

## M-Dephanox 공정 질소 제거 효율 향상 방안에 관한 연구

류흥덕<sup>†</sup> · 이상일

충북대학교 공과대학 환경공학과

## The Study for Enhancement of Nitrogen Removal Efficiency in M-Dephanox Process

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

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 24 August 2005, Accepted 2 November 2005)

### Abstract

In this study, development of M2-Dephanox and M3-Dephanox process has been tried to enhance the nitrogen removal of M-Dephanox process on the basis of previous study about M-Dephanox. The results showed that T-N removal efficiency of M3-Dephanox process was 8.9% or 11.3% higher than M-Dephanox or M2-Dephanox processes, respectively. This result is due to the lower NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration in the effluent of M3-Dephanox than of M-Dephanox and M2-Dephanox processes. This results were recurred by PASS simulator. As result of simulation by PASS program, effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration of M3-Dephanox process was 1.4 mg/L and 3.6 mg/L lower than M-Dephanox and M2-Dephanox processes. In the study about optimization of M3-Dephanox processes by PASS program, SRT greatly affected T-N removal of M3-Dephanox process, whereas, the recycle rate and recirculation rate did little affect T-N removal efficiency of M3-Dephanox. In the study about optimization of reactors following the nitrification reactor of M3-Dephanox process, it was shown that the best optimum volume ratio of denitrification reactor, intermittently aerated reactor and anoxic reactor for the T-N removal were 29.1% : 32.7% : 38.2%. T-N removal efficiency at this volume ratio was similar to T-N removal efficiency at the volume ratio of 36.3% : 36.3% : 27.4% designed for the lab-scale M3-Dephanox.

keywords : M-Dephanox, M2-Dephanox, M3-Dephanox, PASS

### 1. 서론

Dephanox 공정(Fig. 1)은 하이브리드(hybrid) 공정이자 two-sludge 시스템으로 유입부하변동에 강하고(Liu et al., 1996a, 1998; Nurdan et al., 2002; Misra et al., 2001; Pedro et al., 1995; Wang et al., 2000; Lee et al., 2002) 외부 질산화(external nitrification) 시스템으로 짧은 수리학적 체류시간에서도 질산화가 가능하다는 점과 낮은 온도에서도 처리효율이 크게 저하되지 않는 장점을 가지고 있다(Tarek et al., 2002; Liu et al., 1996b). 게다가 부유성장 미생물을 이용하는 공정에 비해 유입수에 함유된 유기물을 탈질시 매우 효율적으로 이용할 수 있어 우리나라와 같이 낮은 C/N 비를 가진 하수처리에 굉장한 유리한 공정으로 평가되고 있다(Kim et al., 1997; Liu et al., 1998).

하지만 이러한 장점에도 불구하고 Dephanox 공정이 지니고 있는 단점 중 하나는 1차 분리조로부터 유기물을 흡착한 활성슬러지가 탈질조로 유입되는 과정에서 암모니아성 질소 및 유기질소도 같이 유입되어 탈질반응조에 후속

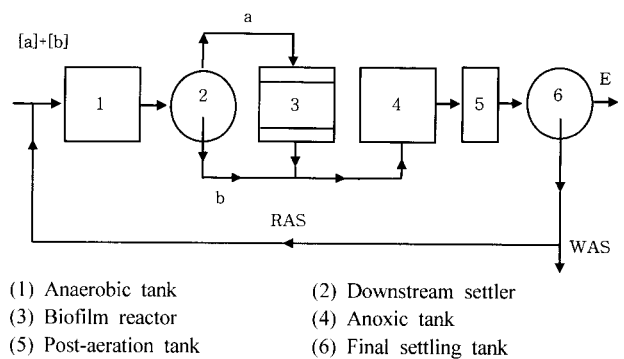
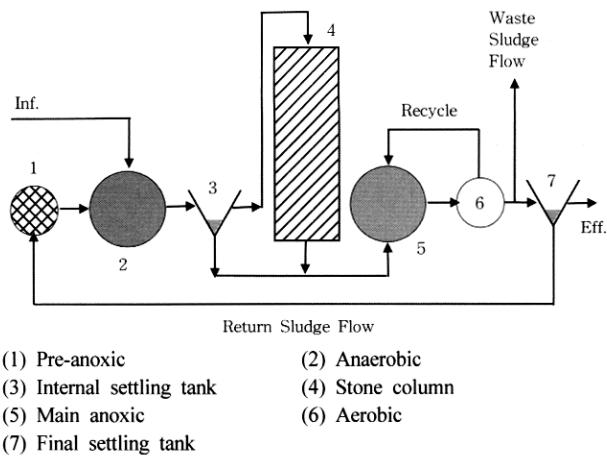


Fig. 1. Configuration of activated sludge system according to Wanner et al. (1992).

되는 재포기조에서 질산화 된 질산염이 탈질이 되지 않고 그냥 방류된다는 구조적인 문제를 꼽을 수 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 류 등(2004a, 2004b)이 Modified-Dephanox(M-Dephanox) 공정을 제안하였다. 이 이외에도 기존 Dephanox 공정을 변형하여 연구한 논문이 Šorm 등(1996) 및 Hu 등(2000)에 의해 소개되어지고 있다. 하지만 Šorm 등(1996)의 연구에서는 질소보다는 인 제거효율 향상에 목적을 두고 공정을 변형시켰으며 따라서 기존 Dephanox 공정의 재포기조를 무산소조와 재포기조로 1 : 2의 비

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



**Fig. 2.** Experimental setup for external nitrification biological nutrient removal activated sludge system (Hu et al., 2000).

