

하수처리시설의 Retrofitting을 위한 파일럿 규모 공기부상공정 연구

A Pilot Study on Air Flotation Processes for Retrofitting of Conventional Wastewater Treatment Facilities

박찬혁¹ · 홍석원^{1,2} · 이상협¹ · 최용수^{1*}

Chanhyuk Park¹ · Seok-Won Hong^{1,2} · Sanghyup Lee¹ · Yong-Su Choi^{1*}

¹한국과학기술연구원 환경기술연구단, ²서울대학교 공과대학 건설환경공학부

(2008년 5월 20일 접수 ; 2008년 6월 5일 채택)

Abstract

The pilot study was conducted to evaluate the applicability of air flotation(AF) processes combined with biological nutrient removal(BNR) for the retrofitting of conventional wastewater treatment facilities. The BNR system was operated in pre-denitrification and intermittent aeration; developed ceramic membrane diffusers were installed to separate the solid-liquid of activated sludge at the bottom of a flotation tank. Before performing a pilot scale study, the size distribution of microbubbles generated by silica or alumina-based ceramic membrane diffusers was tested to identify the ability of solid-liquid separation. According to the experimental results, the separation and thickening efficiency of the alumina-based ceramic membrane diffuser was higher than the silica-based ceramic membrane diffuser. In a 100m³/d pilot plant, thickened and return sludge concentration was measured to be higher than 15,000mg SS/L, therefore, the MLSS in the bioreactor was maintained at over 3,000mg SS/L. The effluent quality of the AF-BNR process was 4.2mg/L, 3.7mg/L, 10.6mg/L and 1.6mg/L for BOD₅, SS, T-N and T-P, respectively. Lastly, it was revealed that the unit treatment cost by flotation process is lower than about 1won/m³ compared to a gravity sedimentation process.

Key words : activated sludge, ceramic membrane diffuser, air flotation, microbubbles

주 제 어 : 활성슬러지, 세라믹 멤브레인 산기관, 공기부상, 미세기포

1. 서론

1970년대 중반부터 시작된 하수처리장 설치사업은 2006년 말 현재 시설용량 23,158천톤/일, 하수도 보급률 85.5%를 도달하여 처리량이 크게 증가하였으나, 최근에는 고도처리의 필요성이 현실화되어 기존 하수처리시설의 처리공정 개선 및 추가시설의 설치가 활발히 진행 중이다. 현재 전국의 하수처리장 가동 개소는 총 304개소이며, 그 중 질소, 인을 포함시켜 처리하는 고도처리시설은 67.8%인 206개소가 가동 중에 있으며, 32.2%인 98개소는 아직 고도처리시설이 설치되지 않았다. 지속적으로 고도처리시설의 도입이 증가하고 있음에도 불구하고, 고도처리시설에 의해 처리되는 하수량은 33.1%(7,659천톤/일)에 불과하여 전체 하수처리량에 비해 미약한 실정이다(환경부, 2007). 현재 운영되고 있는 하수처리장을 대상으로 새로운 고도처리 공법을 적용하는 것은 경제적 측면에서 적절하지 못한 것으로 판단되며, 기존 하수처리시설을 가능한 사용하면서도 효율을 향상시킬 수 있는 시설개량방식(retrofitting) 기술이 필요하다.

질소 제거를 중심으로 하는 고도처리공정은 질산화를 가능하게 하기 위해서 생물반응조 내 MLSS(mixed liquor suspended solid) 농도를 높이고, SRT(solids retention time)를 증가시켜야 한다. 이를 위해서는, 슬러지 반송률을 증대시키거나 최종 침전지의 슬러지 농도를 높여야 한다. 현재 거의 모든 하수처리장에서는 중력식 침전방식을 사용하고 있으나, 벌집 등에 의해 침전성이 저하된 슬러지는 중력에 의한 농축이 거의 불가능하다고 할 수 있다(Choi and Chung, 2000). 중력식 침전방식은 반대로 부상방식을 적용한 활성슬러지의 고액분리는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 것으로 알려져 있다(Dockko and Han, 2004; Edzwald, 1995). 부상방식은 단시간 내에 고액분리를 할 수 있어, 부지소요면적을 획기적으로 줄일 수 있는 공정이며, 중력식 침전방식보다 높은 농도의 농축 슬러지를 생성할 수 있어 생물반응조 내 MLSS 농도를 고농도로 유지하는 데 유리하다. 부상분리가 수처리에 적용된 사례는 정수처리에 주로 사용되는 DAF(dissolved air flotation)가 있으며(Krofta and Wang, 1982), 활성슬러지 공정에서의 슬러지 농축과 처분에 관한 연구도 진행되었다(EPA, 1974; Tavery, 1979). 한편, 전극판을 이용하여 미세기포를 발생시키는 전해부상(EF; electro flotation) 공정은 DAF 보다 균일하면서 작은 크기의 기포를 만들 수 있고 기포의 손실이 적은 것으로 알려져 있다(Choi et al., 2005). 하지만, 아직까지 EF가 하수처리의 슬러지 고액분리에 적용된 사례는 국내외를 통틀어 극히 드문 실정이며, 하수 내 고형물질이 극판에 접촉하여 형성되는 스케일에 의한 효율 저하 문제를 해결하는 하는 문제점을 가지고 있다(Burns et al., 1997).

