大韓環境工學會誌 · 논문 · pp. 206~214. 2005.

부유 및 부착성장 미생물을 이용하는 공정의 유기물, 질소 및 인 제거 특성 비교

류홍덕† · 이상일

충북대학교 공과대학 환경공학과

(2004년 11월 22일 접수, 2005년 2월 7일 채택)

Comparison of Removal Characteristics of Organic Matter, Nitrogen and Phosphorus Between Suspended-Growth and Attached-Growth Biological Processes

Hong-Duck Ryu† · Sang-Ill Lee

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

ABSTRACT : This study was initiated to evaluate efficiencies of suspenced-growth processes(CAS; Conventional Activated Sludge, MLE; Modified Ludzack-Ettinger) and hybrid process(Modified-Dephanox) on removal of organic matter(C), nitrogen(N) and phosphorus(P) in municipal wastewater. M-Dephanox process was designed to improve the performance of Dephanox process on denitrification efficiency. As the results, removal efficiencies of total chemical oxygen demand(TCOD), total nitrogen(T-N) and total phosphorus(T-P) in M-Dephanox process, which is hybrid process, were 12,3, 18.6 and 28.2% higher than those in MLE, which is suspended-growth process. The better removal efficiencies of TCOD, T-N and T-P in M-Dephanox than those in MLE result that M-Dephanox is not only hybrid or multi-sludge process but also process using biosorption mechanism which is possible to use organics in denitrification, effectively. Ammonia removal efficiency in nitrification reactor of M-Dephanox was 96.7% at short hydraulic retention time(HRT) of 2 hr which was 3 hr more short HRT than that(HRT 5 hr) reported in other related papers. This indicates that M-Dephanox process can reduce HRT of whole process.

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

요약 : 본 연구는 도시하수 처리시 부유성장 미생물만을 이용하는 표준 활성슬러지 공정(Conventional Activated Sludge; CAS) 및 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 상호 비교 검토하고자 하였다. M-Dephanox 공정은 기존 Dephanox 공정의 단점을 극복하기 위하여 고안된 공정으로서 기존 Dephanox 공정에 비해 탈질 효율을 증가시킬 수 있다. 연구 결과 부유 성장 미생물을 이용하는 MLE 공정에 비해 하이브리드형 공정인 M-Dephanox 공정의 TCOD, T-N 및 T-P 제거효율이 각각 12.3, 18.6, 28.2% 더 높게 관찰 되었다. M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 유기물 및 질소 제거 효율이 더 높은 원인은 M-Dephanox 공정이 하이브리드 공정이자 다단 슬러지 공정(multi-sludge)인 동시에 생흡착(biosorption)을 이용한 효과적인 유기물 이용 기작이 있기 때문이다. M-Dephanox 공정의 질산화 반응조에서의 암모니아성 질소 제거효율은 약 2hr의 수리학적 체류시간에서 약 96.7%로 나타나 Dephanox 공정과 관련한 기존 문헌에서 보고된 5 hr의 체류시간 보다 3 hr 짧은 수리학적 체류시간에서도 높은 암모니아성 질소 제거효율을 관찰 할 수 있어 전체 공정의 수리학적 체류시간을 줄이는데 커다란 역할을 할 것으로 기대된다.

주제어 : 도시하수, 부유성장 미생물, 하이브리드, 다단 슬러지, MLE, M-Dephanox, 수리학적 체류시간, 질산화, 탈질

1. 서 론

우리나라의 도시하수 처리에 있어 2003년 말 기준으로 표준활성슬러지(Conventional Activated Sludge, CAS) 공정을 비롯하여 72 %가 유기물만을 처리 대상으로 운영되고 있다.[1] 하지만 하수처리시설 방류수의 질소 및 인의 기준 농도가 낙동강은 2004년부터, 금강 · 영산강은 2005년부터 각각 20 및 2 mg/L로 예고되어 있으며[2] 게다가 예고된 질소 및 인의 농도는 미국등 선진국의 유출수 기준(질소: 3~10 mg/L; 인: 0.2~1.0 mg/L)에 비해 매우 높은 편으로서 쾌적한 환경 유지와 수서 생태계의 보호를 위해서는 질소 및 인의 규제 농도가 조만간 선진국 수준 또는 총질소 및 총인의 농도가 각각 10 및 1.0 mg/L 이하로 강화 될 것이 예상된다. 따라서 기존 도시하수의 생물학적 처리공정인 표준활성슬러지 공정을 영양염류 처리공정으로 전환하는 것은 현시점에서 매우 시급한 과제라 할 수 있다.

현재 우리나라 하수처리장의 영양염류 처리 공정으로서 약 50% 이상이 외국에서 도입된 Anoxic/Oxic 계열(Modified Ludzack-Ettinger; MLE-type) 공정인 것으로 보고되고 있다.[1] 하지만 외국과는 달리 우리나라의 경우에는 질소

† Corresponding author
E-mail: nanumenv@hanmail.net
Tel: 043-261-2469 Fax: 043-272-2469

및 인 제거에 필요한 유기물의 비인 C/N 비가 낮아 영양염류 제거에 다소 어려움이 있으며 처리해야 할 하수의 양은 많은데 비해 처리장 부지가 부족하여 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)을 외국의 경우처럼 길게 운영할 수 없는 특징을 가지고 있다. 특히 외국에서 개발된 기술을 국내에 도입하여 적용하는 경우 설계인자의 변경 등 기술적인 검토가 사전에 충분히 이루어져야 하는 문제점을 가지고 있다.

