

## 유입부하가 DEPHANOX 및 Modified-DEPHANOX 공정에 미치는 영향

류홍덕<sup>†</sup> · 민경국 · 이상일

충북대학교 공과대학 환경공학과

### Effect of Loading Rate in the Operation of DEPHANOX and Modified-DEPHANOX Processes

Hong-Duck Ryu<sup>†</sup> · Kyung-Kook Min · Sang-Ill Lee

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

**Abstract** : This study was initiated to evaluate the efficiencies of DEPHANOX and Modified-DEPHANOX, which were developed to enhance nitrogen removal efficiency in municipal wastewater treatment. In the results, removal efficiency of organic matters was not affected much by increased loading rate of organic matters which is contained in influent. The nitrogen removal efficiencies according to the loading rate of influent TN was decreased drastically in conditions of over 0.2 kg/m<sup>3</sup> · day, which is T-N loading rate, and the DEPHANOX process was affected more sensitively than the M-DEPHANOX was. When the temperature was altered from 25 °C to 16 °C at HRT 6hrs, the removal efficiency of ammonia nitrogen was still over 90% and it was concluded that both DEPHANOX and M-DEPHANOX were strong enough to endure temperature variation. Moreover, both processes showed over 90% in ammonia removal efficiencies in over HRT 5hrs, so it was concluded that they were strong in HRT variation. M-DEPHANOX process showed a higher value than DEPHANOX did in T-N removal efficiency to the extent of 4~21%, which resulted from difference of denitrification rates and the biosorption efficiency of organic matter in both processes. In the condition of HRT less than 4hrs, concentrations of ammonia nitrogen contained in effluents and nitrification reactors, might be sensitively affected by biosorption efficiency of organic matters in first separation tank. In the effect of effluent nitrate concentration in phosphorus removal, the more effluent nitrate concentration was decreased, the more phosphorus removal efficiency was increased. This result is related to the decrease of concentration of effluent nitrate which resulted from nitrification inhibition by decreased HRT.

**keywords** : Municipal wastewater, Influent loading rate, Organic matters, Biosorption, Temperature, HRT, DEPHANOX, M-DEPHANOX

## 1. 서 론

생물학적 영양염류 처리공정인 DEPHANOX 공정은 질소와 인 제거를 위해 유기물 이용을 극대화할 수 있고 흡착조로부터 유기물이 흡착되어 질산화조에서 질화박테리아가 종속영양미생물과의 경쟁에서 우위를 차지할 수 있다는 점에서 매우 효율적인 생물학적 처리공정이라 할 수 있다.

DEPHANOX 공정은 혐기접촉조, 분리조, 질산화조, 탈질조, 재포기조, 침전조로 구성된 생물학적 폐수처리 공정으로 혐기접촉조에서 유기물을 흡착하여 이를 탈질조에서 외부전자공여체로 이용함으로써 낮은 C/N비를 가진 도시하수 처리시 탈질 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있는 반면 이러한 기작은 방류수 암모니아성 질소 및 질산성 질소의 농도를 증가시키는 단점으로서도 작용한다. 즉, 암모니아성 질소 및 흡착조에서 흡착된 유기질소가 분리조로부터 탈질조로 유입되어 탈질조에 후속된 재포기조에서 유기질소가

암모니아성 질소로 분해되며 분해된 암모니아성 질소 및 분리조로부터 유입된 암모니아성 질소는 재포기조에서 질산화 과정을 거친 후 탈질공정없이 바로 방류되어 방류수의 총 질소 농도를 증가시키는 결과를 가져온다.

DEPHANOX 공정은 여러 장점을 가지고 있음에도 불구하고 상기 언급한 문제점으로 인하여 현장 적용의 어려움이 있었을 것으로 판단되며 이러한 실용성의 문제로 인해 현재까지 DEPHANOX 공정에 대한 연구가 충분치 않은 것으로 사료된다. 그간 DEPHANOX 공정 연구에 관하여 발표된 논문의 대부분은 무산소 인 섭취(anoxic phosphorus uptake)에 관한 연구가 대부분이다.<sup>1-3)</sup>

따라서 본 연구자는 DEPHANOX 공정을 약간 변형한 M-DEPHANOX(Modified-DEPHANOX) 공정을 제안하고자 한다. M-DEPHANOX 공정은 기존 DEPHANOX 공정의 재포기조를 간헐포기조와 재포기조로 분할함으로써 탈질 효율 향상에 중점을 둔 공정이라 할 수 있다.

