

## 파일럿 규모의 침지식 부직포 여재 활성슬러지 공정의 시스템 처리 특성에 관한 연구

### Pilot Scale Test of Non-woven Fabric Filter Separation Activated Sludge Process for Practical Application on Domestic Wastewater Reclamation

이상우\* · 최철희 · 박영미 · 서규태

Sang-Woo Lee\* · Chul-hoi Choi · Young-mi Park · Gyu-Tae Seo

창원대학교 환경공학과

(2006년 2월 7일 논문 접수; 2006년 4월 5일 최종 수정논문 채택)

#### Abstract

A pilot scale non-woven fabric filter separation activated sludge system was investigated for practical application on domestic wastewater reclamation and reuse. The system was operated in A/O (Anaerobic/Oxic) process with submerged filter module in the aerobic compartment. In the test of two types of filter materials (70g/m<sup>2</sup> and 35g/m<sup>2</sup>), the initial flux (0.42m/d) could be maintained for about three months by regular air backwashing of 35g/m<sup>2</sup> filter at 0.3m water head. The removal efficiency of organic matter by the system was BOD 93.3%, CODcr 96.3%, SS 96.7%. The effluent quality was 7.8mg/L, 12mg/L and 5mg/L for BOD, CODcr and SS, respectively. The water quality was enough to meet a standard for domestic reuse without human contact. T-N removal efficiency was 49.9% at internal recycle rate 2Q and C/N ratio 3.3. The removal efficiency of T-P was 50% with average effluent concentration, 2.6mg/L.

**Key words:** Submerged nonwoven fabric filter, Air backwashing, Gravity filtration, Wastewater reuse

**주제어:** 활성슬러지 침지식 부직포 여재, 공기역세, 중력여과, 오수 재이용

#### 1. 서 론

인구 증가와 생활수준의 향상에 의한 오염부하의 지속적 증가와 함께 처리되지 않은 생활하수는 공공 수역으로 배출되어 하천 및 연안해역을 오염시키는

주요한 원인이 되고 있다. 이에 대하여 국내에서는 대규모 하수도 사업, 마을 하수도 등의 각종 환경기초시설에 대한 투자가 적극적으로 이루어지고 있으나 여전히 미흡한 실정이다.

근래에 들어와 생활용수, 공업용수, 농업용수의 수요가 점점 증가하고 이는 하·폐수를 한 단계 높은

\*Corresponding author Tel: +82-55-279-7566, FAX: +82-55-281-3011, E-mail: woc59@changwon.ac.kr (Lee, S.W.)

수준으로 경제적으로 처리하는 것은 대단히 중요한 일이다. 그런데 지금까지의 하·폐수처리는 여과, 흡착 공정 등과 같은 물리적 처리, 침강, 응집 등과 같은 화학적 처리, 활성슬러지 공정, 회전원판법 등과 같은 생물학적 처리 등이 주로 이용되고 있다. 물의 처리 수준에 따라서는 이들 공정을 적절히 조합하여 가장 경제적으로 수질오염물질을 제거하고 있지만 공정의 효율이나 에너지 소비면에서 보다 더 유리한 새로운 방법에 관한 연구도 지속적으로 진행되고 있다. 이들 연구 중 막을 이용하는 기술은 1950년대에 미국에서 물에서 염분을 제거하는 연구로 시작되어 최근에 특히 활발히 이루어지고 있으며 국내에서도 이 분야에 관심이 높아지고 있다(김, 1993).

