

BNR에 의한 하수의 고도처리에 미치는 NH₃ 스트리핑 전처리의 영향

서정범[†] · 안광호^{*}

안양대학교 환경공학과

^{*}한국건설기술연구원

Effect of Pre-NH₃ Stripping on the Advanced Sewerage Treatment by BNR

Jeong-Beom Seo[†] · Kwang-Ho An^{*}

Department of Environmental Engineering, Anyang University

^{*}Korea Institute of Construction Technology

(Received 24 February 2006, Accepted 19 July 2006)

Abstract

The biological nutrient removal from domestic wastewater with low C/N ratio is difficult. Therefore, this study was performed to increase influent C/N ratio by ammonia stripping without required carbon source and for improving treatment efficiencies of sewerage by the combination process of ammonia stripping and BNR (StripBNR). The results of this study were summarized as follows. BOD removal efficiencies of BNR and StripBNR were 95.3% and 93.2%, respectively. T-N and T-P removal efficiencies of BNR were 53.3% and 40.8%, respectively. T-N and T-P removal efficiencies of StripBNR were 72.8% and 62.9%, respectively. Concentrations of NH₃-N, NO₂-N and NO₃-N at BNR effluent were 0.03 mg/L, 0.08 mg/L and 9.12 mg/L, respectively. On the other hands, concentrations of NH₃-N, NO₂-N and NO₃-N at StripBNR effluent were 5.79 mg/L, 0.01 mg/L and 0.14 mg/L, respectively. Consequently, influent C/N ratio of BNR process was increased by ammonia stripping. Removal efficiency of T-N and T-P was improved about 20% by the process of StripBNR.

keywords : Ammonia stripping, Biological nutrient removal (BNR), C/N ratio, Removal of T-N and T-P

1. 서론

우리나라 전체 오·폐수 발생량의 약 66%를 차지하며, 질소와 인 등 많은 양의 영양염류를 포함한 생활하수는 인구가 증가함에 따라 발생량이 증가되고 있다(환경부, 2005a). 이러한 생활하수가 처리되지 않고 방류될 경우 하천, 호소, 해안 등으로 유입되어 부영양화와 수질오염을 심화시킬 수 있다. 이에 따라 수질환경보전법에서는 모든 하수종말 처리시설 등의 공공시설에 대한 방류수 수질기준이 질소와 인에 대하여 각각 20 mg/L 및 2 mg/L로 강화될 것이므로 하수처리장 및 오수처리장의 고도처리공법 적용이 시급한 실정이다(환경부, 2005b).

질소를 제거하기 위한 처리법에는 암모니아 스트리핑, 파과점 염소화, 선택적 이온교환 등의 물리·화학적 처리 방법(Powers et al., 1987; Metcalf et al., 1991; Reynolds et al., 1996)과 질산화/탈질에 의한 생물학적 처리방법이 있다.

생물학적인 BNR(Biological Nutrient Removal) 공법으로는 Bardenpho, Phostrip, A²O, UCT, Phoredox, SBR, VIP 공법 등으로 국내에서도 이들을 응용한 변법들이 연구 및 개발되고 있다(Burdick et al., 1982; Tetreault et al., 1986;

Daigger et al., 1988; USEPA, 1993; Arora et al., 1985; Silverstein et al., 1983; 윤, 2001).

현재 운전중인 국내 하수처리장의 대부분은 유입 수질이 설계 수질에 비해 낮으며, 유기물 농도에 비해 상대적으로 질소와 인의 농도는 높아 낮은 C/N 비를 나타냄으로써 하수의 고도처리 효율이 적정수준을 유지하지 못하는 경우가 있다(정, 1997). 이러한 낮은 C/N 비를 높이는 방법에는 메탄올, 에탄올, 아세테이트, 글루코오스 등의 외부탄소원을 주입하여 C/N 비를 높이는 방법과 폐수중의 질소 성분을 제거함으로써 C/N 비를 높이는 방법이 있다.

본 연구에서는 외부탄소원의 주입 없이 암모니아 스트리핑을 이용하여 BNR의 전 단계에서 질소를 일부 제거함으로써 어느 정도 C/N 비를 개선하고 전체적인 공정에서의 고도처리 효율을 향상시킬 수 있는지를 규명하고자 하였다.

