 25°C에서 6.4%의 감소율을 보였으며, 온도 상승에 따라 미세하지만 증가하는 경향을 보였다. Fig 10은 압력차에 따른 turbidity 감소율을 나타낸 것으로 압력조건에 따라 99.2%, 99.4%, 99.7%의 감소율을 나타냈으며, 전체적으로 99%가 넘는 큰 감소율을 나타냈다. Fig 11에 나타난 온도차에 따른 turbidity 감소율은 20°C에서 99.7%, 25°C에서 99.4%로 역시 99%이상의 큰 감소율을 보였다.

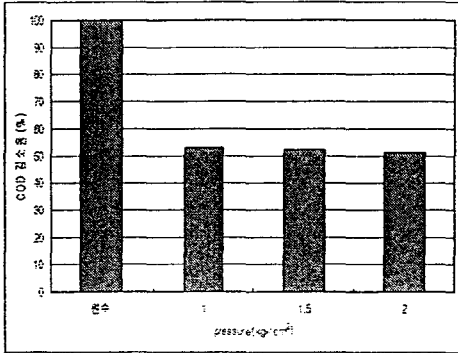


Fig 6. 압력차에 따른 COD 감소 효율

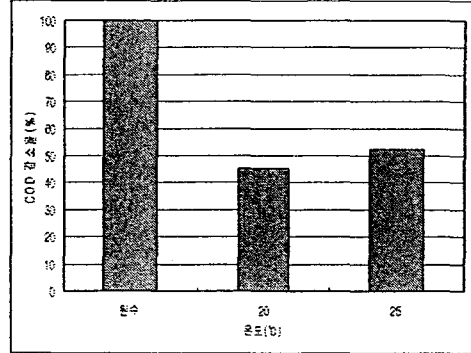


Fig 7. 온도차에 따른 COD 감소 효율

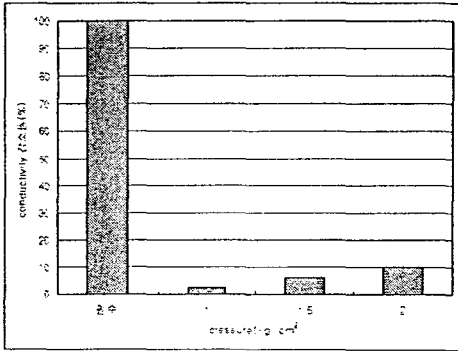


Fig 8. 압력차에 따른 conductivity 감소 효율

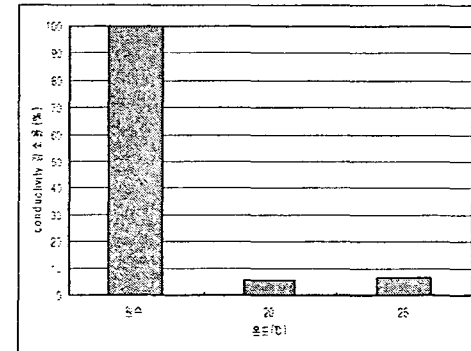


Fig 9. 온도차에 따른 conductivity 감소 효율

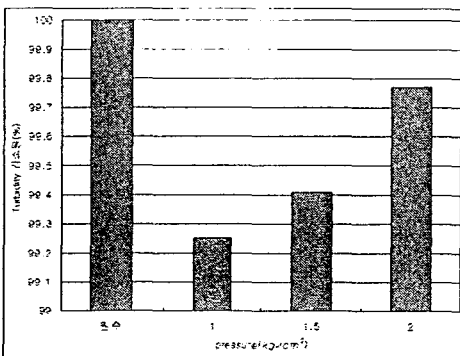


Fig 10. 압력차에 따른 turbidity 감소 효율

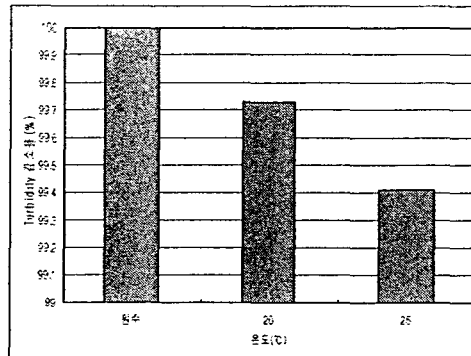


Fig 11. 온도차에 따른 turbidity 감소 효율

4. 결 론

제지공정 백수의 재활용율을 높이기 위한 방안으로서 UF system을 적용하고자 하였으며, UF system의 제지공정 적용성 및 UF 처리 백수의 수질특성 변화를 평가하고자 하였다. 백수의 flux 효율은 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 과 25°C 조건에서 가장 큰 값을 나타냈고, COD 감소율은 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 과 25°C 조건에서 가장 큰 값을 나타내었다. 압력이 상승함에 따라 COD 감소율은 감소하는 경향을 보였으며, 온도 조건에 따른 COD 저감 효과는 큰 경향을 보이지 않았다. 이는 온도 조건에 사용된 막의 pore size가 균일한 직경을 갖지 못하기 때문으로 생각되어진다. 전도도의 경우 압력이 상승할수록 전도도 감소율이 증가하는 경향을 보였으나 온도에 의한 전도도 감소율은 경향성이 보이지 않았다. 전체적으로 전도도는 모든 조건하에서 10% 이하의 낮은 감소율을 나타냈다. 탁도는 전체적으로 UF 적용 시 모든 조건하에서 99%이상의 감소율을 보였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 압력, 온도조건과 flux 효율은 비례적인 관계를 나타냈으며, 수질 오염 저감 효율은 조건에 따른 큰 경향을 보이지 않았다. 실질적으로 공정에 적용 시 막면적과 시간당 flux 효율을 고려할 때 현재의 적용은 어려운 것으로 판단된다. 하지만, COD, 탁도등의 높은 감소율을 나타냈으므로 실제 적용을 위한 지속적인 연구가 필요하다고 생각되어진다.

5. 참고문헌

1. Jönsson, A.S., and Wimmerstedt, R., Desalination 53 : 181(1985).
2. Sierka, R.A., Foister, H.G., and Avenell, J.J., TAPPI 1994 International Environmental Conference Proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta, p.249.
3. Nuortila-Jokinen, J., Marin, P., and Nyström, M., Euromembrane 1995 Conference Proceedings, Bath, UK, p.1-521.
4. Tardy, G., Kuhbok, J., and Woerner, D., Paper Age 28(5): 30(1992).
5. Woerner, D. L., and Short, J. L., TAPPE 1991 Coating Conference Proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta, p.251.
6. Stridsberg, S., Nyberg, T., and Robinson, L., TAPPI 1992 Environmental

Conference Proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta, p.737.

7. Pulp Paper Intern. 24(3):41(1992)
8. Jantunen, E., Lindholm, G., Lindroos, L.M., et al., Paper Timber 74
41(1992)
9. Cloutier, J.N., Azarniouch, M.K., and Callender, D., J. Pulp Paper Sci
19(6): J244(1993)