

MBR과 IPNR을 이용한 소규모 하수처리 시스템에 관한 연구

김영희* · 조은영** · 여인설** · 박승민** · 박찬규**†

A Study on a Small-scale Wastewater Treatment System Using MBR and IPNR

Young-hee Kim*, Eun-young Jo**, In-seol Yeo**, Seung-min Park**, Chan-gyu Park**†

Key Words : Wastewater treatment(생물학적 처리), MBR(생물학적 막분리), IPNR(질소·인 동시 제거), TN(총질소), TP(총인)

ABSTRACT

In the purpose of this study, we investigate the characteristics of the pilot-scale wastewater treatment system applied to BAF, MBR and IPNR as examining the removal efficiency of organic pollutants and operating factors in small decentralized wastewater treatment systems, and operating factors.

For long-term operation period of more than nine months, pilot-scale plant operating results appeared very stable. This results were the removal efficiency of BOD was 80.3% above and removal efficiency of COD with an average of about 91.0%, satisfied the final effluent water quality standards. TN in the final effluents was the average concentration of 7.9 mg/L, was satisfactory water quality standards 10 mg/L of TN.

1. 서 론

환경부는 양질의 안정적인 대체 수자원 확보를 위하여 물 공급의 지역적 불균형 완화와 하천유지용수량 확보 등을 통한 하천의 수생태계 회복 및 수질개선에 힘쓰고 있으며, 하·폐수 재이용율은 계속 증가하고 있다. 특히, 2009년을 기준으로 빗물, 중수도, 하수처리수 재이용량은 9.4억 톤이나 2020년까지 25.7억 톤 재이용을 목표로 하고 있는 것으로 나타났다. 이와 관련하여 16억톤 이상 하수처리수의 재이용량을 증가해야 하는 실정이다. 또한 폐수 배출시설「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」시행규칙을 개정·공포함에 따라 수질보전의 중요성이 큰 상수원보호구역 및 수변구역의 경우, 2012년부터 총인(TP)는 10배(2.0→0.2mg/L)로 강화되었으며, 화학적산소요구량(COD)은 2013년부터 2배(40→20 mg/L)로 강화되어 시행 중이다.1)

이렇듯, 하·폐수 방류수 수질기준이 강화되고 있을 뿐만

아니라, 한정된 수자원을 극복하고자 하수 처리수 재이용 기술이 각광을 받고 있는 시점에서 기존 하·폐수처리장의 효율적인 수처리 외에 건설현장과 같은 산발적 오염원이나 소규모로 분산되어 있는 하수처리 즉, 분산처리 대상에 대한 대책이 필요한 실정이다. 이러한 소규모 분산형 수처리 시스템의 개발은 환경 분야의 글로벌시장 진출에 유리한 시스템이며, 수처리 기술의 해외시장 진출에 걸림돌이던 현지의 상황에 구애 받지 않을 수 있어 경쟁력이 매우 높다고 판단된다. 특히 일반적인 하수처리장의 건설 시에는 하수처리장의 건설비용보다 약 5배 이상이 하수관거 건설에 소요되나 이러한 비용문제를 최소화 할 수 있어 경제적이고 발생지역에서의 하수 특성을 고려할 수 있어 고효율 처리와 집적화된 on site 처리에 유리하여 저개발국 및 개발도상국에 이러한 소규모 분산형 하수처리시설의 적용이 효과적이다.

MBR(membrane bioreactor)은 막에 의한 고액분리와 생물학적 처리의 결합 공법으로 기존 전통적인 하수처리 공정

* 호서대학교 벤처전문대학원(Hoseo University)

** 한국산업기술시험원(Korea Testing Laboratory)

† 교신저자, E-mail : pcg6189@hotmail.com

의 2차 침전 및 여과 공정이 필요 없으며, 고농도 MLSS 유지 및 짧은 수리학적 체류시간으로 인한 작은 부지면적 및 높은 SS 제거율로 낱알이 강화되고 있는 하수처리 방류수 수질 기준을 충족시킬 수 있을 뿐만 아니라 낮은 F/M비와 긴 슬러지 체류시간으로 인하여 기존 활성 슬러지법에 비해 슬러지 발생량이 적은 장점이 있어 컴팩트한 하수처리 시스템 구현이 가능하다.^(2,3)

