

생물학적 질소·인 제거 공정에서 일차 침전지의 영향

황규대[†] · 김태경

경희대학교 환경응용화학대학 환경공학과

The Role of Primary Clarifier in Biological Processes for Nutrient Removal

Gye-Dae Whang[†] · Tae-Kyung Kim

Department of Environment science and Engineering, Kyung Hee University

(Received 2 June 2006, Accepted 20 November 2006)

Abstract

The lab-scale BNR processes fed with Municipal Wastewater Before or After Primary Clarifier (MWBPC or MWAPC) were operated to observe the behavior of particle organic matter in terms of nitrification and denitrification efficiency. As a result of the fractionation of the COD from MWBPC or MWAPC using an aerobic respirometric serum bottle reactor, the total mass of biodegradable organic matter from MWBPC is about 52% greater than the mass from MWAPC. Batch reactors were operated to observe the effect of the Particulate Organic Matter (POM) on substrate utilization for denitrification. Although the consumption of POM for denitrification was observed, the increment of the Specific Denitrification Rate (SDNR) was not great. In terms of the effect of POM on nitrification at different HRTs, activate sludge reactors were operated to determine the optimal HRT when MWBPC and MWAPC were fed relatively. All reactors showed a great organic matter removal efficiency. Reactors fed with MWAPC had obtained the nitrification efficiency above 90% when the HRT of 4 hr, at least, was maintained, while reactors fed with MWBPC had same efficiency when the HRT longer than 5 hr was kept. Three parallel A²/O systems fed with MWBPC or MWAPC relatively were operated to investigate the effects of POM on BNR processes with varying the HRT of an anoxic reactor. For all systems, the efficiency of organic matter removal and denitrification, respectively, was great and about the same. In case of denitrification efficiency, system with MWAPC had 1.5% lower than system with MWBPC at the same HRT of anoxic reactor of 2 hr, and the increasing the HRT of the anoxic reactor by 1 hr in systems fed with MWBPC resulted in a 3.5% increment. The denitrification rate was similar while the consumption of organic matter in systems fed with MWBPC was higher than system fed with MWAPC. It suggests that POM in MWBPC was not be used significantly as a substrate for denitrification in system with the HRT of 3 hr of an anoxic reactor.

keywords : COD fraction, Denitrification, Nitrification, Primary clarifier

1. 서론

대부분의 하수처리시설에서는 포기조의 유기물 부하를 감소시키기 위해 일차침전지를 설치 운영하고 있다. 이러한 일차침전지가 있는 하수처리시설의 생물학적 처리공정은 SS와 유기물 부하가 줄어 잉여슬러지가 적게 생산되며 유입수의 C/N비가 낮기 때문에 반응조의 미생물 중 질산화 미생물의 분율을 높게 유지할 수 있어 질산화율이 높아진다는 장점이 있다. U. S. EPA(1975)에 따르면 BOD/TKN비가 9.0에서 0.5으로 감소함에 따라 생물반응조내의 총 미생물량에 대한 질산화 미생물의 분율이 0.029에서 0.35로 증가한다고 보고하였다. 그러나 탈질이나 인방출에 필요한 유기물이 줄어들게 되어 효과적인 질소·인 제거를 위해서는 추가적으로 외부탄소원을 공급해야 할 경우가 생긴다. 반면에 일차침전지가 제외된 하수처리시설의 생물학적 처리공

정은 SS와 유기물 부하가 늘어나 슬러지 발생량이 증가되고 C/N비가 높아져서 질산화 미생물의 분율이 낮아지고 질산화율이 감소된다는 단점이 있다. Hanaki 등(1990), Henze (1989)의 연구에 따르면 일차침전지를 거치지 않은 유입수가 질산화 반응조로 유입되면 C/N비가 높아지고 생물반응조내 질산화 미생물 분율이 낮아져 질산화에 장애를 받는다고 하였다. 그러나 운전관리가 용이하고 처리시설의 소요부지 면적이 크게 줄어든다는 장점이 있으며 입자상 유기물을 탈질이나 인방출에 필요한 탄소원으로 사용할 수 있다는 이점이 있다. 본 연구에서는 일차침전지를 거치지 않은 하수와 일차침전지를 거친 하수의 COD분율을 측정하여 RBCOD(Readily Biodegradable COD)와 SBCOD(Slowly Biodegradable COD)양을 비교해보고, 입자상 유기물이 탈질과 인방출에 탄소원으로 사용되는지 조사하였다. 또한 일차침전지를 거친 하수와 일차침전지를 거치지 않은 하수를 활성슬러지 반응조에 주입하여 HRT에 따른 처리효율을 분석하고 일차처리로 인한 유입수 수질과 무산소조의 HRT

[†] To whom correspondence should be addressed.
gdwhang@khu.ac.kr

변화가 A²O공정에서의 유기물 제거와 질산화 및 탈질에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 하수의 COD 분율

일차 침전지를 거치지 않은 하수와 일차침전지를 거친 하수의 BDCOD의 양을 측정하기 위하여 Challenge AER-200 aerobic respirometer (Challenge environmental system, Inc, Fayetteville, AR, USA)를 사용하여 용량이 500 mL인 Serum bottle reactor의 미생물 산소 소비율을 측정하였다. Serum Bottle Reactor No. 1, No. 2, No. 3에는 TCOD_{Cr} 농도가 392 mg/L인 일차침전지를 거치지 않은 하수를 주입하고 No. 4, No. 5, No. 6에는 COD_{Cr} 농도가 256 mg/L인 일차침전지를 거친 하수를 변호순서에 따라 각각 100 mL, 200 mL, 300 mL 주입하고 MLSS농도가 8,000 mg/L인 슬러지를 적당량 주입하여 F/M비가 0.5정도로 되도록 하였으며 500 mL에서 부족한 용량은 Nutrient mineral buffer를 이용하여 채우고 Serum bottle reactor의 온도는 20°C로 유지하였다. Fig. 1은 실험에 사용한 Challenge AER-200 aerobic respirometer의 구성도이다.

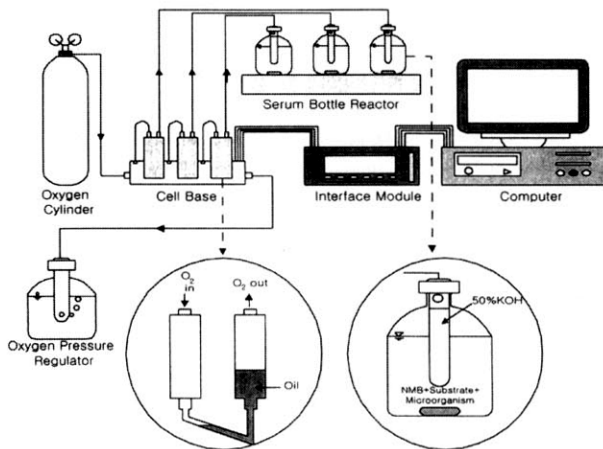


Fig. 1. Schematic diagram of Challenge AER-200 aerobic respirometer(Challenge Environmental System, Inc., Fayetteville, AR, USA).

