

파이롯트 규모의 BNR공법에 의한 도시하수의 질소 및 인 제거

Removal of Nitrogen and Phosphorus from Municipal Wastewater by a Pilot-scale BNR Process

김 영 철*

Young-Chur Kim*

경성대학교 공과대학 건설·환경공학부

(2007년 7월 30일 논문 접수; 2007년 10월 11일 최종 수정논문 채택)

Abstract

This study was conducted to investigate the removal efficiency of BOD and nutrient for the treatment of low strength municipal wastewater by a biological nutrient removal system. In this experiment, the effect of operating parameter including HRT of 7.0hr, BOD/TN ratios of 2.62~4.08, internal recycle of 50~300%, and return sludge of 50~100%, were studied during winter season. Efficiencies of organic matter and T-P removal and denitrification were not significantly affected by the change of temperature in winter season. However, the specific nitrification rate and nitrification efficiency decreased at low temperature. Besides, denitrification efficiencies increased with increasing BOD/TN ratios.

It was also found that the internal recycle and return sludge ratio below 50% is required for the effective denitrification of low strength municipal wastewater. With operating mode 4 of the optimum, the effluent BOD, T-N and T-P concentration were obtained to average 5.8, 14.6, and 0.84 mg/L, respectively.

The temperature-activity coefficient (θ) of specific nitrification rate, specific denitrification rate and specific phosphorus uptake rate were obtained 1.044, 1.017, 1.028, respectively.

Key words: BNR, Internal recycle, BOD/TN ratios, T-N, T-P

주제어: 영양염류제거, 내부반송, BOD/TN비, 총질소, 총인

1. 서 론

하·폐수처리장에서 질소와 인이 미처리된 상태로 방류되거나 처리효율이 낮은 상태로 하천이나 호수로 방류되며 정체수역의 경우에는 부영양화 현상으로 인

한 용수의 이용가치가 손상되어 이들의 적절한 관리가 필요한 실정에 있다. 우리나라의 경우 상수원으로 이용하고 있는 호수의 절반 이상이 이미 부영양화 상태이거나 부영양화 상태(공, 1996)로 진행되고 있어 수자원의 보호 및 확보의 차원에서도 커다란 문제점으로 대두되고 있다. 이에 정부는 1996년부터 총질소

*Corresponding author: Tel: +82-10-3302-5669, FAX: +82-51-315-0753, E-mail: yck4837@ks.ac.kr (Y.C. Kim)

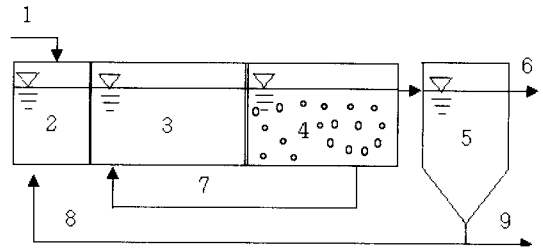
와 총인의 방류수 기준을 명시하고 규제하고 있으며, 2008년 1월 이후부터는 동절기를 제외한 계절에 총질소(TN)는 20mg/L 이하, 총인(TP)은 2mg/L 이하(환경부, 2005)로 방류수 기준을 한층 강화하고 있어 3차 고도처리에 대한 실용화 기술개발이 점차 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히, 우리나라 하수의 경우에는 하수관거의 정비미흡으로 인한 불명수의 유입 등으로 하수종말처리장의 유입 BOD 농도가 50 mg/L 이하로 운영되고 있는 처리장이 전체 하수종말처리장의 약 30%정도(환경부, 2006)인 것으로 알려져 있으며, 유입하수의 유기물 농도가 외국과 비교하여 낮은 실정에 있는 우리나라의 경우에는 외국에서 개발된 생물학적 질소·인 제거공법을 그대로 적용하여 안정적인 영양염류의 제거를 얻기에는 어려운 실정에 있다. 또한 우리나라 기존 하·폐수처리장의 대부분은 질소, 인 등의 영양염류를 제거하기 위한 고도처리 공정이 거의 고려되지 않아 우리나라 현실에 비추어 볼 때 기존 하수처리장의 생물학적 공정을 크게 변경하지 않으면서 고도처리를 운영해야 할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 하수처리장의 생물학적 공정을 크게 변경하지 않으면서 질소와 인 등을 제거할 수 있는 방법을 모색하기 위하여 유입하수의 유기물농도가 낮게 유입되고 있는 J시 하수처리장내에 Pilot Plant를 설치하여 연구를 수행하였다. Pilot Plant 운전기간 중 탄소원을 추가로 투입하지 않고 하수처리장의 유입하수를 사용하여 질소와 인의 제거를 효율적으로 달성하기 위한 실증적인 연구로서, 제거효율을 검증하기 위하여 유입수의 유기물 농도변화와 생물학적 반응조의 반송비 변화에 따른 처리효율 및 온도변화에 따른 처리성능을 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 실험장치

본 연구에 사용한 Pilot Plant는 J시 하수처리장 환경사업소 내에 설치하였다. Pilot Plant는 Fig. 1에 나타내었듯이 유기물제거와 질산화/탈질 및 인 제거를 위하여 혐기조/무산소조/호기조로 구성되어 있다. 실험에 사용한 파이롯트 반응조는 유효용적이 5.83m³ 규모인 철제형 반응조로 하절기부터 이듬해 봄까지



1. Influent 2. Anaerobic tank 3. Anoxic tank 4. Aerobic tank
5. Sedimentation tank 6. Effluent 7. Internal recycle
8. Return sludge 9. Waste sludge

