

무산소조에서 고농도 미생물을 이용한 하수고도처리공정의 처리특성

손동훈 · 임봉수[†] · 박혜숙^{*}

대전대학교 환경공학과 · 대전보건대학 환경보건과

Characteristics of Advanced Wastewater Treatment Process Using High MLSS in Anoxic Tank

Dong-Hun Son · Bong-Su Lim[†] · Hye-Sook Park^{*}

Department of Environmental Engineering, Daejeon University

^{*}Department of Environment Health, Daejeon Environment Health College

Abstract : This study was accomplished to develop an advanced wastewater treatment process using high MLSS in anoxic tank aimed to improve nutrient removal and to reduce wasting sludge. It was operated with 4 Modes with varying solid concentration and internal recycle ratios. Mode I, II, III was operated 1.0~1.5% MLSS concentration at anoxic tank with 50% sludge recycle rate, however, each internal recycle rate were 100%, 200%, 300% and Mode IV was operated 1.5 - 2.0% MLSS concentration at anoxic tank with 50% sludge recycle rate and 100% internal recycle rate. The COD removal efficiency didn't show any big difference from Mode I to IV. The average COD removal rate was over than 90%. The T-N removal rate was 73%, the highest rate in all mode. The 36% of SCOD is used for the denitrification and phosphorus release in the anoxic tank. Specific denitrification rate was 3.5mg NO₃⁻-N/g Mv/hr and denitrification time was 0.7hr. As MLSS concentration is higher in anoxic tank as denitrification time would be shorter. The T-P removal rate was average 70%. The phosphorus release accomplished from the anoxic tank because the anaerobic condition was prevalent in the anoxic due to the prompt completion of denitrification. Sludge production was 0.28 kgVSS/kg BOD_{removed} under the 1.5% MLSS and 17 day SRT. It is prominent result which has 40% sludge reduce comparing with traditional activate sludge system.

keywords : Advanced Wastewater Treatment Process, Nutrient Removal, Wasting Sludge Reduce

1. 서 론

현행 하수처리 방류수 수질기준에서 질소와 인에 대한 규제는 물관리종합대책 및 하수도 시설설치사업 업무처리 일반지침에 의거 2004년부터 신규처리시설에는 질소 20 mg/L, 인 2mg/L 이하로 강화될 예정이다.¹⁾ 이에 따라 국내에서는 고도처리공정에 대한 새로운 공정은 계속 연구개발될 것으로 보인다. 일부지역 하수처리시설에는 질소나 인을 제거하기 위한 고도처리기술이 도입되어 적용²⁻⁴⁾되고 있으나 국내의 하수성상이 외국에 비해 저농도이고 설계나 운전이 아직 미흡한 실정으로 목적하는 효과를 얻지 못하고 있다. 따라서 새로 건설되는 하수처리장이나 기존 처리장을 개조하여 적용 가능하며, 국내의 하수성상에 적합하고 운전이 간편하며 비교적 설치비용이 저렴한 공정이 선택되어 적용되어야 한다.

2001년말 기준으로 6개월이상 가동중인 전국 173개소의 하수처리장이 하루에 16,124천톤의 하수를 처리하고 있다. 하수처리를 통해 발생하는 슬러지는 하수처리량의 1-2%정도이며, 탈수케이크를 포함하는 슬러지의 최종발생량은

5,209톤/일로서 하수처리량의 0.032% 즉 하수 1m³당 0.32kg이 탈수케이크로 최종 배출되었다. 2001년 말 기준으로 슬러지 발생량은 연간 1,901천톤으로 하루에 5,209톤의 탈수슬러지가 발생하였는데, 주로 육상매립(12.3%)과 해양투기(73.0%)에 의해 처분되었으며, 일부 소각(7.3%)되거나 재이용(6.3%)되었다.⁵⁾ 하수슬러지 발생량에 대한 최종처리로 적매립이 규제되고 있고⁶⁾ 소각이나 재활용의 적정처리가 요구되는 시점에서 발생하는 폐슬러지량을 최소화하는 하수처리 공정의 개선은 매우 필요하다. 이를 위해 많은 미생물을 확보하고 SRT를 증대시켜 반응조 용량을 소형화시켜야 한다.

이 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 2차 침전조의 슬러지를 무산소조로 전량 반송하여 미생물의 농도를 고농도 유지시킴으로써 탈질의 효과를 향상시키고, 간헐적으로 무산소조에서 기존 1차침전조(개량된 혐기조)에 미생물을 이송시킴으로써 기존 하수 처리장에서 영양소 제거효율을 높이고, 폐슬러지 생산량을 최소화하는 공정을 개발하기 위한 기초자료를 얻고자 한다.

