

하수처리를 위한 막결합형 A₂O공정에서 최적 내부 순환율 및 MLSS 농도에 관한 연구

김 관 엽[†] · 김 진 모 · 김 형 수 · 이 상 백* · 박 유 진** · 배 성 수***

성균관대학교 토목환경공학과, *제주대학교 청정화학공학과, **로드아일랜드 주립대학교 화학공학과, ***SK케미칼 맑은물연구소
(2005년 5월 3일 접수, 2005년 6월 8일 채택)

A Study on the Optical Internal Recycle Rate and MLSS Concentration of Membrane Coupled A₂O Process for Wastewater Treatment

Kwan-Yeop Kim[†], Jin-Mo Kim, Hyung-Soo Kim, Sang-Bek Lee*, Eugene Park**, and Sung-Soo Bae***

Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University

*Department of Chemical Engineering and Clean Technology Che-Ju National University

**Department of Chemical Engineering, University of Rhode Island

***SK Chemicals Water Environment R&D Center

(Received May 3, 2005, Accepted June 8, 2005)

요 약: 본 연구의 목적은 도시 하수처리를 위한 막결합형 A₂O공정에 대해 실제적인 정보를 얻고자 하는 것이다. 공경 0.25 μm의 평판형 정밀여과막을 공기가 주입되는 호기조에 침지시켜 처리수는 저압으로 여과된다. 인공폐수를 대상으로 최적의 처리수질과 장기운전의 안정성 확보를 위한 내부반송율과 MLSS 농도 등의 최적 운전인자를 산정하고자 하였다. 내부반송은 각각 호기조에서 무산조로 반송한 것을 type 1, 무산조에서 혐기조로 반송한 것을 type 2라고 규정하였다. 플럭스는 15 LMH, type 1을 2Q로 고정하고 실험하였을 때 최적의 운전 조건은 MLSS 농도는 11,000 mg/L, type 2가 1Q로 나타났다. 이때, BOD COD_{cr}, T-N, T-P의 제거율이 각각 97.3%, 94.2%, 64.0%, 63.0%로 타 내부반송율보다 효과적이었다.

Abstract: The purpose of this study is to obtain practical information about membrane coupled A₂O system for municipal wastewater treatment. A flat-plate microfiltration (MF) module with a pore size 0.25 μm was submerged into the aeration basin and treated water was filtrated through the membrane by continuous suction with low pressure. The system was operated with synthetic wastewater to find operational parameters of internal recycle ratio and maximum MLSS showing best water quality and long-term stability. The internal recycle was defined as type 1 for aerobic to anoxic tank and type 2 for anoxic to anaerobic tank, respectively. When the flux was maintained at 0.015 m³/m²/hr (15 LMH) with 2Q type 1 internal recycle ratio, the optimal operational setting were 1Q internal recycle ratio for type 2 and maximum MLSS of 11,000 mg/L among tested conditions. At this condition, removal efficiencies of BOD, COD_{cr}, T-N and T-P showed 97.3%, 94.2%, 64.0%, 63.0%, respectively.

Keywords: wastewater treatment, A₂O process, MBR, microfiltration

1. 서 론

최근의 생활수준의 향상과 경제발전에 의한 공업화 등으로 인해 생활하수, 산업폐수 등이 급속히 증가하고, 이들의 부적절한 처리로 인하여 부영양화가 발생하는 등 국내 주요 상수원인 호소 및 하천, 해양 등이

심각하게 오염되고 있다. 이로 인하여 물이용 면에서 여러 가지 장애 즉, 수돗물 수질 파동, 정수 생산단가 상승 및 정수장의 운전관리 어려움, 그리고 관광자원으로서의 가치 하락 등 물 사용면뿐만 아니라 이에 따른 경제적 손실 등도 문제화되고 있어 처리시설의 미처리 및 부적절한 처리로 인한 부영양화의 제어대책 등이 시급한 실정이다[1].

