

2단계 막분리 활성슬러지법(Two Stage MBR)의 운전 특성에 관한 고찰

Operating Characteristics of 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

Two-stage membrane bioreactor using submerged hollow fiber membrane was applied in laboratory scale to treat nitrogen and phosphorus of domestic wastewater. Alum as the flocculant and adsorbent was added into the anaerobic basin of two-stage membrane bioreactor and mixed liquid of aerobic basin was recycled to the anaerobic basin for the purpose of nitrogen removal. Experiment was carried out to find removal efficient of phosphorous and nitrogen components in the mixed liquid, and the stability of the permeate flux and pressure of two-stage membrane bioreactor. In case of alum was added as the flocculant and adsorbent into the anaerobic basin, soluble phosphorus removal efficient was relatively higher and total permeate resistance(R_{tot}) was more increased but nitrogen removal efficient was lower as the result of lack of alkalinity and insufficient nitrification process than the case of alum was not added.

Keywords : two-stage membrane bioreactor, nitrogen and phosphorus removal, alum, internal recycle rate, hollow fiber membrane

1. 서 론

막분리 활성슬러지법에서 대두되고 있는 두가지 문제점은 우선, 반응조내 장기체류로 인해 미생물의 활성도가 떨어진다는 점, 다음으로 반응조내에 미생물 대사산물에서 유래되는 불활성 물질이 분리·축적되어 미생물에게 저해 또는 독성물질로 작용하거나 분리막 표면의 biofouling을 유

발함으로써 플럭스의 저하 및 투과압력의 상승과 같은 악영향을 초래하며, 과잉으로 발생하는 슬러지의 처리 및 처분문제가 운전의 제한요인으로 작용한다는 점이다^{2),3),4)}. 따라서 막분리 활성슬러지법의 장기운전시 미생물의 활성도를 적정하게 유지하고, 지속적이고 효과적인 플럭스 및 투과압력을 유지하는 운전방법의 확립이 필요하다. 또한 MF막을 주체로 하는 침지형 막분리 활성슬

러지법을 고도처리공법으로 확대 적용하기 위해서는 내부 순환조작 및 응집제 투여 등과 같은 운전조작의 개선이 필요하다¹⁾. 따라서 본 연구에서는 내부순환 조작을 통해 질산화 및 탈질화 과정을 유도함과 동시에 탈질조내에 응집제를 투입하여 반응조내 미생물 대사산물에서 유래되는 불활성 물질을 분리·축적하고, 용존성 인성분을 불용성 고형물로 유도하여 미생물 대사산물과 인을 효과적으로 제어하여 투과플럭스 및 투과압력의 안정화를 도모하기 위해서 2단형 막분리 활성슬러지법에 대한 기초실험을 수행하였고, 이를 토대로 본 시스템의 제반 운전특성에 대해서 기술하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

본 실험에 사용된 원수는 1하수종말처리장에 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 μ m, 모듈의 단위 막면적은 4.0m²이다. 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 스크린을 갖춘 저류조, 교반기가 부착된 혐기성 반응조, 분리막이 침지된 호기성 반응조로 구성되어 있으며, 스크린과정을 거친 원수는 혐기성 반응조 및 호기성 반응조를 거쳐 분리막에 의해 여과된 후, 처리수로 배출된다. 호기성 반응조에서 고농도로 축적된 슬