2. 실험방법 및 장치

본 연구에 사용된 반응조는 실험실 규모로 제작되었고

[†] To whom correspondence should be addressed.
bslim@dju.ac.kr

재질은 아크릴이다. 유입과 반송은 미세유량조절 펌프를 사용하였고, 전체공정은 자연 유하하도록 설치하였다. 유입유량은 18 l/d 이며, 제작된 반응기는 1차침전조(힘기조), 무산소조, 포기조, 2차침전조로 구성되어 있으며 각 단위공정의 용적은 각각 1.5 l, 1.5 l, 4.5 l, 2.7 l 이고, 수리학적 체류시간은 각각 2시간, 2시간, 6시간, 3.6시간으로 설계하였다. 침전조는 부유물질의 유출을 막기 위해 방해판(Baffle)이 설치되어 있으며 하부는 슬러지를 효과적으로 모으기 위해 원뿔 모양으로 제작하였고 모터로 작동되는 스크래퍼를 설치하였다. 탈질을 위해서 포기조에서 무산소조로 내부반송을 하였으며, 슬러지반송은 탈질효과와 슬러지 농축효과를 위해서 2차침전조에서 무산소조로 전량 반송시켰으며 별도의 슬러지를 제거시키지 않았다. 무산소조로 이송된 슬러지는 침전성이 양호하며 침전된 상태에서 혼합되었으며 상징액은 분리되어 포기조로 유입되었다. 침전된 슬러지의 농도를 일정하게 유지하기 위해 간헐적으로 1차침전조로 슬러지를 반송시켰으며 1차침전조에서 슬러지를 폐기하도록 하였다. 반응조의 모식도는 Fig. 1과 같다.

무산소조의 고형물의 농도와 슬러지반송의 변화에 따른 처리효과를 알기 위해 운전조건을 4개의 Mode로 나누어서 운전하였다. Table 1은 Mode별 운전조건을 나타낸 것으로 무산소조의 침전된 고형물농도(TS) 1.0~1.5%에서 슬러지반송율 50%, 내부반송율 100%, 200%, 300%을 기준으로 하여 Mode I, II, III로 각각 구분하였으며, 고형물농도 1.5-2.0%에서 슬러지반송율 50%, 내부반송율 100%을 Mode IV로 구분하였다. 운전기간동안 포기조의 DO는 질산화를 위해 2mg/L 이상으로 유지하였고, 평균 BOD 용적부하는 0.48kg BOD/m³/d 정도로 운전하였고, F/M비는 평균 0.04 kgBOD/kgMLVSS/d로 유지되었고 반응조 온도는 18-21℃로 운전하였다. 수질분석은 Standard Method⁷⁾과 공정시험법⁸⁾에 준하여 실시하였고, 반응조가 정상상태일 때 3일 이상 연속 분석하는 것을 원칙으로 하였다.

본 연구에 사용된 유입원수는 P 아파트 단지의 오수처리 시설 유입수이며 분뇨와 생활하수가 동시에 유입되어 우리나라의 일반적인 하수의 성상보다는 유기물질과 영양소의

Table 1. Operation conditions of process

Division	MLSS of anoxic tank(%)	Sludge recycle rate(%)	Internal recycle rate(%)
Mode I	1.0-1.5	50	100
Mode II	1.0-1.5	50	200
Mode III	1.0-1.5	50	300
Mode IV	1.5-2.0	50	100

Table 2. Characteristics of influent

	Minimum	Maximum	Average
pH	6.4	7.1	6.9
Alkalinity(mg/L)	138.0	337.5	198.5
TCODcr(mg/L)	154.3	391.0	251.6
SCODcr(mg/L)	86.1	195.0	131.8
TBOD(mg/L)	75.5	283.0	174.1
SBOD(mg/L)	27.2	147.7	90.8
SS(mg/L)	28.6	207.0	91.5
T-N(mg/L)	34.5	54.9	39.5
TKN(mg/L)	32.3	44.2	37.1
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	19.6	34.7	24.8
T-P(mg/L)	1.8	7.9	4.1
PO ₄ ⁻ -P(mg/L)	1.0	4.2	2.3

농도가 약간 높은 편이다(Table 2 참조). 사용된 유입수의 CODcr 값은 평균 252mg/L, BOD 174mg/L로 나타났으며, CODcr/BOD의 비가 일반도시하수의 1.72보다 약간 낮은 1.45의 값으로 나타났고 TCOD/TKN은 6.0으로 일반하수의 성상과 유사한 편이다. 이론적으로 질산화에 필요한 알카리도는 약 7.14 mg/mg NH₄⁺-N인데⁹⁾ 유입수의 알카리도는 198mg/L로 평균 24.8mg/L의 NH₄⁺-N을 질산화시키기에 충분한 양으로 생각되며 인위적인 알칼리 주입은 하지 않았다. TCOD/T-P의 비율은 61로 우리나라의 전형적인 TCOD/T-P의 비율인 45보다 높은 값을 보여 인의 유입농도가 약간 낮은 것으로 나타났다.¹⁰⁾

