

Acrylic 폐수의 전처리 및 UF/RO공정의 적용

이 광 현

부산광역시 동의대학교 화학공학과
(2001년 7월 23일 접수, 2001년 10월 19일 채택)

Pretreatment of Acrylic Wastewater and Application of UF/RO Processes

Kwang-Hyun Lee

Dept. of Chemical Engineering, Donggeui University, Pusan 614-714, Korea
(Received July 23, 2001, Accepted October 19, 2001)

요 약 : 본 연구는 아크릴폐수의 COD제거를 위한 전처리 공정 및 전 처리된 아크릴폐수를 한외여과 증공사형 모듈과 역삼투 나권형 모듈에 적용하여 적용압력과 온도변화에 따른 한외여과막과 역삼투막의 분리특성을 고찰하였다. 또한, 장시간 연속운전으로부터 한외여과 및 역삼투 막의 세척 적정시간을 결정하고, 운전시간에 따른 막오염을 고찰하였다. 14시간을 기준으로 한외여과 막의 플럭스가 급격히 떨어지고 있으며, 역삼투 막도 비슷한 경향을 나타내고 있다. CaO 및 모래여과장치를 거친 처리수를 중화처리 하여 UF/RO공정에 적용한 결과 COD 및 TDS가 배출허용 기준치 이하로 제거됨을 알 수 있었다.

Abstract : The pretreatment for COD removal of acrylic wastewater and separation characteristics of ultrafiltration hollow fiber type module and reverse osmosis spiral wound type module with the variation of applied pressure and temperature were discussed. The optimum washing time of membranes was decided with long term operation and the degree of fouling was discussed with operating time. Permeate flux was decreased rapidly at 14 hrs and that of reverse osmosis membrane was indicated similarly. CaO and sand filter for the first step, neutralization process with treated acrylic wastewater as the second step, UF/RO processes were used as final step. It was shown that COD and TDS were below allowable discharge value with the result.

Keywords : acrylic wastewater, COD removal, UF, RO

1. 서 론

물은 인간의 생명을 유지하고, 일상생활과 생산활동에 없어서는 안되는 소중한 천연자원이다. 우리나라는 지난 70년대 이후 경제성장, 인구증가, 생활수준의 향상으로 물의 수요가 급격히 증가하였으나, 물 공급 확대를 위한 수자원의 개발은 환경과피 및 부지선정에 한계를 드러내고 있다. 이러한 관점에서 오염된 물의 고도처리하는 수질환경보전 뿐만 아니라 물 수요를 충

족 시킬 수 있다는 측면에서 그 중요성이 커지고 있다. 또한, 산업발전에 따라 주위환경에 유해한 각종 새로운 오염물질이 배출되고 폐수 발생량이 증가하여 물 공급원의 오염을 촉진시키게 됨으로써 고도처리는 환경적, 시대적 요구로 제시되고 있다. 고도처리 공정 중에서 기존 처리 기술보다 효율적이며 폐수 배출 양을 최소화하고, 공장부지를 저감하면서 처리수의 재활용을 위해서도 막분리 기술이 요구되고 있다[1,2].

우리 나라의 섬유, 고분자 산업은 1950년대 후반 Nylon 합성섬유를 생산함으로써 시작되었다. 이후 경제의 성장과 더불어 섬유산업은 계속 발전하여 전기 전

†주저자(e-mail : khlee@donggeui.ac.kr)

자용 고분자 재료, 의료용 고분자 재료, 생·광 분해성 고분자 재료등 여러 가지 고 부가가치 고분자 재료의 합성 및 가공에 대한 기술 개발이 이루어지고 있다. 이로 인해 발생하는 폐수의 성분도 더 복잡하고 다양해지고 있으며, 최근들어 아크릴섬유의 소비 증가로 아크릴폐수의 양이 증가추세에 있다.

본 실험에 사용된 섬유공장은 U시에 위치하고 있으며, 이 섬유공장의 경우 문제가 되는 폐수가 아크릴 제조과정(A/C공정)에서 나오는 폐수이다. 본 실험에 사용된 섬유공장의 아크릴폐수는 여타의 폐수와 혼합된 폐수로서, 아크릴폐수량이 차지하는 비율이 약 28%를 차지하고 있다[3,4]. COD와 BOD가 높고 시안이 함유되어 있어 생물학적처리에 독성을 미친다. 아크릴폐수는 DMA(dimethyl amine)의 함유로 강한 악취를 내며, 이 DMA(dimethyl amine)가 0.6ppm이상 함유되면 대기오염을 일으킨다.

