

## 2단계 막분리 활성슬러지법(Two Stage MBR)에서 내부순환을 변화와 응집제 첨가에 의한 질소 및 인 제거 특성에 관한 연구

### Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics from Domestic Sewage using Two Stage Membrane Bioreactor

박재로 · 임현만 · 김응호\*

Jae-Roh Park, Hyun-man Lim, Eoung-Ho Kim\*

한국건설기술연구원 수자원환경연구부  
\*홍익대학교 토목공학과

Water Resources & Environmental Research Div., Korea Institute of Construction  
Technology

\* Dept. of Civil Eng., Hong-Ik University

#### Abstract

Laboratory-scale membrane bioreactor added alum into the anaerobic basin as a flocculant and adsorbent was carried out to find removal efficient of nitrogen and phosphorus components in the mixed liquid and weather or not maintaining the stability for the permeate flux and pressure at various internal recycle conditions. It was found that denitrification efficient of maximum 65% was obtained when the ratio of internal recycle was 3Q. Additionally when the ratio of internal recycle was fixed at 3Q, BOD<sub>5</sub> and T-P concentration of permeate was much more reduced compared to not added alum in anaerobic basin but T-N concentration of permeate was relatively increased. In case of added alum as the flocculant and adsorbent in anaerobic basin, the permeate flux was maintained above 10 l/m<sup>2</sup>/hr but the permeate pressure was relatively higher than alum was not added in anaerobic basin.

**Keywords** : Membrane bioreactor, Internal recycle rate, T-N, T-P removal.

#### 1. 서 론

최근, 막분리 기술은 정수, 하·폐수처리, 분뇨처리 등 다방면에 걸쳐서 적용이 시도되고 있다. 이것은 막분리 기술이 가지는 일반적인 장점, 즉 에너지 효율의 우수성, 콤팩트한 장치에 의한 공간절약, 운전 및 유지관리의 용이성, 고도처리의 가능성 외에도 최근 다양한 성능을 지닌 분리막 및 모듈이 개발되고 있는데 기인한다. 막분리법을

단독으로 이용하는 경우, 생물분해성의 한계 및 영양염류에 효과적으로 대처할 수 없는 문제점이 대두되면서 최근, 한외여과막 또는 정밀여과막을 활성슬러지 또는 응집 등과 같은 단위공정과 결합한 변형된 형태의 처리공법(Hybrid System)을 개발하는 시도가 활발히 이루어지고 있는 추세이다. 한편, 생물처리법과 막분리법을 결합시킨 처리공법은 막분리법 단독으로 이용하는 경우에 비해서 막오염 물질의 생물분해성을 높이고, 내부순환을

조작을 통해 질산화 및 탈질화 과정을 유도할 수 있는 장점이 있는 반면, 반응조내 미생물의 장기 체류로 인해 활성도가 떨어지고, 반응조내 미생물 대사산물에서 유래되는 불활성 물질이 분리·축적되어 미생물에게 저해 또는 독성물질로 작용하거나 분리막 표면의 파울링(fouling)을 촉진시키는 단점이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 막 분리 활성슬러지법의 혐기성 반응조에 응집제를 투입하여 미생물 대사산물과 수중에 용해된 인성분을 불용성 고형물로 유도하여 이들 성분을 효과적으로 제어함과 동시에 투과플럭스 및 투과압력의 안정성을 유지할 수 있는가에 대한 평가와 혐기성-호기성 반응조의 배열과 내부순환을 변화를 통해 질소의 거동 및 제거효율에 대한 평가를 수행하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 실험에 사용된 원수는 I하수종말처리장에 유입되는 생활하수로서 평균적인 수질특성은 Table.1과 같다. 실험에 사용된 막은 친수화 코팅된 폴리에틸렌(PE) 재질의 I-type의 중공사 정밀여과막(Mitsubishi Rayon Co.)으로서, 공칭공경은 0.1 $\mu$ m, 모듈의 단위 막면적은 4.0m<sup>2</sup>이다. 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 스크린을 갖춘 저류조, 교반기가 부착된 혐기성 반응조, 분리막이 침지된 호기성 반응조로 구성되어 있으며, 스크린

