

부착증식공정에서 내부 반송율 변화에 따른 생물학적 제거특성

박충기 · 김병욱 · 임재명
강원대학교 환경공학과

Biological Removal Characteristics by the Internal Recycle Rate in the Attached Growth Process

Choong-Ki Park · Byoung-Ug Kim · Jay-Myoung Rim
Dept. of Env. Eng., Kangwon Nat'l University

Abstract

This study was conducted to investigate the contaminants removal efficiency and the optimal operating parameters by the internal recycle rate(IRR) in the combining A²/O process with fixed film. The average removal efficiency of BOD and COD was 92.5%~94.6%, 73.9%~87.0% in RUN 1 and 91.9%~94.7%, 77.7%~89.0% in RUN 2, respectively. Organic removal efficiency, at two different hydraulic retention time of 10 and 14hr, was similar. At 50% of the internal recycle rate, organic removal efficiency was somewhat higher than the other. Total nitrogen(T-N) and total phosphorus(T-P) were removed, highly, at 50% of internal recycle rate. It could be suggested by this study that the optimum internal recycle rate is 50% and hydraulic retention time is 14hr.

I. 서 론

현재 국내에서 운전되고 있는 대부분의 하수처리장은 유기물의 제거는 어느 정도 이루어지고 있으나, 질소(T-N)와 인(T-P)의 제거는 매우 미흡한 실정이다. 또한 미처리된 질소와 인이 인근 수계에 방류됨에 따라 부영양화의 큰 원인으로 작용하고 있으며, 효율적인 수질보전 및 수자원 확보에 악영향을 끼치고 있다¹⁾. 이에 환경부에서는 현행 방류수 수질기준(T-N 60mg/L, T-P 8mg/L)을 더욱 더 강화하고 규제할 방침이다. 따라서 기 설치 및 운전되고 있는 시설의 경우 영양염류를 제거하기 위한 공정이 추가되어야 할 것으로 판단되며,

새로이 건설되는 하수처리장의 경우에도 유기물뿐만 아니라 영양염류도 제거할 수 있는 공정의 적용이 필수적이라 할 수 있다.

최근 부유성장(suspended growth)공법인 활성슬러지공법과 더불어 부착성장(attached growth)공법인 생물막공법이 활발하게 연구되고 실제 처리장치에 많이 적용되고 있다. 이는 생물막공법이 부유성장공법의 대표적 공법인 활성슬러지 공법에 비하여 운전이 용이하고, 충격부하에 대한 적응력이 강하며, 슬러지의 반송 없이 다량의 미생물을 확보할 수 있고, 2차 침전지에서의 슬러지 팽화(bulking)를 줄임과 동시에 슬러지 발생량이 적다는 등의 장점 때문이다. 이러한 생물막공정은 과거

에는 소규모의 생활하수처리용 또는 후처리용으로 주로 사용해왔으나, 최근에는 운전방법의 개량과 다양한 여재의 개발등으로 인하여 대규모의 하수처리시설 및 고농도의 폐수에도 적용되고 있다.

본 연구에서는 기 운전되고 있는 국내 하수처리장에 적용이 비교적 용이할 것으로 판단되는 영양소 제거공정인 A²/O 공정에 여재를 충전하여 내부반송을 변화에 따른 유기물제거 및 영양소 제거특성을 파악하고자 하였다. 내부반송율의 경우 각 처리공정 및 처리방법에 따라 반송율의 범위는 相異할 수 있으며, 반송율의 증가는 운전비(동력비)의 증가를 의미하게 된다. 또한, 내부반송율의 증가가 반드시 제거효율의 증가를 의미하지는 않으므로 내부 반송율변화에 따른 유기물 및 영양소 제거특성을 파악하여 본 공정에 알맞는 적정 내부반송율을 도출하고자 하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험장치

실험은 실험실규모 반응조 2set를 아크릴로 제작하여 수행하였으며, 본 실험에 이용된 반응조 모식도를 Fig. 1에 제시하였다.