아크릴폐수는 심각한 막오염을 유발하므로 한외여과 중공사형 및 역삼투 나린형 모듈에 직접 적용할 수는 없다. 전처리 공정을 이용하여 막오염 물질들을 일정량 제거한 후에야 분리막에 적용이 가능하다. 높은 COD의 제거를 위해서는 한외여과 및 역삼투막 공정만으로는 방류수 배출허용기준을 충족시키지 못하므로, 화학적 전처리 및 모래여과기를 이용한 전처리를 거친 후 UF/RO공정에 적용하여 고찰하였다[5,6].

일반적으로 물을 여과할 때 통용되는 여과 매체는 모래이다. 모래여과기는 공극이 있는 배질층을 통하여 물을 통과시켜서 부유물을 제거하는데, 대부분이 여상의 상층부에서 제거되므로 여상의 깊이 전체가 효과적으로 이용되지는 않는다. 중화공정에 사용되는 중화제로 염화물을 형성하는 염산과 총질소량을 증가시키는 질산을 제외하고, 많은 무기물과 유기물을 녹이는 성질이 있는 H₂SO₄을 선택하여 사용하였다.

본 실험은 아크릴폐수를 화학적 전처리 및 여과하여 COD값을 낮추고, 처리된 아크릴폐수를 한외여과 막과 역삼투 막에 적용하여 적용압력과 온도변화에 따른 분리특성을 고찰하였다. 또한 분리막의 성능을 저하시키는 막오염의 해석으로 효율적인 막분리 공정을 구성하고자 하였다.

2. 이 론

일반적으로 막분리 공정에서 발생하는 여과 저항과 투과플럭스(Permeate flux, J_v)는 직렬여과저항 모델(Resistance-in-series model)[7]에 의해서 다음과 같이 표현될 수 있다.

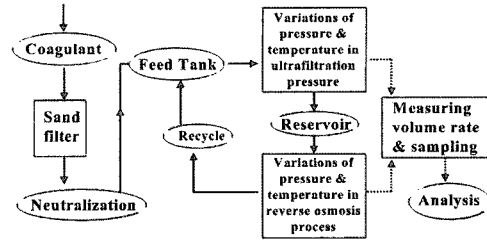


Fig. 1. Schematic diagram of pretreatment and membrane separation system.

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

여기서, ΔP 는 막간 압력차(TMP, Transmembrane pressure), R_m 은 막자체의 고유저항, R_b 는 경계층에 의한 저항, R_f 는 막오염에 의한 저항이다. 순수물 대상으로 한 분리막의 경우에는 R_b 와 R_f 는 존재하지 않으므로 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

또, 식(1)을 이용하여 $R_b + R_f$ 에 대해 정리하면 식(3)과 같다.

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

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

3. 실험방법 및 내용

U시에 소재하는 섬유공장의 아크릴폐수를 대상으로 화학적 전처리 및 모래여과장치를 거쳐 높은 COD의 제거 및 막오염을 최소화하고, 처리수를 한외여과 및 역삼투 공정에 적용하여 각 적용압력과 적용온도의 변화에 대한 실험을 하였다. 본 실험의 전체적인 공정도는 Fig. 1과 같다.

3.1. 화학적 전처리 및 모래여과장치

아크릴 원폐수의 높은 COD로 인해 막분리공정에 직접 적용하기에는 매우 어려우므로 COD를 감소시키기 위해 전처리공정(CaO응집-중화-모래여과)을 도입

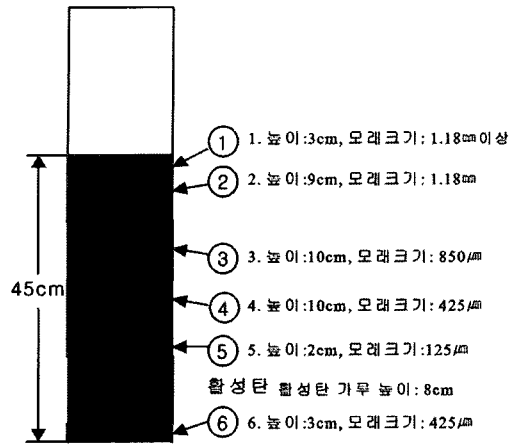


Fig. 2. Schematic diagram of sand filter system.

하였다. 응집공정에서는 아크릴페수의 응집제로 CaO를 사용하였다. 아크릴페수에 CaO를 주입하여 응집후 침전시키고, 상등액만 채취하여 모래여과장치에 투입하였다. CaO 응집공정에 의한 처리수는 알칼리성(pH 12)을 나타내므로 H₂SO₄를 사용하여 중화시켰다. 본 연구는 여과 매체로서 모래를 사용하였으며, 모래여과의 효과를 증대시키기 위해 층 사이에 활성탄을 넣었다. 모래여과장치는 Fig. 2에 나타내었다.

3.2. 한외여과 및 역삼투 모듈 set

본 연구 단계에서 적용된 한외여과 모듈은 (주)Pure Tech의 GUF 3050이며, 역삼투 모듈은 (주)새한의 RO 11-50이다. 이 모듈의 특성은 Table 1에 나타내었다.