DAF보다 낮은 압력으로 미세 기포를 생성할 수 있는 세라믹 멤브레인 산기관(ceramic membrane diffuser)의 개발과 이를 적용한 활성슬러지의 고액분리 성능은 기존 연구에서 검증되었으며(Park et al., 2006), 기타 부상분리방식의 단점을 해결할 수 있는 방법으로 제시되고 있다.

본 연구는 하수처리시설의 retrofitting을 위한 고도처리공정의 적용성에 관한 연구로써, 기존 시설로는 활성슬러지 공정을 모델로 선정하였으며, 고도처리공정으로는 활성슬러지 공정의 포기조 내에 칸막이를 설치하여 간헐포기조로 운영하며, 중력식 침전조 하부에 세라믹 멤브레인 산기관을 설치하여 부상분리방식을 적용한 AF-BNR(air flotation - biological nutrient removal) 공정을 평가하고자 한다. 본 연구에서는 AF-BNR 공정의 파일럿 연구를 통해, 장기적인 처리특성 및 최적 운전 조건을 도출함으로써 개발 공정의 상용화를 위한 기반 기술 확립을 목표로 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 세라믹 멤브레인 산기관

부상분리 방식에서 미세기포를 발생하기 위한 매체로서, 미세 기공을 지닌 세라믹 멤브레인 산기관을 선택하였다. 세라믹 멤브레인 산기관은 천매암(silica-based)과 알루미나(alumina-based) 분말을 주원료로 하여 고온에서 소성한 제품으로 활성슬러지의 고액분리를 위한 적절한 크기의 미세기포 발생이 가능하였다. 세라믹 멤브레인 산기관으로부터 발생한 기포의 크기 측정은 고액분리의 대상이 되는 활성슬러지 입자를 부상시킬 능력이 있어야 하므로 필수적이다(Elimelech et al., 1995). 미세기포의 측정방법으로는 카메라를 이용한 화상분석법과 PC(particle counter)법이 있으며, 최근에는 사용의 편리함으로 인해 PC법을 많이 사용하고 있다(Han et al., 2002). 본 연구에서도 PC법을 사용하였으며, on-line particle counter(LaserTrac Model PC 2400D, Hemtrac)를 사용하여 발생 기포 크기를 측정하였다(Fig. 1). 이 방법은 입자 계수기의 센서부를 통과하는 입자들이 laser에 감지되어 발생하는 pulse로 크기를 측정하지만, 입자와 기포를 구분하지 않고 측정하는 문제점이 있어, 증류수를 사용하여 측정하였다. 세라믹 멤브레인 산기관은 유입되는 공기 압력에 따라 기포의 크기가 다양하지만, 활성슬러지의 고액분리를 위해서는 40~60 μ m의 기포 크기가 가장 효율적인 것으로 알려져 있어(AWWA, 1999), 40~60 μ m를 발생시킬 수 있는 1.6~1.8kgf/cm²의 압력을 유지하였다. 한편, 공극의 크기를 확인하기 위해 FE-SEM(S-4100, HITACHI High-Tech Science Systems, Japan)을 통해 표면의 공극분포를 관찰하였다.

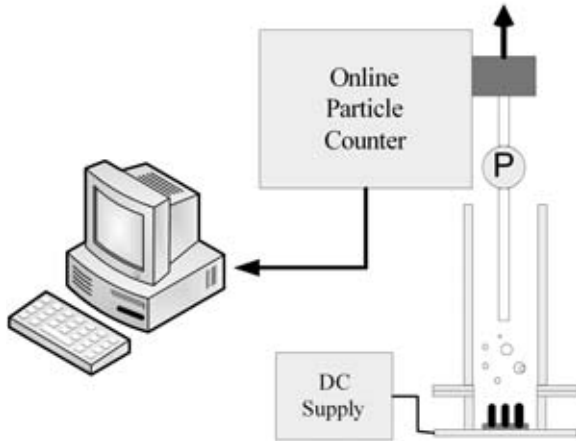


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set up for bubble size measurement.