과정을 거친 원수는 혐기성 반응조 및 호기성 반응조를 거쳐 분리막에 의해 여과된 후, 처리수로 배출된다. 호기성 반응조에서 고농도로 축적된 슬러지를 포함하는 혼합액은 내부순환율의 변화에 따라 혐기성 반응조에 설치된 수위계의 감지에 의해 자동적으로 호기성 반응조에서 혐기성 반응조로 펌핑·순환된다. 혐기성 반응조에 투입되는 응집제는 9.1%의 용해성 Al과 17%의 용해성 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 포함하는 무기저분자 응집제인 Alum(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> · 18H<sub>2</sub>O)을 사용하였다. 응집제 선정 및 투입량에 대해서는 본 연구에 앞서 실시한 Jar-Test 결과에 따른 것이다. 본 실험에서 내부순환율은 유입수량 대비 0.4Q에서 0.8Q, 1.2Q, 1.6Q, 2.0Q, 3.0Q로 변화시켰고, 내부순환율 변화 실험 이후에 순차적으로 혐기성 반응조내에 응집제를 투입하는 실험을 수행하였는데, Alum의 투입량은 10mg/l에서 5mg/l로 변화를 주었다. 침지형 분리막의 흡입-정지(Suction-Idle) 사이클은 각각 4분으로 고정된 상태에서 운전하였다. 호기성 반응조의 경우, 미생물의 활동에 필요한 산소 공급 및 분리막의 공기세정을 목적으로 연속적인 폭기조건을 유지한 반면, 혐기성 반응조는 별도의 공기공급 없이 교반조작만 실시하였다. 본 실험에서 사용된 원수의 수질특성은 Table.1, 분리막의 특성 및 반응조의 제원은 Table.2에 나타낸 바와 같다.

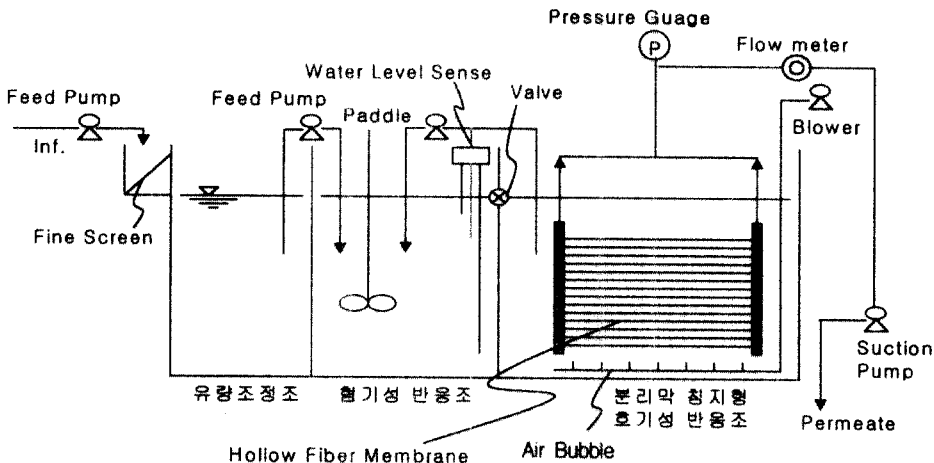


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

Table 1. Water quality of wastewater used in the experiment

구 분	내부순환율 변화실험	응집제 투입실험
BOD <sub>5</sub> (mg/ℓ)	92~111	74~118
COD <sub>cr</sub> (mg/ℓ)	186~253	163~301
T-N(mg/ℓ)	26.4~34.8	24.0~33.8
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(mg/ℓ)	21.6~33.2	20.9~30.9
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N(mg/ℓ)	1.4~3.6	0.1~1.2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(mg/ℓ)	0.4~1.0	0.1~1.2
T-P(mg/ℓ)	2.5~4.4	2.7~3.7
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P(mg/ℓ)	2.1~3.8	2.3~3.1
SS(mg/ℓ)	54~80	38~140
Turbidity(NTU)	28~58	21~55
Color(Degree)	15~24	21~55