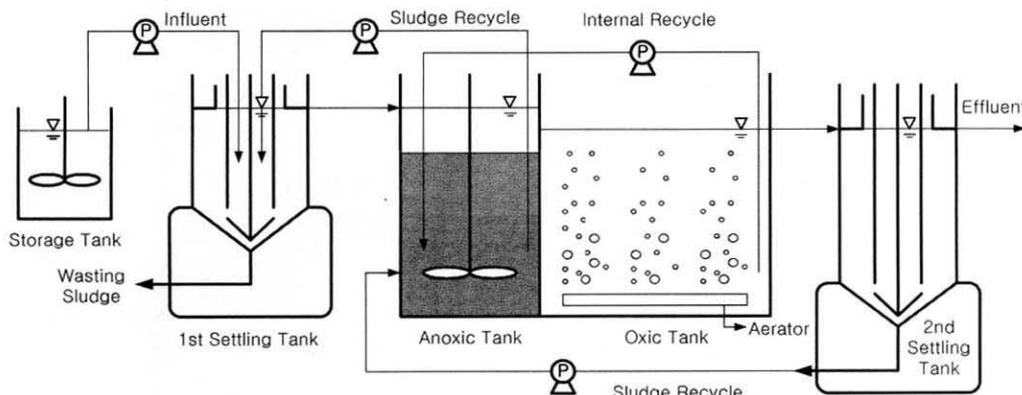


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Mode별 처리효율

Table 3은 Mode별 정상상태에서 각 Mode에 따른 수질 측정결과를 요약한 것으로, Mode I은 무산소조의 고행물농도를 1.37%, 무산소조로 이송된 슬러지반송율 50%, 내부반송율 100%, 포기조 MLSS농도를 2,986mg/L로 운전한 것으로서 2차슬러지의 TS 농도 약 1%, 1차슬러지의 TS농도는 약 2.2%까지 유지되었다. COD, BOD, SS, T-N, T-P 농도의 제거효율은 약 89%, 96%, 95%, 63%, 73%의 결과를 각각 나타내고 있다.

Mode II는 무산소조의 고행물농도를 1.45%, 무산소조로 이송된 슬러지반송율 50%, 내부반송율 200%, 포기조 MLSS농도를 2,678mg/L로 운전한 것으로서 2차슬러지의 TS농도 약 1%, 1차슬러지의 TS농도는 약 2.4%로 유지되었다. COD, BOD, SS, T-N, T-P 농도의 제거효율은 약 92%, 96%, 96%, 73%, 74%의 결과를 각각 나타내고 있다.

Mode III는 무산소조의 고행물농도를 1.1%, 무산소조로 이송된 슬러지 반송율 50%, 내부반송율 300%, 포기조 MLSS농도를 3,356mg/L로 운전한 것으로서 2차슬러지의 TS농도 약 0.9%, 1차슬러지의 TS농도는 약 2.4%로 나타났다. COD, BOD, SS, T-N, T-P 농도의 제거효율은 약 92%, 94%, 94%, 44%, 80%의 결과를 각각 나타내고 있다.

Mode IV는 무산소조의 고행물농도를 2.1%로 Mode I~III보다 높게 증가시키고, 무산소조로 이송된 슬러지 반송율 50%, 내부반송율 100%, 포기조 MLSS농도를 3,177mg/L로 운전한 것으로서 2차슬러지 TS농도 약 1%, 1차슬러지의 TS농도는 약 2.3%까지 유지되었다. COD, BOD, SS, T-N, T-P 농도의 제거효율은 약 86%, 96%, 92%, 49%, 76%의 결과를 각각 나타내고 있다.

Mode 별 유기물질과 영양소의 평균 제거효율을 Fig. 2에 비교하여 나타내었는데, 유기물질의 제거효율은 Mode 별

큰 차이를 보이지 않고 있다. COD제거효율을 보면 Mode III가 약 92%로 가장 좋은 제거효율을 보였고 Mode IV가 약 86%로 가장 낮게 나타났다. BOD 제거효율은 약 94~97%정도, SS 제거효율은 약 92~94% 정도로 매우 양호하게 나타나고 있는데, 강화된 방류수 수질기준인 BOD 10mg/L, SS 10mg/L를 비교적 만족시키는 수준으로 나타났다. 이는 0.04의 낮은 F/M비, 1%의 높은 MLSS농도, 17일의 긴 SRT로 운전하여 미생물들이 유기물질을 최대한 이용하도록 운전했기 때문이라고 사료된다.