러지를 포함하는 혼합액은 내부순환율의 변화에 따라 혐기성 반응조에 설치된 수위계의 감지에 의해서 자동적으로 호기성 반응조에서 혐기성 반응조로 펌핑·순환된다. 본 실험에서 내부순환율은 유입수량 대비 0.4Q에서 0.8Q, 1.2Q, 1.6Q, 2.0Q, 3.0Q로 변화시켰고, 혐기성 반응조에 투입되는 응집제는 Alum(Al₂(SO₄)₃·18H₂O)을 사용하였고, 투입량은 5mg/l에서 10mg/l로 변화를 주었다. 침지형 분리막의 흡입-정지(Suction-Idle) 사이클은 각각 4분으로 고정된 상태에서 운전하였다. 호기성 반응조의 경우, 미생물의 활동에 필요한 산소공급 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 나타난 바와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 호기성 반응조에서 혐기성 반응조로 유입수량 대비 내부순환수량을 0.4Q, 0.8Q, 1.2Q, 1.6Q, 2.0Q, 3.0Q로 변화를 내부순환율 변화 실험과 3Q의 내부순환율을 고정시킨 조건에서 화학적 인제거를 목적으로 혐기성 반응조에 응집제(Alum)를 5mg/l에서 10mg/l로 투입하는 응집제 투입실험이 수행되었다. 내부순환율 변화실험의

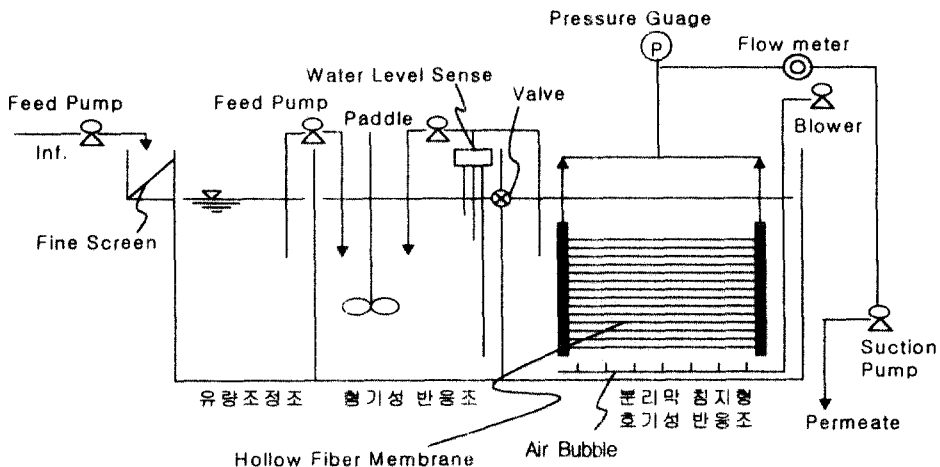


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

Table1. Water quality of wastewater used in the experiment

구 분	내부순환을 변화실험	응집제 투입실험
BOD ₅ (mg/ ℓ)	92 ~ 111	74 ~ 118
COD _{cr} (mg/ ℓ)	186 ~ 253	163 ~ 301
T-N(mg/ ℓ)	26.4 ~ 34.8	24.0 ~ 33.8
NH ₄ ⁺ -N(mg/ ℓ)	21.6 ~ 33.2	20.9 ~ 30.9
NO ₂ ⁻ -N(mg/ ℓ)	1.4 ~ 3.6	0.1 ~ 1.2
NO ₃ ⁻ -N(mg/ ℓ)	0.4 ~ 1.0	0.1 ~ 1.2
T-P(mg/ ℓ)	2.5 ~ 4.4	2.7 ~ 3.7
PO ₄ ³⁻ -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	4 m ²
호기성 반응조내 투입 모듈수	2module
플럭스/모듈	0.01 m ³ /m ² /hr
처리용량	0.01 m ³ /m ² /hr × 4.0m ² /Module × 2Module × 0.25 hr/cycle × 4cycle/hr × 24hr/day = 1.92 ≒ 2.0m ³ /d
반응조 용량	호기성 반응조(0.35m ³), 혐기성 반응조(0.75m ³)
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

원수 및 투과수의 평균 수질은 table.3과 같으며, 응집제 투입실험의 원수 및 투과수의 평균 수질은 table.4와 같다.

3.1 혼합액과 투과수의 CODcr농도차

미생물 대사산물은 대체로 혼합액내에서 고분자물질로 존재하며, 이들은 점성을 가지고 있기 때문에 분리막의 여과저항을 높이는 기능을 한다.