Table 2. Specification of the experimental setup

구 분	침지형 막분리 활성슬러지 반응조
분리막 특성	폴리에틸렌 중공사 정밀여과막(친수성) (Polyethylene Hollow Fiber Membrane, Hydrophilic)
분리막 모델	UMF424SLI(Mitsubishi Rayon co., Japan)
모듈당 막면적	4m <sup>2</sup>
호기성 반응조내 투입 모듈수	2module
플럭스/모듈	0.01m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /hr
처리용량	0.01m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /hr × 4.0m <sup>2</sup> /Module × 2Module × 0.25hr/cycle × 4cycle/hr × 24hr/day = 1.92 ≃ 2.0m <sup>3</sup> /d
반응조 용량	호기성 반응조(0.35m <sup>3</sup> ), 혐기성 반응조(0.75m <sup>3</sup> )
체류시간	포기조(4.2hr), 탈질조(9hr), 전체(13.2hr)
분리막 흡입-정지 주기	4분-4분
포기조건	호기성 반응조(연속 포기), 혐기성 반응조(교반)
세목스크린	체(seive) 간격 1.0mm

Table 3. Raw and permeate water quality during the variation test of internal recycle rate

수질항목		유기물계열		질소계열				인계열	
		BOD <sub>5</sub>	COD <sub>cr</sub>	T-N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	T-P	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P
유입수	0.4Q	97.7	208.8	29.4	27.4	1.7	0.5	3.2	2.8
	0.8Q	90.4	196.0	27.9	24.8	2.3	0.4	2.9	2.6
	1.2Q	96.4	229.1	31.3	27.9	1.6	0.6	3.4	2.6
	1.6Q	88.8	209.1	32.1	28.5	2.3	0.4	3.5	2.8
	2Q	91.7	225.5	32.1	31.7	2.4	0.7	3.7	3.0
	3Q	102.2	221.0	32.0	29.2	1.6	0.5	3.0	2.8
협기성 반응조	0.4Q	43.8	84.5	26.0	22.1	1.6	0.6	12.7	11.4
	0.8Q	42.8	72.1	22.6	16.9	1.6	0.6	11.8	10.9
	1.2Q	27.9	62.3	22.8	16.8	1.4	0.8	11.8	11.4
	1.6Q	23.8	49.6	17.1	13.9	1.1	0.5	8.2	7.9
	2Q	26.8	52.8	16.3	13.6	1.3	0.6	6.9	6.7
	3Q	23.7	49.9	12.7	10.2	1.1	0.7	5.2	4.6
투과수	0.4Q	10.2	22.2	23.1	3.3	1.7	16.7	1.9	1.7
	0.8Q	10.8	23.7	17.9	2.1	2.1	11.1	1.4	1.3
	1.2Q	10.3	22.1	16.3	3.7	1.2	9.7	1.0	1.0
	1.6Q	9.1	18.9	14.3	0.4	1.4	11.8	0.4	0.3
	2Q	7.6	16.7	14.9	0.5	1.2	12.7	0.4	0.3
	3Q	6.0	10.3	11.3	0.2	0.9	10.2	0.4	0.4

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구의 주요 착안점은 혐기성 반응조 및 호기성 반응조 사이에 내부순환율 변화가 질화 및 탈질화에 어떤 영향을 미치는지를 파악하는 것과 혐기성 반응조에 응집제를 투입함으로써 혼합액 내 미생물 대사산물, 용해성 인성분의 제거가 가능한가를 판단하는데 있다. 내부순환율 변화실험은 호기성 반응조에서 혐기성 반응조로 유입수량 대비 내부순환수량을 0.4Q, 0.8Q, 1.2Q, 1.6Q, 2.0Q, 3.0Q로 변화하여 탈질화 효율에 대한 상대평가를 수행하였다. 내부순환율 변화실험을 종료하고, 탈질화 효율이 최적이라고 판단되는 3Q의 내부순환율 조건에서 화학적 인제거를 목적으로 혐기성 반응조에 응집제(Alum)를 투입하는 실험을 수행하였는데, 이는 호기성 반응조에서 혐기성 반응조로 내부순환 과정을 거치면서 혐기성 반응조내에서 미생물 체내에 과잉으로 섭취된 인성분이 방출되는 현상이 있기 때문에 호기성 반응조에 응집제를 투입하는 것보다 혐기성 반응조에 응집

제를 투입하는 것이 인의 제어에 효과적이란 판단에 초점을 맞춘 것이다.

#### 3.1 내부순환율 변화실험

내부순환율 변화실험의 원수 및 투과수의 평균수질은 Table.3과 같으며, 유기물계열, 질소계열, 인계열의 제거율 변화양상은 Fig. 2~Fig. 4와 같다.