본 연구에서는 유입부하가 DEPHANOX 공정의 유기물, 질소, 인 제거에 미치는 영향을 재평가하고자 하였으며 이를 본 연구에서 개발된 M-DEPHANOX 공정과 비교하고자 하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
nanumenv@hanmail.net

## 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.** Characteristics of the average value of municipal wastewater(n=50)

Parameter	Concentration, mg/L
TCOD <sub>cr</sub> (mg/L)	376 ± 105.5(STDEV)
SCOD <sub>cr</sub> (mg/L)	123 ± 28.4
TKN (mg/L)	45 ± 5.5
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	33 ± 3.4
T-P (mg/L)	7 ± 1.8
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	2 ± 0.6
TCOD <sub>cr</sub> /TKN	8 ± 1.3

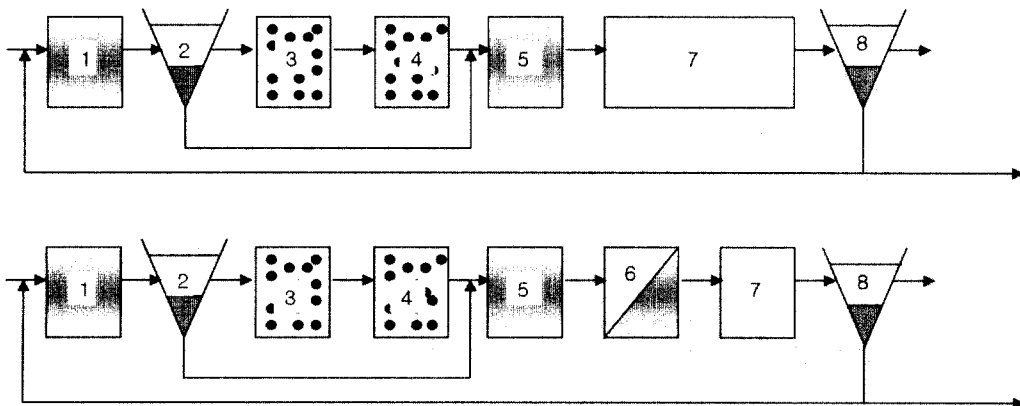
### 2.2. M-DEPHANOX 공정 및 DEPHANOX 공정 운영

본 연구에서 제안하는 M-DEPHANOX 공정은 기존 DEPHANOX 공정의 재포기조를 간헐폭기조와 재포기조로 나누어 질소제거 향상을 목적으로 고안된 공정이며 본 연구의 목적은 실험실 규모의 연구를 통하여 본 연구에서 제안하는 M-DEPHANOX 공정이 기존 DEPHANOX 공정보다 우수함을 입증하는 데 있다.

본 연구는 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째는 수리학적 체류시간(HRT)과 온도가 두 공정에 미치는 영향을 상호 비교하는 연구이며, 두 번째는 유입수 부하율에 따라 두 공정의 유기물, 질소, 인 제거 효율이 어떻게 변화하는지에 관한 것이다. 첫 번째 연구를 위해서 온도의 영향을 살펴보기 위해 수리학적 체류시간을 6 hr으로 고정된 후 운영기간동안 평균 온도를 25℃와 16.2℃로 조절하여 상호 비교하였으며 HRT의 영향은 같은 겨울철 실내온도에서 HRT를 6, 5, 4, 3.5 hr으로 변경하면서 상호 비교 운영하였다. 각 공정의 개략도는 Fig. 1과 같으며 구체적인 운영변수는 Table 2와 같다. 질산화 반응조에 충전한 미디어

**Table 2.** Operational parameters of DEPHANOX and M-DEPHANOX plants

	DEPHANOX			M-DEPHANOX		
	Unit	Value	Volume ratio(%)	Unit	Value	Volume ratio(%)
Volume of anoxic contact reactor	L	2.64	5.91	L	2.64	5.91
Volume of settler 1	L	15.98		L	15.98	
Volume of nitrification reactor 1	L	7.10	15.88	L	7.10	15.88
Volume of nitrification reactor 2	L	7.10	15.88	L	7.10	15.88
Volume of anoxic reactor	L	10.13	22.66	L	10.13	22.66
Volume of intermittently aerated reactor				L	10.13	22.66
Volume of post aeration	L	17.73	39.66	L	7.6	17.00
Activated bypass flow rate		1Q			1Q	
Return sludge flowrate		1Q			1Q	
HRT	Hour	6, 5, 4, 3.5 respectively		Hour	6, 5, 4, 3.5 respectively	
SRT	Day	12		Day	12	
Temperature	℃	25, 16.2, 17.1, 16.5, 18		℃	25, 16.2, 17.1, 16.5, 18	



**Fig. 1.** Schematic diagrams of DEPHANOX(top) and M-DEPHANOX(down) used in this research: 1) Anoxic contact reactor; 2) Sludge and settleable organic matter separation; 3,4) Nitrification reactor packed with Linpor media; 5) Denitrification reactor; 6) Intermittently aerated reactor; 7) Re-aeration; 8) Final settler.

는 cubic type의 유동상 매체인 Linpor(size: 12×12×15mm, Linde 社, 독일)를 사용하였으며 각 반응조의 충전율은 약 18%로 하였다. 유입, 유출수 및 각 반응조에서 관심대상의 측정 항목을 동시에 측정함으로써 유입수 부하가 처리효율에 미치는 영향을 추후에 검토할 수 있도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 유입 부하가 유기물 제거에 미치는 영향

유기물 제거는 TCOD<sub>cr</sub>의 경우 HRT 8hr(온도, 25℃), HRT 6hr(온도, 25℃), HRT 6hr(온도, 16.2), HRT 5hr(온도, 17.1℃), HRT 4hr(온도, 16.5℃), HRT 3.5hr(온도, 18℃)에서 DEPHANOX의 경우 93.3, 86.1, 91.9, 95.1, 85.3, 90.4%

로 나타났으며 M-DEPHANOX의 경우 93.7, 88, 91.2, 95.5, 88.3, 87.5%로 두 공정 모두 온도 및 HRT가 낮아져도 유기물 제거효율에는 큰 변화를 보이지 않고 있음이 관찰되었으며 SCOD<sub>cr</sub>도 비슷한 결과를 보이고 있다(Fig. 2). 하지만 유기물의 유입 부하율에 따른 방류수중의 유기물 함량은 TCOD<sub>cr</sub>와 SCOD<sub>cr</sub> 모두 부하율이 증가할수록 증가하는 경향을 보여 유기물 부하가 증가할수록 방류수중의 유기물 함량이 점진적으로 증가함을 관찰 할 수 있었다(Fig. 3).