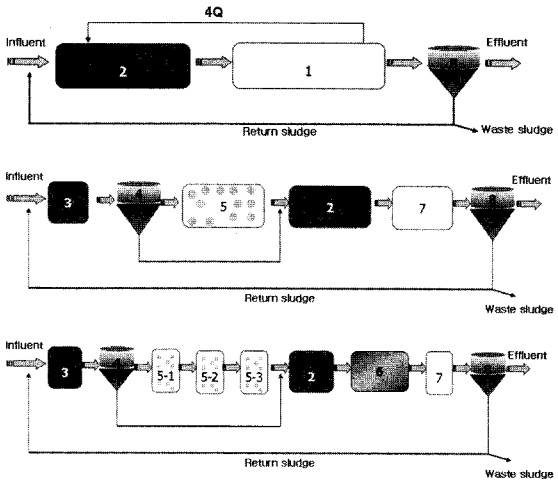
우리나라의 하수처리장을 영양염류 처리장으로 전환하기 위해서는 상기에서도 언급한 바와 같이 짧은 수리학적 체류시간(HRT)에서도 영양염류 처리가 가능해야 하며 겨울철과 같이 온도가 낮고 유입 부하가 심할 경우에도 처리가 원활하게 이루어지는 공정이 바람직하다.

낮은 C/N 비와 온도, 수리학적 체류시간 및 충격부하같은 외부조건을 극복하기 위해서는 부유성장(suspended growth) 미생물만을 이용한 단일 슬러지 공정(single-sludge system; e.g. MLE process)보다는 부유성장 미생물과 부착성장(attached growth) 미생물을 같이 이용하는 다단 슬러지 공정(multi-sludge system) 혹은 하이브리드(hybrid)형 공정이 바람직하리라 사료된다. 부착성장 미생물을 이용할 경우 부유성장 미생물을 이용하는 것에 비해 온도 및 충격부하에 강하며 수리학적 체류시간이 짧을 경우에도 안정적인 처리가 가능하다는 장점이 있다.[3~16]

부착성장 미생물을 이용한 대표적인 공정으로 Dephanox 공정(Fig. 1, middle)을 들 수 있다. Dephanox 공정은 다단 슬러지 공정(multi-sludge system) 혹은 하이브리드(hybrid) 공정으로서 질화박테리아가 독립된 반응조에서 질산화를 수행하기 때문에 전체 공정의 제한인자(rate-limiting factor)로 작용하는 질산화 반응시 소요되는 수리학적 체류시간을 줄일 수 있으며[17~19] 공정 운영에 필요한 산소의 대부분을 질산화 반응시에만 이용하고 인 제거시에는 질산염을 전자수용체로 이용하기 때문에 전체 공정에 소요되는 산소의 양을 줄일 수 있다.[16] 또한 유기물을 활성슬러지에 흡착시켜 탈질에 바로 활용할 수 있기 때문에 단일 슬러지 공정에서처럼 산화에 의한 유기물 손실을 최소화시킬 수 있고[16~20] 우리나라 하수와 같이 낮은 C/N 비를 가진 하수 처리시 이용하기에 매우 적절한 공정이라 할 수 있다.

하지만 Dephanox 공정은 1차 고액분리조(4 on Fig. 1)에서 탈질조(2 on Fig. 1)로 유입되는 유기질소 및 암모니아성 질소가 재포기조(7 on Fig. 1)에서 암모니아성 질소로 분해되거나 질산화되어 이들이 처리되지 못하고 그냥 방류되는 근본적인 문제를 지니고 있다.[21,22]

본 연구에서는 이러한 Dephanox 공정의 문제점을 개선한 하이브리드 타입 공정인 Modified-Dephanox 공정과 현재 우리나라의 하수처리장의 대부분을 차지하고 있는 부유성장(suspended-growth) 미생물을 이용하는 표준활성슬러지(Conventional Activated Sludge; CAS) 공정 및 하수처리장 upgrade 시 A/O 계열로서 널리 사용되는 MLE 공정을 상호 비교하고자 하였다.



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

Fig. 1. Schematic diagrams of MLE(top), DEPHANOX(middle) and M-DEPHANOX(bottom) processes.

Table 1. Average influent characteristics

Parameter	Concentration(mg/L)
$TCOD_{Cr}$ (mg/L)	217.2 ± 30.8*
$SCOD_{Cr}$ (mg/L)	96.6 ± 21.2
TKN (mg/L)	42.0 ± 7.4
NH_4^+-N (mg/L)	31.5 ± 4.0
T-P (mg/L)	6.4 ± 1.7
PO_4^{3-}-P (mg/L)	2.5 ± 0.9
$TCOD_{Cr}$/TKN	5.2

* Standard Deviation

2. 실험재료 및 방법

2.1. 도시하수의 성상

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

2.2. 표준활성슬러지(CAS), MLE 공정 및 M-DEPHANOX 공정 운영

본 연구에서는 부유성장 미생물(suspended-growth bacteria)을 이용하는 공정인 우리나라 하수처리장에서 널리 사용되는 표준활성슬러지(Conventional Activated Sludge; CAS) 공정 및 하수처리장 upgrade시 A/O 계열로서 널리 사용되는 MLE(Fig. 1, top) 공정과, 부유성장 미생물과 부착성장 미생물(attached-growth bacteria)을 동시에 이용하는 M-Dephanox (Modified-Dephanox) 공정을 상호 비교하였다. M-Dephanox

Table 2. Operational parameters of conventional activated sludge, MLE and M-Dephanox processes in lab-scale study