3.3. 실험 방법

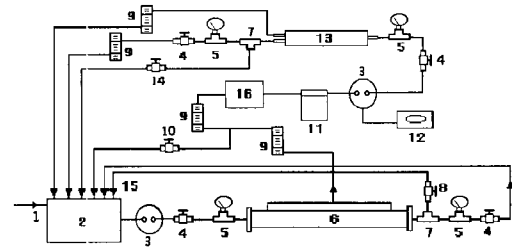
본 연구에서의 실험방법은 다음과 같다. 아크릴페수를 CaO응집, 중화 및 모래여과의 단계로 이루어진 전처리공정에서 처리한 후, 이 전처리수를 한외여과 중

Table 1. Specifications of ultrafiltration & reverse osmosis membrane

	Model	Area of membrane	Membrane material	Type	MWCO
UF	GUF 3050	2.2m ²	Polysulfone	Hollow fiber	50,000
RO	RO 11-50	0.6m ²	Polyamide	Spiral wound	

Table 2. Experimental conditions for ultrafiltration hollow fiber & reverse osmosis spiral-wound membrane module

Item	Unit		Value
Pressure	UF	Kgf/cm ²	1.6, 2.0, 2.4, 2.8
	RO		3, 4, 5, 6
Temperature	℃		15℃, 25℃, 35℃



Legend : 1. Pretreatment wastewater 2. Feed Tank 3. Pump 4. Gate valve 5. Pressure guage 6. UF module 7. T-type unit 8. 10. 14. Bypass valve 9. Flower meter 11. Filter housing 12. Controller 13. RO module 15. Sampling collection 16. Reservoir
Fig. 3. Schematic diagram of membrane separation system.

공사형 모듈과 역삼투 나권형 모듈에 적용하였다. 공급액의 온도(15℃, 25℃, 35℃)를 일정하게 유지시키기 위하여 MONO-TECH사의 refrigerated bath circulator (MRC-3031D)를 사용하였다. UF막의 압력을 한 압력에 일정하게 고정된 후 RO막의 적용압력을 3, 4, 5, 6 kgf/cm²의 4단계로 변화시키면서 실험을 행하였다. 이때 RO막의 압력을 변화시키면 UF막의 일정압력에 대한 영향이 있으므로 이 영향을 배제하기 위하여 저류조를 설치하였다. 공급수의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 UF/RO공정의 모든 투과수와 배제액을 feed tank로 순환시켰다. 원수의 농도 변화는 4.6~4.9%의 오차범위로 일정하였다. UF/RO공정에 적용하는 실험조건은 Table 2에 나타내었으며 UF/RO공정도는 Fig. 3에 나타내었다.

장시간 연속(long-term)실험에서는 막오염에 따른 투과 플럭스의 변화를 관찰하기 위해 25℃의 일정온도에서 UF막의 적용압력을 1.6 kgf/cm²로 하고 RO막에서의 적용압력은 4 kgf/cm²으로 일정하게 고정한 후 26시간 동안의 투과 플럭스를 2시간에 한번씩 측

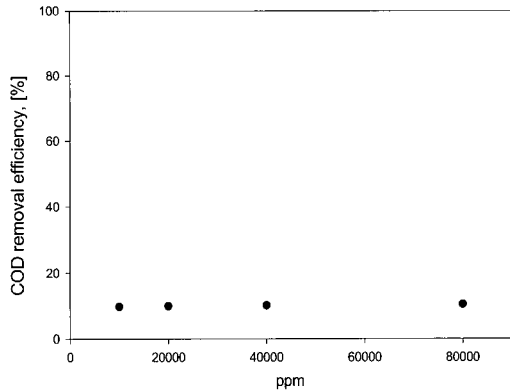


Fig. 4. Chemical pretreatment using CaO.

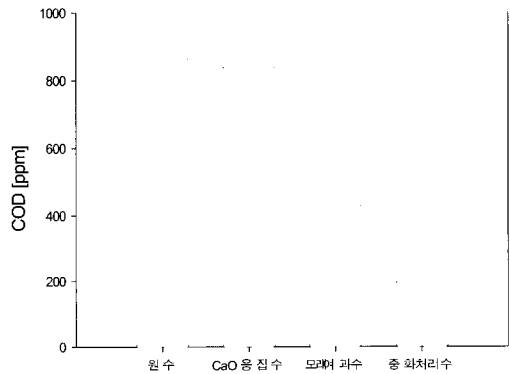


Fig. 5. COD of each pretreatment step.