전통적 유기성 폐수처리 기술인 활성슬러지 공정은 제거 효율이 높지만 최종 유출수의 수질은 처리수와 미생물을 중력 침전법으로 분리하는 침전지에서의 수력학의 조건과 미생물 침강특성에 의존하게 되고 유입수의 유량변화, 성상변화, 계절에 따른 온도변화 등 처리장의 환경변화에 의해 미생물의 침강성이 저하되는 경우 충분한 고액분리가 어려워져 유출수의 악화를 초래하게 된다(1995). 이러한 문제점을 해결하기 위해 근래에는 활성슬러지 공정과 고액 분리막을 조합하여 포기조 후반부에 설치된 침전조 대신 분리막을 도입함으로써 compact한 반응조를 구성할 수 있고 유출수는 슬러지 침강성에 좌우되지 않으며, 긴 SRT로 운전이 가능하여 질산화와 탈질화에 의한 질소제거가 쉬워졌고 잉여슬러지 발생량의 최소화 및 무인자동화 등 많은 장점을 가지게 되었다(1998). 그러나 분리막에 의한 고액분리 방법은 막에 대하여 수직으로 직접 여과하는 Dead-end 방법과 막의 방향과 수평인 Cross-flow 방법이 이용되어지고 있지만 두 방법 모두 운전시간이 증가함에 따라 분리막 표면에 쌓이게 되는 미생물층, 막내부의 공극폐색 등으로부터 기인하는 막오염이 발생하여 분리막의 운전압력 증가 및 플럭스가 크게 감소하는 단점을 가지고 있다(Sethi, 1995). 이러한 막오염에 조금 유리한 Cross-flow 방식이 많이 적용되고 있는데, 이 방식은 적절한 플럭스를 확보하기 위하여 높은 막표면 유속을 필요로 하며 재순환에 의한 에너지 소모가 크다(Murkes 1988). 또한 지금까지 진행되었던 막분리 활성슬러지법에 이용되어온 정밀여과막(MF)이나 한외여과막

(UF)은 그 가격이 높아 초기 설치비 및 막 교체에 따른 유지비가 높아 고도의 처리수질이 확보 가능함에도 불구하고 실제 폐수처리장에 적용함에 있어 큰 문제점으로 남아있다.

한편 최근에는 하수차집 및 하수처리시설이 부족한 지역을 대상으로 소형오수정화시설에 의한 오수처리 예가 증가하고 있다(안, 1996).

이와 같은 소규모 정화시설에 막을 이용한 고도처리에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 시스템 역시 앞에서 언급된 경제성의 문제로 고가의 분리막을 대체할 수 있는 방안이 절실히 요구된다.

본 연구에서 수행하고자 하는 부직포 여재 활성슬러지 공법은 부직포 표면에 형성된 활성슬러지가 유지되어야 하는데, 이에 따른 유기물 부하의 감소와 그 제거속도의 상승과 같은 장점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 도시 소하천 유지용수로 재이용하기 위하여 가격이 저렴한 부직포를 여재로 사용하여 저비용/고효율의 소형 오수재생 장치를 개발하고자 하며 장기적인 처리특성 조사와 함께 최적 운전 조건을 도출함으로써 시스템 실용화를 위한 기반을 확립하는 것을 목표로 연구를 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험 장치

#### 2.1.1 Pilot 장치

유기물과 영양염류를 동시에 제거하기 위해 A/O 방식의 pilot scale 장치를 구성하였으며 설계 처리량은 1인 1일 하수발생량  $0.2\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 로 4인 기준으로 1가구 당 발생량인  $0.8\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 로 설계하였다. 본 연구에 사용된 부직포는 Y사(社)에서 제작된 폴리프로필렌 재질로서 단위 중량이  $35\text{g}/\text{m}^2$ 인 부직포이며 유효 막면적이  $2.4\text{m}^2$ 로 내부에 space를 주었으며 봉투형태로 제작하고 폭기조 내부에 침지시켜 실험을 진행하였다. 주입된 원수는 교내 기숙사 오수처리장에 유입되는 원수를 사용하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 pilot 장치로서 실험장치는 아크릴 재질로 제작되었으며 반응조의 용적이 각각  $0.28\text{m}^3(0.3\text{m} \times 0.7\text{m} \times 1.3\text{m})$ ,  $0.47\text{m}^3(0.5\text{m} \times 0.7\text{m} \times 1.3\text{m})$ 인 무산소조와 호기조로 구성되어 있

