

# A<sup>2</sup>/O공정과 수정 Phostrip공정과의 질소 및 인제거 특성비교

김광수<sup>\*</sup> · 김이태

한국건설기술연구원 건설환경연구부

## Comparison of Phosphorus and Nitrogen Removal Characteristics between A<sup>2</sup>/O and Modified Phostrip Processes

Kwang-Soo, Kim<sup>\*</sup> · I-Tai, Kim

Construction Environment Research Dept., Korea Institute of Construction Technology

(Received 8 August 2005, Accepted 18 October 2005)

### Abstract

An experimental study for the comparison of nitrogen and phosphorus removal efficiencies between A<sup>2</sup>/O and modified Phostrip (M-Phostrip process) were carried out with bench-scale reactors.

In case of nitrogen removal efficiencies both of processes showed similar ones when influent organic loadings were high. However, M-phostrip process was more effective than A<sup>2</sup>/O at low organic loadings. This is why M-phostrip process consumes the whole mass of influent organics as a carbon sources for denitrification in anoxic reactor but the anoxic reactor of A<sup>2</sup>/O process utilizes the residual carbon followed by consuming a part of influent carbon for phosphorus release in anaerobic reactor.

A<sup>2</sup>/O process required the influent COD/T-P and COD/TKN ratios were more than 56 and 10, respectively, to take place the phosphorus release in anaerobic process and phosphorus uptake in oxic process. However, the luxury uptake of phosphorus in M-phostrip process was not affected by influent COD/T-P and COD/TKN ratios and the adverse effect of nitrate in return sludge introduced to the p-stripper from the 2nd clarifier was not significant due to the configurational advantage of the p-stripper.

**keywords** : Influent COD/T-P and COD/TKN ratios, A<sup>2</sup>/O and M-phostrip, P-stripper

## 1. 서론

질소나 인제거를 위한 대표적인 생물학적 공정에는 혐기조, 탈질조, 포기조가 직렬로 연결된 A<sup>2</sup>/O 공정과 같은 주류(main stream)공정과 Phostrip공정과 같이 혐기성 탈인조가 포기조와 병렬로 연결되는 측류(side stream)공정이 있다. 주류공정의 혐기조에서는 유입수의 탄소원을 이용하여 인의 방출이 일어나고, 인의 제거는 포기조에서는 인을 과잉으로 섭취한 잉여슬러지를 폐기시킴으로서 이루어진다(Marais et al., 1983). 측류공정인 Phostrip 공정에서는 인의 방출에 필요한 탄소원으로 혐기조인 탈인조에 반송슬러지의 일부를 장시간 체류시켜 혐기과정에서 슬러지의 cell분해에 의해 야기되는 유기물을 탄소원으로 이용하는 내생탈인(endogenous phosphorus release metabolism)에 의해 인의 방출이 일어나고(Levin et al., 1979), 인의 과잉흡수는 A<sup>2</sup>/O공정과 마찬가지로 포기조에서 일어난다. 그리고 탈질 과정은 A<sup>2</sup>/O공정은 혐기조를 거친 후 진행되나, M-phostrip 공정은 유입원수를 직접탄소원으로 이용한다(Kim et al.,

2000).

본 연구에서는 혐기조에서 외부탄소원 제공에 의한 인의 방출이 일어나는 A<sup>2</sup>/O공정과 내생탈인에 의해 인의 방출되는 특성을 이용한 M-phostrip공정과의 인제거 특성 및 질소제거의 효율성에 대하여 알아 보았다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험장치

Fig. 1 도시된 바와 같이 A<sup>2</sup>/O공정은 용량이 3.3 L인 혐기조, 6.6 L인 무산소조와 용량이 20 L인 포기조로 구성되었다. 혐기조 및 무산소조에는 유입수 및 반송슬러지가 완전혼합되도록 약 150 rpm정도로 운전되는 교반기를 설치하였고, 상부는 공기가 침투하지 않도록 밀폐시켰다. 포기조는 4개의 칸으로 구분되었으며, 조내의 적절한 용존산소 공급 및 혼합을 위하여 산기석과 교반기를 설치하였다. M-Phostrip공정은 포기조와 혐기성의 탈인조로 구성된 전형적인 Phostrip 공정의 포기조 전단에 무산소조를 두었으며, 포기조 및 무산소조 각각의 크기 및 구조는 A<sup>2</sup>/O공정과 같았다. 탈인조에는 슬러지의 농축에 의하여 관이 막히