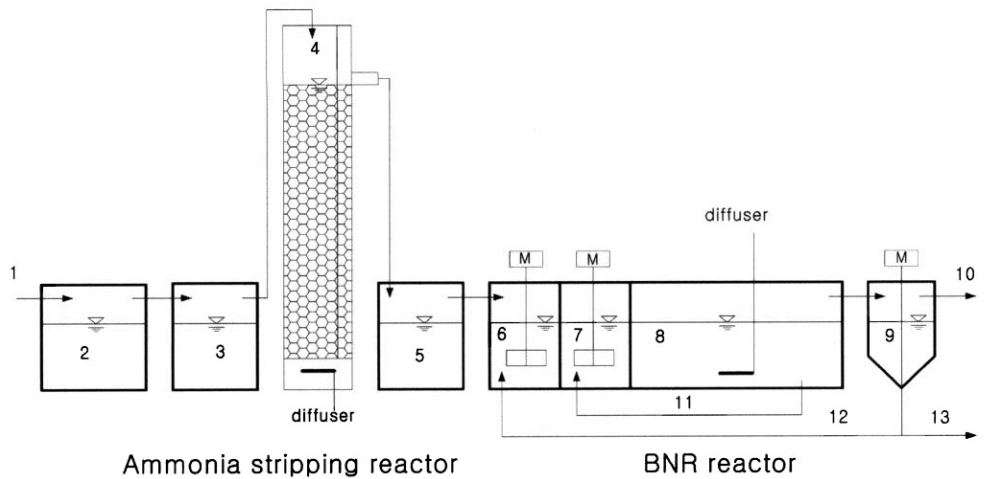
2. 재료 및 방법

2.1. 실험 장치

본 연구에 사용한 실험장치는 암모니아 스트리핑 반응조와 BNR 반응조로 구성되어 있으며, 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

암모니아 스트리핑 반응조는 유효용적이 20 L인 원통의 Column 형태로 아크릴로 제작되었으며, 폐수와 공기의 접

[†] To whom correspondence should be addressed.
jbseo@anyang.ac.kr



1. Influent 2. Sedimentation tank 3. 5. pH controll tank 4. Stripping reactor
6. Anaerobic tank 7. Anoxic tank 8. Aerobic tank 9. Clarifier
10. Effluent 11. Internal recycle 12. Return sludge 13. Waste sludge

Fig. 1. Schematic diagram of reactor.

Table 1. Operational conditions and scale of BNR process

Process	HRT (hr)	MLSS Concentration (mg/L)		Scale (cm)	Effective volume (L)
		BNR	StripBNR		
Anaerobic tank	1.6	1340 ~ 2320	1420 ~ 1720	10.6W×10.6L×17H	1.2
Anoxic tank	1.6	1700 ~ 2300	1380 ~ 2180	10.6W×10.6L×17H	1.2
Aerobic tank	4.8	1820 ~ 2540	1220 ~ 2020	10.6W×32.0L×17H	3.6
Clarifier	2	-	-	7Ø×25H	2

촉을 좋게 하기 위해 벌집 모양의 플라스틱 담체 250개를 채웠다.

BNR 반응조는 아크릴로 2개의 반응조를 동일한 크기로 제작하였는데, 혐기조, 무산소조, 호기조 및 최종침전조로 구성되어 있으며 장치의 규격과 운전조건은 Table 1과 같다.

혐기조, 무산소조, 호기조 및 최종침전조의 유효용적은 각각 1.2, 1.2, 3.6 및 2 L로 하였으며, 여러 연구자들의 연구 결과를 참조하여 혐기조와 무산소조는 부유고형물이 침전되지 않도록 각각 30 rpm으로 교반시켰고, 슬러지가 침전조의 벽면에 부착되는 것을 방지하고 침전이 용이하게 하기 위하여 최종침전조의 교반기 회전속도는 1 rpm으로 하였다(홍 등, 1996; 윤 등, 1999). 원수의 주입과 내부반송은 Master Flux Tubing Pump(Model CP-90601, Model 7518-00)를 사용하였다.

2.2. 실험방법

스크린을 거친 A시의 하수를 실험에 사용하였으며, A하수종말처리장의 반송슬러지를 식종하여 BNR 공정에 이용하였다. 암모니아 스트리핑 과정이 없는 BNR 공정과 암모니아 스트리핑 과정이 있는 StripBNR 공정을 비교 실험하였다.