정하였다. 한외여과 증공사형 모듈의 적용압력은 입구와 출구 압력의 산술 평균값을 취하였다. 한외여과 막의 투과액은 역삼투막 공급용 저장조로 연결되는 관으로부터 직접 수작업으로 유량을 측정하였고, 배제액의 유량은 배제액 관과 배제액 우회관으로부터 각각 수작업으로 측정 후 합산하여 구하였다. 시료채취는 유량 측정과 동시에 수행하였다.

4. 실험 결과

4.1 전처리 공정

COD제거를 위한 전처리공정 중 CaO 응집공정에서의 COD제거 효율은 약 11%의 낮은 값을 나타내었다.(Fig. 4). 본 실험은 슬러지 발생을 최소화 하기위해 CaO의 농도를 10000 ppm으로 조절하였다. CaO를 아크릴페수에 투입한 결과 pH가 12 이상으로 강 염기성(원페수 pH 8.2)을 나타내어 한외여과 증공사형 모듈과 역삼투 나린형 모듈에 적용하기에는 부적합하므로 중화공정이 필요함을 확인 할 수 있었다. Fig. 5는 각

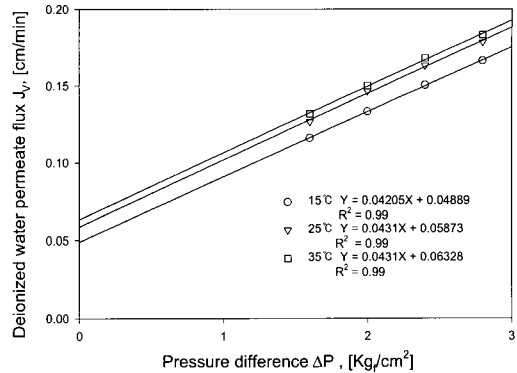


Fig. 6. Deionized water permeate flux versus pressure difference for ultrafiltration hollow fiber module.

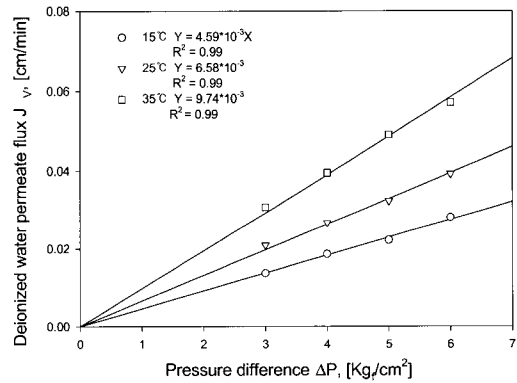


Fig. 7. Deionized water flux versus pressure difference for reverse osmosis spiral wound module.

단계의 COD를 측정된 결과를 나타내었다. 전처리 공정을 마친 COD값은 약 76%가 감소함을 알 수 있었다.

4.2. 순수 투과 플럭스

4.2.1 한외여과막의 순수투과

탈이온수를 한외여과 증공사형 모듈 (GUF 3050)에 적용한 결과 온도 및 적용압력이 증가함에 따라서 순수 투과 플럭스는 선형적으로 증가하였으며, 이로부터 증공사형막의 상태가 구멍이나 누수가 없는 실험 가능한 상태임을 확인할 수 있었다(Fig. 6).

4.2.2 역삼투막의 순수 투과 플럭스

탈이온수를 역삼투 나린형 모듈 RO 14-50에 적용하였을 경우 온도 및 적용압력이 증가함에 따라 투과 플럭스는 선형적으로 증가하였으며, 이로부터 평판막들의 상태가 실험 가능한 상태임을 확인 할 수 있었다(Fig. 7).

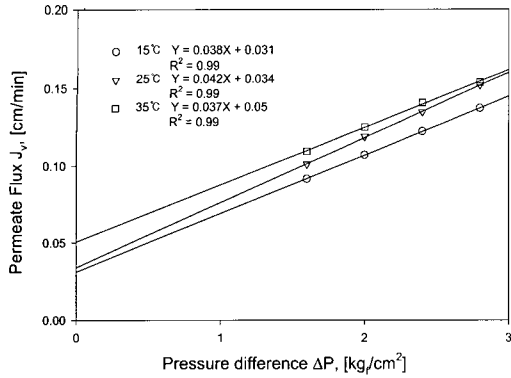


Fig. 8. Permeate flux versus pressure difference for ultrafiltration hollow fiber module.

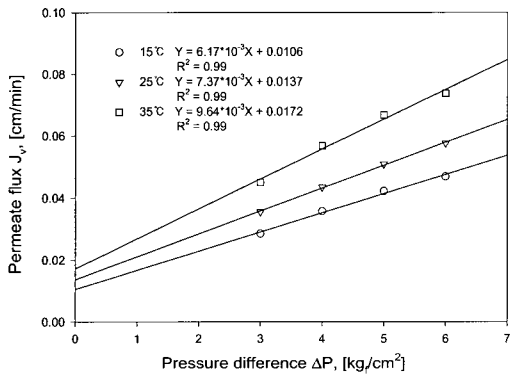


Fig. 9. Permeate flux versus pressure difference for reverse osmosis spiral wound module.

