

## 수리학적 체류시간에 따른 부유성장 미생물을 이용한 공정과 하이브리드 공정의 유기물, 질소 및 인 제거 특성 비교

류홍덕<sup>†</sup> · 이상일

충북대학교 공과대학 환경공학과

(2005년 7월 11일 접수, 2005년 12월 29일 채택)

### Comparison of Removal Characteristics of Organic Matter, Nitrogen and Phosphorus in Suspended-Growth and Hybrid Processes with Hydraulic Retention Time

Hong-Duck Ryu<sup>†</sup> · Sang-Il Lee

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

**ABSTRACT** : This study was initiated to evaluate the effect of HRT (hydraulic retention time) on removal efficiencies of organic matter (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in municipal wastewater for suspended-growth processes (MLE; Modified Ludzack-Ettinger) and hybrid process (Modified-Dephanox). M-Dephanox process was designed to improve the performance of Dephanox process on denitrification efficiency. As the results, removal efficiencies of C, N and P in M-Dephanox process, which is hybrid process, were higher than those in MLE, which is suspended-growth process. Especially, nitrification inhibition of MLE was observed more severely than M-Dephanox as hydraulic retention time was reduced from 6 hr to 3.5 hr. Nitrification in nitrification reactors on M-Dephanox, at short HRT, was so excellent that ammonia nitrogen removal efficiency in nitrification reactors of M-Dephanox was about 92% at 1.59 hr of HRT of nitrification reactors, however, nitrification in nitrification reactors on M-Dephanox was affected severely by organic matter entering to nitrification reactors from down-stream settler. It was observed that reducing of HRT in whole process resulted from reducing of HRT in nitrification reactors on M-Dephanox.

**Key Words** : Municipal Wastewater, Suspended-growth, Hybrid, MLE, M-Dephanox, HRT, Nitrification, Denitrification

**요약** : 본 연구는 도시하수 처리시 부유성장 미생물만을 이용하는 MLE(Modified Ludzack-Ettinger) 공정과 부유 및 부착 미생물을 동시에 활용하는 하이브리드(hybrid)형 공정인 M-Dephanox(Modified-Dephanox) 공정의 유기물, 질소 및 인 제거효율을 수리학적 체류시간에 따라 상호 비교 검토하고자 하였다. M-Dephanox 공정은 기존 Dephanox 공정의 단점을 극복하기 위하여 고안된 공정으로서 기존 Dephanox 공정에 비해 탈질 효율을 증가시킬 수 있도록 고안되었다. 수리학적 체류시간에 따른 유기물, 질소 및 인 제거효율을 관찰한 결과 하이브리드 공정인 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 높은 제거효율이 관찰되었으며, 특히 질산화의 경우 수리학적 체류시간이 6, 5, 4, 3.5 hr으로 짧아짐에 따라 MLE 공정이 M-Dephanox 공정에 비해 질산화 영향을 더 심하게 받는 것으로 나타났다. M-Dephanox 공정의 질화반응조에서의 암모니아성 질소 제거 효율은 질산화 반응조의 HRT 1.59 hr에서 약 92%를 나타내 매우 짧은 수리학적 체류시간에서도 질산화 반응이 원활하게 일어나는 것을 관찰 할 수 있었으며, 질산화 반응조로 유입되는 유기물의 영향을 심하게 받는 것으로 관찰되었다. 질산화 반응조에서의 HRT 단축은 전체 공정의 HRT도 줄이는 결과를 가져옴을 관찰 할 수 있었다.

**주제어** : 도시하수, 부유성장, 하이브리드, MLE, M-Dephanox, 수리학적 체류시간, 질산화, 탈질

## 1. 서론

앞으로 강화되리라 예상되는 수질기준을 만족하기 위해서는 전체 공정의 약 78%를 차지하고 있는 유기물 처리만을 목적으로 설계된 공정을 영양염류 처리 공정으로 전환하는 것이 시급한 과제이다. 이러한 당면과제를 해결하기 위해 기존 하수처리장을 영양염류 처리장으로 전환하는 사업이 활발하게 진행이 되고 있지만 영양염류 처리방법으로 도입되고 있는 공법의 50% 이상이 외국에서 도입된 Anoxic/Oxic 계열(MLE-

type) 공정의 것으로 보고되고 있다.<sup>1)</sup> 하지만 A/O 계열 공법은 우리나라 하수와 같이 낮은 C/N 비를 가진 하수나 부지면적이 적어 부득이 하게 수리학적 체류시간(HRT)을 짧게 요구하는 우리나라 실정에는 적합하지 않을 것으로 판단되며 우리나라 실정에서는 짧은 수리학적 체류시간(HRT)이나 유입 부하가 심할 경우에도 처리가 원활하게 이루어지는 공정이 바람직하다. 위와 같은 생물학적 처리공정으로는 부유성장(suspended growth) 미생물만을 이용하는 단일 슬러지 공정(single-sludge system; e.g., MLE process) 보다는 부유성장 미생물과 부착성장(attached growth) 미생물을 동시에 이용하는 다단 슬러지 공정(multi-sludge system) 혹은 하이브리드(hybrid)형 공정이 바람직하리라 사료된다. 부착성장 미생물

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: nanumenv@hanmail.net

Tel: 043-261-3667

Fax: 043-272-2469

을 이용할 경우 부유성장 미생물을 이용하는 것에 비해 충격 부하에 강하며 수리학적 체류시간이 짧은 경우에도 안정적인 처리가 가능하다는 장점이 있다.<sup>2~8)</sup>

Dephanox 공정은 대표적인 다단 슬러지 공정이자 하이브리드 공정으로서 유기물 흡착 기작을 이용하기 때문에 낮은 C/N 비를 가진 하수에 적합하며 질산화에 소모되는 수리학적 체류시간을 줄일 수 있다. 하지만 Dephanox 공정은 1차 고액분리조에서 탈질조로 유입되는 유기질소 및 암모니아성 질소가 재포기조에서 암모니아성 질소로 분해되거나 질산화되어 이들이 처리되지 못하고 그냥 방류되는 근본적인 문제를 지니고 있다.<sup>9,10)</sup>

본 연구에서는 이러한 Dephanox 공정의 문제점을 개선한 Modified-Dephanox 공정과 현재 우리나라의 영양염류 처리 공정으로서 하수처리장의 대부분을 차지하고 있고 하수처리장 upgrade 시 A/O 계열로서 널리 사용되는 MLE (Modified-Ludzack Ettinger) 공정을 상호 비교 하고자 하였으며 이에 따라 수리학적 체류시간이 각 공정에 미치는 영향뿐만 아니라 유입 부하율이 각 공정 효율에 미치는 영향도 동시에 검토하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 도시하수의 성상

본 연구에 사용된 시료는 C시 환경사업소로 유입되는 도시하수를 사용하였다. 도시하수의 평균 성상은 Table 1에 도시하였다.

Table 1. Average influent characteristics

Parameter	Concentration(mg/L)
TCOD <sub>Cr</sub> (mg/L)	342.0 ± 116.8*
SCOD <sub>Cr</sub> (mg/L)	117.7 ± 29.3
TKN (mg/L)	45.1 ± 6.1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/L)	32.7 ± 3.7
T-P (mg/L)	6.9 ± 1.9
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P (mg/L)	2.4 ± 0.7
TCOD <sub>Cr</sub> /TKN	7.6

\* Standard Deviation

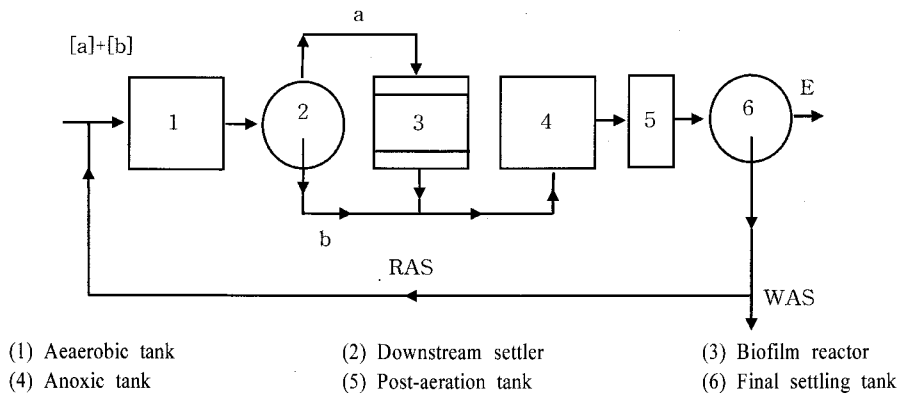


Fig. 1. The configuration of activated sludge system according to Wannner et al. (1992).<sup>11)</sup>