<sup>\*</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kskim@kict.re.kr

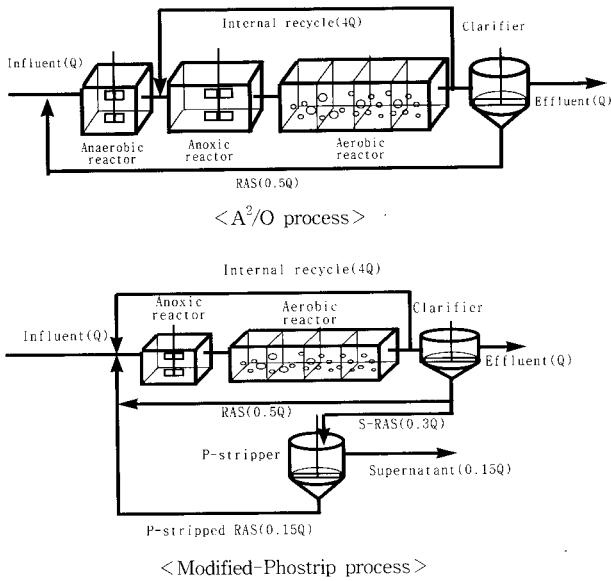


Fig. 1. Schematic diagram of A<sup>2</sup>/O and Modified-Phostrip processes.

지 않도록 2~3 rpm 속도의 슬러지 스크래퍼(scraper)를 설치하였다. 각 공정에서 유입수 및 반송슬러지는 정량펌프로 이송시켰다.

2.2. 운전방법

각 공정의 유입수는 COD농도가 약 200 mg/L인 고양하수처리장 1차 침전지의 유출수에 유기물의 보충이 필요한 경우는 glucose를 그리고 인을 보충하기 위하여는 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>을 주입하였으며, 회석시에는 2차 처리수를 사용하였다. 각 공정의 일일 처리용량은 80 L/day였다.

Table 1은 각 공정의 단계별로 사용된 유입수의 수질을 나타낸 것으로, A<sup>2</sup>/O공정에서 인 농도는 약 6 mg/L로 고정시키고, COD 농도만을 변화시켜 유입수의 COD/T-P(또는 C/P로 표현)비를 28~56범위로 하였다. M-Phostrip공정에서 I, II-a 및 III-a 단계에서는 A<sup>2</sup>/O공정과 유사하게 COD/T-P비를 22~47범위로 하였으나, II-b 및 III-b 단계에서는 인의 농도를 약 3.5 mg/L로 낮추어 실험을 수행하였다. 각 공정에서 유입수의 TKN 농도는 20~44 mg/L로 하여 유입수의 COD/TKN(또는 C/N로 표시)비는 4~10범위였다. 통상의 생물학적 인제거만을 위한 유입수질의 COD/T-P의 적정범위는 25이상, 그리고 질산성 질소의 영향없이 인의 원활한 제거를 위한 COD/TKN 적정범위는 10 이상을 요구한다(Siebritz et al., 1981). 본 연구에서는 유입수의 COD/T-P 비는 적정범위로 하고 COD/TKN비는 적정비의 범위를 벗어나게 운전하여 두 공정간의 인뿐만 아니라 질소제거효율을 비교하였다.

각 공정의 운전은 Table 2에 주어진 바와 같이 A<sup>2</sup>/O공정에서는 포기조 및 혐기조의 체류시간은 각각 6시간 및 1시간으로, 그리고 탈질조의 체류시간은 2시간으로 하였다. 포기조에서 탈질조로의 내부반송유량은 유입수 유량(Q)의 4배인 4Q로 고정시켰다. M-Phostrip공정에서는 포기조 체류시간 및 탈인조의 SDT(sludge detention time)는 각각 6시간 및 10~12시간으로 하고, 탈질조의 체류시간 및 포기조에서 탈질조로의 내부반송비 유량은 A<sup>2</sup>/O공정과 마찬가지로 각각 2시간 및 4Q로 하였다. 그리고 M-phostrip공정의 탈인조 상등액은 화학처리없이 전량 폭기조로 이송하였다.