Fig.1. Schematic of the facilities for field experiment

Table 1. Operation conditions for pilot plant

Parameter	Operation Variables	
Influent Flow rate, m ³ /d	18~22(20)	
Reactor	Anaerobic	0.83
Volume(m ³)	Anoxic	2.5
	Oxic	2.5
HRT(hr)	Anaerobic	1
	Anoxic	3
	Oxic	3
BOD/TN ratios	2.62~4.08	
Temperature(°C)	7.7~26.8	
SRT(d)	6~15	
MLSS(mg/L)	3,000~4,600	

Note (): Average

운전하였다. 하수의 유입량은 일평균 20m³/d로 유량조정조에서 공급하였으며 유입수 배관에 관수로형 전자식 유량계를 설치하여 순간유량 및 적산유량이 유량계와 조작판넬에 동시에 표시되도록 하였다. Table 1은 본 연구에 사용한 실험장치의 운전조건을 요약한 것이다.

2.2. 유입하수의 성상

본 실험에 사용한 식중슬러지는 Bacillus속 세균이 우점화 되어 있는 B3공법 하수처리장의 반송슬러지를 이용하였다. 유입하수의 성상은 계절에 따라 다소 차이를 보이고 있지만 운전초기인 6월~11월 중순경까지는 하수처리장의 최초 침전지를 통과한 하수로 유입수로 사용하였다. 유입수의 TBOD는 40~93 mg/L, TCOD_{Mn}는 25~78mg/L, SS는 25~100

Table 2. Influent characteristics

Item	Concentration(mg/L)	
	6/1~11/20*	11/27~5/30*
TCOD _{Mn}	25~78	45~152
SCOD _{Mn}	18~47	30~80
TBOD	40~93	72~228
SBOD	24~60	60~162
SS	25~100	45~210
T-N	18~30	24~46
TKN	17.9~28.8	23.5~43.5
NH ₄ ⁺ -N	12~28	17~35
NO ₃ ⁻ -N	0.2~2.0	0.62~1.4
T-P	1.7~3.8	2.2~6.3
S-P	1.4~3.3	1.8~5.1

*: Date(M/D)

mg/L을 나타내었다. 또한 TN과 NH₄⁺-N의 경우에는 각각 18~30mg/L과 12~28mg/L로 유입하수중의 질소는 대부분 암모니아성질소로 조사되었으며 TP의 경우에는 1.7~3.8mg/L의 범위를 보였다. 유입수의 유기물과 질소성분의 농도는 일반 도시하수보다는 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다.

운전초기의 유입수 농도가 매우 낮아 11월 말부터 이듬해 5월 말까지의 유입수는 최초침전지 이전의 하수를 사용하였다. 이 시기의 TBOD는 72~228 mg/L, TCOD_{Mn}는 45~152mg/L, SS는 45~210 mg/L을 보였다. TN의 경우에는 24~46mg/L, TP는 2.2~6.3mg/L로 운전초기의 경우와 비교하여 유입하수의 농도변화가 다소 심하게 보이는 것은 이 시기에 간헐적인 분뇨투입과 계절적인 요인으로 인해 유입수의 농도변화가 다소 심하게 나타난 것으로 생각된다. 본 실험에 사용한 유입수의 특성을 Table 2에 나타내

었다.

2.3. 운전조건 및 실험방법

본 실험은 몇 개월간 미생물을 순응시켜 정상상태에 도달하였다고 판단되는 시점부터 분석데이터를 사용하였다. 반응조의 운전조건은 Table 1과 Table 3에 나타낸 바와 같이 혐기조의 체류시간은 1시간, 무산조 및 호기조의 체류시간은 각각 3시간으로 고정하고 내부반송율(Internal Recycle ratios)과 슬러지 반송율(Return Sludge ratios)을 변화시켰다. 일차침전지를 거쳐 유기물 농도가 낮은 하수가 유입된 운전 Mode 1~4에서 내부반송율의 변화가 탈질효율 및 인 제거 효율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 내부반송율을 유입량의 50~200%로 변화시켰다. 유입수의 유기물 농도가 운전 Mode 1~4와 비교하여 높게 유지하고 있는 운전 Mode 5~8에서는 내부반송율 및 슬러지 반송율을 각각 50~300%, 50~100%로 변화시켰으며, 이 기간에 BOD/TN비는 3.93~4.08을 보였다. 각 운전 Mode의 MLSS 농도는 Mode 1~4에서 3,000~3,500mg/L, 운전 Mode 5~8에서는 4,000~4,600mg/L 정도를 유지하였으며, SRT(Solid Retention Time)는 6~15일로 운전하였다. 혐기조와 무산조는 교반기를 이용하여 혼합이 되도록 하였으며 호기조에서 DO농도는 2~3mg/L을 유지하도록 운전을 하였다. 또한 반응조의 온도는 실온에서 실험을 수행하여 상온과 저온에서 질소 및 인의 제거효율에 대해 검토하였다. 아래의 Table 3은 본 실험의 운전조건에 대해 상세히 나타낸 것이다.