##### 가) 유기물 계열

내부순환율 변화실험에 있어서 BOD<sub>5</sub> 및 COD<sub>cr</sub>의 유입수 평균농도는 각각 88~102mg/l, 196~226mg/l, 탈질조 유출수의 BOD<sub>5</sub> 및 COD<sub>cr</sub> 평균농도는 각각 24~43mg/l, 50~72mg/l였으며, 투과수의 평균농도는 6~11mg/l, 10~24mg/l의 범위에 있다. 내부순환율이 0.4Q~3Q로 변화되는 과정에서 BOD<sub>5</sub>의 평균 제거율은 90.5%, 88.1%, 89.3%, 89.8%, 91.7%, 94.2%, COD<sub>cr</sub>의 평균 제거율은 89.4%, 87.9%, 90.3%, 91%, 92.6%, 95.3%로 내부순환율이 증가됨에 따라 유기물의 제거효

율도 다소 높아지는 경향을 보여주고 있다.

가추세를 보여주고 있다.

나) 질소 계열

내부순환율이 증가됨에 따라 투과수의 T-N농도 및  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 점진적으로 낮아졌고, 투과수의  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 의 농도는 내부순환율의 변화에 관계없이 거의 일정한 반면, 투과수의  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 호기성 반응조에서 직접 흡입되기 때문에 다소 농도가 높은 상태로 배출되었다. 탈질화 효율이 가장 좋았던 내부순환율은 유입수량 대비 3Q로서 유입수 및 투과수의 T-N농도는 각각 29.4mg/l, 11.3mg/l 를 보여주고 있다. 내부순환율이 0.4Q~3Q로 변화되는 과정에서 T-N의 평균 제거율은 21.4%, 35.8%, 47.9%, 55.5%, 53.8%, 64.7%로서 완만한 증

다) 인 계열

내부순환율 변화실험에 있어서 T-P의 유입수 평균농도는 2.9~3.7mg/l, 혐기성 반응조의 T-P 평균농도는 5.2~12.7mg/l로서, 유입수에 비해 혐기성 반응조의 T-P농도가 상대적으로 높다. 이는 호기성 반응조에서 과잉섭취된 인성분이 혐기성 반응조로 순환되면서 미생물 체내에 축적된 인 이 방출된 결과로 판단된다. 반면, 투과수의 평균 T-P농도는 0.4~1.9mg/l로서, 내부순환율이 증가됨에 따라 T-P농도는 오히려 낮아지는 경향을 보였다. 결과적으로 내부순환율 1.6Q를 전후해서 투과수의 T-P농도가 0.5mg/l 이하가 유지되는 것

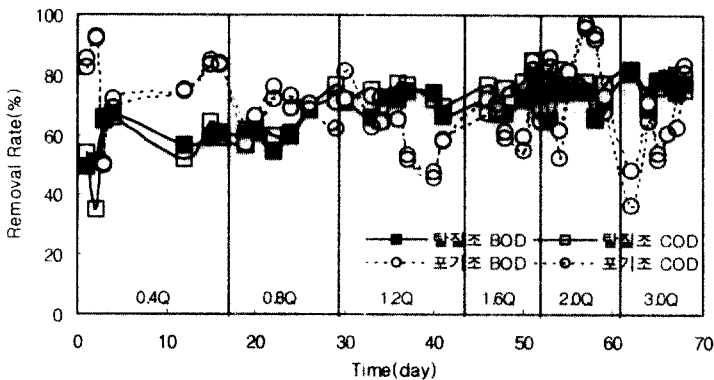


Fig. 2. Removal rate of BOD<sub>5</sub> and COD<sub>cr</sub> in the variation test of internal recycle rate

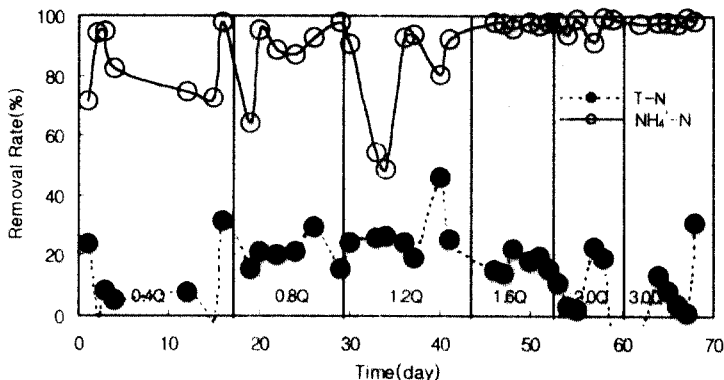


Fig. 3. Removal rate of T-N and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in the variation test of internal recycle rate