2.2. Pilot 장치

본 연구에 사용된 pilot 장치는 경기도 O시 하수처리장 내 검증단계에 설치하였으며, 일 하수처리용량 100m³으로 Fig. 2와 같이 구성되어있다. 각각의 반응조 용적은 전탈질조 2.8m³ (1.2m×1.2m×1.95m), 간헐폭기조 22.2m³ (1.5m×6.0m×2.45m), 부상분리조 4.8m³ (1.0m×1.2m×4.0m)로 구성되어있다. 원수는 저류조에 저장한 뒤 전탈질조로 공급되며, 전탈질조에서는 부상분리조에서 반송된 슬러지와 함께 교반을 실시하여 무산소조건으로 운전하였다. 간헐폭기조는 2개의 조로 구성되어 있으며, 각각의 조에서 폭기/비폭기, 비폭기/폭기를 시간에 따라 교호적으로 운전하였으며, 교반은 24시간 실시하였다. 이는 유입수 내의 유·무기 질소의 질산화를 위한 호기성 조건과 탈질화를 위한 무산소 조건이 두 개의 간헐폭기조에서 교대로 조성되며, 특히 후단의 간헐폭기조에서는 전단에서 미처리된 암모니아성 질소의 산화작용 및 질산성 질소의 탈질화를 위한 내생탈질을 유도하기 때문에 안정적인 질소 제거율을 유지할 수 있다. 한편, 활성슬러지의 고액분리를 위한 부상분리조에는 하부에 세라믹 멤브레인 산기관 (Ø40mm×185mm) 120개를 연결한 공기 주입장치를 설치하였다(Fig. 3). 공기의 주입은 air compressor를 통해 1.6~1.8kgf/cm²의 압력으로 일정하게 주입하며, 보조탱크 500L와 air filter를 장착하여 균일한 기포양과 크기를 유지하였다.

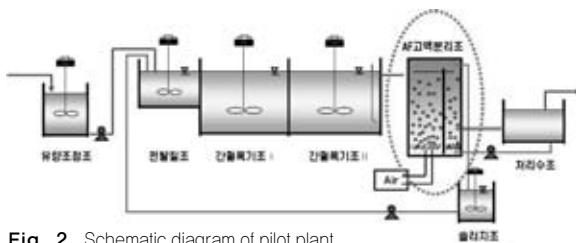


Fig. 2. Schematic diagram of pilot plant.



Fig. 3. Array of alumina ceramic membrane diffusers in air flotation tank.

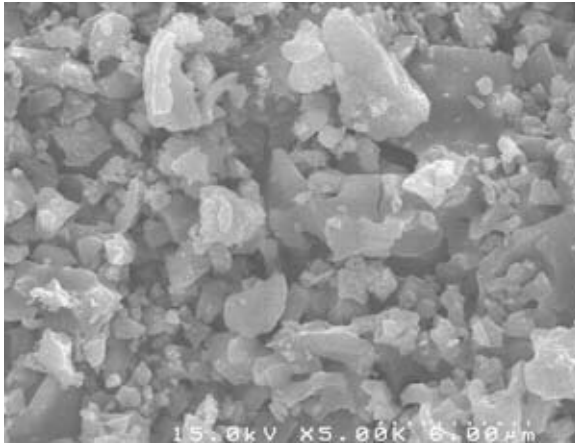
3. 결과 및 토의

3.1. 세라믹 멤브레인 산기관의 성능 비교

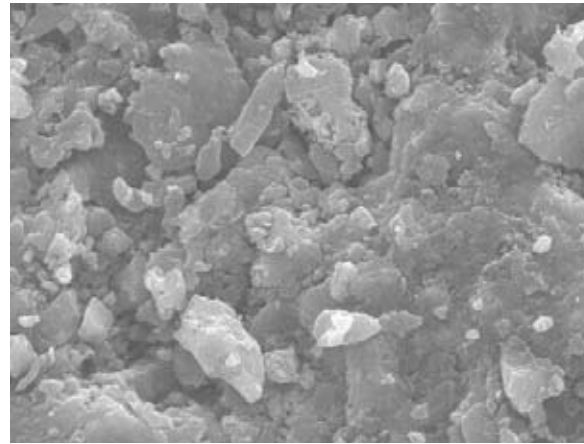
미세기포를 이용한 활성슬러지의 고액분리 효율 증대를 위해서는 발생하는 미세기포의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 미세기포의 발생은 발생매체인 세라믹 멤브레인 산기관의 구조 및 공극 등에 의해 영향을 받는다. 1차 및 2차 개발 세라믹 멤브레인 산기관을 대상으로 압력에 따른 미세기포 크기 분포를 PC법에 의해 조사하였다. Table 1에서와 같이, 각각의 재료로 만들어진 세라믹 멤브레인 산기관은 공기

Table 1. Size distribution of air bubbles generated by ceramic membrane diffusers.