	CAS			MLE			M-Dephanox		
	Unit	Value	Volume ratio(%)	Unit	Value	Volume ratio(%)	Unit	Value	Volume ratio(%)
Volume of aerobic tank(8 hr*)	L	10	100				None		
Volume of anoxic tank(4 hr)	None			L	10	50			
Volume of aerobic tank(4 hr)				L	10	50	None		
Volume of anoxic contact tank(0.59 hr)	None			None			L	3.89	7.33
Volume of downstream settler	None			None			L	15.98	
Volume of first nitrification tank(1.07 hr)	None			None			L	7.10	13.38
Volume of second nitrification tank(1.07 hr)	None			None			L	7.10	13.38
Volume of third nitrification tank(1.07 hr)	None			None			L	7.10	13.38
Volume of anoxic tank(1.53 hr)	None						L	10.13	19.10
Volume of intermittent aeration tank(1.53 hr)	None			None			L	10.13	19.10
Volume of post-aeration tank(1.15 hr)	None			None			L	7.60	14.33
Return sludge flow rate	Q	1		Q	1		Q	1	
Internal recirculation rate	None			Q	4		None		
Activated bypass flow rate	None			None			Q	1	
HRT	Hour	8		Hour	8		Hour	8	
SRT	Day	12		Day	12		Day	12	
Temperature	℃	25		℃	25		℃	25	

*Hydraulic Retention Time(HRT)

공정(Fig. 1, bottom)은 하이브리드(hybrid) 공정 혹은 two-sludge 공정으로 불리우는 기존 Dephanox 공정의 단점을 보완한 공정이다. 즉, 기존 Dephanox 공정(Fig. 1, middle)의 재포기 반응조(7 on Fig. 1)를 간헐포기조(6 on Fig. 1, bottom)와 재포기조(6 on Fig. 1, bottom)로 분할함으로서 질소 처리효율을 향상시키고자 하였다. 실험에 사용된 기존 활성슬러지 공정, MLE 공정 및 M-Dephanox 공정의 개략도는 Fig. 1과 같으며 각 공정의 운영 조건은 Table 2와 같다. 각 공정의 수리학적 체류시간(HRT) 및 미생물 체류시간(Sludge Retention Time, SRT)은 각각 8 hr 및 12 day (일)로 운영하였으며 운영기간동안 반응조의 온도는 25℃로 일정하게 유지하였다. 최종침전지에서의 슬러지 반송율은 세 공정 모두 유입 유량과 같은 비율인 1 Q로 운영하였다. MLE 공정의 경우 호기조에서 무산소조로의 내부순환비는 4 Q로 운영하였으며, M-Dephanox 공정의 경우 1차 고액분리조에서 무산소조(2 in Fig. 1)로의 슬러지 반송은 1 Q로 운영하였다. 표준활성슬러지 공정 및 MLE 공정의 각 반응조에는 C 하수종말처리장의 활성슬러지를 식종하여 부유성장 상태로 운영하였으며, M-Dephanox 공정의 경우 질산화 반응이 일어나는 5-1, 5-2, 5-3 반응조를 제외한 3, 2, 6, 7 반응조에 C시 하수종말처리장의 활성슬러지를 식종하고 5-1, 5-2, 5-3 반응조에는 유동상 메디아를 충진하여 하이브리드(hybrid) 형 혹은 two-sludge 시스템 방식으로 운영하였다. 유동상 메디아는 cubic type의 Linpor (size: 12×12×15 mm)를 사용하였으며 각 반응조의 Linpor 메디아 충진율은 약 18%로 하였다. 충진율을 18%로 한 이유는 P 사의 "폐타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술"에서 담체 충진율을 10~20%로 한 것을 근거로 하였다.[23] M-Dephanox 공정에서 질산화조를 5-1, 5-2, 5-3으로 분할하여 운영한 이유는 원활한 질산화를 위한 메디아 충진율과 반응조 부피를 대략적으로 관찰하기 위해서였다. M-Dephanox 공정의 간헐포기조의 호기/비포기 시간은 1 hr/1 hr으로 운영하였다. 세 공정 모두 실험기간동안 지속적으로(연속적으로) 유입수를 유입시켰으며 모든 결과 해석은 공정이 정상상태에 도달하였을 때 행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거 특성

부유성장 미생물을 이용한 표준활성슬러지(CAS) 공정 및 MLE 공정과 부유성장 미생물과 부착성장 미생물을 동시에 이용하는 하이브리드(hybrid) 공정(M-Dephanox 공정)의 유기물 제거 특성을 비교 관찰한 결과 부유성장 미생물과 부착성장 미생물을 동시에 이용하는 M-Dephanox 공정의 유기물 제거가 CAS 공정 및 MLE 공정에 비해 더 안정적이며 높은 효율을 보이고 있음이 관찰되었다. 평균 총유기물(TCOD) 및 용존유기물(SCOD) 제거효율의 경우 M-Dephanox 공정의 경우 각각 약 91.3, 82.3%인데 비해 CAS 공정은 73.0, 67.5%, MLE 공정은 79, 69.3%로 관찰되어 하이브리드 공정이 부유성장 미생물만을 이용하는 공정보다 TCOD의 경우 12.3~18.3%, SCOD는 13.0~14.8% 더 높은 제거

효율을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 2). M-Dephanox 공정이 표준활성슬러지 공정 및 MLE 공정에 비해 TCOD 제거 효율이 높은 것은 M-Dephanox 공정이 다른 공정에 비해 종침에서의 슬러지 침전성(SVI; Sludge Volume Index)이 양호했기 때문인 것으로 사료된다.[24~27]

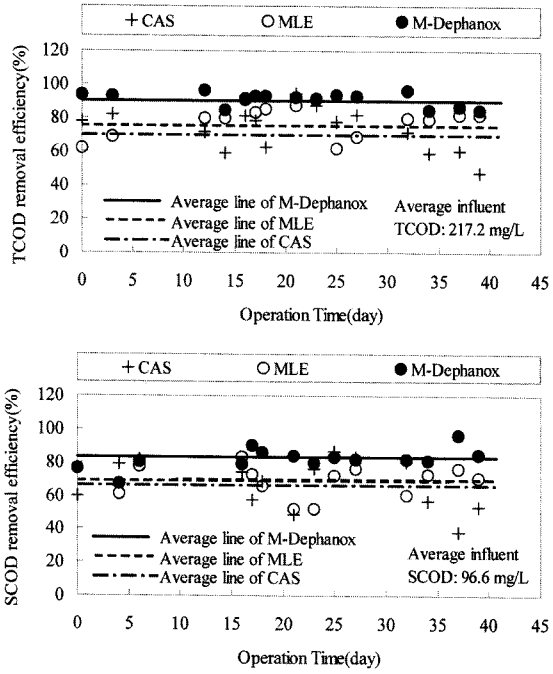


Fig. 2. TCOD and SCOD removal efficiencies between suspended-growth processes(CAS and MLE) and hybrid process(M-Dephanox).