유입 및 유출수의 분석항목은 pH, COD_{Mn}, BOD, SS, TN, TKN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP(Total

Table 3. Operation mode of process

Mode	IR(%) (% of Inf.)	RS(%) (% of Inf.)	BOD/TN ratios	Temp. (°C)	Date (M/D)
1	100	50	2.74	20.4~26.8	6/1~8/24
2	200	50	2.73	21.6~24.2	8/31~10/4
3	50	100	2.62	18.9~21.9	10/9~10/25
4	50	50	2.62	14.5~17.1	10/30~11/20
5	100	100	4.08	11.7~13.2	11/27~12/20
6	50	50	3.95	8.2~9.1	12/27~2/7
7	300	100	3.97	7.7~9.5	2/19~3/20
8	200	100	3.93	11.2~20.7	4/1~5/30

Note: IR: Internal Recycle ratio, RS: Return Sludge ratio

Phosphate), SP(Soluble Phosphate) 등을 측정하였다. 이와 같은 분석항목은 우리나라 수질오염공정시험방법(환경부, 2000)과 Standard Methods(APHA, 1992)에 따라 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거

Fig. 2는 실험기간중의 유입 BOD 농도와 유출수의 BOD 농도변화를 보인 것으로 실험기간중의 수온은 7.7~26.8°C를 나타내었다. 운전 Mode 1~4에 해당하는 6월~11월 중순까지 유입하수의 BOD 농도는 하수처리장의 최초 침전지를 거친 하수가 Pilot Plant로 유입된 것으로 인하여 유입 BOD 농도는 40~93 mg/L(평균 56~65mg/L)로 유입하수의 BOD 농도가 일반적인 하수처리장의 유입 BOD 농도보다 현저히 낮은 농도를 보이고 있음에도, 평균 BOD 제거율은 85% 이상을 나타내었으며 유출수의 BOD 농도는 평균 6mg/L 이하를 보였다. 11월말 이후인 운전 Mode 5~8에서는 간헐적인 분뇨의 투입과 최초 침전조를 거치지 않은 하수를 Pilot Plant에 공급하여 실험을 수

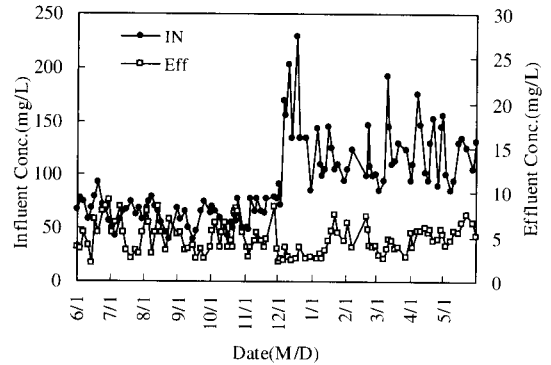


Fig. 2. BOD concentration profile.

행한 관계로 유입수의 BOD 농도가 72~228mg/L로 Mode 1~4와 비교하여 유입 BOD 농도 및 농도변화가 비교적 큰 값을 보였다.

각 운전 Mode에 대한 유기물의 유입수 및 유출수의 농도와 제거효율을 Table 4에 요약 정리하였다. BOD 및 COD 제거효율은 운전 Mode 1~4에서 각각 90%, 85% 이상을 보이고 있으며, 운전 Mode 5~8의 경우에 BOD 및 COD 제거효율은 각각 95%, 88% 이상으로 운전 Mode 1~4보다 다소 증가를 나

Table 4. Organic matter removal efficiencies

Mode	COD(mg/L)			BOD(mg/L)			SS(mg/L)		
	Inf.	Eff.	Rem.(%)	Inf.	Eff.	Rem.(%)	Inf.	Eff.	Rem.(%)
1	25~78 (45)	4.5~10.5 (6.1)	86	40~93 (65)	2.1~9.1 (5.5)	91	28~100 (45)	2~6.7 (3.5)	91
2	28~55 (43)	5.4~6.5 (5.8)	86	40~75 (61)	2.5~6.5 (4.2)	93	25~60 (33)	2.1~5 (3.4)	89
3	25~57 (38)	4.5~6.2 (5.5)	85	42~77 (56)	3.8~8.2 (5.8)	90	41~65 (49)	2~5 (3.3)	93
4	34~57 (45)	4.5~7.1 (5.9)	86	49~77 (64)	2.8~5.5 (4.3)	93	28~75 (51)	2~4.5 (2.8)	94
5	50~152 9(86)	5.3~7.6 (6.2)	92	72~228 (134)	2.2~8.5 (3.4)	97	82~154 (97)	2~5.1 (3.4)	96
6	52~99 (67)	5.8~10.6 (7.9)	88	85~145 (114)	2.5~7.5 (4.2)	96	45~145 (86)	2~5 (3.1)	96
7	48~102 (72)	5.5~9.8 (7.6)	88	95~192 (119)	2.5~7.3 (4.3)	96	70~125 (92)	3.1~5.8 (4.5)	95
8	45~95 (72)	4.8~9.3 (6.8)	90	85~176 (121)	2.8~7.5 (5.3)	95	75~210 (120)	2~7.5 (4.0)	96

Note (): Average

타내었다. 특히 동절기인 Mode 6~7의 경우에 유출수의 평균 BOD 농도는 4.3mg/L 이하, 유출수의 COD 농도는 8mg/L 이하, 유출수의 SS 농도는 4.5 mg/L 이하로 온도감소에도 안정적인 처리를 보이고 있다. 또한 수온이 7.7~9.5°C로 하강하는 동절기인 Mode 6~7의 유기물 제거효율이 하절기인 Mode 1~2보다 오히려 높은 제거효율을 보이고 있는 것으로부터 유기물의 제거효율은 유입수의 농도에 다소 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.2. 질소제거

3.2.1. 질산화

Fig. 3은 실험기간중의 유입 암모니아아성질소 농도 및 유출수의 농도를 나타낸 것이다. 유출수의 암모니아아성질소 농도는 운전 Mode 1~4인 6월~11월 중순까지 0.7~1.7mg/L을 보이다가 11월 하순 이후인 동절기에는 온도감소로 인해 4.4~6.7mg/L로 증가를 보이고 있다. 각 운전 Mode에 따른 질산화율, 유입수 및 유출수의 NH₄-N, NO₃-N 농도를 Table 5에 요약하여 나타내었다. 질산화율은 수온이 18.9~26.8인 운전 Mode 1~3에서 평균 95% 이상을 보이고 있으며, 수온이 7.7~9.5°C인 Mode 6~7에서는 평균 68~71%로 온도감소에 따라 급격히 감소를 보였다. 질산화율에 대한 온도영향을 Fig. 4에 나타내었다. 질산화율은 수온 20°C에서 95% 이상을 보이고 있지만 온도가 7.7°C로 감소하는 동절기에는 66%로 온도감소에 따라 큰 영향을 보이고 있다.