2.2. 회분식 실험

2.2.1. 입자상 유기물이 탈질 및 인방출에 미치는 영향

유효용량이 1 L인 회분식 반응조를 탈질과 인방출 실험에 각각 4개씩 총 8개를 사용하였으며, 반응조 수표면이 안정된 상태에서 슬러지의 완전교반을 유도하기 위해 jar-tester impeller의 회전 속도를 40~60 rpm으로 적절히 조절하였다. 8개의 회분식 반응조에 하수처리장 유출수와 입자상 유기물 혼합액을 각각 반응조 No. 1과 No. 5에는 800 mL와 0 mL, 반응조 No. 2와 No. 6에는 775 mL와 25 mL, 반응조 No. 3과 No. 7에는 750 mL와 50 mL를 넣고 반응조 No. 4와 No. 8에는 하수를 1시간 침전시킨 하수의 상등수를 800 mL를 투입한 후 활성슬러지 농축액 200 mL

를 투입하여 MLSS농도가 약 1,600 mg/L가 되도록 하였다. 입자상 유기물 혼합액은 O하수처리장의 유입관거에서 채취된 유입수에서 원심분리기를 이용하여 분리된 입자상 유기물을 하수처리장 유출수로 희석하여 SS농도가 약 10000 mg/L가 되도록 제조하였다. 탈질실험에 이용된 No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 반응조에는 KNO₃로 조제한 표준용액을 적당량 투입하여 NO₃-N농도가 20 mg/L가 되도록 하였다. 시료는 일정시간 간격으로 채취하여 SCOD_{Cr}와 NO₃-N 및 PO₄³⁻-P를 측정하였다. 시료분석은 Standard methods와 수질오염공정시험법에 준하여 실시하였다.

2.3. 연속식 실험

2.3.1. 일차침전지를 거친 하수와 일차침전지를 거치지 않은 하수가 주입된 활성슬러지 공정의 유기물 제거 및 질산화효율

포기조 용량과 침전조 용량이 칸막이에 의해 각각 5 L와 2 L로 분리되고 아크릴로 제작된 실험실 규모의 반응조 4개를 사용하였다. 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 유입되는 반응조 No. 1, No. 2, No. 3는 수리학적 체류시간이 유기물을 제거 및 질산화 반응에 미치는 영향을 분석하기 위하여 HRT를 반응조 순서에 따라 3 hr, 4 hr, 5 hr으로 하였고 일차 침전지를 거친 하수가 유입되는 No. 4는 일반 하수처리장의 포기조 체류시간을 고려하여 HRT를 3 hr로 하였다. 모든 반응조는 MLSS농도 3,000 mg/L, SRT 3~5 일, DO농도 3~4 mg/L를 유지하였고 암모니아 농도는 NH₄Cl을 적당량 투입하여 하수처리장의 일반 설계기준인 35 mg/L로 유지시켰다. 40일 후에는 실험결과에 따라 No. 1는 운전을 중지하고 반응조 No. 2, No. 3는 동일한 HRT로 계속하여 운전하였으며 No. 4 반응조는 HRT를 3 hr에서 4 hr로 증가시켜 운전하였다.

2.3.2. 일차침전지를 거친 하수와 일차침전지를 거치지 않은 하수가 주입된 고도처리 공정의 유기물 제거 및 질산화효율

회분식 실험과 질산화 실험의 결과를 토대로 3개의 A²O 시스템을 운전하였다. 일차침전지를 거치지 않은 하수를 주입하는 시스템 No. 1, No. 2는 혐기조와 포기조의 HRT를 1 hr, 5 hr로 동일하게 하였고 무산소조의 HRT를 각각 2 hr와 3 hr으로 하였다. 일차침전지를 거친 하수를 주입하는 시스템 No. 3는 혐기조와 무산소조, 호기조의 HRT를 각각 1 hr, 2 hr, 4 hr로 하였다. 각 시스템의 총 HRT는 시스템 No.1이 8시간, No. 2가 9시간, 시스템 No. 3을 7시간으로 하였다. 각 시스템의 MLSS농도는 3,000 mg/L를 유지하였고 유입수의 암모니아 농도는 NH₄Cl을 적당량 투입하여 약 35 mg/L로 유지시켰다. 유입수는 3개의 정량펌프를 이용하여 유입되었고, 내부반송과 외부반송도 6개의 정량펌프를 이용하여 시스템 유입수 유량대비 각각 1~1.5Q, 0.5Q로 유지되었다. 시스템을 운전하기 시작한 후 2일 간격으로 유입수와 각 반응조의 유출수를 채취하여 TSS, VSS, TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr}, TKN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, TP,

Table 1. Operation mode of A²/O processes

		System No. 1	System No. 2	System No. 3
HRT (hr)	Anaerobic	1	1	1
	Anoxic	2	3	2
	Oxic	5	5	4
Internal recycle	RUN 1	1.0 Q		
	RUN 2	1.5 Q		
External recycle	RUN 1	0.5 Q		
	RUN 2			

PO₄³⁻-P, MLSS, MLVSS를 측정하였으며 주기적으로 각 반응조의 SCOD_{Cr}과 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, PO₄³⁻-P농도를 분석하였다. 시료분석은 Standard methods와 수질오염공정시험법에 준하여 실시하였다. Table 1은 실험에 사용된 시스템 No. 1, No. 2, No. 3에 대한 운전조건을 나타낸 것이다.

본 실험에는 O하수처리장의 유입관거에서 하수처리장으로 유입되는 유입하수를 채취하여 이용하였다. 채취된 하수를 약 1시간 동안 침전시킨 후 그 상등액을 일차침전지를 거친 하수로 실험에 사용하였으며, 채취된 하수의 조대부유물질을 제거하기 위해 4 mm체를 통과시킨 하수를 일차 침전지를 거치지 않은 하수로 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 하수의 COD 분율

일차 침전지를 거치지 않은 하수를 100 mL, 200 mL, 300 mL 주입한 Serum bottle reactor No. 1, No. 2, No. 3에서의 초기 TCOD_{Cr}농도는 번호 순서대로 각각 78.4 mg/L, 156.8 mg/L, 235.2 mg/L이었다. OUR(Oxygen Uptake Rate)를 이용하여 산정한 결과 각 Serum bottle reactor의 RBCOD농도는 24.9 mg/L, 48.6 mg/L, 71.1 mg/L를 나타내 RBCOD농도 분율은 31.8%, 31%, 30.2%로 계산되었다. 또한 SBCOD농도는 39~111.9 mg/L의 범위를 나타내어 SBCOD농도 분율은 49.7%, 52.5%, 47.6%로 계산되었다.