### 2.2. MLE 공정 및 M-DEPHANOX 공정 운영

본 연구에서는 하수처리장 upgrade시 A/O 계열로서 널리 사용되는 MLE(Modified Ludzack-Ettinger) 공정과, 부유성장 미생물과 부착성장 미생물(attached-growth bacteria)을 동시에 이용하는 M-Dephanox(Modified-Dephanox) 공정을 상호 비교하였다. M-Dephanox 공정은 하이브리드(hybrid) 공정 혹은 two-sludge 공정으로 불리는 기존 Dephanox 공정의 단점을 보완한 공정이다.<sup>9,10)</sup> 즉, 기존 Dephanox 공정(Fig. 1)의 재포기 반응조(5 on Fig. 1)를 간헐포기조와 재포기조로 분할함으로써 질소 처리효율을 향상시키고자 하였다. 실험에 사용된 MLE 공정 및 M-Dephanox 공정의 개략도는 Fig. 2와 같으며, 수리학적 체류시간 (HRT) 영향을 관찰하기 위한 각 공정의 운영 조건은 각각 Table 2와 같다. 온도는 HRT 6 hr의 일정한 조건에서 온도를 25℃에서 16℃로, HRT의 영향은 겨울철 실내온도(16, 17, 18℃) 조건에서 HRT를 6, 5, 4, 3.5 hr으로 변화시키면서 두 공정의 유기물, 질소 및 인 제거특성을 비교 관찰하였다. 공정 운영기간동안 각 공정의 미생물 체류시간(Sludge Retention Time; SRT)은 12day(일)로 일정하게 유지하였다. 최종침전지에서의 슬러지 반송율은 두 공정 모두 유입 유량과 같은 비율인 1Q로 운영하였다. MLE 공정의 경우 호기조에서 무산소조로의 내부순환비는 4Q로 운영하였으며, M-Dephanox 공정의 경우 1차 고액분리조에서 무산소조로의 슬러지 유량은 1Q로 운영하였다. MLE 공정의 각 반응조에는 C 하수종말처리장의 활성슬러지를 식종하여 부유성장 상태로 운영하였으며, M-Dephanox 공정의 경우 5-1, 5-2 반응조를 제외한 3, 2, 6, 7 반응조에 C시 하수종말처리장의 활성슬러지를 식종하고 5-1, 5-2 반응조에는 유동상 미디어를 충전하여 하이브리드(hybrid) 형 혹은 two-sludge 시스템 방식으로 운영하였다. 유동상 미디어는 cubic type의 Linpor (size : 12×12×15 mm)를 사용하였으며 각 반응조의 Linpor 미디어 충전율은 약 18%로 하였다. 충전율을 18%로 한 이유는 P 사의 “페타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술”에서 담체 충전율을 10~20%로 한 것을 근거로 하였다.<sup>12)</sup> M-Dephanox 공정의 간헐포기조의 호기/비포기 시간은 1 hr/1 hr으로 운영하였으며 세 공정 모두 실험기간동안 유입수를 연속적으로 유입시켰다.

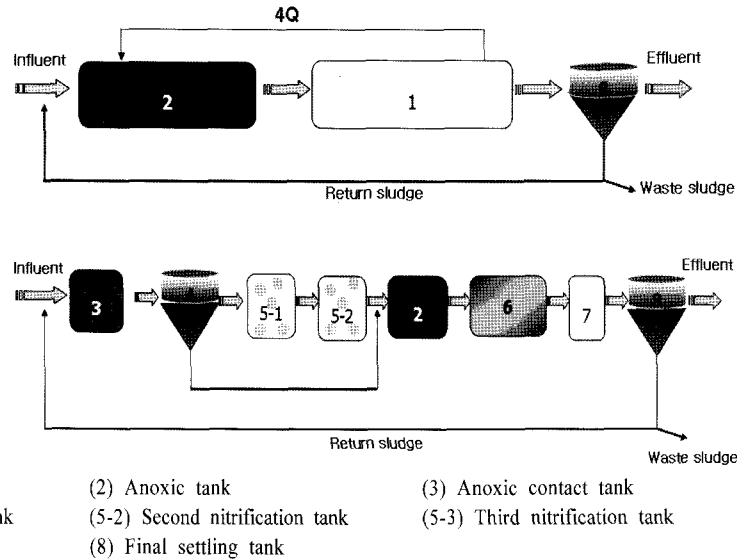


Fig. 2. MLE (top) and M-Dephanox (bottom) processes used in this study.

Table 2. Operational parameters of MLE and M-Dephanox processes to observe the effect of HRT in lab-scale study

Processes	MLE			M-Dephanox		
	Unit	Value	Volume ratio (%)	Unit	Value	Volume ratio (%)
Volume of anoxic tank	L	10	50	-		
Volume of aerobic tank	L	10	50	None		
Volume of anoxic contact tank	None			L	2.64	5.91
Volume of first nitrification tank	None			L	7.10	15.88
Volume of second nitrification tank	None			L	7.10	15.88
Volume of anoxic tank	-			L	10.13	22.66
Volume of intermittent aeration tank	None			L	10.13	22.05
Volume of post-aeration tank	None			L	7.60	17.00
Return sludge flow rate	Q	1		Q	1	
Internal recirculation rate	Q	4		None		
Activated bypass flow rate	None			Q	1	
HRT	Hour	6, 5, 4, 3.5		Hour	6, 5, 4, 3.5	
SRT	Day	12		Day	12	
Temperature	℃	16 ~ 18		℃	16 ~ 18	

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 유기물 제거 특성

수리학적 체류시간(HRT)을 6, 5, 4, 3.5 hr으로 변화시킴에 따른 MLE 및 M-Dephanox 공정의 유기물 제거효율은 M-Dephanox 공정이 MLE 공정의 유기물 제거효율보다 높게 나타났다(Fig. 3). 수리학적 체류시간이 6, 5, 4, 3.5 hr에서 MLE 공정의 TCOD 제거효율은 86.7, 89.3, 77.4, 87.3%의

제거효율을 보인 반면 M-Dephanox 공정은 92.0, 92.6, 88.3, 87.4%로 관찰되었으며 SCOD 제거효율의 경우 MLE 공정은 77.2, 74.5, 69.8, 76.3%, M-Dephanox 공정은 81.6, 83.9, 78.5, 81.6%로 나타나 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 TCOD 제거효율은 3~5%, SCOD 제거효율은 4~9% 더 높게 관찰되었다. MLE 및 M-Dephanox 공정 모두 HRT가 짧아지면서 나타날 수 있는 유기물 제거효율 감소는 두드러지지 않아 온도 영향 실험에서의 마찬가지로 수리학적 체류시간이 짧아져도 유기물 처리효율은 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

