

하수 고도처리를 위한 유로변경형 MBR공정의 개발 Development of Influent Controlled Membrane Bioreactor for Biological Nutrient Removal on Municipal Wastewater

박종부[†] · 신경숙 · 허형우 · 강 호*
Jong-Bu Park[†] · Kyung-Sook Shin · Hyung-Woo Hur · Ho Kang*

(주)한화건설 기술연구소 · *충남대학교 환경공학과
Research Institute of Technology, Hanwha E&C Corp. · *Department of Environmental Engineering, Chungnam University

(2011년 2월 17일 접수, 2011년 7월 26일 채택)

Abstract : This study was performed to investigate the characteristics of nutrient removal of municipal wastewater in membrane bioreactor system. Membrane bioreactor consists of four reactors such as two intermittently anaerobic tanks, the oxic tank and the sludge solubilization tank with an internal recycle. The hydraulic retention time (HRT) and flux were 6.5 hours and 20.4 L/m² · hr (LMH), respectively. The removal efficiency of COD_{Cr}, SS, TN and TP were 94.0%, 99.3%, 99.9%, 69.9%, and 66.9%, respectively. The estimated true biomass yield, specific denitrification rate (SDNR), specific nitrification rate (SNR), specific phosphorus release rate (SPRR) and specific phosphorus uptake rate (SPUR) were 0.34 kgVSS/kgBOD · d, 0.067 mgNO₃-N/mgVSS · d, 0.028 mgNH₄-N/mgVSS · d, 16.0 mgP/gVSS · d and 2.1 mgP/gVSS · d, respectively. The contents of nitrogen and phosphorus of biomass were 8.9% and 3.5% on an average.

Key Words : Intermittently Anaerobic, Membrane, SNR, SDNR, SPRR, SPUR

요약 : 본 연구는 2개의 간헐혐기조, 막분리조 및 슬러지 가용화로 구성된 유로변경형 membrane bioreactor의 운영을 통하여 도시 하수의 영양염류 제거 특성을 규명하였다. 수리학적 체류시간(HRT)과 운영 여과 플럭스의 평균값은 각각 6.5 시간과 20.4 L/m² · hr (LMH)이었으며, 공정을 운전한 결과, COD_{Cr}, SS, TN 및 TP의 평균 제거율은 각각 94.0%, 99.3%, 99.9%, 69.9%와 66.9%이었다. 슬러지 생산계수, SDNR, SNR, SPRR 및 SPUR은 각각 0.34 kg VSS/kg BOD · d, 0.067 mg NO₃-N/mg VSS · d, 0.028 mg NH₄-N/mg VSS · d, 16.0 mg P/g VSS · d 및 2.1 mg P/g VSS · d였다. 또한, 생산된 슬러지의 평균 질소 및 인 함량은 각각 8.9%와 3.5%였다.

주제어 : 유로변경, 분리막, 비질산화율, 비탈질산화율, 비인방출율, 비인흡착율

1. 서론

최근 하수도 보급률의 증가로 고농도 하수에 의한 오염 부하량의 증가로 기존 하수종말처리장의 증설 및 기존 활성슬러지 공법의 고도처리 개선이 필요하다. 활성슬러지 공법은 처리 효율이 낮으며 부하변동 대응성이 부족하여 유출수의 수질 저하를 가져오게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 생물학적 고도처리 공정에 분리막을 결합한 침지형 막분리(submerged membrane filtration)공법의 적용이 증가하고 있으며 국내의 경우, 2007년말 가동중인 하수처리시설 중 20~900 m³/day의 중소규모 처리시설에 적용되어 운영 중에 있다.¹⁾

막분리(membrane bioreactor) 시스템은 2차 침전 및 여과 소독공정이 필요 없고 짧은 수리학적 체류시간으로 부지면적이 작으며 고농도 MLSS 유지 및 높은 SS 제거율로 엄격한 재이용수 수질 기준을 충족시킬 수 있을 뿐만 아니라 낮은 F/M비와 긴 슬러지 체류시간로 인하여 기존 활성슬러지법에 비해 슬러지 발생량이 작은 장점이 있다.²⁻⁴⁾ 최근 하수의 낮은 C/N비를 보완하기 위하여 외부탄소원의 공급

없이 유기물의 분해과정에서 생성된 잉여 슬러지를 물리화학적 및 생물학적인 방법으로 파쇄 및 가용화하여 재이용함으로써 감량화하고자 하는 연구가 적극적으로 시도되고 있다.^{5,6)}

그러나, Membrane bioreactor시스템은 막오염 방지를 위한 세정과 분리막 교체로 운영비가 고가이며 운영자료의 부재로 미생물 및 영양물질의 처리에 대한 명확한 해석과 예측이 곤란하여 운전조건을 선택하는데 어려움이 있다.⁷⁾ 또한, 대부분의 MBR공정은 A²O계열로 높은 내부순환율과 막오염 방지를 위한 과도한 포기로 인해 호기조로부터 혐기조로 유입되는 질산성 질소와 용존산소의 영향으로 혐기조건의 형성이 어려워 인 방출기작이 원활하지 못한 단점이 있다.⁸⁾