Table 6은 각 운전 Mode의 BOD/TKN 비 및 온도에 따른 SNR(Specific Nitrification Rate)값을 요약하

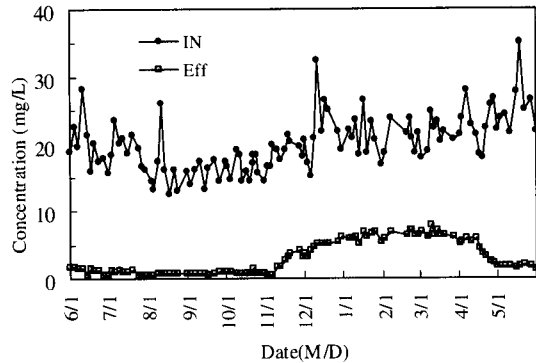


Fig. 3. Ammonia nitrogen concentration profile.

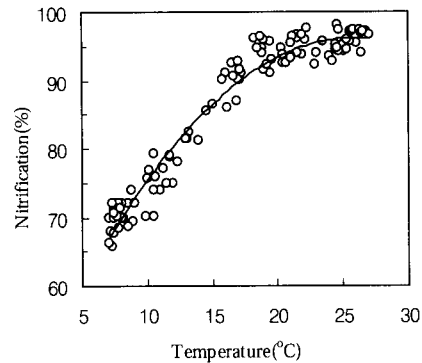


Fig. 4. Effect of temperature on nitrification.

여 나타낸 것으로, 각 운전 Mode의 반응조내 MLSS 농도는 운전 Mode 1~4에서 3,000~3,500mg/L, 운전 Mode 5~8에서 4,000~4,600mg/L 정도를 유지하였다. 평균 SNR은 유입 BOD/TKN비가 3.0 이하이며 수온이 14.5~26.8°C인 운전 Mode 1~4에서 2.38

Table 5. Summary of ammonia nitrogen removal efficiencies

Mode	NH ₄ -N(mg/L)		Nitrification Efficiency (%)	NO ₃ -N (mg/L)		Date (M/D)
	Inf.	Eff.		Inf.	Eff.	
1	12~28(19)	0.4~1.7(0.95)	95.0	0.6	9.5~11.4(10.4)	6/1~8/24
2	13~18(16)	0.6~1.1(0.81)	94.9	2.0	9.3~12.9(11.6)	8/31~10/4
3	14~19(17)	0.6~1.6(0.77)	95.5	0.3	10.3~12.8(11.3)	10/9~10/25
4	14~20(18)	0.4~3.8(1.7)	90.6	0.2	8.4~11.8(10.5)	10/30~11/20
5	17~33(23)	3.2~5.2(4.4)	80.9	0.6	5.8~8.4(6.8)	11/27~12/20
6	18~27(21)	5.2~6.8(6.1)	71.0	0.8	3.9~5.4(4.8)	12/27~2/7
7	19~25(21)	6.3~7.8(6.7)	68.1	1.3	3.5~4.8(4.2)	2/19~3/20
8	18~35(24)	1.3~6.1(3.2)	86.7	1.4	3.6~12.4(8.2)	4/1~5/30

Note (): Average

Table 6. Effect of temperature and BOD/TKN ratios on SNR

Mode	Temp. (°C)	BOD/TKN ratios	SNR (mg NH ₄ ⁺ -N/gVSS/hr)
1	20.4~26.8	2.67	2.070~3.815(2.625)
2	21.6~24.2	2.66	1.946~2.482(2.371)
3	18.9~21.9	2.56	2.245~2.870(2.561)
4	14.5~17.1	2.54	2.369~2.882(2.561)
5	11.7~13.2	3.98	1.388~2.102(1.887)
6	8.2~9.1	3.85	1.130~1.700(1.471)
7	7.7~9.5	3.87	1.329~1.783(1.568)
8	11.2~20.7	3.85	1.785~2.899(2.401)

SNR; Specific Nitrification Rate

~2.63mgNH₄⁺-N/gVSS/hr, BOD/TKN비가 3.85~3.87이며 수온이 낮은 동절기인 Mode 6~7에서 1.47~1.57mgNH₄⁺-N/gVSS/hr을 보였다. 이러한 결과 값들은 안(안, 1998)에 의해 보고된 3.4mgNH₄⁺-N/gVSS/hr값과 비교하여 비교적 온도가 높은 시기인 Mode 1~4의 경우에는 약간 낮은 값을 보였지만, Mode 5~8의 경우에는 낮은 값을 보이고 있는데 이러한 결과는 안(안, 1998)의 연구조건과 본 연구조건이 상이한 결과에 의한 것으로 판단된다. Metcalf (Metcalf & Eddy, 1991)는 BOD/TKN비가 3 이하에서 질산화는 안정적으로 이루어진다고 보고하고 있다. 본 실험에서 BOD/TKN비는 Mode 1~4인 경우에는 질산화가 이루어지기에 적당한 비를 나타내고 있지만, Mode 5~8에서 BOD/TKN비는 3.85~3.98로 비교적 높은 값을 보이고 있다. 그러나 유입 BOD/TKN비가 3.85이며 수온이 11.2~20.7°C인 운전 Mode 8의 평균 SNR은 2.401mgNH₄⁺-N/gVSS/hr로 BOD/TKN비가 3.0 이하로 최적의 질산화 조건을 보이는 운전 Mode 3~4의 SNR과 비교하여 큰 차이가 없음을 고려해보면 유입 BOD/TKN비에 의한 영향 보다는 온도감소가 SNR에 미치는 영향이 더 큰 것으로 사료된다.