T-N의 처리효율은 Mode II가 73%로 가장 효율이 높았다. 이는 내부반송율 200%로 운전한 경우가 질산화와 탈질 조건이 적절하게 수행된 결과로 판단된다. 유출수 T-N농도는 8.8 - 21.2mg/L로 Mode III를 제외하고 강화된 방류수 수질기준인 T-N 20mg/L을 만족하였다. Mode III의 경우 질소제거효율이 44.3%로 나타났는데 질소제거효율이 낮은 이유는 내부 반송율을 300%로 하여 반송량이 증가되어 수리학적체류시간이 0.5hr으로 무산소조의 탈질을 위한 충분한 체류시간을 갖지 못했기 때문이다. Mode IV의 경우도 질소제거효율이 48.7%로 낮게 나타났는데 이는 무산소조 MLSS를 2%이상으로 높게 운전하는 과정에서 고행물질 플럭스에 의한 2%이상 농축의 한계를 보였다. 고농도를 유지하기 위해 무산소조 바닥을 삼각뿔 형태로 변형하였으나 역시 MLSS를 유지하기 어려웠고, 일부 MLSS가 포기조로 유출하는 등 탈질 미생물의 성장조건이 제대로 이루어지지 못했다.

T-P 제거효율은 대부분의 경우 약 70% 이상으로 나타났다. 이는 분석기간동안 유입수의 평균 T-P농도가 1.9~3.6mg/L(평균 2.7mg/L) 정도로 우리나라 일반하수의 전형적인 T-P농도인 4.5mg/L보다 낮게 유입되어 비교적 제거효율이 좋았다. 이는 높은 MLSS의 유지로 인하여 미생물이 세포의 합성에 T-P가 사용되어 T-P제거효율이 운전기간 전반에 걸쳐 좋게 나타난 것으로 사료된다.

Table 3. The experiment results in each operation mode

		COD	BOD	SS	T-N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	T-P	PO ₄ -P
Mode I	Influent(mg/L)	276	179	62	37.0	22.0	-	1.9	1.7
	Effluent(mg/L)	56	6.3	3.5	13.8	0.2	7.0	0.5	0.45
	Removal Efficiency(%)	88.8	96.5	94.5	62.7	98.9	-	73.3	78.3
Mode II	Influent(mg/L)	172	112	91	32.8	24.0	-	2.5	2.0
	Effluent(mg/L)	14.6	4.8	5.5	8.8	1.2	2.7	0.65	0.4
	Removal Efficiency(%)	91.5	95.7	95.7	73.2	95.1	-	74.2	80
Mode III	Influent(mg/L)	280	161	164	38.1	24.4	-	3.6	1.6
	Effluent(mg/L)	21.8	10.1	10.2	21.2	0.4	16.6	0.7	0.6
	Removal Efficiency(%)	92.2	93.7	93.9	44.3	98.1	-	80.5	62.5
Mode IV	Influent(mg/L)	262	122	120	38.4	27.8	-	2.9	-
	Effluent(mg/L)	36	5.4	6.7	19.7	0.6	14	0.7	-
	Removal Efficiency(%)	86.2	95.6	91.9	48.7	98.0	-	75.9	-

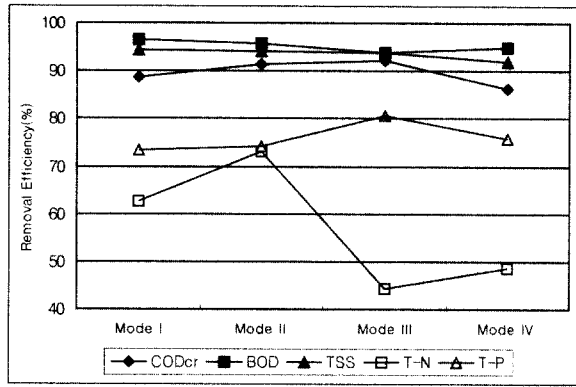


Fig. 2. Comparison of nutrient and organic matter removal efficiency in each operation mode.