IPNR(Ilshin Phosphorus Nitrogen Removal) process는 단일 반응기 내에서 질소와 인을 동시에 처리하는 신개념 공정으로서 하수 처리수내에 잔존하는 인은 철염을 이용하여 화학적인 방법으로 처리하며, 질소는 외부 탄소원으로 메탄올을 주입함으로써 생물학적 탈질을 유도하여 질소를 제거한다. 주입된 철염과 탈질 미생물은 반응기 내 충전된 담체의 표면에 부착되어 상향류로 유입되는 하수 처리수내 남아 있는 질소와 인을 제거하고 방류수를 통해 오염물질을 제거한다.^(4,5)

본 연구에서는 최적화된 소규모 분산형 하수처리 시스템 개발을 위하여 이전 연구의 결과인 하수 내 유기물제거를 위한 BAF(Biologica Aerated Filter)와 더불어 MBR, IPNR 공법을 적용하고 최적화 하여 pilot scale로 실제하수처리장에 설치하여 장기간 운전하였다. 따라서 본 연구의 목적은 pilot scale의 BAF와 MBR, IPNR이 적용된 소규모 분산형 하수처리 시스템의 유기오염물질의 제거효율 및 운전인자를 고찰하여 본 하수처리 시스템의 특성을 규명하고자 한다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1 연구 재료 및 방법

본 연구에서 개발된 소규모 분산형 하수처리 시스템의 pilot scale의 실증 실험을 위하여 경기도 수원시에 위치한 S대 하수처리장을 테스트베드로 선정하였다. 실험 기간은 2013년 9월부터 2014년 5월까지 총 9개월간이었으며, 수온 저하에 의한 처리효율 저감을 알아보기 위하여 동절기 기간을 포함하여 실험하였다. S대 하수처리장으로 유입되는 하수성상의 특징은 학기가 진행중인 봄/가을과 방학기간인 여름/겨울로 구분되었으며 COD와 TN은 방학기간 보다 학생수가 증가되는 학기 중에 현저히 높게 나타나는 반면 TP는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 학기 중 유입농도의 범위는 COD 농도가 50-296 mg/L (평균 142 mg/L), TN은 22.4-54.3 mg/L (평균 33.2 mg/L), TP는 1.5-3.76 mg/L (평균 2.53 mg/L)이었고, 방학 중 유입농도의 범위는 COD 농도가 40-156 mg/L (평균 92.6 mg/L), TN은 15.4-35.0 mg/L (평균 25.6 mg/L), TP는 1.9-3.4 mg/L (평균 2.83 mg/L)이었다. 이러한 유입수의 농도범위는 TN의 최대 오염물질 농도를 제외하면 환경부의 500 m³/일 미

만 소규모 처리시설 유입하수 성상 중 COD, TN, TP의 최대 오염물질 유입농도 및 최소 오염물질 유입농도, 평균 오염물질 유입농도와 유사하거나 높았다(Table 1). 본 연구에서 유입 및 유출수의 수질분석은 수질공정시험법에 준하여 BOD, COD, SS, TN, TP의 5가지 항목을 분석하였다.

2.2 공정 구성 및 설계조건

이전 연구의 bench scale 테스트 결과⁽¹⁾를 바탕으로 pilot scale의 소규모 분산형 하수처리시스템의 공정을 개발하였다. 소요 부지를 감소시키기 위하여 혐기조와 무산소조를 삭제하고 대신에 질소와 인을 제거하기 위하여 후단에 고도처리 공정으로써 탈질과 인 흡착/여과를 통해 질소와 인을 제거할 수 있는 IPNR process(상향류식 모래여과기)를 구성하였다. IPNR process는 질소와 인을 고도처리할 수 있는 공정으로써 혐기조와 무산소조를 거쳐 질소와 인을 제거하는 공정보다 제거 효율이 높아 안정적인 수질을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 소요부지가 매우 감소할 있다는 특징이 있다.