일반적으로 생물학적 공정을 이용한 영양염류 제거 속도에 대한 온도영향에 대해서 많은 관계식을 실험적으로 구하고 있지만, 일반성과 간편성으로 부터 Arrhenius-type을 널리 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서도 질산화속도에 대한 온도영향을 Arrhenius-type(US EPA, 1993)을 이용하여 고찰하였다.

$$q_T = q_{20} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (3.1)$$

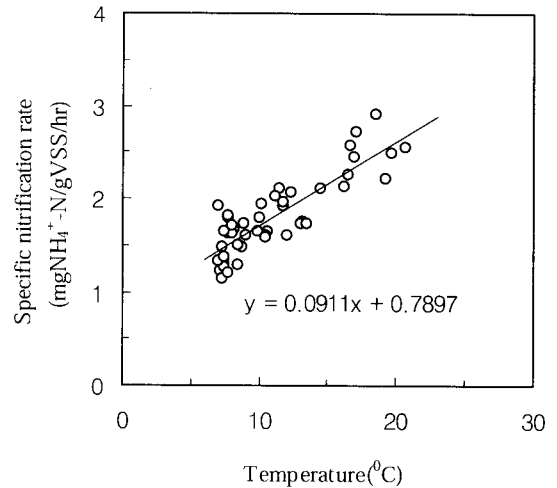


Fig. 5. Effect of temperature on specific nitrification rate.

여기서, q_T = Specific nitrification rate (mgNH₄⁺-N/gVSS/hr)

q_{20} = 20°C에서 Specific nitrification rate (mgNH₄⁺-N/gVSS/hr)

T = 온도(°C)

θ = Temperature-activity 상수이며 1.03~1.11 사이의 값을 가진다.

Fig. 5는 BOD/TKN비가 유사한 운전 Mode 5~8에서 θ 값을 구하기 위하여 온도에 따른 SNR(Specific Nitrification Rate)를 나타낸 것이다. **Fig. 5**로부터 θ 값은 1.044로 일반적으로 알려진 Temperature-activity 상수의 범위에 있는 값을 얻었다.

3.2.2. 총 질소 제거 및 탈질효율

유입 및 유출수의 TN농도변화를 **Fig. 6**에 나타내었다. 평균 유입수의 TN농도는 운전 Mode 1~4에 해당하는 6월~11월 중순까지는 21.6~25.4mg/L을 나타내었으며, 이후의 운전 Mode인 12월부터 29.1~32.3mg/L로 증가를 보이고 있다. 전체 운전기간 중 유출수의 TN농도는 유입수의 농도변화와 수온의 감소에도 15mg/L 이하로 안정적인 처리를 보였다.

Table 7은 각 운전 Mode에 대한 실험결과를 요약하여 나타낸 것이다. Ekama(Ekama, 1983)에 의하면 BOD/TN비가 3.0 이상에서 최적의 탈질조건을 가진 것으로 알려져 있는데, 본 실험에서 유입수의

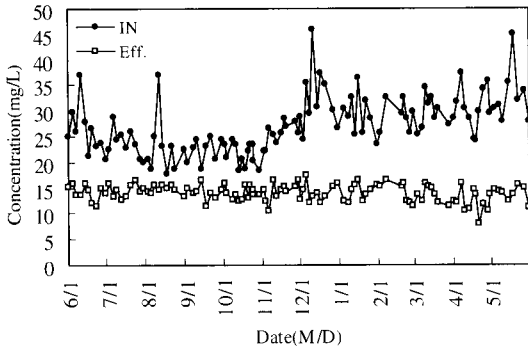


Fig. 6. Total nitrogen concentration profile.

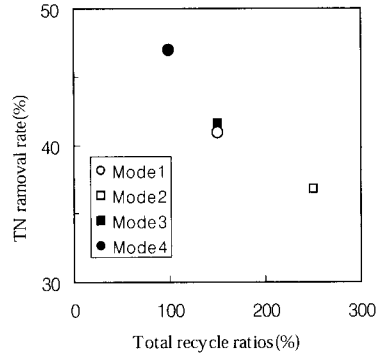


Fig. 7. Effect of recycle ratios on TN removal rate(Mode 1~4, Total recycle ratios=IR(%) + RS(%)).