각 공정의 단계별 실험기간은 약 15일정도 수행하였으며, 각 단계별 처리효율은 안정된 수질이 반복적으로 나타날 때 정상상태라 판단하여 산정하였다. 주요항목의 분석방법

Table 1. Characteristics of influent for A<sup>2</sup>/O and M-Phostrip process experiments

Process	Phase	COD (mg/L)	T-P (mg/L)	TKN (mg/L)	COD/T-P ratio	COD/TKN ratio
A <sup>2</sup> /O	I	367	6.5	38	56	10
	II	257	6.0	36	43	7
	III	165	6.0	35	28	5
M-Phostrip	I	359	7.6	37	47	10
	II - a	263	6.5	43	40	6
	II - b	258	3.7	44	70	6
	III - a	141	6.5	33	22	4
	III - b	172	3.5	20	49	9

Table 2. Operating conditions for A<sup>2</sup>/O and M-Phostrip process experiments

Process	Anaerobic reactor HRT(hr)	Anoxic reactor HRT(hr)	Aerobic reactor HRT(hr)	P-stripper SDT(hr)	RAS
A <sup>2</sup> /O	1	2	6	-	· 2nd clarifier → Anaerobic reactor: 0.5Q · Aerobic → Anoxic reactor : 4Q
M-Phostrip	-	2	6	10~12	· Aerobic → Anoxic reactor : 4Q · 2nd Clarifier → Anoxic reactor : 0.5Q · 2nd Clarifier → P-stripper : 0.3Q · P-stripper → Aerobic reactor: 0.15Q · Supernatant : 0.15Q

Q: influent flow rate, SDT: sludge detention time

은 Standard Methods(COD: dichromate reflux method, TKN: macro-kjeldahl method, NO<sub>3</sub>-N: UV spectrophotometric method, Phosphorus: Vanadomolybdophosphoric acid colorimetric method)에 의하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 유기물제거

각 공정의 각 단계별 유입수 COD농도 80% 이상이 대부분이 포기조 전단에 설치한 혐기-무산소조, M-phostrip의 경우는 무산소조에서 제거되었으며, 이는 혐기조건에서 인의 방출시 cell내에 PHB로 저장되었거나 탈질과정에서 탄소원으로 사용되었기 때문인 것으로 판단되었으며, 타 연구결과(Eikelboom, 1980; 전 등, 1994)에 따르면 혐기조 및 무산소조조건에서 미생물의 신진대사 능력이 포기조에서 보다 낮음에도 불구하고 많은 유기물이 소모되는 것은 COD 농도 대부분이 미생물 floc에 흡수(sorption)되기 때문이라고 하였다.

#### 3.2. 질소의 제거

Fig. 2는 A<sup>2</sup>/O공정을 대상으로 각 실험 단계별로 유입수 및 유출수의 TKN, NH<sub>3</sub>-N 및 NO<sub>3</sub>-N의 농도를 측정된 결과이다. 유입수의 TKN 및 NH<sub>3</sub>-N 농도는 각각 평균 37 mg/L 및 30 mg/L이었으며, 유출수의 TKN 및 NH<sub>3</sub>-N 농도는 각각 약 3 mg/L 및 1 mg/L 이하로 질산화 효율은 90% 이상으로 나타났으나, 유출수의 질산성 질소 농도가 I 단계에서는 5~10 mg/L, II 단계에서는 10~15 mg/L, 그리고 III 단계에서는 12~18 mg/L를 나타내어 탈질조에서의 F/M 비가 낮을수록 총질소 제거효율이 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 3은 M-phostrip공정을 대상으로 각 실험 단계별로 유입수 및 유출수의 TKN 농도 그리고 2차 침전지 유출수의 질산성 질소 농도를 측정된 결과이다. 각 단계에서 유출수의 TKN농도는 2 mg/L이하로 배출되었고 유출수의 질산성 질소농도는 A<sup>2</sup>/O공정의 I, II, III단계와 유사한 유입수질로 수행한 I, II-a,b, 그리고 III-a,b 각 단계별 유출수의 질산성 질소농도는 4~10 mg/L 혹은 6~15 mg/L 범위를 나타내었으며 유입수의 유기물 농도가 높을수록 시스템 전체의 질소 제거효율이 증가되었음을 알 수 있다.