따라서, 본 연구에서는 호기조로부터 혐기조로 유입되는 질산성 질소와 용존산소의 영향을 최소화하여 인 제거가 우수하며 슬러지의 가용화에 의한 잉여슬러지의 발생량을 감소시킨 유로변경형 생물막(membrane bioreactor)공정을 개발하였으며 실제 하수를 대상으로 하여 기질 소비 특성 및 실제 공정 운전시 요구되는 동역학적 인자에 관하여 검토

[†] Corresponding author E-mail: jongbu@hanwha.co.kr Tel: 054-775-1430 Fax: 054-775-1431

하였다.

2. 연구방법

2.1. 실험장치 및 실험방법

Membrane bioreactor의 구성은 Fig. 1에서 보듯이, 간헐 혐기 1조(intermittently anaerobic No. 1), 간헐 혐기 2조(intermittently anaerobic No. 2), 침지형 막분리 호기조(submerged membrane aerobic) 및 슬러지 가용화조(sludge solubilization tank)로 구성되었으며 시설규모는 일최대 57 m³/day으로 D 하수종말처리장에 설치하여 운전하였다. 유입수를 2 시간 주기로 간헐 혐기 1조와 간헐 혐기 2조에 교대로 유입시켰으며 처음 2시간 동안 유입수를 공급한 간헐 혐기 1조에서는 무산소 조건에서 반송된 슬러지에 포함되어 있는 질산성 질소와 유입수내 유기물을 이용한 탈질반응을, 유입수가 중단된 간헐 혐기 2조에서는 잔류 질산성 질소를 유기물을 이용하여 탈질산화 후 질산성 질소가 존재하지 않는 혐기 조건에서 인방출 반응을 교대로 일어나도록 하였으며 다음 2시간 동안은 간헐 혐기 2조에 유입수를 공급하고 간헐 혐기 1조는 유입수를 차단하여 무산소 및 혐기조건을 형성하였다. 막분리호기조에는 정밀여과막(MF)을 침지시켜 고액분리가 이루어진다. 슬러지 반응은 최대 200%로 실시하였다. 또한, 생성된 잉여슬러지 중 2 m³/day는 pH 10~11의 슬러지가용화조에서 가용화되어 용존유기물의 형태로 전환된 후 간헐 혐기조로 반송시켜 탄소원으로 활용함으로써 슬러지 발생량을 감소시켰다. 수리학적 체류시간은 간헐 혐기 1조 1.5 시간, 간헐 혐기 2조 1.5시간, 막분리호기조 3.0시간으로 총 6 시간으로 제작하였으며 슬러지 가용화조는 24시간으로 운영하였다. 간헐 혐기조와 막분리호기조의 MLSS 농도는 각각 9,600 mg/L 및 12,900 mg/L을 유지하였으며 MLVSS/MLSS 비는 0.74이었다.

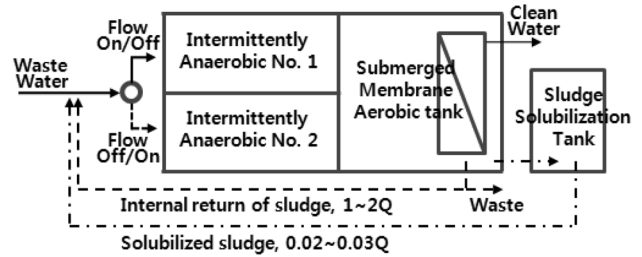


Fig. 1. Schematic diagram of influent controlled membrane bioreactor.

본 연구에 사용된 분리막은 K사의 침지형 중공사막으로 공칭공경 0.1 μm의 PVDF (polyvinylidene fluoride)로 제작되었으며 분리막 운전은 10분 흡입, 30초 역세정으로 연속 운전하였다. Membrane bioreactor의 운전조건은 Table 1과 같다.