BNR 공정은 폭기조의 폭기량, HRT 등이 동일한 조건에서 2개의 반응조가 이용되었는데, 내부반송율은 유입수의 200%, 외부반송율은 유입수의 50%로 운전하였다. BNR 공

정의 HRT는 Table 1에서와 같이 혐기, 무산소 및 호기조가 각각 1.6 hr, 1.6 hr 및 4.8 hr이었으며 침전조의 HRT는 2.0 hr으로 하였다. 한 개의 반응조(BNR)는 암모니아 스트리핑 과정이 없는 반응조로서 원수를 침전조에서 부유물질을 침전시켜 상등액을 유입수로 사용하였다. 나머지 한 개의 반응조(StripBNR)는 암모니아 스트리핑 과정이 있는 반응조로서, 암모니아 스트리핑 반응조는 NaOH를 이용하여 pH를 10 이상으로 높이고 HRT는 24 hr으로 하였다. 공기 공급량은 30 L/min로 하였으며, 공기와 접촉을 용이하게 하기 위해 250개의 플라스틱 담체를 채워주었다. 암모니아 스트리핑 과정을 거친 유출수는 H₂SO₄로 pH를 약 5.2로 조절하여 BNR 공정의 유입수로 사용하였다. pH를 5.2로 조절하여 유입수로 사용한 것은 pH를 7로 중화하여 BNR 공정에 도입할 경우, BNR 공정의 폭기조에서 거품이 다량 발생하며 폭기조의 pH가 8.7 이상으로 질산화의 적정 pH인 7.2~8을 유지하지 못하므로 폭기조의 pH가 질산화 조건에 맞도록 유입수의 pH를 5.2로 유지하였다. BNR 공정의 F/M 비는 0.15~0.35 kgBOD/kgMLSS·day였으며, StripBNR 공정에서는 0.11~0.24 kgBOD/kgMLSS·day로 운전되었다. 생물반응조에서의 SRT는 NH₃ 스트리핑이 없는 반응조가 8.08 day, StripBNR이 7.40 day로 각각 나타났다.

시료의 분석은 수질오염공정시험방법(환경부, 2001)에 따라 분석하였으며, BNR 반응조 실험은 운전개시 20일 이후

부터 정상상태에 도달하여 분석을 시작하였다. pH는 pH meter(Orion model 350A)를 이용하여 측정하였으며, T-N, T-P, NH₃-N, NO₂-N 및 NO₃-N은 UV-Spectrometer(Spectronic Genesys 5, Milton Roy)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 2는 BNR 공정과 StripBNR의 조합공정에 대한 실험 결과를 요약한 것으로 원수를 BNR공정에 직접 유입시킨 경우, BOD 제거율은 95.3%로 StripBNR에서의 BOD 제거율 93.2%에 비해 다소 제거율이 높았다. COD 제거율에 있어서도 BNR, StripBNR이 각각 87.4%, 74.6%로 BNR의 제거율이 다소 높은 경향을 나타내었는데, 이는 BNR과 StripBNR의 생물반응조 내 F/M 비가 각각 평균 0.15~0.35 kgBOD/kgMLSS·day 및 0.11~0.24 kgBOD/kgMLSS·day로서 처리조건에 다소의 차이가 있었기 때문인 것으로 사료된다. StripBNR 공정에서 평균 유입수의 BOD 및 COD 농도는 각각 177.0 mg/L 및 96.5 mg/L인데 스트리핑을 거친 후의 평균 BOD 및 COD 농도가 각각 94.8 mg/L 및 76.0 mg/L로서 암모니아 스트리핑 반응조에서 BOD 및 COD가 각각 약 46.4% 및 21.2% 제거됨을 알 수 있다. 이는 비록 암모니아 스트리핑 반응조가 생물 반응조는 아니지만 긴 체류시간의 폭기로 인하여 생분해가 일어난 것으로 사료되며, 예비실험 결과 암모니아 스트리핑 반응조 내의 pH를 9.7로 조금 낮게 운전한 경우 반응조 내의 미생물 성장으로 인하여 이러한 생분해 현상이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