3.2. 질소제거

3.2.1. 질산화와 탈질화 효율

Fig. 3은 공정별 NO₃⁻-N농도와 NH₄⁺-N의 변화를 나타낸 것으로서 NO₃⁻-N의 농도로 내부반응에 따른 무산소조에서 탈질이 어느정도 일어나는지 알 수 있다. 내부반응율 100%인 경우(Mode I)가 무산소조에서 NO₃⁻-N의 농도가 1.3mg/L로 탈질이 양호하게 나타났으나 유출수의 NO₃⁻-N의 농도가 7.0 mg/L로 더 많은 내부반응이 필요한 것으로 나타났고, 내부반응율 200%인 경우(Mode II)가 무산소조에서 NO₃⁻-N의 농도가 0.4mg/L로 탈질이 가장 양호하게 이루어졌고, 유출수의 NO₃⁻-N 농도가 2.7mg/L로 반응율이 적절한 것으로 나타났다. 내부반응율 300%인 경우(Mode III)에는 더 높은 탈질율을 기대했으나 무산소조에서 NO₃⁻-N 농도와 유출수 NO₃⁻-N 농도가 매우 높게 나타났는데, 이는 수리학적 으로 반응량이 증가되어 무산소조의 탈질을 위한 충분한 체류시간을 갖지 못했기 때문이다. 또한 무산소조에서 상하류층이 발생하여 혼합이 원활하지 못했고 미생물 농도가 조안에서 균등하지 못했기 때문이다. Mode IV의 경우도 전술한 바와 같이 탈질미생물의 성장조건이 이루어지지 않아 무산소조와 유출수의 NO₃⁻-N의 농도가 높아 낮은 탈질 효율을 보였다.

Batch test를 통한 비탈질율(specific denitrification rate, SDNR)을 측정된 결과 3.5mg NO₃⁻-N/mgMv/hr으로 나타났는데 유입 TKN이 33mg/L가 전부 질산화되었다고 볼 때,

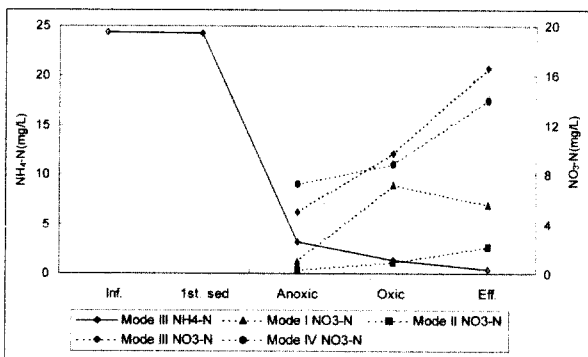


Fig. 3. Variation of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in each operation mode.

무산소조 MLVSS농도가 10,000mg/L의 조건에서 약 0.7시간 정도의 탈질 시간이 요구되는 것으로 나타났다. 본 실험에서 짧은 체류시간에 탈질이 일어날 수 있었던 것은 무산소조의 미생물농도가 고농도로 유지되기 때문인 것 같다. 무산소조의 고형물 농도를 높게 유지할수록 일반적인 영양소 제거공정 비해 탈질시간을 최소한으로 줄일 수 있다.

공정별 NH₄⁺-N의 변화는 측정자료의 부족으로 Mode III의 경우만을 나타내고 있는데 무산소조로 유입되는 NH₄⁺-N 농도가 매우 낮았다. 그 이유는 반송율의 과다로 인한 회석효과와 수리학적인 혼합 등에 의해 영향을 준 것으로 생각된다.

Mode II의 경우 유입수의 NH₄⁺-N 농도는 24mg/L, 유출수의 NH₄⁺-N 농도는 1.2mg/L로 95%정도의 제거효율을 보여 유입 NH₄⁺-N가 대부분 질산화되는 것으로 나타났고, Mode I, III, IV도 각각 99%, 98%, 98%의 질산화율을 보였다.

Batch test를 통해 얻은 질산화율(specific nitrification rate, SNR)은 2.3mg NH₄⁺-N/gMv/hr으로 이 질산화율을 근거로 질산화에 필요한 소요시간을 산정하면 유입 NH₄⁺-N가 24mg/L, 포기조 MLVSS가 2500mg/L의 조건에서 포기조의 체류시간이 3.1hr 정도가 요구되는데 본 실험의 경우 포기조에서 체류시간 6시간으로 운전되었으므로 질산화가 충분히 이루어진 것으로 판단되며 암모니아 농도가 낮은 경우에는 포기조의 체류시간을 줄일 수 있다.

3.2.2. 질소의 물질수지

본 공정으로 유입 및 유출되는 평균 질소량과 탈질반응에 의해 질소가스로 전환되는 질소량을 이용하여 물질수지를 Table 4와 같이 산정하였다. 생물학적 반응에 의해 질소가스로 전환되어 대기 중으로 방출되는 질소량은 유입 질소량에서 유출되는 질소량과 세포합성에 의해 제거되는 질소량의 차이로 계산하였다.