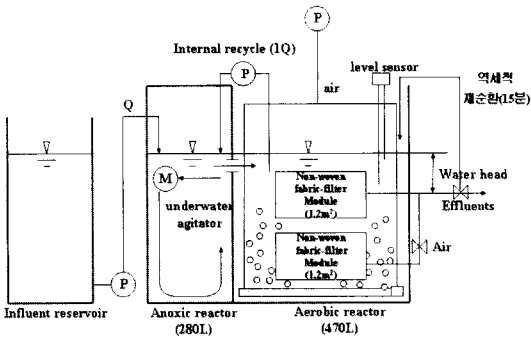


Fig. 1. Schematic diagram of pilot plant.

다. 원수는 저류조에 저장한 뒤 호기조 내부에 설치된 level sensor에 의해 무산소조로 공급되어 반응조내의 수위가 일정하게 유지되도록 하였다. 내부 반송은 정량펌프(Master flex, Cole parmer)를 이용하여 호기조에서 무산소조로 반송시켰다. 무산소조 내부에는 수중 펌프를 설치하여 교반을 실시하였고 blower를 통하여 호기조 하부로 20l/min의 유량으로 폭기시켜 산소를 공급하였으며 기온이 하강하는 동절기에는 각 조 내부에 수중 heater를 설치하여 수온을 20°C로 유지시켰다. 고액 분리는 호기조 내부에 침지된 부직포 여과수 유출구와 조내 수위사이에서 일정한 수두차를 주어 중력식으로 여과되도록 하였다.

### 2.2 운전 조건

본 연구에 사용된 유입원수는 교내 기숙사 오수처리장의 오수로서 대부분이 화장실과 식당에서 발생하고 있으며 지하 오수처리장의 유량 조정조에 저류되

어 있는 오수를 실험 장치의 원수 저류조내로 펌핑하여 사용하였다. Table 1과 Table 2는 유입수 특성과 시스템 운전조건을 나타낸 표이며, 분뇨가 포함된 오수임에도 불구하고 원수의 BOD가 그리 높지 않은 값을 나타내는데, 이는 해당 건물의 오수처리장의 저류조에서 일부 분해되거나 방화기간에 기숙사내 거주하는 수가 줄었기 때문으로 판단된다. 일반 가정오수의 수질을 고려하여 원수의 BOD가 낮아지는 경우 10%의 Glucose를 주입하여 120mg/L 수준으로 조정하여 사용하였다. RUN은 부직포의 단위면적당 무게 또는 수두를 변화시키는 것을 기준으로 하여 운전일수와 반응조내 미생물 농도를 나타낸 것이며, RUN3-1은 반응조내의 부직포막을 교체하여 재가동한 것을 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Flux 변화

본 실험장치의 초기운전 flux는 0.42m/day로 설정하여 여과수 유출수와 반응조 수면사이의 수두차에 의한 중력식 여과를 채택하였다. 운전시간에 따른 flux 변화를 Fig. 2에 나타냈다.

RUN 1에서 부직포 70g/m<sup>2</sup> 수두차 0.3m에서 초기 10일간 플럭스를 유지하다 차츰 감소하여 운전 21일째 플럭스가 0.17m/day까지 떨어져 비교적 세밀한 조적을 가지는 70g/m<sup>2</sup>의 부직포는 공극이 쉽게 막혀 flux유지가 어려웠던 것으로 판단된다. 이후 역세를 실시하였으나 플럭스 회복은 되지 않았다. RUN 2에

Table 1. Characteristics of influent wastewater

	Temp (°C)	pH	BOD (mg/L)	CODcr (mg/L)	CODMn (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	SS (mg/L)
평균	28.2	6.8	118.2	199.8	109.8	38.8	5.1	149.7
최대	32.2	7.28	128.5	221.3	120.5	46.1	6.4	199.1
최소	24.1	6.33	65.4	109	55.2	31.8	3.7	60.9

