

## 소규모 하수처리를 위한 파일럿 규모 이중슬러지 KNR<sup>®</sup> (Kwon's nutrient removal) 시스템의 영양염류 제거성능 평가

안진영\*, 권중천<sup>†</sup>, 김윤학<sup>†</sup>, 정유훈<sup>†</sup>, 김두언<sup>†</sup>, 유선호<sup>†</sup>, 김병우

성균관대학교 공과대학 화학공학과  
440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

<sup>†</sup>(주)에코다임 기업부설연구소  
305-501 대전광역시 유성구 탐립동 대덕테크노밸리 DTV Post BI 306호

(2006년 3월 31일 접수; 2006년 6월 18일 채택)

### Evaluation of the Nutrient Removal Performance of the Pilot-scale KNR<sup>®</sup> (Kwon's Nutrient Removal) System with Dual Sludge for Small Sewage Treatment

Jin-Young An\*, Joong-Chun Kwon<sup>†</sup>, Yun-Hak Kim<sup>†</sup>, Yoo-Hoon Jeng<sup>†</sup>, Doo-Eon Kim<sup>†</sup>, Sun-Ho Ryu<sup>†</sup>, and Byung-Woo Kim

Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, 300 Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 440-746

<sup>†</sup>R&D Center, Ecodigm Co., Ltd., 306 DTV Post BI, Tannip-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-501

(Received for review March 31, 2006; Revision accepted June 18, 2006)

#### 요 약

본 연구에서 소규모 하수고도처리를 위한 이중슬러지(Dual sludge) KNR<sup>®</sup> (Kwon's nutrient removal) 시스템이 개발되었다. KNR<sup>®</sup> 시스템은 부유성장식 탈질미생물과 부착성장식 질산화미생물을 분리시킨 이중슬러지 공정으로 최초침전조, 혐기조, 무산소조, 농축조의 복합기능을 수행하는 UMBR (Upflow multi-layer bioreactor) 과 펠렛형 담체가 충전된 호기성 담체조로 구성되어 있다. 소규모 하수처리시 본 개발공정의 안정성과 처리성능을 평가하기 위해 처리용량 50 m<sup>3</sup>/d 규모의 파일럿 플랜트를 고도처리 공정으로 개선공사 중인 처리용량 50 m<sup>3</sup>/d 규모의 실제 소규모 마을하수처리장에 적용하였다. UMBR과 담체조의 체류시간은 각각 4.7 h와 7.2 h이였으며, 반응조 수온은 18.1 ~ 28.1°C이였다. 유입 하수량과 유입수의 BOD/N의 변동폭이 컸음에도 불구하고 파일럿 플랜트는 안정된 처리성능을 보였다. 전체 실험기간 중 처리수의 COD<sub>Cr</sub>, COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub>, TN, TP의 평균 농도는 11.0 mg/L, 8.8 mg/L, 4.2 mg/L, 3.5 mg/L, 9.8 mg/L, 0.87/0.17 mg/L (poly aluminium chloride(PAC) 투입/미투입)이였으며, 제거율을 각각 95.3%, 87.6%, 96.3%, 96.5%, 68.2%, 55.4/90.3% 이였다. 잉여슬러지 발생량은 A<sub>2</sub>O와 Bardenpho 등과 같은 단일슬러지를 이용하는 고도처리공정과 비교시 약 1.9~3.8 배 낮은 0.026 kg-DS/m<sup>3</sup> and 0.220 kg-DS/kg-BOD로 나타났다.

**주제어** : 상향류 생물반응조 KNR시스템, 질소·인제거, 이중슬러지, 소규모 하수처리

**ABSTRACT** : A simple dual sludge process, called as KNR<sup>®</sup> (Kwon's Nutrient Removal) system, was developed for small sewage treatment. It is a hybrid system that consists of an UMBR (Upflow multi-layer bioreactor) as anaerobic and anoxic reactor with suspended denitrifier and a post aerobic biofilm reactor,

\* To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: ironface@skku.edu

filled with pellet-like media, with attached nitrifier. To evaluate the stability and performance of this system for small sewage treatment, the pilot-scale KNR<sup>®</sup> plant with a treatment capacity of 50 m<sup>3</sup>/d was practically applied to the actual sewage treatment plant, which was under retrofit construction during pilot plant operation, with a capacity of 50 m<sup>3</sup>/d in a small rural community. The HRTs of a UMBR and a post aerobic biofilm reactor were about 4.7 h and 7.2 h, respectively. The temperature in the reactor varied from 18.1°C to 28.1°C. The pilot plant showed stable performance even though the pilot plant had been the severe fluctuation of influent flow rate and BOD/N ratio. During a whole period of this study, average concentrations of COD<sub>Cr</sub>, COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub>, TN, and TP in the final effluent obtained from this system were 11.0 mg/L, 8.8 mg/L, 4.2 mg/L, 3.5 mg/L, 9.8 mg/L, and 0.87/0.17 mg/L (with/without poly aluminium chloride(PAC)), which corresponded to a removal efficiency of 95.3%, 87.6%, 96.3%, 96.5%, 68.2%, and 55.4/90.3%, respectively. Excess sludge production rates were 0.026 kg-DS/m<sup>3</sup>-sewage and 0.220 kg-DS/kg-BOD lower 1.9 to 3.8 times than those in activated sludge based system such as A<sub>2</sub>O and Bardenpho.

**Key Words** : Upflow Multi-Layer Bioreactor (UMBR), Kwon's nutrient removal (KNR), biological nutrient removal (BNR), dual sludge, small sewage treatment plant

## 1. 서 론

담 상류와 농어촌 지역의 생활환경을 개선하고, 오염물질을 초기단계부터 방지하기 위하여 환경부는 이 지역에 중·소규모 마을하수도 고도처리사업을 확충하고 있다. 그러나 마을하수도 처리시설이 지역적으로 넓게 산재되어 있고, 전문인력의 확보가 어려워 제대로 관리되지 않고 있는 실정이다. 따라서 마을하수도 사업의 성공을 위해서는 처리능력의 향상뿐만 아니라 공정의 단순성, 운전의 용이성, 저렴한 유지관리비, 무인운전 및 통합관리에 대한 적용성이 필수적으로 요구된다. 현재까지 적용되어 있는 공법을 살펴보면 SBR(Sequencing batch reactor), A<sub>2</sub>O, MLE(Modified Ludzak-Ettinger) 등의 부유성장식 단일슬러지를 기본으로 이용하는 공정이다. 부하량이 낮고 유입량이 불균일한 마을하수도의 특성상 부유성장식 단일슬러지를 이용할 경우 방류수 수질기준 중에 SS (Suspended solid) 10 mg/L의 기준을 초과하는 경우가 많고, 또한 대장균 유출이 심하여 지역환경을 오염시키게 될 우려가 높다.

UASB (Upflow anaerobic sludge blanket)-생물막 공정, anaerobic baffled reactor-활성슬러지 공정 등과 같은 이중슬러지 (Dual sludge) 공정은 운전의 단순성, 시스템의 안정성, 에너지 절감 등 많은 장점을 지니고 있어 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다<sup>1-3)</sup>. 그러나 저수온에서 나타나는 혐기조의 부분적인 탈질 (Partial denitrification), 유기물의 제거를 저하 등의 문제로 인해 잔류 유기물 제거와 질산화 (Nitrification)를 위한 적절한 후속 호기성 공정을 선택하기가 어려운 실정이다<sup>4)</sup>.