BOD/TN비가 3.0 이하인 Mode 1~4의 TN 제거율은 내부반송율 100%, 슬러지 반송율을 50%로 운전한 Mode 1의 경우에 40.9%의 제거율을 보이고 있으며, 슬러지 반송율은 운전 Mode 1과 동일하게 하고 내부반송율을 200%로 증가시켜 질소제거효율을 증가시키려고 시도한 운전 Mode 2에서는 오히려 36.8%로 다소 낮은 제거효율을 보이고 있는데, 이는 내부반송율의 증가로 호기조의 용존산소가 무산조로 다량 유입되었거나 무산조에서 실제 체류시간의 감소

로 인해 탈질효율이 영향을 받은 것으로 생각된다. 슬러지 반송율을 운전 Mode 1의 경우와 동일하게 하고 내부반송율을 50%로 감소시킨 운전 Mode 4에서 총질소 제거효율은 46.9%로 유입수의 BOD/TN비가 3.0 이하인 운전 Mode 1~4 가운데 가장 높은 제거효율을 보이고 있다. Fig. 7은 운전 Mode 1~4의 총 반송비율(내부반송율 + 슬러지반송율)에 대한 TN제거율의 영향을 나타낸 것으로 TN제거율은 총 반송비

Table 7. Effect of temperature and BOD/TN ratios on total nitrogen removal efficiency and SDNR

Mode	Temp (°C)	BOD/TN ratios	T-N(mg/L)			SDNR (mgNO ₃ -N/gVSS/hr)
			Inf.	Eff.	Rem.(%)	
1	20.4~26.8	2.74	18~30 (24.4)	11.4~16.5 (14.4)	40.9	0.961~1.993 (1.425)
2	21.6~24.2	2.73	19~25 (22.3)	13~16 (14.1)	36.8	0.731~1.725 (1.203)
3	18.9~21.9	2.62	19~25 (23.6)	12.5~15.6 (13.8)	41.5	0.841~1.757 (1.383)
4	14.5~17.1	2.62	18~29 (25.4)	10.5~15.3 (13.5)	46.9	0.726~1.970 (1.554)
5	11.7~13.2	4.08	24~46 (32.1)	12.0~16.5 (14.1)	56.1	1.655~2.173 (1.829)
6	8.2~9.1	3.95	26~37 (29.1)	12.5~16.5 (14.6)	49.8	1.371~1.973 (1.417)
7	7.7~9.5	3.97	25~33 (29.6)	12.0~15.7 (13.7)	53.7	1.502~2.027 (1.705)
8	11.2~20.7	3.93	25~36 (32.3)	8.0~15.7 (12.7)	60.7	1.744~2.549 (2.046)

Note (): Average
SDNR; Specific Denitrification Rate

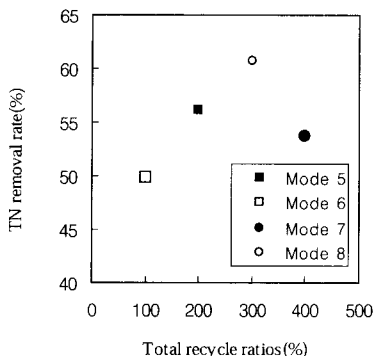


Fig. 8. Effect of recycle ratios on TN removal rate (Mode 5-8).

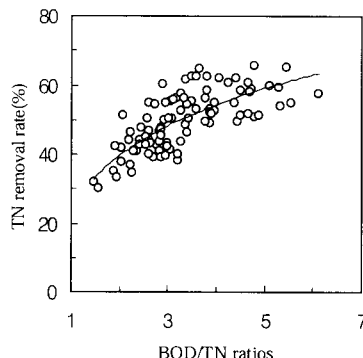


Fig. 9. Effect of BOD/TN ratios on TN removal rate.

율의 증가에 따라 거의 직선적인 감소를 보이고 있다. 따라서 유입수의 BOD농도가 낮은 하수처리장의 경우에 반송비율에 의해 질소제거율은 다소 영향을 받는 것을 고려해보면 내부반송율과 슬러지반송율은 50% 이하로 운전하는 것이 보다 효율적일 것으로 생각된다.

최적 탈질조건을 유지하고 있는 운전 Mode 5~8에 대해 Fig. 8과 Table 7에 나타낸바와 같이 각 운전 Mode에 대한 총질소 제거율은 내부반송 및 슬러지 반송율을 각각 100%로 운전한 Mode 5의 경우에 총질소 제거율은 56.1%를 보이고 있으며, 슬러지 반송율은 동일하게 하고 내부반송율을 300%로 증가시킨 운전 Mode 7의 경우에 총질소 제거효율은 53.7%로 운전 Mode 5와 비교하여 제거효율이 약간 감소를 나타내었다. 내부반송 및 슬러지반송율을 각각 50%로 감소시켜 운전한 Mode 6의 경우에 총질소 제거효율은 49.8%로 운전 Mode 5~8 중 가장 낮은 제거효율을 보이고 있으며, 내부반송 200%, 슬러지반송 100%의 조건인 운전 Mode 8에서 총질소 제거효율은 60.7%로 가장 높은 제거율을 보였다. Fig. 8은 운전 Mode 5~8의 총 반송비율에 대한 TN제거율의 영향을 나타낸 것으로 운전 Mode 8에 해당하는 총 반송비율 300%까지는 반송비율이 증가함에 따라 TN제거율은 증가를 보이다가 반송비율이 300% 이상이 되면 감소를 나타내었다.

이상의 반송비율 변화에 따른 총질소 제거율의 연구결과로부터 유입 BOD/TN비에 따라 적합한 반송비율을 유지하는 것이 질소제거에 보다 효과적인 것으로 사료된다.

SDNR(Specific Denitrification Rate)값은 BOD/TN

비를 3.0 이하로 운전한 Mode 1~4에서 1.203~1.554mgNO₃-N/gVSS/hr 범위를 보이고 있으며 Mode 4의 조건에서 1.554mgNO₃-N/gVSS/hr로 SDNR은 가장 높은 수치를 나타내었다. BOD/TN비가 3.0 이상인 Mode 5~8의 경우에 SDNR은 1.417~2.046mgNO₃-N/gVSS/hr를 나타내었고, 내부반송율과 슬러지 반송율이 각각 50%로 가장 낮은 반송율로 운전한 Mode 6의 경우가 1.417mgNO₃-N/gVSS/hr로 가장 낮은 수치를 보이고 있으며 Mode 8이 2.046mgNO₃-N/gVSS/hr로 가장 높은 값을 보였다.