또한 본 연구에서 개발된 소규모 분산형 하수처리 시스템은 규격화된 컨테이너에 들어갈 수 있도록 각각의 공정을 구성함으로써 이동성을 갖춰 분산되어 있는 점 오염원에서 발생하는 하수처리를 처리하는데 큰 이점이 있게 된다. 뿐만 아니라 비교적 많은 소요부지를 필요로 하는 침전조 대신 MBR을 BAF와 같은 수조에 배치하여 설계하였으며, 컴팩트한 소규모 하수처리 시스템이 가능하도록 하였다. IPNR process의 효율적인 질소 및 인 제거를 위하여 전단에 처리수조를 설계하여 유량 조정조의 역할과 함께 약품 주입 라인을 구성하도록 하였다 (Fig. 1).

2.2.1 BAF(Biological Aerobic Filter)

BAF는 반응조 내에 충전되어 있는 여재를 통해 미생물에 의해 유입수를 처리한다. 반응조 내에 공기를 순환시켜 미생물의 적정 용존산소농도를 유지시키며, 자연유하로 여재층을 통과하면서 여재층에 형성된 미생물들에 의해 유기물의 산화분해 및 질산화가 이루어지는 공정으로 하수는 분사노

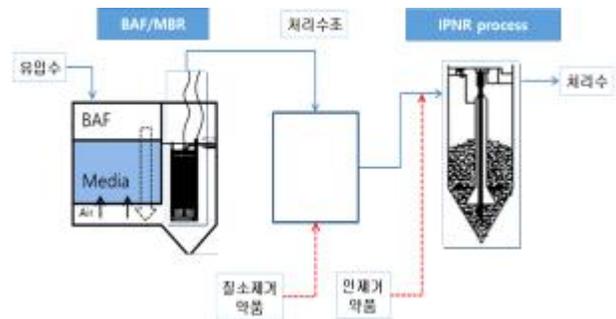


Fig. 1 Schematic diagram of wastewater treatment system

Table 1. Characteristics of influent (unit: mg/L)

Influent		BOD	COD	TN	TP
Nationwide wastewater treatment plant*	Max.	612.0	362.0	177.6	19.2
	Min.	8.5	8.5	8.0	0.2
	Avg.	135.1	71.7	36.4	3.3
Nationwide wastewater treatment plant under 500m ³ /day*	Max.	244.4	152.9	79.2	10.1
	Min.	11.7	9.7	8.0	1.0
	Avg.	107.0	50.9	24.0	2.7
Synthetic wastewater used in this study		110 ~ 250	50 ~ 150	25 ~ 80	3 ~ 10

* Ministry of environment(2002)

즐을 통하여 골고루 반응조에서 상향류로 유입된다.⁽⁶⁾ 설계 조건은 안정적인 유기물 제거 및 질산화를 위하여 계획처리 용량은 25 m³/일로 하였으며, 체류시간은 1.8 hr으로 유지하였다. 표면부하율은 1 m³/m²/hr 이하로 설계하였으며, 접촉재의 충진율은 조용적의 55%이하로 하되 공극율을 다르게 하여 처리효율 향상시키고자 하였다.

2.2.2 MBR(Membrane Bioreactor)

MBR은 BAF에서 탈착된 미생물을 분리하여 유기물 및 SS 등을 제거하고 후단의 IPNR process의 운전 성능을 향상시키며 분리공정에 의해 오염물질을 추가로 제거한다. 설계조건은 BAF와 마찬가지로 계획처리용량은 25 m³/일로 하였으며, 선정된 분리막의 프레임당 면적은 73.4 m², 투과수량은 0.35 m³/m²/day이었다. 분리막의 크기는 580 mmW×1140 mmL×1200 mmH이고 투영면적은 0.661 m²이었다. 따라서 막세척에 필요한 공기량은 0.8 Nm³/min (Nm³/day=프레임 수×분리막 투영면적(m²)×75 Nm³/m²/hr×hr/60min)으로 나타났다. 시설물별 용량 계산 여과 유량은 원액의 성상이나 반응조의 미생물농도에 따라 다르게 설계되며 일반적인 오수의 경우에는 여과유량을 0.3~0.6 m³/m²/day로서 산정한다.