4.3. 폐수 투과 플럭스

4.3.1. 한외여과막 폐수 투과 플럭스

전처리한 아크릴폐수를 한외여과 증공사형 모듈에 적용하였을 경우 적용압력이 증가함에 따라 투과 플럭스는 선형적으로 증가하였으며, 같은 적용압력에서 적용온도가 증가함에 따라 한외여과막의 투과플럭스는 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 8). 이 결과로부터 투과플럭스는 압력과 온도에 비례하여 증가함을

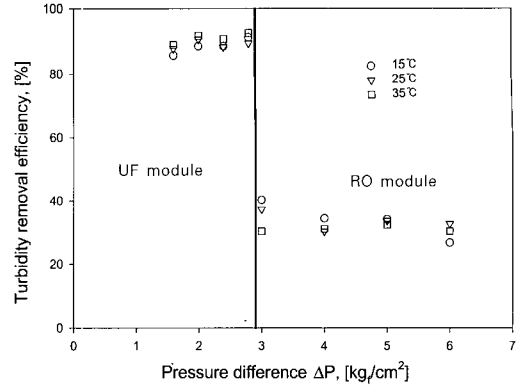


Fig. 10. Turbidity removal efficiency versus pressure difference for modules.

알 수 있다.

4.3.2. 역삼투막 폐수 투과 플럭스

전처리한 아크릴폐수를 한외여과 증공사형 모듈들에 적용하여 얻은 투과액을 공급액으로 하여 역삼투 모듈들에 적용하였을 경우, 일정한 공급 용액 유량 하에서 적용압력이 증가함에 따라서 투과 플럭스는 선형 비례하는 것으로 나타났으며, 공급액 온도가 증가함에 따라 투과플럭스는 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 9).

4.4. Turbidity

전처리한 아크릴폐수(5.20 NTU)를 일정한 공급 용액 유량 하에서 한외여과 증공사형 모듈 GUF3050에 적용하였을 경우 한외여과막의 탁도 제거효율은 약 86~93%의 값을 보이고 있으므로, 탁도의 경우 거의 대부분 한외여과 막에서 제거됨을 알 수 있었다. 이 한외여과막 투과액을 공급액으로 한 역삼투막 공정에서 역삼투막의 탁도 제거효율은 23~43% 사이에 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 10). 이는 한외여과막에서 대부분의 탁도가 제거되었기 때문이다(Table 3). 공급액의 온도와 압력의 변화에 따른 탁도의 제거 효

Table 3. Condition after pretreatment and UF/RO processes

	Acrylic wastewater	Pretreatment	Membrane	
			UF	RO
TDS [ppm]	2160	3850	< 3840	< 230
Turbidity [NTU]	3.1	5.2	< 0.6	< 0.25
COD [ppm]	850	200	< 197	< 40
T-N [ppm]	35.6	33.3	< 31.3	< 1.6
pH	8	8.6	8 ~ 8.6	8 ~ 9.8

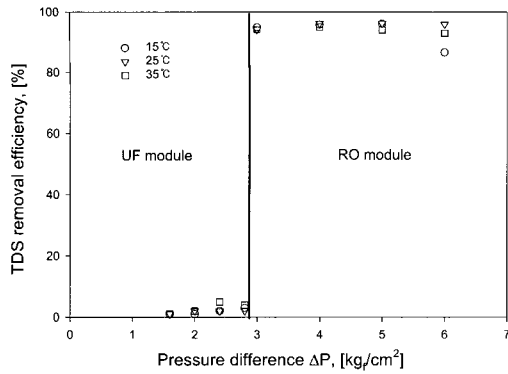


Fig. 11. TDS removal efficiency versus pressure difference for modules.

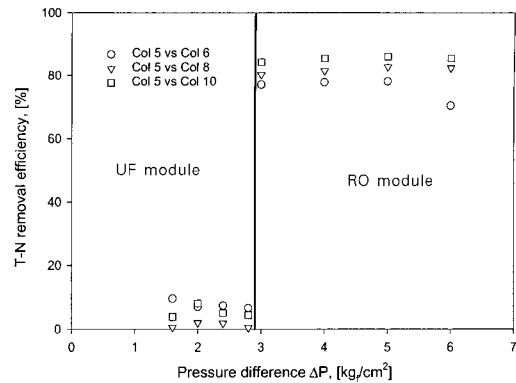


Fig. 13. T-N removal efficiency versus pressure difference for modules.