즉 세포합성에 의해 제거되는 질소량은 실험 중에 슬러지를 폐기시킬 때 제거되는 질소량이다. 폐슬러지를 건조시킨 후 적당량을 증류에 회석시켜 질소농도와 시료부피를 측정하여 실제 폐기시킨 슬러지내 포함된 질소 무게량을 계산하였다.

Fig. 4는 Mode별 유출 질소의 물질수지를 비교하기 위해 백분율로 나타냈는데, Mode II의 경우 본 공정으로 유입되

Table. 4. Nitrogen mass balance in each operation mode

Division	Influent T-N (mg/d)	Effluent (mg/d)			
		TKN	NO ₃ ⁻ -N	Sludge wasting	N ₂ gas
Mode I	666 (100%)	122.4 (18.4%)	126 (18.9%)	150 (22.5%)	267.6 (40.2%)
Mode II	590 (100%)	109 (18.5%)	48.6 (8.2%)	220 (37.3%)	212.4 (36.0%)
Mode III	686 (100%)	82.8 (12.1%)	298.8 (43.6%)	199 (29%)	105.4 (15.4%)
Mode IV	691 (100%)	102.6 (14.8%)	252 (36.5%)	171 (24.7%)	165.4 (24.0%)

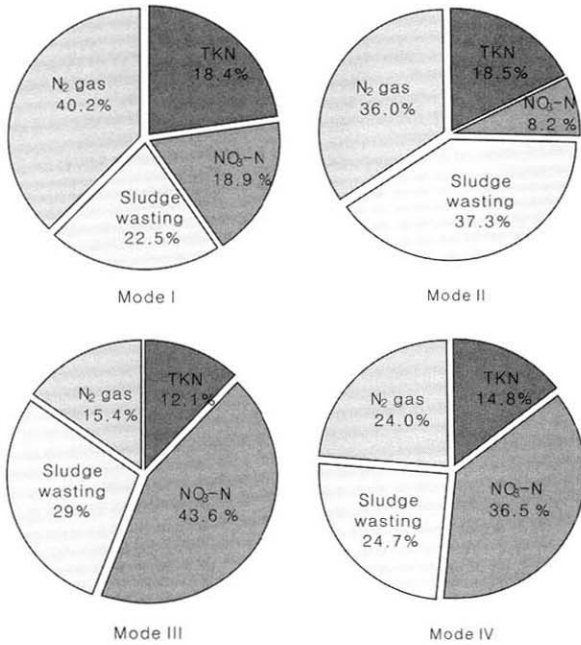


Fig. 4. Nitrogen mass balance for effluent in each operation mode.

는 총질소량을 100%로 보면 처리수로 유출되는 TKN량은 18.5%였고 NO₃-N량은 8.2%이었다. 폐슬러지 내 포함되어 제거되는 양은 37.3%이고 나머지 36%는 질소가스로 전환되어 대기 중으로 방출되는 것으로 나타났다. 이 경우 유입 SCOD는 1차침전지에서 31%, 무산소조에서 36%, 포기조에서 13%가 제거되었는데 1차침전지에서 인방출을 위해 SCOD가 비교적 많이 사용되었다.

3.3. 인제거

생물학적 인 제거에 있어서 유입수의 TCOD : T-P의 비율은 매우 중요한 인자인데 이 비율은 먹이의 분배를 결정하여, 서로 다른 미생물 종의 군집을 결정하게 된다. 문헌에 따르면 TCOD/T-P 비가 40 이상이면 유출수의 T-P를 1mg/L 이하로 얻을 수 있다고 밝히고 있다.⁹⁾ 본 실험에서는 TCOD/T-P가 61로 유출수 T-P 농도를 0.7mg/L 이하로 유지할 수 있었으며 T-P 제거효율은 약 70%이상으로 나타났다.

Fig. 5는 Mode II에서 인이 어떤 단위공정에서 방출되고 섭취가 되는지 알아보기 위하여 공정별 SCOD와 PO₄-P의 변화를 도시한 것인데, 일반적으로 혐기조에서 인이 방출되고 포기조에서 과잉섭취가 이루어져야 되는데 본 연구에서는 인이 혐기조 역할을 하는 1차침전조보다 무산소조가 더 많이 방출이 이루어지고 포기조에서 인이 섭취되는 것으로 나타났다. 이것은 무산소조의 NO₃-N의 탈질이 모두 이루어져 혐기성 상태가 되고 SRT를 길게 운전함에 따라 바닥에서 고형물이 어느 정도 농축되어 인이 방출할 수 있는 충분한 혐기성 환경조건이 만들어졌기 때문인 것으로 사료된다. 이때 무산소조의 ORP는 -230 mV로 혐기조건임을 뒷받침해 주고 있다. 1차침전조와 무산소조의 고형물농도를