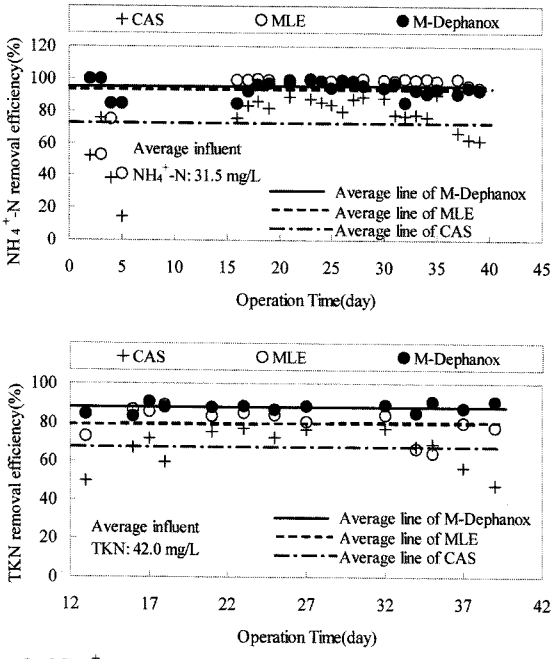


Fig. 3. NH_4^+-N and TKN removal efficiencies between suspended-growth processes(CAS and MLE) and hybrid process(M-Dephanox).

3.2. 암모니아성 질소(NH_4^+-N) 및 TKN 제거 특성

부유성장 미생물을 이용한 표준활성슬러지(CAS) 공정 및 MLE 공정과 부유 및 부착성장 미생물을 동시에 이용하는 하이브리드 공정(M-Dephanox)의 암모니아성 질소 및 TKN 제거 특성은 Fig. 3과 같다. 실험결과 평균 암모니아성 질소제거효율은 MLE 공정과 M-Dephanox 공정이 각각 93.4 및 94.0%로 거의 차이가 없는 것으로 나타났으나 질산화 효율이 좋을 것으로 예상되었던 표준활성슬러지 공정의 암모니아성 질소제거 효율은 약 74.4%로 MLE 공정 및 M-Dephanox 공정에 비해 상대적으로 낮게 관찰되었다. TKN 제거 특성은 암모니아성 질소 제거 효율과는 조금 다른 특징을 보이고 있다. 암모니아성 질소 제거 효율의 경우 MLE 공정과 M-Dephanox 공정 차이가 거의 없는 것에 비해 TKN의 경우 M-Dephanox 공정이 MLE 공정보다 약 9% 처리효율이 더 높은 것으로 나타나고 있다. 이는 유기물 제거특성에서 언급한 바와같이 M-Dephanox 공정이 다른 공정에 비해 종침에서의 슬러지 침전성(SVI)이 양호하기 때문인 것으로 사료된다. 바꿔 말하면 MLE 공정은 M-Dephanox 공정에 비해 종침에서의 침전성이 떨어지기 때문에 유출되는 고형물 농도가 더 높고 이로 인한 유기질소 증가로 인해 TKN 제거효율이 큰 폭으로 감소하는 것이라 사료된다. CAS, MLE, M-Dephanox 공정의 TKN 제거효율은 각각 66.6, 79.9, 87.8 %로서 M-Dephanox 공정이 부유성장 미생물만을 이용하는 공정보다는 처리효율면에서 약 8~21% 더 우수한 것으로 관찰되었다.

3.3. 탈질 및 T-N 제거 특성

NO_3^--N 농도는 하이브리드 공정인 M-Dephanox 공정에서 약 6.8 mg/L, MLE 공정에서 약 12.2 mg/L, CAS 공정에서는 약 26.3 mg/L로 관찰되어 부유성장 미생물과 부착성장 미생물을 동시에 이용하는 M-Dephanox 공정이 가장 낮은 것으로 나타났다(Fig. 4, top). C/N 비가 낮은 하수에서 M-Dephanox 공정이 MLE 공정보다 탈질 효율이 더 좋은 이유는 첫째, 접촉조(3 on Fig. 1)에서 활성슬러지에 의해 유기물이 흡착된 후 1차 분리조(4 on Fig. 1)에서 고액분리된 활성슬러지가 유기물을 흡착한 상태로 탈질조(2 on Fig. 1)로 유입되어 질산화조(5-1, 5-2, 5-3 on Fig. 1)에서 탈질조로 유입된 NO_3^--N의 탈질에 기여했기 때문이며, 둘째는 1차 분리조에서 활성슬러지와 함께 탈질조로 유입된 유기질소 및 암모니아성 질소가 간헐포기조(6 on Fig. 1)에서 질산화 된 후 탈질이 되었기 때문이다. 여기서 간헐포기조는 기존 Dephanox 공정의 재포기조를 간헐포기조와 재포기조로 분할하여 생긴 M-Dephanox 공정의 핵심이라 할 수 있다. 즉 간헐포기조를 둠으로서 1차분리조에서 활성슬러지와 함께 탈질조로 유입된 유기질소 및 암모니아성 질소가 간헐포기조에서 질산화와 탈질을 거치면서 보다 완벽한 질소 처리를 할 수 있는 것이다. 이러한 영향은 T-N