본 연구에서는 소규모 하수고도처리를 위한 이중슬러지 KNR<sup>®</sup> (Kwon's nutrient removal) 시스템이 개발되었다. 본 시스템은 기존 단일슬러지(Single sludge) KNR<sup>®</sup> 시스템<sup>5-7)</sup>의 슬러지 월류형 UMBR (Upflow multi-layer bioreactor)과 포기조를 슬러지 월류억제형 UMBR과 생물막공정으로 개조하여 중·소규모 하수고도처리에 최적화시킨 이중슬러지공정이며<sup>8)</sup>, 본 연구에서는 후속 생물막공정으로 소규모 하수처리에 보다 적합

한 하향류식 생물막공정을 적용하였다. 이중슬러지 KNR<sup>®</sup> 시스템은 질소제거효율을 극대화시키기 위해 부유성장식(Suspended-growth type) 탈질미생물과 부착성장식(Attached-growth type) 질산화미생물을 공간적으로 분리시킨 공정이다. UMBR은 최초 침전지, 혐기조, 무산소조, 농축조의 복합기능을 수행하는 상향류식 플러그 흐름형 반응조이다<sup>5-7)</sup>. UMBR에는 중력침강에 의해 슬러지층과 상등수층이 구분되어지며, 슬러지 계면의 수위는 광센서 혹은 초음파센서가 부착된 슬러지계면제어기에 의한 자동제어가 가능하다. UMBR은 부유성장식 미생물이 무산소조건에서만 성장되어 탈질효율이 우수하고, 5,000 mg/L 이상의 고농도 슬러지층이 유지되어 유기물 제거효율이 높으며, 슬러지층의 여과기능으로 30 mg/L 이하의 상등수만 후속공정으로 유출시킨다<sup>8)</sup>. 이와 같은 UMBR의 장점은 후속 호기성 공정의 선택의 폭을 넓게 하며, 호기조에 부유 미생물 없이 생물막만을 이용함에 따라 체류시간 4~5 h이 필요한 최종침전조와 반송슬러지의 생략이 가능하여 공정구성이 단순하고 처리효율이 우수한 이중슬러지공정을 간단하게 구성할 수 있다. 후속 생물막 공정으로는 열가소성 수지와 생물친화성 물질로 제조된 펠렛형 담체를 1.5 m 이상의 높이로 충전한 하향류식 생물막 공정을 이용하였다. 본 연구에서는 처리용량 50 m<sup>3</sup>/d 규모의 과일렛 플랜트를 유량 및 부하변동이 심한 처리용량이 50 m<sup>3</sup>/d인 실제 소규모 마을하수처리장에 적용하여 개발공정의 처리성능 및 안정성을 평가하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 시스템 개요

본 연구에서 개발된 이중슬러지 KNR<sup>®</sup> 시스템은 Figure 1과 같이 UMBR (Upflow multi-layer bioreactor), 담체조/경사판 침전조로 구성되어 있다. 유입하수와 내부반송수는 UMBR조 상부 피드웰 (Feed-well)에서 혼합된 후 회전분배장치를 통해 반응조 하부에서 균일하게 분배되며, 유입수가 플러그 흐름

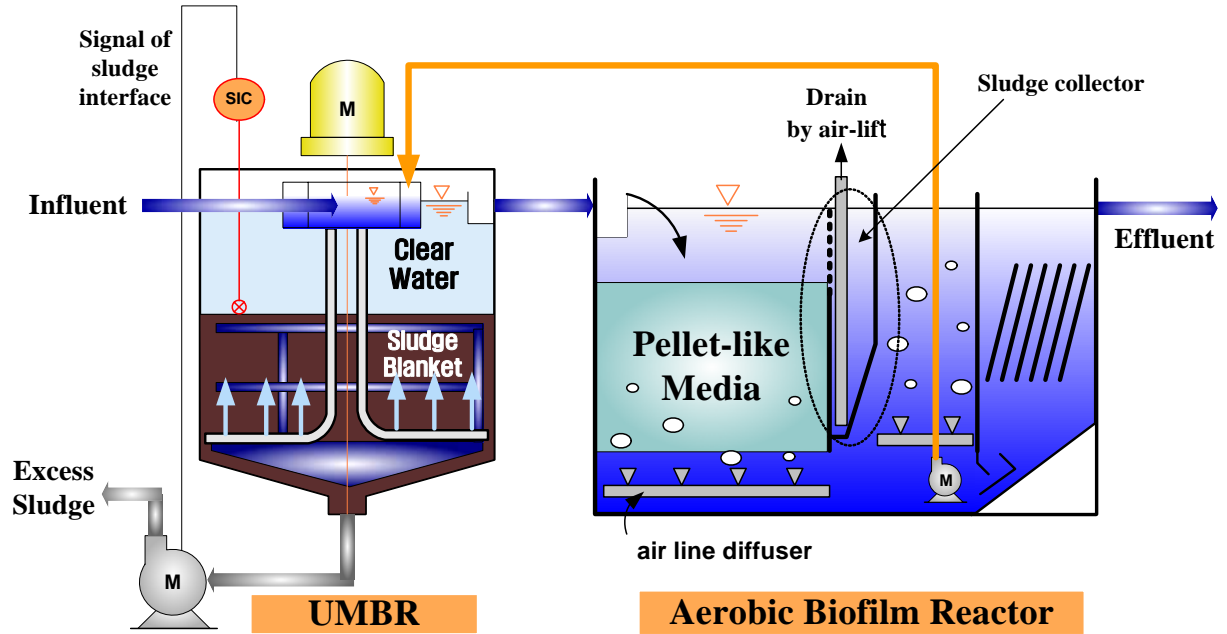


Figure 1. Schematic diagram of the dual sludge KNR<sup>®</sup> system.

Table 1. The physicochemical characteristics of the pellet-like media used in this study.

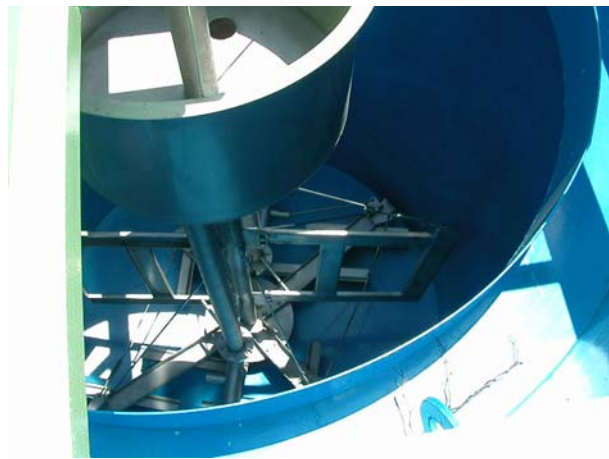
시험명	시험항목	단위	시험결과	시험방법
중금속 용출시험	Pb	mg/L	N.D.	폐기물공정시험법
	Cu		N.D.	
	As		N.D.	
	Cd		N.D.	
내약품성 시험	10% HCl	%	2.2	상온에서 168시간후 무게변화율
	5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		1.6	
	5% NaOH		1.3	
	0.5% NaOH		0.8	
입도시험	5/16" 잔류분	%	0.9	KS A 5301-95
	1/4" 잔류분		98.7	
	4 mesh 잔류분		0.4	
	6 mesh 잔류분		0	
겉보기비중	건조	-	0.387	KS A 0602-95
진비중	습윤	-	1.093	KS A 0602-95
비표면적	-	m <sup>2</sup> /g	0.051±0.00905	질소가스를 이용한 BET

(Plug-flow)에 의해 상향류로 슬러지층을 통과하면서 탈질(Denitrification), 인 흡착(Phosphorus biosorption), SS 흡착 및 침전반응이 일어난다<sup>8)</sup>. 분배장치는 4~6 m/min의 주변속도(Tip Speed)로 서서히 회전하면서 유입수를 받기 하부에 균일하게 분배하고, 주축(Shaft)에 부착된 회전배플(Circulating Baffle)은 슬러지 단락현상(Channeling)을 방지한다. 유체흐름이 없는 분배시스템 하부는 농축조로 이용되며, 잉여슬러지를 20,000~40,000 mg/L까지 농축하여 저장한다<sup>5-8)</sup>. 미생물 증식 혹은 유입유량 증가에 의해 슬러지계면이 일정 수위 이상으로

상승하면 슬러지 계면감지기(Sludge Interface Analyzer)와 잉여슬러지 인발펌프의 연동운전에 의해 UMBR조 하부 농축영역에 저장된 잉여슬러지를 자동으로 배출하게 된다. 후속 담체조는 유입수를 담체층진층 하부로 통수시켜 잔류 유기물 제거, 질산화(Nitrification), SS 여과 기능을 수행하는 하향류식 호기성 생물막 반응조이다. 본 공정에서 사용된 담체(Terra-fill, (주)에코다임)의 물리화학적 특성을 Table 1에 정리하였다. 본 담체는 PP(Poly propylene) 및 PE(Poly ethylene) 등의 열가소성 수지와 각종 세라믹, 톱밥, 인산염 등의 생물친화성 물질을 이용



(a)



(b)

Figure 2. Views of the pilot-scale KNR<sup>®</sup> plant. (a) Pilot-scale KNR<sup>®</sup> Plant; (b) Interior view of the UMBR.