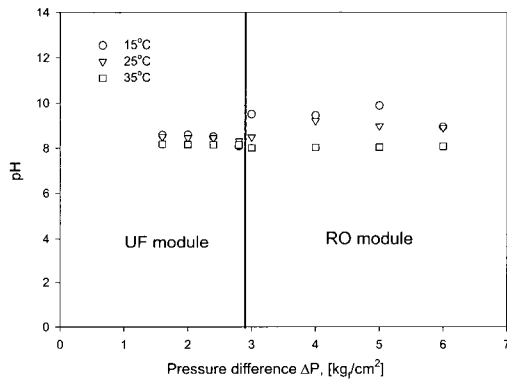


Fig. 12. pH versus pressure difference for modules.

율은 큰 변화를 보이지 않았다. 탁도의 제거 효율을 높이기 위해서는 한외여과 막의 MWCO(분획 분자량)를 작게 함으로써 가능할 것이다.

4.5. TDS

일정한 공급 유량 하에서 한외여과 중공사형 모듈에 적용하였을 경우 TDS 제거효율은 1~6%를 나타내므로 한외여과 막만으로 TDS를 효과적으로 제거하기 어려움을 알 수 있었다. 이 투과액을 역삼투 나권형 모듈에 적용한 결과 TDS의 제거 효율은 93% 이상을 나타내므로 역삼투 막은 TDS의 제거에는 아주 좋은 것으로 나타났다(Fig. 11). 여러 적용 압력과 온도변화에 대해 제거효율은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

4.6. pH

pH는 istek사의 pH meter(module : 735p)를 사용

하여 측정된 결과 한외여과 중공사형 모듈에서는 pH는 8.08~8.6 사이로 거의 일정하였으나 역삼투 나권형 모듈에서는 적용 온도가 낮을수록 pH가 약염기성을 나타내는 경향을 보였다(Fig. 12).

4.7. 총질소

BRAN+LUEBBE사의 AutoAnalyzer 3를 사용하여 총질소를 측정된 결과 한외여과 모듈에서는 약 1~10%의 제거 효율을 나타내므로 한외여과 중공사형 막의 경우 총질소 제거 효과는 거의 없는 것으로 나타났으며 역삼투 나권형 모듈에서는 약 72~96% 이상의 제거효율을 나타내었다. 이러한 고찰은 TDS 제거에서와 같은 경향을 나타내는 것이다. 공급액의 온도와 압력의 변화는 투과액에 대한 총질소의 제거효율에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났(Fig. 13).

4.8. COD

BRAN+LUEBBE사의 AutoAnalyzer 3를 사용하여 COD를 측정된 결과 한외여과 중공사형 막의 경우 약 2~10%의 제거 효율을 나타내므로 COD의 제거 효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 이 투과액을 역삼투 나권형 모듈에 적용한 결과 제거효율은 약 83%의 제거 효율을 나타내었으며 공급액의 압력에 따른 투과액의 COD 제거효율은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 14).

4.9. 전처리 공정을 거친 아크릴페수의 장시간 연속(long-term)운전 및 막오염의 해석

4.9.1. 페수투과 플럭스

아크릴페수의 화학적 처리수를 한외여과 중공사형

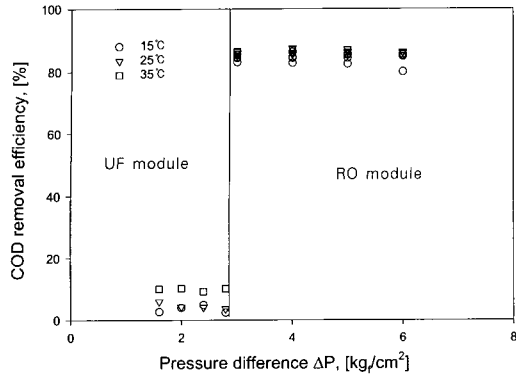


Fig. 14. COD removal efficiency versus pressure difference for ultrafiltration hollow fiber and reverse osmosis wound module.

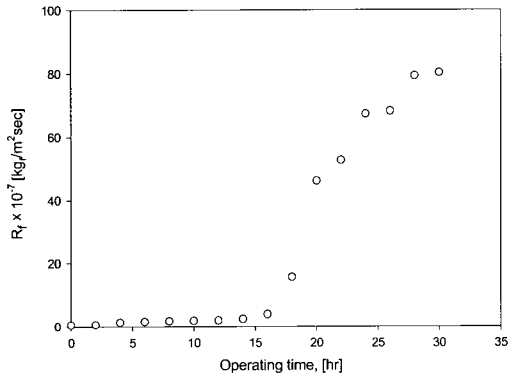


Fig. 15. R_f versus operating time for ultrafiltration hollow fiber module.