위의 자료로부터 일차 침전지를 거치지 않은 하수 중 RBCOD농도 분율은 평균 31%이며 SBCOD농도 분율은 평균 51%이고 Inert COD농도 분율은 평균 18%로 산출하였다. 일차 침전지를 거친 하수가 주입된 Serum bottle reactor No. 4, No. 5, No. 6에서의 초기 TCOD_{Cr}농도는 번호 순서대로 각각 51.2 mg/L, 102.4 mg/L, 153.6 mg/L이었다. OUR (Oxygen Uptake Rate)를 이용하여 산정한 결과 각 Serum bottle reactor의 RBCOD농도는 24.7 mg/L, 49.1 mg/L, 71.5 mg/L를 나타내 RBCOD농도 분율은 48.2%, 47.9%, 46.5%로 계산되었다. 또한 SBCOD농도는 16.4~58.3 mg/L의 범위를 나타내어 SBCOD농도 분율은 32%, 33.4%, 37.9%로 계산되었다. 위의 자료로부터 일차 침전지를 거친 하수 중 RBCOD농도 분율은 평균 48%이며 SBCOD농도 분율은 평균 35%이고 Inert COD농도 분율은 평균 17%로 나타났다. 일차 침전지를 거치지 않은 하수와 일차 침전지를 거친 하수의 TCOD에 대한 BDCOD의 분율은 각각 0.82과 0.84로 나타나 IWAPRC(Henze et al., 1987)에서 제시한 일반적인 하수의 분해가능한 COD의 분율인 0.7~0.8보다 약간 높은 값을 나타냈다. 일차 침전지를 거친 하수의 COD분율은 Orhon 등(1992)이 제시한 도시하수의 COD분율과 비슷한 값으로 나타났다. 도출된 COD분율을 적용하여 COD_{Cr}농도가 392 mg/L인 일차침전지를 거치지 않은 하수의 RBCOD와 SBCOD농도는 각각 121.5 mg/L, 200.0 mg/L로 산출되었으며 COD농도가 256.0 mg/L인 일차침전지를 거친 하수의 RBCOD와 SBCOD농도는 각각 123 mg/L와 89.5 mg/L로 산출되었다. 일차침전지를 거치지 않은 하수와 일차침전지를 거친 하수의 RBCOD농도는 차이가 없었으나 SBCOD농도는 큰 차이를 나타내었다. 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 일차 침전지를 거친 하수보다 분해 가능한 유기물 농도가 약 52%정도 증가된 것을 알 수 있었다. SBCOD가 탈질이나 인방출에 기질로써 사용된다면 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 생물학적 질소·인 제거 공정으로 유입되면 질소·인 제거율이 높아질 것으로 판단된다. 일차 침전지를 거치지 않은 하수와 일차 침전지를 거친 하수의 COD분율은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Experimental results of the BDCOD fraction

Items		RBCOD (%)	SBCOD (%)	InertCOD (%)	TCOD (%)
MWBPC	No. 1	31.8 (24.9 mg/L)	49.7 (39 mg/L)	18.5 (14.5 mg/L)	100 (78.4 mg/L)
	No. 2	31.0 (48.6 mg/L)	52.5 (82.3 mg/L)	16.5 (25.9 mg/L)	100 (156.8 mg/L)
	No. 3	30.2 (71.1 mg/L)	47.6 (111.9 mg/L)	22.2 (52.2 mg/L)	100 (235.2 mg/L)
Average		31	51	18	100
MWAPC	No. 4	48.2 (24.7 mg/L)	32 (16.4 mg/L)	19.8 (10.1 mg/L)	100 (51.2 mg/L)
	No. 5	47.9 (49.1 mg/L)	33.4 (34.2 mg/L)	18.7 (19.1 mg/L)	100 (102.4 mg/L)
	No. 6	46.5 (71.5 mg/L)	37.9 (58.3 mg/L)	15.5 (23.82 mg/L)	100 (153.6 mg/L)
Average		48	35	17	100

3.2. 입자상 유기물이 탈질 및 인방출에 미치는 영향

입자상 유기물이 탈질 반응에 외부탄소원으로 사용될 수 있는지를 알아보고자 회분식 반응조를 운전한 결과 하수처리장 유출수만을 투입한 대조 반응조 No. 1과 하수처리장 유출수와 입자상 유기물 농축액이 각각 25 mL, 50 mL 투입된 반응조 No. 2, No. 3는 NO_3^- -N농도가 천천히 감소되는 경향을 보였으며 5시간이 경과된 후 각 반응조의 NO_3^- -N농도는 초기 20 mg/L에서 반응조 번호순서에 따라 각각 17.5 mg/L, 11.2 mg/L, 8.7 mg/L로 감소하였다. 일차침전지 상등수가 투입된 반응조 No. 4의 NO_3^- -N농도는 반응시간 2시간 후 6 mg/L로 급격히 감소하였다. 반응조 No. 1, No. 2, No. 3의 SCOD_{Cr} 농도 변화는 나타나지 않았으며 일차침전지 상등수가 투입된 반응조 No. 4의 SCOD_{Cr} 농도는 탈질 미생물이 NO_3^- -N을 제거하는데 SCOD_{Cr} 를 유기물로 소모했기 때문에 반응시간 2시간까지 비교적 빨리 감소되는 경향을 나타내었으며 SCOD_{Cr} 농도는 초기 126 mg/L에서 48.8 mg/L로 감소하였다. 하수처리장 유출수를 투입한 반응조 No. 1의 비탈질 속도(specific denitrification rate)는 0.47 mgNO_3^- -N/gMLVSS · hr로 계산되어 U.S. EPA (1993)에서 제시한 $0.48 \sim 1.2 \text{ mgNO}_3^-$ -N/gMLVSS · hr범위의 내생탈질속도의 낮은 범위의 값을 나타내었다. 입자상 유기물 농축액을 각각 25 mL, 50 mL 투입한 반응조 No. 2, No. 3의 비탈질속도는 각각 1.42 mgNO_3^- -N/gMLVSS · hr, 1.91 mgNO_3^- -N/gMLVSS · hr로 계산되어 Carley 등(1991)이 하수를 기질로 하여 도출한 비탈질속도 $1.3 \sim 4.6 \text{ mgNO}_3^-$ -N/gMLVSS · hr와 U.S. EPA(1993)에서 제시한 무산소조에서의 비탈질속도 $1.7 \sim 6.2 \text{ mgNO}_3^-$ -N/gMLVSS · hr범위내의 값을 보이나 비교적 낮은 값을 나타내었다. 반응조 No. 4에서 탈질이 일어나는 2시간 동안의 비탈질속도는 5.89 mgNO_3^- -N /gMLVSS · hr로 U.S. EPA(1993)에서 제시한 무산소조 비탈질속도 범위내의 높은 값을 나타내었다. 본 실험 결과 입자상 유기물은 탈질 미생물이 기질로써 이용할 수 있을 것으로 판단되지만 입자상 유기물을 이용한 비탈질속도는 용존성 유기물을 이용한 비탈질속도 보다 매우 낮게 나타나 입자상 유기물을 탈질반응에 이용하기 위해서는 무산소조의 체류시간이 연장되어야 할 것으로 판단된다. 입자상 유기물 투여가 인방출을 위한 탄소원으로 사용되는지를 알아보기 위한 회분식 반응조 운전 결과 하수처리장 유출수가 투입된 반응조와 입자상 유기물 농축액이 투입된 반응조들의 인 농도 변화는 나타나지 않았다. 그러나 하수처리장 유출수가 투입된 No. 4에서는 PO_4^{3-} -P농도가 반응시간 1시간까지는 급격히 증가하다가 그 후에는 반응시간 4시간까지 완만하게 증가하여 PO_4^{3-} -P농도가 7.72 mg/L로 초기 농도에 비해 약 6.5배 증가하였다. 또한 반응조 No. 1, No. 2, No. 3의 SCOD_{Cr} 농도는 변화가 없는 것으로 나타났으나 반응조 No. 4의 SCOD_{Cr} 농도는 반응시간이 증가함에 따라 점차 감소되어 반응시간 4시간에는 24.8 mg/L까지 낮아졌다. 반응조 No. 4에서의 반응시간 1시간 동안 1 g의 SCOD_{Cr} 이 소모되어 방출되는 PO_4^{3-} -P의 양은 0.25 gPO_4^{3-} -P/