MBR의 운전조건으로는 분리막의 초기운전압력의 경우 4~20 cmHg으로 유지하였으며, 분리막세정은 운전압력이 40 cmHg 이상시 또는 초기 운전 압보다 20 cmHg 이상 상승시 진행하도록 설계 하였다. 분리막 세정은 화학세정 방법을 적용하도록 하였으며, NaOCl 3000 mg/L 이용하여 2~6 개월에 1회 실시하도록 하였다. 최대운전온도는 40℃이였으며, pH 범위는 2~12으로 하수 처리의 안정적인 분리막을 선정 및 운전 조건을 유지하였다. 적정 MLSS 농도는 4000~7000 mg/L이였으며, 분리막 운전 방식은 14분 운전/1분 휴지를 유지하면서 안정적인 분리막 상태가 유지되도록 하였다.

2.2.3 IPNR process

IPNR process는 생물학적 처리공정 후단에 설치되어 생

Table 2. Operation factor of this wastewater treatment system

Reactor	Contents	Baseline
BAF	HRT	1.8 hr
MBR	HRT	5.4 hr
	over-flowrate load	0.35 m ³ /m ² /day
IPNR	over-flowrate load	4.0 m ³ /m ² /hr 이하

물학적 처리공정 처리수내에 존재하는 총인과 질산성질소를 제거하기 위한 공정으로서 인제거를 위한 코팅약품의 급속 혼합과 질산성질소를 제거하기 위한 메탄올주입으로 미디어 표면의 인 슬러지를 제거하기 위한 슬러지 탈리장치가 설치된 연속반응식 탈질/인흡착 여과기로 구성되어 있다.

설계조건은 다른 설비와 마찬가지로 계획 유입 용량은 25 m³/일로 설계하였으며, 표면부하율(여과선속도)은 3.7 m/hr로 유지하며 운전하였다. 가동시간은 하루 24 시간 연속 운전 하였고, 인과 질소 처리 효율은 각각 TP 유입농도 4.0 mg/L 기준일 때, 처리수질 0.2 mg/L 이하를 만족하도록 하였으며, NO₃-N으로서 TN 유입농도 40 mg/L 기준일 때, 처리수질 10 mg/L 이하로 처리되도록 설계하였다. IPNR process의 여과기는 수직원통 (또는 장방형)으로 여과 면적 0.28 m² 이상을 갖도록 하였다(예: Ø 0.6 m×2.0 mH). 여과기 직경은 0.57 m 이상으로 하였으며, 여과층 높이는 0.8 mH 이상으로 유지되도록 하였다. 연속 미디어 세척에 필요한 공기량은 0.42 m³/min 이상이였으며, 여기에 필요한 토출압력은 7 kgf/cm²으로 설계 되었다.

인과 질소를 동시에 고도처리 하기 위한 약품으로는 철염과 메탄올이 선정되었으며, 본 소규모 하수처리시스템의 유입유량에 비례 주입 되도록 하였다. 약품농도는 유입 TP 및 TN 농도에 따라 시운전기간 동안 최적조건을 도출하였다. 특히, 메탄올 주입은 자동으로 이루어졌으며, 약품 펌프는 다이아프램 정량 펌프를 사용하였다. Table 2에 각 공정의 수리학적 체류시간 등 설계인자 및 기준치를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 BOD 제거

원수 및 처리수의 생물학적 산소요구량(BOD)의 분석을 통해 본 시스템의 생물학적 유기물 제거효율을 고찰하였다. 운전 초반 1개월간은 반응 안정화 단계로 2013년 10월 이후로 생물학적 반응이 안정됨을 알 수 있었다. 실험기간동안 원수의 BOD 농도는 평균 66.0 mg/L로 나타났으며, 최소 32.5 mg/L에서 최대 120.5 mg/L의 농도로 유입되었다. BAF/MBR 공정에서 처리된 처리수의 평균 BOD 농도는 35.2 mg/L(21.0~58.7 mg/L)로 나타나, BAF/MBR 공정을



Fig. 2 Concentration(mg/L) of BOD in the treated effluents by this wastewater treatment system