Table 2. Operation parameters of the pilot scale plant

	UMBR		Aerobic biofilm reactor/with inclined plates	
	Sludge Blanket Zone	Clear Water Zone	Nitrification Zone	Clarification Zone
Dimension (m)	2.2 D × 2.6 He		2.6 W × 3.5 L × 3.0 He	
Volume(m <sup>3</sup> )	6.9	3.0	15.0	6.0
HRT (h)	3.3	1.4	7.2	2.9
DO (mg/L)	< 0.2		> 2.0 mg/L	
Recycle ratio (% of influent)			100~200	

하여 압출공정에 의해 제조되었으며, 비중이 1.05~1.20으로 낮아 세척수 없이 수중 공기만으로 역세척이 가능하고, 형상이 지름 7~8 mm, 길이 10~20 mm의 펠렛형이어서 통수성이

우수하다. 또한 공극 등이 고려된 담체 비표면적(Specific surface area)이 450~550 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>으로 넓어, 미생물 부착 및 SS 흡착 기능이 우수하다. 담체 충전층 하부에 하부집수장치를 설치하여 유입수 및 공기가 균등 분배되도록 하였다. 정상운전 시에는 하부에 설치되어 있는 산기관(Membrane diffuser)을 통해 상시/간헐 포기하여 질산화를 위한 공기공급을 하고 담체 충전층의 통수성을 향상시키며, 역세척 (Backwashing) 운전 시에는 유입 하수 공급을 차단하고, 충분한 공기를 공급하여 담체 층을 팽창시켜 담체사이에 퇴적된 부유물질 및 탈리미생물이 집수장치 하부 혹은 슬러지제거기를 통해 제거되도록 한다. 잉여 슬러지 인발의 단일화를 위해 슬러지 제거기에 모인 탈리 슬러지는 에어리프트 펌프(Air-lift pump)를 통해 UMBR조로 이송한다. 담체조 후단에는 체류시간 2~3 h의 장방형(Rectangular) 경사판 침전조를 두어 SS 제거효율을 향상시킨다.

2.2. 실험장치 및 반응기 운전방법

본 연구에서는 소규모 하수처리장의 실제 운전조건에서 본 공정의 특성을 평가하기 위해 고도처리공정으로 전면 개조중인 경상북도 OO 마을하수처리장 (처리용량 50 m<sup>3</sup>/d)에 처리용량 50 m<sup>3</sup>/d 규모의 파일럿 반응기를 설치하여 실험하였다 (Figure 2). 자세한 각 단위공정의 설계 제원 및 운전인자는 Table 2에 정리하였다. UMBR 회전분배장치는 유입수의 균등분배와 단락현상 방지를 위해 감속기(Cyclo reducer)를 이용하여 0.5 rpm의 속도로 회전시켰다. UMBR 반응조 전체 체류시간은 5.9 h이며, 슬러지층 (Sludge blanket)은 전체 반응용량의 약 70%이하로 유지하고자 하였으며 (HRT<3.3 h), 슬러지계면감지기 (Sludge Zone Meter, SS-5Z, Japan)로 측정된 슬러지층이 높이가 일정 수위 이상이면 UMBR조 하부에 설치된 모노펌프를 이용하여 잉여슬러지를 인발하였다. 담체조 전체 체류시간은 7.2 h이며, 담체 충전층의 체류시간은 약 3.3 h 이었다. 하수 유입펌프가 가동될 경우 송풍기(Ring blower)가 연동되어 자동으로 가동되며, 하수 유입펌프가 중지될 경우 동력비를 절감하고 담체층 폐쇄를 방지하기 위해 간헐적(20 min On/20 min Off)으로 가동하였으며, 6시간 마다 약 20분씩 역세척운전을 하였다. 이와 같은 포기조 운전의 자동제어와 공기량 조절을 위해 전동밸브 (Automatic butterfly valve)와 PLC (Programmable logic controller)를 설치하였다. 경사판 침전조에는 스테인레스로 제작된 경사판 (1.15 m × 1.0 m × 13 EA)을 60°의 경사각, 100mm의 간격으로 균일하게 설치하였으며 체류시간은 2.9 h 이었다. 운전기간 중 담체조 DO는 2.0 mg/L 이상 유지되었으며, 담체조에서 UMBR조로의 내부반송율은 100~200%로 운전하였다.

2.3. 식종 슬러지 및 운전 MLSS

본 연구에서 사용된 식종슬러지는 활성슬러지로 운전 중인 경상북도 OO시 하수종말처리장의 반송슬러지를 이용하였다. 슬러지 식종 후 약 15일간 UMBR조내 탈질 미생물 활성화, 생물막 공정의 접촉담체 표면에 안정적인 생물막형성을 위해 부하량 조절을 통한 적응운전을 수행하였다. 본 개발 공정에서는 공정특성상 반송슬러지를 생략하고 MLSS (Mixed liquor suspended

solid)가 거의 없는 내부반송만으로 운전되므로 UMBR 슬러지층의 농도는 유입하수와 내부반송수에 의해 결정되는 상향류 속도 (Upflow velocity)에 의해 조절된다. 실험기간 중 UMBR 조는 상향류 속도 1.2~1.4 m/h의 범위로 운전되었으며 이때 슬러지층의 농도는 6,000~8,000 mg/L로 유지되었다.

2.4. 분석방법

유입수 및 처리수, 각 단위반응조로부터 채취된 시료는 현장에서 운전인자 조절을 위해 주요 항목을 간이 측정하였으며, 냉장보관된 시료를 최종적으로 실험실에서 분석하였다. 현장에서는 HACH사에서 조제된 수질분석 Kit를 이용하여 COD<sub>Cr</sub> (Method 8,000: Reactor Digestion Method), T-N(Method 10,071: Persulfate Digestion Method), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(Method 10,031: Salicylate Method), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N(Method 10,020: Chromotropic Acid Method), TP (Method 8,190: PhosVer<sup>®</sup> with Acid Persulfate Digestion Method)를 측정하였으며, 측정장비는 Spectrophotometer (DR/2500, HACH, USA)를 사용하였다. DO (Dissolved Oxygen)와 pH는 휴대용 pH & DO Meter를 이용하여 측정하였다.

현장 간이 분석후 시료를 실험실로 이송하여 pH, 알칼리도, BOD, COD<sub>Mn</sub>, SS, TN, TP, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 등의 항목을 환경공정시험법 및 Standard Method에 준하여 측정하였고<sup>9)</sup>, COD<sub>Cr</sub>은 HACH사에서 조제된 Kit(Method 8,000:Reactor Digestion Method)를 이용하여 Spectrophotometer (DR/2500, HACH, USA)로 측정하였다. 공정특성상 채취한 시료에 MLSS가 미량으로 존재하여(20 mg-SS/L 이하), 시료보관 및 이송 중에 큰 오차가 발생되지 않아 현장 분석결과와 실험실 분석결과는 큰 차이가 나지 않았다.