율로 분할하여 운영하였을 때 T-N 제거효율이 72.6%에서 59.0%로 오히려 감소하는 것을 관찰 할 수 있었다. Hu 등 (2000)의 연구에서는 재포기조에서 탈질조로 내부순환을 시켜주었을 때(Fig. 2) 평균 T-N 제거효율이 약 86%로 나타나 기존 Dephanox 공정 연구(Bortone et al., 1996; Šorm et al., 1996; Bortone et al., 1999)에서 관찰된 T-N 제거효율에 비해 약 10~30% 더 높은 값을 보여주고 있다. Hu 등(2000)의 연구에서 기존 Dephanox 공정에 비해 T-N 제거효율이 높게 나타난 원인은 물론 재포기조에서 무산소조로 내부순환을 시켜줌으로써 질산성 질소( $\text{NO}_3^-$ -N)를 감소시켜 준 것이 큰 원인으로 작용하였겠지만 유입 TCOD/TKN 비가 비교적 높은 9였다는 점도 T-N 제거 효율 향상에 커다란 역할을 하였을 것으로 생각된다.

Dephanox 변형 공정에 대한 언급은 Šorm 등(1996) 및 Hu 등(2000)의 연구를 제외하고는 현재까지 전무한 실정이며 Šorm 등(1996) 및 Hu 등(2000)의 연구에서조차도 Dephanox 공정의 근본적인 문제점인 질소처리 문제에 대해서는 간과하거나 언급되어지지 않았으며 주로 인을 처리 목표 대상으로 하거나 기존 Dephanox 공정과 상호 비교한 체계적인 연구는 수행되지 않았다. 또한 질소 처리를 극대화하기 위한 방법 제시가 전혀 언급되고 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 류 등(2004a,b)이 수행한 M-Dephanox 공정 연구를 기초로 하여 T-N 제거효율을 극대화 시키기 위해 M2-Dephanox 공정 및 M3-Dephanox 공정을 제안하고자 하며 실험값 검증에 위해 공정의 처리효율을 모사할 수 있는 PASS 프로그램을 동시에 활용하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 도시하수의 성상

본 연구에 사용된 폐수는 C시 도시하수 처리장의 1차 침전지로 유입되는 도시하수를 사용하였으며 유입수 성상은

**Table 1.** Characteristics of domestic wastewater used in this study

Parameter	Concentration, mg/L
TCOD <sub>cr</sub> (mg/L)	93.5 ± 35.4(STDEV)
SCOD <sub>cr</sub> (mg/L)	41.8 ± 13.0
TKN (mg/L)	28.0 ± 4.0
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/L)	21.9 ± 4.0
T-P (mg/L)	3.6 ± 1.6
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P (mg/L)	1.9 ± 0.6
TCOD <sub>cr</sub> /TKN	3.3

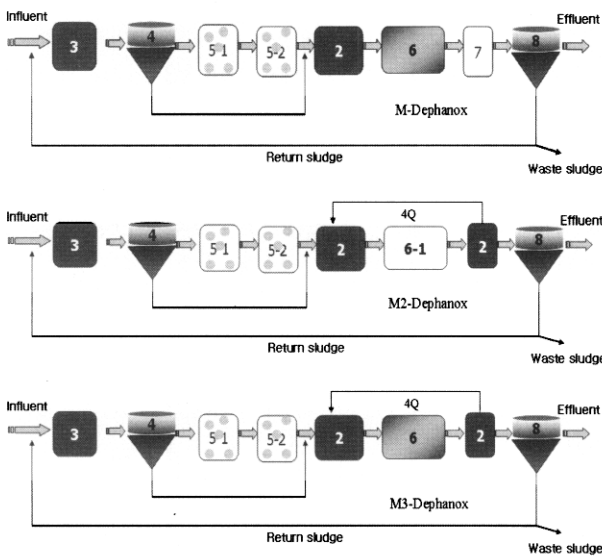
Table 1과 같다. 조사된 유입 하수의 성상으로는 TCOD<sub>cr</sub> 및 SCOD<sub>cr</sub> 농도가 각각 93.5, 41.8 mg/L 였으며, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 및 TKN 농도는 각각 21.9, 28.0 mg/L로 나타났다. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 및 T-P의 농도는 각각 1.9, 3.6 mg/L 였으며, TCOD<sub>cr</sub>/T-N 비는 약 3.3인 것으로 나타났다. 본 연구에서 도시하수의 평균 C/N 비가 낮은 원인은 여름철 장마기간에 시료를 채취했기 때문인 것으로 판단된다.

### 2.2. M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정 운영

본 연구에서 M-Dephanox 공정의 질소제거 향상 연구를 위해 M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정을 고안하였으며 M-Dephanox 공정을 대조군으로 하여 고안된 M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정을 상호 비교하였다. M-Dephanox 및 M2-Dephanox, M3-Dephanox 공정의 개략도는 Fig. 3과 같다. M2-Dephanox 공정은 M-Dephanox 공정의 간헐포기조(6 on Fig. 3)와 재포기조(7 on Fig. 3)를 각각 연속 포기조(6-1 on Fig. 3)와 무산소조(2 on Fig. 3)로 전환시키고 무산소조에서 질산화조에 후속되는 탈질 반응조로 내부 순환(4Q) 시키는 것을 특징으로 하고 있으며, M3-Dephanox 공정은 M-Dephanox 공정의 재포기조를 무산소조로 전환하고 무산소조에서 질산화조에 후속되는 탈질조로 내부 순환시키는 것을 특징으로 하고 있다. 내부순환의 목적은 M-Dephanox 공정의 질소제거 효율을 보다 더 증진시키기 위함이다. M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의 운영조건은 Table 2에 나타내었다. 세 공정 모두 수리학적 체류시간(HRT)은 6hr으로 하였으며 온도는 25°C에서 운영하였다. 공정 운영 기간 동안 각 공정에서의 미생물 체류시간(Sludge Retention Time, SRT)은 12 day(일)로 일정하게 유지하였으며 최종침전지(8 on Fig. 3)에서 무산소 접촉조(3 on Fig. 3)로의 반응율 및 1차 고액분리조(4 on Fig. 3)에서 탈질조(2 on Fig. 3)로의 슬러지 유량은 0.6Q로 하였다. 세 공정 모두 질산화 반응조(5-1, 5-2 on Fig. 3)에 유동상 매디아를 충전 하였으며 유동상 매디아는 cubic type의 Linpor(size: 12×12×15 mm)를 사용하였다. 각 반응조에서 Linpor 매디아의 충전율은 약 18%로 하였다. M-Dephanox 공정 및 M3-Dephanox 공정의 간헐포기조(6 on Fig. 3)의 호기/비포기 시간은 1 hr/1 hr으로 운영하였다.