2.2. 성상 분석 및 미생물 활성도 분석방법

COD_{Cr}, BOD₅, 총질소, TKN, 총인, NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P, SS, MLSS, MLVSS 등을 수질오염공정시험법 및 Standard Methods(APHA, 1999)에 따라 분석하였으며 수온, ORP, 용존산소, 막간차압(trans-membrane pressure, TMP), 유량 및 유속 등은 계측기를 이용하여 실시간 측정하였다.⁹⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. Membrane bioreactor 운전 및 처리특성 분석

운영기간 동안 유입수의 COD_{Cr} 및 BOD 농도는 각각 평균 217.1 mg/L 및 111.6 mg/L였으며 유출수의 COD_{Cr} 및 BOD 농도는 각각 12.8 mg/L 및 1.0 mg/L으로 제거율은 각각 94.0% 및 99.3%였다. 유출수 SS는 평균 0.1 mg/L 이하로 0.1 μm의 분리막을 통한 고형물 분리로 완벽한 SS의 제거가 가능하였다. 유입수의 총질소와 총인 농도는 각각

Table 1. Operating conditions in this study

| Item | | Operating Conditions | |
|---|-------------------------------|---|---------|
| | | Range | average |
| Capacity (m ³ /d) | | 18.9~69.7 | 57.1 |
| Filtration flux (L/m ² · hr) | | 15.0~23.5 | 20.7 |
| Operation temperature (°C) | | 11.5~30.9 | 20.4 |
| HRT (hr) | Bioreactor | Intermittently Anaerobic tank | 2.6~6.5 |
| | | Aerobic tank | 2.7~6.7 |
| | Total | 5.2~13.2 | |
| | Slubilization tank | 17.6~72.9 | 27.6 |
| MLSS (mg/L) | Intermittently Anaerobic tank | 5,800~15,500 | 9,600 |
| | Aerobic tank | 7,300~19,700 | 12,900 |
| | Slubilization tank | 4,900~29,200 | 12,300 |
| Filtration cycle | | Filtration 10 min, and backwash 30 sec. | |
| Backwash flux | | 29 L/m ² · hr (with filtrated effluent) | |
| Maintenance cleaning | | Backwashing with NaOCl 200 mg/L, three times a week | |

Table 2. Influent and effluent concentrations of membrane bioreactor system

| Item | Case 1 | | Case 2 | |
|---------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| | Influent | Effluent | Influent | Effluent |
| Operation period | December-March | | April-November | |
| Operation temp. (°C) | 11.5~18.2 | | 15.8~30.9 | |
| COD _{Cr} (mg/L) | 133.3~489.0 (246.4) | 7.5~20.3 (13.4) | 65.6~424.0 (205.8) | 4.8~26.3 (12.6) |
| BOD ₅ (mg/L) | 43.0~239.0 (119.1) | 0.6~2.5 (1.0) | 37.5~243.2 (108.7) | 0.5~2.2 (1.0) |
| SS (mg/L) | 46.7~290.0 (105.7) | N.D.~0.4 (0.1) | 27.0~355.0 (115.2) | N.D.~0.1 (0.1) |
| T-N (mg/L) | 23.8~53.0 (37.2) | 7.0~18.4 (11.4) | 8.5~46.0 (31.7) | 4.5~15.3 (9.1) |
| NH ₄ -N (mg/L) | 15.5~34.2 (25.3) | 0.1~8.9 (2.2) | 5.4~32.3 (23.4) | 0.1~4.8 (0.7) |
| T-P (mg/L) | 1.6~5.8 (3.4) | 0.1~2.1 (0.7) | 1.1~5.5 (3.2) | 0.1~1.9 (1.1) |
| PO ₄ -P (mg/L) | 1.1~2.5 (1.8) | 0.1~2.0 (0.6) | 0.5~2.9 (1.6) | 0.1~1.9 (1.0) |
| Coliform group | 12,000~83,000 (33,000) | N.D. | 14,000~96,000 (55,400) | N.D. |

33.7 mg/L와 3.3 mg/L이었으며 유출수의 총질소와 총인 농도는 각각 9.9 mg/L와 1.0 mg/L로 평균 제거율은 각각 69.9%와 66.9%였다.

Table 2는 유입수의 온도에 따른 처리효율을 비교하기 위하여 동절기 및 하절기의 처리수질을 검토하였다. 12월에서 익년 3월까지의 동절기의 생물학적 처리수의 COD_{Cr}, BOD 및 SS 농도는 각각 13.4 mg/L, 1.0 mg/L 및 0.1 mg/L였으며 4월에서 11월까지 기간의 생물학적 처리수의 COD_{Cr}, BOD 및 SS 농도는 각각 12.6 mg/L, 1.0 mg/L 및 0.1 mg/L로 큰 차이가 없었다. 생물학적 처리수의 총질소 및 총인 농도는 동절기의 경우 11.4 mg/L 및 0.7 mg/L으로 평균 처리효율은 각각 68.9% 및 79.9%였으며 NH₄-N의 농도는 최저 11.5°C의 낮은 수온으로 인하여 0.1~8.9(평균 2.2) mg/L로 질산화 반응에 저해가 있었다. 반면, 4월에서 11월의 경우 9.1 mg/L 및 1.1 mg/L으로 평균 처리효율은 각각 70.3%