3. 결과 및 고찰

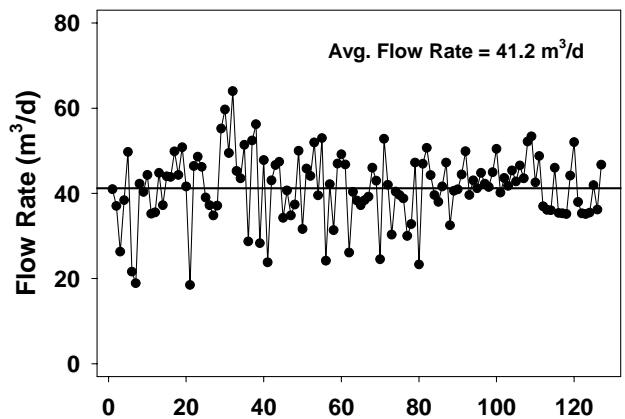
3.1. 유입하수 특성

고도처리공정으로 전면 개조공사 중인 처리용량 50m<sup>3</sup>/d 규모의 OO 마을하수처리장에서 약 5개월간 소규모 하수처리장의 실유입 조건 하에서 파일럿 플랜트 실험을 수행하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이 실험기간 중 유입 하수농도는 BOD<sub>5</sub> 70.2~152.2 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 45.7~112.0 mg/L, COD<sub>Cr</sub> 148.8~355.7 mg/L, SS 29.5~382.1 mg/L, TN 20.0~41.7 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 11.8~39.1 mg/L, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 0.1~0.9 mg/L, TP 0.65~5.07 mg/L, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 0.29~2.43 mg/L의 범위로 유입되었다. 유입 하수 수온은 18.1~27.1℃, pH는 6.8~7.4이었다.

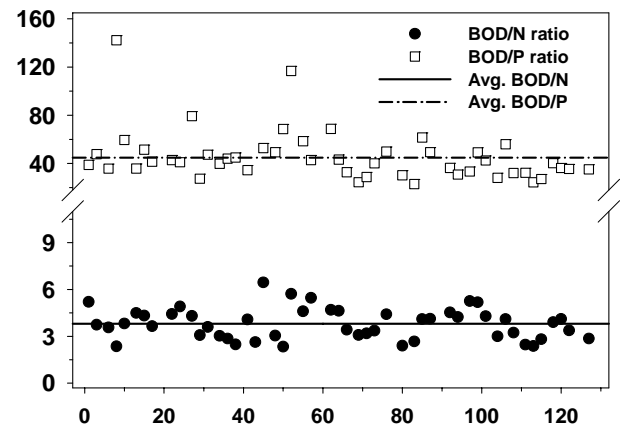
Figure 3(a)는 실험기간 중 일별 하수 유입유량 변화를 나타낸다. 하수는 18.5~64.0 m<sup>3</sup>/d 범위로 유입되었으며, 이는 설계 유량 (50 m<sup>3</sup>/d)의 37~128% 범위로 일별 유량 변동 폭이 비교적 컸다. 실험기간 중 일평균 하수유입량은 41.3 m<sup>3</sup>/d이었다. Figure 3(b)는 유입하수의 BOD/N 및 BOD/P의 일별 변화를 나타낸다. 실험기간 중 유입 하수의 BOD/N 비는 3.8 (2.3~6.5), BOD/P 비는 44.9 (13.8~142.2) 범위로 나타나, 비교적 생물학적 질소/인 제거에 적합한 조건이었다. 그러나 전체 실험일수 중 약 22%는 하수가 생물학적 질소제거시 유기물이 다소 부족

Table 3. The characteristics of influent sewage

Parameters	Range
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	70.2 ~ 152.2
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	45.7 ~ 112.0
COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	148.8 ~ 355.7
SS (mg/L)	29.5 ~ 382.1
TN (mg/L)	20.0 ~ 41.7
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/L)	11.8 ~ 39.1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	0.1 ~ 0.9
TP (mg/L)	0.65 ~ 5.07
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P (mg/L)	0.29 ~ 2.43
수온 (℃)	18.1 ~ 27.1
pH	6.8 ~ 7.4
BOD/N	2.3 ~ 6.5
Influent flow rate (m <sup>3</sup> /d)	18.5 ~ 64.0



(a)



(b)

Figure 3. Variations in influent flow rates (a), BOD/N ratio, and BOD/P ratio (b).

한 조건인 BOD/N이 3 이하로 유입되었다<sup>10)</sup>.

3.2. 유기물 및 고형물 제거

단위 반응조별 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Cr</sub>, COD<sub>Mn</sub>, SS 농도변화를 Figure 4에 정리하였다. 각 단위반응조별 평균 BOD<sub>5</sub> 농도는 유입수 116.3 mg/L, UMBR조 17.9 mg/L, 방류수 4.2 mg/L이었으며, 평균 COD<sub>Mn</sub> 농도는 유입수 73.8 mg/L, UMBR조 16.0 mg/L, 방류수 8.8 mg/L이었으며, COD<sub>Cr</sub> 농도는 유입수 239.7 mg/L, UMBR조 32.2 mg/L, 방류수 11.0 mg/L으로 나타났다. 단위반응조별 유기물 제거율은 UMBR조의 BOD 제거율, COD<sub>Mn</sub> 제거율 및 COD<sub>Cr</sub> 제거율은 각각 84.0 (75.4~91.4)%, 77.5 (62.0~86.6)%, 86.0 (69.8~93.1)%이었고, 전체 BOD 제거율, COD<sub>Mn</sub> 제거율, 및 COD<sub>Cr</sub> 제거율은 각각 96.3 (93.9~98.7)%, 87.6 (77.1~93.7)%, 95.3 (92.1~97.6)%으로 나타났다. UMBR조에서 탈질반응에 의해 대부분의 유기물이 제거되고, 슬러지 플럭(Floc)에 흡착되지 않거나 혹은 침전되지 않은 미량의 콜로이드성 BOD 성분만 유출되어 후속 담체조는 최적의 질산화조건이 유지된 것으로 판단된다. 각 단위반응조별 평균 SS 농도는 유입수 118.6 mg/L, UMBR조 16.6 mg/L, 방류수 3.5 mg/L으로 나타났다. UMBR조에서 중력침강, 슬러지층에 의한 생흡착 등에 의해 83.4 (40.6~97.1)%의 SS가 제거되어, 후속 생물막 공정의 고형물 부하를 최소화하여 안정적인 운전이 가능하게 하였다. 담체조로 유입된 SS는 담체층진층

의 여과기능 혹은 슬러지 수집기를 통해 일부 제거되며 최종적으로 경사판을 통해 제거되어, 전체 SS 제거율은 96.5(84.4~99.6)%로 나타났다.

3.3 질소 제거특성

가. 질산화 (Nitrification)

기존 활성슬러지를 이용한 고도처리공정은 유기물이 과다 유입되어 C/N비가 높은 경우에는 유기물을 제거하는 타가영양성 미생물 (Heterotroph)이 과다 성장하여 성장속도가 느린 자가영양성 질산화균(Autotrophic nitrifier)이 유실(Wash out)되어 질산화가 저하되는 문제가 있다. 또한 수온이 낮아 미생물의 성장속도가 둔화되는 동절기의 경우에도 타가영양성 미생물과 자가영양성 질산화균의 극명해진 성장속도 차이로 인해 질산화균 유실현상이 발생된다. 이러한 혼합배양(Mixed culture)에 의해 발생하는 문제점을 해결하기 위해, 본 연구에서는 탈질미생물과 질산화미생물을 분리하여 운전하는 이중슬러지 공정을 개발하였다. 본 공정에서는 포기조에 활성슬러지를 생략하고 부착미생물만을 이용하며, 최적의 질산화조건을 유지하여 질산화미생물만 선택적으로 비표면적이 우수한 접촉여재 표면에 부착시켜, 외부 운전조건 변화시 질산화균의 유실을 원천적으로 방지하고자 하였다. 실험 기간 중 UMBR조의 유기물 및 부유물질 제거율(80% 이상)을 살펴보면, 담체조에서 최적의 질산화조건이 유지됨을 알 수 있다.