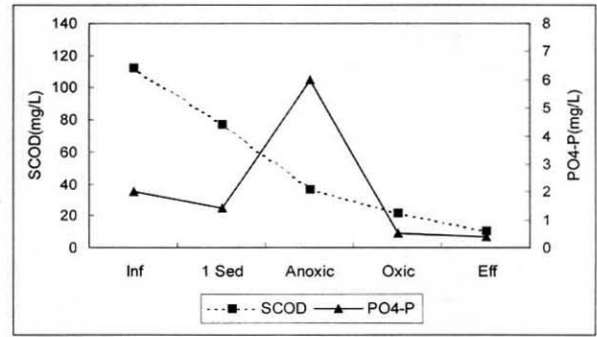


Fig. 5. Variation of SCOD and PO₄-P in Mode II.

비교시 1차침전조의 농도가 무산소조보다 다소 높음에도 불구하고 인방출이 안된 것은 이미 무산소조에서 이미 인방출이 이루어진 슬러지를 혐기조로 간헐 반송하여 혐기조에서 추가로 인이 방출되지 않고 미생물에 의한 유기물흡착이 일어난 것으로 사료된다.

Mode II의 경우에 1차침전조에서 유입수 SCOD는 31%가 감소되었는데, 이는 인방출에 소요한 유기물질의 분해가 아니고, 다른 요소에 의해 분해된 것 같다. 무산소조에서 유입 PO₄-P의 약 3배 정도가 방출되었고 이때 SCOD는 36%가 감소되었다. 또한 포기조에서 인의 섭취가 용출된 인의 93%이상 제거되고 있음을 알 수 있었다.

Mode II의 경우 무산소조와 포기조에서 각각 인방출율과 인섭취율을 결정하기 위하여 Batch test를 실시한 결과 인방출율(specific phosphorus release rate, SPRR)은 1.38mg PO₄-P/g Mv/hr, 인섭취율(specific phosphorus uptake rate, SPUR)은 1.7mg PO₄-P/g Mv/hr를 보였고, P_{release}/P_{uptake}는 1.23으로 용출시킨 양이 섭취한 양보다 약 23% 정도 더 높은 것으로 나타났다.

Mode II의 경우 본 공정으로 유입 및 유출되는 평균 인의 양과 폐슬러지로 제거되는 인의 양을 이용하여 인의 물질수지를 구하여 보았다. 유입되는 총인의 양을 100%, 처리수로 유출되는 인의 양을 26%로 볼 때 나머지 74%는 슬러지내에 포함되어 폐슬러지로 제거되는 양으로 볼 수 있다. 이 때 폐슬러지 내의 인 포함비율을 측정값인 4.4%를 적용하면 폐슬러지에 포함된 인의 양은 56%로 인 포함량이 적은 것으로 나타났다. 이것은 1차침전조 내의 성상이 최초 침전되는 1차슬러지와 무산소조로 이송되는 슬러지의 혼합에 기인한 것으로 생각된다.

3.4. 폐슬러지 슬러지감량과 영양소 함량

본 공정의 개발 목적 중 하나가 폐슬러지의 감량화인데 이를 위해 슬러지를 2차침전조에서 폐기하지 않고 무산소조로 이송하고, 무산소조의 농축된 슬러지를 다시 1차침전조로 이송하여 최종적으로 1차침전조에서 폐기시켰다. Table 5는 Mode 별 SRT와 슬러지생산량의 결과인데 고형물 함량을 높게 유지하기 위해 SRT를 약 17일 정도로 길게 운전한 결과 슬러지 생산량은 1kg BOD제거당 평균 0.28kg VSS가 생산되어 일반적인 활성슬러지공정의 0.4-0.5 kgVSS/kgBOD₅¹²⁾의 약 40%정도 감량되었다. Mode

IV의 경우 무산소조의 고형물질농도를 약 2%정도로 유지하였는데 약 1~1.5%정도로 유지한 것 보다 더 슬러지 감량효과가 높았다. 이것은 SRT의 증가와 미생물 축적의 과정에서 무산소조 하부가 혐기성조건이 이루어져 슬러지감량 효과를 증대한 것으로 사려된다.