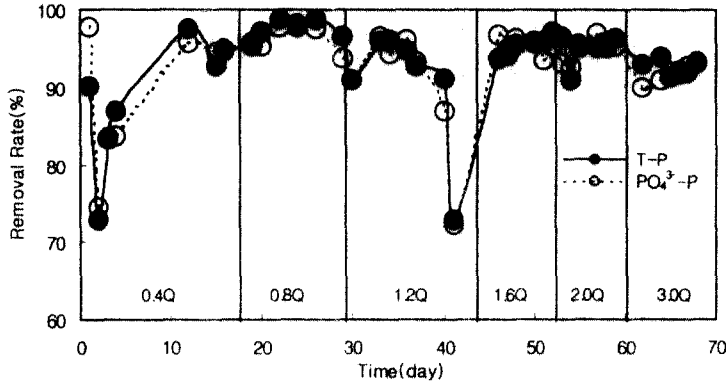


Fig. 4. Removal rate of T-P and  $PO_4^{3-}$ -P in the variation test of internal recycle rate

으로 나타났다. 내부순환율이 0.4Q~3Q로 변화되는 과정에서 T-P의 평균 제거율은 40%, 51.8%, 69.4%, 88.2%, 90.4%, 86.5%로서 내부순환율 1.6Q를 기점으로 T-P의 제거율이 급격히 좋아지는 양상을 보여주고 있다.

3.2 혐기성 반응조내 응집제 투입실험

탈질화 효율 측면에서 최적 내부순환율 조건을 3Q로 설정한 상태에서 혐기성 반응조에 응집제를 투입한 경우, 원수 및 투과수의 평균 수질은 Table.4, 유기물 계열, 질소 계열 및 인 계열의 제거율 변화양상은 Fig. 5~Fig. 7과 같다.

가) 유기물 계열

혐기성 반응조에 응집제를 투입한 결과, 유입수의 BOD<sub>5</sub> 및 COD<sub>cr</sub> 평균 농도는 각각 101~106mg/l, 214~230mg/l, 투과수의 평균 농도는 각각 8~9mg/l, 16~18mg/l의 범위로서, 응집제를 투입하지 않은 경우에 비해 투과수의 BOD<sub>5</sub> 및 COD<sub>cr</sub> 농도가 상대적으로 낮아짐을 알 수 있다.

나) 질소 계열

내부순환율을 3Q로 고정된 상태에서 응집제 투입량을 5mg/l에서 10mg/l로 증가시킨 경우,

Table 4. Raw and permeate water quality during the chemicals dosing test

(단위 : mg/l)

분석항목	Alum농도	유입수		혐기성 반응조		투과수	
		5mg/l	10mg/l	5mg/l	10mg/l	5mg/l	10mg/l
유기물계열	BOD <sub>5</sub>	105.8	100.8	24.1	22.5	7.8	8.7
	COD <sub>cr</sub>	230.2	214.3	48.5	56.0	15.8	17.6
질소계열	T-N	32.8	32.2	13.1	12.7	12.2	12.3
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	29.3	28.0	10.8	9.8	1.4	0.06
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	1.8	2.2	1.2	1.6	1.5	1.3
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.6	0.6	0.7	0.6	9.4	10.7
인계열	T-P	3.5	3.4	1.4	0.4	0.4	0.2
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	3.1	2.9	1.0	0.4	0.4	0.2

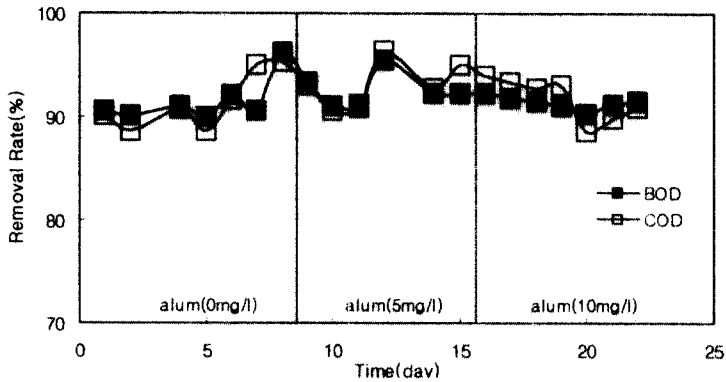


Fig. 5. Removal rate of BOD<sub>5</sub> and COD<sub>cr</sub> in the chemicals dosing test