gCOD로 계산되어 Moser 등(1999)과 Henze 등(1995)이 보고한 $0.38, 0.4 \text{ gPO}_4^{3-}$ -P/gCOD보다 다소 낮은 값을 나타내었다. 따라서 입자상 유기물은 Maris 등(1988)과 Wentzel 등(1985)이 보고한 SBCOD는 인제거에 전혀 영향을 미치지 않는다는 연구결과와 같이 혐기성 상태에서 인 방출시에 필요한 탄소원으로써 사용되지 않는 것으로 나타났다.

3.3. 일차침전지를 거친 하수와 일차침전지를 거치지 않은 하수가 주입된 활성슬러지 공정의 유기물 제거 및 질산화효율

운전기간 동안 일차 침전지를 거치지 않은 하수의 TSS 농도는 146~256 mg/L의 범위로 평균 211 mg/L이고 TCOD_{Cr} 농도는 219~456 mg/L의 범위로 평균 375 mg/L이며 SCOD_{Cr} 농도는 93.6~162.7 mg/L로 평균 126.6 mg/L로 나타났다. 일차 침전지를 거친 하수의 TSS 농도는 56~100 mg/L의 범위로 평균 78.5 mg/L이고 TCOD_{Cr} 농도는 154.6~284.6 mg/L의 범위로 평균 226 mg/L이며 SCOD_{Cr} 농도는 94~158.6 mg/L로 평균 126.2 mg/L로 나타났다. 각 반응조의 MLSS 농도는 반응조 번호에 따라 각각 평균 3,467 mg/L, 3,089 mg/L, 3,415 mg/L, 3,408 mg/L로 유지되었으며 MLVSS 농도는 MLSS 농도의 약 82%로 나타났다. 유출수의 평균 TSS 농도는 반응조의 번호에 따라 각각 22.9 mg/L, 22.0 mg/L, 19.9 mg/L, 22.54 mg/L로 나타났고 각 반응조 유출수의 평균 TCOD_{Cr} 농도는 반응조의 번호 순서에 따라 각각 55.2 mg/L, 52.0 mg/L, 47.0 mg/L, 50.2 mg/L로 나타났다. 또한 각 반응조는 번호순서에 따라 76.8%, 78.6%, 82.2%, 80.1%의 평균 SCOD_{Cr} 제거효율을 나타내었다. 모든 반응조에서 전반적으로 높은 유기물 제거율을 나타내었다. 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 유입된 반응조 No. 1, No. 2, No. 3의 TSS 제거율은 89~90%정도로 나타났으며 일차 침전지를 거친 하수가 유입된 반응조 No. 4의 TSS 제거율은 71.3%로 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 유입된 반응조의 TSS제거율 보다 낮게 나타났는데 이는 모든 반응조에서 유출되는 TSS농도는 비슷하지만 유입되는 TSS농도는 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 일차 침전지를 거친 하수보다 63%정도 높기 때문에 상대적으로 일차 침전지를 거친 하수가 유입된 반응조 No. 4가 낮은 TSS제거율을 나타내었다. 이같은 결과는 TCOD_{Cr} 제거율에서도 같은 경향을 나타냈다. SCOD_{Cr} 제거율은 HRT가 길어짐에 따라 높게 나타났으며 반응조 No. 1이 No. 4보다 SBCOD제거율이 낮게 나타난 것은 일차 침전지를 거치지 않은 하수에 포함된 입자성 유기물이 미생물에 의해 분해되면서 미생물 용해성 대사산물(Soluble microbial products)이 생성된 결과라고 사료된다. 본 연구와 비슷한 TCOD_{Cr} 부하량으로 운전된 활성슬러지 공정에서 Clarkson 등(1980)은 약 98%의 TSS 및 TCOD_{Cr} 제거율을 얻었다고 보고하였는데 이와 같이 TSS와 TCOD_{Cr} 의 제거효율이 높은 이유는 반응조의 MLSS농도가 6,600 mg/L 정도로 높게 유지되었고 반응조