#### 3.2. TN 유입 부하가 질소 제거에 미치는 영향

Fig. 4는 HRT 및 온도에 따른 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N와 TN 제거율을 나타낸 그림이다. HRT 6hr에서 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N와 TN 제거율의 온도에 대한 영향을 살펴본 결과 온도가 낮아져도 암모니아

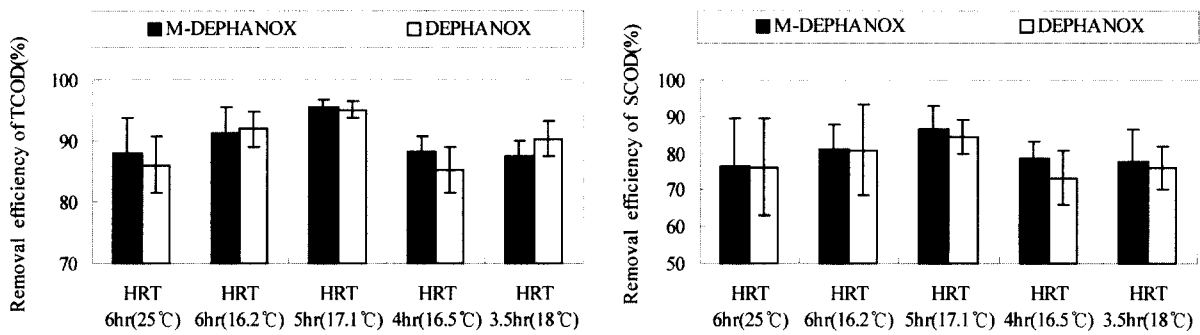


Fig. 2. Comparison of M-DEPHANOX and DEPHANOX in removal efficiencies of organic matters according to the HRT and temperature.

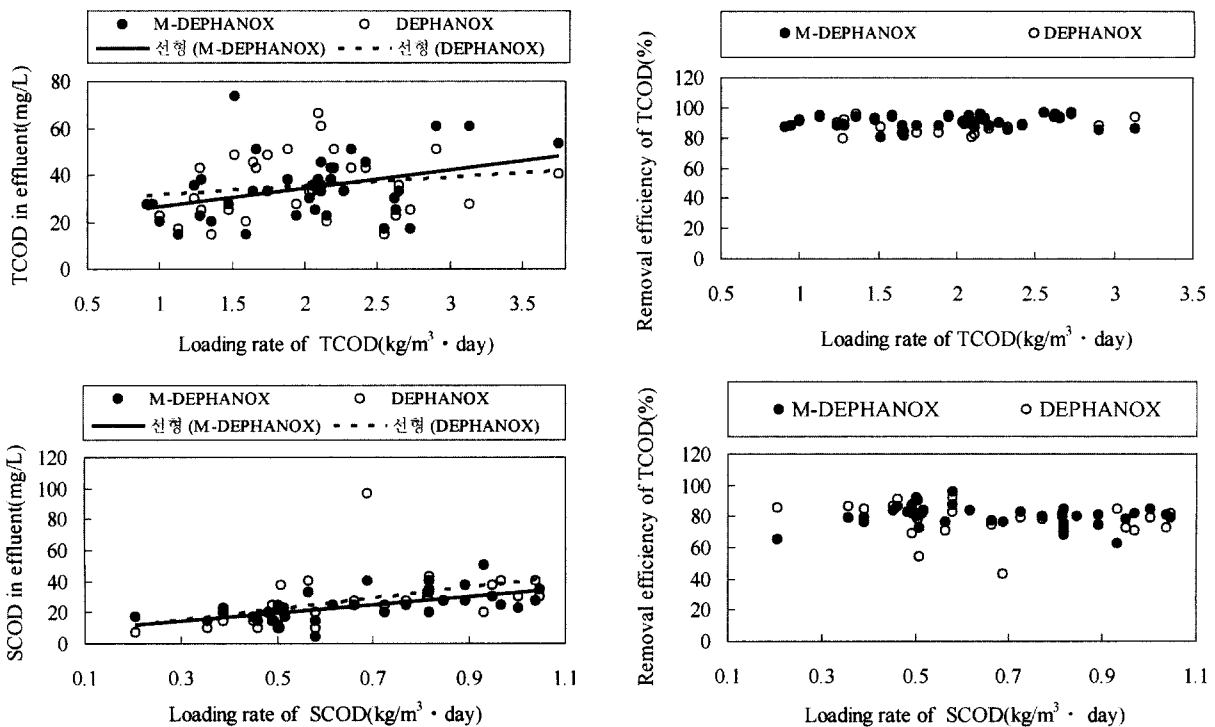


Fig. 3. Concentration and removal efficiencies of organic matters according to the influent organic loading rate, respectively.