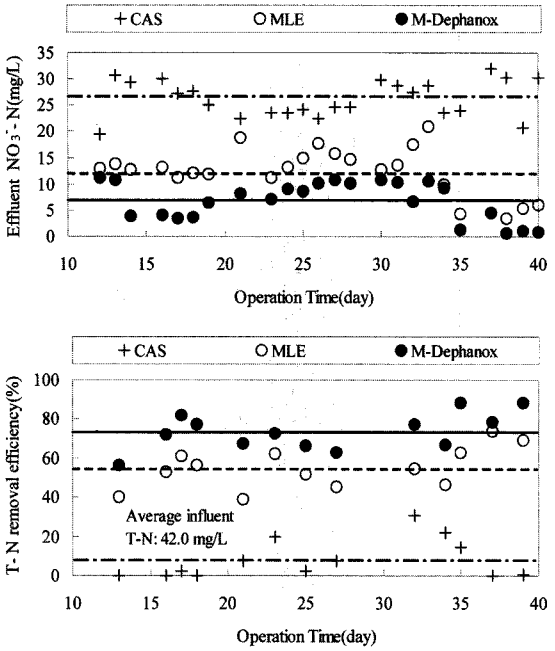


Fig. 4. Denitrification and T-N removal efficiency between suspended-growth processes(CAS and MLE) and hybrid process(M-Dephanox).

제거에도 그대로 반영되고 있다. Fig. 4(bottom)에 의하면 M-Dephanox 및 MLE 공정의 평균 T-N 제거효율은 각각 73.6 및 55.0%, 방류수 중의 평균 T-N 농도는 각각 11.9, 20.4 mg/L로 M-Dephanox 공정의 질소제거효율이 MLE 공정에 비해 약 19% 높은 것을 관찰할 수 있었다. M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 T-N 제거효율이 높다는 것은 M-Dephanox 공정의 NO_3^--N의 제거효율이 MLE 공정보다 좋음을 의미하며 유기물을 흡착하여 이를 탈질에 활용하는 M-Dephanox 공정이 전탈질 공정으로 많이 사용되는 MLE 공정보다 유기물 활용측면에서 더 유리함을 의미하는 것이다. 상기 자료를 소표본에서 모평균을 검정하는 통계학적인 방법인 t-검정을 통하여 분석한 결과 유의수준 $\alpha = 0.05$일 때 검정통계량 t값이 t-분포표 값보다 크게 나타나 95% 신뢰범위에서 M-Dephanox 공정이 CAS 및 MLE 공정에 비해 방류수 중의 NO_3^--N 농도는 더 낮고 T-N 제거 효율은 더 높음을 검증할 수 있었다(Table 3).

3.4. 인 제거 특성

PO_4^{3-}-P 제거 특성은 Fig. 5와 같으며 부유 및 부착 성장 미생물을 동시에 이용하는 M-Dephanox 공정과 부유성장 미생물만을 이용하는 MLE 및 CAS 공정의 PO_4^{3-}-P 제거율은 각각 72.0, 46.9, 8.1%로 나타나 MLE 공정에 비해 M-Dephanox 공정의 PO_4^{3-}-P 제거율이 약 25.1% 더 높은 것으로 나타났다. T-P 제거특성도 PO_4^{3-}-P 제거특성과 마찬가지로 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 T-P 제거효율이 더 높은 것으로 관찰되었으며 이때 M-Dephanox, MLE 및 CAS 공정의 T-P 제거효율은 각각 71.3, 43.1, 31.0%로 나타나 M-Dephanox 공정의 T-P 제거효율이 MLE 공정보다 약 28.2% 더 높은 것으로 관찰되었다(Fig. 5). M-Dephanox 공정의 인 제거 효율이 MLE 공정에 비해 높은 원인은 무산소 접촉조(3 on Fig. 1, bottom)에서의 인 방출, 탈질조(2 on Fig. 1, bottom)에서 일어나는 무산소 조건에서 인 흡수(anoxic P-uptake)와 후속되는 간헐조 및 호기조에서 인 방출 및 흡수가 반복되어 인의 과잉 섭취가 일어나기 때문인 것으로 사료된다.

Table 4는 본 연구에서 연구한 CAS, MLE 및 M-Dephanox 공정의 유기물, 질소 및 인 제거효율을 알기쉽게 도표로 나타낸 것이다.

Table 3. Results of T-test on the numerical difference of average NO_3^--N and T-N removal efficiencies in MLE and M-Dephanox processes

	T-test(one-sided test)	
	NO_3^--N in effluent	T-N removal efficiency
	Compariosn of MLE & M-Dephanox	Compariosn of MLE & M-Dephanox
Null Hyphothesis(H_0)	(H_0 : $\mu_1 = \mu_2$)	(H_0 : $\mu_1 = \mu_2$)
Altanative Hyphothesis(H_1)	(H_1 : $\mu_1 > \mu_2$)	(H_1 : $\mu_1 > \mu_2$)
Significance Level(α)	0.05	0.05
$t_\alpha(n1+n_2-2)$	1.680	1.711
*Sp^2	17.64	101.82
**Test Statistic(t)	4.43	4.70
Critical Region($t \geq t\alpha$ (n_1+n_2-2)	4.43 > 1.680	4.70 > 1.711
Results	In 95% confidence	In 95% confidence
	NO_3^--N in M-Dephanox process were lower than that in MLE process	T-N removal efficiency in M-Dephanox process were higher than that in MLE process

where

μ_1 : Sample values of NO_3^--N in MLE effluent or T-N removal efficiency in M-Dephanox process