T-N의 제거율에 있어서는 StripBNR이 전단계 NH₃ 스트리핑에서 많은 질소를 제거함으로써 전체공정의 제거율이 72.8%로 53.3%인 BNR에 비해 제거율이 높았다. NH₃-N의 경우 BNR 반응조가 질산화가 잘 일어나 처리수의 NH₃-N 농도 0.03 mg/L를 나타내었으며, StripBNR의 경우 BNR에 비해 높은 5.79 mg/L를 나타내었다. NO₂-N은 BNR, StripBNR이 거의 0값을 나타내어 유입수와 처리수의 아질산성 질소는 없는 것으로 나타났다. NO₃-N은 유입수에서는 0을 나타내었고, BNR 반응조에서 처리수는 9.12 mg/L를 나타내었으며, StripBNR에서는 0.14 mg/L로 낮은 값을 나타내었다. T-P는 StripBNR의 제거율이 62.9%로 BNR의 제

거율 40.8%에 비해 높은 값을 나타내었다.

따라서 BNR 공정과 StripBNR의 조합공정을 비교해 보면, BOD와 COD 제거율에 있어서는 BNR에서의 제거율이 다소 높았으나, T-N과 T-P 제거율에 있어서는 StripBNR이 BNR보다 높은 것으로 나타났다.

Fig. 2는 시간경과에 따른 BOD의 농도 변화를 나타낸 그림으로 원수에 비해 BNR과 StripBNR 공정 모두 처리수의 BOD 농도가 12 mg/L 이하로 낮아 높은 제거율을 나타내었다. 원수에서 암모니아 스트리핑을 거친 BOD 농도의 경우, 약 95 mg/L로 암모니아 스트리핑을 거친 후 상당량의 BOD가 제거됨을 알 수 있었다.

Fig. 3은 시간경과에 따른 COD의 농도 변화를 나타낸 그림으로 BNR과 StripBNR 공정 모두 낮은 COD 농도를

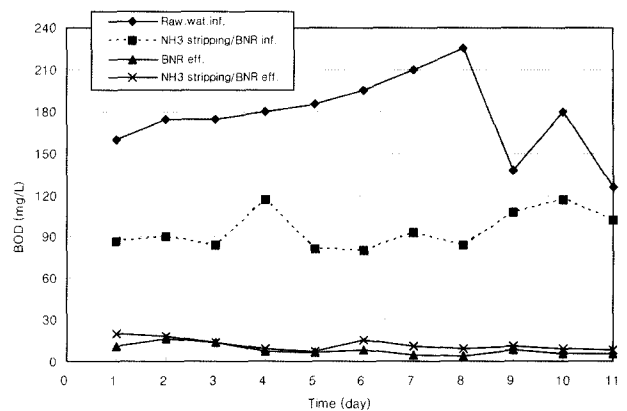


Fig. 2. BOD concentration for BNR and StripBNR.

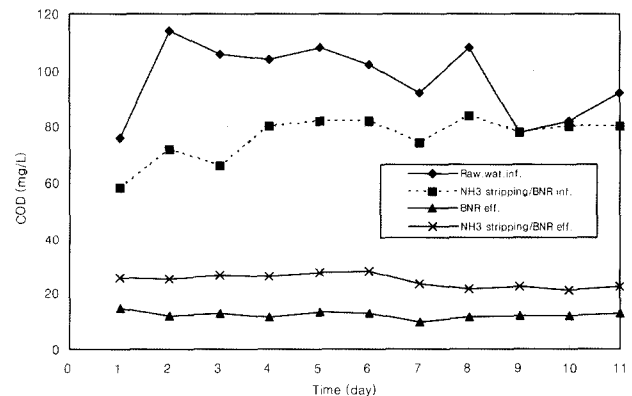


Fig. 3. COD concentration for BNR and StripBNR.

Table 2. Summary of the experimental results for BNR and StripBNR (HRT is 24 hr and air supply is 30 L/min of ammonia stripping reactor)

Reactor	BNR			StripBNR		
	Inf. (mg/L)	Eff. (mg/L)	Rem. eff. (%)	Inf. (mg/L)	Eff. (mg/L)	Rem. eff. (%)
BOD	177.0	8.3	95.3	177.0(94.8)	12.0	93.2
COD _{Mn}	96.5	12.2	87.4	96.5(76.0)	24.5	74.6
T-N	43.8	20.4	53.3	43.8(18.9)	11.9	72.8
NH ₃ -N	19.39	0.03	-	19.39(6.49)	5.79	-
NO ₂ -N	0.04	0.08	-	0.04(0.02)	0.01	-
NO ₃ -N	0	9.12	-	0(0.01)	0.14	-
T-P	5.20	3.08	40.8	5.20(3.58)	1.93	62.9

() : Concentrations after ammonia stripping

나타내어 BOD와 유사한 경향을 나타내었다. StripBNR의 처리수 COD 농도에 비해 BNR의 처리수 COD 농도가 다소 낮은 경향을 보였다.