각 반응조는 혐기성, 무산소, 호기성 1, 2의 공정을 두었으며, RUN 1의 반응조별 유효용량은 각각 2.0, 1.5, 3.5, 3.0L로서 총 10.0L로 하였다. RUN 2의 공정별 유효용량은 각각 3.0, 2.5, 4.5, 4.0L로서 총 용량은 14.0L이다. 혐기조와 무산소조는 교반기(stirrer)를 하부에 설치하여 혼합하였으며, 포기조는 air blower를 설치하여 혼합 및 적정 DO를 유지하였다. 그리고 원수의 주입과 내부반송은 미량정량펌프(Masterflex Tubing Pump)를 이용하여 일정하게 유지하였다.

실험에 사용한 여재는 폐비닐을 세척과정 없이 폐비닐 표면의 미세한 흙 성분과 이물질(異物質) 등이 포함된 상태에서 직접 탄화(炭化)시켜 만든 SWPP(Synthetic Waste Polyethylene Porous ; 이하 SWPP)여재를 사용하였으며, SWPP 여재는 폐비닐을 이용한 재생여재로서 폐기물 재활용 차원은 물론 폐수처리에 적합한 여재로 판단되어 본 연구에서 채택하여 수행하였다. 실험에 이용된 여재의 특성을 Table 1에 제시하였다. SWPP여재는 말굽형의 긴 막대같은 모양을 하고 있으며, 표면은 미생물부착을 위하여 매우 거친 형태를 지니고 있다. 여재는 격자형으로 층을 쌓아 단층설치로 하였다.

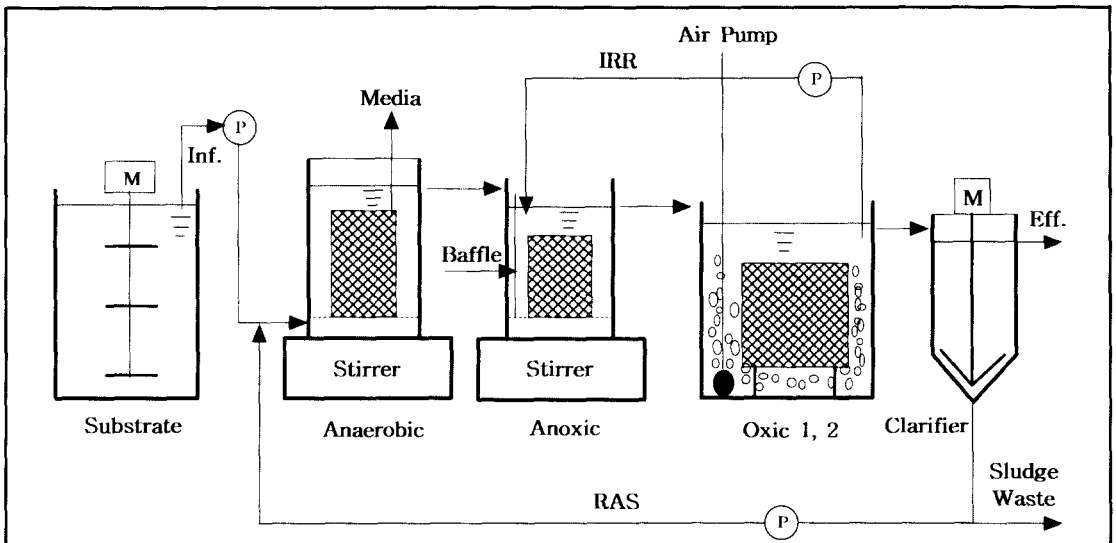


Fig. 1. Schematic diagram of attached growth process in this study(P; pump, M; motor, IRR; Internal Recycle Rate, RAS; Return Activated Sludge).

Table 1. Characteristics of Synthetic Waste Polyethylene Porous Media

Item	Value
Density(g/cm ³)	1.47
Specific weight	1.47
Specific surface area(m ² /m ³)	184.03
Tensile strength(kg/cm ²)	170.00
Absorptivity(%)	0.24

각 반응조별 여재의 충전율은 일반적인 접촉산화공정 설계시 현장에서 적용되는 방법인 반응조 유효용량에 대한 충전형태의 길보기 부피의 비로 산정하였으며, 각 조별로 약 50%씩 충전하였다.