Fig. 4는 탈질조의 F/M비에 따른 총질소 제거효율을 A<sup>2</sup>/O공정과 비교하여 나타낸 것으로, 탈질조의 F/M비가 높을 경우에는 총질소 제거효율이 서로 유사하였으나 F/M비가 낮을수록 A<sup>2</sup>/O공정보다 M-Phostrip공정에서 총질소 제거효율이 우수함을 알 수 있다. 이는 A<sup>2</sup>/O공정의 경우 유입수의 유기물 농도가 높을 때는 인 방출 및 탈질화에 소요되는 유기물이 부족하지 않으므로 인 및 질소 제거효율에서 M-Phostrip공정과 큰 차이가 없으나, 유입수의 유기물 농도가 낮을 경우에는 M-Phostrip공정에서는 유입유기물 전량이 탈질에 소모되나 A<sup>2</sup>/O공정에서는 혐기성 과정에서의 인 방출에 유입 유기물의 일부가 소모되고 잔류 유기물이 탈질에 이용되기 때문으로 사료된다.

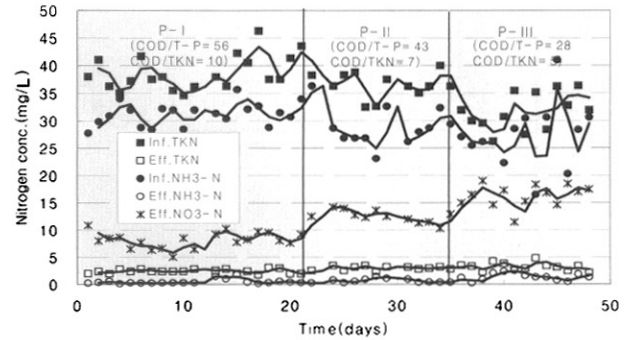


Fig. 2. Variation of nitrogen concentration in A<sup>2</sup>/O process.

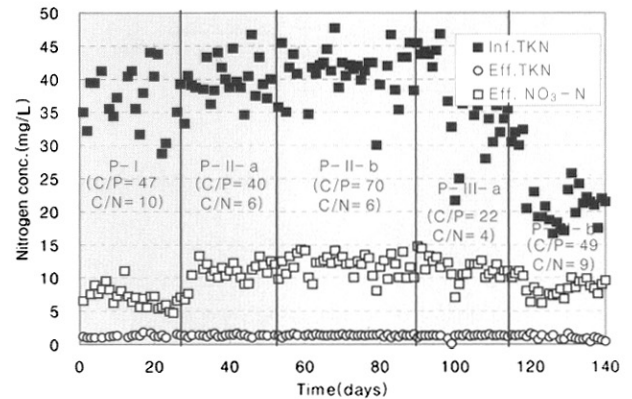


Fig. 3. Variation of nitrogen concentration in M-Phostrip process.

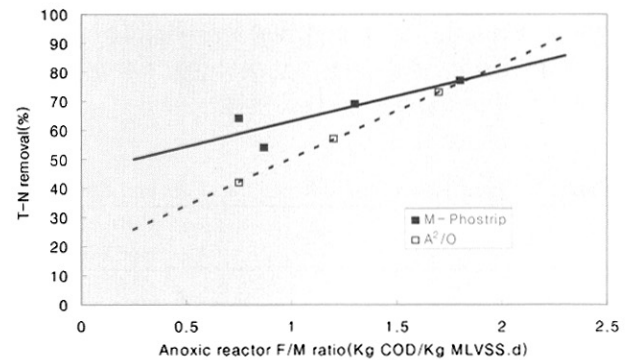


Fig. 4. Comparison of overall T-N removal according to F/M ratio of anoxic reactor in A<sup>2</sup>/O and M-Phostrip processes.

