

A/O 및 A²/O공정의 생물학적 인제거 특성비교

Comparison of Biological Phosphorus Removal Characteristics between A/O and A²/O Process

김광수 · * 서규태 · 이경호 · 김낙주

Kwang-Soo, Kim · Gyu-Tae, Seo · Kyung-Ho, Lee · Nag-Ju, Kim

한국건설기술연구원 수자원환경부
* 창원대학교 환경공학과
* * 서울산업대학교 정밀화학과

Dept. of Water Resources & Environmental Eng., Korea Institute of construction
Technology

*Dept. of Environmental Eng., Chang-Won National University

**Dept. of Fine Chemistry Eng., National Seoul University of Technology

Abstract

Bench scale experiments were carried out with two biological nutrient removal(BNR) units, A/O and A²O processes, to investigate the behavior of phosphorus in the system and to compare the characteristics of phosphorus removal in two BNR processes. To achieve this goal, COD/T-P and COD/TKN ratios of the influent was varied in the range of 23~64 and 5~24, respectively.

In A/O process, influent COD/T-P ratio should be kept higher than 44mg/L to meet the final effluent T-P concentration lower than 1mg/L and in A²/O process, influent COD/T-P and COD/TKN ratios higher than 56 and 10, respectively, were required for good phosphorus release and uptake with no influence of nitrate nitrogen in return sludge. At this conditions, the rate of phosphorus release in the anaerobic basin should be kept higher than 0.1 kg S-P/kg MLVSS · d

In A/O process, the phosphorus content of anaerobic and aerobic sludges was increased as SRT of total system was becoming longer resulting in decreasing the difference of phosphorus content between two sludges while phosphorus release in anaerobic basin and phosphorus uptake in aerobic basin was not incident. In A²/O process, the phosphorus content of anaerobic and aerobic sludges were not increased with higher SRT of total system due to the relatively high nitrate concentration in return sludge. However, the difference of phosphorus content between anaerobic and aerobic sludges was incident when phosphorus release and uptake was observed.

Keywords : A/O and A²/O processes, Influent COD/T-P and COD/TKN ratios, Phosphorus Release Rate, Phosphorus Content of Anaerobic and Aerobic Sludges

1. 서 론

질소나 인제거를 위한 대표적인 생물학적처리 주류공정(main-stream process)으로는 A/O, A²/O, 수정 Bardenpho 등과 같은 공법이 있다. 이와같은 공법을 구성하고 있는 각 반응조의 역할은 혐기조에서는 인의 방출이 일어나고, 탈질조에서는 질산성 및 아질산성 질소 등이 환원되어 질소가스로 제거되며, 포기조에서는 유기물 산화 및 질산화 그리고 인의 과잉섭취 등이 일어나며 인의 제거는 포기조에서 자란 슬러지를 폐기시켜 수행한다. 그리고 혐기조에서의 인방출 그리고 탈질조에서의 질소제거를 위해서는 유입수에 함유된 BOD 또는 COD 등의 유기탄소원을 사용하기 때문에 유입수의 유기물농도가 매우 중요한 요소로 작용한다^{1,2)}. 더불어, 유입수에 함유된 TKN 및 T-P 등의 영양염류에 있어서 TKN의 경우 폭기조에서 산화된 후 반송슬러지 혼합액에 함유되어 혐기조로 유입될 경우에는 혐기조에서 인 방출에 영향을 미치게 되고^{3,4)}, T-P의 경우는 폭기조의 SRT에 따라 제거효율에 큰 차이가 있기 때문에 생물학적 영양염류

제거시설에서 유입수의 COD/TKN, COD/T-P의 비는 매우 중요하다고^{5,6,7)} 할 수 있다.