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

수질항목		유기물계열		질소계열				인계열	
		BOD ₅	COD _{cr}	T-N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	T-P	PO ₄ ³⁻ -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
협기성반응조	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

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

분석항목		유입수		협기성 반응조		투과수	
		5mg/ℓ	10mg/ℓ	5mg/ℓ	10mg/ℓ	5mg/ℓ	10mg/ℓ
유기물계열	Alum농도						
	BOD ₅	105.8	100.8	24.1	22.5	7.8	8.7
	COD _{cr}	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 ₄ ⁺ -N	29.3	28.0	10.8	9.8	1.4	0.06
	NO ₂ ⁻ -N	1.8	2.2	1.2	1.6	1.5	1.3
	NO ₃ ⁻ -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 ₄ ³⁻ -P	3.1	2.9	1.0	0.4	0.4	0.2

또한 슬러지 폐쇄계 시스템인 본 공정의 경우, 반응조내에 미생물이 장기적으로 체류하기 때문에 세포분해에 의한 색도물질이 용출되어 투과수의 색도가 높아지는 문제를 안고 있다. 이러한 미생물 대사산물 또는 색도 유발물질은 분리막의 여과저항 및 효율평가에 중요한 변수로 작용한다. Fig. 2와 Fig. 3은 내부순환율 변화실험과 응집제 투입실험에서 혼합액과 투과수의 COD_{cr}농도차를 비교한 것이다. 단, 두가지 실험에서 차이점은 내부순환율은 3Q로 동일하지만 응집제 투입여부가 다르다는 점이다. 응집제를 투입하지 않은 경우, 혼합액과 투과수 COD_{cr}농도의 경일변화를 살펴보면, 대체로 시간이 경과되면서 혼합액과 투과수 COD_{cr}농도가 점진적으로 낮아짐과 동시에 상대적인 농도차 역시 줄어드는 반면, 절대적인 농도차

는 응집제를 투입한 경우에 비해 월등히 높다는 것을 알 수 있다. 투과수의 COD_{cr}농도는 10~20mg/l인 반면, 혼합액내 COD_{cr}농도는 40~60mg/l로서 농도차가 크다.

한편, 응집제를 투입한 경우를 보면, 시간이 경과됨에 따라 혼합액과 투과수의 COD_{cr}농도가 약간 상승되는 경향을 보이지만 절대적인 농도차는 내부순환율의 경우에 비해서 월등히 낮다는 것을 알 수 있다. 투과수의 COD_{cr}농도는 10~20mg/l로 다소 변동이 있지만 혼합액내 COD_{cr}농도는 대체로 30mg/l 수준이 유지되고 있다. 이러한 결과를 놓고 볼 때, 응집제를 투입한 경우에 비해 응집제를 투입하지 않은 경우의 혼합액내 COD_{cr}농도가 상대적으로 높으며, 이는 여과저항이 상대적으로 커지며, 투과수의 색도 역시 높게 나타날 수

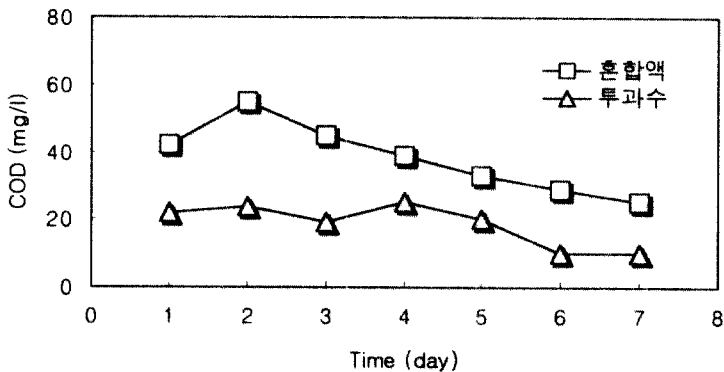


Fig. 2. COD_{cr} concentration of mixed liquid and permeate in the variation test of internal recycle rate