후단에 인제거를 위한 응집제를 투여하여 유출수 중에 TSS농도가 낮아졌기 때문이다. 운전기간 동안 일차 침전지를 거치지 않은 하수의 TKN농도는 43.0~47.9 mg/L의 범위로 평균 45.3 mg/L로 반응조 No. 1, No. 2, No. 3의 평균 TKN 부하량은 번호순서대로 각각 0.363 kgTKN/m³·day, 0.272 kgTKN/m³·day, 0.218 kgTKN/m³·day로 나타났다. NH₄⁺-N의 평균농도는 35.7 mg/L로 나타났다. 일차 침전지를 거친 하수의 TKN농도는 36.9~40.9 mg/L의 범위로 평균 38.7 mg/L로 반응조 No. 4의 평균 TKN 부하량은 0.31 kgTKN/m³·day로 나타났고 NH₄⁺-N의 평균농도는 35.5 mg/L로 나타났다. 운전기간 동안 반응조 No. 1, No. 2, No. 3의 유입수 TCOD/TKN비는 8.27로 나타났으며 반응조 No. 4 유입수의 TCOD/TKN 비는 5.84으로 나타나 국내 일반하수의 TCOD/TKN 비인 4보다 높게 나타났다. 유출수의 평균 TKN농도는 반응조의 번호 순서에 따라 각각 17.8 mg/L, 9.8 mg/L, 5.1 mg/L, 11.6 mg/L로 나타났고 유출수의 평균 NH₄⁺-N농도는 반응조의 번호 순서에 따라 각각 16.1 mg/L, 8.2 mg/L, 3.6 mg/L, 9.9 mg/L로 나타났다. Benninger 등(1978)은 유입수의 TCOD/TKN 비가 4.28 이고 TKN부하율이 0.168 kgTKN/m³·day인 활성슬러지 반응조를 운전한 결과 93%의 TKN제거율을 얻었다고 보고하였는데 본 실험에 비하여 높은 TKN제거율이 나타난 이유는 TKN부하가 낮고 유입수의 TCOD/TKN비가 낮아서 반응조내의 전체 미생물 중 질산화 미생물의 비율이 높아졌기 때문으로 사료된다. Lawrence 등(1976)은 TCOD/TKN 비가 16.1인 유입수를 활성슬러지 반응조에 주입하여 본 실험 결과보다 93.8%의 높은 TKN 제거율이 나타났다고 보고하였는데 이는 HRT를 8 hr로 유지하여 TKN부하율을 0.038 kgTKN/m³·day로 낮게 유지하였기 때문으로 사료된다. Clarkson 등(1980)은 C/N비가 5.28인 하수를 HRT가 2 hr로 유지되는 활성슬러지 반응조에 주입하여 TKN 부하율을 0.253 kgTKN/m³·day로 유지한 결과 99.5%의 TKN 제거율이 나타났다고 보고하여 본 실험의 반응조 No. 2, No. 3과 비슷한 TKN 부하율에서 더 높은 TKN 제거율을 얻을 수 있었는데 이는 반응조 후단에 응집제를 투여하여 유출수의 TSS농도를 매우 낮게 유지하여 더 높은 TKN 제거율이 나타난 것으로 판단된다. 각 반응조의 유입수중 TKN농도와 유출수 NH₄⁺-N 농도를 통해 산출된 반응조 No. 1, No. 2, No. 3의 질산화율은 각각 64.4%, 81.9%, 93.1%로 나타났으며 일차 침전지를 거친 하수가 유입된 반응조 No. 4의 질산화율은 HRT가 3 hr로 유지되었을 때는 74.5%, 4 hr로 유지되었을 때는 90%로 나타났다. 실험 결과 NH₄⁺-N농도가 약 35 mg/L인 일차침전지를 거치지 않은 하수를 활성슬러지 공정에 유입하여 90% 이상의 질산화율을 얻기 위해서는 반응조의 HRT를 5시간 이상으로 유지하여야 하고 일차침전지를 거친 하수를 활성슬러지 공정에 유입하여 90%이상의 질산화율을 얻기 위해서는 반응조의 HRT를 4시간 이상으로 유지하여야 할 것으로 나타났다. 운전기간 동안의 항목별 농도변화는 Fig. 2에 나타내었다.

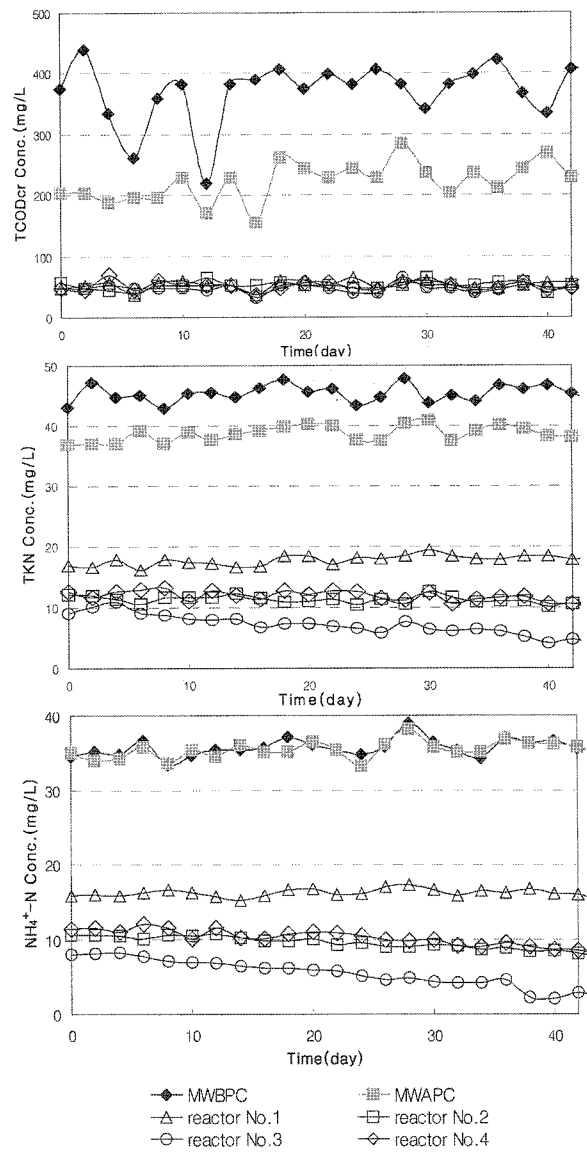


Fig. 2. Variation of TCOD_{Cr}, TKN, NH₄⁺-N concentrations due to the operation time with and without primary clarifier for activated sludge process.

3.4. 일차침전지를 거친 하수와 일차침전지를 거치지 않은 하수가 주입된 고도처리 공정의 유기물제거 및 질산화효율

총 시스템 운전기간 124일중 90일간은 내부반송율을 시스템 유입수 유량대비 1Q로 유지하였고 이후에는 1.5Q로 유지하여 시스템을 운전하였다. 운전기간 동안 일차 침전지를 거치지 않은 하수의 TSS, TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr}의 평균농도는 각각 203.6 mg/L, 375.6 mg/L, 130.9 mg/L로 나타났다. 일차 침전지를 거친 하수의 TSS, TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr}의 평균농도는 각각 77.1 mg/L, 230 mg/L, 130.1 mg/L로 나타났다. 내부반송율을 시스템 유입유량대비 1Q로 유지하였을때 각 시스템 유출수 평균 TSS농도는 시스템의 번호순서에 따라 각각 13.8 mg/L, 13.7 mg/L, 14.6 mg/L로 평균 93.2%, 93.3%, 81.1%의 TSS제거효율을 나타내었다. 각 시스템 유출수의 평균 TCOD_{Cr}농도는 시스템 번호 순서에 따라 각각 37.8 mg/L, 37.8 mg/L, 36.8 mg/L로 나타났고 각 시스템