BOD/TN비에 대한 TN제거율을 Fig. 9에 나타내었다. BOD/TN비를 3.0이하로 운전한 Mode 1~4의 경우에 운전시기의 수온이 비교적 높은 하절기임에도 TN제거율은 37~47%를 보였다. 그러나 BOD/TN비가 약 4.0이며 동절기에 해당하는 Mode 6~7의 경우에 TN제거율은 50~61% 정도로 TN제거율은 온도감소에 따른 영향보다는 BOD/TN비에 따라 큰 영향을 나타내었다.

탈질속도에 대한 온도영향을 고찰하기위해 상기의 (3-1)식과 동일한 Arrhenius-type(US EPA, 1993)을 이용하여 온도와 비탈질 속도와의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 본 연구에서 θ 값은 1.017로 지금까지 알려진 값들 보다는 적은 값을 보이고 있는 것으로부터 본 시스템에 의한 탈질속도는 온도영향을 크게 받지 않는 안정적인 고도처리 공법임을 알 수 있었다. 따라서 상기의 연구결과로부터 탈질효율에 대한 온도의 영향은 미미하며 BOD/TN비에 의해 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

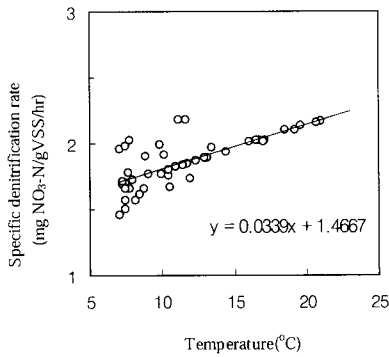


Fig. 10. Effect of temperature on specific denitrification rate.

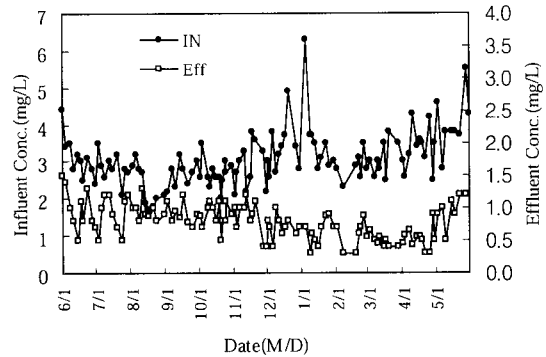


Fig. 11. Total phosphorus concentration profile.

3.3. 인 제거

운전기간중의 유입 및 유출수의 TP농도변화를 Fig. 11에 나타내었으며, Table 8은 각 운전 Mode의 인 제거효율과 TBOD/TP 비 및 SPUR(Specific Phosphorus Uptake Rate) 등에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 유입수의 평균 TP농도 및 SP농도는 운전 Mode 1~4에서 각각 2.6~2.9mg/L과 2.3~2.6 mg/L을 보이고 있으며, 이후의 운전 Mode 5~8에서 각각 3.0~3.6mg/L와 2.6~3.3mg/L로 증가를 보이

고 있다. 전체 운전기간중 유출수의 TP농도는 유입수의 농도변화와 동절기의 수온감소에도 불구하고 1.0mg/L 이하를 나타내었다. 총인 제거효율은 본 실험의 슬러지 반송율의 조건인 50~100%의 범위에서는 크게 영향을 받지 않고 TBOD/TP 비에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. TBOD/TP 비가 21.9~23.8인 운전 Mode 1~4에서 TP제거효율은 67%이하를 보이고 있지만, TBOD/TP 비가 34.7~41.1인 운전 Mode 5~8에서는 81%정도로 TBOD/TP 비의

Table 8. Phosphorus removal efficiencies

Mode	T-P(mg/L)			S-P(mg/L)			TBOD/TP	SPUR (mgSP/gVSS/hr)	Temp. (°C)
	Inf.	Eff.	Rem.(%)	Inf.	Eff.	Rem.(%)			
1	1.7~3.4 (2.80)	0.5~1.4 (0.96)	64.8	1.4~2.8 (2.35)	0.4~1.2 (0.84)	64.3	23.8	0.26	20.4~26.8
2	2.1~3.5 (2.69)	0.7~1.2 (0.89)	65.9	1.8~3.0 (2.29)	0.6~1.1 (0.79)	65.5	23.2	0.26	21.6~24.2
3	2.0~2.7 (2.57)	0.8~1.1 (0.91)	64.5	1.7~2.3 (2.26)	0.7~0.9 (0.81)	64.2	21.9	0.25	18.9~21.9
4	2.1~3.8 (2.91)	0.7~1.2 (0.96)	65.8	1.8~3.3 (2.56)	0.6~1.0 (0.84)	67.2	22.6	0.29	14.5~17.1
5	2.2~4.9 (3.28)	0.4~1.0 (0.66)	79.1	1.8~4.6 (3.05)	0.3~0.8 (0.58)	80.9	41.1	0.27	11.7~13.2
6	2.3~6.3 (3.37)	0.3~0.8 (0.61)	81.0	1.8~5.1 (2.97)	0.2~0.7 (0.54)	81.8	35.5	0.27	8.2~9.1
7	2.5~3.8 (3.00)	0.3~0.8 (0.54)	81.8	2.3~3.5 (2.64)	0.2~0.7 (0.49)	81.4	39.9	0.26	7.7~9.5
8	2.5~5.5 (3.64)	0.3~1.2 (0.68)	80.7	2.3~4.8 (3.31)	0.2~1.0 (0.61)	81.6	34.7	0.33	11.2~20.7