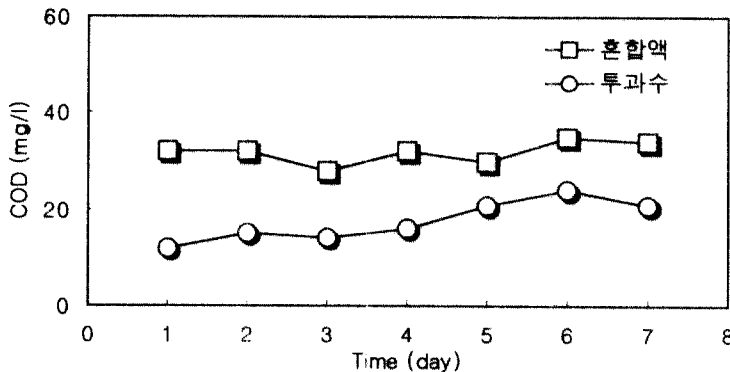


Fig. 3. COD_{cr} concentration of mixed liquid and permeate in the chemical dosing test

있음을 의미한다.

결과적으로 응집제의 투입은 혼합액내 COD_{cr} 성분, 다시 말해서 미생물 대사산물 또는 색도 유발 물질과 반응해서 불용성 고형물로 전환되며, 이것이 투과수의 COD_{cr} 농도를 낮게 유지시킬 뿐만 아니라 플럭스 안정화, 투과압력 및 투과수의 색도 저감에 기여한다고 평가할 수 있다. 상기 결과는 Yamamoto 등의 결과^{2),3),4)}와 상당한 유사점을 갖는다. 즉, 혼합액과 투과수의 COD_{cr} 농도차는 수백 mg/l 이상의 극단적인 차이는 보이지 않았으며, 혼합액과 투과수의 COD_{cr} 농도 사이에는 일정한 상관관계는 확인되지 않았다.

3.2 유기물 용적부하와 COD_{cr} 및 T-N 제거율의 관계

Fig. 4는 내부순환율 변화실험과 응집제 투입실험에서 유기물 용적부하와 COD_{cr} 및 T-N 제거율의 관계를 나타낸 것이다. 본 실험에서 COD_{cr} 용적부하 범위는 0.41~0.57kg-COD_{cr}/m³/d 정도이며, 내부순환율 변화실험 및 응집제 투입실험의 COD_{cr} 제거율은 90% 정도로 비슷하다. 한편, 응집제 투입실험에서는 COD_{cr} 용적부하가 커져도 T-N 제거율은 60~65%에서 큰 변화가 없었던 반면, 내부순환율 변화실험의 경우, COD_{cr} 용적부하가 커짐에 따라 T-N 제거율은 40~60%로 상승하는 양상을 보여주고 있다. 따라서 0.4kg-COD_{cr}/m³/d 이상의 유기물 용적부하 조건에서 COD_{cr}의 제거율은 90% 이상이 유지될 수 있

으며, 내부순환율 3Q 및 응집제 투입조건에서 유기물 용적부하의 대소에 관계없이 60% 정도의 T-N 제거가 가능한 것을 알 수 있다. 단, 응집제를 투입하지 않은 경우는 유기물 용적부하에 따라서 T-N 제거율의 변동폭이 크다는 것을 알 수 있다.