**Table 2.** Operational parameters of M-Dephanox, M2-Dephanox and M3-Dephanox processes

Conditions	Processes	M-Dephanox		M2-Dephanox		M3-Dephanox		
		Unit	Value	Volume ratio(%)	Value	Volume ratio(%)	Value	Volume ratio(%)
Volume of anoxic contact tank		L	2.64	5.91	2.64	5.91	2.64	5.91
Volume of first nitrification tank		L	7.10	15.88	7.10	15.88	7.10	15.88
Volume of second nitrification tank		L	7.10	15.88	7.10	15.88	7.10	15.88
Volume of anoxic tank		L	10.13	22.66	10.13	22.66	10.13	22.66
Volume of intermittent aeration tank		L	10.13	22.66			10.13	22.66
Volume of aeration tank		L			10.13	22.66		
Volume of post-aeration tank		L	7.60	17.00				
Volume of anoxic tank		L			7.60	17.00	7.6	17.00
Return sludge flow rate		Q		0.6		0.6		0.6
Activated bypass flow rate		Q		0.6		0.6		0.6
Recirculation rate		Q		4		4		4
HRT		Hour		6		6		6
SRT		Day		12		12		12
Temperature		°C		25		25		25



- (2) Anoxic tank
- (3) Anoxic contact tank
- (4) Downstream settler
- (5-1) First nitrification tank
- (5-2) Second nitrification tank
- (6) Intermittent aeration tank
- (6-1) Aerobic tank
- (7) Post-aeration tank
- (8) Final settling tank

**Fig. 3.** M-Dephanox (top), M2-Dephanox (middle) and M3-Dephanox (bottom) processes used in this study.

**2.3. Periodic activated sludge simulator (PASS) 1.0을 이용한 실험 결과값 비교 및 예측**

PASS 1.0 예측모델은 IAWPRC(International Association on Water Pollution Research and Control)에서 개발된 ASM-1(Activated Sludge Model-1)에 기초하여 제작된 프로그램으로서 1997년 미국 플로리다 대학의 Ben Koopman 교수에 의해 개발된 프로그램이다. PASS 1.0 예측모델의 개략적인 내용은 다음과 같다.

**2.3.1. PASS 1.0의 사용 범위와 모델링의 기초**

PASS 1.0은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

1. PASS 1.0은 두 가지 소프트웨어가 결합되어 구동된다. 즉, 마이크로소프트 비주얼 C++ 5.0으로 작성된 계산모듈(Computation Module) 혹은 “CM”이라고 칭하는 프로그램은 계산된 결과를 그래픽으로 보여주며, 사용자-인터페이스 모듈(User-Interface Module) 혹은 “UIM”은 마이크로소프트 엑셀프로그램을 이용하여 데이터를 CM으로 전환시켜주는 역할을 한다. 이런 형태로 이루어진 프로그램은 사용자가 시뮬레이션 결과를 분석하는데 엑셀의 장점을 최대한 이용할 수 있게 해주며 이 두 가지 모듈은 텍스트 파일 형태로 정보를 교환한다.
2. PASS 1.0은 바이오-데니포(Bio-Denitro) 공정과 같이 간헐적으로 포기상태가 이루어지고 주기적으로 유입수의 경로가 변화되는 공정을 포함하여 단일 슬러지 공정까지 거의 모든 공정을 시뮬레이션 할 수 있다.
3. 스크린상으로 반응조 및 방류수의 수질을 시각적으로 볼 수 있으며 종속영양 박테리아의 호기 및 혐기 상태일때 성장과 질화박테리아의 호기 상태일때 성장을 예측할 수 있다. 또한 생물체의 사멸, 입자성 유기물질의 가수분해, 그리고 용존성 유기질소의 암모니아화 등도 나타낼 수 있다.
4. 생물학적 산소요구량(BOD)과 질소가 활성슬러지 공정에 의해 제거되는 것을 모델링할 수 있으며, 이때 2차 침전조가 반응조의 혼합물(mixed liquor)로부터 완전히 순간적으로 분리된다는 것을 가정하고 있다.

**2.3.2. PASS 1.0을 이용한 실험값 검토**

M-Dephanox 공정과 질소 제거 효율을 보다 더 개선하기 위해 고안된 M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의 실험 결과값을 PASS 프로그램으로서 비교 평가하기 위해 다음과 같은 방법이 도입되었다. 첫째, 시뮬레이션을 위한 유입수 및 다른 일반적인 조건은 실험시와 동일하게 하였으며, 세 공정의 주된 차이는 질산화조 후단의 반응조 형태에 있

으므로 시뮬레이션 역시 세 공정 모두 질산화 반응조 후단에 초점을 맞추어 시행하였다. 둘째, 본 시뮬레이션의 목적은 세 공정의 상대 비교에 있기 때문에 PASS 모델을 구동하기 위해 입력하여야 할 변수를 실험을 통해 일일이 구하지 않았으며 도시하수의 일반적인 성상에 기초한 값을 입력하여 공정을 모사하였다. 공정 효율 향상을 도모하기 위해서 실험 및 시뮬레이션을 통해 T-N 제거효율이 가장 높은 공정을 선택하여 PASS 프로그램을 이용하여 SRT, 최종 침전지에서 무산소 접촉조로의 반송율(recycle rate), 내부순환율(recirculation ratio), 질산화 반응조 후단의 세 반응조의 부피비를 최적화하고자 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 암모니아성 질소 및 TKN 제거 특성

암모니아성 질소 및 TKN 제거 특성은 Fig. 4 및 Fig. 5 와 같다. M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의 암모니아성 질소 제거효율은 각각 91.8, 96.6, 93.2%로 나타났으며, TKN 제거효율은 각각 89.1, 92.6, 90.4%로 관찰되었다. 여기서 주목할 만한 사실은 반응조의 호기시간이 짧다고 생각되는 M3-Dephanox 공정의 암모니아성 질소 및 TKN 제거효율이 M-Dephanox 공정보다 크다는 것이다. 즉, 종침 앞단의 무산소조(2 on Fig. 3)에서 질산화조 바로 후단의 탈질조(2 on Fig. 3)로 4Q의 내부순환을 시켜도 90% 이상의 암모니아성 질소 및 TKN 제거효율을 달성할 수 있음을 의미한다.