Table 2. Operating conditions

	Filter weight (g/m <sup>2</sup> )	Water head (m)	Operation period (days)	MLSS (mg/L)
RUN 1	70	0.3	33	1210 ~ 1580
RUN 2	35	0.1	17	1654 ~ 2157
RUN 3	35	0.3	97	2138 ~ 2410
RUN 3-1	35	0.3	52	2239 ~ 2544

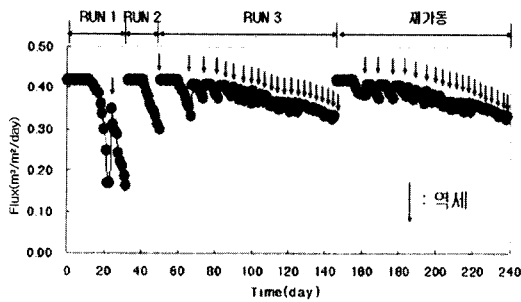


Fig. 2. Daily variation of permeate flux.

서 부직포 35g/m<sup>2</sup> 수두차 0.1m에서 초기 플럭스를 7 일간 유지한 뒤 차츰 감소하는 경향을 나타내었다. RUN 3에선 부직포 35g/m<sup>2</sup> 수두차 0.3m로 초기 플럭스 0.42m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day에서 운전을 하였으며, 시스템의 장기간 운전을 위해서 역세를 실시하였다. 초기 플럭스가 10일 이후까지 유지되었으며 그 이후에는 점차적으로 감소추세를 나타내었다. 역세는 투과유속이 20% 정도 감소하였을때 실시하였는데 공기역세로 2분간 실시하였다. 초기에는 7일에 한번씩 역세를 하였고 그 이후에는 3일에 한 번, 운전 73일째 부턴 하루에 한번씩 역세를 실시하였다. flux 회복율은 운전 초기에는 거의 90%에 달하였으나 이후 잦은 역세에도 불구하고 약 85%의 회복율을 나타내었다. RUN 3에서 운전을 하고 난 뒤 막 모듈을 교체하여 시스템을 재가동하였으며 앞의 실험과 유사한 결과를 나타내어 재현성이 있음을 보여 주었다. 본 장치의 현장 적용 시에는 부직포 공극의 과도한 막힘이 일어나기 전에 교체해주는 것이 역세빈도를 줄여 보다 효율적인 운전이 가능하다고 판단된다.

### 3.2 처리 특성

#### 3.2.1 유기물

각 단계별 COD<sub>Cr</sub>, BOD의 유입수와 유출수의 농도변화는 Fig. 3과 같다. Run 1, Run 2, Run 3에서 유입 원수를 그대로 사용하였고 재가동 부분에서는 유입수의 농도가 너무 낮아 10% Glucose를 첨가하여 유기물 농도를 조절하였다.

원수 중의 유기물은 먼저 무산소조로 유입되어 탈질에 이용되어 소비되고 다시 호기조에서 미생물 산화에 의해 소비되며 실험을 진행한 전 구간에서 유출수의 농도는 COD<sub>Cr</sub>의 경우는 11.2~12.4mg/L로 나

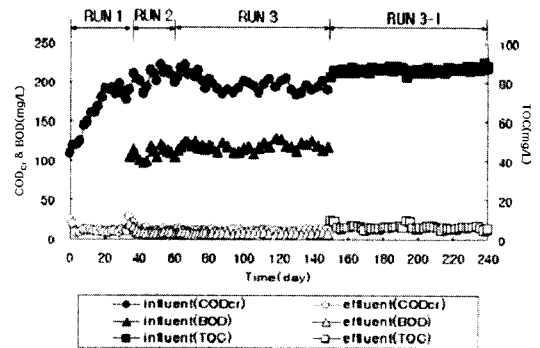


Fig. 3. Daily variation of organic removal in terms of COD<sub>Cr</sub>, BOD and TOC by the system.