모듈에 적용한 결과 운전시간에 따른 막오염 저항(R_f)의 변화를 Fig. 15에 나타내었다. 14시간 이전의 운전 시간에서는 막오염 저항(R_f)의 변화가 거의 없으며 14시간 이후에는 막오염으로 인하여 R_f 값이 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 이로부터 한외여과 증공사형 모듈의 적정 세척시기는 운전시작부터 14시간 경과한 시점인 것으로 나타났다. Fig. 16에는 운전시간에 따른 역삼투막의 투과플럭스의 변화를 나타내었다. 역삼투막에서도 한외여과와 마찬가지로 14시간 이후부터 투과플럭스의 감소를 확인할 수 있었다.

4.9.2. TDS

일정한 공급유량 하에서 화학적 처리수를 한외여과 증공사형 모듈에 적용한 결과 제거 효율은 약 2.4~12.3%의 값을 나타내므로 한외여과 증공사형 모듈로 TDS를 제거하기 어려운 것으로 나타났다. 투과액을 역삼투 나권형 모듈에 적용한 결과 TDS의 제거 효율

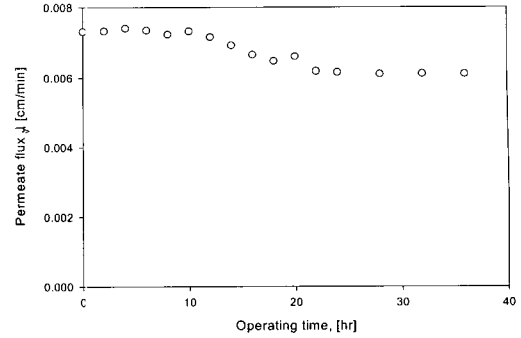


Fig. 16. Permeate flux versus pressure difference for reverse osmosis spiral wound module.

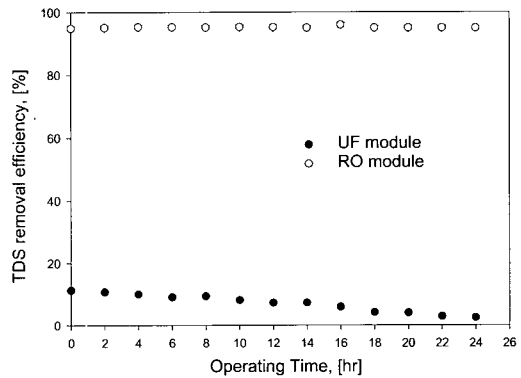


Fig. 17. TDS removal efficiency versus operating time for ultrafiltration hollow fiber and reverse osmosis spiral wound module.

은 약 95% 이상의 높은 값을 계속 유지함을 알 수 있었다(Fig. 17).

4.9.3. pH

화학적 처리수의 pH는 약 12로 강염기성(원폐수의 pH는 8.2)을 나타내고 있어, 중화공정을 거친 처리수(pH 8.3)를 한외여과 증공사형 모듈과 역삼투 나권형 모듈에 적용한 결과 한외여과 막에서는 pH가 약 8.3으로 거의 일정하였으나, 역삼투막에서 pH가 약 8.5~9.8 사이의 값을 나타내는 것은 전처리 공정에서의 여러 가지 이온들에 대한 역삼투막의 선택성에 따른 영향일것으로 사료된다.(Fig. 18).

4.9.4. Turbidity

화학적 처리수를 일정한 공급 용액 유량 하에서 한외여과 증공사형 모듈 GUF 3050과 역삼투 나권형 모듈 RO 11-50에 적용하였을 경우 UF막에서 탁도

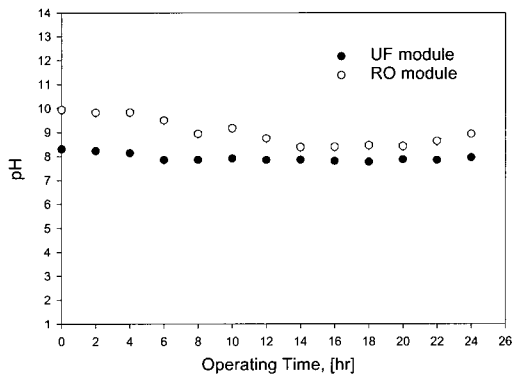


Fig. 18. pH versus operating time for ultrafiltration hollow fiber and reverse osmosis spiral wound module.

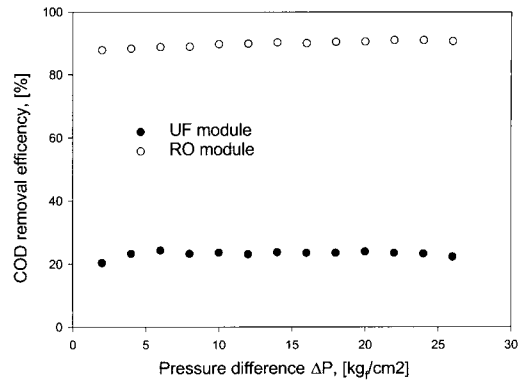


Fig. 20. COD removal efficiency versus operating time for ultrafiltration hollow fiber and reverse osmosis wound module.