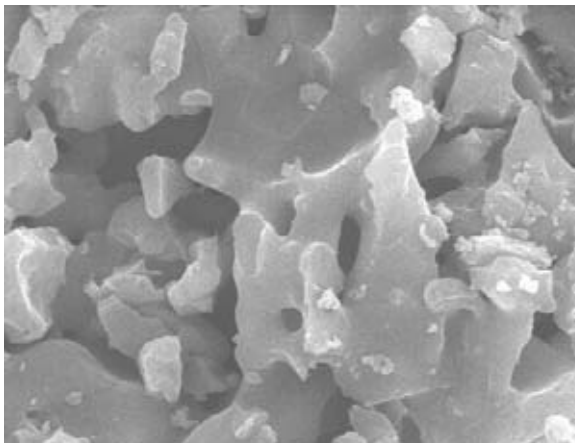
	Pressure (kgf/cm ²)	Mean Size (μm)		Mean Size (μm)
Silica-based ceramic membrane diffuser	2.0	93.15	Alumina-based ceramic membrane diffuser	72.22
	1.9	85.83		76.12
	1.8	81.29		69.35
	1.7	62.47		44.84
	1.6	55.30		38.11
	1.5	51.79		33.24



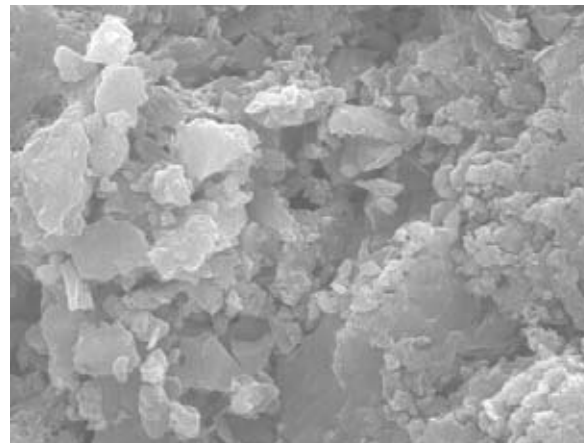
Silica-based ceramic membrane diffuser (× 5,000)



Alumina-based ceramic membrane diffuser (× 5,000)



Silica-based ceramic membrane diffuser (× 10,000)



Alumina-based ceramic membrane diffuser (× 10,000)

Fig. 4. FE-SEM analysis of two ceramic membrane diffusers.

압이 증가함에 따라 미세기포 크기가 증가하는 경향을 보였으며, 특히 1.8kgf/cm^2 이상에서 급격히 증가되는 것을 확인할 수 있다. 한편, 공급압력이 1.5kgf/cm^2 이하에서는 미세기포가 발생하지 않았으며, 2.0kgf/cm^2 이상에서는 평균 기포 크기가 $100\mu\text{m}$ 이상의 굵은 기포가 발생하여 활성슬러지의 고액분리에는 적합하지 않아 실험결과에 반영하지 않았다.

또한, 미세기포 크기를 결정하는 세라믹 멤브레인 산기관 구조를 관찰함으로써 공극을 간접적으로 확인하고, 각각의 재료가 고온에서 소성되어 결합된 상태를 파악하여 발생된 기포 크기와 비교하였다. Fig. 4에서와 같이 FE-SEM 사진을 통해 알루미나를 주원료로 하는 세라믹 멤브레인 산기관의 경우, 공극의 크기가 매우 작은 것을 확인할 수 있다. FE-SEM 관찰로는 세라믹 멤브레인 산기관의 정확한 공극 크기나 공극 분포를 알 수 없으나, 상대적인 비교는 가능하므로 각각의 재료를 사용한 세라믹 멤브레인 산기관에서의 기포 크기를 예측할 수 있다.

이와 같이, 기포 크기를 비교하는 것은 활성슬러지가 부상분리조로 유입되었을 경우, 고액분리가 완벽히 되어 상층부에는 고농도의 농축슬러지를 형성하고, 하층부에는 깨끗한 처리수층을 형성하도록 하기 위함이다. 따라서, 실험실 규모의 실험을 통해 천매암과 알루미나 재료로 제조된 세라믹 멤브레인 산기관의 고액분리 효율을 측정하였다. 운전 조건은 연속식으로서, 공기압은 활성슬러지의 고액분리가 잘 형성되는 조건인 1.8kgf/cm^2 로 동일하게 하였으며, 부상분리조에 유입되는 MLSS 농도는 약 $2,000\sim 10,000\text{mg/L}$ 로 변화시키고, 유출수의 SS 농도를 측정하였다. Fig. 5에서와 같이, 알루미나 세라믹 멤브레인 산기관은 유출수의 SS 농도를 낮게 유지할 수 있는 것으로 보아, 고액분리 효율이 우수함을 확인할 수 있었으며, 유출수의 SS 농도는 유입 MLSS 농도에 관계없이 5mg/L 이하의 수질을 항상 달성하였다. 반면에, 동일압력에서 기포의 크기가 큰 천매암 세라믹 멤브레인 산기관은 유입 MLSS의 농도가 높아지면, 유출수의 SS 농도가 10mg/L 이상으로 급격히 증가하는 것으로