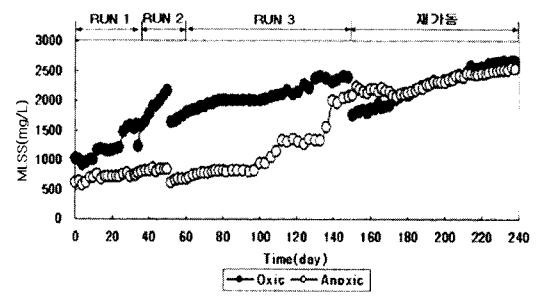


Fig. 4. Daily variation of MLSS concentration in the system.

타났으며, BOD의 경우는 유출수의 농도가 평균 7.1~8.6mg/L로 나타났다. 유기물의 제거는 유입수의 농도 변화에 관계없이 92.7~95.1% 범위로 평균 93.5%의 제거율을 보이고 있었다. 이후 재가동시에는 TOC를 측정하였는데 유입수 농도는 평균 85.9mg/L, 유출수 농도는 평균 6.15mg/L로 나타나 평균 92.8%의 제거효율을 나타냈다. 이는 방류수 수질기준의 BOD 10mg/L 이하, COD 40mg/L 이하의 기준을 만족하여 재이용수의 이용을 가능하게 하며, 하천수 수질등급과 비교하였을때 4등급에 속하여 농업용수로서의 사용 또한 가능하다.

Fig. 4는 반응조 내부의 MLSS 농도 변화를 나타낸 것이다. Run 2와 Run 3에서 MLSS의 농도가 낮은 이유는 반응조내 부직포 막을 교체하면서 부직포에 형성되어있던 슬러지가 외부로 유출되었기 때문이다. 그리고 실험초기 F/M비는 0.1에서 실험 후반단계에서는 0.06이었다.

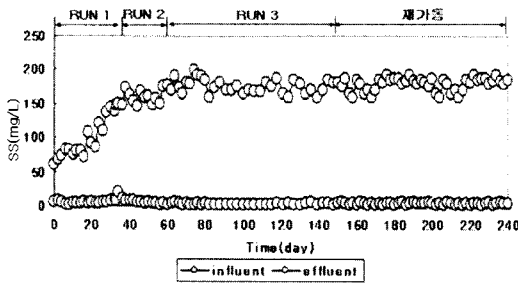


Fig. 5. Daily variation of SS removal by the system.

3.2.2 SS

UF나 MF 등을 사용하는 일반적인 막 결합형 활성 슬러지 공정에서는 유출수에서 부유물질(Suspended solids)이 거의 검출되지 않는 수질을 유지할 수가 있다. 50 $\mu$ m 이상의 공극의 크기를 가지는 부직포 막을 이용한 본 연구에서도 유출수의 SS 수질은 평균 4.9 mg/L로 96.7%의 양호한 제거율을 보였다. Fig. 5는 운전기간 중 유출수의 SS 농도를 나타낸 것이다. 역세 후 초기유출수는 반응조내로 재순환하였으며 이후 반응조가 안정되었을 때 SS를 측정하여 나타내었다. 방류수 수질기준에서는 SS를 10mg/L 이하로, 하천수 수질등급에서는 25mg/L 이하로 규정하고 있으며, 이는 유출수의 평균 SS 4.9mg/L가 두가지 수질기준 모두에 적합함을 알 수 있다.