#### 3.2. M-Dephanox, M2-Dephanox 및 공정 및 M3-Dephanox 공정의 탈질 및 T-N 제거 특성

실험을 통해 관찰된 M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의 방류수 중의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도는 Fig. 6 (top)에 나타내었다. 예상한 대로 M3-Dephanox 공정에서 방류되는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도가 M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 각각 약 1.4 mg/L 및 3.6 mg/L 더 낮은 것을 실험을 통해 관찰 할 수 있었으며, PASS 프로그램에 의한 시뮬레이션 결과에서도 M3-Dephanox 공정이 M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 방류수 중의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도가 각각 평균 약 12.0, 9.65 mg/L 더 낮은 것을 관찰 할 수 있었다(Fig. 6, bottom). 실험 결과 M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의 방류수 중의 평균 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도는 각각 약 12.1, 14.3, 10.8 mg/L로 관찰되었다. 실험에서는 M2-Dephanox 공정이 M-Dephanox 공정에 비해 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도가 2.2 mg/L 더 높은 것으로 나타났으나 시뮬레이션 결과에서는 M2-Dephanox 공정이 M-Dephanox 공정에 비해 약 2.35 mg/L 더 낮은 것으로 나타나 서로 다른 결과를 보이고 있는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 시뮬레이션 결과에서도 나타난 바와 같이 M2-Dephanox 공정과 M-Dephanox 공정간의 방류수 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도차이가 크지 않기 때문이며 이러한 원인으로 인한 실험적 오차라 사료된다.

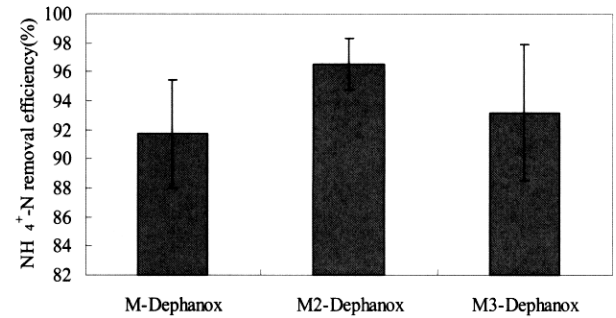
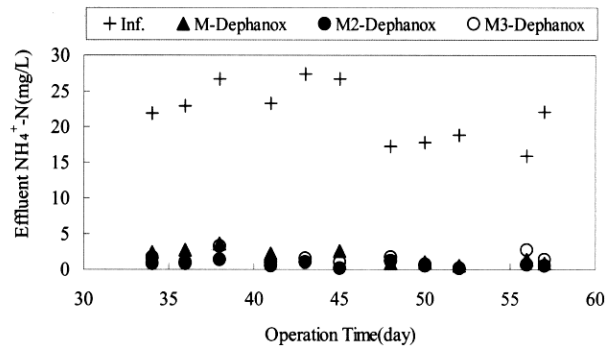


Fig. 4. Characteristics of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal of M-Dephanox, M2-Dephanox and M3-Dephanox processes.

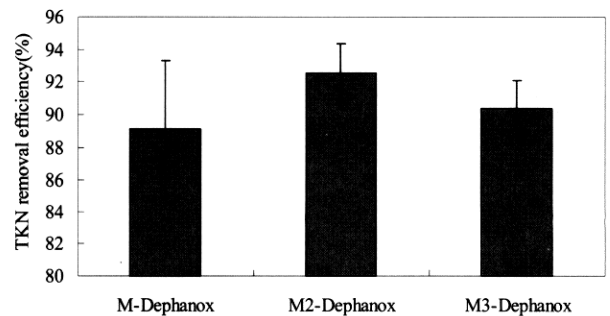
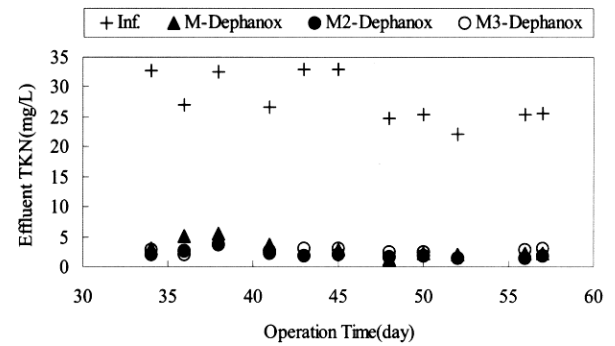


Fig. 5. Characteristics of TKN removal of M-Dephanox, M2-Dephanox and M3-Dephanox processes.