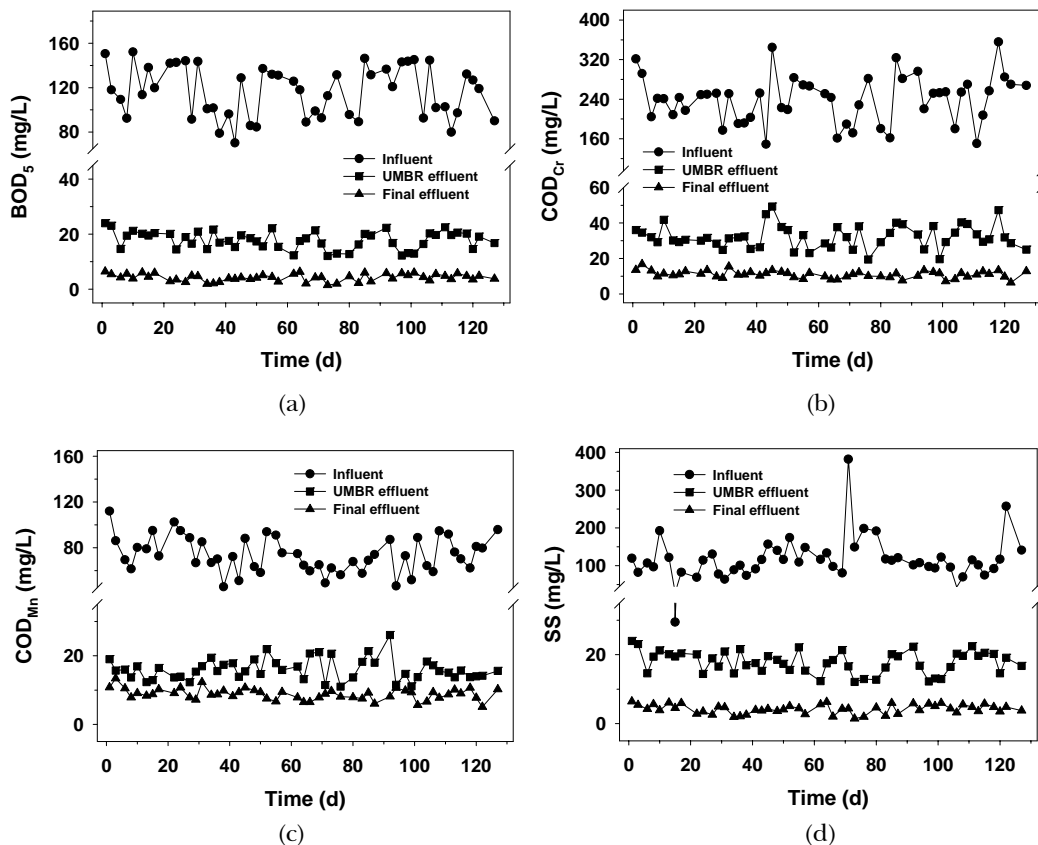


Figure 4. Variations in the organic matters and suspended solid in the treatment of sewage by the pilot plant. (a) BOD<sub>5</sub>; (b) COD<sub>Cr</sub>; (c) COD<sub>Mn</sub>; (d) SS

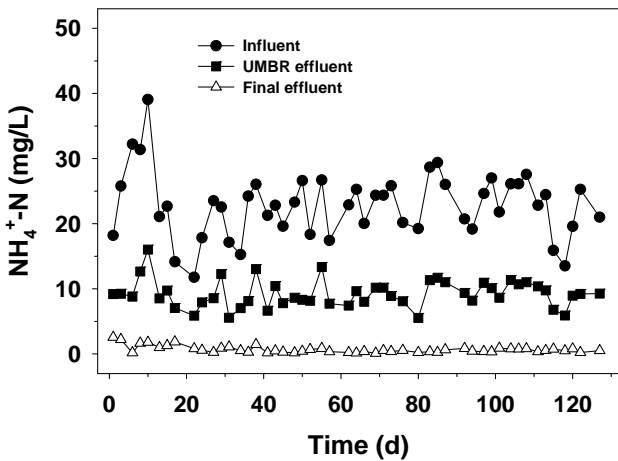
Figure 5(a)는 각 단위반응조별  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도변화를 나타낸다. 유입수  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도는 22.8(11.8~39.1) mg/L이었으며, 질산화된 내부반송수와 희석되어 UMBR조에서는 9.3(5.5~16.0) mg/L으로 유출되었으며, 담체조에서 거의 대부분 질산화되어 최종 유출수의 잔류  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도는 0.7(0.1~2.6) mg/L이었으며, 이에 해당하는 질산화율은 96.8(85.9~99.5%)이었다. Figure 5(b)는 실험기간 중 담체조의 비질산화율(Specific nitrification rate) 및 질산화율을 나타낸다. 실험초기에 과일릿 플랜트에 유입하수량 50 m<sup>3</sup>/d, 유입  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도 36 mg/L, 담체 비표면적 450 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, SNR 1.0 g-N/m<sup>2</sup>·d 기준으로 약 4 m<sup>3</sup>의 담체를 투입하였다. 실험 기간 중 유입 유량과  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  변동이 심하여 담체조의 평균 SNR은 설계기준 보다 낮은 0.53 g-N/m<sup>2</sup>·d 이었으며, 시스템이 안정화된 이후에는 유입 유량, C/N 비,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  부하량 등의 운전조건과 관계없이 항상 높은 질산화율을 나타내었으며, 방류수  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도는 1.0 mg/L 이하로 유출되었다.

기존 살수여상조(Trickling filter), 접촉산화조 등과 같은 접촉여재를 이용한 유기물/질소 동시 처리공정에서 일반적인 SNR 운전범위는 0.2~1.0 g TKN/m<sup>2</sup>·d이며, 유출 암모니아

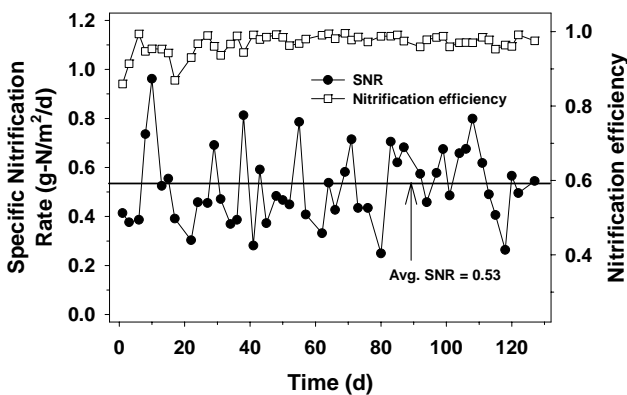
농도는 3.0 mg-N/L이다11). 본 연구에서 나타난 최대 SNR은 0.96 g-N/m<sup>2</sup>이었으며, 이때 질산화율이 96.4%로 나타나, 기존 상용화된 공정보다 우수한 처리성을 나타내었다. 이와 같은 높은 질산화 효율은 UMBR에서의 높은 유기물 제거율에 따른 담체조에서의 최적의 질산화 조건 유지, 탈질미생물과 질산화미생물이 분리되어 운전되는 이중슬러지 공정의 특징, 담체의 높은 비표면적에 따른 안정적인 생물막 형성 등에 기인한 것으로 평가되어 진다.

나. 탈질 (Denitrification)

UMBR조에서는 MLSS 6,000 mg/L 이상의 고농도 탈질슬러지층을 유지하여, 무산소 조건하에서 선택적으로 탈질미생물이 우점종으로 성장된다. UMBR조는 플러그-흐름 반응특성상 교반기를 이용한 기계적 강제혼합이 없기 때문에 슬러지 플러이 비교적 크게 유지되어 용존 DO에 따른 탈질효율의 영향이 적고, 상향류 흐름으로 반응영역과 수면이 차단되어 있어 완전혼

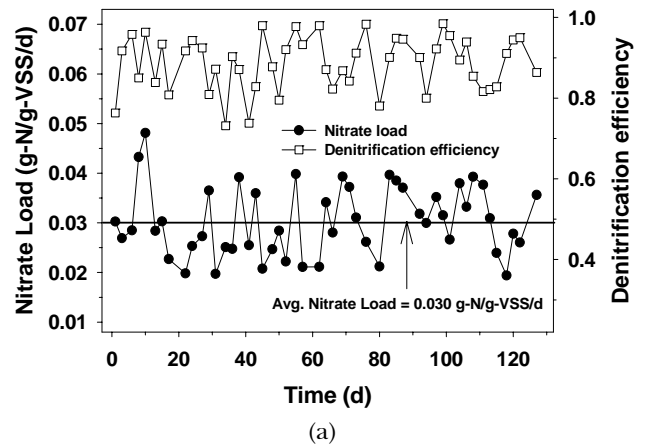


(a)

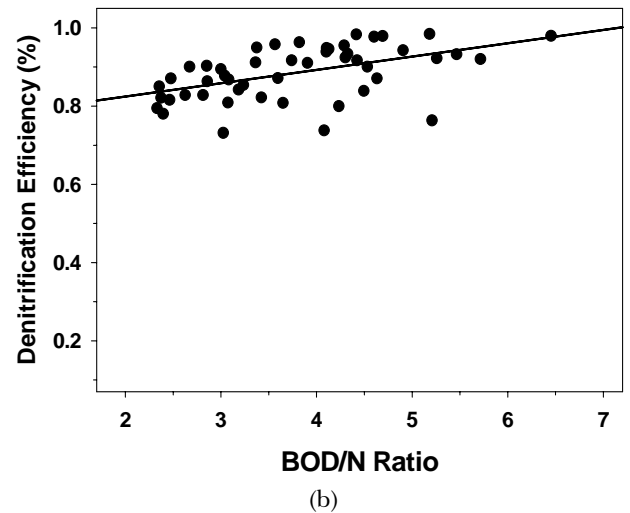


(b)

Figure 5. Variations in the ammonia (a) and specific nitrification rates (b) in the treatment of sewage by the pilot plant.