2. 폐수

본 연구에 사용된 시료는 아파트 오수처리시설의 집수조에서 채취한 가정하수를 이용하였으며, 운전기간동안(3월~7월) 이용된 시료의 성상을 다음 Table 2에 나타내었다. 유입시료의 성상을 살펴보면 SS의 경우 58.2~202.2mg/L의 분포를 보였으며, BOD는 52.5~165.3mg/L로 나타났다. SS 및 BOD의 경우 운전일수가 경과함에 따라 농도가 대체로 낮아지는 것으로 나타났으며, 이는 기온 상승에 따른 물의 사용량이 증가한 것에 기인되는 것으로 판단된다. T-N은 21.1~34.6mg/L의 범위를 보였으며, T-P는 2.36~4.45mg/L로 나타났다. 이에따른 BOD/T-N비는 평균 2.7~4.6, BOD/T-P비는 25.0~35.7로 조사되었다.

3. 운전 및 분석방법

실험초기 식종을 위한 슬러지는 혐기성조의 경우 본 연구실에서 운전되는 혐기성 반응조 미생물을 이용하였으며, 포기조는 춘천시 하수종말처리장의 포기조 미생물을 채취하여 주입하였다. 원시료는 저류조에서 모터를 이용하여 연속적으로 혼합하였으며, 시료의 주입량은 RUN 1과 RUN 2를 동일하게 24L/day로 주입하였다. 반응조별 체류시간은 RUN 1의 경우 혐기조, 무산소조, 포기조 1, 포기조 2를 각각 2.0, 1.5, 3.5, 3.0hr으로 유지하였으며, RUN 2의 경우는 3.0, 2.5, 4.5, 4.0hr으로 운전하였다. 탈질을 유도하기 위한 무산소조로의 내부 반송은 각각 0%, 50%, 100%로 조정하였다. 혐기성조로의 슬러지 반송은 운전기간동안 미미한 슬러지 발생량과 침전조의 높은 용존산소 농도(약 4~5mg/L) 및 질산성질소 농도(6~8mg/L)로 인해 혐기성조로 반송시 인의 용출이 저해되는 것을 방지하기 위하여 실시하지 않았다. 전 운전기간동안(3월~7월) 온도와 용존산소에 따른 오차를 배제하기 위하여 반응조의 온도는 20±2℃로 일정하게 유지하였으며, 포기조내의 용존산소 농도(DO)는 4.0~5.0mg/L를 유지하였다.

시료의 분석은 유입수와 각 공정별 처리수 및 최종 유출수를 채취하여 2~5일 간격으로 분석하였으며, 반송을 변경시에는 약 10일정도의 미생물 적응기간을 둔 후에 시료를 채취하여 분석하였다. 분석은 Standard Methods²⁾에 준하여 분석하였으며, BOD실험시 질산화에 의한 산소의 소모량을 배제하기 위하여 질산화 억제제(nitrification inhibitor formula 2533 : HACH Company)를 사용하

Table 2. Characteristics of influent wastewater

Item	IRR (%)	SS	COD _{cr}	BOD	T-N	T-P	BOD/T-N	BOD/T-P
Influent wastewater	0	113.3~202.2 (153.1)	205.1~237.4 (225.3)	80.5~165.3 (115.7)	25.2~26.3 (25.4)	3.13~3.42 (3.24)	4.6	35.7
	50	77.5~148.3 (120.7)	136.2~186.1 (157.2)	66.2~148.4 (110.1)	21.1~34.6 (28.1)	2.63~4.45 (3.38)	3.9	32.6
	100	58.2~90.5 (71.5)	102.7~127.4 (112.7)	52.5~93.6 (75.0)	27.3~29.5 (28.0)	2.36~3.44 (3.00)	2.7	25.0

Note ; (): Average conc.