[†]주저자(e-mail : yeops@hanmail.net)

정부에서는 1989년 1월에 상수원보전을 위해 호소의 수질관리를 목적으로 부영양화의 원인 물질인 총질소·총인의 항목이 추가된 호소수질환경기준을 제정하여 1999년까지 달성할 수질환경 기준목표치를 총질소(T-N) 0.3 mg/L, 총인(T-P) 0.02 mg/L로 설정하였으며, 2002년부터 총질소·총인의 규제를 시작하여 2003년 1월부터는 산업폐수의 경우에도 총질소·총인의 규제를 시행하기에 이르렀다.

또한, 2004년 강화된 국내의 방류수 수질환경기준 총질소 20 ppm, 총인 2 ppm[2]은 미국, 일본, 북유럽 등의 선진국에서의 총질소 15 ppm 이하, 총인 0.2~1 ppm[3-5]과 비교해 볼 때 특히, 총인 농도에서 큰 차이를 보이고 있어 아직까지 국내의 경우 “인처리”에 대한 강력한 규제를 하고 있지 못한 현실이다.

MBR (membrane bioreactor) 공정은 호기조 내 높은 MLSS 농도의 유지 가능, 처리시간 단축, 잉여슬러지 발생량 저감, 질산화/탈질화 용이, 부하변동 대처 유리 등의 많은 장점을 가지고 있지만, 기본적인 인 제거 메커니즘이 미생물의 인 과잉섭취(luxury uptake)를 유도한 후 잉여슬러지를 인발하는 방식이기 때문에 인 제거 측면에서는 MBR 공정이 효과적이지 못하다고 인식되어왔고, 국내에 적용되고 있는 MBR 공정의 대부분도 유기물 제거와 질소 제거에 초점이 맞추어져 있다.

본 연구는 현재 및 향후 국내·외를 통하여 잠재적 시장성이 클 것으로 예상되는 저농도의 하수를 대상으로 기존에 건설된 하수처리장의 개량 및 신설 하수처리장에 대응할 수 있고, 장래의 처리수질 기준을 충분히 만족할 수 있는 질소·인 동시 제거를 위한 MBR 공정의 최적 운전인자 산정을 목표로, 기존의 하수처리장에서 가장 많이 적용되고 있는 생물학적 처리 공정인 A₂O공정(혐기/무산소/호기)의 호기조에 흡인여과방식의 침지형 평막을 설치·결합한 “막결합형 A₂O공정(MCA₂O, membrane coupled anaerobic/anoxic/oxic)”을 이용하여 하수처리에 관한 실험을 수행함으로써 “막결합형 A₂O공정”에서의 최적 질소·인 제거효율, 장기운전과 막오염(fouling) 제어가 가능한 내부반송율과 MLSS 산정 등의 최적 운전인자를 도출하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 대상원수와 분리막

실험에 사용한 대상원수는 제조한 인공의 합성폐수로 KNO₃ (질산칼륨), KH₂PO₄ (인산이수소칼륨), 우유 등을 혼합하여 사용하였으며, 미생물의 생장에 필요한 미량 미생물을 제공하기 위해 S지역에 위치하고 있는 하수종말처리장 내의 하수를 인공 합성폐수 제조 시에 투입하였다. 실험에 사용된 인공 합성폐수 원료와 성상은 Table 1~Table 2와 같으며 그 성상은 처리되지 않은 도시하수의 구성성분을 바탕으로 제조되었다. 보통 처리되지 않은 도시하수는 BOD, COD, TN, TP가 저농도의 경우에 각각 110, 250, 20, 4 mg/L[6]로, 제조되어진 인공의 합성폐수와 그 성상이 거의 동일하였다.

원수의 공급은 인공폐수 저장조 내에 수증펌프를 투입하여 자동수위조절기를 설치해 호기조 내로 자동 유입되게 하였다. 또한, 실험에 사용된 활성 슬러지는 동일한 S지역 내 하수종말처리장 슬러지 반송라인에서 채취한 후 실험실에서 제조된 합성폐수로 약 2주간 적응시킨 후 사용하였다.