#### 3.2. 암모니아성 질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 및 TKN 제거 특성

수리학적 체류시간이 MLE 및 M-Dephanox 공정의 암모니아성 질소 및 TKN 제거효율에 미치는 영향은 M-Dephanox 공정에 비해 MLE 공정이 더 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 우선 암모니아성 질소 제거효율을 살펴보면 수리학적 체류시간이 HRT 6, 5, 4, 3.5 hr으로 짧아지면서 MLE 공정은 72.8, 38.2, 11.7, 17.4%로 감소하여 HRT 6 hr에서 HRT 5 hr으로 짧아지면서 약 34.6%의 암모니아성 질소 제거효율이 감소한 반면 M-Dephanox 공정은 93.0, 84.0, 55.8, 32.0%로 감소하여 HRT 6 hr에서 HRT 5 hr으로 짧아지면서 약 9%의 암모니아성 질소 제거효율이 감소하여 부유성장 미생물만 동시에 이용하는 M-Dephanox 공정에 비해 HRT의 영향을 훨씬 많이 받는 것으로 나타났다. TKN 제거효율 역시 MLE 공정에 비해 M-Dephanox 공정이 HRT의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다. HRT 6 hr에서 HRT 5 hr으로 짧아지면서 MLE 공정의 암모니아성 제거효율은 59.7%에서 47.5%로 감소하여 12.2%가 감소한 반면 M-Dephanox 공정은 85.7%에서 79.5%로 감소하여 6.2%가 감소하였다. HRT 4, 3.5 hr에서 MLE 공정의 암모니아성 질소 제거효율은 각각 24.0, 28.1%로 관찰되었으며 M-Dephanox 공정은 57.8, 37.6%로 관찰되어 짧은 HRT에서도 암모니아성 질소 제거효

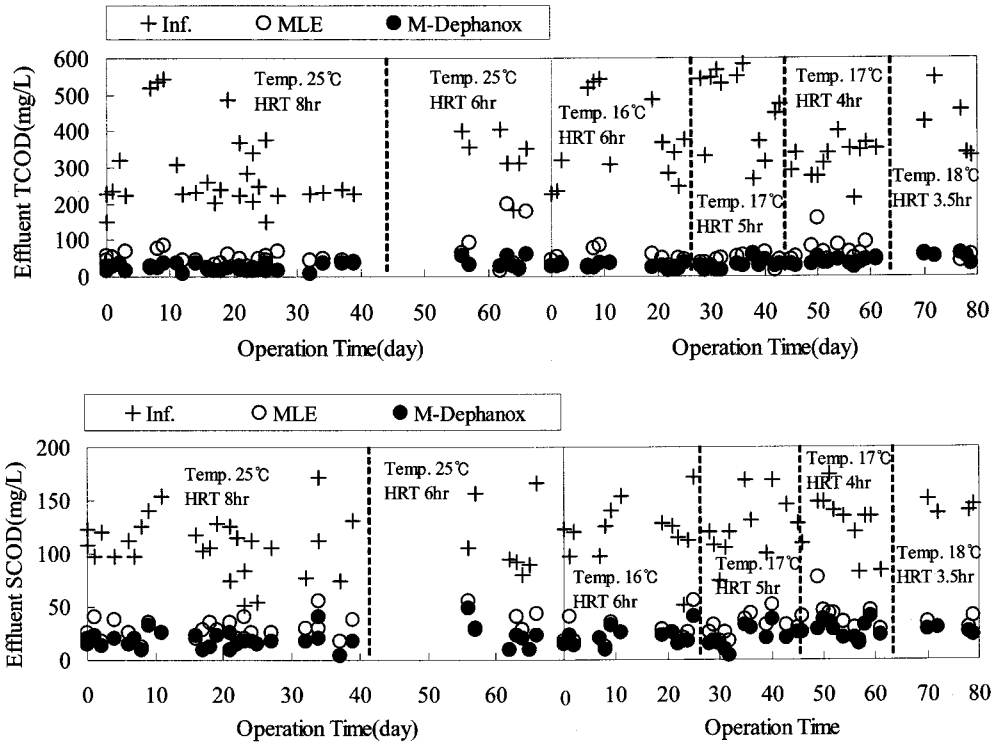


Fig. 3. TCOD and SCOD removal Characteristics between suspended-growth process (MLE) and hybrid process (M-Dephanox).

을 특성에서 보여준것과 마찬가지로 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 높은 효율을 보이고 있음을 관찰할 수 있었다 (Fig. 4).

소표본에서 모평균을 검정하는 통계학적 방법인 *t*-검정을

통하여 상기 실험결과를 검정한 결과  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  및 TKN 제거 효율을 모두 HRT 6, 5, 4, 3.5 hr에서 95% 신뢰범위에서 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 효율이 좋았음이 확인 되었다(Table 3).

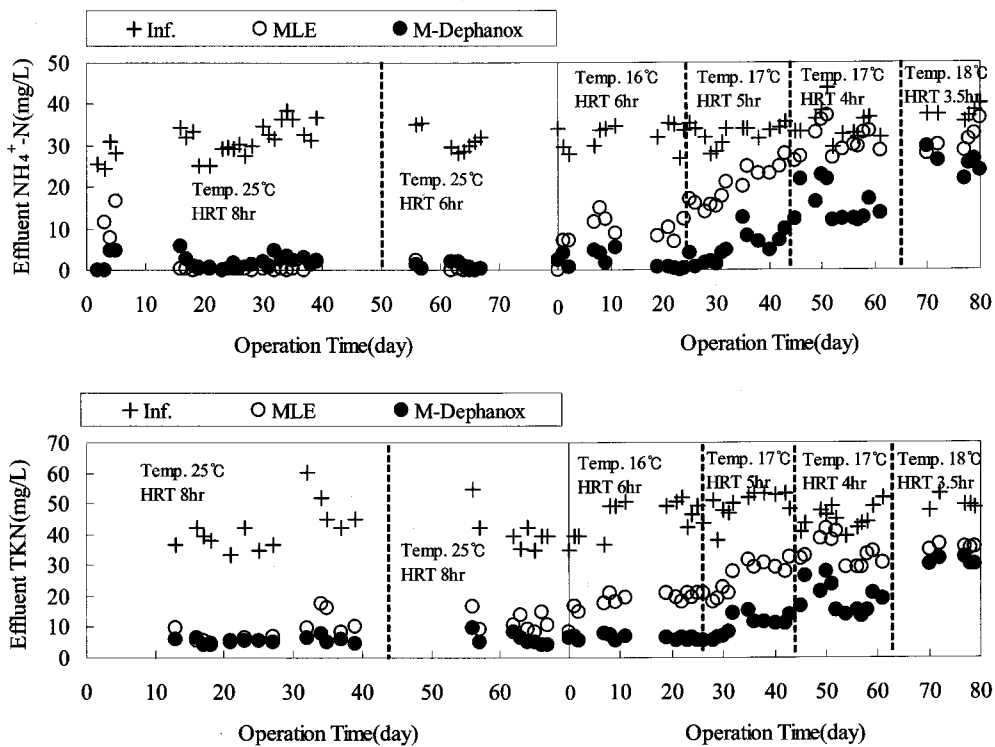


Fig. 4. TCOD and SCOD removal Characteristics between suspended-growth process (MLE) and hybrid process (M-Dephanox).

**Table 3.** T-test results about numerical difference of average NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TKN removal efficiencies of MLE and M-Dephanox processes according to HRT

Parameters	T-test(one-sided test)							
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N removal efficiency				TKN removal efficiency			
	HRT 6 hr	HRT 5 hr	HRT 4 hr	HRT 3.5 hr	HRT 6 hr	HRT 5 hr	HRT 4 hr	HRT 3.5 hr
Null Hypothesis(H <sub>0</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )
Alternative Hypothesis(H <sub>1</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )
Significance Level(α)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
t <sub>α(n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-2)</sub>	1.711	1.717	1.717	1.812	1.711	1.717	1.717	1.860
*S <sub>p</sub> <sup>2</sup>	125.23	113.75	56.62	42.41	24.58	52.42	88.00	4.07
**Test Statistic(t)	4.59	10.51	14.34	3.90	13.35	10.85	8.81	7.43
Critical Region (t ≥ t <sub>α(n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-2)</sub> )	4.59 > 1.711	10.51 > 1.717	14.34 > 1.717	3.90 > 1.812	13.35 > 1.711	10.85 > 1.717	8.81 > 1.717	7.43 > 1.860
Results	In 95% confidence				In 95% confidence			
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N removal efficiency in M-Dephanox process were higher than that in MLE process				TKN removal efficiency in M-Dephanox process were higher than that in MLE process			

$$* S_p^2 = [(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2]/(n_1+n_2-2)$$