세 공정간 T-N 제거 효율도 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N와 같은 유형을 보이고 있음이 실험결과 나타났다. 실험 결과 M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의 T-N 제거효율은 각각 41.1, 38.7, 50.0%로 M3-Dephanox 공정이 M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 각각 약 8.9% 및 11.3% 더 큰 것으로 관찰되었으나 M-Dephanox 공정에 비해 M2-Dephanox 공정의 T-N 제거효율은 약 2.4% 더 낮은 것으

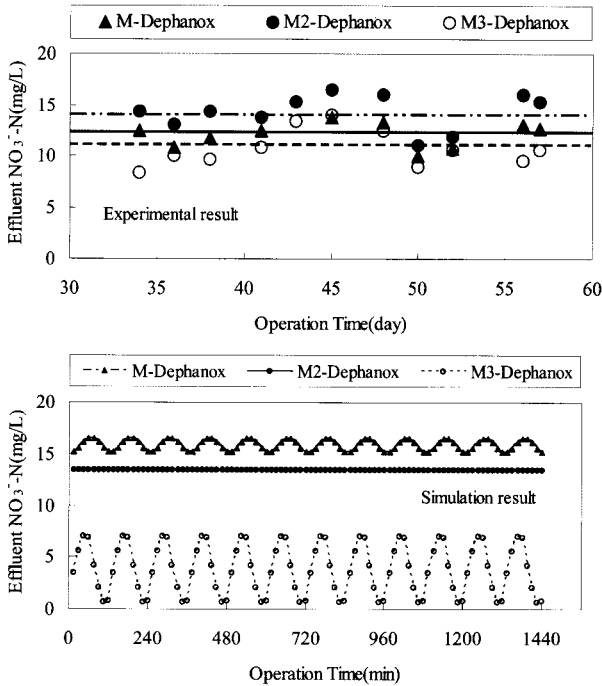


Fig. 6. Comparison of experimental results with simulation results of effluent  $\text{NO}_3\text{-N}$  of M-Dephanox, M2-Dephanox and M3-Dephanox.

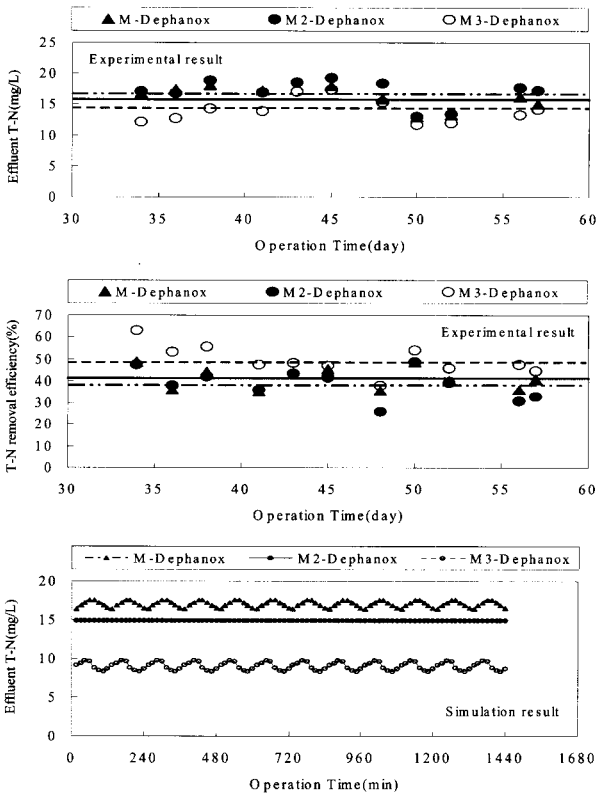


Fig. 7. Comparison of experimental results with simulation results of effluent T-N of M-Dephanox, M2-Dephanox and M3-Dephanox.

로 나타났다. PASS 프로그램에 의한 컴퓨터 시뮬레이션 결과에서도 M3-Dephanox 공정의 평균 방류수 T-N 농도가

M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 각각 약 8, 2.1 mg/L 더 낮게 나타났으나 실험 결과와는 대조적으로 M2-Dephanox 공정의 방류수 T-N 농도가 M-Dephanox 공정에 비해 약 2.1 mg/L 더 낮게 관찰되었다(Fig. 7).

본 연구에서는 전반적으로 세 공정 모두 T-N 제거효율이 낮게 관찰되고 있는데 이는 여름철 유입 하수의 낮은 C/N 비와 실험실 연구에서 탈질 반응에 수행되는 반응조의 기하학적 형태가 현장에 설치되어 있는 반응조에 비해 대기와 접하고 있는 수표면 면적이 반응조 전체 부피에 비해 상대적으로 크기 때문인 것으로 사료된다.

상기 연구 결과를 소표본에서 모평균을 검정하는 통계학적 방법인 t-검정을 통하여 M3-Dephanox 공정과 M-Dephanox의 방류수 중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도와 T-N 제거효율을 비교한 결과 M3-Dephanox 공정이 M-Dephanox 공정에 비해 방류수 중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도가 더 낮고 T-N 제거효율이 더 높음을 95% 신뢰수준에서 검증할 수 있었다(Table 3). 또한 M3-Dephanox 공정과 M2-Dephanox 공정의 방류수 중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도와 T-N 제거효율을 비교한 결과 M3-Dephanox 공정이 M2-Dephanox 공정에 비해 방류수 중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도가 더 낮고 T-N 제거효율이 더 높음을 95% 신뢰수준에서 검증할 수 있었다(Table 4).

### 3.3. 유기물 및 인 제거 특성

M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의 TCOD 제거효율은 각각 50.4, 58.9, 68.6%로, SCOD 제거효율은 59.8, 57.4, 58.8%로 관찰되었다(Table 5). SCOD 제거효율은 세 공정 모두 비슷하게 나타났으나 TCOD 제거효율은 M3-Dephanox, M2-Dephanox 및 M-Dephanox 공정 순으로 큰 값을 보이고 있음을 관찰할 수 있었다. M3-Dephanox 공정이 다른 두 공정에 비해 상대적으로 호기 시간이 짧음에도 불구하고 유기물 제거효율이 높은 원인은 산소이외에  $\text{NO}_3\text{-N}$ 를 전자 수용체로 사용하는 탈질 미생물들이 유기물 제거에 관여하였을 것으로 사료된다 (Table 5).