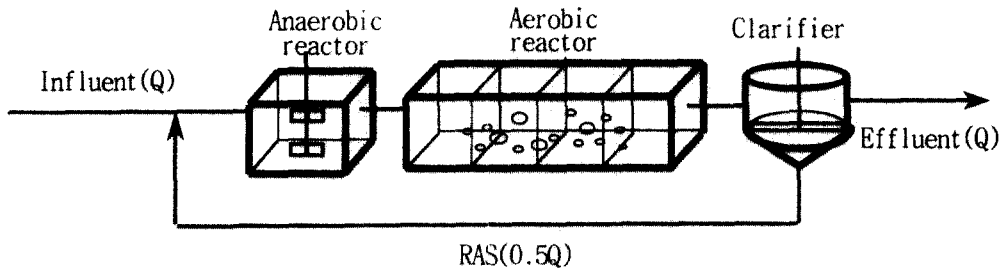
따라서 본 연구에서는 현재 상업적으로 실용화되어있는 A/O 및 A²/O공정에서 유입수의 COD/T-P 및 COD/TKN비 등의 수질의 변화에 따른 시스템내에서의 인의 거동 및 제거특성의 비교, 그리고 그에 관련된 설계인자 등을 알아 보고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 A/O 및 A²/O공정 실험 장치는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 용량이 3.3L인 혐기조, 용량이 6.6L무산소조 그리고 용량이 20L인 포기조로 구성되어 있다. 혐기조 및 무산소조에는 유입수 및 반송슬러지가 완전 혼합되도록 약 150 rpm정도로 운전되는 교반기를 설치하였고, 상부는 공기가 침투하지 않도록 밀폐시켰다. 포기조는 4개의 칸으로 구분되었으며, 조내의 적절한 용존 산소 공급 및 혼합을 위하여 산기적으로 공기를

<A/O Process>



<A²/O Process>

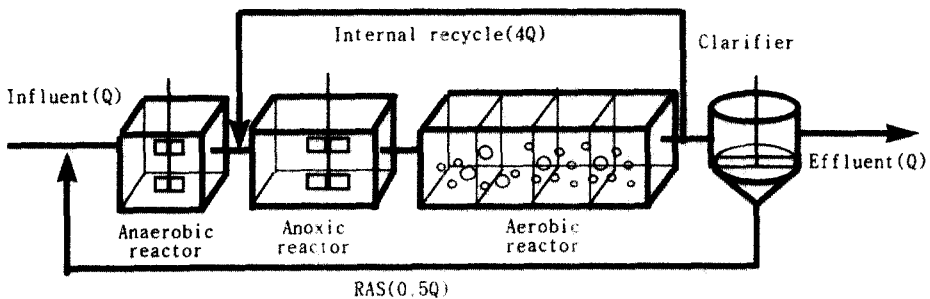


Fig. 1. Schematic diagram of experimental A/O and A²/O processes.

공급하였다. 각 공정에서 유입수 및 반송 슬러지는 정량 펌프로 이송시켰다.

2.2 실험방법

유입수는 COD 농도가 약 200 mg/L인 하수처리장 1차침전지의 유출수에 유기물을 보충하기 위하여 glucose를 그리고 인을 보충하기 위하여는 KH₂PO₄를 주입하였으며, 회석수로는 하수처리장의 처리수를 사용하였다.

본 실험에 사용된 유입수 및 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 유입수의 COD 농도는 I 단계에서 359~367 mg/L, II 단계에서 237~257 mg/L, 그리고 III 단계에서 129~165 mg/L로 각 단계별로 변화시키고, T-P농도는 5~6 mg/L로 고정시켜서 유입수의 COD/T-P비를 23~64 범위로 운전하였다. 그리고 TKN 농도는 A/O공정의 경우는 반송슬러지 혼합액에 질산성 질소가 함유되어 혐기조에서 질산성 질소에 의한 영향을 받지 않도록 하기 위하여 세포형성에 필요한 적당량인 10~15 mg/L만 주입하였다. A²/O공정의 경우 TKN 농도는 35~38 mg/L높여서 유입수의 COD/TKN 비는 5~10 범위로 변화시켰다.