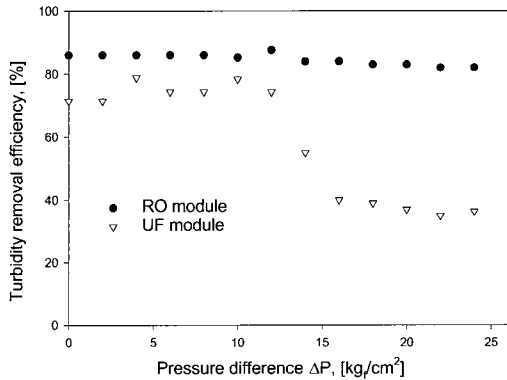


Fig. 19. Turbidity removal efficiency versus operating time for ultrafiltration hollow fiber and reverse osmosis spiral wound module.

제거효율이 약 73% 이상 일정하게 유지되었으나 14시간 이후 감소하는 경향을 보였다. RO막에서는 큰 감소를 보이지는 않지만 UF와 비슷한 시간대에 변화를 확인할 수 있었다(Fig. 19).

4.9.5. COD

아크릴페수의 화학적 처리수를 한외여과 중공사형 모듈에 적용하여 COD를 측정된 결과 약 24% 이내의 제거효율을 나타내므로 COD의 제거효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 한외여과막 투과액을 역삼투 나권형 모듈에 적용한 결과 87% 이상의 제거효율을 계속 유지함을 알 수 있었다(Fig. 20).

5. 결론

아크릴페수의 전처리 공정을 거치고 난 페수를 한외여과 중공사형 모듈과 역삼투 나권형 모듈에 적용한 결과 Turbidity는 한외여과 공정에서 효율적으로 제거됨을 알 수 있었다. 또한 역삼투 공정에서 T-N과 TDS 제거 효율이 우수함을 나타내었다. 역삼투 공정에서 T-N은 적용온도가 증가할수록 제거효율이 증가하지만 적용압력에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 아크릴페수의 COD값은 화학적 전처리 및 모래여과공정에 의해 COD의 제거효율이 약 76%임을 알 수 있었다.

장시간 연속(long term)운전에서 운전시간이 14시간 이내에서는 R_f , Turbidity 및 TDS의 제거효율은 변화가 없는 것으로 나타났다. 14시간 이후의 운전시간에서는 R_f 값이 증가하고, Turbidity 제거효율은 각 모듈에서 감소하는 경향을 보이며, 한외여과 막에서의 TDS의 제거효율은 거의 없는 것을 확인할 수 있었다.

감 사

본 논문은 2001년도 동의대학교 대학자체 학술연구비 및 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발 연구센터(RRC-IETD)의 지원(과제번호 : 99-10-02-03-A-3)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K. J. Kim, *J. of KSEE*, **17**(5), 413 (1995).
2. J. S. Taylor, A. Mulford, S. J. Duranceau, and W. M. Barrent, *J. AWWA*, **81**(11), 52 (1989).
3. Y. Osada and T. Nakagawa, "Membrane Science and Technology", Marcel Dekker, Inc., 333 (1992).
4. Zahid Amjad, "Reverse Osmosis", Chapman & Hall, 275 (1993).
5. P. Fu, H. Ruiz, K. Thomposon, and C. Spangenberg, *J. AWWA*, **86**(12), 55 (1994).
6. W. B. Suratt, "Pretreatment for membrane precesses," AWWA Proceedings : Membrane Technology conference, Boltimore, MD., 9-21 (1993).
7. M. Cheryan, "Ultrafiltration handbook," Technomic Publishing Co. (1986).
8. J. Y. Park, *Membrane J.*, **7**(1), 39 (1997).
9. B. S. Parekh, "Reverse Osmosis Technology : Applications for High Purity Water Production," Marcel Dekker Inc., New York, 23-34 (1988).
10. 이해일, 부경민, 최경민, 김창원, *한국수질보전학회지*, **14**(1), 57 (1998).
11. H. I. Lee, S. K. Lee, K. S. Choi, H. G. Lee, and C. W. Kim, *J. of KSEE*, **21**(4), 617 (1999).
12. R. M. Shimokubo, *Filtr.*, **20**(Sep.), 376 (1983).
13. B. Hultman, K. Jonsson, and E. Plaza, *Wat. Sci. Tech.*, **29**(10-11), 127 (1994).
14. K. H. Lee, *Membrane J.*, **3**(2), 41 (1993).
15. P. A. Schweitzer, "Handbook of Separation Techniques for chemical Engineers," McGraw-Hill, Inc., New York (1973).
16. T. M. Missimer, "Water Supply Development for Membrane Water Treatment Facilities", Lewis Publishers, 11 (1994).