및 63.1%였으며 NH₄-N의 농도는 0.1~4.8(평균 0.7) mg/L이었다. 따라서, 탈질산화는 동절기에 저해가 있었으나 인 제거 효율은 동절기에 높게 나타났다. 이는 동절기에 낮은 수온으로 인하여 질산화가 저해되어 반응 슬러지내 질산화 농도가 낮게 유지되어 인 방출이 촉진됨으로써 질소 제거효율은 떨어지고 인 제거효율 반대로 높아지는 현상에 기인한다. 허형우 등에 의하면 혐기조건에서 NO₃-N 농도가 1.0 mg/L 이상에서는 인 방출이 일어나지 않는 것으로 보고하였다.⁸⁾

Fig. 2에서 보듯이, 25°C 기준의 막간차압(TMP, Trans-Membrane Pressure)는 운영초기 0.11 kgf/cm²에서 운영 150일 이후 최대 0.28 kgf/cm²로 증가하여 0.25% NaOCl와 1% 옥살산을 사용하여 6시간 동안 계외세정을 실시하였으며 TMP는 계외세정 실시 후 0.14 kgf/cm²으로 감소하였으나 운영 300일 이후 다시 최대 0.33 kgf/cm²로 증가하였다.

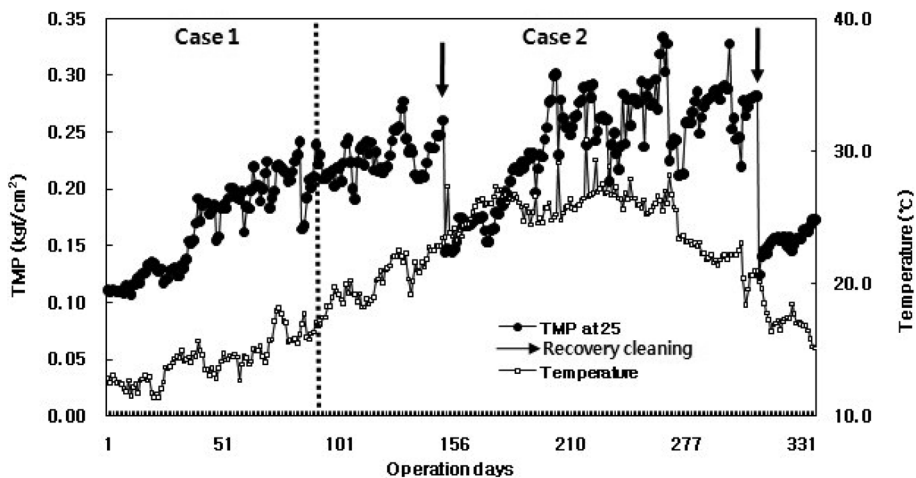


Fig. 2. Profile of temperature and trans-membrane pressure (TMP at 25°C).

차기철 등에 의하면 TMP 증가는 수온 감소에 따른 점성계수의 증가와 운영기간 누적에 따른 생물대사산물에 의한 막오염이 원인으로 고려되고 있다.⁹⁾ 본 연구 운전기간 중의 막투과유속(flux)은 20.7 L/m² · hr였으며 막투과능력(permeability)는 105.8 LMH/TMP이었다.

운영기간 동안 간헐혐기조의 pH, ORP 및 DO는 각각 7.3, -111.9 mV 및 0.1 mg/L였으며 막분리조기조의 pH, ORP 및 DO는 각각 7.2, 52.8 mV 및 0.16 mg/L였다. 또한, 슬러지 가용화조의 pH, ORP 및 DO는 각각 10.5, -324.1 mV 및 0.1 mg/L였다.

3.2. 유기물 처리 특성 및 슬러지 발생량 분석

운영기간동안 COD_{Cr} 및 BOD의 용적 부하량은 각각 837 g COD_{Cr}/m³ · d 및 428 g BOD/m³ · d였으며 유기물 제거량은 각각 11.7 kg COD_{Cr}/d와 6.3 kg BOD/d로 평균 제거율은 각각 94.0%와 99.3%였다(Fig. 3). 또한, COD_{Cr}과 BOD의 평균 비제거율은 각각 107.5 mg COD_{Cr}/g VSS · d와 58.3 mg BOD/g VSS · d였다.