공정의 운전조건은 유입유량(Q)은 약 80 L/d, 그리고 각 조의 MLSS 농도는 약 3,500~4,000

mg/L 범위로 유사하게 하였다. 혐기조의 체류시간은 약 1시간, 무산소조 체류시간은 2시간 그리고 포기조의 체류시간은 약 6시간으로 하였고, 2차침전지에서 포기조로의 슬러지 반송비는 유입유량(Q)의 50%로 하였다. seeding 용 슬러지는 pilot plant 규모로 운전하고 있는 생물학적 질소, 인 동시제거공정의 폭기조 슬러지를 이용하였으며, 각 단계별 운전기간은 정상상태라고 판단되는 운전기간을 포함하여 약 15일~20일씩 이었다. 반응조의 온도는 실온(18~20℃)으로 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유기물의 제거

Fig. 2는 A/O 및 A²/O 공정 각 실험단계별로 유입수 TCOD 농도 및 각 생물반응조 유출수의 SCOD농도를 나타낸 것으로, 유입수 유기물 농도의 약 70% 이상이 혐기 또는 혐기-무산소 과정에서 제거됨을 보여 주었다. 이는 2차침전지에서 혐기조로 반송되는 반송슬러지 혼합액 또는 포기조에서 무산소조로 반송되는 내부반송슬러지 혼합액에 의한 회석효과나, 혐기과정에서의 인방출 그리고 무산소조에서 질산성 질소를 질소가스로 환원 시키기 위한 탄소원으로 사용되었거나, 미생물

Table 1. Characteristics of influent and operating condition

Process	Phase	COD (mg/L)	T-P (mg/L)	TKN (mg/L)	COD/T-P ratio	COD/TKN ratio
A/O	I	359	5.6	15	64	24
	II	237	5.4	15	44	16
	III	129	5.3	10	23	13
A ² /O	I	367	6.5	38	56	10
	II	257	6.0	36	43	7
	III	165	6.0	35	28	5
Condition	Flow rate(Q)			80(L/d)		
	HRT			A/O		A ² /O
	Anaerobic reactor (hr)			1		1
	Anoxic reactor (hr)			-		2
	Aerobic reactor (hr)			6		6
	RAS			· Clarifier → Anaerobic reactor : 0.5Q		
	Internal recycling ratio			· Aerobic → Anoxic basin : 4Q		

floc에 흡수^{8,9)}되었기 때문인 것으로 사료되었다.

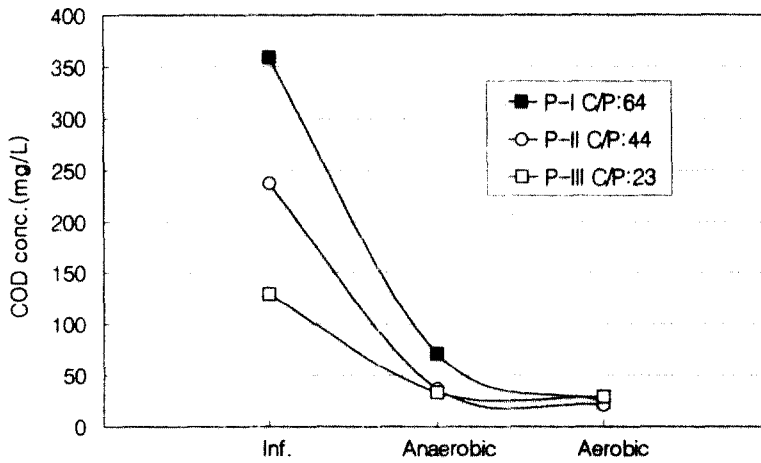
Table 2는 A/O 및 A²/O 공정의 SRT를 나타낸 것으로 F/M비가 낮아짐에 따라 SRT가 길어지는 전형적인 생물학적 처리양상을 나타내며, A/O 공정보다 A²/O 공정이 SRT가 긴 것은 A²/O 공정이 무산소조의 추가로 시스템전체의 F/M비가 낮았기 때문인 것으로 사료되었다.