통상 폐수처리에 있어 전반적으로 사용되고 있는 막은 중공사(Hollow fiber)형으로서 중공사 막의 특징은 단위 부피당 막 면적 즉 막의 충전밀도를 최대화할 수 있어 막과 관련된 여러 분야에서 널리 이용되고 있다. 하지만 이러한 중공사막은 폐수 중의 협잡물로 인한 막 영킴으로 인해 막 오염이 심화될 위험이 있고 세정을 위한 공기량이 막 설계인자보다 강하거나 폐수내의 고형물 등의 요인에 의해 막이 절단되어 처리수에 영향을 주게 되므로 처리수의 안정성에도 큰 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 중공사막에 비해 막의 충전밀도는 낮지만, 중공사 막과 같은 단점이 없고 높은 MLSS 농도의 적용이 가능하며 취급이 용이하다는 장점을 가지고 있는 평막(plate type membrane)을 사용하였다. 분리막(Japan, Yuasa Co.) 사양은 Table 3과 같다[7,8].

2.2. 막결합형 A₂O Pilot 실험장치

본 연구에 사용된 막결합형 A₂O공정의 실험장치는 Fig. 1과 같이 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성된 A₂O공정의 호기조 내에 평막을 침지시켰다. 각각의 조에는 입축교반기를 설치하고 약 80 rpm 정도로 조 내를

Table 1. Composition of the Synthetic Wastewater

Constituent	Concentration (mg/L)
Milk	200
KNO ₃	80.0
KH ₂ PO ₄	10.0
Wastewater	20.0

Table 2. Characteristics of Raw Wastewater

Parameter	Value
pH	6.8~7.5
Temperature (°C)	15~30
BOD (mg/L)	120
COD _{cr} (mg/L)	250
T-N (mg/L)	35.0
T-P (mg/L)	5.0

교반시켜 미생물이 침전되지 않고 미생물과 유기물 사이에 적절한 접촉이 일어나게 하였고, 각각의 조의 유효 용적은 혐기조 17 L, 무산조 48 L, 호기조 43 L이다. 막결합형 A₂O공정의 투과 플럭스(막투과유속, permeate flux)는 15 LMH (L/m² · hr)로 정량펌프(peristaltic pump)를 이용, 일정하게 생산하여 연속 운전되게 하였다. 분리막은 호기조에 수직으로 설치하였고, 분리막 하부에 산기관(blower)을 설치하여 산소공급에 의한 미생물의 활성, 호기조내 균등한 교반, 막표면의 케이크층(cake layer) 제거를 가능하게 하였다.

Table 3. Characteristics of MF Membrane Module

Configuration	Plate
Membrane Type	Microfiltration
Pore size (μm)	0.25
Material	Polyolefin
pH Range	3~11
Surface area (m ²)	0.84
Chemical Resistance (Cl ⁻ , mg/L)	5,000
Dimension (mm)	490 W×1000 H×7.5 T

또한, 실험조건에 따른 무인 자동운전을 위해 PLC (programmable logic controller)를 설치하였고, 동력비 절감과 실험장치의 유지관리를 용이하게 하기 위해 각각의 조에 수위차를 주어 처리수가 생산된 만큼 혐기조로 원수가 유입되게 하였다. 한편, 제조된 합성폐수를 펌프를 통해 혐기조에 공급하고, 내부반송 type 1에 의해 호기조에서 무산소조로 슬러지를 공급하여 탈질화 반응이 원활히 일어나도록 하였으며, 무산소조의 탈질화가 끝난 슬러지를 내부반송 type 2에 의해 다시 혐기조로 공급하였다.

2.3. 실험방법 및 분석방법

막결합형 A₂O공정의 최적 운전조건을 도출하기 위해 우선 내부반송율에 따른 유기물의 제거효과를 살펴 보았다. 이후 최적으로 선정된 내부반송율을 적용한 후 장기운전이 가능하기 위한 최적 MLSS 농도를 막