슬러지 발생량은 평균 15.9 kg VSS/d였으며 COD_{Cr} 및 BOD 제거량에 대한 평균 미생물 생산량은 각각 0.19 kg VSS/kg COD_{Cr} 및 0.34 kg VSS/kg BOD였다. 이는 Fan 등의 실제 하수를 대상으로 분석한 결과인 0.61 kg VSS/kg COD와 지대현 등의 인공하수의 0.42 kg VSS/kg COD에 비해 45.2% 및 31.1% 수준으로 매우 낮게 나타났다.^{10,11)} 이는 MBR 공법에서의 특징인 높은 SRT와 생산된 잉여 슬러지가 pH 10 이상의 알카리 조건에서 가용화되어 반응조 내에서 탄소원으로 재사용됨으로써 슬러지 생산량이 감소한 것으로 판단되었다. 슬러지 가용화조에서 생물반응조의 반송수의 평균 농도는 각각 SCOD 1,874 mg/L, TN 150.2 mg/L, NH₄-N 84.4 mg/L, TP 100.3 mg/L 및 PO₄-P 92.2 mg/L였다. 이 때 생물반응조 유입수의 부하량은 COD_{Cr} 122.2%, T-N 110.1% 및 T-P 169.7% 증가하였으며 C/N비와 C/P비는 각각 초기 6.5와 66.5에서 가용화 산물의 혼합 후 6.6과 44.9로 나타났다. 또한, 동절기의 경우 평균 미생물 생산량은 각각 0.27 kg VSS/kg COD_{Cr} 및 0.49 kg VSS/kg BOD이었으며 4월부터 11월까지의 평균 미생물 생산량은

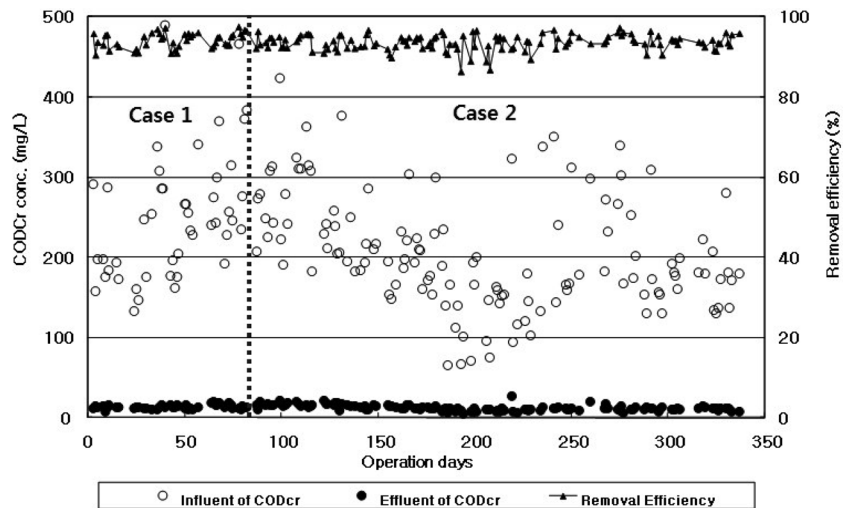


Fig. 3. Variation of COD_{Cr} removal efficiency.

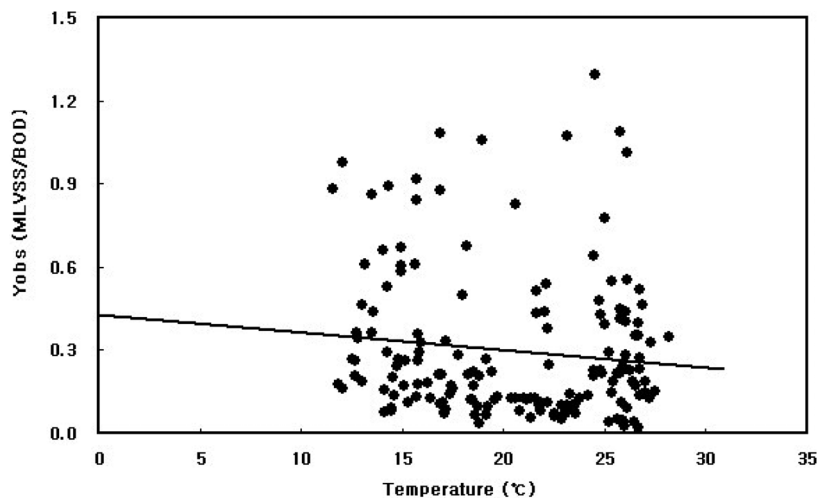


Fig 4. The biomass yield coefficient at the different temperature conditions.

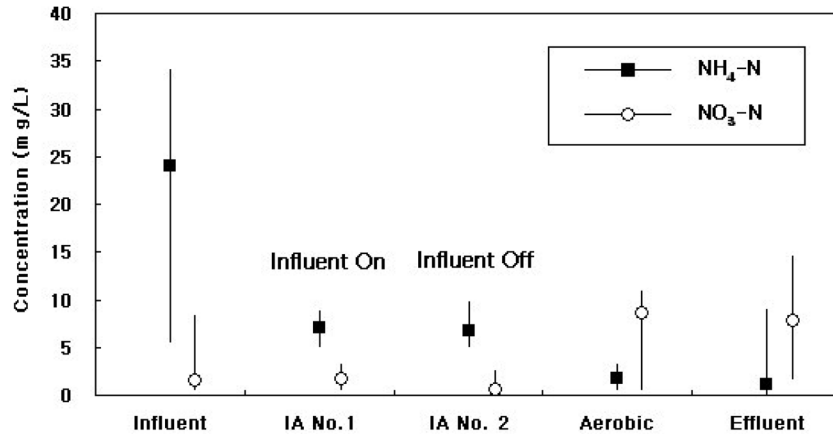


Fig. 5. Profiles of ammonium and nitrate ion in the membrane bioreactor.