통해 평균 46.7%의 유기물질이 제거되었음을 알 수 있었다. 최종 단계인 IPNR process를 거친 최종 처리수의 농도는 약 4.3 mg/L로 나타나, 본 시스템을 통하여 약 91%의 유기물질이 제거되었다. 또한 최종 처리수의 BOD농도는 방류수 수질 기준 중 가장 높은 기준인 5 mg/L를 만족하였다. BAF/MBR 공정 처리수의 경우 원수의 농도가 증가하거나 감소함에 따라 제거효율 또한 증가하거나 감소하는 경향을 보여 일정한 수준의 제거율을 유지하는 것으로 판단되며, 최종 처리수의 경우에는 BOD 5 mg/L이하의 일정한 값을 보여주고 있어 본 시스템은 수온, pH, 원수 농도 등 외부 변화에 영향을 덜 받는 것으로 보인다.

3.2 COD 제거

본 하수처리 시스템의 유기물 제거효율 평가 및 운전데이터의 신뢰성 확보를 위해 운전기간동안 주 2회 이상 화학적 산소요구량(COD)을 측정하였다. pilot scale plant 운전 기간 동안 유입수의 COD 농도는 평균 128.7 (40.0-296.0) mg/L이었으며, 최종 방류수의 COD 농도는 평균 13.2 (5.0-20.0) mg/L로 나타났다. 최종 COD제거 효율은 평균 80.3%이었으며, 최고 94.9%까지 COD가 제거되는 것을 알 수 있었다.

IPNR process에서 질소 제거를 위한 탄소원(메탄올)을 처리수조에 인위적으로 주입하기 때문에 BAF/MBR 생물학적 공법 처리수에서 다소 COD가 증가하여 유입수보다 높아지는 경향을 띄었지만 결국 IPNR process에서 모든 COD를 소모하여 가장 높은 I 지역의 방류수 수질 기준인 20 mg/L에 안정적으로 충분히 만족하였다.

인위적으로 주입되는 탄소원에 의해 BAF/MBR 처리수가 유입수보다 COD가 증가하는 현상은 기온이 낮은 겨울철에 주로 발생하였으며, 수온이 20℃ 이상으로 높은 봄·여름철에는 유입수 COD 농도가 최고 296.0 mg/L까지 유입되었음에도 대부분의 COD를 저감시킨 후, 최고 71.3% (평균 55.4%) 감소

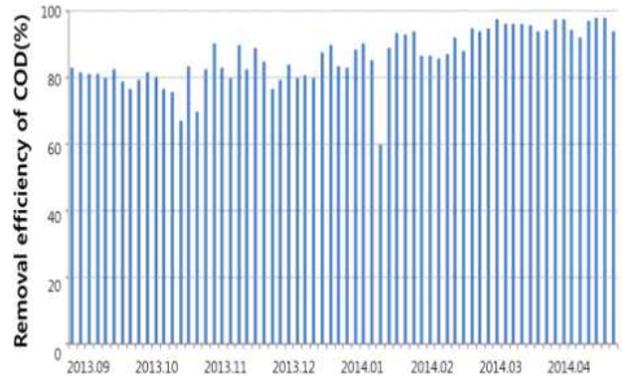


Fig. 3 Removal efficiency(%) of COD by this wastewater treatment system

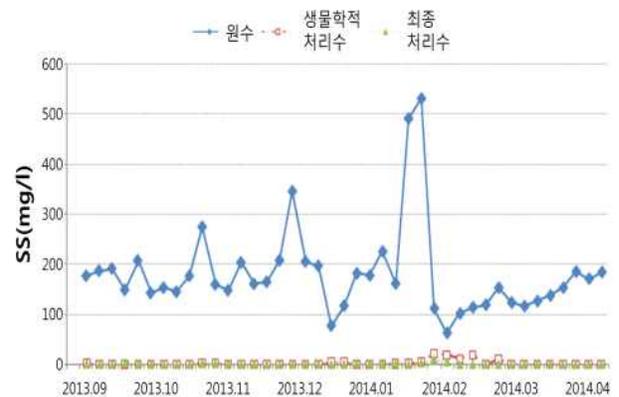


Fig. 4 Concentration(mg/L) of SS in the treated effluents by this wastewater treatment system

하여 평균 100.5 (52.0-152.0) mg/L을 나타내었다.