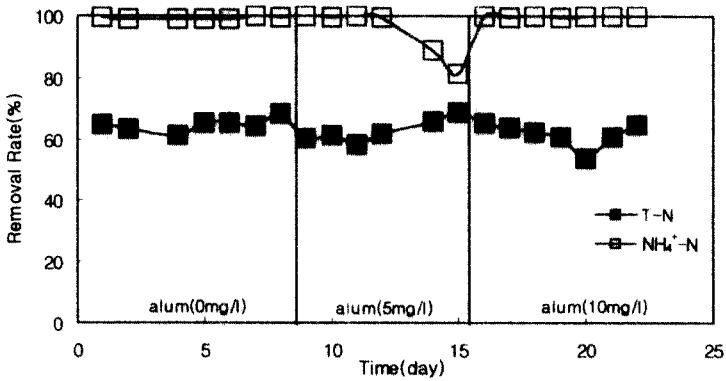


Fig. 6. Removal rate of T-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in the chemicals dosing test

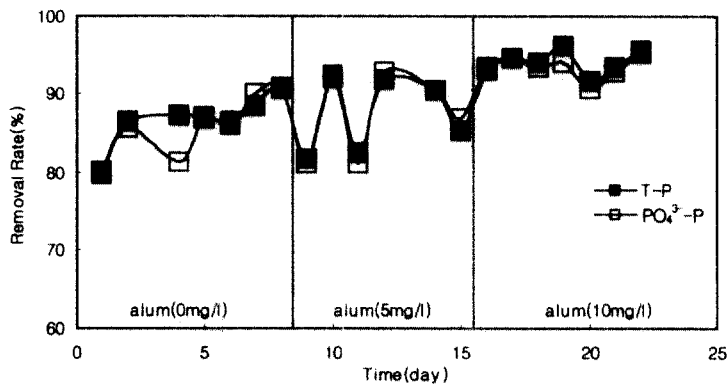


Fig. 7. Removal rate of T-P and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P in the chemicals dosing test

투과수의 T-N농도는 각각 12.2mg/l, 12.3mg/l로서 큰 차이점을 발견할 수 없지만 응집제를 투입하지 않은 경우의 투과수 T-N농도 11.3mg/l와 비교할 때 다소 높은 수치이다.

다) 인 계열

유입수의 T-P농도는 평균 3.5mg/l로 거의 변화가 적었던 반면, 혐기성 반응조의 T-P농도는 응집제 투입량에 따라 다소 차이를 보였다. Alum

투입량 5mg/l 와 10mg/l 에서 혐기성 반응조의 T-P농도는 각각 1.4mg/l, 0.4mg/l 로서 응집제 투입량이 많을수록 T-P농도는 낮았으며, 투과수의 T-P농도도 0.4mg/l, 0.2mg/l 로서 약간의 차이를 보여주고 있다. 유입수 대비 투과수의 T-P농도의 평균 제거율은 약 91% 정도로 나타났다.

3.3 MLSS농도의 변화 양상

내부순환을 변화실험 및 응집제 투입실험을 거치는 동안 혐기성 반응조와 호기성 반응조의 MLSS농도의 변화 양상은 Fig. 8과 같다. 내부순환을 0.4Q에서 혐기성 반응조 및 호기성 반응조내 MLSS농도가 매우 불안정한 상태를 보였으나 내부순환을 0.8Q 이후부터 서서히 안정상태를 유지하였다. 내부순환을 0.8Q 이후의 MLSS농도의 변화를 살펴보면, 호기성 반응조의 MLSS농도는 응집제 투입실험 후반을 제외하고 대체로 일정한 수

준을 유지했던 반면, 혐기성 반응조의 경우, 내부순환율이 증가됨에 따라 MLSS농도도 동반 상승하는 양상을 보였다. 호기성 반응조와 혐기성 반응조의 MLSS농도가 차이를 보이는 것은 혐기성 반응조의 경우 조내 상태를 혐기성 상태로 유지하기 위해서 완속교반을 실시함에 따라 상당 부분의 MLSS가 반응조 하부에 퇴적된 것이 원인으로 판단된다. 전체적으로 호기성 반응조내 MLSS농도는 5kg/m<sup>3</sup> 정도, 혐기성 반응조의 MLSS농도는 3kg/m<sup>3</sup> 정도이며, MLVSS는 각각 3kg/m<sup>3</sup>, 2kg/m<sup>3</sup> 정도가 유지된 것으로 나타났다.