(a)



(b)

Figure 6. Variations in denitrification efficiencies under various conditions. (a) effects of nitrate loads on denitrification efficiencies; (b) effects of BOD/N ratio on denitrification efficiencies.

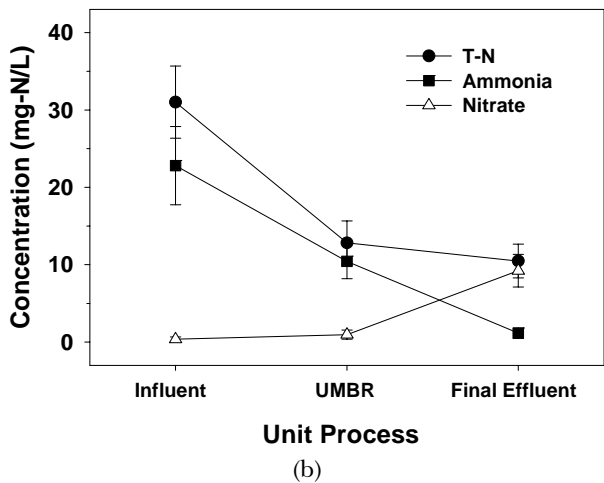
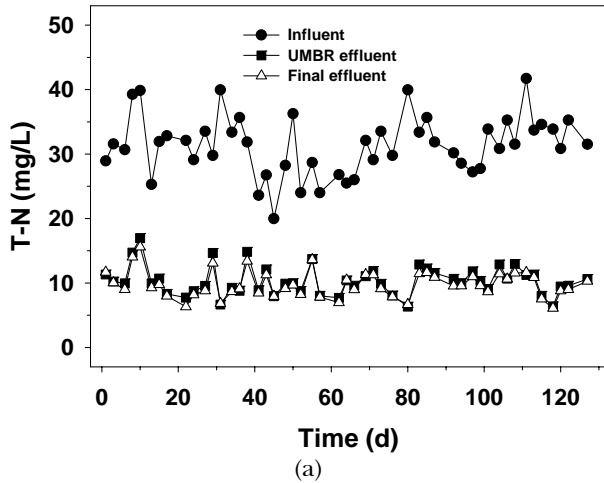


Figure 7. Nitrogen removal performance of the pilot plant. (a) variations in total nitrogen; (b) profile of the nitrogen species in each unit process.

합형 탈질조에서 강제혼합시 수면에 vortex가 형성되어 반응조 DO가 상승되는 문제점도 없다. 또한 C/N비가 부족할 경우에도 타공정보다 높은 MLSS로 운전되므로 내생탈질(Endogenous denitrification)에 의한 탈질 기여도가 높아서 전체적인 탈질효율이 우수할 것으로 기대된다.

실험기간 중 유입수의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도는 0.4(0.1~0.9) mg/L이었으며, 최종 방류수의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도는 8.5(5.1~13.2) mg/L로 나타났다. 방류수 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도는 유입 하수량과 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 부하량에 따라 변동 폭이 컸다. 소규모 하수처리장에는 유입하수량을 비례제어하기 보다는 주로 유량조정조의 수위에 따른 단속운전을 하기 때문에 유입하수량이 적어 유입펌프 가동이 중단되는 시간이 증가되는 경우에는 내생탈질에 의해 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N이 추가적으로 제거될 수 있다. Figure 6은 BOD/N 비와 질산성질소 부하(Nitrate load)에 따른 탈질을 변화를 나타낸다. 실험기간 중 평균 질산성질소 부하는 0.030 g-N/g-VSS·d이었으며, 내부반송 유량을 일정하게 운전하여 유입하수량과 유입 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도에 많은 영향을 받았으며, 운전 MLSS (6,000 mg/L 이상,

VSS/TSS=0.67)가 높아 타공정보다 수치가 낮게 나타났다. 실험기간 중 BOD/N 비는 3.8 (2.3~6.5)으로 나타났으며, 단위 반응조별 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도기준으로 계산된 탈질효율은 88.6 (73.1~98.4)%로 나타났다. 특히 유기물이 부족한 BOD/N 비가 3 이하인 경우에도 75% 이상의 높은 탈질효율을 나타내었다.

본 연구에서 나타난 BOD/N 조건에서의 높은 탈질효율은 이중슬러지 운전에 의해 UMBR에 선택적으로 탈질미생물이 높은 비율로 존재하여, 내생탈질이 타 공정보다 높은 것으로 평가되어진다. 비내생탈질율(Specific endogenous denitrification rate)은 MLSS가 2.5~4.0 g/L 범위에서는 MLSS 농도에 무관하다고 알려지고 있으나<sup>12)</sup>, 신항식 등에 따르면 UMBR에서 MLSS가 2.06~10.30 g/L로 변화할 경우 MLSS 농도와 비내생탈질율은 비례(0.224~0.481 mg-L/g-MLVSS·h)한다고 보고하였다<sup>13)</sup>. 본 연구에서 UMBR의 MLSS는 6~9 g/L의 높은 농도 유지되었으며, 이와 같은 고농도 MLSS 조건에서는 2~4 g/L로 운전되어 지는 타 공정에 비해 세포사멸 등에 의해 유출되어지는 cell lysate의 발생량이 증가되며, 따라서 이를 이용한 cryptic growth<sup>14)</sup>에 의한 비내생탈질을 또한 향상되는 것으로 평가되어진다.