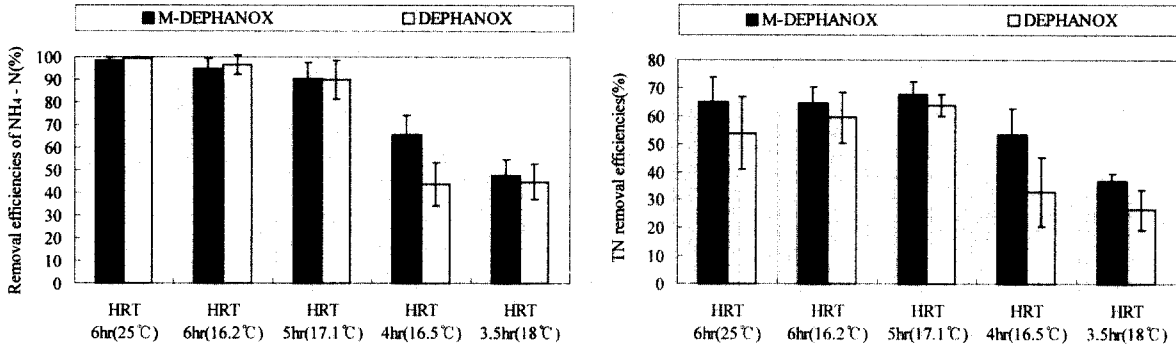


Fig. 4. Comparison of M-DEPHANOX and DEPHANOX in removal efficiencies of nitrogen according to the HRT and temperature.

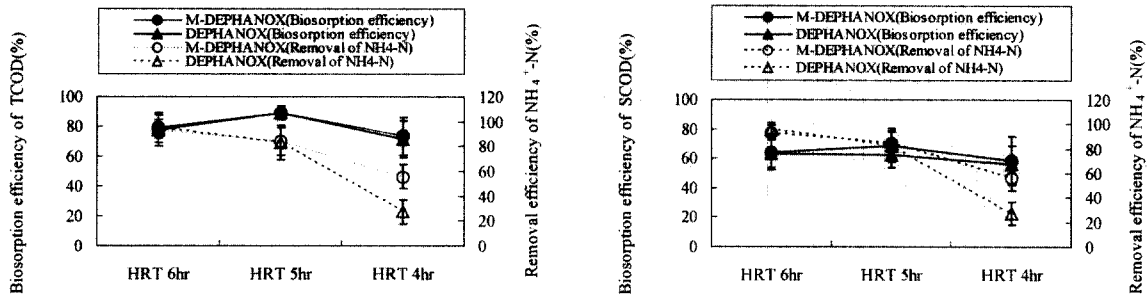


Fig. 5. Comparison with M-DEPHANOX and DEPHANOX process in removal efficiency of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  according to the both HRTs and biosorption efficiencies.

성 질소의 경우 평균 90% 이상의 높은 제거효율을 보이고 있고 TN 제거효율도 평균 60~70%의 제거율을 보이고 있어 두 공정 모두 온도 영향에 강한 것으로 나타났으나 TN의 경우 M-DEPHANOX 공정이 약 4~5% 더 높은 효율을 보이고 있는 것으로 나타나 M-DEPHANOX 공정이 기존 DEPHANOX 공정보다 온도의 영향에 더 강한 것으로 나타났다. HRT 영향은 암모니아성 질소의 경우 두 공정 모두 HRT 5hr까지 평균 90% 이상의 높은 제거효율을 보이고 있으며 TN의 경우도 HRT 5hr까지 평균 60~70% 제거효율을 보이고 있어 두 공정 모두 HRT 변화에 강한 것으로 나타났지만 HRT 영향에서도 온도 영향에서 볼수 있는 것과 마찬가지로 M-DEPHANOX 공정이 DEPHANOX 공정보다 TN 제거효율이 4~21% 더 높은 것을 볼 수 있는데 이는 M-DEPHANOX의 간헐조에서 질산성 질소의 제거로 인한 탈질 효율의 증진과 1차 분리조에서의 유기물 흡착 영향 때문인 것으로 보인다. 실제 공영 운영에 있어 방류수 중의 질산성 질소 농도가 M-DEPHANOX 공정의 경우 DEPHANOX 공정보다 약 0.3~8.3 mg/L 더 낮게 측정되었다. 또한 주목하여 관찰하여야 할 사항중의 하나는 TN 제거효율에 있어서 HRT가 5hr에서 4 hr으로 감소하면서 M-DEPHANOX 공정은 14% 효율이 감소된 것에 비해 기존 DEPHANOX 공정의 TN 제거효율은 30.8% 감소한 것으로 나타났는데 이는 HRT가 5hr에서 4 hr으로 감소하면서 암모니아성 질소 제거효율이 M-DEPHANOX 공정보다 기존 DEPHANOX 공정에서 급격히 감소하였기 때문이