3.4 투과플럭스의 변화 양상

내부순환을 변화실험 및 응집제 투입실험에서 투과플럭스 및 투과압력의 변화 양상을 나타내면 Fig. 9~Fig. 10과 같다. 내부순환을 1.6Q를 전후해서 투과플럭스가 약간 떨어지는 양상을 보였으나

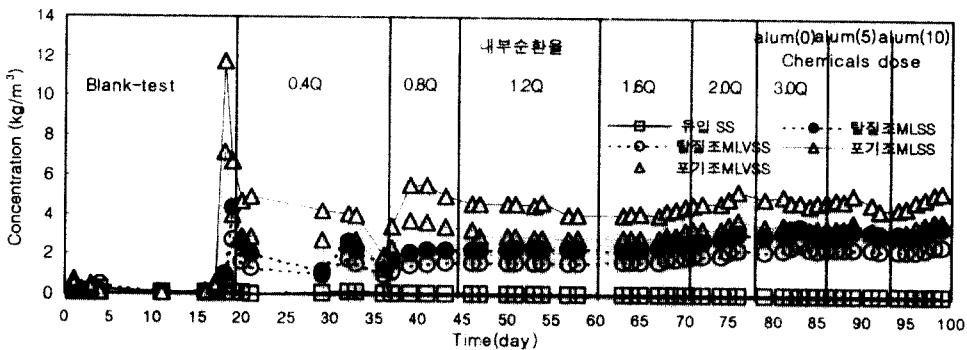


Fig. 8. Daily variation of MLSS and MLVSS concentration

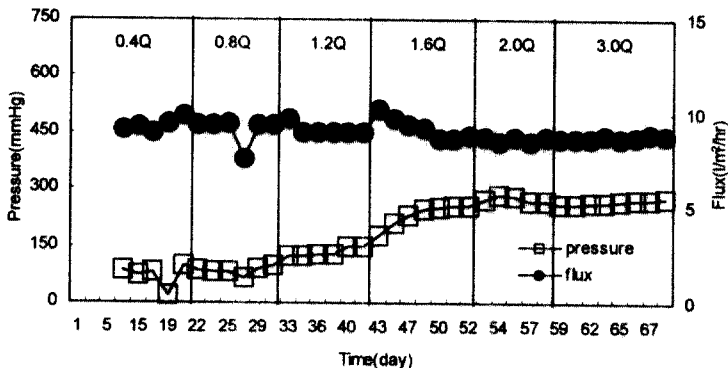


Fig. 9. Daily variation of permeate flux and pressure in the variation test of internal recycle rate



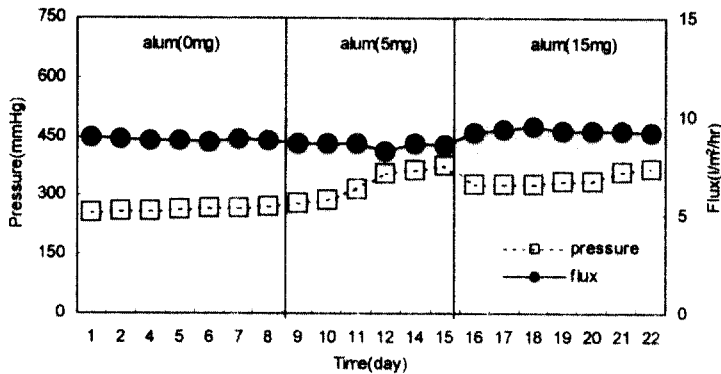


Fig. 10. Daily variation of permeate flux and pressure in the chemicals dosing test