3.2 인의 방출 및 흡수

Fig. 3은 A/O 및 A²/O 공정 각 실험 단계별로 유입수의 T-P 농도 및 혐기조, 무산소조 그리고 포기조 유출수의 S-P 농도를 측정하여 평균값으로 나타낸 것이다.

A/O 공정의 경우 유입수의 COD/T-P비가 64 및 44로 유지된 I, II 단계 실험에서는 혐기조 유출수의 S-P 농도가 유입수의 T-P 농도보다 높은 22

< A/O process >



< A²/O process >

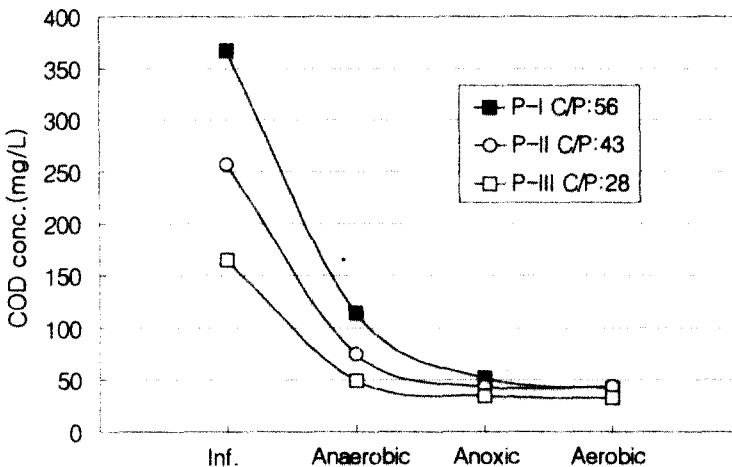


Fig. 2. Profile of effluent SCOD concentration in anaerobic, anoxic, and aerobic basin.

Table 2. Effect of F/M ratio on system SRT

Process	Phase	F/Mratio (kg COD/kgMLSS · d)	SRT(day)
A/O	I	0.47	8
	II	0.35	15
	III	0.2	23
A ² /O	I	0.37	9.8
	II	0.26	18
	III	0.18	25

mg/L, 16 mg/L를 나타내고 포기조의 인농도는 1 mg/L이하를 나타내어, 혐기조에서는 인의 방출이 일어나고 포기조에서는 인의 흡수가 원활히 진행되었음을 알 수 있다. 그러나 COD/T-P비가 23으로 저하된 III단계 실험에서는 혐기조 유출수 및 포기조의 인 농도가 유입수의 인농도와 유사하여 인의 방출 및 흡수가 진행되지 않음을 보여주고 있다.

A²/O 공정의 경우 유입수의 COD/T-P비가 56으로 유지된 I단계 실험에서는 혐기조 유출수의 S-P 농도가 유입수의 T-P 농도보다 높은 17 mg/L를 나타내고, 포기조의 인농도는 약 1 mg/L이하를 나타내어, 인의흡수 및 방출이 원활히 진행되었으나, 유입수의 COD/T-P비가 43 및 28로 유지된 II,III단계에서는 유입수 및 혐기조 그리고 포기조의 인의 농도가 유사하여 인의 방출 및 흡수가 진행되지 않음을 보여주고 있다.

따라서 혐기조에서의 인방출과 포기조에서의 인의 과잉흡수가 원활히 진행되기 위한 유입수의 수질조건은 A/O공정의 경우 유입수의 COD/T-P 비는 44이상이어야 하고, A²/O 공정은 56이상이어야 함을 알 수 있다.

한편 table 3은 A/O 및 A²/O 공정 각 단계별의 혐기조에서의 인방출속도를 산정하여 나타낸 것으로, 유입수의 COD/T-P 비가 높을수록 혐기조에서의 인 방출속도가 증가함을 나타내며, Fig. 3에서 보는 바와같이 혐기조에서 인방출 그리고 포기조에서 인의 과잉흡수가 원활히 일어나 유출수의 인농도를 약 1 mg/L로 배출하기 위한 혐기조에서의 인방출속도는 약 0.1 kg S-P/kg MLVSS. d 이상을 유지하여야 함을 알 수 있다.