$$** t = (X_1 - X_2) / [S_p^2(1/n_1 + 1/n_2)]^{1/2}$$

where,

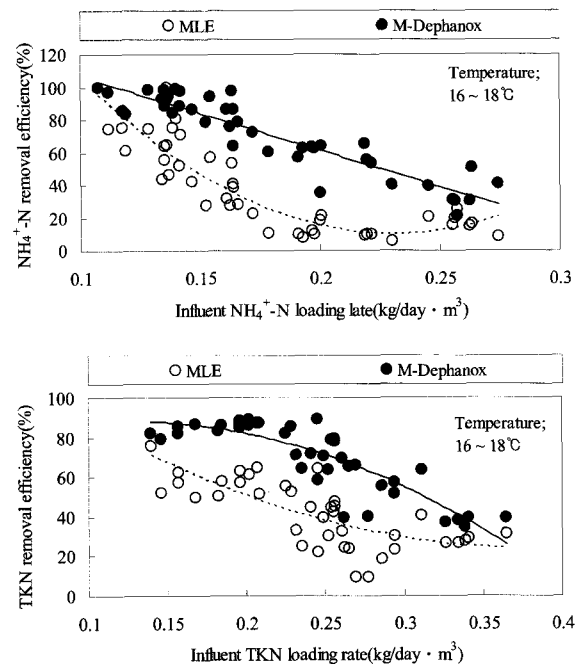
- μ<sub>1</sub> : Sample values of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N or TKN removal efficiency in M-Dephanox process
- μ<sub>2</sub> : Sample values of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N or TKN removal efficiency in MLE process
- n<sub>1</sub> : Numbers of sample of M-Dephanox process
- n<sub>2</sub> : Numbers of sample of MLE process
- S<sub>1</sub> : Standard deviation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N or TKN removal efficiency in M-Dephanox process
- S<sub>2</sub> : Standard deviation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N or TKN removal efficiency in MLE process
- X<sub>1</sub> : Average value of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N or TKN removal efficiency in M-Dephanox process
- X<sub>2</sub> : Average value of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N or TKN removal efficiency in MLE process

### 3.3. 질소 부하가 질산화에 미치는 영향

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 부하가 MLE 및 M-Dephanox 공정의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 질소 제거 효율에 미치는 영향은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 부하가 0.1~0.2 kg/day · m<sup>3</sup> 영역에서 M-Dephanox 공정에 비해 MLE 공정의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 질소 제거 효율이 급격히 감소하는 것으로 나타나 M-Dephanox 공정의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 질소 제거 효율이 MLE 공정에 비해 질소 부하에 더 안정적인 것으로 관찰되었다(Fig. 5, top). 또한 TKN 제거효율 역시 TKN 부하 변동시 MLE 공정이 M-Dephanox 공정에 비해 TKN 부하에 영향을 더 받는 것으로 관찰되어(Fig. 5, bottom) 부유 및 부착성장 미생물을 동시에 활용하는 하이브리드 공정이 부유성장 미생물만을 이용하는 공정에 비해 질소 부하변동에 강하다는 기존 연구 결과를 뒷받침해 주고 있음을 알 수 있었다.<sup>13,14)</sup>

### 3.4. T-N 제거 특성

수리학적 체류시간이 감소함에 따라 암모니아성 질소 제거 효율은 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 높지만 방류수 중의 질산염 농도가 MLE 공정이 M-Dephanox 공정에 비해 낮기 때문에 수리학적 체류시간이 짧아짐에 따른 T-N 제거효율의 감소는 MLE 및 M-Dephanox 공정 모두 두드러지게 나타나는 않았다(Fig. 6, top). 하지만 HRT가 5 hr에서 4 hr으로 감소함에 따라 MLE 공정의 T-N 제거효율은 22%



**Fig. 5.** NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TKN removal efficiency according to influent NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TKN loading rates.

감소한 반면 M-Dephanox 공정의 T-N 제거효율은 15%가 감

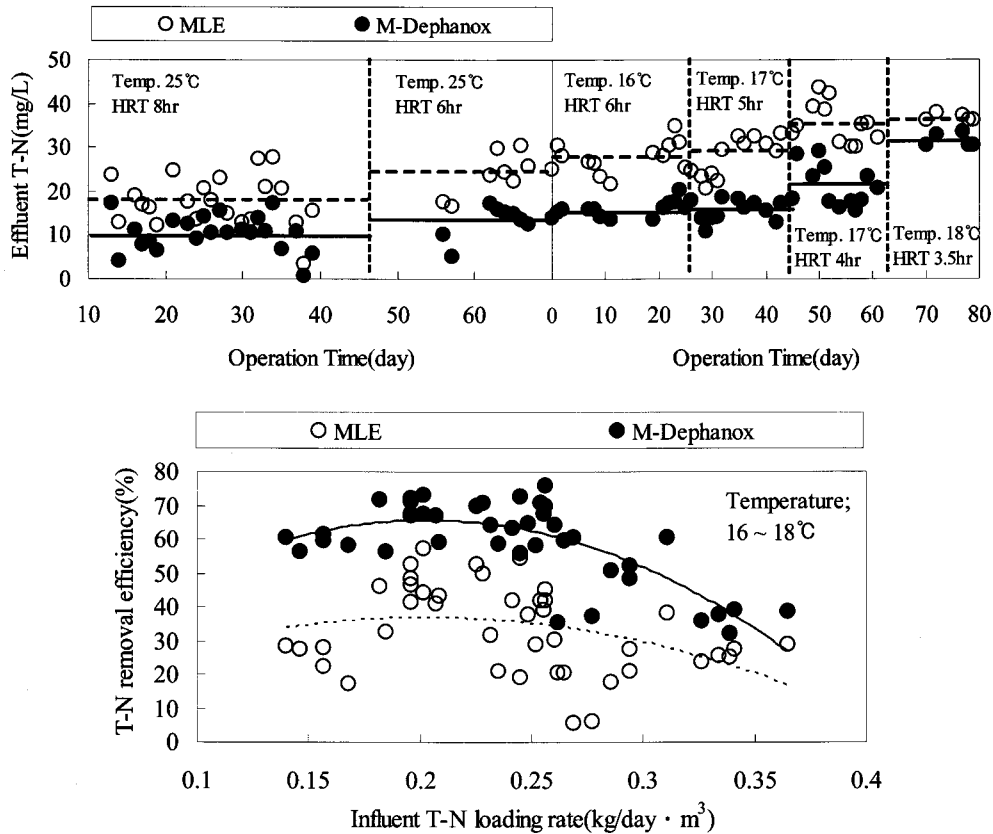


Fig. 6. Characteristics of T-N removal between suspended-growth process(MLE) and hybrid process(M-Dephanox) according to HRT.

소하여 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 HRT 변화에 더 강한 것으로 나타났다. HRT 변화에 따른 T-N 제거효율은 HRT가 6, 5, 4, 3.5 hr에서 MLE 공정은 37.4, 43.8, 21.3, 26.2%, M-Dephanox 공정은 64.4, 68.3, 53.5, 36.7%로 나타나 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 T-N 제거효율이 약 10~32%의 더 높은 T-N 제거효율이 관찰되었다.

유입 T-N 부하율이 T-N 제거효율에 미치는 영향이 Fig. 6 (bottom)에 도시되었다. 유입 T-N 부하율이 증가함에 따라 MLE 및 M-Dephanox 공정 모두 T-N 제거효율이 감소하는 경향을 관찰 할 수 있었으며, 유입 T-N 부하율이 0.2~0.25 kg/day · m<sup>3</sup> 이상에서 T-N 제거효율이 감소하는 경향을 관찰 할 수 있었다. 하이브리드 공정인 M-Dephanox 공정이 부유성장 미생물만을 이용하는 MLE 공정에 비해 T-N 부하에 따라 더 높은 T-N 제거 효율을 보이고 있으며 Jun *et al.*(2003)의 연구에서도 하이브리드 공정이 일반적인 유동상 다공성 매체(fluidized porous carrier)를 이용하는 공정보다 질소제거 효율이 30% 더 높음을 관찰 할 수 있었다.<sup>15)</sup> 본 연구에서도 M-Dephanox 공정이 MLE 공정보다 약 30% 정도 더 높은 T-N 제거 효율을 보이고 있음을 관찰 할 수 있었다.