3.2.3 질소

유입수 원수의 질소중 약 90% 이상이 암모니아성 질소였으며 이러한 암모니아성 질소는 호기조에서 질산성 질소로 산화되고 무산소조로 내부 반송되어 유입수중의 유기물을 수소공여체로 하여 탈질 반응이

진행된다. Fig. 6은 유입수와 유출수의 T-N, NH<sub>3</sub>-N의 농도변화를 나타낸 것으로, RUN 3에서 반응율을 1Q, 2Q로 운전하여 그 결과를 비교한 것이다. 두 실험결과 T-N의 경우 운전기간동안 유입수의 평균은 38.8mg/L, 유출수 평균은 22.7mg/L로 1Q 반송시에는 41.1%의 제거율을 나타냈고, 2Q 반송시에는 49.9%의 제거율을 나타냈다. NH<sub>3</sub>-N의 경우는 유입수 평균 34.5mg/L, 유출수 평균 1.12mg/L로 반응율에 관계없이 평균 96.5%의 제거율을 보이고 있다. NH<sub>3</sub>-N의 경우 대부분 제거됨으로써 질산화는 잘 일어났으나 그에 반해 탈질화 효율이 낮게 나타났으며 이는 유입수의 질소비가 비교적 높아 탄소원이 부족했을거라 판단된다.

3.2.4 인

Fig. 7은 유입수와 유출수의 T-P변화를 나타낸 것으로 무산소조에서는 인의 용출이 잘 이루어 지지 않아 낮은 인 제거율을 보이고 있었다. 반응율 변화에도 인 제거율은 큰 차이를 보이지 않았으나 RUN 3 운전기간동안 호기조에서 막 모듈의 철망에 의해 인이 모듈 철망의 부식과 반응하여 침전되면서 인의 제거가 이루어져 처리수 평균 2.4mg/L로서 49.9%의 제거율을 보였다. 반응조내 생물학적 공정에서 세포 대사에 의해 10~30%의 제거율을 보이고 본 시스템에서는 막 모듈 철망이 부식됨으로 인해 인과 반응하여 인이 침전됨으로써 인제거가 이루어진 것으로 판단된다.

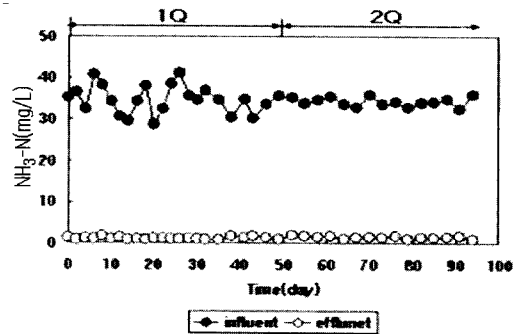
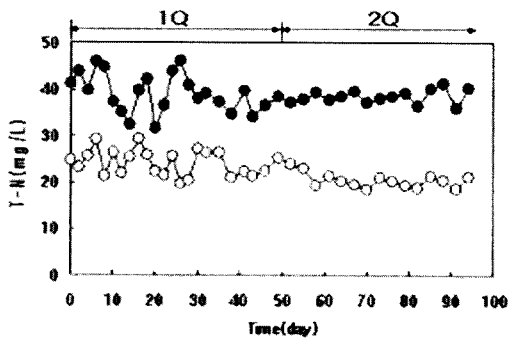
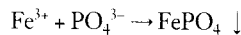


Fig. 6. Daily variation of T-N and NH<sub>3</sub>-N removal by the system.

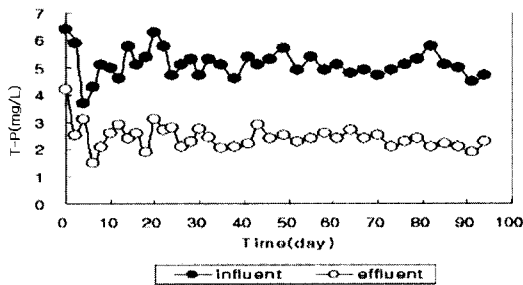


Fig. 7. Daily variation of T-P removal by the system.