Table 3. Operating conditions of this study

Item		Flow Rate (L/day)	Anaerobic	Anoxic	Oxic 1	Oxic 2
RUN 1	HRT (hr)	24.0	2.0	1.5	3.5	3.0
	IRR		0%, 50%, 100%			
RUN 2	HRT (hr)	24.0	3.0	2.5	4.5	4.0
	IRR		0%, 50%, 100%			

여 실험을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

실험시작 후 미생물이 환경에 적응하여 안정화 단계에 이르기까지는 약 20여일 정도가 소요되었다. 제시한 분석자료는 미생물 부착과 유기물질 및 영양소 제거가 안정적으로 유지됨을 분석을 통하여 확인한 후의 자료로서 각 반송율에 따른 평균 자료를 대상으로 고찰하였다.

1. 유기물 제거

다음 Table 4 및 Fig. 2에 각 운전인자별 유입, 유출농도와 그에 따른 유기물질 제거율을 제시하였다. BOD의 경우 RUN 1은 92.5~94.6%의 제거율을 보였으며, 이에 따른 유출수의 농도는 5.6~7.8mg/L를 나타내었다.

RUN 2는 91.9~94.7%의 제거율을 보였으며, 유출수의 농도는 5.8~7.1mg/L로서 RUN 1과 유사하게 나타났다. SS의 경우 RUN 1은 96.4~97.1%의 제거율을 보였으며, 유출수의 농도는 2.6~4.6mg/L를 나타내었다. RUN 2는 95.7~97.6%의 제거율을 보였으며, 이에 따른 유출수의 농도는 2.9~3.9mg/L로서 RUN 1과 유사하게 제거되는 것으로 나타났다. RUN 1의 수리학적 체류시간은 총 10hr이며, RUN 2의 수리학적 체류시간은 총 14hr으로서 수리학적 체류시간에 따른 유기물 제거율의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 본 공정에서 미

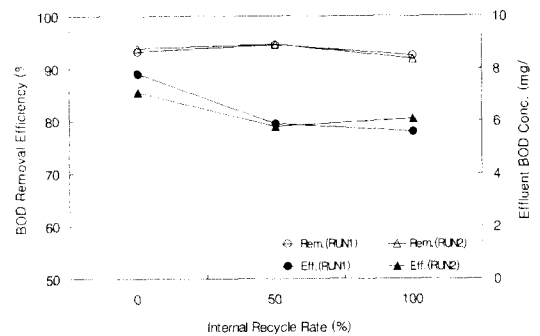


Fig. 2. BOD removal efficiency and effluent BOD concentration with internal recycle rate.

생물 확보가 안정적으로 유지된 것에 기인하는 것으로 판단되며, 안정적인 미생물 확보로 인해 본 공정으로 유입되는 유기물을 처리하기 위한 수리학적 체류시간은 약 10hr으로 판단된다.

내부 반송에 따른 유기물 제거율은 거의 유사하게 나타났으나, 반송율 50%에서 다소 높은 것으로 조사되었다.

내부 반송율 100%에서는 다른 운전결과와 비교할 때 다소 낮게 나타났으며, 이는 증가된 반송량에 의해 미생물의 탈리현상이 높아진 것과 반송에 의해 무산소조로 유입되는 유기물의 농도가 희석됨에 따라 반응조내 활성 미생물농도가 감소된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 A²O공정의 내부반송율은 100~300%^{3), 4)}를 권장하고 있으나, 본 연구에서는 약 50%의 내부반송이 적합함을 알

Table 4. Variations of organic matter with internal recycle rate in RUN 1, RUN 2.

Item	IRR (%)	BOD			COD _{Cr}							SS		
		Inf	Eff.	Rem.(%)	Inf.	An	Ax	Ox-1	Ox-2	Eff.	Rem. (%)	Inf.	Eff.	Rem.(%)
RUN 1	0	115.7	7.8	93.3	225.3	137.1	96.3	42.2	30.6	29.4	87.0	153.1	4.6	97.0
	50	110.1	5.9	94.6	157.2	107.7	64.2	40.5	31.5	28.4	81.9	120.7	3.5	97.1
	100	75.0	5.6	92.5	112.7	92.5	48.9	37.1	32.3	29.4	73.9	71.5	2.6	96.4
RUN 2	0	115.7	7.1	93.9	225.3	112.7	87.6	38.6	25.5	24.7	89.0	153.1	3.9	97.5
	50	110.1	5.8	94.7	157.2	93.2	58.4	33.6	26.6	25.7	83.7	120.7	2.9	97.6
	100	75.0	6.1	91.9	112.7	78.6	39.2	33.7	26.5	25.1	77.7	71.5	3.1	95.7

Table 5. Variations of nitrogen with internal recycle rate in RUN 1, RUN 2.