M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  및 T-P 제거효율은 전반적으로 낮게 관찰되었다. M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거효율은 각각 1.5, 1.9, 4.7%였으며 T-P 제거효율은 각각 16.4, 19.2, 21.9%로 매우 낮은 효율을 보여주고 있다 (Table 5).  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  및 T-P 제거효율이 이렇게 낮은 원인은 유입 하수의 농도가 낮고 인 방출시  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 영향을 받았기 때문인 것으로 사료된다. 주목할 만한 사실은 인 제거효율이 매우 낮음에도 불구하고 M3-Dephanox 공정의 인 제거효율이 M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 더 높다는 사실이다. 이러한 원인은 첫째, M3-Dephanox 공정에서 방류되는  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도가 M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 적게 방류되기 때문에 최종침전지에서 무산소 접촉조로 유입되는  $\text{NO}_3\text{-N}$  부하가 적게 되고 이로 인해 무산소 접촉조에서의 인 방출시 다른 공정에 비해 영향을 덜 받고, 둘째, M3-Dephanox 공정은 종침 앞단

**Table 3.** T-test results about numerical difference of average effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and T-N removal efficiency of M-Dephanox and M3-Dephanox processes

Parameters	Items	T-test(one-sided test)	
		Effluent NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	T-N removal efficiency
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> )
Altanative Hypothesis(H <sub>1</sub> )		(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>2</sub> > μ <sub>1</sub> )
Significance Level(α)		0.05	0.05
t <sub>α</sub> (n <sub>1</sub> +n <sub>2</sub> -2)		1.729	1.729
*S <sub>p</sub> <sup>2</sup>		2.44	37.04
**Test Statistic(t)		1.99	3.19
Critical Region (t ≥ t <sub>α</sub> (n <sub>1</sub> +n <sub>2</sub> -2))		2.44 > 1.99	3.19 > 1.729
Results		In 95% confidence	In 95% confidence
		Effluent NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N in M3-Dephanox process were lower than that in M-Dephanox process	T-N removal efficiency in M3-Dephanox process were higher than that in M-Dephanox 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 effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M-Dephanox process

μ<sub>2</sub> : Sample values of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M3-Dephanox process

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

n<sub>2</sub> : Numbers of sample of M3-Dephanox process

S<sub>1</sub> : Standard deviation of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M-Dephanox process

S<sub>2</sub> : Standard deviation of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M3-Dephanox process

X<sub>1</sub> : Average value of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M-Dephanox process

X<sub>2</sub> : Average value of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M3-Dephanox process

**Table 4.** T-test results about numerical difference of average effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and T-N removal efficiency of M2-Dephanox and M3-Dephanox processes

Parameters	Items	T-test(one-sided test)	
		Effluent NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	T-N removal efficiency
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> )
Altanative Hypothesis(H <sub>1</sub> )		(H <sub>1</sub> : μ <sub>1</sub> > μ <sub>2</sub> )	(H <sub>1</sub> : μ <sub>2</sub> > μ <sub>1</sub> )
Significance Level(α)		0.05	0.05
t <sub>α</sub> (n <sub>1</sub> +n <sub>2</sub> -2)		1.725	1.725
*S <sub>p</sub> <sup>2</sup>		3.18	47.11
**Test Statistic(t)		4.71	3.71
Critical Region (t ≥ t <sub>α</sub> (n <sub>1</sub> +n <sub>2</sub> -2))		4.71 > 1.725	3.71 > 1.725
Results		In 95% confidence	In 95% confidence
		Effluent NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N in M3-Dephanox process were lower than that in M2-Dephanox process	T-N removal efficiency in M3-Dephanox process were higher than that in M2-Dephanox 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 effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M2-Dephanox process

μ<sub>2</sub> : Sample values of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M3-Dephanox process

n<sub>1</sub> : Numbers of sample of M2-Dephanox process

n<sub>2</sub> : Numbers of sample of M3-Dephanox process

S<sub>1</sub> : Standard deviation of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M2-Dephanox process

S<sub>2</sub> : Standard deviation of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M3-Dephanox process

X<sub>1</sub> : Average value of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M2-Dephanox process

X<sub>2</sub> : Average value of effluent NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N or T-N removal efficiency of M3-Dephanox process

의 무산소 조에서 질산화조 후단의 무산소 조로 4Q의 내부 순환을 해주고 간헐 반응조에서는 1시간 간격으로 호기와 혐기 조건이 반복되기 때문에 M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 호기와 혐기가 반복되는 횟수가 더 많기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.4. 질소제거 측면에서 PASS 프로그램에 의한 M3-Dephanox 공정의 질소제거 효율 향상 연구

M3-Dephanox 공정의 T-N 제거효율이 M-Dephanox 공정 및 M2-Dephanox 공정에 비해 더 높게 관찰되었음을 앞에서 언급하였다. 본 절에서는 M-Dephanox 및 M2-Dephanox

**Table 5.** Comparison of average removal efficiencies (%) of M-Dephanox, M2-Dephanox and M3-Dephanox

Processes Conditions	M-Dephanox	M2-Dephanox	M3-Dephanox
	HRT 6hr (25°C)	HRT 6hr (25°C)	HRT 6hr (25°C)
TCODcr	50.4 (±17.5*)	58.9 (±13.3)	68.6 (±11.3)
SCODcr	59.8 (±14.4)	57.4 (±11.7)	58.8 (±13.9)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	91.8 (±3.7)	96.6 (±1.8)	93.2 (±4.7)
TKN	89.1 (±4.2)	92.6 (±1.8)	90.4 (±1.7)
T-N	41.1 (±5.4)	38.7 (±7.1)	49.6 (±6.6)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	1.5 (±3.2)	1.9 (±3.5)	4.7 (±10.2)
T-P	16.4 (±15.7)	19.2 (±14.1)	21.9 (±12.5)