3.3 SS 제거

수중 부유물질(SS, Suspended solids)은 물에 용해되지 않고 부유하는 입자상 물질로 현탁 고형물이라고도 한다. 방류수 내의 SS는 탁도를 높이고 유기물질에 의해 용존산소를 감소시킬 수 있어 방류수 수질기준 항목으로 관리되고 있다. SS의 방류수 수질기준은 모든 지역에서 10 mg/L 이하로 관리되고 있다. 운전기간 동안 주 1회 이상 시료를 채취하여 수질오염공정시험방법에 준하여 SS 분석을 실시하였으며, 이를 통해 개발 공정의 오염 제거효율을 측정하고 운전의 안정도를 평가하였다.

겨울철 S대 하수처리장 내 집수조가 오염됨에 따라 일시적으로 300 mg/L 이상의 높은 SS가 유입되었으나, 본 시스템의 방류수에는 큰 영향 없이 안정적인 SS 농도를 나타내었다. 운전기간 동안 원수의 평균 SS 농도는 181.4 mg/L로 유지되었으며, BAF/MBR 공정을 거친 처리수의 SS는 2.88 mg/L로 나타나 BAF/MBR 공정만으로도 방류수 수질환경기



Fig. 5 Concentration(mg/L) of TN in the treated effluents by this wastewater treatment system



Fig. 6 Concentration(mg/L) of TP in the treated effluents by this wastewater treatment system

준을 충분히 만족함을 알 수 있었다. 또한 IPNR process의 매디아를 통해 잔류하는 SS가 제거됨에 따라 최종 처리수의 SS는 0.87 mg/L로 측정되어, 본 소규모 하수처리 시스템을 이용한 하수처리를 통해 수중의 부유물질을 99% 이상 제거 할 수 있음을 알 수 있었다.

3.4. TN 제거

운전 기간 동안 유입수의 TN 농도는 평균 31.1 (15.4 ~ 54.3) mg/L 이었으며, 우리나라 하수 특성상 대부분이 암모니아성 질소 ($\text{NH}_4\text{-N}$)으로 존재하기 때문에 유입수내 질산성 질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 농도는 평균 2.7 (0.3~6.2) mg/L로 낮은 농도로 유입되었다. 유입수내 $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 BAF/MBR 공정에서 BAF 활성슬러지 기작으로 인해 84.8% 이상 산화되어 $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 전환되었으며, 따라서 BAF/MBR 공정에서의 TN 농도는 평균 28.8 (13.2~44.4) mg/L로서 유입수와 비교하여 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 BAF/MBR 공정의 주 목적이 유기물 제거 및 질산화이기 때문인 것으로 판단된다. 초기 설비 안정화 기간을 제외하고 $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 전환된 질소는 처리수조로 주입된 메탄올을 탄소원으로 이용하여 IPNR process에서 탈질 미생물에 의해 질소가 제거되어 최종 처리수에서는 TN 농도가 평균 7.9 (3.0~10.0) mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 평균 6.3 (0.9~9.8) mg/L로 나타났다. 이로써 최종 처리수내 TN 농도는 수질 기준인 10 mg/L를 안정적으로 만족하였으며 TN 평균 처리 효율은 71.8% (최고 처리 효율 88.0 %)로 나타났다.

3.5 TP 제거

테스트베드 운전 기간 동안 유입수내 TP 농도는 평균 2.6 (1.5 ~ 3.8) mg/L이었으며, $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도는 평균 2.3 (1.1 ~ 3.3) mg/L로서, pilot scale plant가 설치된 하수처리장으로 유입되는 유입수 TP의 80% 이상이 $\text{PO}_4\text{-P}$ 로 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 인 제거 약품으로 사용되는