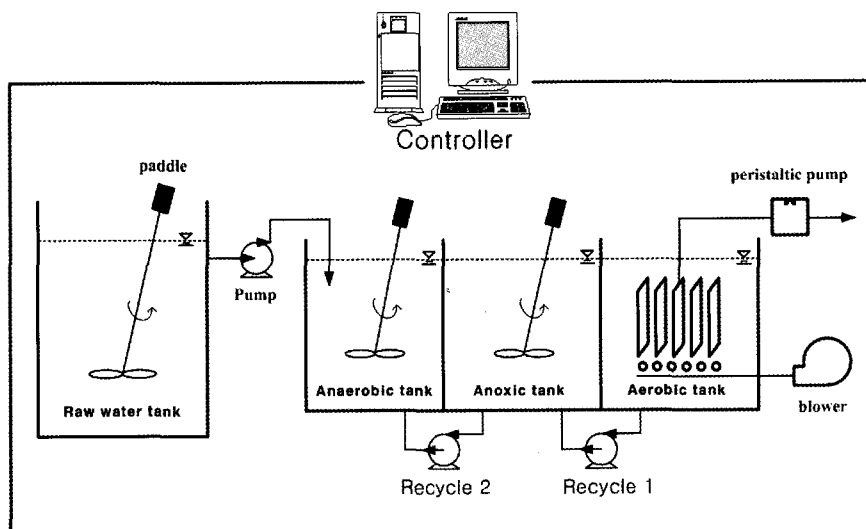


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

간차압(transmembrane pressure, TMP)을 통하여 산출하였다.

모든 시료의 분석은 환경오염 공정시험법에 의해 시료 채취 후 즉시 수행하였고, 온도와 pH, DO는 pH/ORP/DO Meter (Horiba D-25)를 사용하여 기기분석하였다. 그 외 COD, T-N, T-P 등은 바이얼(HACH Co.)을 이용하여 측정하였다.

2.3.1. 반송율 평가 실험

A₂O공정에서 혐기조에 질산성 질소가 유입될 경우, 정상적인 인의 방출과 유기물의 제거, PHB의 축적이 이루어지지 않고 오히려 미생물들이 탄소원과 질산성 질소의 산소이온을 이용하여 호기조에서와 같은 인을 섭취하는 현상이 발생한다. 반면에, 혐기조내 유기물 농도가 높고 질산성 질소의 농도가 낮을수록 인 방출량이 증가한다[6]. 일반적인 생물처리공정에서의 반송은 호기조, 무산소조, 혐기조 내부로의 “내부반송”과 2차침전지에서 무산소조 및 혐기조로의 “슬러지반송”으로 구분되지만 본 실험에서의 막결합형 A₂O공정은 2차침전지가 생략된 형태이므로 반송은 원활한 탈질 반응을 위한 호기조에서 무산소조로의 내부반송 type 1과 질산성 질소의 유입을 최대한 억제하고 인 방출 환경을 극대화하기 위한 무산소조에서 혐기조로의 내부반송 type 2를 설치하였다.

내부반송 type 1의 경우에는 순환비의 상승에 따라 무산소조에서 BOD/NO₃-N 비가 감소하고 DO 유입이 늘고 ORP를 상승시켜 탈질반응을 저하시킬 가능성이 있고, 순환용 펌프의 설비비 및 운전동력비가 커질 가능성이 예상되는 바, 순환비를 2Q로 고정하였다[9]. 또한, 무산소조에서 혐기조로 반송되는 내부반송 type 2의 경우는 0.5Q (RUN1), 1Q (RUN2), 2Q (RUN3)로 변환하면서 각각의 제거 효율을 판단하여 최적 내부반송율을 산출하고자 하였다.

2.3.2. 최적 MLSS 산정

부유물질과 용존성 기질이 막표면에 부착됨으로 발생하게 되는 막오염은 막 공정을 실제 적용하는데 있어 가장 큰 영향을 주는 인자이므로 막오염을 억제할 수 있는 최적의 MLSS 조건의 도출이 필요하다. 하·폐수처리에 있어 막결합형 A₂O공정에서 MLSS 농도가 한계농도를 넘으면 혼합액의 점성이 상승하여 투과 플럭스를 급격하게 저하시키는 것으로 알려져 있다[10].

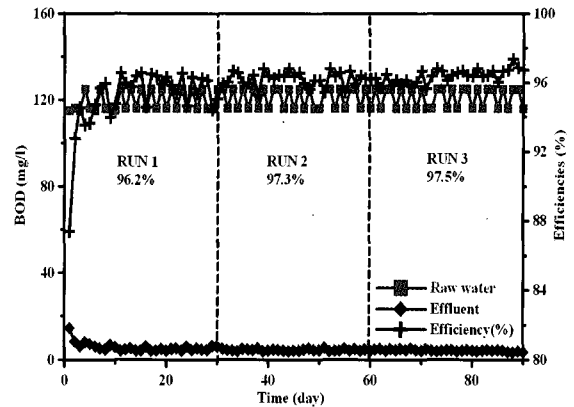


Fig. 2. Influent and effluent BOD and removal efficiency of various Run types.