Item	IRR (%)	T-N							NH ₃							NO ₃	
		Inf.	An	Ax	Ox-1	Ox-2	Eff.	Rem.(%)	Inf.	An	Ax	Ox-1	Ox-2	Eff.	Rem.(%)	Inf.	Eff.
RUN 1	0	25.4	24.1	22.3	21.2	18.8	18.2	28.3	19.7	18.9	17.4	14.8	4.6	4.5	77.2	-	10.0
	50	28.1	24.1	17.2	15.6	13.4	10.8	61.6	19.1	17.3	11.8	5.9	2.8	2.1	89.0	-	8.3
	100	28.0	26.3	18.9	17.8	14.2	12.8	54.3	20.5	19.7	11.7	8.3	4.9	4.8	76.6	-	6.3
RUN 2	0	25.4	23.8	21.5	19.6	17.3	16.8	33.9	19.7	18.6	17.3	14.6	4.1	3.9	80.2	-	11.3
	50	28.1	23.3	16.4	16.1	12.3	9.4	66.5	19.1	17.1	11.8	4.2	2.4	1.7	91.1	-	7.2
	100	28.0	25.7	18.2	16.4	13.4	11.7	58.2	20.5	17.1	10.0	5.7	4.1	3.9	81.0	-	6.2

수 있었다.

2. 질소 제거

각 운전인자별 유입, 유출수 농도와 그에 따른 질소의 제거율을 Table 5 및 Fig. 3에 제시하였다.

T-N의 경우 RUN 1의 유출수 농도는 10.8~18.2mg/L를 보였으며, 이에 따른 제거율은 28.3~61.6%로 나타났다. RUN 2의 유출수 농도는 9.4~16.8mg/L의 범위를 보였으며, 제거율은 33.9~66.5%로서 RUN 1보다 제거율이 높은 것으로 나타났다. RUN 2가 RUN 1보다 T-N 제거율이 높게 나타난 것은 전체적인 체류시간이 증가함에 따라 기질이 다소 많이 제거되었고, 포기조의 체류시간이 2hr 증가함에 따라 포기조에서 질산화가 더 많이 이루어져, 내부반송에 의해 무산소조에서 탈

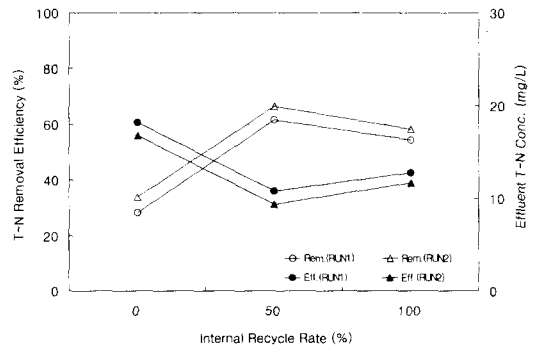


Fig. 3. T-N removal efficiency and effluent T-N concentration with internal recycle rate.

질된것에 기인된다. 암모니아성 질소(NH₃-N)의 경

우 RUN 1은 76.6~89.0%의 제거율을 보였으며, 유출수의 농도는 2.1~4.8mg/L의 범위였다. RUN 2는 80.2~91.1%의 제거율을 보였으며, 유출수의 농도는 1.7~3.9mg/L로서 RUN 1보다 제거율이 높고 유출수의 농도는 낮은 것으로 나타났다.