#### 4. 결 론

부직포를 고액 분리막으로 적용시킨 막 결합형 활성슬러지 시스템을 가정오수 처리에 대한 적용성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 70g/m<sup>2</sup>의 보직포를 사용한 RUN 1에서 초기 Flux 0.42m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day에서 역세를 주지 않았을 경우에는 운전 21일만에 0.17m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day까지 Flux가 떨어짐을 알 수 있었고, 이 때 역세를 주더라도 Flux는 회복되지 않았다. 이후 35g/m<sup>2</sup>의 부직포를 사용하여 운전하였을 때는 초기유속의 20% 정도 감소하였을때마다 역세를 실시하였는데 이때는 약 97일간 초기유속을 유지할 수 있었으며 장기운전이 가능하였다.

2) 실험을 진행한 전 구간에서 유출수의 평균농도는 COD<sub>Cr</sub> 11.2~12.4mg/L, BOD 7.1~8.6mg/L로 나타나 유입수의 농도 변화에 관계없이 92.7~95.1% 범위로 평균 93.5%의 제거율을 보이고 있었다. 이후 재가동시 측정된 TOC 유출수 평균농도는 6.15mg/L로 92.8%의 제거효율을 나타냈다. 이는 방류수 수질 기준을 만족하여 재이용수의 이용을 가능하게 하며, 하천수 수질등급과 비교하였을때 4등급에 속하여 농업용수로서의 사용 또한 가능하다.

3) 역세에 의한 초기 SS 유출은 반응조내로 재순환 시킴으로서 SS 유출을 막을 수 있었으며 유입수의 평

균 SS 농도는 149.7mg/L, 유출수의 평균 SS 농도는 4.9mg/L로 96.7%의 처리효율을 나타냈다.

4) T-N의 경우 반응률 1Q로 했을 경우 41.1%, 2Q로 했을 경우 49.9%의 제거율을 얻을 수 있었고, NH<sub>3</sub>-N의 경우는 반응율에 상관없이 96.5%의 제거율로서 반응조내에서 질산화가 잘 이루어짐을 알 수 있었다. 인의 경우 RUN 3 운전기간동안 호기조에서 막 모듈의 철망에 의해 인이 모듈 철망의 부식과 반응하여 침전되면서 인의 제거가 이루어져 처리수 평균 2.4mg/L로서 49.9%의 제거율 나타냈다.

#### 참고문헌

1. 김갑수, 김오식 (1988) *신활성슬러지법*, 1-2.
2. 김재진, 김성수, 김창근, 박승엽 (1993) *수처리학*, 11(6): 440-448, 화학공업과 기술.
3. 김태열, 김진태, 최광호, (1993). 분리막을 이용한 폐수 재활용, pp. 449~456, *화학공업과 기술*.
4. 안규홍 외, (1996), *처리수 재이용 시스템 기반기술개발, 3차년도 최종보고서*, 한국과학 기술원 pp. 15~16, 1996
5. 창원시 상공회의소, (1997), 창원시의 환경 질 개선과 관리에 관한 연구, pp. 285-299.
6. Granville H. Sewell, *Biological process design for wastewater treatment*, pp. 131-217.
7. Jakob Murkes, Claes-Goran Carlsson (1988) *Cross-flow filtration theory and practice*, John Wiley & Sons Ltd. 1-31.
8. Muhammad H. Al-Malack, G. K. Anderson, (1997) *Crossflow microfiltration with dynamic membranes*, *Wat. res.* 31(8), 1969-1979
9. Ravipim Maythanukhraw (1995) *Application of air backflushing technique in membrane bioreactor*, Asian Institute of Technology Bangkok, Thailand, 1-2.
10. Sandeep Sethi, Mark R. Wiesner, Member, ASCE (1995) *Performance and cost modeling of ultrafiltration*, *Journal of environmental engineering*, December, pp. 874-882.
11. Speth. T. F., Summer. R. S., and Gusses. A. M. (1988) *Nanofiltration foulants from a treatment surface water*, *Environ. Sci. Technol.*, 32, pp. 3612-3617.