3.3 F/M비 변화와 BOD₅ 및 COD_{cr} 제거율의 관계

Fig. 5는 혐기성 반응조에서 응집제 주입여부에 따른 F/M비 변화와 BOD₅ 및 COD_{cr}의 제거율의 관계, Fig. 6은 호기성 반응조에서 응집제 주입여부에 따른 F/M비 변화와 BOD₅ 및 COD_{cr}의 제거율의 관계를 나타낸 것이다. 혐기성 반응조에서 F/M비는 0.09~0.11kg-BOD₅/kg-MLVSS/d로서 혐기성 반응조내 탈질균의 증식속도가 호기성 산화균에 비해 상대적으로 떨어짐에 기인한다. 혐기성 반응조에서 내부순환율 변화실험 및 응집제 투입실험시 F/M비 증감에 따른 BOD₅ 및 COD_{cr} 제거율은 큰 변화없이 80% 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 한편, 호기성 반응조에서 F/M비는 0.06~0.08로서 혐기성 반응조보다 낮은데, 이는 폭기조내 MLVSS농도가 혐기성 반응조에 비해 상대적으로 높기 때문이다. 호기성 반응조의 경우, 응집제 투입실험시 F/M비 증감에 따라서 BOD₅ 및 COD_{cr} 제거율은 일정한 값을 유지하는데 반해 내부순환율 변화실험에서는 F/M비가 증가됨에 따라 BOD₅ 및 COD_{cr}의 제거율도 약간 높아지는 추세를 보여주고 있다.

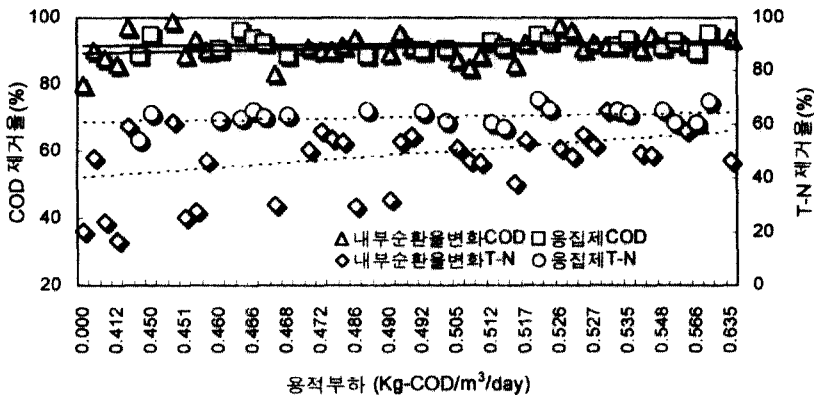


Fig. 4. Relationship of organic loading rate and removal rate of COD_{cr} and T-N

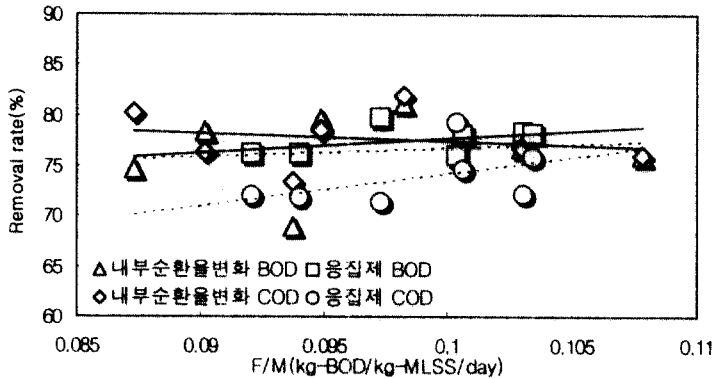


Fig. 5. BOD₅ and COD_{Cr} removal efficient according to variation of F/M ratio in the anaerobic basin

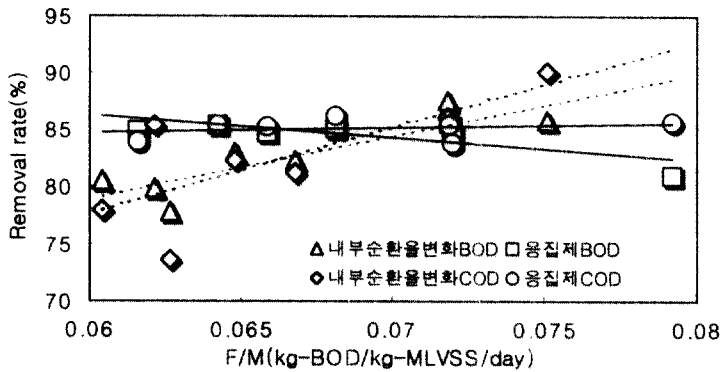


Fig. 6. BOD₅ and COD_{Cr} removal efficient according to variation of F/M ratio in the aerobic basin