소표본에서 모평균을 검정하는 통계학적 방법인 t-검정을 통하여 상기 실험결과를 검정한 결과 HRT 6, 5, 4, 3.5 hr에서 95% 신뢰범위에서 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 효율이 좋았음이 확인 되었다(Table 4).

Table 4. T-test results about numerical difference of average T-N removal efficiency of MLE and M-Dephanox processes according to HRT

Parameters	T-test(one-sided test)			
	T-N removal efficiency			
	HRT 6 hr	HRT 5 hr	HRT 4 hr	HRT 3.5 hr
Null Hypothesis(H <sub>0</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )
Alternative Hypothesis(H <sub>1</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )
Significance Level(α)	0.05	0.05	0.05	0.05
t <sub>α(n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-2)</sub>	1.711	1.717	1.717	1.860
*S <sub>p</sub> <sup>2</sup>	93.80	31.51	86.29	5.71
**Test Statistic(t)	7.09	10.70	8.48	6.92
Critical Region (t ≥ t <sub>α(n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-2)</sub> )	7.09 > 1.711	10.70 > 1.717	8.48 > 1.717	5.71 > 1.860
Results	In 95% confidence	In 95% confidence	In 95% confidence	In 95% confidence
	T-N removal efficiency in M-Dephanox process were higher than that in MLE process			

$$* S_p^2 = [(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2]/(n_1+n_2-2)$$

$$** t = (X_1 - X_2) / [S_p^2(1/n_1 + 1/n_2)]^{1/2}$$

where,

- $\mu_1$  : Sample values of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  or TKN removal efficiency in M-Dephanox process
- $\mu_2$  : Sample values of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  or TKN removal efficiency in MLE process
- $n_1$  : Numbers of sample of M-Dephanox process
- $n_2$  : Numbers of sample of MLE process
- $S_1$  : Standard deviation of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  or TKN removal efficiency in M-Dephanox process
- $S_2$  : Standard deviation of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  or TKN removal efficiency in MLE process
- $X_1$  : Average value of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  or TKN removal efficiency in M-Dephanox process
- $X_2$  : Average value of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  or TKN removal efficiency in MLE process

### 3.5. 인 제거 특성

HRT 6, 5, 4, 3.5 hr에서  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거효율은 MLE 공정이 13.7, 6.2, 57.4, 31.7%, M-Dephanox 공정은 59.3, 47.5, 95.8, 91.7%로 나타나 M-Dephanox 공정의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거효율이 MLE 공정에 비해 약 38~60% 더 높은 것으로 관찰되었다. T-P 제거효율의 경우 HRT 6, 5, 4, 3.5 hr에서 MLE 공정은 38.3, 46.1, 67.9, 57.1%, M-Dephanox 공정은 68.3, 75.1, 85.7, 89.8%의 제거효율을 보이고 있어 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 약 18~33% 더 높은 제거효율이 관찰되었다(Fig. 7). 여기서 주목할 만한 사실은 HRT가 5 hr에서 4 hr으로 짧아지면서  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  및 T-P 제거효율이 급격히 증가했다는 사실이다. HRT가 짧아지면서 인 제거 효율이 급격히 증가한 주요한 원인은 HRT가 짧아지면서 질산화 효율이 저하되고(Fig. 4) 이에 따라 재포기조(7 on Fig. 2)에서

$\text{NO}_3^-\text{-N}$  농도가 감소하여 중침(8 on Fig. 2)에서 무산소 접촉조(3 on Fig. 2)로 반송되는  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  양이 줄어들었기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 8은 MLE 및 M-Dephanox 공정의 방류수 중의  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  농도가 인 제거효율에 미치는 영향을 나타낸 그림으로서 방류수 중의  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  농도가 증가 할수록 인 제거효율이 감소하는 경향을 관찰 할 수 있다. 특히 방류수 중의 질산염 농도가 인 제거에 미치는 영향은 M-Dephanox 공정보다 MLE 공정이 더 민감한 것으로 나타났다. MLE 공정의 경우 방류수 중의 질산염 농도가 약 1 mg/L 이상만 되어도  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거효율이 60% 이하로 급격히 저하되는 반면 M-Dephanox 공정의 경우에는 약 8 mg/L 이상이 되어야  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거효율이 60% 이하로 저하되는 것을 관찰할 수 있다. M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 인 제거효율이 높은 원인은 방류수 중의  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  영향에 덜 민감하고 탈질조(2 on Fig. 2)에서 질산염을 전자 수용체로 하여 인을 섭취하는 인 박테리아가 우점종으로 성장하고 있기 때문인 것으로 사료된다.<sup>16~19)</sup>

유입  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  및 T-P 부하율에 따른  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  및 T-P 제거효율은 Fig. 9와 같다. 유입  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  및 T-P 부하율이 증가함에 따라 MLE 및 M-Dephanox 공정의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  및 T-P 제거효율은 증가하는 것이 관찰되었다.  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  및 T-P 부하율이 증가함에 따라  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  및 T-P 제거효율이 증가하는 이유는 높은 부하율에서는 수리학적 체류시간이 짧고 이에 따라 질산화 반응이 저해되어(Fig. 4) 방류수 중의  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  농도가 감소하였기 때문이다(Fig. 8).

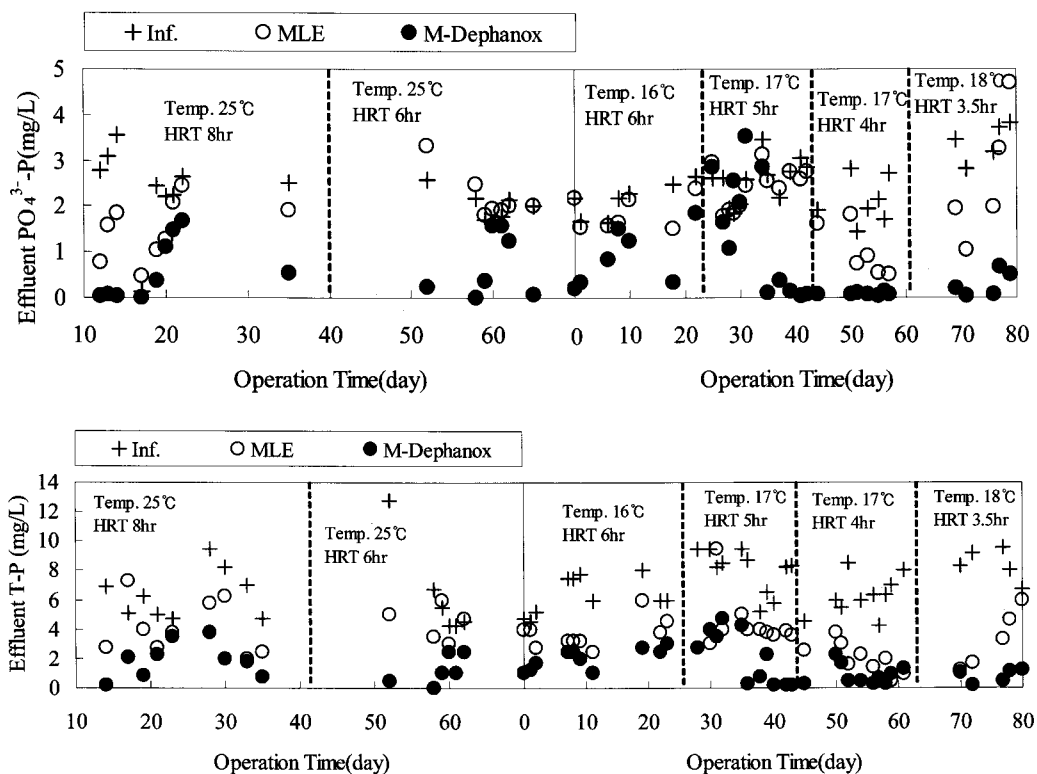


Fig. 7.  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  and T-P removal Characteristics between suspended-growth process (MLE) and hybrid process (M-Dephanox).