다(Fig. 4). HRT 4 hr에서 M-DEPHANOX 공정보다 DEPHANOX 공정의 암모니아성 질소 제거효율이 더 급격히 감소한 원인은 흡착효율과 관계가 있을 것으로 생각된다. Fig. 5는 흡착효율과 암모니아성 질소 제거효율과의 관계를 나타낸 그래프로서 HRT 4hr에서 M-DEPHANOX 공정과 DEPHANOX 공정의 흡착 효율 비교시 M-DEPHANOX 공정이 DEPHANOX 공정보다  $\text{TCOD}_{cr}$  흡착효율은 약 2.1%  $\text{SCOD}_{cr}$  흡착효율은 2.6% 더 좋은 것으로 나타났으며 이러한 유기물 흡착 차이로 인해 암모니아성 질소 제거효율은 M-DEPHANOX가 기존 DEPHANOX 공정보다 28.3% 더 높게 관찰되었다. 반면 HRT 5 hr에서의 흡착효율은  $\text{SCOD}_{cr}$ 의 경우 6.2% 더 높게 관찰되었지만 암모니아성 질소 제거효율은 M-DEPHANOX 공정이 DEPHANOX 공정보다 단지 약 1.1% 높게 관찰된 것으로 나타났다. 오히려 HRT 5 hr에서 흡착효율의 차이가 컸음에도 불구하고 암모니아성 질소 제거효율의 차이가 HRT 4 hr에서 더 크게 나타나는 이유는 HRT 5 hr 이상에서는 암모니아성 질소 제거효율이 흡착에 별 영향을 받지 않음을 나타내며 유기물 및 암모니아성 질소 부하율이 높아지는 HRT 4 hr 이하에서는 유기물 흡착 유무가 암모니아성 질소 제거효율에 민감하게 작용함을 나타내기 때문이라 사료된다. Fig. 6은 각각의 질산화 반응조에서의 암모니아성 제거 효율을 나타낸 그래프로서 HRT 4 hr에서 2번째 질산화 반응조의 암모니아성 질소가 M-DEPHANOX 보다 DEPHANOX 공정에서 급격히 증가하고 있는 것을 관찰할 수 있으며 이러한 원인

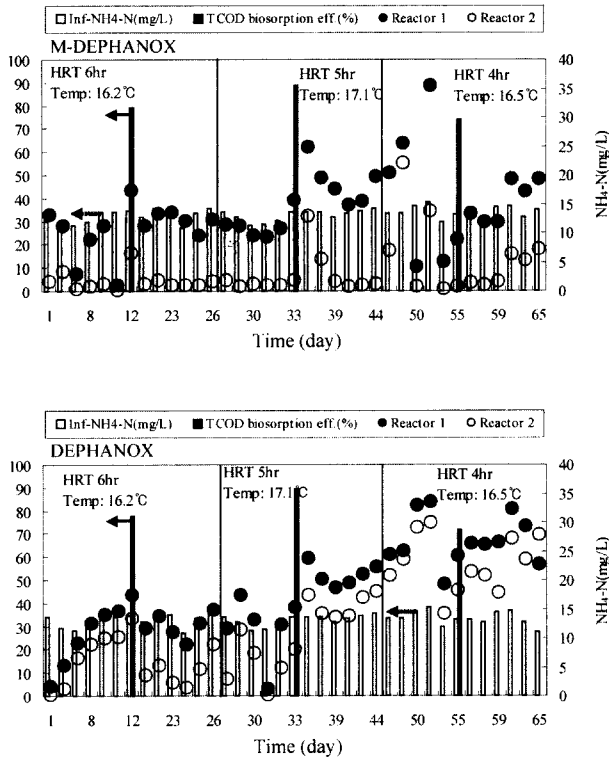


Fig. 6. Comparison with M-DEPHANOX and DEPHANOX process in nitrification efficiency according to both HRTs and biosorption efficiencies in each nitrification reactors.

은 DEPHANOX 공정이 M-DEPHANOX 보다 흡착효율이 약 2.1% 더 낮았기 때문이며 흡착이 되지 않은 유기물이 질산화 반응조로 유입됨으로 인해 질화박테리아가 질산화에 저해를 받았기 때문이라 생각된다. 이러한 흡착과 질산화와의 관계는 용존 유기물(SCODcr) 흡착효율에서도 같은 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7은 유입수 TN 부하량이 방류수 중 암모니아성 질소 및 TN 농도에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 방류수 중 암모니아성 질소 및 TN 농도 역시 유기물 부하율에 따른 방류수 중의 유기물 농도가 증가하듯이 TN 부하율에 따라 비례하는 경향을 보이고 있지만 그 기울기가 더 급함을 관찰할 수 있다. 이는 질화박테리아가 종속영양박테리아보다 온도 및 HRT 변화에 더 민감하게 작용함을 나타낸 것이다. 암모니아성 질소와 TN 모두 유입 TN 부하율이 약  $0.2 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$  이상에서 제거효율이 급격히 감소되는 것을 볼수 있다. 하지만 유입 TN 부하율이 암모니아성 질소 및 TN 제거효율에 미치는 영향은 약간 다른 경향을 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 암모니아성 질소의 경우 유입 TN 부하율이 증가함에 따라 일정한 제거효율을 보이다가 감소하는 경향을 보이고 있는 반면 TN 제거효율은 유입 TN 부하율이 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보이고 있다. TN 제거효율이 유입 TN 부하율이 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 경향성은 TN 부하율이 증가함에 따라 방류수에 포함된 암모니아성 질소는 증가하지만 암모니아성 제거율이 감소되는 대신 생성되는 질산성 질소의 농도가 감소하고 질산성 질소의 농도가 감소함에 따라