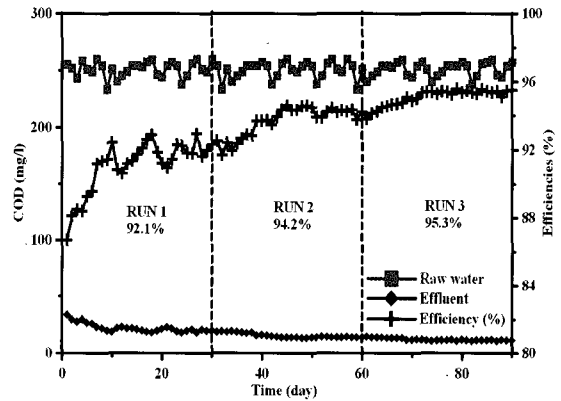


Fig. 3. Influent and effluent COD_{cr} and removal efficiency of various Run types.

이에 본 실험에서는 운전초기부터 안정적인 처리수질 확보와 장기운전이 가능하도록 막간차압의 모니터링 (monitoring)을 통한 최적의 MLSS 농도를 산정하고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 최적 반송율 산정

Fig. 2~Fig. 5에서와 같이 내부반송 type 1의 내부반송율을 2Q로 고정하고, 내부반송 type 2를 0.5Q (RUN1), 1Q (RUN2), 2Q (RUN3)로 조건을 변화시키면서 최적의 수질 제거효율에서의 최적의 내부반송율을 산정하였다. 그 결과 Fig. 2~Fig. 3의 그래프에서 내부반송율 type 2를 0.5Q, 1Q, 2Q로 변화시킬 때, 각각의 BOD 평균제거율이 96.2%, 97.3%, 97.5%, COD_{cr} 평균제거율이 92.1%, 94.2%, 95.3%로 유기물 제거효

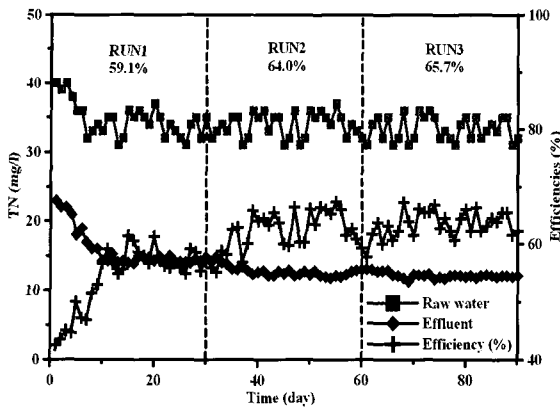


Fig. 4. Influent and effluent T-N and removal efficiency of various Run types.

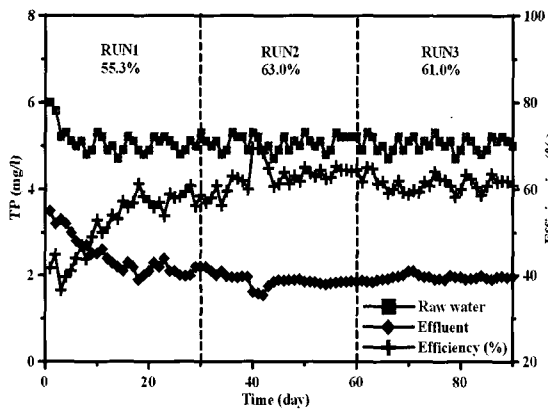


Fig. 5. Influent and effluent T-P and removal efficiency of various Run types.

율이 내부반송율(0.5Q~2Q)이 증가함에 따라 다소 높아지는 경향을 나타내지만 그 차이는 크지 않았다.