Table 4는 2차침전지 유출수 질산성 질소 농도

와 혐기조에서의 인 방출 농도를 비교한 것으로, A/O공정에서는 유입수에 함유된 질소농도가 낮아서 2차침전지에서 혐기조로 반송되는 슬러지혼합액에 질산성 질소의 농도가 낮았으며 그 결과 혐기조에서 질산성 질소의 영향을 거의 받지않았으나, 질소와 인을 동시에 제거하는 A²/O 공정에서는 탈질조에서 탄소원이 부족하여 질산성 질소제거효율이 낮으면 반송슬러지에 의한 질산성 질소의 과잉유입으로 혐기조에서 인 방출이 저하되고 따라서 처리수의 인농도가 높게됨을 알 수 있다.

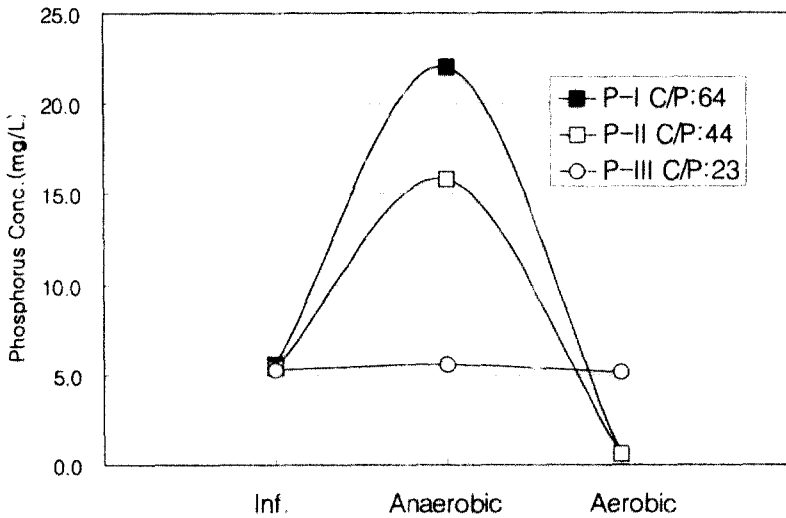
이러한 결과로부터 A/O공정과 A²/O 공정간의 혐기조에서의 인 방출을 저하를 비교하면 A/O공정에서는 유입수의 COD/T-P비 26에서 혐기조에서의 인 방출을 저하는 인방출에 소요되는 탄소원이 부족하기 때문이나, A²/O 공정이 A/O공정보다 인의 제거효율이 낮은 것은 2차 침전지에서 혐기조로 반송되는 질산성 질소가 인 방출에 소요될 유기물을 상당량 소모시켜 혐기조에서 인 방출에 악영향을 주기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 A²/O 공정에서 질산성 질소의 영향없이 혐기조에서의 인 방출 그리고 호기조에서의 인의 흡수가 원활히 일어날 적정 유입수질 조건은 유입수의 COD/T-P 비는 56이상이고, COD/TKN 비는 10 이상이어야 함을 알 수 있다.

3.3 슬러지의 인 함량

Table 5는 SRT에 따른 혐기조 및 포기조 슬러지의 인함량을 나타낸 것이다.