μ_2 : Sample values of NO_3^--N in M-Dephanox effluent or T-N removal efficiency in MLE process

n_1 : Numbers of sample of MLE or M-Dephanox process

n_2 : Numbers of sample of M-Dephanox or MLE process

S_1 : Standard deviation of NO_3^--N in MLE effluent or T-N removal efficiency in M-Dephanox process

S_2 : Standard deviation of NO_3^--N in M-Dephanox effluent or T-N removal efficiency in MLE process

X_1 : Average value of NO_3^--N in MLE effluent or T-N removal efficiency in M-Dephanox process

X_2 : Average value of NO_3^--N in M-Dephanox effluent or T-N removal efficiency in MLE process

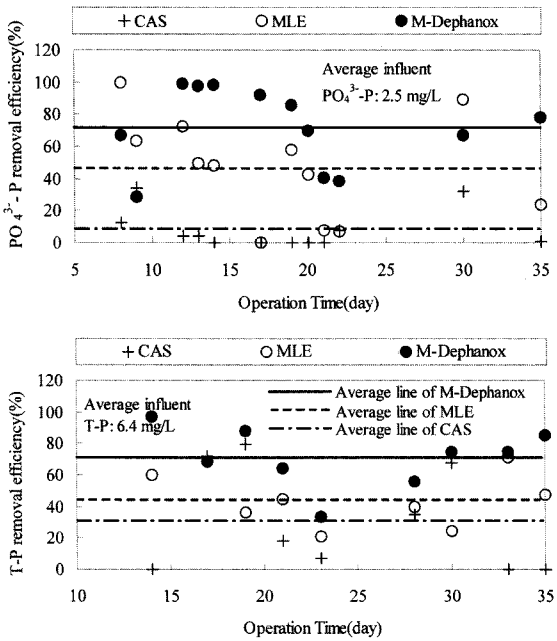


Fig. 5. PO_4^{3-}-P and T-P removal efficiencies between suspended-growth processes(CAS and MLE) and hybrid process(M-Dephanox).

Table 4. Comparison of average efficiencies of CAS, MLE and M-Dephanox processes

	Operation conditions		
	HRT : 8 hr / SRT : 12 day / Temperature : 25℃		
	Removal efficiencies(%)		
	CAS	MLE	M-Dephanox
$TCOD_{Cr}$	73.0 ± 12.8*	79.0 ± 9.3	91.3 ± 4.1
$SCOD_{Cr}$	67.5 ± 15.0	69.3 ± 9.6	82.3 ± 6.7
NH_4^+-N	74.4 ± 18.0	93.4 ± 15.3	94.0 ± 4.9
TKN	66.6 ± 10.2	79.9 ± 7.7	87.8 ± 2.4
T-N	8.2 ± 10.2	55.0 ± 10.6	73.6 ± 9.6
PO_4^{3-}-P	8.1 ± 12.5	46.9 ± 32.4	72.0 ± 24.8
T-P	31.0 ± 33.6	43.1 ± 17.0	71.3 ± 19.0

*Standard Deviation

3.5. M-Dephanox 공정의 유기물 흡착 효율 및 부착성 질화균에 의산 질산화 특성

유동상 메디아가 충진된 질화조(5-1, 5-2, 5-3 on Fig. 1, bottom)에서의 질산화 반응은 문헌에 보고된 바와 같이 비교적 원활히 잘 일어나는 것으로 관찰되었다. 질화반응조 1, 2, 3에서의 평균 암모니아성 제거 효율은 Table 5에 나타난 바와 같이 각각 89.7, 96.7, 98.3%로 관찰되었으며 질화 반응조 1, 2에서 대부분의 암모니아성 질소가 제거되는 것으로(96.7%) 나타났다. 질화 반응조 1, 2, 3에서 나타낸 NO_2^--N 및 NO_3^--N의 거동을 살펴보면 질화반응조 1에서는 NO_2^--N가 축적되는 양상이 관찰되었으나 질화반응조 2에서는 대부분의 NO_2^--N가 산화되어 거의 관찰되지 않았으며, 질화 반응조 2와 3에서의 NO_3^--N의 농도는 거의 같은 것으로 나타나 질화 반응조 1, 2에서 거의 완벽한 질산화가 이루어 지는 것을 관찰할 수 있었다. 이때 전체 반응조 부피 중 질화 반응조 1, 2가 차지하는 비율은 약 26.8%였으며 질화 반응조 1, 2에서의 수리학적 체류시간(HRT)는 2.14 hr이었다. 기존 문헌에서 보고된 질화반응조의 비율 및 질화반응조에서의 체류시간은 Bortone 등[24] 및 Šorm 등[25]의 기존 Dephanox 공정 연구에서 각각 27.5% 및 5 hr이었으며 이때 질화 반응조에서의 암모니아성 질소 제거효율은 각각 약 81.9, 100%로 나타났다. Šorm 등[25]의 Dephanox 공정의 혐기 접촉조(1 on Fig. 1, middle)와 탈질조(4 on Fig. 1, middle)에 공기가 유입되지 않도록 밀봉한 Dephanox 공정 연구에서의 질화반응조 비율과 질화반응조에서의 체류시간은 각각 27.5%, 5 hr이었으며, 기존 Dephanox 공정의 재포기조(5 on Fig. 1, middle)를 무산소조와 호기조로 분할한 Dephanox 변형공정 연구에서 질화반응조 비율 및 체류시간은 각각 44.6%, 5 hr이었다. 이때 Dephanox 공정의 질화 반응조에서의 암모니아성 질소 제거효율은 모두 100%로 관찰되었다(Table 3-9). 여기서 주목할 점은 Bortone 등[24] 및 Šorm 등[25]의 연구에서 질화 반응조의 수리학적 체류시간이 같음에도 불구하고 질화 반응조에서의 평균 암모니아성 제거효율이 틀리다는 점이다. Table 5에 나타난 바와 같이 Šorm 등[25]의 연구에서 나타난 암모니아성 제거효율이 Bortone 등[24]의 연구에서 나타난 암모니아성 제거효율에 비해 약 18%나 더 높다는 것을 알 수 있다. 본 연구자의 M-Dephanox 공정 연구 결과에서도 질화반응조에서의 암모니아성 제거효율이 수리학적 체류시간이 변하지 않았음에도 불구하고 첫 번째 질화반응조에서 크게는 약 32%나 차이가 나는 것을 관찰 할 수 있었다. 본 연구 결과에 의하면 질산화 반응조에서 암모니아성 질소 제거효율이 차이가 나는 이유는 질산화 반응조에서 메디아에 부착성장하는 질산화 박테리아가 흡착조에서 미생물에 의해 생흡착되지 않고 질산화 반응조로 유입되는 유기물의 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 6은 첫 번째 질산화 반응조로 유입되는 SCOD 농도 및 흡착조에서의 SCOD 흡착효율이 질산화 반응조 1, 2, 3에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 본 연구결과에서는 질산화 반응조에 유입되는 SCOD의 양이 증가할 수록 질산화 반응조 1, 2, 3의 암모니아성 제거효율이 감소하는 경향이 나타났으며 유기물의 영향을 직접적으로 받는 첫 번째 질화반응조가 가장 큰 영향을 받으며 2번, 3번 반응조로 갈수록 그 영향이 적은 것으로 나타났다. 이와같이 암모니아성 질소 제거효율이 유기물이 유입됨에 따라 감소하는 원인은 메디아에 부착성장하는 질산화 박테리아가 종속영양미생물에 의해 교체되고 산소 경쟁에서 도태되기 때문이며 이러한 영향을 2번, 3번 질산화 반응조로 갈수록 덜 받기 때문에 암모니아성 질소 제거효율의 감소도 더 적어지는 것으로 사료된다. 본 연구결과는 접촉조에서의 유기물 흡착 제어가 공정 전체의 T-N 제거효율에 결정적인 영향을 줄 수 있음을 보여주는 결과이며 여기에 대한 보다 구체적인 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