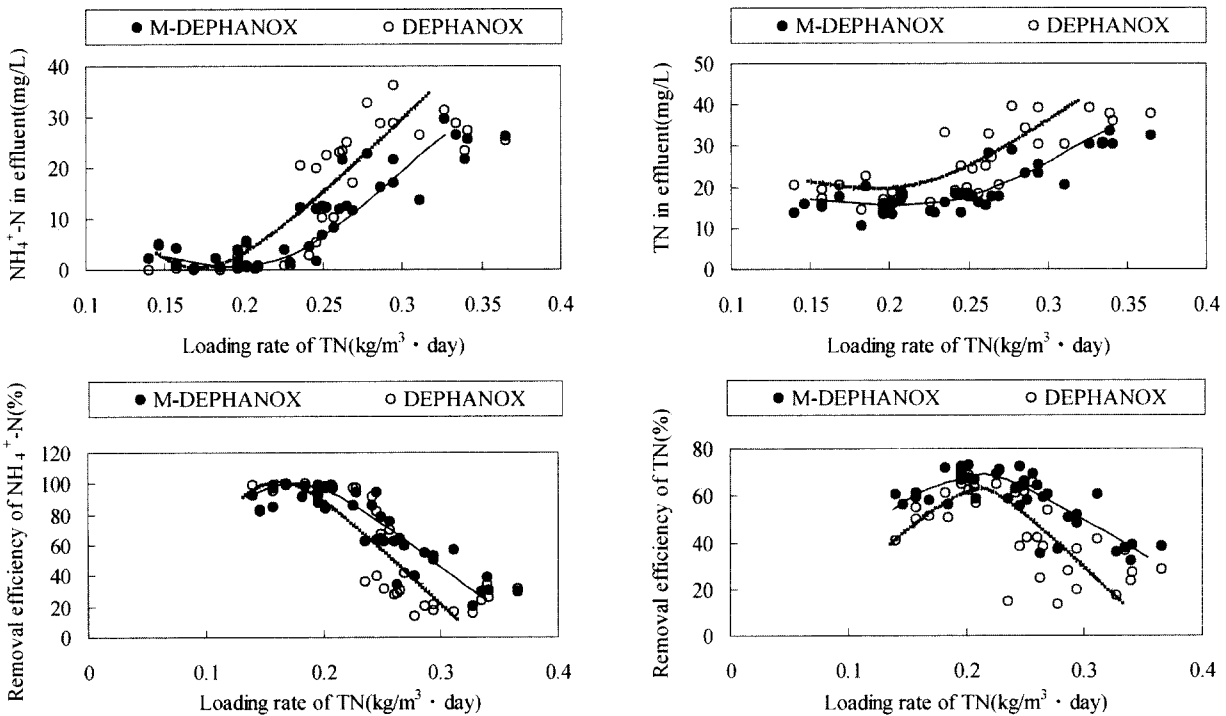


Fig. 7. Nitrogen removal according to the influent nitrogen loading rates.

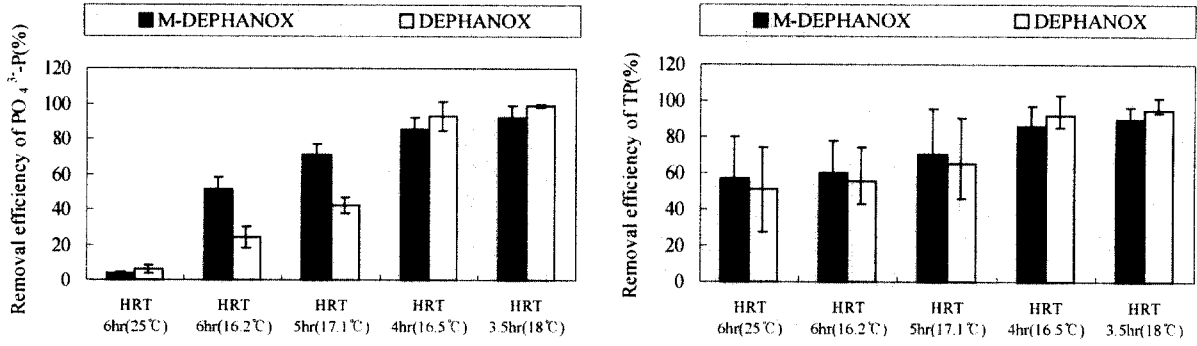


Fig. 8. Comparison of M-DEPHANOX and DEPHANOX in removal efficiencies of phosphorus according to the HRT and temperature.