A/O공정의 경우 SRT가 증가함에 따라 슬러지내의 인함량은 증가하는 경향을 나타내고, 반면에 혐기조 슬러지와 포기조 슬러지간에 인함량 차이

< A/O process >



< A²/O process >

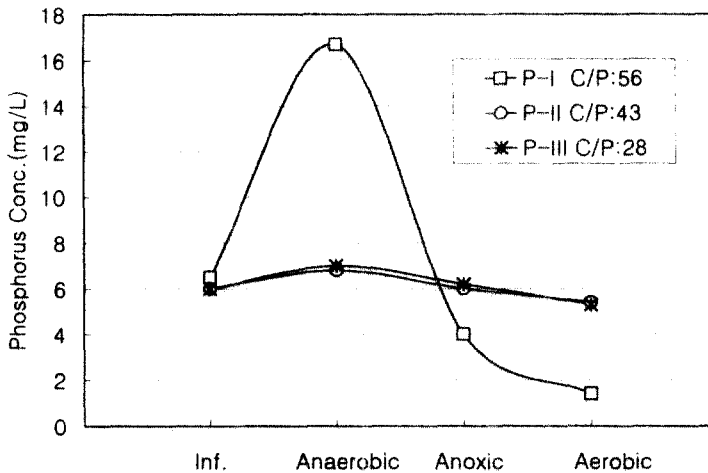


Fig. 3. Profile of effluent phosphorus concentration in anaerobic, anoxic, and aerobic basin.

가 점점 적어지다가 인의 방출 및 흡수가 일어나지 않는 III단계에서는 인함량이 같아 짐을 보여주고 있다.

A²/O 공정의 경우는 SRT가 증가하여도 A/O 공정에 비교하여 인함량의 증가는 크지 않으나, 인의 흡수 및 방출이 원활히 진행된 I단계 실험 결과에서 나타낸 바와같이 혐기조 슬러지와 포기조 슬러지 간에 인함량의 차이가 있음을 보여주고

있다. 반면에 인의 흡수 및 방출이 원활하지 않았던 II, III단계에서는 A/O공정 III단계와 마찬가지로 인함량이 같아짐을 보여주고 있다.

결국 생물학적 인제거 공정에서 A/O공정의 경우는 SRT를 길게하면 인이 축적되어 슬러지의 인함량은 증가하나 인의 방출 및 흡수가 원활히 진행되지않고, A²/O 공정의 경우는 SRT가 길어지면 반송슬러지에 함유된 질산성 질소 농도의 증가로

Table 3. phosphorus release rate in anaerobic basin

Process	Experimental phase	P release rate in anaerobic basin (kg S-P/kg MLVSS · d)
A/O	I	0.15
	II	0.11
	III	0.015
A ² /O	I	0.09
	II	0.011
	III	0.011

Table 4. Effects of return sludge NO₃-N concentration on soluble phosphorus concentrations of anaerobic basin and 2nd clarifier effluents

Process	Experimental phase	NO ₃ -N conc. of 2nd clarifier effluent(mg/L)	S-P conc. of anaerobic basin effluent(mg/L)	S-P conc. of 2nd clarifier effluent(mg/L)
A/O	I	3	22	0.6
	II	3	16	0.6
	III	4	5.6	5.2
A ² /O	I	8.3	17	1.4
	II	12.3	6.8	5.4
	III	16	7.0	5.3

협기조는 혐기성조건이 형성되지 않고 전자 수용체가 질산성 질소인 무산소성 조건이 형성되어 슬러지의 인의 흡수 및 방출과정이 정지되어 인함량의 변화가 없어지는 것으로 사료되었다.

따라서 A/O 공정에서 인의 방출 및 흡수가 원활히 진행되기 위해서는 유입수의 COD/T-P비 뿐만 아니라 SRT도 중요하며 유출수의 인농도를

1mg/L이하로 배출하기 위해서는 유입수의 COD/T-P비는 44이상, SRT는 15일 이하로 유지하여야 한다. 그리고 A²/O 공정의 경우는 질산성 질소의 영향 때문에 유입수의 COD/T-P 비는 56이상, COD/TKN 비는 10 이상을 유지하여야 하며 SRT는 10일이하로 유지하여야 함을 알 수 있다.