Table 5. NH_4^+-N removal efficiency and NO_2^--N and NO_3^--N in nitrification reactor 1, 2 and 3

		NH_4^+-N removal(%)		NO_2^--N(mg/L)		NO_3^--N(mg/L)	
		Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
Nitrification reactor 1 (*13.38%, ▣1.07 hr)	This study	89.7	9.3	1.8	1.1	10.0	3.5
Nitrification reactor 2 (*13.38%, ▣1.07 hr)	This study	96.7	4.5	0.4	0.4	13.9	3.2
Nitrification reactor 3 (*13.38%, ▣1.07 hr)	This study	98.3	3.0	0.1	0.1	15.0	2.7
Dephanox (Nitrification reactor; (*27.5%, ▣5 hr)	Bortone et al. (1996)	81.9					
	Šorm et al. (1996)	100					
Dephanox (Nitrification reactor; *27.5%, ▣5 hr)	Šorm et al. (1996)	100					
Dephanox (Nitrification reactor; *44.6%, ▣5 hr)	Šorm et al. (1996)	100					

*Volume Ratio, ▣ HRT in each reactor

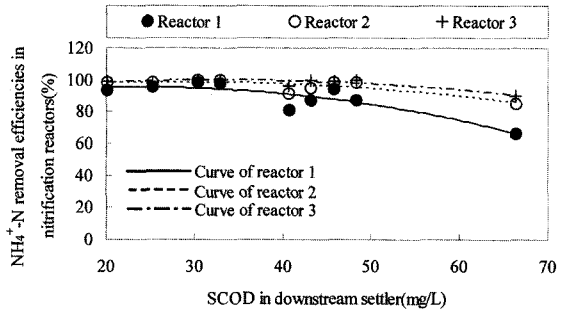


Fig. 6. NH_4^+-N removal efficiency in nitrification reactors according to SCOD concentration in downstream settler.

결론적으로 접촉조에서 유기물이 적절하게 제어된다면 질산화 반응조에서의 질산화 반응은 약 2시간 정도의 짧은 수리학적 체류시간에서 가능하다. 짧은 수리학적 체류시간에서 완벽한 질산화가 가능한 이유는 무산소 접촉조에서 유기물이 대부분 흡착되고 암모니아만이 농축된 상등수가 1차 분리조로부터 질화조로 유입되기 때문에 메디아에 부착된 질산화균이 종속영양미생물과의 경쟁에서 우점종을 차지하기 때문인 것으로 사료된다. 질산화 반응조에서의 신속한 질산화는 전체 공정의 수리학적 체류시간(HRT)을 줄이는데 커다란 역할을 하게 된다.