3.4 C/N비와 탈질율의 관계

Fig. 7은 내부순환율 변화실험 및 응집제 투입 실험에서 C/N비 변화와 탈질율의 관계를 나타낸 것이다. 실험기간 동안 C/N비는 2.8~3.6 사이에서 변화가 있었고, 내부순환율 변화실험 단계의 T-N 제거율은 시간경과에 따라 상승되는 추이를 보인 반면, 응집제 투입실험에서는 시간경과에 따라 점진적으로 떨어지는 추이를 보여주고 있다. 응집제 투입실험에서 T-N 제거율이 내부순환율 변화실험에 비해 상대적으로 떨어지는 추이를 보인 것은 C/N비의 영향이라기 보다는 응집제 투입에 따른 알칼리도 부족 및 질산화 미생물에 미치는 영향으로 인해 탈질의 전단계에서 필수적으로 이루어져야 하는 질산화 기능이 다소 떨어진다

원인이 있다고 판단된다.

3.5 혼합액의 COD_{Cr}농도와 투과플럭스 및 투과압력의 관계

Fig. 8은 내부순환율 변화실험과 응집제 투입 실험에 있어서 혼합액의 COD_{Cr}농도와 투과플럭스의 관계를 나타낸 것이다. 내부순환율 변화실험시 혼합액의 COD_{Cr}농도가 증가해도 투과플럭스에 미치는 영향을 별로 없었으나, 응집제 투입실험시 혼합액의 COD_{Cr}농도가 증가함에 따라 투과플럭스가 점진적으로 감소되는 경향을 보인다. 이는 혼합액 내 MLSS의 증가에 따른 영향 보다는 응집제의 누적에 따른 점성의 증가가 큰 요인으로 판단된다. 이러한 결과에서 응집제의 투입은 인제거란 측면