Table 5. Effect of SRT on phosphorus content of aerobic and anaerobic sludges

Process	Experimental phase	SRT(day)	T-P/VSS (%)	
			Anaerobic sludge	Aerobic sludge
A/O	I	8	4.3	5.2
	II	15	5.5	6.1
	III	23	6.1	6.1
A ² /O	I	10	4.0	4.4
	II	18	4.5	4.5
	III	25	4.4	4.4

4. 결 론

생물학적 영양염류 제거공정인 A/O 및 A²/O 공정의 인제거특성을 알아보기 위하여 유입수의 COD/T-P 비는 23~64, COD/TKN 비는 5~24로 변화시켜 실험실규모로 운전하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 혐기조, 무산소조, 포기조 등 각 단위공정에서 유입수의 COD 소모농도 변화를 측정한 결과, 유입 COD의 약 70% 이상이 혐기조에서 소모되고, 탈질조를 거친 후에는 포기조와 유사한 수질을 보여 주었다.
2. 혐기조에서 인의 방출 그리고 포기조에서 인의 흡수가 원활히 진행되어 유출수의 인농도를 약 1 mg/L 이하로 배출하기 위한 유입수의 적정 수질 조건을 알아보기 위하여 유입수의 COD/T-P 비는 28~64범위로 변화시켜 수행한 결과, A/O 공정은 COD/T-P 비가 44 이상이고, 인 질소 동시제거 공정인 A²/O 공정은 COD/T-P 비가 56 이상 그리고 COD/TKN 비는 10 이상 이어야 하며, 혐기조에서의 인방출속도는 약 0.1 kg S-P/kg MLVSS · d 이상을 유지하여야 함을 알 수 있었다.
3. 슬러지의 인함량은 A/O 공정의 경우는 SRT가 증가함에 따라 인이 축적되어 인의 함량은 높아졌으나 혐기조 슬러지와 호기조 슬러지간에 인함량의 차이가 적어지면서 인의 흡수 및 방출속도가 감소하였다. 반면 A²/O 공정의 경우는 SRT가 증가하여도 인의 함량은 증가하지 않았으며 이는 혐기조에 질산성질소의 유입으로 혐기조가 무산소 조건이 형성되어 인의 흡수 및 방출이 정지되었기 때문인 것으로 사료되었다.

참고문헌

1. Matsch, L. C., and Drnevich, R. F., "Biological Nutrient Removal", in *Advances in Water and Wastewater Treatment*, Ann Arbor Sci., Mich. (1987)
2. Kang, S. J., et al., "Biological Nitrification and Denitrification in the Phostrip Process", in paper presented at 61st Water Pollut. Control Fed. Conf., Dallas, Tex (1988)
3. Simpkins, M. J., and McLaren, A. R., "Consistent Biological Phosphate and Nitrate Removal in an Activated Sludge Plant.", *Progr. Water Technol.*, 10(5/6), 433 (1978)
4. Stensel, H. D., et al., "Performance of First U.S. Full Scale Bardenpho Facility", *Proceedings of EPA International Seminar on Control of Nutrients in Municipal Wastewater Effluents.*, San Diego (1980)
5. Tetreault, M. J., Benedict, A. H., Kaempfer, C., and Barth, E. F., "Biological Phosphorus Removal : A Technology Evaluation", *JWPCF*, 58(8), 823-837 (1986)
6. Hong, S., et al., "A Biological Wastewater Treatment System for Nutrient Removal", paper presented at 54th Annu. Conf. Water Pollut. Control Fed., Detroit, Mich. (1981)
7. Siebritz, I. P., Ekama, G. A., and Marais, G. v. R., "Parametric Model for Biological Excess Phosphorus Removal", presented at the I.W.P.R. Post Conference Seminar on Phosphate Removal, Pretoria (1982)
8. Eikelboom, I. D., *Biosorption & Prevention of Bulking Sludge by Means of a High Floc Loading*, Water Research Centre, 163~173 (1980)
9. 전항배, 이용택, 신항식, "유기물질이 인제거 특성에 미치는 영향", *상하수도 학회지*, 8(2), 25~34 (1994)