1차침전조에서 폐기되는 슬러지의 질소와 인을 분석한 결과 TKN/VSS비와 T-P/VSS비가 평균 4%과 4.4%를 각각 나타냈다. 일반적인 활성슬러지공정의 폐슬러지(VSS) 중의 질소함량 7% 보다 작게 나타났고, 인 함량 2%보다 약 2배 정도 높은 값을 보였다.¹²⁾

Table. 5. SRT and sludge production rate in each operation mode

	SRT(day)	Sludge production (kgVSS/kgBOD _m)
Mode I - III	17	0.28
Mode IV	24	0.21

활성슬러지공정에서 슬러지생산량과 슬러지내 인 함량에 따른 제거 인농도를 보면 본실험에서 얻은 1kg BOD제거 당 0.28kg VSS 생산시, 슬러지내 인농도 4.4%를 적용해 보면 약 2mg/L이하의 인이 제거되어야 하는데¹²⁾ 본 공정 (Mode II)에서도 약 1.9mg/L이하의 인 제거를 보여 비슷한 수치를 나타냈다.

4. 결론

무산소조에서 고농도 미생물을 유지한 하수고도처리공정을 이용하여 실험실 규모의 반응조에서 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 무산소조의 침전된 고형물농도 1.0~1.5%에서 슬러지반송율 50%, 내부반송율 100%, 200%, 300%을 기준으로 하여 Mode I, II, III로 각각 구분하고, 고형물농도 약 2.0%에서 슬러지반송율 50%, 내부반송율 100%을 Mode IV로 구분하여 운전한 결과 COD 제거효율은 평균 약 90%이상으로 나타났고, Mode 별로 큰 차이를 보이지 않았다.
- 2) T-N 제거효율은 Mode II가 약 73%, 유출수 T-N 8.8 mg/L로 가장 효율이 높았으며 이는 내부반송율 200%로 운전한 경우가 질산화와 탈질조건이 적절하게 수행된 결과로 판단되며, 총질소의 약 36% 정도가 탈질에 의해 질소 가스로 전환되었다. 이 경우 SCOD 제거효율 90% 중 무산소조에서 36%의 제거효율을 나타냈는데 이는 무산소조에서 인 방출과 탈질을 위해 용해성 유기물질이 사용되었기 때문이다.
- 3) 무산소조의 비탈질율을 측정된 결과 3.5mg NO₃⁻-N/g

Mv/hr으로 유입 TKN이 33 mg/L, 무산소조 MLVSS농도가 10,000 mg/L의 조건에서 약 0.7시간 정도의 탈질시간이 요구되어, 무산소조의 고형물농도를 높게 유지할수록 탈질시간을 최소한으로 줄일 수 있다.

- 4) T-P 제거효율은 대부분 Mode에서 약 70% 이상으로 양호하게 나타났으며, 무산소조에서 인 방출율은 1.38mg PO₄⁻-P/g Mv/hr을 보였고, 무산소조에서 인방출이 이루어 졌는데 이는 무산소조의 NO₃⁻-N의 탈질이 모두 이루어져 혐기성 상태가 되어 인이 방출할 수 있는 충분한 혐기성 환경조건이 만들어졌기 때문이다.
- 5) 무산소조에서 TS 1.5%이하의 농도로 유지하고 SRT를 17일 정도로 길게 운전한 결과 슬러지 생산량은 평균 0.28kg VSS/kgBOD_{removed}로 일반적인 활성슬러지 공정에 비해 약 40%이상의 감량효과가 나타났으며 무산소조의 고형물질의 농도를 높힌다면 더 양호한 감량효과를 얻을 수 있다.

사 사

본 연구는 2000년도 산·학·연 공동기술개발 지역컨소 사업사업으로 대전대학교 산학협력연구원의 연구비 지원으로 수행되었음에 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 환경부, *하수도법령집* 하수도법시행규칙 6조 별표1 (2001).
2. 엄태규, 한동엽, 구인수, 순환형 A/O 시스템을 이용한 질소제거에 관한연구, *상하수도학회지*, 16(5), pp. 569-574 (2002).
3. 박철취, 신창민, 음식물쓰레기 발효산물을 이용한 질소·인 동시제거 운전 특성인자, *상하수도학회지*, 16(3), pp. 261-269 (2002).
4. 구리시, *하수고도처리편람* (2000).
5. 환경부 상하수도국 하수도과, 2001년 하수종말처리장 운영결과 분석보고 (2002).
6. 환경부, 폐기물관리법 시행규칙 (2001).
7. APHA, AWWA & WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed., U.S.A. (1998).
8. 환경부, *수질오염공정시험법* (1995).
9. Randall, C. W. et al., *Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal*, Technomic Publishing Co. Inc., U.S.A. (1992).
10. 최의소, 우리나라 환경기초시설의 문제점 및 개선방향, *우리나라 하수관리정책의 바람직한 방향 특별세미나 자료집*, 대한환경공학회, 서울 (1996).
11. 조남운, 간헐포기를 결합한 MLE와 A2/O 공정의 비교, *대전대학교 석사학위논문* (2001).
12. WEF and ASCE, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, U.S.A. 2, pp. 65-87 (1998).