내부 반송율 변화에 따른 질소의 제거율은 50%에서 가장 높고, 그 다음 100%, 무반송의 순으로 나타났다. 내부 반송율 100%에서 50%보다 질소 제거율이 낮게 나타난 것은, 내부반송에 의해 무산소조로 유입되는 유기물 농도가 희석됨에 따라 탈질에 필요한 유기물량이 감소된 것과 유량의 증가에 따른 탈질조(무산소조)의 실제 체류시간이 감소함에 따라 충분한 탈질이 이루어지지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

전체적으로 본 연구에서 질소제거의 경우 총 수리학적 체류시간(HRT) 10hr인 RUN 1 보다는 충분한 질산화를 유도할 수 있는 RUN 2(HRT 14 hr)가 제거율이 높게 나타났으며, 내부 반송율에 따른 질소 제거율은 반송율 50%에서 높게 나타났다. 따라서 본 공정으로 질소를 제거할 경우 수리학적 체류시간을 14hr으로 유지하고, 내부 반송율은 50%로 운전하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

3. 인 제거

Table 6 및 Fig. 4에 각 운전인자별 유입, 유출 농도와 그에 따른 인의 제거율을 제시하였다.

T-P의 경우 RUN 1의 유출수 농도는 1.79~1.95mg/L를 보였으며, 제거율은 37.7~47.0%로 나

타났다. RUN 2의 유출수 농도는 1.74~1.92mg/L의 범위를 보였으며, 제거율은 39.0~48.5%로서 RUN 1보다 다소 높은 것으로 나타났다. 이는 RUN 2의 경우 혐기성조의 수리학적 체류시간이 1hr 길어서 RUN 1에 비해 인의 용출이 다소 많이 이루어져, 호기성조에서 섭취가 보다 많이 되었음을 의미한다.

내부반송율에 따른 T-P제거율은 내부 반송율 50%에서 가장 높은 것으로 나타났으며, 이는 반송에 따른 희석효과와 미생물 활성도가 타 반송율에 비해 높아 유기물제거 및 인의 제거가 보다 많이 발생되었음을 의미한다. S-P의 경우 전체적으로 유입되는 농도에 비해 유출되는 농도가 높은 것으로 나타났다. 이는 혐기성조에서 인의 용출이 일어나고, 무산소조에서 인축적 박테리아(PAO)가 이용

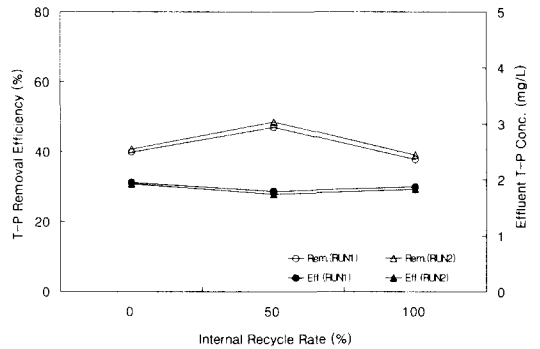


Fig. 4. T-P removal efficiency and effluent T-P concentration with internal recycle rate.

Table 6. Variations of phosphorous with internal recycle rate in RUN 1, RUN 2.

Item	IRR (%)	T-P							S-P						
		Inf.	An	Ax	Ox-1	Ox-2	Eff.	Rem.(%)	Inf.	An	Ax	Ox-1	Ox-2	Eff.	Rem.(%)
RUN 1	0	3.24	2.47	2.98	2.08	1.97	1.95	39.8	1.18	1.43	1.54	1.42	1.31	1.30	-10.2
	50	3.38	2.71	2.34	2.02	1.81	1.79	47.0	1.30	1.55	1.64	1.61	1.64	1.51	-16.2
	100	3.00	2.51	2.12	2.07	1.93	1.87	37.7	1.51	1.56	1.80	1.68	1.62	1.57	-4.0
RUN 2	0	3.24	2.30	2.22	2.05	1.97	1.92	40.7	1.18	1.46	1.64	1.56	1.51	1.49	-26.3
	50	3.38	2.60	2.19	1.92	1.76	1.74	48.5	1.30	1.59	1.66	1.63	1.56	1.52	-16.9
	100	3.00	2.43	2.08	1.97	1.89	1.83	39.0	1.51	1.59	1.80	1.79	1.60	1.65	-9.3