Note (): Average

SPUR: Specific Phosphorus Uptake Rate

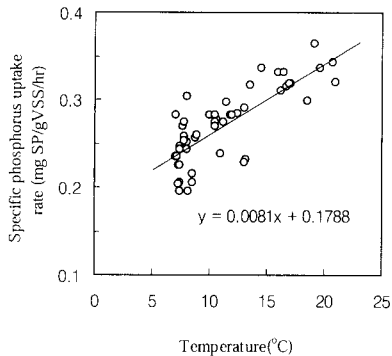


Fig. 12. Effect of temperature on specific phosphorus uptake rate.

증가에 따라 TP 제거효율은 증가를 보였다. 인 제거효율의 최적 TBOD/TP 비는 20 이상(Fuhs, 1975, 안, 1998)인 것으로 알려져 있으며 기존의 연구결과와 비교하여 본 실험에서 모든 운전조건의 TBOD/TP 비는 20 이상으로 최적조건을 유지하고 있지만, 운전 Mode 1~4와 운전 Mode 5~8의 인 제거효율을 비교하여 보면 운전 Mode 1~4의 경우가 낮은 제거효율을 보이고 있다. 이와 같이 인 제거효율이 차이를 보이는 것은 Mode 1~4의 경우에 혐기조로 유입되는 질산성질소의 농도는 3~8mg/L를 나타내었지만, 운전 Mode 5~8에서는 1~3mg/L 이하를 나타내어 인 방출에 영향을 미치는 질산성질소의 농도로 인하여 총인의 제거효율이 영향을 받은 것으로 생각된다. 또한 각 운전 Mode에 대한 SPUR (Specific Phosphorus Uptake Rate)은 0.25~0.33 mgSP/gVSS/hr 범위를 나타내고 있으며, 운전 Mode 8이 가장 높은 수치를 보이고 있다.

Fig. 12는 저온에서 총인의 제거효율에 대한 온도 영향을 고찰하기 위해 TBOD/TP 비가 유사한 운전 Mode 5~8의 실험결과를 상기의 (3-1)식(US EPA, 1993)을 이용하여 온도와 SPUR과의 관계를 Fig. 12에 나타내었으며, 본 연구에서 θ 값은 1.028을 얻었다.

4. 결 론

BNR(Biological Nutrient Removal) 공법을 이용하여 유입 유기물농도가 낮은 J시 하수처리장에서 계절변화에 대한 질소와 인 및 유기물의 처리성능을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. BOD, COD 및 SS 제거는 수온의 영향을 받지 않고 안정적인 처리수질을 보이고 있으며, 유기물의 제거효율은 유입수의 농도에 따라 다소 영향을 나타내었다.
2. 질산화율 및 SNR은 유입 BOD/TKN 비에 의한 영향 보다는 온도감소에 매우 민감한 반응을 보였으며, 온도와 Specific Nitrification Rate 관계로부터 θ 값은 1.044를 얻었다.
3. 유기물 농도가 낮은 도시하수의 경우에 내부반송과 슬러지반송비율은 50% 이하로 유지하는 것이 탈질효율을 높일 수 있는 것으로 조사되었다. 또한 반송비율은 유입 BOD/TN 비에 따라 적절한 반송비율을 유지하는 것이 질소제거에 보다 효과적일 것으로 생각된다.
4. 탈질효율은 BOD/TN 비에 의해 큰 영향을 보였으나, 온도영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 온도와 Specific Denitrification Rate 관계로부터 θ 값은 1.017로 일반적으로 알려진 값들에 비하여 다소 낮은 값을 보였다.
5. 저온에서 총인 제거율은 큰 영향을 받지 않았으며, 온도와 Specific Phosphorus Uptake Rate 관계로부터 θ 값은 1.028을 얻었다. 또한 혐기조로 유입되는 질산성질소의 농도가 총인의 제거효율에 큰 영향을 보였다.

참고문헌

1. 공동수 (1996) 우리나라 인공호수의 부영양화제어방안, 호소의 부영양화 방지대책에 대한 한·일 세미나, 국립환경연구원·한국수질보전학회지..
2. 안종화, 남광현, 민경석(1998) 분뇨혼합 저농도 하수의 영양소제거, *한국물환경학회지*, **14**(36), pp. 281-288.
3. 환경부 (2005) *하수도법*.
4. 환경부 (2006) *2006년도 상반기 하수처리시설 지도점검결과*, 환경부 생활하수과.
5. 환경부 (2000) *수질오염공정시험법*.
6. APHA, AWWA and WEF (1992) Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed, American Public Health Association.
7. Ekama, G. A., Siebritz, I.P. and Marais, G. v. R., (1983) Consideration in the process Design of Nutrient Removal Activated Sludge Process, *Water Science Technology*, **15**, pp. 283-318.

8. Fuhs, G. W. and Chen. M., (1975) Microbiological Basis of Phosphate Removal in the Activated Sludge Process for the Treatment of Wastewater, *Microbial Ecology*, 2, pp. 119-138.
9. Metcalf & Eddy, Inc., (1991) Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse, 3rd ed, McGraw-Hill.
10. R. I. Sedlak ed., (1991) Phosphorous and Nitrogen from Municipal Wastewater, 2nd Ed, p. 19, Lewis Publishers.
11. US EPA, (1993) Nitrogen Control, p.107, Technomic Publishing, Co.