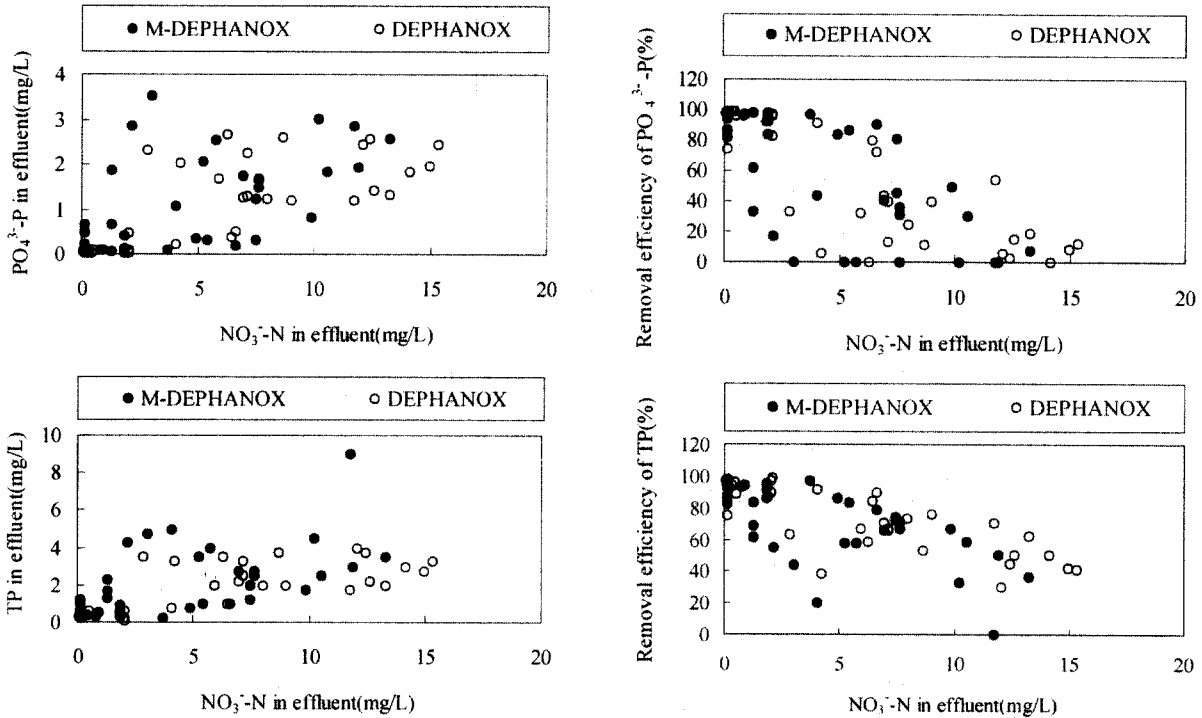


Fig. 9. Effect of concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration contained in effluents with relation to removal of phosphorus.

탈질 반응조에서 탈질이 더 원활히 수행되었기 때문에 나타나는 현상이라 사료된다.

유입 TN 부하율에 따른 질소 제거율도 DEPHANOX 공정보다 M-DEPHANOX 공정이 더 좋은 효율을 보이고 있는 것을 관찰할 수 있다.

### 3.3. 질산성 질소의 농도가 인 제거에 미치는 영향

질산성 질소가 방류수 중 인 농도에 미치는 영향은 Fig. 9에 도시되어 있다. 방류수의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도가 증가할수록 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 및 TP의 제거효율이 급격히 감소하고 있음을 관찰할 수 있다.

유입수 유기물의 농도와 방류수의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도를 동시에 고려하였을 때의 인 제거효율은 Fig. 10에 도시되어 있다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도 하나만을 고려하였을 때 보다 보다 극명하게

인 제거효율이 영향을 받는 것을 관찰할 수 있다. 유입수에 함유된 SCOD의 농도가 일정하다고 가정할 때 유출수에 함유된 질산성 질소의 농도가 감소함에 따라 방류수에 함유된 인 농도가 감소함을 알 수 있다. 이러한 경향성은 질산염이 인 제거를 방해하기 때문인 것으로 사료되며 인 제거에 질산염이 주는 영향에 관해 연구한 여러 문헌을 통해서도 확인할 수 있다.<sup>4,6)</sup>

HRT가 감소할수록 DEPHANOX, M-DEPHANOX 모두 인 제거효율이 급격히 증가하는 경향을 관찰할 수 있는데 (Fig. 8) 이는 HRT가 감소하면서 질산화가 저해되어 질산염이 감소되는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다. 즉, HRT 감소와 더불어 질산염의 감소는 결국 인 제거효율을 증가시키는 결과를 가져온다.