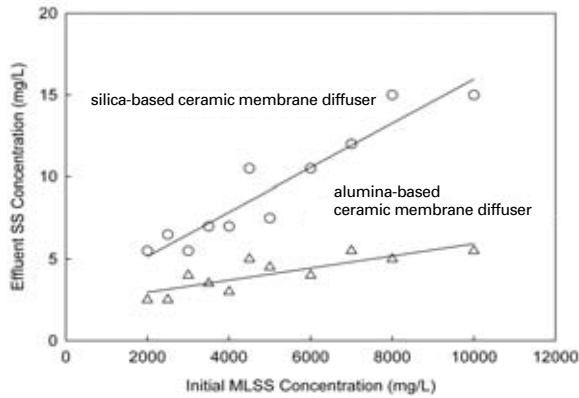


Fig. 5. Comparison of separation efficiencies by using two ceramic membrane diffusers.

보아 고액분리 효율이 다소 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 FE-SEM에서의 결과와 같이, 세라믹 멤브레인 산기관의 공극이 크고 발생기포의 크기가 크면 슬러지를 부상시키는 데 있어서 효율이 감소하는 것을 의미한다.

3.2. 고액분리 효율

본 연구결과는 파일럿 플랜트에서의 운전 결과로서, 슬러지 고액분리 효율 및 생물반응조 내 MLSS 농도 변화를 나타내었다. 부상분리조는 실험실 연구결과 효율이 우수한 알루미늄 세라믹 멤브레인 산기관을 사용하였으며, 공기압은 1.8kgf/cm²로 유지하였다. 부상분리조에서는 농축 슬러지를 고농도로 확보하는 것이 매우 중요하다. 하지만, 부상분리 시, 상층부에 형성된 고농도 농축슬러지는 스키머를 작동하여 물과 함께 혼합되어 전탈질로로 이송되므로 농축 슬러지 농도가 아닌 반송 슬러지의 농도가 중요하다. Fig. 6에서와 같이, 유입 MLSS 농도가 3,000mg/L 이상에서 농축 슬러지는 20,000mg/L 이상 생성되어 반송 슬러지의 농도는 15,000mg/L 내외로 유지할 수 있다. 반면, 유입 MLSS 농도가 3,000mg/L 이하에서는 10,000mg/L 정도의 슬러지 반송이 일어나므로, 중력식 침전방식과 크게 다를 바가 없는 것을 확인할 수 있다.

이러한, 고농도 슬러지 반송을 통해 BNR 운영 시 필요한 생물반응조 내 MLSS 농도를 고농도로 유지할 수 있다. 초기 운전에는 0시 하수처리장 내 반송 슬러지를 식중하여 생물반응조를 시운전하고, 유입수의 유입과 폭기, 내부순환을 통해 슬러지 안정화를 유도하였다. 부상분리를 통한 고액분리를 시작하면서, 반송 슬러지는 생물반응조로 반송되어 생물반응조 내 MLSS가 서서히 증가하는 것을 알 수 있으며 (Fig. 7.), 이는 질소 제거율의 상승을 도모하기도 하였다.

3.3. 처리 특성

2007년 10월부터 2008년 5월의 파일럿 운전 결과로서,

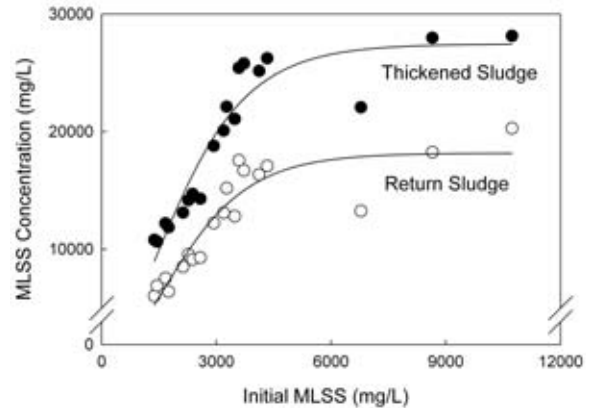


Fig. 6. Solid concentration of thickened and return sludge under various initial MLSS concentration.

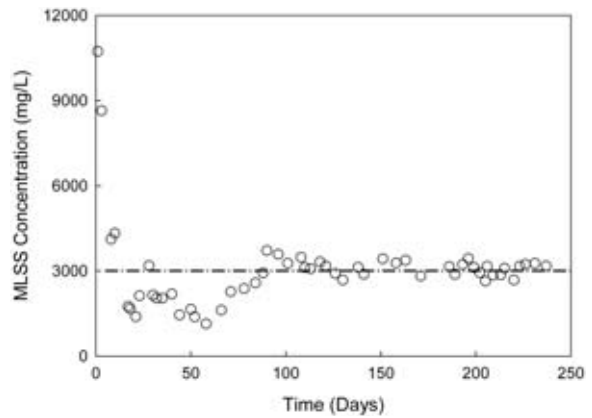


Fig. 7. Daily variation of MLSS concentration in the biomass reactor.