Fig. 4는 시간 경과에 따른 T-N의 농도 변화를 나타낸 그림으로 원수에 비해 BNR, StripBNR 모두 낮은 T-N 농도를 나타내었다. 특히, 스트리핑을 거친 StripBNR의 T-N 농도는 약 12 mg/L로 BNR의 약 20 mg/L에 비해 매우 낮은 농도를 나타내었다.

Fig. 5는 시간 경과에 따른 NH₃-N의 농도 변화를 나타낸 것으로 BNR은 대부분 0값을 나타내어 질산화는 잘 일어남을 알 수 있다. StripBNR의 경우는 스트리핑 후 평균 BNR 유입수의 NH₃-N 농도와 처리수 NH₃-N 농도가 각각 6.49 mg/L 및 5.79 mg/L로 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 스트리핑을 거친 후의 평균 T-N 농도가 18.9 mg/L인 점을 미루어 볼 때 생물반응조에서 유기질소가 암모니아성 질소로 변환되는 양이 있고 암모니아성 질소가 질산화 및 탈질에 의해 제거된 양과 유기질소가 암모니아성 질소로 변환된 양이 유사하였기 때문인 것으로 사료되나 처리수의 NH₃-N 농도가 평균 5.79 mg/L로 높은 것은 인위적으로 pH를 변화시키기 위해 스트리핑 반응조에서 NaOH를 사용하고 스트리핑 후 BNR 공정 전에 중화 목적으로 H₂SO₄를 사용하는 등이 질산화에 영향을 준 것으로 사료된다.

Fig. 6은 시간 경과에 따른 NO₂-N의 농도 변화를 나타낸 것으로 원수, StripBNR 유입수, BNR 처리수, StripBNR 처

리수 모두 아질산성 질소가 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 시간 경과에 따른 NO₃-N의 농도 변화를 나타낸 것으로 원수, StripBNR 유입수, StripBNR 처리수는 질산성 질소가 없는 것으로 나타났으며, BNR 처리수의 경우 질산화는 잘 일어나지만 탈질이 잘되지 않아 약 9 mg/L 정도로 높게 나타났다.

Fig. 8은 시간 경과에 따른 T-P의 농도 변화를 나타낸 것으로 StripBNR이 BNR에 비해 낮은 처리수 T-P 농도를 나타내었다. StripBNR의 경우 유입수의 평균 T-P 농도가 5.20 mg/L인데 스트리핑 반응조의 처리수가 평균 3.58 mg/L로 약 30% 제거되는 것으로 나타났다. 이는 인의 경우 기체 상태로 제거되는 물질이 아니므로 유입수 중에 함

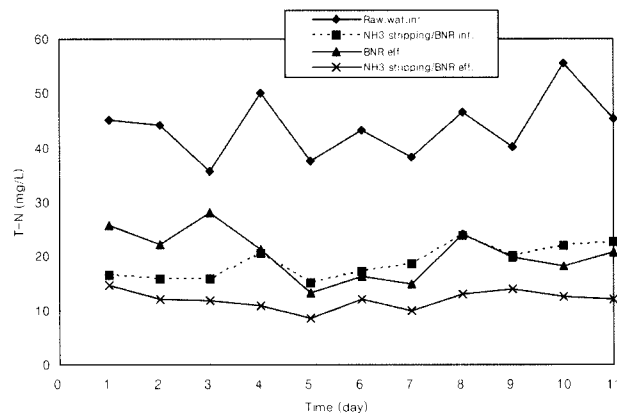


Fig. 4. T-N concentration for BNR and StripBNR.