각각 0.16 kg VSS/kg COD_{Cr} 및 0.28 kg VSS/kg BOD로 동절기의 미생물 생산량이 4월부터 11월까지의 미생물 생산량에 비해 높게 나타났다. 이는 수온 상승에 따른 질소 제거율의 증가에 따라 유기물이 탈질산화 반응의 탄소원으로 사용됨으로써 미생물 생산량이 감소한 것으로 판단되었다.¹⁰⁾

Fan 등¹⁰⁾이 제시한 미생물의 COD전환인자를 적용하여 유입 COD_{Cr}의 물질수지를 검토한 결과, 유입 COD_{Cr} 12.4 kg COD_{Cr}/d중 미생물 생산에 유입 COD_{Cr}의 22.7%인 2.8 kg COD_{Cr}/d가 소모되었으며 탈질산화 반응의 탄소원으로 33.6%인 12.7 kg COD_{Cr}/d, 산소산화에 35.2%인 13.9 kg COD_{Cr}/d가 각각 소모되었으며 최종 유출량은 0.7 kg COD_{Cr}/d였다.

3.3. 질산화 및 탈질산화에 의한 질소 제거

Membrane bioreactor 반응조별 평균 NH₄-N 농도는 각각 간헐혐기조 6.82 mg/L, 막분리호기조 1.72 mg/L 및 슬러지 가용화조 89.0 mg/L으로 질산화가 정상적으로 이루어졌다. 또한, 반응조별 평균 NO₃-N 농도는 유입수가 유입되는 간헐혐기조의 경우 1.74 mg/L였고 유입수가 차단된 간헐혐기조의 경우 잔류 NO₃-N의 탈질산화에 의해 NO₃-N 농도가

0.27 mg/L이었으며 유입수가 차단된 경우 인 방출이 원활하게 이루어질수 있도록 NO₃-N 농도가 1 mg/L 이하로 유지되었다.⁸⁾ 막분리호기조의 평균 NO₃-N 농도는 8.55 mg/L였으며 슬러지 가용화조의 평균 NO₃-N 농도는 0.18 mg/L였다(Fig. 5).

Fig. 6은 운영기간 동안 탈질산화율(specific denitrification rate, SDNR)과 질산화율(specific nitrification rate, SNR)의 변화를 나타내었다. SDNR은 0.067 mg NO₃-N/mg VSS · d였으며 동절기의 평균 SDNR은 0.058 mgNO₃-N/mg VSS · d으로 약 13.4%의 효율 저하를 보였다. 또한, SNR은 0.028 mg NH₄-N/mg VSS · d였으며 동절기의 평균 SNR은 0.027 mg NH₄-N/mg VSS · d로 수온변화에 큰 영향이 없었다. 생산된 슬러지의 질소 함량은 슬러지의 VSS기준으로 8.9%였다. 김윤석의 연구에 의하면 MBR공정에서의 SNR은 평균 수온 19℃에서 0.032 mgNH₄-N/mg VSS · d으로 본 연구와 유사수준이었다.¹²⁾

3.4. 인 방출 및 생흡착에 의한 인 제거

Fig. 7에서 보듯이, 유입수와 반송슬러지가 유입되어 무산소 조건을 형성하는 간헐혐기조의 PO₄-P의 농도는 평균

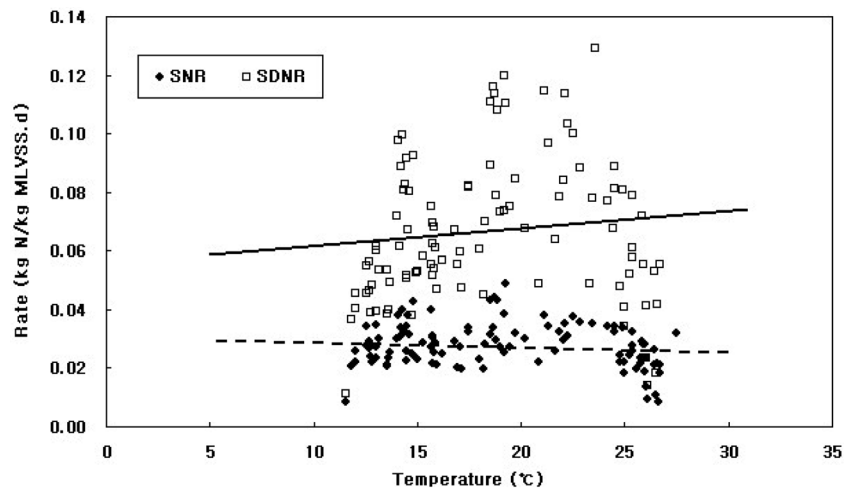


Fig. 6. The effect of temperature on SDNR and SNR.