BOD₅, SS 등의 유기물과 질소, 인의 영양염류 처리 특성을 정리하였다. 유입원수는 처리장의 1차 침전조를 거쳐 파일럿 시설로 유입되는데, 하수만이 아닌 주변 산업단지 폐수 등이 함께 유입되어 유입 BOD₅ 농도가 상당히 낮다. Table 2에서와 같이, 유입수 BOD₅ 농도는 23.5 ~ 72.3mg/L로 평균 60.6mg/L이며, 유출수 BOD₅ 농도는 1.1 ~ 8.6mg/L로 평균 3.8mg/L를 나타내었다. 한편, 유입 SS 농도는 41.0 ~ 89.0mg/L로 평균 66.7mg/L이며, 유출수 SS 농도는 1.2 ~ 8.4mg/L로 평균 3.4mg/L를 나타내었다. 이는 방류수 수질기준의 BOD₅ 10mg/L 이하, SS 10mg/L 이하의 기준을 만족하며, AF-BNR 공정의 수질목표인 BOD₅ 5mg/L 이하, SS 5mg/L 이하의 기준을 만족할 수 있었다.

Table 2. Water quality of the pilot AF-BNR process during experimental period

	Influent Concentration (mg/L)	Effluent Concentration (mg/L)	Removal Efficiency (%)
BOD ₅	23.5 ~ 72.3 (60.6)	1.1 ~ 8.6 (3.8)	84.8 ~ 97.0 (93.6)
SS	41.0 ~ 89.0 (66.7)	1.2 ~ 8.4 (3.4)	84.4 ~ 98.2 (94.6)
T-N	32.8 ~ 48.3 (40.9)	6.1 ~ 17.3 (9.7)	65.9 ~ 86.2 (75.9)
T-P	2.5 ~ 7.6 (5.4)	0.5 ~ 4.1 (1.6)	37.9 ~ 89.8 (75.2)

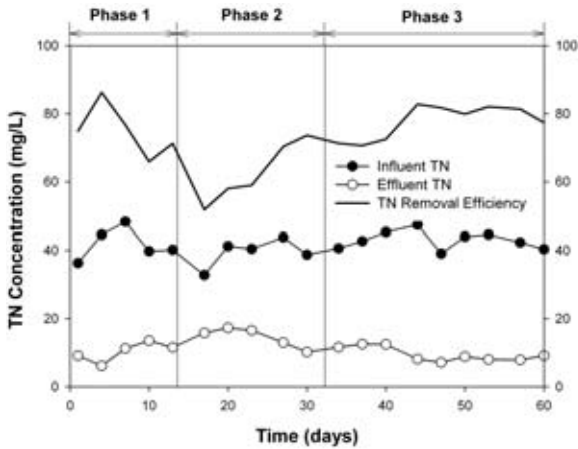


Fig. 8. Nitrification study results under various intermittent aeration period.

질소의 경우, 유입 T-N 농도는 28.5 ~ 48.3mg/L로 평균 40.9mg/L이며, 유출 T-N 농도는 6.1 ~ 17.3mg/L로 평균 9.7mg/L를 나타내었다. 질소 제거의 경우, 동절기를 거치며 수온에 의한 영향과 폭기 주기 변화에 따른 질소 제거 효율 관찰 실험을 수행하였으며, 공정의 최적 운전인자를 찾기 위한 연구를 수행하였다. 질소 제거효율에 대한 안정성을 확보하고, 간헐폭기조 내 폭기 주기의 변경을 통해 질소 제거효율을 향상시키고자 하였다. 질소 제거효율 향상을 위해 약 2개월간의 운전 기간 동안 간헐폭기조 내의 교호 간헐폭기 주기를 변경하여 질소 제거효율면에서 가장 우수한 운전 모드를 선정하고자 하였다. 폭기 주기(폭기/비폭기 시간)에 따른 질소 제거효율 결과는 Table 3과 Fig. 8과 같다.

하수고도처리에서 질소의 제거는 상당히 중요한 부분으로써, 질산화를 통한 생물학적 질소 제거는 반드시 확인해야 한다. 이는 공정별 암모니아성 질소 농도의 감소여부를 측정하여 질산화 유무를 판단하며, NO₃-N 및 NO₂-N 측정 결과로 물질수지분석을 통해 검증할 수 있다. 이는 폭기, 비폭기의 적정 주기를 통해 질산화와 탈질화를 유도한 것이며, NH₄-N의 농도가 공정을 거치면서 점차 감소하는 것으로 보아 질산화가 양호하게 진행되는 것을 알 수 있다. 구체적으로, NH₄-N는 간헐폭기조 내에서 질산화 미생물이 산화하여 NO₂-N와 NO₃-N로 전환되고, 비폭기시 무산소 조건에서 탈질화되는 것이다. 한편, 부상분리조를 거쳐 최종 유출수의 NH₄-N농도는 평균 2.2mg/L를 나타냈으며, 이는

Table 3. Removal efficiency of total nitrogen under various intermittent aeration period.