유출수의 평균 SCOD_{Cr}농도는 시스템 번호순서에 따라 각각 22.0 mg/L, 21.4 mg/L, 20.0 mg/L로 나타났다. 모든 시스템에서 전반적으로 높은 TSS 및 유기물 제거율을 나타내었다. 시스템 유입수 유량대비내부반송율을 1.5Q로 증가하여 실험한 결과 각 시스템 유출수의 TSS, TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr}의 평균농도는 시스템 유입수 유량대비 내부반송율의 증가전과 비슷한 값으로 나타나 유입수 유량대비 내부반송율의 1Q에서 1.5Q로의 증가는 유기물 제거율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 시스템 No. 3의 TSS와 TCOD_{Cr}제거율이 다른 반응조와 비교하여 낮게 나타난 것은 각 반응조의 유출수의 수질은 비슷한데 비해반응조 No. 3로 유입되는 일차 침전지를 거친 하수의 유입 TSS 및 TCOD_{Cr}농도가 낮아서 상대적으로 제거효율이 낮게 계산되었다. 운전기간 동안 일차 침전지를 거치지 않은 하수의 평균 TKN농도는 44.4 mg/L로 시스템 No. 1과 No. 2의 평균 TKN부하량은 0.212 kgTKN/m³ · day로 나타났고 NH₄⁺-N의 평균농도는 35.4 mg/L로 나타났다. 일차 침전지를 거친 하수의 평균TKN농도는 38.8 mg/L로 시스템 No. 3의 평균 TKN부하량은 0.232 kg TKN/m³ · day로 나타났고 NH₄⁺-N의 평균농도는 35.3 mg/L로 나타났다. 내부반송율을 시스템 유입유량대비 1Q로 유지하였을 때 각 시스템 유출수의 평균 TKN농도는 시스템의 번호 순서에 따라 각각 2.4 mg/L, 2.4 mg/L, 2.3 mg/L로 나타났고 유출수의 평균 NH₄⁺-N농도는 시스템의 번호순서에 따라 각각 0.9 mg/L, 0.9 mg/L, 0.7 mg/L로 나타났다. 각 시스템 유출수의 평균 NO₃⁻-N농도는 시스템의 번호 순서에 따라 각각 9.2 mg/L, 7.5 mg/L, 8.5 mg/L로 나타났으며 평균 NO₂⁻-N농도는 시스템의 번호 순서에 따라 0.3 mg/L, 0.3 mg/L, 0.3 mg/L로 나타났다. 내부반송율을 시스템 유입유량대비 1.5Q로 증가하였을 때 각 시스템 유출수의 TKN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N의 평균농도는 시스템 유입수 유량대비 내부반송율의 증가전과 비슷한 값으로 나타났다. 시스템 유입수유량대비 내부반송율을 1Q로 유지하였을 때 유입수 TKN농도와 유출수 NH₄⁺-N농도차에 대한 유입수 TKN농도비로 산출된 각 시스템의 질산화율은 반응조 번호순에 따라 각각 98.0%, 97.9%, 98.0%로 모든 반응조에서 높은 질산화율을 나타내었다. 활성슬러지 반응조 운전결과와 비교하여 포기조의 HRT가 같은데도 불구하고 질산화율이 더 높게 나타난 것은 각 시스템으로 주입되는 유입수내 유기물이 포기조로 유입되기 전에 혐기조와 무산소조를 지나면서 인방출과 탈질 반응에 사용되어져 포기조에서 질산화 반응에 필요한 산소가 경쟁적으로 소비되지 않았고 외·내부반송에 의해 혐기조와 무산소조에서 암모니아 농도가 희석되어 호기 반응조로 유입되는 질소의 농도가 낮아졌기 때문으로 판단된다. 유입수 TKN농도와 유출수중의 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N농도의 총합과의 차이와 유입수 TKN농도와 유출수 NH₄⁺-N농도의 차이와의 비로 산출된 각 시스템의 탈질율은 78.2%, 81.7%, 76.7%로 나타나 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 유입되는 반응조 No. 1의 탈질율이 유입수의 TKN농도가 높아 일차 침전지를 거친 하수가 유입되는 반

응조 No. 3의 탈질을 보다 약간 높게 나타났고 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 유입되고 무산소조의 체류시간이 2시간인 시스템 No. 1보다 무산소조의 체류시간이 3시간으로 운전된 시스템 No. 2의 탈질율이 약 3.5% 높게 나타났다. 시스템 유입수유량대비 내부반송율을 1.5Q로 증가하여 유지하였을 때 각 시스템의 질산화율과 탈질율은 내부반송율의 증가전과 비슷한 값을 나타냈다. 탈질율은 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 유입되고 무산소조의 체류시간이 2시간인 시스템 No. 1과 무산소조의 체류시간이 3시간으로 운전된 시스템 No. 2는 약간 증가했고 일차침전지를 거친 하수를 주입한 시스템 No. 3는 변화가 없었다. 운전기간 동안 시스템 No. 1, No. 2로 유입되는 일차 침전지를 거치지 않은 하수의 TCOD_{Cr}/TKN 비는 8.5로 계산되었으며 시스템 No. 3으로 유입되는 일차 침전지를 거친 하수의 TCOD_{Cr}/TKN비는 5.9로 나타났다. Baeza 등(2003)은 TCOD_{Cr}, TKN농도가 각각 470 mg/L, 41.8 mg/L로 조제된 하수를 주입하고 HRT 5.3 hr로 유지한 A²/O시스템을 운전한 결과 70%의 질산화율과 91%의 탈질율을 얻었다고 하였다. 본 실험과 비교하여 높은 탈질율을 얻은 것은 상대적으로 낮은 질산화를 때문인 것으로 판단되며 C/N비가 11.24로 높아 질산화 미생물의 질산화작용에 방해받을 받은 것으로 판단된다. 각 시스템에서 유입수 TCOD_{Cr}농도와 유출수 SCOD_{Cr}농도의 차이와 유량대비 NO₃⁻-N 제거량을 이용하여 산출한 1 mgNO₃⁻-N이 제거되는데 소모된 유기물양은 반응조 번호순서에 따라 각각 10.46 mgCOD/mgNO₃⁻-N_{removed}, 9.94 mgCOD/mgNO₃⁻-N_{removed}, 7.20 mgCOD/mgNO₃⁻-N_{removed} 이었으며 내부반송율 변화에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다. 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 유입된 시스템 No. 1, No. 2에서는 유입되는 분해가능한 유기물의 농도가 약 52% 증가되어 시스템 No. 3보다 더 많은 질소가 제거될 것이라고 예상했지만 각 시스템에서 제거된 질소의 양은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 SBCOD가 탈질 미생물이 사용할 수 있는 RBCOD로 전환되는 가수분해율이 탈질을보다 느리기 때문에 2~3시간의 무산소 체류시간에서는 가수분해되는 SBCOD의 양이 적었던 것으로 판단된다. Randall 등(1990)이 HRT가 6 hr로 유지된 A²/O시스템을 운전하여 산출한 1 mgNO₃⁻-N를 제거하는데 소모되는 유기물양 8.95 mgCOD/mgNO₃⁻-N_{removed}은 시스템 No. 1, No. 2보다 낮은 값인데 이는 시스템 No. 1, No. 2로 유입되는 유기물의 양은 많지만 유기물이 탈질 작용에서 사용되지 않고 포기조에서 제거되었기 때문으로 판단된다. 조 등(2001)은 혐기조, 무산소조, 포기조의 체류시간이 각각 2 hr, 2 hr, 6 hr로 유지된 A²/O시스템에 TCOD_{Cr}, TKN의 농도가 각각 227 mg/L, 33.3 mg/L이고 SBCOD분율이 전체 유기물의 49%인 하수를 주입하여 운전한 결과 1 mgNO₃⁻-N이 제거되는데 소모되는 유기물의 양은 7.63 mgCOD/mgNO₃⁻-N_{removed}으로 산출되어 시스템 No. 3과 비슷한 값을 나타내었다. 유(2000)는 TCOD_{Cr}, TSS, TKN의 평균농도가 각각 259.6 mg/L, 235.7 mg/L, 34.1 mg/L인 하수처리장 일차침전지 유출수를 HRT가 6.7 hr인 A²/O시스