Fig. 4의 그래프에서 T-N 평균제거율이 각각 59.1%, 64%, 65.7%로 내부반송율(0.5Q~2Q)이 증가함에 따라 제거효율 또한 상승하였다. 특히, 0.5Q와 1Q의 차이가 4.9%로 1Q와 2Q 차이 1.7%보다 큼을 알 수 있었다. Fig. 5의 그래프에서 내부반송율(0.5Q~2Q)에 따른 T-P의 평균제거율이 각각 55.3%, 63.0%, 61.0%로 1Q일 때 가장 높은 제거효율을 나타냈다. 따라서 내부반송 type 2는 1Q에서(내부반송 I 2Q), 가장 경제적이고 유기물, 질소, 인의 처리효율이 좋을 것으로 판단하여 본 실험의 최적 내부 반송율로 적용하였다.

3.2. 단위공정별 물질 거동

3.2.1. 유기물질의 거동

유기물질의 거동을 알아보기 위해 앞서 나온 최적의

Table 4. Raw and Permeate Water Quality and Removal Rate During the Variation Test of Internal Recycle Rate

Factor		Raw water (mg/L)	Permeate water (mg/L)	Removal rate (%)
BOD	Run1	120	4.6	96.2
	Run2	120	3.2	97.3
	Run3	120	3.0	97.5
COD _{cr}	Run1	250	20.0	92.1
	Run2	250	14.5	94.2
	Run3	250	11.8	95.3
T-N	Run1	35.0	14.3	59.1
	Run2	35.0	12.6	64.0
	Run3	35.0	12.1	65.7
T-P	Run1	5.0	2.2	55.3
	Run2	5.0	1.9	63.0
	Run3	5.0	2.0	61.0

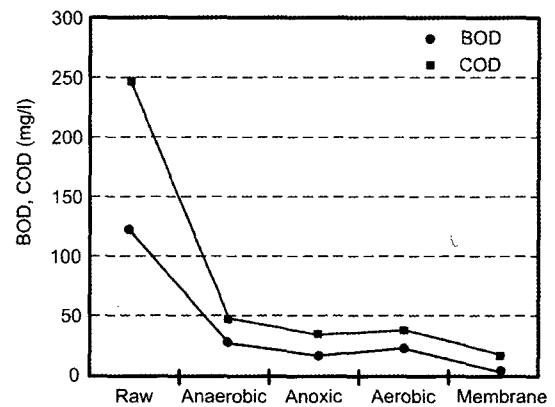


Fig. 6. BOD and COD_{cr} in various stages.

내부반송율(내부반송 type 1 2Q, 내부반송 type 2 1Q)을 적용하여 막결합형 A₂O공정을 연속 운전한 결과, 각 반응단계별 BOD 및 COD_{cr} 농도는 Fig. 6과 같다. 이 때, MLSS는 11,000mg/L 기준, 투과 플럭스는 15 LMH로 운전하였다.

원수(유입수)의 평균 BOD농도는 120 mg/L이고, 혐기조 18.3 mg/L, 무산소조 9.5 mg/L, 호기조 13.8 mg/L, 처리수(막투과수) 3.2 mg/L로 제거효율은 각각 원수대비 혐기조 84.8%, 무산소조 92.1%, 호기조 88.5%, 처리수 97.3%였다. 또한, 원수의 평균 COD_{cr}농도는 250 mg/L이고, 혐기조 32.5 mg/L, 무산소조 24.3 mg/L, 호기조 20.3 mg/L, 처리수 14.5 mg/L로 제거효율은 각각 원수대비 혐기조 87.0%, 무산소조 90.3%,

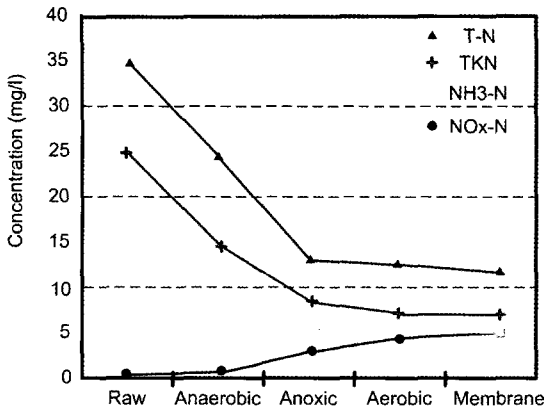


Fig. 7. T-N, TKN, NH₃-N and NO_x-N in various stages.