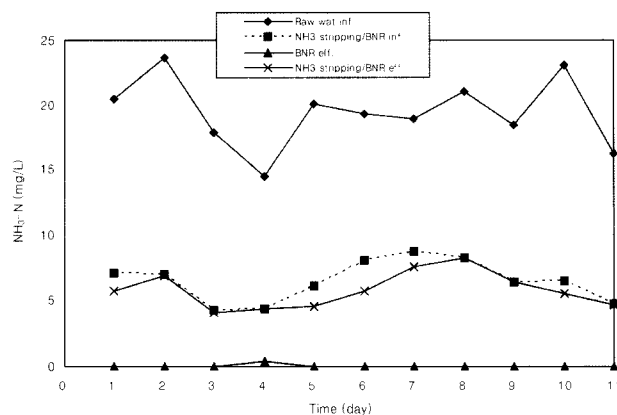


Fig. 5. NH₃-N concentration for BNR and StripBNR.

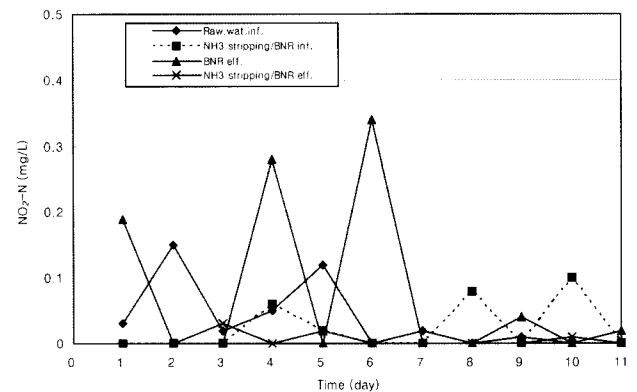


Fig. 6. NO₂-N concentration for BNR and StripBNR.

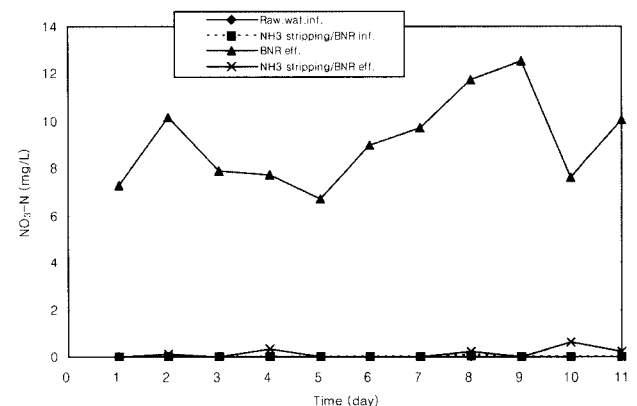


Fig. 7. NO₃-N concentration for BNR and StripBNR.

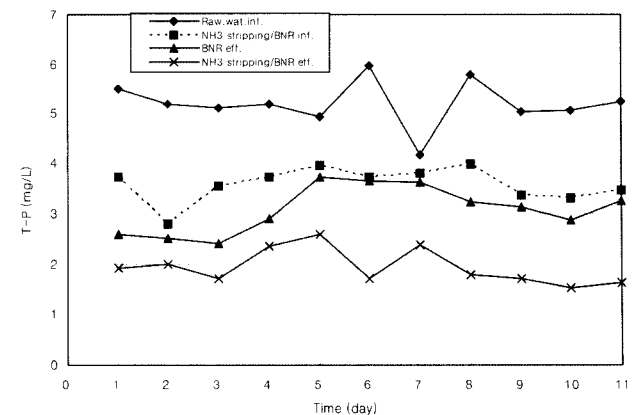


Fig. 8. T-P concentration for BNR and StripBNR.

유된 부유물질의 일부가 스트리핑 반응조 내의 담체 및 바닥에 축적되어 부유물질 중에 함유된 인이 제거되고, 비록 pH가 높으나 약간의 미생물이 담체에 부착되어 다소의 인을 섭취하는 것으로 사료된다. StripBNR 처리수의 T-P 농도는 1.52~2.58 mg/L 범위로 평균 1.93 mg/L를 나타내어 StripBNR 공정의 평균 T-P 제거율은 62.9%로 높았다. BNR 공정의 유입수 T-P 농도는 평균 5.20 mg/L이고 처리수의 T-P 농도는 2.41~3.72 mg/L 범위로 평균 3.08 mg/L를 나타내어 평균 40.8%의 제거율을 나타내었다. 따라서 BNR 공정과 StripBNR 공정의 전체적인 T-P 제거율을 비교해 볼 때 StripBNR의 제거율이 BNR의 제거율보다 22.1% 높게 나타났다.