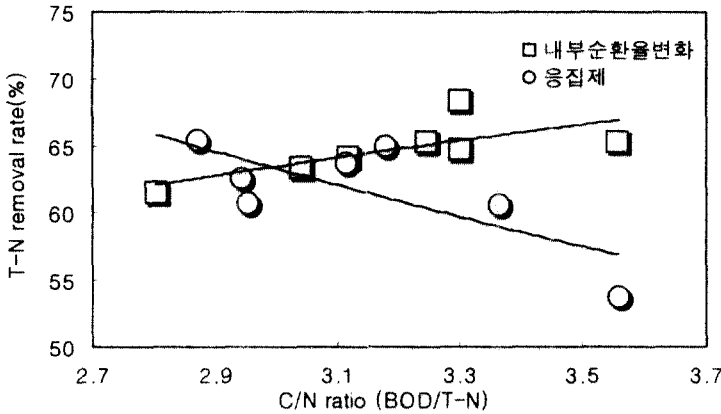


Fig. 7. Relationship of C/N ratio and T-N removal efficient

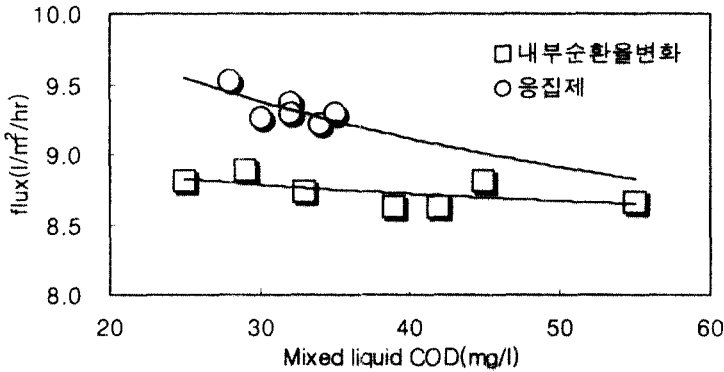


Fig. 8. Relationship of COD_{cr} concentration of mixed liquid and permeate flux

에서 도움이 되지만 투과플럭스의 유지측면에서는 마이너스 영향인자가 될 수 있음을 보여준다.

3.6 전여과저항과 투과압력의 관계

Fig. 9는 내부순환율 변화실험 및 응집제 투입 실험에 있어서 시간경과에 따른 전여과저항의 변화를 나타낸 것으로, 대체로 시간이 경과되면서 전여과저항(R_{tot})은 증가하는 것으로 나타났다. 내부순환율 변화실험에 비해 응집제 투입실험시 전여과저항의 증가폭이 큰 것은 응집제의 축적에 의해 혼합액의 점성이 상대적으로 커진데 원인이 있다고 판단된다. Fig. 10은 전여과저항(R_{tot})과 투과압력의 관계를 나타낸 것이다. 대체로 전여과저항(R_{tot})과 투과압력 사이에는 깊은 상관관계가 인정

된다. 즉, 전여과저항(R_{tot})이 증가함에 따라 투과압력도 그에 비례해서 높아짐을 알 수 있으며, 내부순환율 및 응집제 투입실험시 전여과저항과 투과압력의 상승폭은 거의 일정한 것으로 나타났다.

3.7 Color농도와 전여과저항의 관계

Fig. 11은 Color농도와 전여과저항(R_{tot})의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 Color농도가 높아짐에 따라 전여과저항(R_{tot})도 높아지는 것을 알 수 있다. 즉, Color의 유발물질은 미생물 대사 산물로 생각되며, 이것이 전여과저항을 증가시키는 요인으로 판단된다. 단, 내부순환율 변화실험에서는 전여과저항의 상승폭이 응집제 투입실험에 비해 상대적으로 높다는 것이 큰 차이점이다.