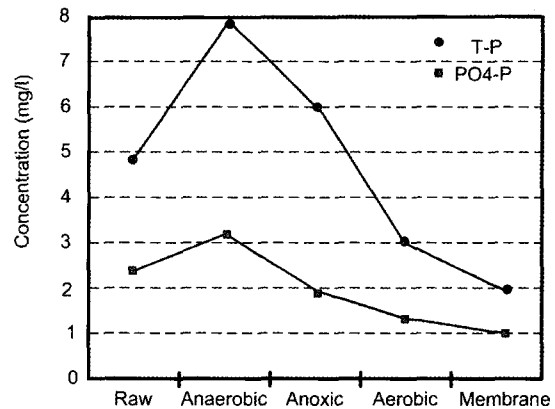


Fig. 8. T-P and PO₄-P in various stages.

호기조 91.9%, 처리수 94.2%였다.

3.2.2. 질소와 인의 거동

Fig. 7은 각 단위공정별 질소의 거동을 나타낸 것이다. T-N은 평균 35.0 mg/L가 유입된 후 혐기조에서 24.3 mg/L로 30.6%가 제거되었으며, 처리수 수질은 12.6 mg/L로 원수대비 64.0%의 제거효율을 나타냈다. TKN과 NH₃-N의 경우에는 처리수 수질이 각각 6.1 mg/L, 4.1 mg/L로 원수대비 각각 74.0%, 76.0%의 제거효율을 나타냈다. 또한, NO_x-N의 경우에는 원수내에 거의 존재하지 않으나 혐기조에서 발생하여 그 농도가 점차 증가하다가 처리수에서는 4.0 mg/L로 배출되었다.

Fig. 8은 각 단위공정별 인의 거동을 나타낸 것이다. 혐기조에서는 호기조에서 과잉섭취된 인의 방출로 T-P 7.8 mg/L, PO₄-P의 3.2 mg/L로 원수에 함유된 T-P 5.0 mg/L, PO₄-P 2.5 mg/L보다 높은 값을 나타냈다. 그러나 호기조에서는 미생물에 의한 “인의 과잉섭취”로 인해 원수보다 낮은 T-P 3.0 mg/L, PO₄-P 1.3 mg/L를 나타냈고, 처리수는 T-P 1.9 mg/L, PO₄-P 1.0 mg/L로 각각 63.0%, 60.0%의 제거효율을 나타냈다.

3.3. 최적 MLSS 수준 도출

MBR공정에서는 MLSS 농도를 높게 유지할 수 있기 때문에 내부반송율을 줄일 수 있고, 급격한 고형물 및 수리학적 부하변동에 안정적으로 대처가 가능하고, 질산화와 탈질화를 보다 효과적으로 수행하게 한다고 알려져 있지만[11], MLSS 농도를 35,000 mg/L까지 높게 유지할 경우, 이로 인해 투과 플럭스 감소, 산소전

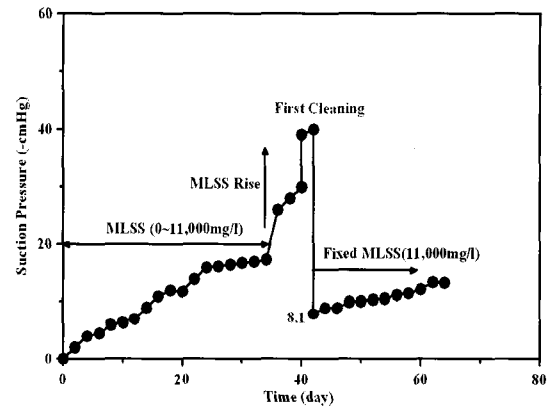


Fig. 9. Variation of TMP during the operation.

달에 문제가 생기며 기존 생물학적 공정에 비해 활성도가 감소한다고 보고되고 있다[12].

Fig. 9에서와 같이 운전 시작 후 MLSS 농도가 11,000 mg/L까지의 범위에서는 막간차압의 상승이 완만하였으나, 35일이 경과된 시점에서 MLSS 농도가 11,000 mg/L 이상으로 증가함에 따라 막간차압이 급격히 상승함을 알 수 있었다. 따라서 42일이 경과한 시점에서 물리세정 및 화학세정을 실시하였고, 막폐색 등 막오염의 제어와 안정적인 MLSS 농도에서 임계 플럭스 범위로 운전을 지속하기 위해 이후 호기조의 슬러지를 인발하여 MLSS 농도를 11,000 mg/L로 낮추어 안정적으로 운전하였다.