가능한 기질이 존재하여 부분적으로 다시 인의 용출이 발생되었으며⁵⁾, 호기성조에서 생물막 공정의 특성상 생물막표면의 호기성층에서는 인의 섭취가 이루어지나, 생물막내부의 혐기성층에서는 인이 용출되어 전체적인 농도가 높아지는 것으로 판단된다. 생물학적 처리공정에서 인의 거동은 혐기성조건에서 인이 용출되고, 호기성 조건에서 미생물 세포내에 축적된다. 그러나, Kerm-Jespersen & Henze⁶⁾는 무산소 조건과 호기성 조건에서 인의 섭취(uptake)를 연구한 결과 무산소 조건에서도 산소나 nitrate가 존재할 경우 이를 전자공여체로 이용하여 인의 섭취가 발생할 수 있다고 하였다. 또한 Gerber⁵⁾은 생물학적 영양소 제거공정에서 기질(organic substrate)과 질산성질소(nitrate) 및 인(phosphate)의 관계를 연구한 결과 무산소 조건에서 인축적 박테리아가 이용 가능한 acetate가 존재하는 경우에는 인의 용출이 일어날 수 있으며, 호기성 조건에서도 환경조건에 따라 인의 용출이 일어날 수 있다고 하였다.

생물학적 인제거는 인의 실질적인 변환에 의한 제거라기 보다는 미생물 세포내에 에너지원으로 축적됨을 의미하는 것이며, 엄밀한 의미에서의 인의 제거는 잉여슬러지를 폐기함으로써 달성할 수 있다. 본 연구에서 영양소 제거공정인 A²/O 공정에 여재를 충전하여 내부반송율 변화에 따른 제거 특성을 파악한 결과, 인의 경우 생물막공정의 특성상 높은 제거율은 기대하기 힘든 것으로 나타났다. 따라서 이러한 공정을 적용할 경우 미 처리된 인의 적정 처리방안에 대한 연구가 보다 많이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

국내 하수처리장에 적용이 비교적 용이할 것으로 판단되는 영양소 제거공정인 A²/O 공정에 여재를 충전하여 내부반송율 변화에 따른 유기물제거 및 영양소 제거특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수리학적 체류시간(RUN 1; 10hr, RUN 2; 14hr) 변화에 따른 유기물 제거율의 차이는 미미한 것으로 나타났으며, 내부 반송율에 따른 유기물

제거율은 반송율 50%에서 다소 높은 것으로 나타났다.

2. 질소제거는 전체적인 체류시간이 증가함에 따라 기질이 다소 많이 제거되었고, 포기조의 체류시간이 2hr 증가함에 따라 포기조에서 질산화가 더 많이 이루어졌다. 내부 반송율 변화에 따른 질소의 제거율은 50%에서 가장 높고, 그 다음 100%, 무반송의 순으로 나타났다.
3. 내부반송율에 따른 T-P제거율은 유기물 및 질소의 경우와 유사하게 내부 반송율 50%에서 가장 높은 제거효율을 보였다.
4. 종합적으로 본 공정으로 유기물제거 뿐만 아니라 영양소 제거를 동시에 고려할 경우, 적정 체류시간은 약 14hr으로 유지하고 내부반송율은 50%로 운전하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 제35차 KIST-KITA 협동공개 강좌: 오베수 탈질·탈인 기술, 1996.
2. APHA, AWWA, WEF: Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Ed., 1995.
3. Daigger, G. T., et al.: Enhanced secondary Treatment Incorporating Biological Nutrient Removal, JWPCF, Vol. 60, No. 10, 1988.
4. Walsh, T. K., et al., A Review of Biological Phosphorus Removal Technology, Presented at the water pollution control Federation Annual conference, October, 1983.
5. Gerber A., et al.: Interactions Between Phosphate, nitrate and Organic Substrate in Biological Nutrient Removal Processes, Water Science and Technology, 18, Copenhagen, 1986.
6. Kerm-Jespersen J. P. and Henze M., Biological Phosphorus Uptake under Anoxic and Aerobic Conditions, Water Research. Vol. 27, No. 4, 1993.