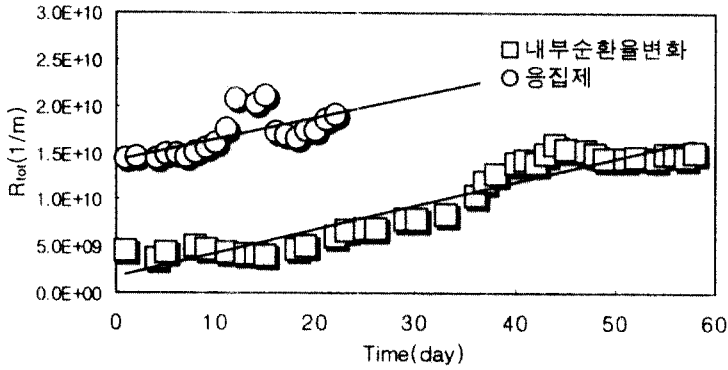


Fig. 9. Variation of R_{tot} during the experimental period

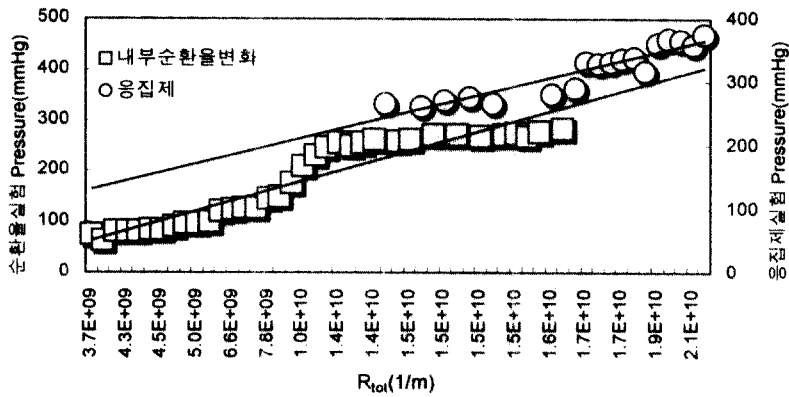


Fig. 10. Relationship of permeate pressure and R_{tot}

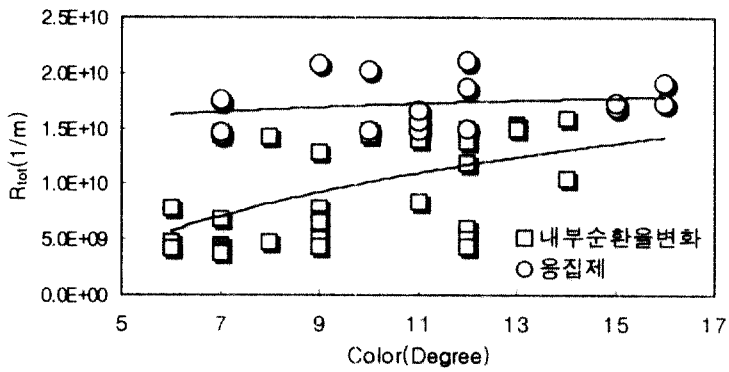


Fig. 11. Relationship of color concentration of permeate and R_{tot}

5. 결 론

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

(1) 2단형 막분리 활성슬러지법에서 응집제의 투입은 유기물, 미생물 대사산물 혹은 색도 유발물질 및 용해성 인성분과 반응하여 불용성 고형물로 전환되어 효과적인 인 제거 뿐만 아니라 투과압력의 안정화 및 투과수의 색도 저감에 플럭스 요인으로 작용함을 알 수 있었다.

(2) 내부순환을 변화실험에서는 F/M비가 증가됨에 따라 BOD₅ 제거율이 높아지는 반면, 응집제 투입실험에서는 F/M비의 증가가 BOD₅, COD_{Cr}의 제거율에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

(3) C/N비 2.8~3.6의 운전조건에서 C/N비의 증감이 T-N 제거율에 미치는 영향은 크지 않았다. 단, 응집제 투입실험에서 T-N 제거율이 다소 떨어진 것은 C/N비의 영향이라기 보다는 응집제 투입에 따른 알칼리도 부족 및 질산화 미생물에 미치는 영향으로 인해 탈질 전 단계에서 필수적으로 이루어져야 하는 질산화 기능이 다소 떨어진 데 원인이 있다고 판단된다.

(4) 전여과저항과 투과압력 사이에는 깊은 상관관계가 있으며, Color농도가 높아짐에 따라 전여과저항(R_{tot})도 높아지는 것을 알 수 있다. 즉, Color 유발물질은 전여과저항을 증가시키는 중요한 영향인자로 판단된다.

참고문헌

1. 박재로 외 3인, *그린타운 개발사업(II)*, 한국건설기술연구원 기본연구보고서 (1997).
2. Kazuo Yamamoto et al, Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank, *wat. sci. tech.*, Vol.21, 43-54 (1989).
3. Yasutoshi Shimizu et al, Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment, *wat. sci. tech.*, Vol. 30, No.10, 2385-2392 (1996).
4. T. Ueda et al, Treatment of domestic sewage from rural settlements by a membrane bioreactor, *wat. sci. tech.*, Vol.34, 189-196 (1996).
5. Bernard J. Dutka, *Membrane filtration-application, techniques and problems*, Marcel Dekker Co., (1981).
6. Marcel Mulder, *Basic principles of membrane technology*, Kluwer Academic Publishers, (1991).
7. H. Nagaoka et al, Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 34, No. 9, 165-172 (1996).
8. 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).