Operating Condition	Phase 1 (30/30min)	Phase 2 (60/60min)	Phase 3 (45/45min)
Influent T-N Conc(mg/L)	41.8	39.2	42.8
Effluent T-N Conc(mg/L)	10.3	14.6	9.5
T-N Removal Efficiency(%)	75.0	62.6	77.8

슬러지 내 SS 성분이 미세기포를 통해 고액분리되면서 일부 NH₄-N도 분리, 제거되기 때문이다. 한편, 무산소 조건인 전탈질조에서 유입수 내 포함된 NO₂-N의 농도보다 소량 증가된 0.2 ~ 0.5mg/L 정도의 NO₃-N이 측정되는데, 이는 부상분리조 내 형성된 농축 슬러지 내에 함유된 미세기포(산소)가 반송되기 때문이다. 무산소 조건인 전탈질조에서 NO₂-N, NO₃-N은 인 방출 반응을 저해하는 요소로 알려져 있지만, 저해를 우려할 만한 농도가 3mg/L 이상이므로 본 공정에서는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

한편, 유입수의 T-P 농도는 2.5 ~ 7.6mg/L로 평균 5.4mg/L이며, 유출수 T-P 농도는 0.5 ~ 4.1mg/L로 평균 1.6mg/L를 나타내었다. 평균 제거율은 75.2%이며, 목표수질인 0.5mg/L 이하를 만족하지 못하였다. 하지만, 유입수 질에 비해 제거율이 상당히 높은 편이며, 이는 전탈질조(무산소 조건)에서 예상보다 많은 양의 인 방출이 일어나기 때문인 것으로 판단된다. AF-BNR 공정은 인 제거를 목적으로 하지 않고, 추가적인 처리를 도입해야 목표수질을 달성할 수 있을 것이다. 본 연구기간동안의 BOD/T-P 비가 낮아 처리가 어려웠지만, 산업폐수 등이 유입되지 않고 하수만이 유입되어 고농도의 유기물이 확보되는 경우, 인의 제거는 추가 공정없이 제거가능할 것으로 판단된다.

3.4. 경제성 분석

본 공정의 상용화를 위한 노력으로 기존 하수처리시설의 처리방식인 중력식 침전방식과 부상분리 방식에 대한 경제성 분석을 일 60,000m³ 처리규모 실 하수처리장을 대상으로 경제성 분석을 실시하였다. 경제성 분석은 하수처리장의

Table 4. Cost analysis for air flotation process and gravity sedimentation

(단위 : 천원)

	Air flotation	Gravity sedimentation	Advantages
1. Lands	1,560,000	4,680,000	(+) 31억원
2. Total Capital costs	5,159,000	7,245,000	(+) 20억원
Civil/Architecture	1,746,000	5,240,000	
Mechanics/Pipes	2,860,000	1,480,000	
Electric supply	553,000	525,000	
3. O&M costs	90,224	81,492	(-) 870만원/년
Humans	39,000	39,000	
Electric power	44,959	37,867	
Chemicals	3,500	2,000	
Others	2,765	2,625	
4. Unit cost (sedimentation tank)	16.88 won/m ³	17.80 won/m ³	(+) 0.92won/m ³
5. Thickening tank	421,525	842,168	(+) 4억원
Lands	325,000	650,000	
Capital costs	55,891	110,900	
O&M costs	40,634	81,268	

설치 및 유지관리비용을 산정한 결과이며, 부지비는 경기 P 하수처리장을 기준으로 하여 m^2 당 1,625,000원으로 동일하게 책정하였다. 내구년한은 토목·건축공사 30년, 기계·배관 및 전기·계장공사는 각각 15년을 적용하였으며, 최근 5년간 지자체 발주사업 41개소 처리시설의 공사비를 토대로 물가상승을 등을 고려하여 소요비용을 분석한 자료를 활용하였다(환경부, 2001). Table 4에서와 같이, 공기부상방식으로 설치할 경우에 총 시설비, 부지 소요면적, 처리단가, 농축조 설비 등에서 중력식 침전방식에 비해 경제성이 우수한 사실을 확인할 수 있다. 특히, 부지 소요면적이 1/3 수준으로 절감할 수 있어 추가적인 경제적 이익을 창출할 수 있는 신개념 공법으로 판단된다. 반면, 유지관리비는 연간 약 870만원이 더 소요되는 것으로 분석되었으나, 용지비 약 31억원, 시설비 약 20억원의 이익을 가져오며, 농축설비 약 4억원을 절감할 수 있어 매우 경제적이다. 한편, 일반 재래식 하수처리공정을 고도처리로 retrofitting 할 경우에도 추가 부지면적이 없이도 시공이 가능하며, 이 경우에는 잉여 부지면적을 다용도로 활용할 수 있는 장점이 있다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 하수처리장의 retrofitting을 위한 AF-BNR 공법의 적용성을 판단하기 위해 일 100 m^3 처리용량의 파일럿 연구를 수행하였으며, 공기부상방식에 핵심으로 사용되는 세라믹 멤브레인 산기관에 대한 성능을 평가하였다. 천매암 및 알루미늄 재료를 원료로 하는 세라믹 멤브레인 산기관을 대상으로 기포 특성을 조사한 결과, 알루미늄 재료를 원료로 하는 세라믹 멤브레인 산기관은 보다 미세한 기포를 생성하였으며 FE-SEM 촬영을 통해 공극 크기가 작은 것을 확인하였다. 활성슬러지의 고액분리 효율을 평가한 결과, 동일한 압력에서 알루미늄 세라믹 멤브레인 산기관은 유입하는 MLSS 농도에 관계없이 유출수의 SS 농도를 5mg/L 이하로 항시 유지 가능하였다.