#### 3.3. 인의 제거

Fig. 5는 A<sup>2</sup>/O 공정의 유입수 및 혐기조, 탈질조 그리고 포기조의 유출수 인 농도를 측정된 결과이며, Table 3은 각 실험 단계별로 평균치를 계산한 결과로서 유입수의 COD/T-P비가 56이었던, I 단계 실험에서, 혐기조의 용해성 인 농도(soluble phosphate : S-P)는 약 17 mg/L이었으며, 침전지 유출수의 인 농도가 1.4 mg/L를 나타냄으로써 혐기에서는 인이 방출되고, 포기조에서 인이 과잉흡수 되었음을 알 수 있다. 그러나 유입수의 COD/T-P비를 43 및 28로 저하시켜 실시한 II 단계 및 III 단계 실험에서는 혐기조 및 2차 침전지 유출수의 인 농도가 유입수의 인 농도와 유사하여

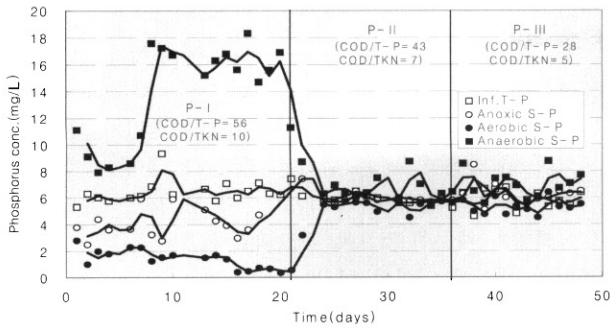


Fig. 5. Phosphorus concentration of anaerobic, anoxic and aerobic reactor effluents in A<sup>2</sup>/O process.

Table 3. Average effluent phosphorus concentration of anaerobic, anoxic and aerobic basins in A<sup>2</sup>/O process

Experimental phase	Influent T-P conc.(mg/L)	Effluent soluble P conc. (mg/L)			Effluent T-P conc.(mg/L)
		Anaerobic	Anoxic	Aerobic	
I	6.5	16.7	4.0	1.4	1.8
II	6.0	6.8	6.0	5.4	5.6
III	6.0	7.0	6.2	5.3	5.8

세포합성 이외에는 인의 방출 및 흡수가 일어나지 않았음을 알 수 있다.

Fig. 6은 M-Phostrip 공정에 대하여 각 실험 단계별로 유입수 및 유출수의 T-P 농도와 탈인조 상등액의 용해성 인 농도를 측정된 자료이며, Table 4는 Fig. 6의 자료를 각 실험 단계별로 평균하여 나타낸 것으로, 유출수의 인 농도는 유입수의 COD/T-P비가 22인 경우를 제외하고는 유입수의 수질에 관계없이 평균 1 mg/L이하로 배출되었으며, 탈인조 상등액의 용해성 인 농도가 2차 침전지 유출수의 인 농도보다 높아서 어느 조건에서나 인의 방출이 일어남을 알 수 있다. 따라서 M-phostrip 공정이 A<sup>2</sup>/O공정보다 유입수 수질에 영향을 적게 받음을 알 수 있다.

한편 Table 5는 A<sup>2</sup>/O 및 M-phostrip 공정 2차 침전지 유출수의 질산성 질소가 A<sup>2</sup>/O공정의 혐기조 및 M-phostrip공정의 탈인조에서 인의 방출에 미치는 영향을 나타낸 것이다. A<sup>2</sup>/O공정에서 2차 침전지 유출수의 질산성 질소 농도는 유입수의 COD 농도가 낮아 질 수록 높아지고 동시에 2차 침전지 유출수의 질산성 질소농도가 높아질수록 혐기

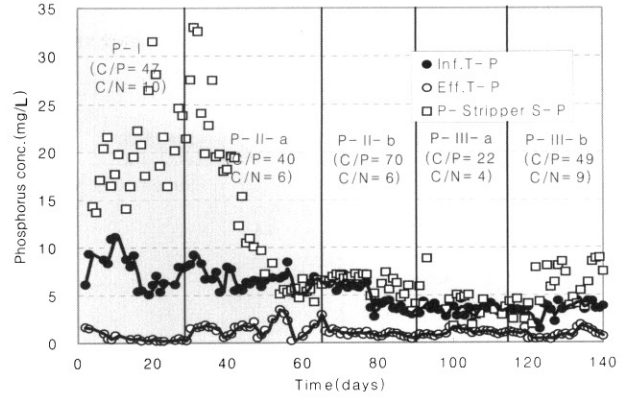


Fig. 6. Variation of phosphorus concentration in M-Phostrip process.