대체로 실험종료 시점까지  $10 \text{ l/m}^2/\text{hr}$ 의 안정된 투과플럭스를 유지하는 것으로 나타났다. 한편, 투과압력은 내부순환율 1.2Q까지 70mmHg에서 150mmHg로 완만한 증가추세를 보이다가 내부순환율 1.6Q 이후부터 급격히 상승되어 300mmHg에 육박하였고, 이 값은 내부순환율 실험이 완료될 때까지 지속되었다. 한편, 내부순환율 3Q에서 Alum을 투입한 경우, 투과플럭스에 미세한 차이를 발견할 수 있다. 즉, Alum 투입 이전에는 투과플럭스가  $10 \text{ l/m}^2/\text{hr}$ 보다 다소 낮은 상태가 유지된 반면, Alum 투입 이후에는 투과플럭스가  $10 \text{ l/m}^2/\text{hr}$ 를 약간 상회하는 상태를 보여주고 있다. 한편, 응집제 투입초기의 투과압력은 300mmHg였으나 응집제 투입기간이 늘어나면서 투과압력은 점진적으로 높아지는 추세를 보였다.

#### 4. 결 론

실제 생활하수를 대상으로 침지형 막분리 활성슬러지법을 2단(혐기성 반응조-호기성 반응조)으로 운영하는 경우와 혐기성 반응조에 응집제를 투입하는 경우 각각에 있어서 질소, 인의 거동 및 분리막의 투과플럭스와 투과압력의 변화양상을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 2단형 침지형 막분리 활성슬러지법에서 유입수량 대비 3Q의 내부순환율을 운전조건에서 최대 65%의 탈질화 효율을 얻을 수 있었다.

2) 내부순환율을 운전조건을 3Q로 고정한 상태에

서 혐기성 반응조에 응집제로 alum을 투입한 경우, 투과수의 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, T-P농도는 응집제를 투입하지 않은 경우에 비해 낮아진 반면, 투과수의 T-N농도는 상대적으로 높아지는 경향을 보여주고 있다. 따라서 응집제를 첨가하는 경우, 인 제거 측면에서는 효과적이거나 탈질화 측면에서는 마이너스 인자로 작용하기 때문에 처리수의 요구수질조건에 맞게 내부순환율 운전조건 및 응집제 투입량의 설정이 요구된다.

3) 혐기성 반응조에 응집제를 투입하는 경우, 투과플럭스는  $10 \text{ l/m}^2/\text{hr}$  이상의 안정된 상태를 유지하나, 투과압력은 응집제를 투입하지 않은 경우에 비해 상대적으로 높아지는 경향을 보여주고 있다.

#### 참고문헌

1. Joao G. Crespo and Karl W. Boddeker, *Membrane Processes in Separation and Purification*, Kluwer Academic Publishers (1993).
2. Bernard J. Dutka, *Membrane Filtration-Application, Techniques, and Problems*, Marcel Dekker Co., (1981).
3. O. O. Hart and C. A. Buckley, *Membrane Technology in Wastewater Management*, Pergamon Press, (1992).
4. Marcel Mulder, *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers,

- (1991).
5. Yasutoshi Shimizu et al, Filtration Characteristics of Hollow Fiber Microfiltration Membranes used in Membrane Bioreactor for Domestic Wastewater Treatment, *J. Wat. Res.*, Vol. 30, No. 10, 2385-2392 (1996).
  6. T. Ueda et al, Treatment of Domestic Sewage from Rural Settlements by a Membrane Bioreactor, *J. Wat. Sci. Tech.*, Vol. 34, 189-196 (1996).
  7. H. Nagaoka et al, Influence of Bacterial Extracellular Polymers on the Membrane Separation Activated Sludge Process, *J. Wat. Sci. Tech.*, Vol. 34, No. 9, 165-172 (1996).
  8. J. Dittrich et al, Microfiltration of Municipal Wastewater for Disinfection and Advanced Phosphorus Removal, *J. Wat. Sci. Tech.*, Vol. 34, No. 9, 125-131 (1996).
  9. Keith Brindle and Tom Stephenson, Application of Membrane Biological Reactor for Treatment of Wastewater, *J. Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 49, 601-610 (1996).
  10. 化學工學會·膜分離技術 Working Group, ユーザのための實用膜分離技術, 日刊工業新聞社, 1996.
  11. 新井一仁 外, 直接浸漬型 膜分離 活性汚泥法におけるモジュール形態および サイクルの平價”, *水環境學會誌*, 第18卷 第4號, 324-331 (1995).
  12. Yasuhiro Imamura et al, セオライト粉末と分離膜を組み合わせたシステム によるアモニア性窒素除去”, *水環境學會誌*, 第19卷 第6號, 473-479 (1996).