다. 총질소 제거효율

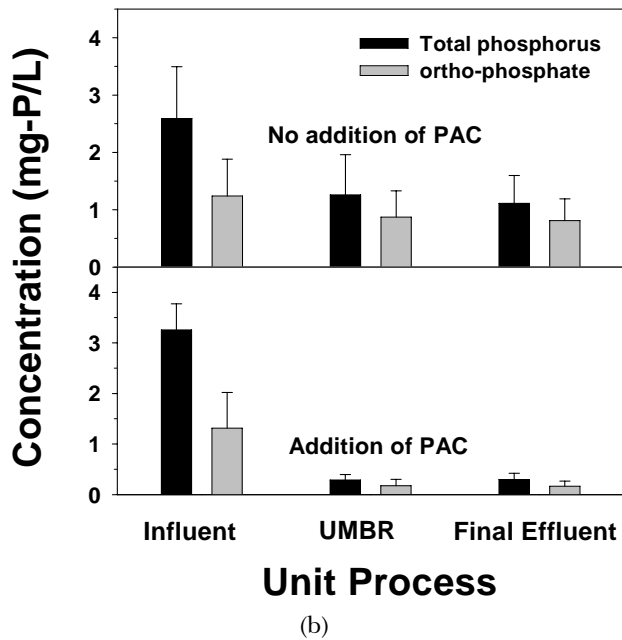
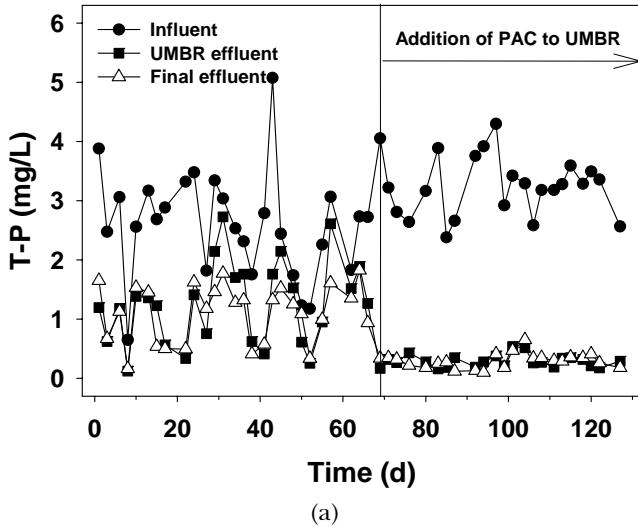
Figure 7(a)는 단위 반응조별 TN 농도변화를 나타낸다. 각 단계별 TN 농도는 유입수 31.3 (20.0~41.7) mg/L, UMBR조 10.4 (6.3~17.0) mg/L, 방류수 9.8 (6.1~15.6) mg/L로 나타났다. 전체 공정의 TN 제거율은 68.2 (52.6~83.3)%이었다. Figure 7(b)는 각 단위 반응조별 질소제거율 및 질소의 내부거동을 나타낸다. 유입수는 총 질소 중 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N이 72.8%로 대부분을 차지했으며, UMBR조에서는 탈질에 의해 대부분의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N이 제거되므로 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N이 총질소의 89.4%를 차지했으며, 최종 방류수에는 질산화에 의해 대부분의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N가 제거되므로 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N이 총질소의 86.7%를 차지했다.

3.4. 인제거

고도처리공정에서 인제거 기작은 단일슬러지의 혐/호기 순환을 통해 이루어지며, 혐기조건에서 인산염(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)을 방출하고 호기조건에서 인산염을 과잉 흡수하여 세포내 인함량이 2~8%으로 인이 과잉으로 축적된 슬러지를 인발하여 인을 제거한다<sup>15)</sup>. 소규모 하수처리장은 숙련된 운전인력 부족하여, 인제거를 위한 운전인자 조절이 어렵고, 특히 저유량 및 저부하가 지속될 경우 인제거를 위한 SRT(Solid retention time) 조절이 어려워 혐기조에서 인산염이 과잉 방출되고, 호기조에서 흡수되는 인산염량은 적어 유입수 보다 방류수의 총인 농도가 높은 경우가 빈번하다. 게다가 유입하수량이 적을 경우에는 최종침전조에서 인이 재방출되는 경우도 빈번하게 발생된다.

이중슬러지로 운전되는 본 개발공정에서는 슬러지를 혐/호기 조건으로 순환시키지 않으므로 세포내에 인을 과잉으로 축적하지 않으며 혐기/무산소 조건에서 과잉 방출하지 않는다. 본 개발공정에서는 고형물에 포함된 인성분은 UMBR 슬러지층을 통과하면서 생흡착 및 중력 침강에 의해 제거되며, 용존 인성분인 인산염 (Ortho-phosphate)만 후속공정으로 유평된다.





**Figure 8. Phosphorus removal performance of the pilot plant. (a) variations in total phosphorus with and without PAC; (b) profile of phosphorus species in each unit process with and without PAC.**

Figure 8은 단위 반응조별 총인 농도변화 및 내부거동을 나타낸다. 실험기간 중 무기응집제인 PAC (Poly aluminium chloride)의 투입 유무에 따른 인 제거 특성을 비교하였다. 약품투입전 각 단계별 TP와  $PO_4^{3-}$ -P 농도는 유입수는 2.59 (0.65~5.07) mg/L와 1.24 (0.29~2.43) mg/L이었고, UMBR조는 1.26 (0.12~2.73) mg/L와 0.87 (0.15~1.70) mg/L이었고, 방류수는 1.11(0.16~1.83) mg/L와 0.81(0.15~1.36) mg/L이었다. Figure 8(b)를 살펴보면, UMBR조에서 고형 인성분이 침전 및 생흡착으로 제거되는 반면, 용존 인성분인  $PO_4^{3-}$ -P의 제거율은 낮았다. 총인의 농도가 높지 않고  $PO_4^{3-}$ -N/TP의 비는 50% 이하인 국내 소규모 하

수처리장의 유입하수 특성을 고려할 때, 본 개발공정으로 법정 방류수 수질기준 (TP<2 mg/L)을 만족시키는데는 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다. 그러나 숙련된 운전요원이 부족하여 생물학적 인 제거를 위한 복잡한 운전이 적용되기 어려운 소규모 하수처리장의 현장 사정과 고농도 TP 유입시 인 제거율이 다소 불안정한 본 개발공정의 특성을 고려하면 소규모 처리시설에는 경제적 부담이 적은 무기응집제를 투입하여 인을 제거하는 방법이 가장 효율적인 운전방법일 수 있다. 이와 같은 이유로 무기응집제 투입에 따른 인 제거 특성에 관한 실험을 수행하였다. 인 제거를 위한 무기응집제로는  $Al_2O_3$  11% 함량의 액상 PAC (Poly aluminium chloride)를 청수로 10배 희석하여 일 투입량 20 l/d (14 ml/d)으로 UMBR조에 투입하였다. 약품투입 후 단계별 TP와  $PO_4^{3-}$ -P 농도는 유입수는 3.26 (1.18~4.30) mg/L와 1.32 (0.31~2.80) mg/L이었고, UMBR조는 0.29 (0.17~0.54) mg/L와 0.17 (0.06~0.35) mg/L이었고, 방류수는 0.30 (0.18~0.65) mg/L와 0.17 (0.08~0.38) mg/L이었다. Figure 8(b)를 살펴보면, 유입된  $PO_4^{3-}$ -P가 UMBR조에 투입된 PAC에 의해 80% 이상 응집침전되어 제거됨을 알 수 있다. 약품투입전 UMBR조의 TP제거율과  $PO_4^{3-}$ -P 제거율은 각각 51.0 (10.2~77.3)%와 21.5 (0.0~77.3)%이었고, 전체 처리공정의 TP제거율과  $PO_4^{3-}$ -P 제거율은 각각 55.4 (11.7~85.1)%와 22.7 (0.0~86.8)%로 나타났다. 약품투입후 UMBR조의 TP제거율과  $PO_4^{3-}$ -P 제거율은 각각 90.9 (72.8~95.9)%와 81.5 (45.2~93.0)%이었고, 전체 처리공정의 TP제거율과  $PO_4^{3-}$ -P 제거율은 각각 90.8 (72.7~97.4)%와 81.3 (37.9~92.6)%로 나타났다.

이와 같이 본 개발공정의 TP 제거율은 유입하수 중의 용존 인산염 농도에 의해 좌우되어 지는 것으로 평가되며<sup>8)</sup>, 총인 중 인산염 함량이 50% 이하인 국내 하수 특성을 고려할 때 약품은 비상시 혹은 간헐적으로 투입하는 것이 가장 경제적인 운전방법일 것으로 판단된다.