철염은 이온적 결합으로 용존성 인을 제거하는데 충분히 사용될 수 있음을 확인하였다. BAF/MBR 공정에서는 단순 폭기를 진행함으로써 BAF 미생물을 이용하여 유기물 제거 및 질산화를 유도하는 반면 인 제거에 대해서는 혐기 조건이 갖춰지지 않기 때문에 별다른 제거 효율을 나타내지 않는다. 그러나 대부분 $\text{PO}_4\text{-P}$ 로 존재하는 용존성 인은 IPNR process에서 90% 이상 제거되는 것으로 나타났다. 초기 설비 안정화 기간을 제외하고 최종 처리수에서의 TP 농도는 평균 0.16 (0.08~0.20) mg/L으로 평균 제거 효율은 93.0 %로 나타났으며, $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도는 평균 0.12 (0.03~0.20) mg/L로 나타나 평균 제거 효율 94.1%로 확인되어 목표 수질 기준 0.2 mg/L를 만족하였다.

4. 결론

본 연구를 통해 개발된 소규모 분산형 하수처리시스템의 BOD, COD, SS, TN, TP 등 주요 오염물질의 제거 효율을 고찰하였으며, 이를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Pilot scale plant 운전결과, 9개월 이상의 장기간 운전기간 중 BOD, COD을 통한 유기물 제거효율은 각각 평균 약 91.0%, 80.3% 이상으로 매우 안정적으로 나타났으며 최종 방류수의 수질기준을 모두 충분히 만족하였다.
- 2) TN의 경우, BAF/MBR 공정에서는 질산화가 이루어졌으며, 이후 처리수조로 주입된 메탄올을 탄소원으로 이용하여 IPNR process에서 탈질 미생물에 의해 질소가 제거되어 최종 처리수에서의 TN 농도가 평균 7.9 mg/L로서 최종 처리수내 TN 농도는 수질 기준인 10 mg/L를 안정적으로 만족하였으며 TN 평균 처리 효율은 71.8 %로 나타났다.
- 3) TP의 경우, 초기 설비 안정화 기간을 제외하고 최종 처리수의 TP 농도는 평균 0.16 mg/L으로 평균 제거 효율은 93.0%로 나타났으며, 목표 수질 기준 0.2

mg/L를 만족하였다.

- 4) 본 연구에서는 실제하수처리장에서 pilot-scale의 개발된 소규모 분산형 하수처리 시스템 적용해 장기간 운전으로 하였으며, 이를 통하여 운전인자 및 제거효율 등에 대한 데이터베이스를 구축하고 운영 노하우를 개발하여 충분한 사업화 가능성을 확인하였다. 따라서 향후 마을하수처리시설 및 저개발국 하수처리 시장에 진출할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 중소기업 산학협력사업(C0011319)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) 박찬규, 조은영, 김영희, 박성진, “생물학적 호기성필터를 이용한 소규모 하수처리시스템에 관한 연구”, 한국유체기계학회 논문집(2014), Vol. 17, No. 3, pp. 41 ~ 45.
- (2) 박종부, 박승국, 허형우, 강호, “도시 하수에서의 생물학적 고도처리를 위한 MBR공정 개발 및 화학세정에 의한 미생물 활성도 영향 분석”, 한국물환경학회지(2009), Vol. 25, No. 1, pp. 120 ~ 124.
- (3) 조일형, 김지태, “하 · 폐수 처리용 MBR 분리막 기술 및 산업동향과 발전방향”, 멤브레인학회지(2013), Vol. 23, No. 1, pp. 24 ~ 44.
- (4) 송지희, 김영희, 김주성, 유남중, “파일럿 규모 IPNR 공정에서 질소 · 인 동시 제거에 미치는 영향”, 한국물환경학회 학술발표회 논문집(2012), pp. 826 ~ 827.
- (5) 송지희, 김영희, 김주성, 유남중, “하수방류수에서 파일럿 규모 IPNR 공정을 이용한 질소 · 인 동시 제거시 외부 탄소원 주입비 결정”, 한국물환경학회 학술발표회 논문집(2012), pp. 167 ~ 168.
- (6) Yukio, I. and Akihiro, T. 1984, “Nitrogen Removal from Municipal Wastewater by a Single Submerged Filter,” JWPCF, Vol. 56, pp. 251 ~ 258.
- (1) 박찬규, 조은영, 김영희, 박성진, “생물학적 호기성필터를