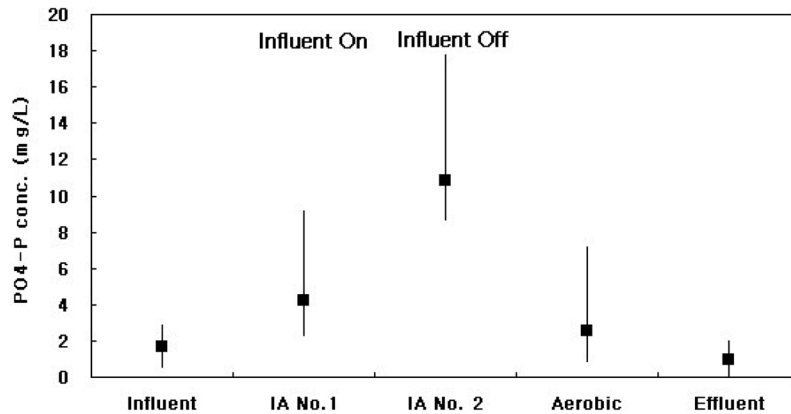


Fig. 7. Profiles of phosphate ion in the membrane bioreactor.

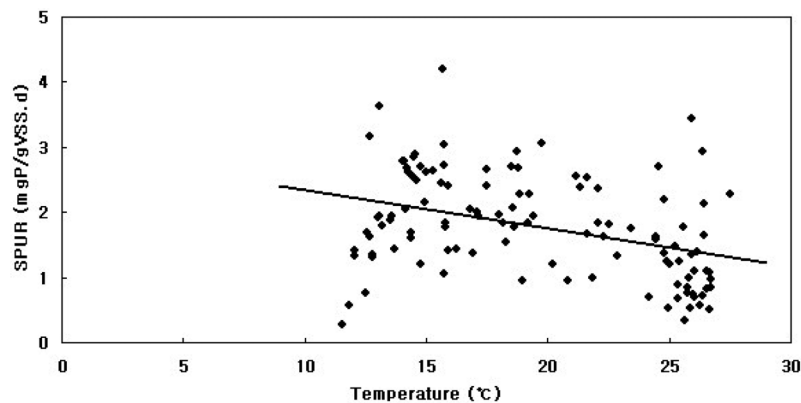


Fig. 8. The effects of temperature on SPUR.

4.3 mg/L이었으며 유입수와 반송슬러지가 차단되어 혐기 조건을 형성하는 간헐혐기조의 $PO_4\text{-P}$ 의 농도는 평균 10.8 mg/L이었다. 이는 생물학적 인 제거공정에서 혐기조로 nitrate가 차단될 경우 산화-환원전위차가 감소하여 혐기성상태가 유지되어 poly-P박테리아와 탈질미생물간의 유기물경쟁에서 인방출을 촉진시킬 수 있는 생분해 가능한 유기물의 양이 과잉으로 존재하기 때문에 인이 과잉 방출되었다.^{13,14)} 막분리호기조의 $PO_4\text{-P}$ 의 농도는 평균 2.5 mg/L로 인 흡착이 원활히 일어난 것을 알 수 있었다. 유입수 및 유출수의 $PO_4\text{-P}$ 의 평균 농도는 각각 1.7 mg/L 및 0.95 mg/L였다.

간헐혐기조에서 유입수가 차단된 상태에서 형성된 혐기 조건에서 방출된 인의 평균 방출량 및 비방출율(specific phosphate release rate, SPPR)은 각각 0.38 kg P/d 및 16.0 mg P/g VSS · d이었다. 또한, 평균 인 제거량 및 비생흡착율(specific phosphate uptake rate, SPUR)은 각각 0.16 kg P/d였으며 2.1 mg P/g VSS · d였다. 온도에 따른 SPUR을 분석한 결과, Fig. 8에서 보듯이, 동절기의 경우 인 제거량 및 SPUR은 각각 평균 0.16 kg P/d 및 2.1 mg P/g VSS · d였으나 4월에서 11월까지의 인 제거량 및 SPUR은 각각 0.10 kg P/d 및 1.6 mg P/g VSS · d으로 동절기에 비해 다소 낮았다. 이는 수온 상승에 따른 질산화율이 증가하여 반송되는 $NO_x\text{-N}$ 의 농도 증가에 의한 인 방출이 저해되는 것으로 판단되며 여상민 등의 연구결과와 유사한 결과를 얻었다.

다.^{8,15)} 생산된 슬러지의 인 함량은 VSS기준으로 평균 3.5%였다.