4. 결 론

부유 및 부착성장 미생물을 이용하는 공정의 유기물, 질소 및 인 처리 특성에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 부유성장 미생물을 이용하는 표준활성슬러지 공정 및 MLE 공정과 부유 및 부착 성장 미생물을 모두 이용하는 하이브리드 공정인 M-Dephanox 공정의 유기물, 질소 및 인 제거 효율 비교 연구에서 M-Dephanox 공정이 표준활성슬러지 공정 및 MLE 공정에 비해 TCOD 제거효율은 약 12.3～18.3%, SCOD는 13.0～14.8% 더 높게 관찰되었으며, TKN 의 경우 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 약 9 % 더 높은 제거효율이 관찰되었다. 또한 PO_4^{3-}-P 및 T-P 제거효율은 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 각각 25.1, 28.2% 더 높게 나타나 유기물, TKN 및 인 제거 효율면에서 하이브리드형 공정이 부유성장 미생물만을 이용하는 공정에 비해 더 높고 안정적인 처리효율을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

2) T-N 제거 측면에서 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 약 19% 높은 T-N 제거효율을 보여 주었으며 이는 탈질 효율이 M-Dephanox 공정이 MLE 공정에 비해 매우 좋았기 때문인 것으로 나타났다. M-Dephanox 공정 및 MLE 공정의 방류수 중 NO_3^--N 농도는 각각 6.8, 12.2 mg/L로 M-Dephanox 공정이 MLE 공정보다 약 5.4 mg/L 더 낮은 NO_3^--N 농도가 관찰되었다. 이러한 결과는 유기물을 흡착하여 이를 탈질에 활용하는 M-Dephanox 공정이 전탈질 공정으로 많이 사용되는 MLE 공정보다 유기물 활용측면에서 더 유리함을 의미한다.

3) M-Dephanox 공정의 질산화 반응조에서의 암모니아성 질소 제거효율은 약 2 hr의 체류시간에서 약 96.7%로 나타나 기존 문헌에서 보고된 5 hr의 체류시간 보다 3 hr 짧은 수리학적 체류시간에서도 높은 암모니아성 질소 제거효율을 관찰할 수 있었다.

4) 질산화 반응조에서의 질산화 반응은 흡착조에서 흡착되지 않고 질화반응조로 유입되는 유기물의 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며 질산화 반응조에 유입되는 유기물의 양이 증가할 수록 그 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 따라서 접촉조에서 유기물이 적절하게 제어된다면 질산화 반응조에서의 질산화 반응을 원활하게 진행시킬 수 있으며 질산화 반응조에서의 신속한 질산화는 전체 공정의 수리학적 체류시간(HRT)을 줄이는데 커다란 역할을 할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2004).

참 고 문 헌

1. 환경부, 2003년말 기준 가동중인 하수종말처리시설 현황(2003).
2. 환경부, 2001 하수도 사업 추진 · 관리 계획(2001).
3. 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).
4. Randall, C. and Sen, D., "Full-Scale Evalution of an Integrated Fixed-Film Activated Sludge(IFAS) Process for Enhanced Nitrogen Removal," *Water Sci. Technol.*, **33**(12), 155～162(1996).
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. Kuba, T., Furumai, H., and Kusuda, T., "A Kinetic Study on Methanogenesis by Attached Biomass in a Fludized Bed," *Water Res*, **24**(11), 1365～1372(1990).
10. 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).
11. Nurdan, B. and Ayse, F., "Concentrated Wastewater Treatment Studies using an Anaerobic Hybrid Reactor," *Process Biochem.*, **38**, 771～775(2002).
12. Misra, C. and Gupta, S. K., "Hybrid Reactor for Priority Pollutant Trichloroethylene Removal," *Water Res.*, **35**(1), 160～166(2001).
13. 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," *J. Ferment. Bioeng.*, **79**(3), 270～272(1995).
14. Wang, J., Shi, H., and Qian, Y., "Wastewater Treatment in a Hybrid Biological Reactor (HBR): Effect of Organic Loading Rates," *Process Biochem.*, **36**, 297～303(2000).
15. Tarek, A. E., Kim, L. T. O., Grietje, Z., and Gatze, L., "Treatment of Domestic Sewage in a Two-Step Anaerobic Filter/Anaerobic Hybrid System at Low Temperature," *Water Res.*, **36**, 2225～2232(2002).
16. Liu, J., Li, W., Wang, X., Liu, H., and Wang, B., "Removal of Nitrogen from Coal Gasification Wastewater by Nitrosofication and Denitrosofication," *Water Sci. Technol.*, **38**(1), 39～46(1998).
17. Hu, Z. R., Wentzel, M. C., and Ekama, G. A., "External Nitrification in Biological Nutrient Removal Activated Sludge Systems," *Water Sci. Technol.*, **43**(1), 68～251(2001).
18. Hu, Z. R., Wentzel, M. C., and Ekama, G. A., "Anoxic Growth of Phosphate-Accumulation Organisms(PAOs) in Biological Nutrient Removal Activated Sludge Systems," *Water Res.*, **36**, 4927～4937(2002).
19. Hu, Z. R., Wentzel, M. C., and Ekama, G. A., "Modelling Biological Nutrient Removal Activated Sludge Systems-a Review," *Water Res.*, **37**, 3430～3444(2003).
20. Kuba, T., Loosdrecht, M. C. M., Van and Heijnen, J. J., "Phosphorus and Nitrogen Removal with Minimal COD Requirement by Integration of Denitrifying Dephosphatation and Nitrification in a Two-Sludge System," *Water Res.*, **30**(7), 1702～1710(1996).
21. 류홍덕, 민경국, 이상일, "유입부하가 DEPHANOX 및 Modified DEPHANOX 공정에 미치는 영향," 한국물환경학회지, **20**(1), 18～23(2004a).
22. 류홍덕, 민경국, 이상일, "온도 및 수리학적 체류시간이 Modified DEPHANOX 공정에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **26**(3), 313～320(2004b).
23. 환경관리공단, "환경기술검증보고서," 폐타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술, pp. 4～5(2001).
24. 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).
25. Šorm, R., Bortone, G., Saltarelli, R., Jeníček, 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).

26. Ekama, G. A. and Wenzel, M. C., "Difficulties and Developments in Biological Nutrient Removal Technology and Mmodeling," *Water Sci. Technol.*, **39**(6), 1～11(1999).
27. Hu, Z. R., Wentzel, M. C., Ekama, G. A., "External Nitrification in Biological Nutrient Removal Activated Sludge System," *Water S. A.*, **26**(2), 225～238(2000).