템에 주입하여 99%의 질산화율과 81%의 탈질율을 얻었으며 이때 1 mgNO₃⁻-N이 제거되는데 소모되는 유기물의 양은 8.7 mgCOD/mgNO₃⁻-N_{removed}이라고 보고하여 일차침전지를 거친 하수를 주입하였지만 본 실험의 일차침전지를 거치지 않은 하수를 주입한 시스템 No. 2와 비슷한 결과를 얻었다. 유(2000)의 TCOD_{Cr} 농도는 본 실험의 일차침전지를 거친 하수와 비슷하지만 TSS농도가 높아 SBCOD분율이 높을것으로 판단되며 무산소조의 HRT가 1.3 hr로 짧아 탈질반응에 SBCOD의 소모가 많지 않았기 때문에 판단된다. 문헌조사결과와 본 실험결과에서 탈질율과 1 mg NO₃⁻-N이 제거되는데 소모된 유기물양은 큰 차이를 나타내지 않아 유입수에 포함된 SBCOD가 탈질반응에 소모되지 않고 호기반응조에서 소모되었음을 알 수 있었다. 또한 무산소조의 HRT를 3시간으로 증가시켜도 SBCOD소모에 따른 탈질율은 크게 증가되지 않음을 알 수 있었다. 운전기간 동안 일차 침전지를 거친 하수의 평균 TP농도는 2.8 mg/L로 나타났고 평균 PO₄³⁻-P농도는 1.31 mg/L로 나타났 다. 일차 침전지를 거치지 않은 하수의 평균 TP농도는 4.7 mg/L로 나타났고 평균 PO₄³⁻-P농도는 1.3 mg/L로 나타났 다. 시스템 유입수유량대비 내부반송율이 1Q일때 각 시스템 유출수의 평균 TP농도는 번호순서에 따라 1.5 mg/L, 1.5 mg/L, 1.5 mg/L로 나타났으며 시스템 유입수유량대비 내부반송율을 1.5Q로 증가하여 운전하였을때 반송율증가전과 비슷한 제거율을 나타냈다. 또한 유출수의 평균 PO₄³⁻-P농

도는 시스템의 번호 순서에 따라 각각 1.2 mg/L, 1.2 mg/L, 1.2 mg/L로 나타났고 시스템 유입수유량대비 내부반송율을 1.5Q 증가하여 운전하였을 때 내부반송율 증가전과 비슷한 제거율을 나타내었다. 일반적으로 생물학적 인 제거 공정에서 유입수의 TCOD_{Cr}/TP비가 40이상이면 유출수의 TP 농도가 1 mg/L이하로 배출될 것으로 예상되지만 일차 침전지를 거친 하수와 일차 침전지를 거치지 않은 하수의 TCOD_{Cr}/TP비가 각각 80.9, 79.0으로 유입수의 TCOD_{Cr}/TP 비가 40이상임에도 불구하고 모든 반응조의 유출수에서 TP 농도가 1 mg/L이상으로 측정된 것은 NO₃⁻-N농도가 높은 유출수가 외부반송에 의해 혐기조로 유입되어 인 방출에 저해 요인으로 작용하였기 때문으로 사료된다. 운전기간동안의 유입수와 유출수의 항목별 농도는 Table 3에 나타내었다. RUN1은 시스템 유입수 유량대비 내부반송율을 1Q로 운전한 기간이고 RUN 2는 시스템 유입수 유량대비 내부반송율을 1.5Q로 운전한 기간이다.

4. 결론

본 연구에서는 일차침전지를 거치지 않은 하수와 일차침전지를 거친 하수의 COD분율을 측정하여 RBCOD와 SBCOD양을 비교해보고, 입자상 유기물이 탈질과 인방출에 탄소원으로 사용되는지 조사하였다. 또한 일차침전지를 거친 하수와 일차침전지를 거치지 않은 하수를 활성슬러지

Table 3. Experimental results of TSS, TCOD_{Cr}, TKN, NH₄⁺-N, TP removal efficiency in each system

Items		System No. 1		System No. 2		System No. 3	
Wastewater		MWBPC		MWBPC		MWAPC	
TSS conc. (mg/L)	Inf. conc.	203 (116~256)		203 (116~256)		77.1 (56~120)	
	Eff. conc.	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2
		13.8	10.6	13.7	9.5	14.6	13.9
Removal efficiency (%)		93.2	94.7	93.3	95.2	81.1	81.9
TCOD _{Cr} conc. (mg/L)	Inf. conc.	375.6 (325.4~483.4)		375.6 (325.4~483.4)		230 (179~301)	
	Eff. conc.	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2
		37.8	37.5	37.8	37.5	36.8	35.6
Removal efficiency (%)		89.9	89.7	90	89.7	84	84.6
TKN conc. (mg/L)	Inf. conc.	44.4 (32.8~49.8)		44.4 (32.8~49.8)		38.8 (25.4~43.2)	
	Eff. conc.	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2
		2.38	2.33	2.42	2.40	2.27	2.29
NH ₄ ⁺ -N conc. (mg/L)	Inf. conc.	35.4 (25.0~39.0)		35.4 (25.0~39.0)		35.3 (22.5~38.5)	
	Eff. conc.	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2
		0.9	0.9	0.9	1.0	0.7	0.8
Nitrification efficiency (%)		98.0	97.9	97.9	97.7	98.0	98.0
Denitrification efficiency (%)		78.2	80.1	81.8	83.2	76.7	76.9
TP conc. (mg/L)	Inf. conc. (mg/L)	4.7 (3.7~6.0)		4.7 (3.7~6.0)		2.8 (2.1~4.0)	
	Eff. conc. (mg/L)	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2
		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Removal efficiency (%)		68.7	68.9	69.1	68.9	46.5	47.3