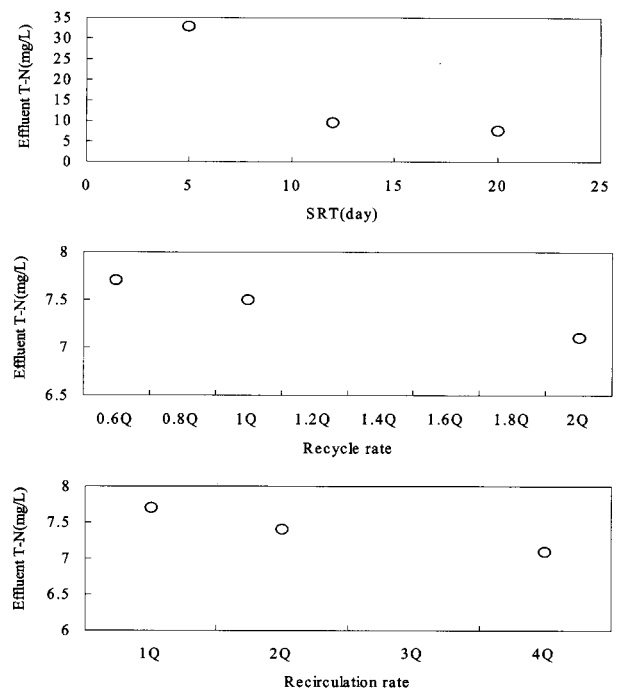
\*Standard Deviation

공정에 비해 T-N 제거 효율이 더 좋은 M3-Dephanox 공정을 대상으로 PASS 프로그램을 이용하여 질소 제거 측면에서 최적의 SRT, 침전지에서 무산소 접촉조로의 슬러지 반송율(recycle rate), 내부 순환율(recirculation rate)을 결정하고자 하였으며 더불어 최적의 T-N 제거효율을 얻을 수 있는 질산화 반응조 후단의 탈질조, 간헐조, 무산소조의 부피비를 결정하고자 하였다. SRT, 슬러지 반송율, 내부 순환율 및 부피비가 T-N 제거에 미치는 영향을 모사하기 위해 PASS 1 프로그램에 입력한 조건을 Table 6에 나타내었으며 질산화 반응조 후단의 탈질, 간헐, 무산소조의 부피비는 Table 7에 나타낸 10가지 경우를 모사하였다.

시뮬레이션 결과 M3-Dephanox 공정의 T-N 제거시 SRT의 영향이 비교적 큰 것으로 나타났다. SRT 5일에서는 방류수의 T-N 농도가 약 32.8 mg/L로 관찰된 반면 실험실 연구에서 수행하였던 SRT 12일에서는 9.6 mg/L로 그 차이가 많이 나는 것을 알 수 있었다. SRT 20일에서는 방류수 T-N 농도가 7.7 mg/L로서 SRT 12일과 큰 차이가 없는 것으로 관찰되었다(Fig. 8, top). 최종 침전지에서 무산소 접촉조로의 반송비(recycle rate) 및 내부 순환비(recirculation rate)가 방류수 T-N 농도에 미치는 영향을 모사한 결과 반송비 및 순환비가 증가할수록 방류수 T-N 농도가 감소하는 경향을 관찰할 수 있었으나 그 영향은 거의 없는 것으로 나타났다(Fig. 8, middle and bottom). 질산화 반응조 후단의 탈질, 간헐, 재포기조의 부피비(v/v, %)가 방류수 T-N 농도에 미치는 영향을 모사한 결과 실험실연구에 사용된 탈질조 : 간헐조 : 무산소조 = 36.3(%) : 36.3(%) : 27.4(%)

**Table 7.** Volume ratio of denitrification tank(Den-R), intermittently aerated tank(Inter-R) and anoxic tank (Anoxic-R) used in simulation

	Den-R	Inter-R	Anoxic-R
Case 1	36.3	36.3	27.4
Case 2	60.1	36.3	3.6
Case 3	36.3	60.1	3.6
Case 4	36.3	29.1	34.6
Case 5	29.1	36.3	34.5
Case 6	25.5	36.3	38.2
Case 7	19.4	36.3	44.3
Case 8	21.9	36.3	40.8
Case 9	29.1	32.7	38.2
Case 10	21.9	39.9	38.2



**Fig. 8.** Effects of SRT, recycle rate and recirculation rate on T-N removal of M3-Dephanox process.

에서 방류수 T-N 농도가 7.06 mg/L로 관찰되어 최적 조건인 29.1(%) : 32.7(%) : 38.2(%)에서 방류수 T-N 농도인 6.79 mg/L와 거의 값이 같은 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 9). 따라서 실험실 연구에서 사용된 반응조 재원을 pilot plant 연구나 실제 현장 적용시에 그대로 사용하면 될 것으로 판단되나 최종침전지에서의 침전 효율을 향상시키기 위해 간헐조와 무산소조를 줄이고, 줄인 부피만큼 무산소조 후단에 재포기조를 하나 더 설치하는 것이 더 타당할 것으로 사료된다.

**Table 6.** Simulation condition to observe effects of SRT, recycle rate, recirculation rate and volume ratio

	HRT(hr)	SRT(day)	Recycle rate	Recirculation rate	Volume ratio(%)
Effect of SRT	6	5 ~ 20	0.6Q	4Q	36.3 : 27.4 : 27.4
Effect of recycle rate	6	20	0.6Q ~ 2Q	4Q	36.3 : 27.4 : 27.4
Effect of recirculation rate	6	20	2Q	1Q ~ 4Q	36.3 : 27.4 : 27.4
Effect of volume ratio	6	20	2Q	4Q	Table 5-7

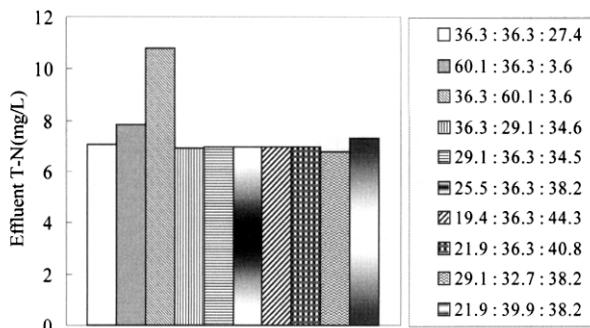


Fig. 9. Effluent T-N according to various volume ratios of Den-R, Inter-R and Anox-R.