Table 3은 암모니아 스트리핑 전과 암모니아 스트리핑 후의 C/N비를 비교한 것으로, 전체적으로 스트리핑 전 C/N비 3~4에서 스트리핑 후 C/N비 5~6으로 향상됨을 알 수 있었다.

Table 3. Compare with C/N Ratio Before and After Ammonia Stripping

Classification	BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	C/N Ratio
Before ammonia stripping	177.0	43.8	4.03
After ammonia stripping	94.8	18.9	5.03

4. 결론

암모니아 스트리핑 예비실험을 수행하고 BNR과 StripBNR의 비교 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) BOD는 BNR이 95.3%로 StripBNR의 93.2%보다 다소 높았으나, 두 반응조 모두 처리수의 BOD 농도가 12 mg/L 이하로 양호하였다.
- 2) T-N 및 T-P는 StripBNR이 72.8% 및 62.9%의 제거율로 BNR에서의 53.3% 및 40.8%에 비해 높은 제거 효율을 나타내었다.
- 3) BNR은 질산화는 잘되나 탈질율이 낮아 처리수의 NH₃-N, NO₂-N은 거의 없고 NO₃-N의 농도는 높았다. StripBNR은 NO₂-N, NO₃-N은 거의 없었으나, NH₃-N은 평균 5.79 mg/L로 나타났다.
- 4) C/N 비의 경우 암모니아 스트리핑 전과 암모니아 스트리핑 후가 각각 3~4 및 5~6으로 스트리핑 후의 C/N비가 향상되었다.

본 연구 결과 BNR 공정에 암모니아 스트리핑 공정을 도입함으로써 C/N 비를 높일 수 있었고, T-N 및 T-P의 제거율이 약 20% 정도 향상되었음을 알 수 있었다.

참고문헌

윤정미, 생물학적 방법을 이용한 영양염류 고도처리기술 동향조사 연구, 동국대학교 산업기술 환경대학원 석사학위논문 (2001).

윤조희, 이상훈, A²O공정을 이용한 생물막법에서 수리학적 체류시간 변화에 따른 유기물과 질소제거 특성, *한국수질보존학회지*, **15**(2), pp. 193-201 (1999).

정태학, 국내 하·폐수처리에 적용을 위한 고도처리기술의 평가, *수도*, **24**(5), pp. 45-61 (1997).

홍정선, 서정범, 윤조희, 유덕희, 김용석, 유재근, 서윤수, 파이롯트 규모의 혐기/무산소/호기 공법에 의한 오수처리, *한국수질보존학회지*, **12**(4), pp. 425-433 (1996).

환경부, 2001년 하수종말처리장 운영보고 (2001).

환경부, 수질오염공정시험방법 (2001).

환경부, 환경백서, p. 449 (2005a).

환경부, 환경통계연감, p. 467 (2005b).

Arora, M. L., Barth, E. F. and Margaret, B. U., Technology Evaluation of Sequencing Batch Reactor, *Journal WPCF*, **57**, pp. 867-875 (1985).

Burdick, C. R., Reffling, D. R. and Stensel, D. H., Advanced Biological Treatment to Achieve Nutrient Removal, *Journal WPCF*, **54**, pp. 1078-1086 (1982).

Daigger, G. T. and David, G., Enhanced Secondary Treatment Incorporating Biological Nutrient Removal, *Journal WPCF*, **60**, pp. 1833-1842 (1988).

Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 726-729 (1991).

Powers, S. E., Collins, A. G., Edzwald, J. K. and Dietrich, J. M., Modeling an Aerated Bubble Ammonia Stripping Process, *Journal WPCF*, **59**, pp. 92-100 (1987).

Reynolds, T. D. and Richards, P. A., *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, 2nd Ed., PWS Publishing Company, pp. 327-337 (1996).

Silverstein, J. and Schroeder, E. D., Performance of SBR Activated Sludge Process with Nitrification/Denitrification, *Journal WPCF*, **55**, pp. 377-384 (1983).

Tetreault, M. J., Benedict, A. H., Christopher, K. and Barth, E. F., Biological Phosphorus Removal : A Technology Evaluation, *Journal WPCF*, **58**, pp. 823-837 (1986).

U. S. EPA, *Manual Nitrogen Control*, U. S. EPA/625/R-93/010 (1993).