Table 4. Average phosphorus concentration in M-phostrip process

Experimental phase	Influent COD/T-P ratio	Influent T-P conc.(mg/L)	Effluent T-P conc.(mg/L)	P-stripper supernatant S-P conc.(mg/L)
I	47	7.6	0.35	21
II-a	40	6.5	1.1	6.4
II-b	68	3.7	0.8	5.3
III-a	22	6.5	1.8	3.6
III-b	49	3.5	0.9	7.9

조에서의 인방출 농도는 낮아져 A<sup>2</sup>/O공정에서 인의 흡수 및 방출이 원활히 일어나기 위해서 유입수의 COD/T-P비는 56 이상 그리고 COD/TKN비는 10 이상 되어야 함을 알 수 있다(Siebritz et al., 1981). M-Phostrip 공정에서도 마찬가지로 유출수의 질산성 질소 농도가 높을수록 탈인조 상등액의 용해성 인 농도는 감소하는 경향을 나타내기는 하였으나, 탈인조에서의 인방출은 여전히 진행되어 2차 침전지에서 반송되는 질산성 질소의 영향을 적게 받음을 보여주고 있다.

이는 M-Phostrip공정에서는 A<sup>2</sup>/O공정과 달리 포기조 앞에 탈질조만 두어 유입수내의 유기물을 모두 탈질에 소요 시킴으로써 질소 제거효율이 A<sup>2</sup>/O공정에서 보다 높게 되어 탈인조에 유입되는 질산성 질소의 부하가 낮기 때문이기도 하며, 또한 Fig. 7에서 보는 바와같이 탈인조의 구조적 기능 때문으로 사료된다. 즉, A<sup>2</sup>/O공정의 혐기조는 완전혼합

Table 5. Effect of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration of 2nd clarifier effluent on soluble phosphate concentration in P-stripper of M-Phostrip and in anaerobic reactor of A<sup>2</sup>/O

Process	Experimental phase	Eff. NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N conc. (mg/L)	Aerobic tank eff. S-P(mg/L)	P-stripper S-P (mg/L)	anaerobic tank eff. S-P(mg/L)
A <sup>2</sup> /O	I	8.3	1.4	-	17
	II	12.3	5.4	-	6.8
	III	16	5.3	-	7.0
M-Phostrip	I	7	0.35	21	-
	II-a	12	1.1	6.4	-
	II-b	12	0.8	5.3	-
	III-a	11	1.8	3.6	-
	III-b	8	0.9	7.9	-

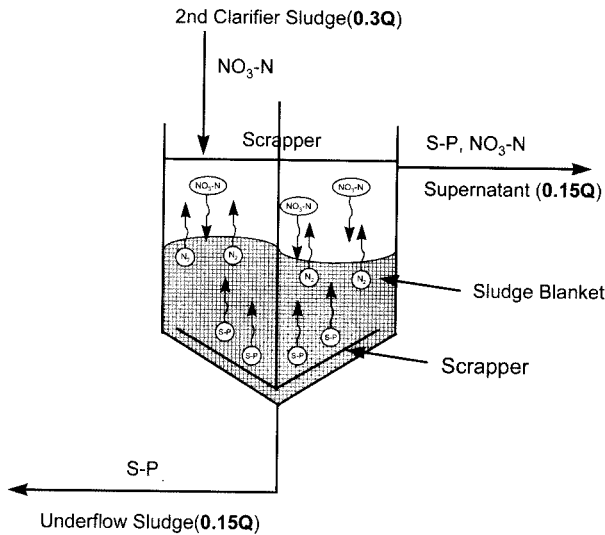


Fig. 7. Schematic diagram for the mass transfer and fate of  $\text{NO}_3^-$ -N and soluble phosphate in P-stripper.