반응조에 주입하여 HRT에 따른 처리효율을 분석하고 일차 처리로 인한 유입수 수질 변화와 무산소조 HRT에 따른 A²/O공정에서의 유기물제거율과 질산화 및 탈질을 평가하기 위해 실행된 실험결과를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 일차침전지를 거치지 않은 하수와 일차침전지를 거친 하수의 RBCOD농도는 차이가 없었으나 SBCOD농도는 큰 차이를 나타내 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 일차 침전지를 거친 하수보다 분해 가능한 유기물 농도가 약 52%정도 더 많은 것을 알 수 있었다.
- 2) 실험 결과에 의하면 입자상 유기물질을 탈질 반응에 사용할 수 있다. 그러나 비탈질속도가 매우 낮은 것으로 나타났다. 또한 입자상 유기물은 인 방출 반응에 기질로 사용되지 않는 것으로 추정되었다.
- 3) 활성슬러지 공정에서 일차 침전지를 거치지 않은 하수가 주입된 반응조의 질산화율을 90%이상으로 유지하기 위해서는 반응조 HRT가 5시간 이상으로 유지되어야 하며 일차 침전지를 거친 하수가 주입된 반응조의 질산화율을 90%이상 유지하기 위해서는 반응조의 HRT가 4시간 이상으로 유지되어야 한다는 것을 알 수 있었다.
- 4) 일차침전지를 거치지 않은 하수를 주입한 시스템 No. 1, No. 2과 일차침전지를 거친 하수를 주입한 시스템 No. 3의 유기물제거율과 질산화율, 인제거율은 비슷하게 나타났다. 3개의 A²/O시스템중 일차침전지를 거친 시스템 No. 3는 가장 낮은 탈질율을 나타내었으며 무산소조 HRT를 3시간으로 유지한 시스템 No. 2는 가장 높은 탈질율을 나타내었으나 각 시스템의 탈질율의 절대값은 큰 차이를 나타내지는 않았다. 일차침전지를 거치지 않은 하수에 포함된 SBCOD는 실험에 적용한 HRT조건에서도 탈질반응에 거의 소모되지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 유영수, 선단무산소조와 원수분배를 이용한 고도처리공정과 A²/O공정의 영양염류 제거특성 비교, 연세대학교 대학원 도시공학과 석사학위논문, pp. 43-56 (2000).
- 조남운, 임봉수, 어성욱, 간헐 포기를 결합한 MLE 공정과 A²/O공정의 영양소 제거특성 비교, *상하수도학회지*, **15**(4), pp. 325-333 (2001).
- Baeza, J. A., Gabriel, D. and Lafuente, J., Effect of Internal Recycle on the Nitrogen Removal Efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic(A²/O) Wastewater Treatment Plant(WWTP), *Process Biochemistry*, **39**(2004), pp. 1615-1624 (2003).
- Benninger, R. W. and Sherrard, J. H., Nitrification and Alkalinity Relationships in Activated Sludge, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **50**(9), pp. 2132-2142 (1978).
- Carley, B. N., and Mavinic, D. S., The Effects of External Carbon Loading in Nitrification and Denitrification of a High-Ammonia Landfill Leachate, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **63**(1), pp. 51-59 (1991).
- Clarkson, R. A., Lau, P. J. and Krichthen, D. J., Single-sludge Pure-oxygen Nitrification and Phosphorus Removal, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **52**(4), pp. 770-779 (1980).
- Hanaki, K., Wantawin, C. and Ohgaki, S., Effects of the Activity of Heterotrophs on Nitrification in a Suspended-Growth Reactor, *Wat. Res.*, **24**(3), pp. 289-296 (1990).
- Henze, M., Grady Jr., C. P. L., Gujer, W., Marais, G. V. R. and Mastuo, T., Activated sludge model No. 1 : First Report by IAWPRC Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment, IAWPRC Scientific and Technical Report Series 1, Elsevier Science, London (1987).
- Henze, M., The Influence of Raw Wastewater Biomass on Activated Sludge Oxygen Respiration Rates and Denitrification Rates, *Wat. Sci. Technol.*, **21**, pp. 603-607 (1989).
- Henze, M., Gujer, W. and Mino, T., Wastewater and Biomass Characterization for the Activated Sludge Model No. 2 : Biological phosphorus removal, *Wat. Sci. Technol.*, **31**(2), pp. 13-23 (1995).
- Lawrence, A. W. and Brown, C. G., Design and Control of Nitrifying Activated Sludge Systems, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **48**(7), pp. 1779-1803 (1976).
- Marais, G. V. R., Loewenthal, R. E. and Siebritz, I. P., Review : Observations Supporting Phosphate Removal by Biological Excess Uptake, *Wat. Sci. Technol.*, **15**(3/4), pp. 15-41 (1988).
- Moser, E. R., Kuhni, M. K., Bernhard, C. and Siegrist, H., Fermentation of Raw Sludge on a Industrial Scale and Applications for Elutriating Its Dissolved Products and Non-sedimentable Solids, *Wat. Res.*, **33**(16), pp. 3503-3511 (1999).
- Orhon, D., Artan, N., Büyükmurat, M. and Görgün, E., The Effect of Residual COD on the Biological Treatability of Textile Wastewater, *Wat. Sci. Technol.*, **26**(3/4), pp. 815-825 (1992).
- Randall, C. W., Waltrip, D. and Wable, M. V., Upgrading a Municipal Activated Sludge Plant for High-rate Biological Nutrient Removal, *Wat. Sci. Technol.*, **22**(7/8), pp. 21-33 (1990).
- U. S. EPA, Process Design Manual Nitrogen Control, Office of Technology Transfer, Washington D. C. (1975).
- U. S. EPA, Manual : Nitrogen control, EPA 625/R-93/010, Office of Research and Development, Cincinnati, OH. (1993).
- Wentzel, M. C., Dold, P. L., Ekama, G. A. and Marais, G. V. R., Kinetics of Biological Phosphorus Release, *Wat. Sci. Technol.*, **17**, pp. 57-71 (1985).