#### 4. 결론

도시하수 처리시 M-Dephanox 공정의 질소 처리 효율을 향상시키기 위한 M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험실 연구에서 M-Dephanox 공정을 비교 군으로 하여 이를 개선한 M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정을 상호 비교 연구한 결과 T-N 제거 측면에서 M3-Dephanox 공정이 M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 각각 약 8.9% 및 11.3% 더 높은 것을 관찰할 수 있었으며 이는 공정 개선을 통한 탈질 효율이 증대되었기 때문이다. 방류수 중의  $\text{NO}_3^-$ -N 농도는 M3-Dephanox 공정이 M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 각각 1.4 mg/L 및 3.6 mg/L 더 낮은 것을 관찰할 수 있었다.
- 2) M-Dephanox, M2-Dephanox 및 M3-Dephanox 공정의  $\text{NH}_4^+$ -N 제거효율은 각각 91.8, 96.6, 93.2%로 모두 높은 제거효율을 관찰할 수 있었다.
- 3) PASS 시뮬레이터에 의한 실험 결과 검증에서도 실험 결과와 마찬가지로 M3-Dephanox 공정이 M-Dephanox 및 M2-Dephanox 공정에 비해 더 높은 T-N 제거효율을 관찰할 수 있었다.
- 4) PASS 시뮬레이터에 의한 M3-Dephanox 공정의 최적화 연구에서 SRT 변화에 따른 T-N 제거효율은 비교적 큰 차이를 나타내고 있는 것을 관찰할 수 있었으나 최종침전지에서 무산소 흡착조로의 반송율(recycle rate)과 최종 침전지 앞단의 무산소조에서 질산화 후단의 탈질조로의 내부 순환율(recirculation rate)의 비는 T-N 제거 효율에 큰 영향을 주지 않는 것으로 관찰되었다. 반송율 및 내부 순환율이 증가할수록 T-N 제거효율은 작으나 증가하는 경향을 관찰할 수 있었다. 또한 탈질조, 간헐조, 무산소조의 부피가 T-N 제거에 미치는 영향을 관찰한 결과 실험실 연구에 사용된 탈질조 : 간헐조 : 무산소조 = 36.3(%) : 36.3(%) : 27.4(%)에서 방류수 T-N 농도가 7.06 mg/L로 관찰되어 최적 조건인 29.1(%) : 32.7(%) : 38.2(%)에서 방류수 T-N 농도인 6.79 mg/L와 거의 값이 같음을 알 수 있었다.

#### 사 사

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2005).

#### 참고문헌

- 류홍덕, 민경국, 이상일, 유입부하가 DEPHANOX 및 Modified-DEPHANOX 공정에 미치는 영향, *한국물환경학회지*, **20**(1), pp. 24-31 (2004a).
- 류홍덕, 민경국, 이상일, 온도 및 수리학적 체류시간이 Modified DEPHANOX 공정에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **26**(3), pp. 313-320 (2004b).
- Bortone, G., Marsili, S., Tilche, A. and Wanner, J., Anoxic Phosphate Uptake in the Dephanox Process, *Wat. Sci. Tech.*, **40**(4~5), pp. 177-185 (1999).
- 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).
- Hu, Zhi-rong, Wentzel, M. C. and Ekama, G. A., External Nitrification in Biological Nutrient Removal Activated Sludge System, *Water S. A.*, **26**(2), pp. 225-238 (2000).
- Kim, Y., Mikawa, T., Tanaka, K. and Emori, H., Development of Novel Anaerobic/Aerobic Filter Process for Nitrogen Removal Using Immobilized Nitrifier Pellets, *Wat. Sci. Tech.*, **36**(12), pp. 151-158 (1997).
- Lee, H. S., Park, S. J. and Yoon, T. I., Wastewater Treatment in a Hybrid Biological Reactor Using Powdered Minerals: Effects of Organic Loading Rates on COD Removal and Nitrification, *Process Biochemistry*, **38**, pp. 81-88 (2002).
- Liu, J., Li, W., Wang, X., Liu, H. and Wang, B., Removal of Nitrogen from Coal Gasification by Nitrosification and Denitrosification, *Wat. Sci. Tech.*, **38**(1), pp. 39-46 (1998).
- 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, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(1~2), pp. 315-322 (1996b).
- Liu, J., Wang, B., Li, W., Jin, C., Cao, X. and Wang, L., Removal of Nitrogen from Coal Gasification and Coke Plant Wastewaters in A/O Submerged Biofilm-Activated Sludge(SBF-AS) Hybrid System, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(10), pp. 17-24 (1996a).
- Misra, C. and Gupta, S. K., Hybrid Reactor for Priority Pollutant Trichloroethylene Removal, *Wat. Res.*, **35**(1), pp. 160-166 (2001).
- Nurdan, B. and Ayse, F., Concentrated Wastewater Treatment Studies Using an Anaerobic Hybrid Reactor, *Process Biochemistry*, **38**, pp. 771-775 (2002).
- Pedro, R. C., Alejandro, P. F. and Faustino, S., Improved Performance of a Hybrid Design over an Anaerobic Filter for the Treatment of Dairy Industry Wastewater at Laboratory Scale, *Journal of Fermentation and bioengineering*, **79**(3), pp. 270-272 (1995).
- 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, *Wat. Res.*, **30**(7), pp. 1573-1584 (1996).
- Tarek, A. E., Vladimir, S., Grietje, Z. and Gatez, L., Low Temperature Pre-Treatment of Domestic Sewage in an Anaerobic Hybrid or an Anaerobic Filter Reactor, *Bioresource Technology*, **82**, pp. 233-239 (2002).
- Wang, J., Shi, H. and Qian, Y., Wastewater Treatment in a Hybrid Biological Reactor (HBR): Effect of Organic Loading Rates, *Process Biochemistry*, **36**, pp. 297-303 (2000).
- Wanner, J., Cech, J. S. and Kos, M., New Process Design for Biological Nutrient Removal, *Wat. Sci. Tech.*, **25**(4~5), pp. 445-448 (1992).