이지만 M-Phostrip공정의 탈인조는 완전혼합형이 아니므로 2차침전지에서 반송된 슬러지내의 질산성 질소가 상당부분 탈인조 상정액으로 유출된다. 또한  $\text{A}^2/\text{O}$ 공정에서는 2차 침전지에서 혐기조로의 반송유량이 0.5~1.0Q이나 M-Phostrip 공정에서는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 0.3Q이므로  $\text{A}^2/\text{O}$ 공법 보다 질소부하량이 적어서 질산성 질소의 영향을 덜 받기 때문에 판단된다. 그리고 UCT공정에서는 2차침전지 반송슬러지를 혐기조에 직접 반송시키지 않고 탈질조를 거친 후 혐기조로 반송함으로써 혼합액에 함유된 질산성 질소의 농도를 최소화 시키나, M-Phostrip공정에서는 2차침전지로 부터 반송슬러지가 탈인조에 직접 유입되더라도 고·액분리과정에서 인 방출에는 고농도의 슬러지가 주로 관여하고, 상정액에 함유된 질산성 질소는 유출되므로 질산성 질소의 영향을 최소화시킬 수 있다.

#### 4. 결론

$\text{A}^2/\text{O}$ 공정과 M-Phostrip공정간의 질소제거 효율 및 인제거 특성을 비교실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 탈질조의 F/M비가 높을 경우에는 총질소 제거효율은 서로 유사하였으나, F/M비가 낮을수록  $\text{A}^2/\text{O}$ 공정보다 M-Phostrip공정에서 총질소 제거효율이 우수함을 알 수 있었다. 이는 유입수의 유기물 농도가 높을 때는 인 방출

및 탈질화에 소요되는 유기물이 부족하지 않으므로 질소 제거효율에서 M-Phostrip공정과 큰 차이가 없었으나, 유입수의 유기물 농도가 낮을 경우에는 M-Phostrip공정에서는 유입유기물 전량이 탈질에 소모되었기 때문이었으며,  $\text{A}^2/\text{O}$ 공정에서는 혐기성 과정에서의 인 방출에 유입 유기물의 일부가 소모되고 잔류 유기물이 탈질에 이용되었기 때문인 것으로 사료되었다.

2) 인의 제거에 있어서 M-Phostrip공정의 경우 유입수질에 관계없이 인의 방출 및 흡수가 원활히 진행되었으나,  $\text{A}^2/\text{O}$ 공정에서 인의 흡수 및 방출이 원활히 일어나기 위해서 유입수의 COD/T-P비는 56 이상 그리고 COD/TKN비는 10 이상 되어야 함을 알 수 있었다. 이는 M-Phostrip공정의 경우 혐기조인 탈인조의 구조적인 장점 때문에 질산성 질소의 영향을  $\text{A}^2/\text{O}$ 공정보다 적게 받기 때문인 것으로 사료되었다.

#### 참고문헌

전항배, 이운택, 신항식., 유기물질이 인제거 특성에 미치는 영향, *상하수도학회지*, **8**(2), pp. 25-34 (1994).

Eikelboom, I. D., *Biosorption & Prevention of Bulking Sludge by Means of a High Floc Loading*, Eater Research Centre, pp. 163-173 (1980).

Kim, K. S., Joe, K. M., and Choi, H. C., Pilot Study on Nitrogen and Phosphorus Removal by a Modified Phostrip Process, *Water Sci. and Tech.*, **42**(3-4), pp. 199-206 (2000).

Kuba, T., Vanloosdrecht, M. C. M., and Heijnen, J. J., Occurrence of Denitrifying Phosphorus Removing Bacteria in Modified UCT-Type Wastewater Treatment Plants, *Wat. Res.*, **31**(4), pp. 777-786 (1997).

Levin, G. V. et al., *Phosphate Stripping of Sewage*, USA patent 4,141,822 (1979).

Marais, G. v. R., Loewenthal, R. E., and Siebritz, I. P., Observations Supporting Phosphate Removal by Biological Excess Uptake-A Review, *Wat. Sci. Tech.*, **15**, pp. 15-41 (1983).

Ostgaard, K., Chrisrensson, M., Jonsson, K., and Welander, T., Anoxic Biological Phosphorus Removal in a Full-Scale UCT Process, *Wat. Res.*, **11**(4), pp. 2719-2726 (1997).

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).