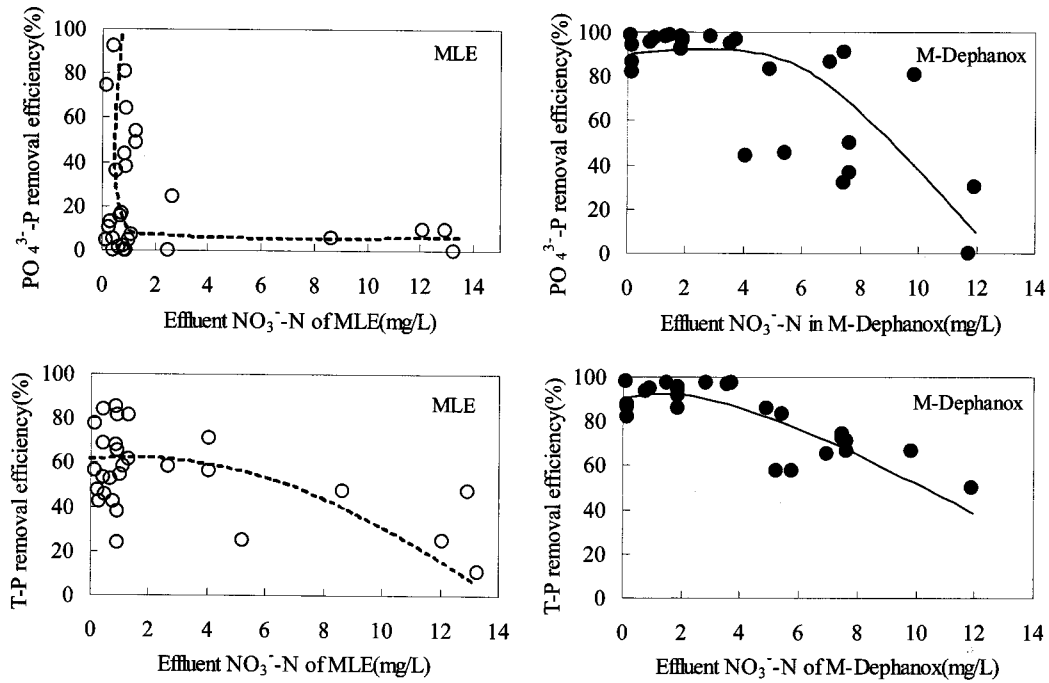


Fig. 8. Effect of effluent  $\text{NO}_3^-$ -N on removal of  $\text{PO}_4^{3-}$ -P and T-P.

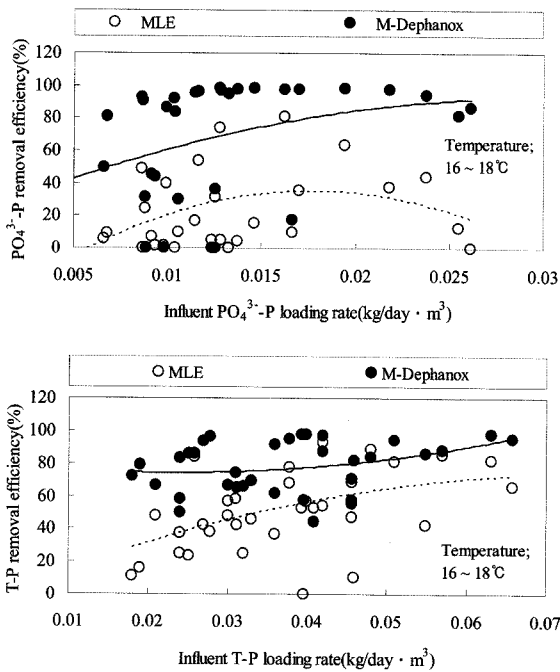


Fig. 9.  $\text{PO}_4^{3-}$ -P and T-P removal efficiency according to influent  $\text{PO}_4^{3-}$ -P and T-P loading rates.

소표본에서 모평균을 검정하는 통계학적 방법인 *t*-검정을 통하여 MLE 및 M-Dephanox 공정의  $\text{PO}_4^{3-}$ -P와 T-P 제거 효율을 비교한 결과 HRT 6, 5, 4, 3.5 hr에서 95% 신뢰범위에서 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해  $\text{PO}_4^{3-}$ -P와 T-P 제거 효율이 좋았음이 확인 되었다(Table 5).

Table 6은 MLE 및 M-Dephanox 공정의 수리학적 체류시간에 따른 유기물, 질소 및 인 제거효율을 표로 알기 쉽게

나타낸 것이다.

### 3.6. M-Dephanox 공정의 부차성 질화균에 의한 질산화 특성 및 유입 유기물이 질산화 반응에 미치는 영향

반응조 온도가 16~18°C, 전체 공정의 수리학적체류시간이 5, 4, 3.5 hr 조건일 때 질화반응조에서의 수리학적체류시간은 각각 1.91, 1.59, 1.27, 1.11 hr이었다. 질화반응조 1, 2에서의 평균 암모니아성 질소 제거효율은 HRT 5 hr에서 각각 54.2, 92.1%, HRT 4 hr에서 53.6, 83.6%, HRT 3.5 hr에서는 21.6, 43.5%로 관찰되어 HRT 4, 5 hr의 짧은 수리학적 체류시간에서도 높은 암모니아성 질소 제거효율을 관찰 할 수 있었으나 수리학적 체류시간이 짧아짐에 따른 각 질화 반응조에서의 암모니아성 질소 제거 효율은 감소하는 경향을 보였으며, 특히 HRT 4 hr에서 HRT 3.5 hr으로 수리학적 체류시간이 감소함에 따라 암모니아성 질소 제거효율이 급격히 떨어짐을 관찰 할 수 있었다. 질산화 반응조에서의 암모니아성 질소 제거효율 감소는 전체 공정의 암모니아성 질소 제거효율 감소에 영향을 주고 있음을 Fig. 4와의 비교를 통해 알 수 있다. 1차 분리조(4 on Fig. 2)에서 질산화 반응조로 유입되는 암모니아성 질소 부하율이 각 질산화 반응조에서 암모니아성 질소 제거효율에 어떠한 영향을 미치는지는 Fig. 10을 통해 알 수 있다. 그림에 의하면 암모니아성 질소 농도에 바로 노출되는 첫 번째 질산화 반응조(N-reactor 1)가 두 번째 질산화 반응조(N-reactor 2)에 비해 암모니아 부하의 영향에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 두 번째 질산화 반응조에서 암모니아성 질소 제거 효율이 90% 이상이 되기 위해서는 질화 반응조에 유입되는 암모니아성 질소의 부하가 약 0.6  $\text{kg/day} \cdot \text{m}^3$  이하가 되어야 함을 알 수 있다.



**Table 5.** T-test results about numerical difference of average PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P and T-P removal efficiencies of MLE and M-Dephanox processes according to HRT

Parameters	T-test(one-sided test)							
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P removal efficiency				T-P removal efficiency			
	HRT 6 hr	HRT 5 hr	HRT 4 hr	HRT 3.5 hr	HRT 6 hr	HRT 5hr	HRT 4 hr	HRT 3.5 hr
Null Hypothesis(H <sub>0</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )	(H <sub>0</sub> : μ <sub>1</sub> =μ <sub>2</sub> )
Altanative Hypothesis(H <sub>1</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )
Significance Level(α)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
t <sub>α(n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-2)</sub>	1.782	1.717	1.782	1.860	1.734	1.725	1.734	1.860
*S <sub>p</sub> <sup>2</sup>	434.74	1006.88	357.89	349.14	207.90	411.34	275.86	504.06
**Test Statistic(t)	4.10	3.19	3.79	5.08	4.65	3.35	2.41	2.30
Critical Region (t ≥ t <sub>α(n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-2)</sub> )	4.10 > 1.782	3.19 > 1.717	3.79 > 1.782	5.08 > 1.860	4.65 > 1.734	3.35 > 1.725	2.41 > 1.734	2.30 > 1.860
Results	In 95% confidence				In 95% confidence			
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P removal efficiency in M-Dephanox process were higher than that in MLE process				T-P removal efficiency in M-Dephanox process were higher than that in MLE process			