파일럿 연구결과, 유입 MLSS 농도가 3,000mg/L 이상에서 농축 및 반송슬러지가 각각 20,000, 15,000mg/L 이상 생성되어 중력식 침전방식보다 약 2배이상 고액분리가 가능하였다. 공기부상법을 통해, 고농도로 생성된 농축 및 반송슬러지는 생물반응조 내 MLSS 농도를 항시 3,000mg/L 이상 유지가능토록 하였다. 일 100 m^3 처리규모 AF-BNR 공정의 처리 특성을 분석한 결과, 유출수의 BOD₅, SS 농도는 각각 3.8, 3.4mg/L이며, 유출수의 TN 농도는 9.7mg/L, TP 농도는 1.6mg/L를 나타내어 방류수 수질기준 달성에 문제가 없었다. 한편, 간헐폭기조 내 폭기 주기 변경을 통해 질소제거효율을 향상시키고자 하였으며, 폭기 주기는 45분/45분으로 가동 시에 가장 높은 질소제거효율을 보였다. 한

편, AF-BNR 공정의 상용화를 위해 기존 중력식 침전방식과 비교하여 경제성을 분석한 결과, 공기부상방식은 중력식 침전방식에 비해 시설비, 용지비, 처리단가, 농축조 설비비 등에서 매우 경제적이었으며, retrofitting 시에도 부지면적을 1/3이상 절감할 수 있어 그 활용성이 우수한 것으로 판단된다.



사사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project 수행기관인 수처리선진화사업단 (과제번호: I²WATERTECH 04-5)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 환경부 (2001) 주택단지 내 상수·오수 발생량 원단위 산정 및 하수처리시설 소요비용연구
2. 환경부 (2007) 하수도 통계
3. American Water Works Association (1999) *Water quality and treatment*, 5th Ed. p.7.47-7.61, McGraw-Hill.
4. EPA (1974) *Process design manual for sludge treatment disposal*
5. Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X. and Williams, R. A. (1995) *Particle deposition and aggregation: measurement, modeling and simulation*, 1st Ed. p. 347-360, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford.
6. Burns, S. E., Yiacoumi, S. and Tsouris, C. (1997) Microbubble generation for environmental and industrial separations, *Separation and Purification Technology*, 11, pp.221-232.
7. Choi, Y. G. and Chung, T. H. (2000) Effects of humus soil on the settling and dewatering characteristics of activated sludge, *Water Science and Technology*, 42(9), pp.127-134.
8. Choi, Y. G., Chung, T. H. and Yeom, I. T. (2005) Improvement of the thickening characteristics of activated sludge by electroflotation, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 19(3), pp.295-300.
9. Dockko, S. and Han, M. Y. (2004) Fundamental characteristics of bubbles and ramifications for the

- flotation process, *Water Science and Technology*, 50(12), pp.207-214.
10. Edzwald, J. K. (1995) Principles and applications of dissolved air flotation, *Water Science and Technology*, 31(3-4), pp.1-23.
 11. Han, M. Y., Park, Y. H. and Yu, T. J. (2002) Development of new method of measuring bubble size, *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(2), pp.77-83.
 12. Krofta, M. and Wang, L. K. (1982) Potable water treatment by dissolved air flotation and filtration, *Journal of AWWA*, 74(6), pp.305-310.
 13. de Nardi, I. R., Fuzi, T. P. and Del Nery, V. (2008) Performance evaluation and operating strategies of dissolved-air flotation system treating poultry slaughterhouse wastewater, *Resources, Conservation and Recycling*, 52, pp.533-544.
 14. Park, C., Hong, S. -W., Maeng, J., Lee, S., Choi, Y. -S. and Moon, S. -Y. (2006) Thickening characteristics of activated sludge by air flotation process, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 20(5), pp.747-753.
 15. Tavery, M. A. (1979) DAF prove-out 12-years running, *Water & Sewage Works*, 126(1), pp.55.