4. 결 론

본 연구에서 “막결합형 A₂O공정(MCA₂O)”을 이용하여 하수처리를 위한 8개월에 걸친 Pilot 실험 결과를

통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 내부반송 I 을 2Q로 고정하고, 내부반송II를 0.5Q (RUN1), 1Q (RUN2), 2Q (RUN3)로 변화시킨 결과, 내부반송율이 증가할수록 유출수질이 상승함을 알 수 있었다. 하지만, 유기물질의 제거 효율이 증가하는 폭은 내부반송 type 2가 0.5Q에서 1Q로 늘렸을 때가 1Q에서 2Q로 늘릴 때 보다 폭이 높았으며 이를 통해 내부 반송의 장기화에 따른 장치의 경제성을 감안하여 내부반송 type 2가 1Q일 때를 최적 운전 조건으로 하였다.

2) 최적 내부반송을 조건에서(내부반송 type 1 2Q, 내부반송 type 2 1Q) 장기 운전한 결과, BOD, COD_{cr}, T-N, TKN, NH₃-N, T-P, PO₄-P의 처리수의 제거효율은 원수대비 각각 97.3%, 94.2%, 64.0%, 74.0%, 76.0%, 63.0%, 60.0%였다.

3) MLSS 농도가 11,000 mg/L 이전에서는 막간 차압의 상승이 완만하였으나, 그 이상이 될 경우 막간차압이 급격히 상승하였기 때문에 본 Pilot 실험에서 막 오염의 제어와 안정적인 장기 운전이 가능한 최적 MLSS 농도는 11,000 mg/L이라고 판단된다.

감 사

이 논문은 “2004년도 환경부 차세대핵심환경기술개발사업”의 연구비에 의해 수행되었고, 이상백의 URI 방문연구는 “2004년도 제주대학교 발전기금 국외파견 연구지원계획”에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 박명균, 장윤석, 박철휘, 박철림, “DNR시스템에 의한 하수의 고도처리에 관한 연구,” 대한상하수도학회 학술발표회, 140 (1995).
2. 하수도법 시행규칙 (2001).
3. EPA (Environment Protection Agency), 40 CFR (Code of Federal Regulations) Parts 133, Secondary Treatment Regulation (2003).
4. 일본 하수도법시행령, 정령 313호 (2002).
5. German Federal Environment Agency, Umweltpolitik “Wasserwirtschaft in Deutschland” (2001).
6. Metcalf & Eddy, “Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse”, Third Edition, McGraw-Hill (2000).
7. 김규진, 윤성훈, “Membrane Bioreactor (MBR)를 이용한 오·폐수 처리,” 대한공업화학회지, **12**, 239 (2001).
8. 유익근, 차기철, 심진기, 김형수, 이영무, 안승호, “침지형 평막 생물반응기에 의한 식품폐수 처리,” 대한환경공학회지, **22**, 1475 (2000).
9. “헴기-무산소-호기법 운전관리설명서,” 도쿄하수도 서비스주식회사 (1997).
10. Z. Shaoyuan, H. Renze van, Dick H. Eikelboom, D. Hans, J. Zhaochun, F. Yaobo, and W. Jusi, “Sewage treatment by a low energy membrane bioreactor,” Bioresource Technology, **90**, 185 (2003).
11. H. Kishino, H. Ishida, H. Iwabu, and I. Nakano, “Domestic wastewater reuse using a submerged membrane bioreactor,” Desalination, **106**, 115 (1996).
12. 김형수, 윤성훈, “침지형 막분리 공정에서 플럭스에 따른 막오염 속도,” 대한환경공학회지, **21**, 1707 (1999).
13. 배태현, 장경국, 탁태문, “침지형 분리막 생물반응기에서 미생물 농도와 슬러지 부하에 따른 미생물 활성 변화와 막오염 특성 연구,” 한국막학회지, **14**, 296 (2004).