4. 결론

본 연구에서는 유로변경형 고도처리 막분리공정을 개발하여 장기간 운영을 통한 공정의 운영 안정성 평가 및 내부 이온 거동 분석을 통한 동역학적 계수 산정을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) COD_{Cr} , BOD, SS, T-N, T-P의 평균 처리효율은 각각 94.0%, 99.3%, 99.9%, 69.9%와 66.9%로 간헐반응조를 유로변경에 의해 혐기조와 무산소조로 교대로 운전할 경우에도 안정적인 처리효율을 얻을 수 있었다.
- 2) 슬러지 생산 계수는 0.34 kg VSS/kg BOD · d으로 MBR 공정의 특성인 긴 슬러지 체류시간과 슬러지 가용화에 의해 슬러지 발생량이 작게 나타났다.
- 3) 반응조별 평균 $NO_3\text{-N}$ 농도는 유입수가 유입되는 간헐 혐기조의 경우 1.74 mg/L였고 유입수가 차단된 간헐혐기조의 경우 0.27 mg/L으로 탈질산화가 안정적으로 이루어졌으며 SDNR 및 SNR은 각각 평균 0.067 mg $NO_3\text{-N}$ /mg VSS · d 및 0.028 mg $NH_4\text{-N}$ /mg VSS · d이었다.

4) 간헐혐기조의 PO₄-P의 농도는 무산소조건 및 혐기조건에서 각각 평균 4.3 mg/L 및 10.8 mg/L으로 유로변경에 의해 동일 반응조에서 정상적인 인 방출이 이루어졌으며 SPPR 및 SPUR은 각각 평균 16.0 mg P/g VSS · d 및 2.1 mg P/g VSS · d이었다.

기호설명

- Flux ; the quantity of material passing through a unit area of membrane per unit time
- Permeability ; Ease of flow through membrane, represented by flux:pressure ratio
- SDNR ; Specific denitrified nitrogen ratio, denitrified nitrogen contents by volatile suspended solids in the anoxic condition
- SNR ; Nitrified nitrogen contents by volatile suspended solids in the oxic condition
- SPPR ; Released phosphorus contents by volatile suspended solids in the anaerobic condition
- SPUR ; Uptaken phosphorus contents by volatile suspended solids in the aerobic condition

KSEE

참고문헌

1. 환경부, 하수도통계(2007).
2. Gander, M., Jefferson, B. and Judd, S., "Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost consideration," *Separation and Purification Technology*, **18**, 119~130 (2000).
3. Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., Wilde, W. and Koning, J., "Membrane Bioreactor technology on wastewater treatment and reuse," *Desalination*, **187**, 271~282(2006).
4. Stepheson, T., Judd, S., Jefferson, B. and Brindle, K., "Membrane bioreactors for wastewater treatment," IWA Publishing, London, U.K.(2000).
5. Lee, N. M. and Welander, T., "Reducing sludge production in aerobic wastewater treatment through manipulation of the ecosystem," *Water Res.*, **30**, 1781~1790(1996).
6. Yasui, H., Nakamura, K., Sakuma, S., Iwasaki, M. and Sakai, Y., "A full-scale operation of a novel activated sludge process without excess sludge production," *Water Sci. Technol.*, **34**, 395~404(1996).
7. 김규진, 윤성훈, "Membrane Bioreactor (MBR)를 이용한 오·폐수 처리," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**(3), 239~248 (2001).
8. 허형우, 신경숙, 박승국, 박종부, 최은주, 강호, "혐기조의 인 방출 최적화를 위한 영향인자 평가," *대한환경공학회지*, **25**(11), 1382~1387(2003).
9. 차기철, 황명구, 정형근, 김동진, 유익근, 한상국, "MBR공정에 있어서 미생물 성장 특성과 SMP의 거동," *대한환경공학회지*, **25**(2), 155~162(2003).
10. Xiao-Jun Fan, Vincent Urbain, Yi Qian and Jacques Manem, "Nitrification and mass balance with a membrane bioreactor for municipal wastewater treatment," *Water Sci. Technol.*, **34**(1-2), 129~136(1996).
11. 지대현, 신상우, 이광호, 이재근, "연속회분식 반응 공정에서 동역학적 계수 및 미생물 합성에 사용된 영양물질 산정," *한국물환경학회지*, **23**(5), 607~612(2007).
12. 김윤석, "슬러지가용화조 및 분리막을 이용한 유입흐름제어형 하수고도처리," *충남대학교, 박사학위논문*(2007).
13. Barnard, J. L., "Alternative prefermentation systems," *Barnard*, pp. 1321~1335(1994).
14. Henze, M., "Capabilities of biological nitrogen removal processes from wastewater," *Water Sci. Technol.*, **23**, 5~6(1991).
15. 여상민, 이영옥, "생물학적 인 제거 공정에서 탄소원에 따른 미생물군집구조의 변화," *대한환경공학회지*, **28**(2), 165~172(2006).