\* S<sub>p</sub><sup>2</sup> = [(n<sub>1</sub>-1)S<sub>1</sub><sup>2</sup> + (n<sub>2</sub>-1)S<sub>2</sub><sup>2</sup>]/(n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-2)

\*\* t = (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>)/[S<sub>p</sub><sup>2</sup>(1/n<sub>1</sub> + 1/n<sub>2</sub>)]<sup>1/2</sup>

where,

μ<sub>1</sub> : Sample values of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P or T-P removal efficiency in M-Dephanox process

μ<sub>2</sub> : Sample values of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P or T-P removal efficiency in MLE process

n<sub>1</sub> : Numbers of sample of M-Dephanox process

n<sub>2</sub> : Numbers of sample of MLE process

S<sub>1</sub> : Standard deviation of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P or T-P removal efficiency in M-Dephanox process

S<sub>2</sub> : Standard deviation of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P or T-P removal efficiency in MLE process

X<sub>1</sub> : Average value of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P or T-P removal efficiency in M-Dephanox process

X<sub>2</sub> : Average value of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P or T-P removal efficiency in MLE process

**Table 6.** Comparison of average removal efficiencies of MLE and M-Dephanox processes

Items	MLE						M-Dephanox					
	HRT 8 hr (25 °C)	HRT 6 hr (25 °C)	HRT 6 hr (16 °C)	HRT 5 hr (17 °C)	HRT 4 hr (17 °C)	HRT 3.5 hr (18 °C)	HRT 8 hr (25 °C)	HRT 6 hr (25 °C)	HRT 6 hr (16 °C)	HRT 5 hr (17 °C)	HRT 4 hr (17 °C)	HRT 3.5 hr (18 °C)
TCOD <sub>Cr</sub>	79.0 (±9.3)	73.0 (±22.6)	86.7 (±4.8)	89.3 (±5.6)	77.4 (±11.9)	87.3 (±3.5)	91.3 (±4.1)	87.4 (±5.1)	92.0 (±3.0)	92.6 (±5.3)	88.3 (±2.4)	87.5 (±2.5)
SCOD <sub>Cr</sub>	69.3 (±9.6)	71.7 (±16.6)	77.2 (±9.7)	74.5 (±6.0)	69.8 (±8.2)	76.3 (±2.9)	82.3 (±6.7)	78.5 (±12.5)	81.6 (±6.9)	83.9 (±6.2)	78.5 (±4.5)	81.6 (±2.7)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	93.4 (±15.3)	98.5 (±2.3)	72.8 (±14.6)	38.2 (±11.0)	11.7 (±4.5)	17.4 (±5.7)	94.0 (±4.9)	96.8 (±2.7)	93.0 (±6.1)	84.0 (±10.3)	55.8 (±9.6)	32.0 (±7.2)
TKN	79.8 (±7.7)	71.4 (±6.8)	59.7 (±6.3)	47.5 (±8.1)	24.0 (±8.9)	28.1 (±2.0)	87.8 (±2.4)	85.5 (±4.1)	85.7 (±3.0)	79.5 (±6.2)	57.8 (±9.8)	37.6 (±2.1)
T-N	50.5 (±12.4)	39.9 (±17.5)	37.5 (±12.3)	43.8 (±6.4)	21.3 (±9.3)	26.2 (±2.0)	73.6 (±9.6)	67.0 (±11.8)	64.4 (±6.0)	68.3 (±4.7)	53.5 (±9.2)	36.6 (±2.8)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	34.4 (±25.6)	0.8 (±2.2)	13.7 (±13.7)	6.3 (±9.3)	57.4 (±26.6)	31.7 (±25.4)	77.8 (±23.9)	60.3 (±41.3)	59.3 (±26.1)	47.5 (±43.9)	95.8 (±2.5)	91.7 (±7.3)
T-P	43.1 (±17.0)	35.8 (±31.7)	38.3 (±18.0)	46.1 (±20.2)	67.9 (±20.4)	57.1 (±31.1)	71.3 (±19.0)	73.3 (±25.2)	68.3 (±9.6)	75.1 (±20.3)	85.7 (±11.6)	89.8 (±6.4)

\* Standard Deviation

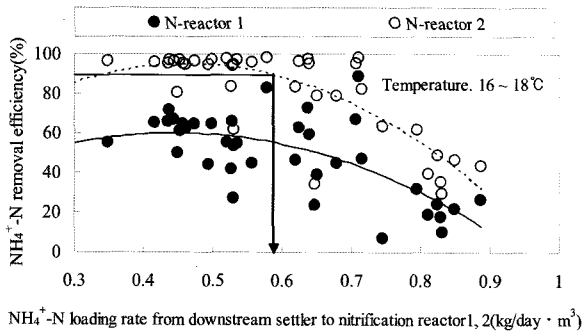
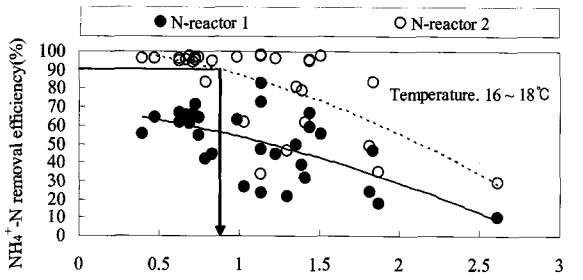
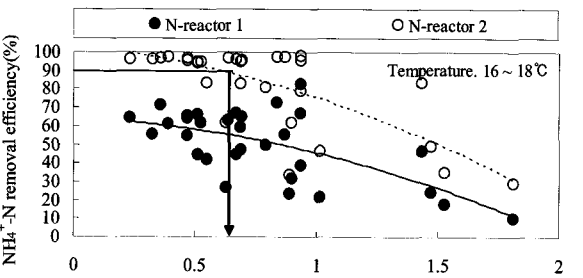


Fig. 10.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  removal efficiency in nitrification reactors according to  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  loading rate.

HRT가 짧아짐에 따라 1차 고액분리조에서 질산화 반응조로 유입되는 유기물 부하율이 증가하게 된다. 온도 16~18°C에서 HRT가 6, 5, 4, 3.5 hr으로 짧아지면서 1차 고액분리조에서 질산화 반응조로 유입되는 유기물 부하율에 따른 암모니아성 질소 제거효율을 Fig. 11에 나타내었다. 1차 고액분리조에서의 TCOD 및 SCOD 유입 부하가 증가함에 따라 질산화 반응조에서의 암모니아성 질소 제거효율이 감소하는 것을 관찰 할 수 있으며 첫 번째 질산화 반응조가 두 번째 질산화 반응조에 비해 질산화 반응조로 유입되는 유기물의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 두 번째 질산화 반응조에서의 암모니아성 질소 제거효율이 90% 이상이 되기 위해서는 1차 고액분리조에서 질산화 반응조로 유입되는 TCOD 부하율이 약 0.9  $\text{kg/day} \cdot \text{m}^3$ , SCOD 부하율은 약 0.7  $\text{kg/day} \cdot \text{m}^3$  이하여야 할 것으로 사료되며 이를 위해서는 무산소 접촉조(3 on Fig. 2)에서 활성슬러지에 의한 유기물 흡착이 적절하게 제어되어야 할 것으로 사료된다.



TCOD loading rate from downstream settler to nitrification reactor 1, 2( $\text{kg/day} \cdot \text{m}^3$ )



SCOD loading rate from downstream settler to nitrification reactor 1, 2( $\text{kg/day} \cdot \text{m}^3$ )

Fig. 11.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  removal efficiency in nitrification tanks according to organic loading rate in downstream settler.