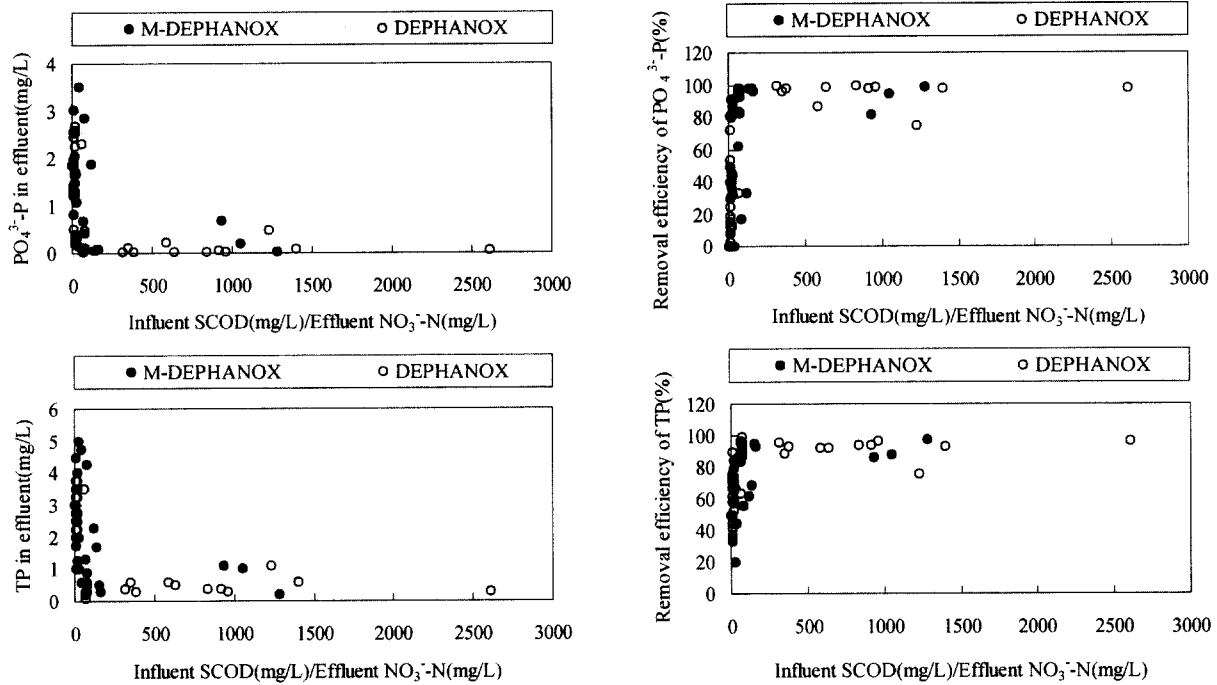


Fig. 10. Effect of concentration of SCOD/ $\text{NO}_3^-$ -N in removal of phosphorus.

#### 4. 결론

도시하수 처리시 유입부하에 따라 DEPHANOX 및 본 연구에서 제안하는 M-DEPHANOX 공정을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HRT 6 hr에서 온도의 영향을 살펴 본 결과 유기물 제거효율은 온도가 25°C에서 16.2°C로 감소하였을 경우 두 공정 모두 오히려 증가하는 양상을 보였다. 총 질소 제거효율 역시 온도가 낮아짐에 따라 증가하는 양상을 보이고 있으나 M-DEPHANOX 공정이 4~5% 더 높은 것으로 관찰되었다. 전반적으로 두 공정 모두 온도 변화에 강한 것으로 나타났다.
- 2) HRT 변화에 따른 유기물 및 질소 제거율을 관찰한 결과 유기물 제거효율은 HRT가 감소함에 따라 영향을 크게 받지 않았으며 암모니아성 제거효율은 HRT 5 hr까지 90% 이상의 높은 제거 효율을 보이다가 HRT 4 hr 이하로 되면서 제거 효율이 급격히 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. TN 제거효율은 HRT 5 hr까지 60~70%의 제거효율이 관찰되었으며 HRT가 4hr 이하에서 급격히 효율이 감소하였다. 이때 HRT 5 hr까지 M-DEPHANOX 공정이 DEPHANOX 공정보다 약 3.8~5.1% 효율이 높게 관찰되었으며 HRT가 4 hr 이하로 감소함에 따라 제거효율 감소폭이 M-DEPHANOX 공정이 작게 관찰됨에 따라 M-DEPHANOX 공정이 기존 DEPHANOX 공정보다 HRT 변화에 강한 것으로 나타났다.
- 3) 유입수 중 TN 유입부하의 증가에 따른 질소 제거효율은 유기물보다 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며

TN 유입 부하가  $0.2 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$  이상에서 급격히 효율이 감소하는 경향을 관찰할 수 있었다.

- 4) TN 유입부하의 증가에 따른 질소 제거효율은 DEPHANOX 공정이 M-DEPHANOX 공정보다 더 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.
- 5) HRT 감소에 따라 방류수의  $\text{NO}_3^-$ -N가 감소 하고 인 제거 효율은 향상되는 것으로 관찰되었다.

#### 사 사

본 연구는 과기부 지정 국가지정연구실사업(M10104000201-02J0000-08810)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Bortone, G., Marsili, L. S., Tilche, A. and Wanner, J., Anoxic phosphate uptake in the DEPHANOX process, *Wat. Sci. Tech.*, **40**(4-5), pp. 177-185 (1999).
2. 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, *Wat. Sci. Tech.*, **35**(10), pp. 87-94 (1997).
3. Bortone, G., Saltarelli, R., Alonso, V., Sorm, R., Wanner, J. and Tilche, A., Biological anoxic phosphorus removal-The dephanox process, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(1~2), pp. 119-128 (1996).
4. Hascoet, M. C. and Florentz, M., Influence of nitrates on biological phosphorus removal from wastewater, *Wat. S.*

- A.*, 11, pp. 1-8 (1985).
5. Meinhold, J., Arnold, E. and Isaacs, S., Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in BPR activated sludge, *Wat. Res.*, 33, pp. 1871-1833 (1999).
  6. Kuba, T., Smolders, G., van Loosdrecht, M. C. M. and Heijnen, J. J., Biological phosphorus from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor, *Wat. Sci. Tech.*, 27(5-6), pp. 241-252 (1993).