결론적으로 무산소 접촉조에서 유기물이 적절하게 제어된다면 질산화 반응조에서의 질산화 반응은 약 1.54 hr 정도의 짧은 수리학적 체류시간에서도 질산화 반응조에서 90% 이상의 높은 암모니아성 질소 제거가 가능하다. 질산화 반응조에서 짧은 수리학적 체류시간에도 불구하고 완벽한 질산화가 가능한 이유는 접촉조에서 유입 유기물의 대부분이 생흡착에 의해 제거되고 암모니아성 질소가 농축된 유입수만 질산화 반응조에 유입되며, 또한 질산화 반응조에 충전된 미디어는 질산화 박테리아를 농축시켜 부착성장 시키는 환경을 만족시킬 수 있기 때문이다. 질산화 반응조에서의 신속한 질산화는 전체 공정의 수리학적 체류시간(HRT)을 줄이는데 커다란 역할을 하는 것으로 연구 결과 나타났다.

#### 4. 결론

수리학적 체류시간에 따른 하이브리드 공정의 유기물, 질소 및 인 처리 특성에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 온도가 16~18°C인 조건에서 HRT를 6, 5, 4, 3.5 hr으로 줄이면서 유기물, 질소 및 인 제거효율을 관찰한 결과 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 유기물, 질소 및 인 제거효율이 높게 관찰 되었으며, 이때 T-N 제거효율의 경우 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 10~32% 더 높은 T-N 제거효율을 나타내었다. 수리학적 체류시간에 따른 질산화의 영향은 MLE 공정이 M-Dephanox 공정에 비해 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. HRT가 6 hr에서 5 hr으로 짧아지면서 MLE 공정은 약 34.6%의 암모니아성 질소 제거효율이 감소한 반면 M-Dephanox 공정은 단지 9%의 암모니아성 질소 제거효율이 감소함을 관찰 할 수 있었다. HRT 6, 5, 4 hr에서 M-Dephanox 공정의 암모니아성 질소 제거효율은 각각 93.0, 84.0, 55.8%로 나타났다.

2) 온도가 16~18°C인 조건에서 HRT가 짧아지면서 MLE 공정 및 M-Dephanox 공정의 인 제거효율이 증가하는 현상을 관찰할 수 있었으며, 이는 HRT가 짧아지면서 질산화가 저해되어 방류수 중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도가 감소하였기 때문인 것으로 나타나 질산염 농도가 인 제거효율에 커다란 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 인 제거시 질산염의 영향은 MLE 공정이 M-Dephanox 공정에 비해 그 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

3) M-Dephanox 공정의 질산화 반응조에서의 평균 암모니아성 제거효율은 반응조 온도가 16~18°C 조건일 때 HRT가 짧아짐에 따라 질산화 반응조에 유입되는 암모니아성 질소 부하가 증가하면서 질산화 효율이 감소하는 현상이 관찰 되었다. 이때 첫 번째 질산화 반응조가 두 번째 질산화 반응조에 비해 그 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 질산화 반응조에서의 질산화 효율은 전체 수리학적 체류시간이 5 hr일 때 92.1%, 4 hr일 때 83.6%를 나타내어 짧은 수리학적 체류시간에서도 높은 암모니아성 질소 제거효율을 나타내

었다.

4) 질산화 반응조에서의 질산화 효율은 질산화 반응조로 유입되는 암모니아성 질소 부하뿐만이 아니라 1차 고액분리조에서 유입되는 유기물의 양(무산소 흡착조에서의 흡착효율)에 따라 질산화 반응조에서의 암모니아성 제거효율에 있어 차이가 있는 것으로 나타났다. 온도 16~18°C인 조건에서 질산화 반응조에서 90% 이상의 암모니아성 질소제거효율을 얻기 위해서는 TCOD 및 SCOD 부하율이 각각 약 0.9 kg/day · m<sup>3</sup>, 0.6 kg/day · m<sup>3</sup> 이하가 되어야 함을 관찰 할 수 있었다.

## 사 사

이 논문은 환경부 사업인 2004년도 차세대 핵심환경기술 개발사업의 지원을 받아 연구한 논문으로서 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 환경부, 2003년말 기준 가동중인 하수종말처리시설 현황 (2003).
2. Deguchi, H. and Kashiwaya, M., "Study on Nitrified Liquor Recycling Process Operations Using Polyurethane Foam Sponge Cubes as a Biomass Support Medium," *Water Sci. Technol.*, **30**(6), 143~149(1994).
3. Randall, C. and Sen, D., "Full-scale Evaluation of an Integrated Fixed-film Activated Sludge(IFAS) Process for Enhanced Nitrogen Removal," *Water Sci. Technol.*, **33**(12), 155~162(1996).
4. Park, S. J., Oh, J. W., and Yoon, T. I., "The Role of Powdered Zeolite and Activated Carbon Carriers on Nitrification in Activated Sludge with Inhibitory Materials," *Process Biochemistry*, **39**, 211~219(2003).
5. Kazuaki, Y., Yuichi, O., and Akira, O., "Simultaneous Removal of Carbonaceous and Nitrogenous Pollutants by a Plunging Liquid Jet Bioreactor with Crossflow Filtration Operated Under Intermittent Aeration," *Bioresour Technol.*, **53**, 57~62(1995).
6. Zhao, Q. and Wang, B., "Evaluation on a Pilot-Scale Attached-Growth Pond System Treating Domestic Wastewater," *Water Res.*, **30**(1), 242~245(1996).
7. Rakkoed, A., Danteravanich, S., and Puetpaiboon, U., "Nitrogen Removal in Attached Growth Waste Stabilization Ponds of Wastewater From a Rubber Factory," *Water Sci. Technol.*, **40**(1), 45~52(1999).
8. Polprasert, C. and Sookhanich, S., "Upgrading of Facultative Ponds to Treat a Toxic Organic Wastewater," *Water Sci. Technol.*, **31**(2), 201~210(1995).
9. 류홍덕, 민경국, 이상일, "유입부하가 DEPHANOX 및 Modified DEPHANOX 공정에 미치는 영향," *한국환경공학회지*, **20**(1), 18~23(2004).
10. 류홍덕, 민경국, 이상일, "온도 및 수리학적 체류시간이 Modified DEPHANOX 공정에 미치는 영향," *대한환경공학회지*, **26**(3), 313~320(2004).
11. Wanner, J., Cech, J. S., and Kos, M., "New Process Design for Biological Nutrient removal," *Water Sci. Technol.*, **25**(4~5), 445~448(1992).
12. 환경관리공단, "환경기술검증보고서," 페타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술, pp. 4~5(2001).
13. Liu, J. X., van Groenestijn, J. W., Doddema, H. J., and Wang, B. Z., "Removal of Nitrogen and Phosphorus Using a New Biofilm-Activated-Sludge System," *Water Sci. Technol.*, **34**(1-2), 315~322(1996).
14. Liu, J., Li, W., Wang, X., Liu, H., and Wang, B., "Removal of Nitrogen from Coal Gasification Wastewater by Nitrosification and Denitrosification," *Water Sci. Technol.*, **38**(1), 39~46(1998).
15. Jun, B. H., Miyanaga, K., Tanji, Y., and Unno, H., "Removal of Nitrogenous and Carbonaceous Substances by a Porous Carrier-Membrane Hybrid Process for Wastewater Treatment," *Biochemical Engineering Journal*, **14**, 37~44(2003).
16. Bortone, G., Saltarelli, R., Alonso, V., Sorm, R., Wanner, J., and Tilche, A., "Biological Anoxic Phosphorus Removal-The Dephanox Process," *Water Sci. Technol.*, **34**(1-2), 119~128(1996).
17. Sorm, R., Wanner, J., Saltarelli, R., Bortone, G., and Tilche, A., "Verification of Anoxic Phosphate Uptake as the Main Biochemical Mechanism of the "DEPHANOX" Process," *Water Sci. Technol.*, **35**(10), 87~94(1997).
18. Šorm, R., Bortone, G., Saltarelli, R., Jeniček, P., Wanner, J., and Tilche, A., "Phosphate Uptake Under Anoxic Conditions and Fixed-Film Nitrification in Nutrient Removal Activated Sludge System," *Water Res.*, **30**(7), 1573~1584(1996).
19. Bortone, G., Marsili, S., Tilche, A., and Wanner, J., "Anoxic Phosphate Uptake in the Dephanox Process," *Water Sci. Technol.*, **40**(4-5), 177~185(1999).