3.5. 잉여슬러지 발생량

본 개발공정에서 잉여슬러지 인발은 UMBR조의 슬러지계면이 유효수심의 75%를 초과할 경우, 반응조 하부의 농축영역에서 20,000 mg/L 이상으로 농축된 잉여슬러지 중 약 0.5m<sup>3</sup>를 수동으로 배출하였다. 슬러지 계면 측정은 광센서가 장착된 슬러지계면측정기(sludge interface analyzer)를 이용하여 주기적으로 측정하였다. 잉여슬러지 발생량 및 성상은 Table 4에 정리하였다. 잉여슬러지 발생량은 유입유량 기준으로 0.026 kg-DS/m<sup>3</sup>, 제거된 BOD5 기준으로 0.220 kg-DS/kg-BOD으로 나타났다. 정확한 비교분석은 어렵지만  $A_2O$  (Anaerobic/anoix/oxic) 계열의 활성슬러지를 이용하는 고도처리공정의 전형적인 SRT(Solid retention time) 값이 10~20 d 임을 고려하여<sup>15)</sup>, 본 개발공정과 고도처리공정의 슬러지 발생량과 비교하면 잉여슬러지 발생량이 1.9~3.8배 절감되는 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는 슬러지 발생량이 적은 생물막 공정을 적용하였고, 고농도 MLSS로 운전되는 UMBR조의 슬러지 부하 (sludge loading rate, kg-BOD/kg-MLSS · d)가 낮아 자산화율이 높고 (MLVSS/MLSS <0.67), 세포합성 대사효율이 호기조건 보다 낮은 탈질에 의해 대

**Table 4. Comparison of the excess sludge production**

		Influent flow rate (m <sup>3</sup> /d)	Influent BOD <sub>5</sub> (mg/L)	Waste sludge frow rate (m <sup>3</sup> /d)	Waste sludge conc. (mg/L)	Excess Sludge production rate	
						kg-DS/m <sup>3</sup>	kg-DS/kg-BOD
KNR <sup>®</sup> system		41.3	116.3	0.044	23,970	0.026	0.220
Typical BNR process <sup>1)</sup>	SRT <sup>2)</sup> 10d	41.3	116.3	0.52	8,000	0.100	0.860
	SRT <sup>2)</sup> 20d	41.3	116.3	0.26	8,000	0.05	0.430

<sup>1)</sup> Typical SRT values (10-20d) in biological nutrient removal process using activated sludge such as A<sub>2</sub>O and Bardenpho

<sup>2)</sup> It was determined by the following equation

$$SRT (d) = \frac{MLSS \times V}{SS_w \times Q_w}$$

where, V (reactor volume) = 13.8 m<sup>3</sup> (HRT 8h), MLSS : 3,000 mg/L,  
 SS<sub>w</sub> (waste sludge concentration) : 8,000 mg/L  
 Q<sub>w</sub> (waste sludge flow rate)

부분의 유기물이 제거되어 유입 BOD<sub>5</sub>의 세포합성 전환율이 타 공정보다 낮은 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

소규모 하수고도처리를 위해 처리용량 50 m<sup>3</sup>/d 규모의 이중 슬러지 KNR<sup>®</sup> 파일럿 플랜트를 운전한 결과를 요약하면 다음과 같다.

##### 1) 소규모 하수처리장 유입수 특성

하수는 18.5~64.0 (41.3) m<sup>3</sup>/d 범위로 유입되었으며, 이는 설계유량 (50m<sup>3</sup>/d)의 37~128% 범위로 일별 유량 변동 폭이 비교적 컸다. 유입 하수농도는 BOD<sub>5</sub> 70.2-152.2 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 45.7-112.0 mg/L, COD<sub>Cr</sub> 148.8-355.7 mg/L, SS 29.5-382.1 mg/L, TN 20.0-41.7 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 11.8-39.1 mg/L, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 0.1-0.9 mg/L, TP 0.65-5.07 mg/L, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 0.29-2.43 mg/L의 범위로 유입되었다. 유입 하수 수온은 18.1~27.1℃, pH는 6.8~7.4이었다.

##### 2) 유기물 및 부유물질 제거율

UMBR조 유출수의 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Cr</sub>, COD<sub>Mn</sub>, SS 농도는 각각 17.9 mg/L, 32.2 mg/L, 16.0 mg/L, SS 농도는 16.6 mg/L로 나타났으며, 방류수는 각각 4.2 mg/L, 11.0 mg/L, 8.8 mg/L, 3.5 mg/L로 나타났다. UMBR조에서 80% 이상의 유기물과 부유물질이 제거되어 후속 담체조는 최적의 질산화 조건이 유지된 것으로 평가된다.

##### 3) 질소제거

유입 유량과 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 변동이 심하여 담체조의 평균 SNR은 설계기준 보다 낮은 0.53 g-N/m<sup>3</sup>·d 이었으며, 시스템이 안정화된 이후에는 유입 유량, C/N 비, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 부하량 등의 운전조건과 관계없이 항상 높은 질산화율을 나타내었으며, 방류수

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도는 1.0 mg/L 이하로 유출되었다. 실험기간 중 최대 SNR은 0.96 g-N/m<sup>3</sup>·d이었으며, 이때 질산화율이 96.4%으로 나타나 설계기준인 1.0 g-N/m<sup>3</sup>·d에서도 안정적인 질산화율을 나타낼 수 있을 것으로 평가된다.

평균 질산성질소 부하는 0.030 g-N/g-VSS·d이었으며, 내부 반송 유량을 일정하게 운전하여 유입하수량과 유입 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도에 많은 영향을 받았으며, 운전 MLSS (6,000 mg/L 이상, VSS/TSS=0.67)가 높아 타공정보다 수치가 낮게 나타났다. 실험기간 중 BOD/N 비는 3.8 (2.3~6.5)로 나타났으며, 단위 반응조별 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도기준으로 계산된 탈질효율은 88.6 (73.1 ~ 98.4)%로 나타났다. 특히 UMBR조에서 고농도 슬러지층이 유지되어 유기물이 부족한 BOD/N 비가 3 이하인 경우에도 75% 이상의 높은 탈질효율을 나타내었다.

각 단계별 평균 TN 농도는 유입수 31.3 mg/L, UMBR조 10.4 mg/L, 방류수 9.8 mg/L로 나타났으며, 전체 공정의 TN 제거율은 68.2%이었다.

##### 4) 총인 제거

약품투입전 각 단계별 TP와 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도는 유입수는 2.59 mg/L와 1.24 mg/L이었고, UMBR조는 1.26 mg/L와 0.87 mg/L이었고, 방류수는 1.11 mg/L와 0.81 mg/L이었다. 약품투입 후 각 단계별 TP와 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도는 유입수는 3.26 mg/L와 1.32 mg/L이었고, UMBR조는 0.29 mg/L와 0.17 mg/L이었고, 방류수는 0.30 mg/L와 0.17 mg/L이었다. 본 개발공정은 약품투입 없이도 수질기준을 만족할 수 있으나, 과부하 혹은 비상시를 대비하여 간헐적으로 약품을 투입하는 것이 가장 경제적인 운전방법일 것으로 평가된다.

##### 5) 슬러지 발생량

잉여슬러지 발생량은 유입유량 기준으로 0.026 kg-DS/m<sup>3</sup>, 제거된 BOD<sub>5</sub> 기준으로 0.220 kg-DS/kg-BOD으로 나타났다. 정확한 비교분석은 어렵지만, 일반적으로 체류시간 8h, MLSS

3,000 mg/L, SRT (solid retention time) 10~20일로 운전되어지는 A<sub>2</sub>O 공정의 슬러지 발생량과 비교하면 잉여슬러지 발생량이 1.9~3.8배 절감되는 것으로 나타났다.

이와 같이 본 개발공정은 유량 및 농도 부하가 심한 현장조건에서 우수한 처리성능 및 시스템의 안정성을 나타내었다. 따라서 살수여상(Trickling filter), 회전원판접촉법(Rotating biological contactor), 접촉산화조(Contact oxidation system), 호기성 바이오필터(Aerobic biofilter) 등과 같은 기존 생물막 공정 전단에 UMBR조를 설치하면 간단히 고도처리 공정으로 개선될 것으로 평가된다.

## 감 사

본 연구는 중소기업청의 중소기업기술혁신개발사업의 일환으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Collivignarelli, C., Urbini, G., Farneti, A., Bassetti, A., and Barbaresi, U., "Performance of a partly aerated biofilter in the removal of nitrogen" *Wat. Sci. Tech.*, **34**(1/2), 187-194 (1990).
- Chernicharo, C. A., and Machado, R. M. G., "Feasibility of the UASB/AF system for domestic sewage treatment in developing countries" *Wat. Sci. Tech.*, **38**(8-9), 325-332 (1998).
- Garuti, G., Dohanyos, M., Tilche, A., "Anaerobic-aerobic combined process for the treatment of sewage with nutrient removal: the ANANOX<sup>®</sup> process" *Wat. Sci. Tech.*, **25**(7), 383-394 (1992).
- Bodík, I., Kratochvíl, K., Gašpariková, E., Hutnan, M., "Nitrogen removal in an anaerobic baffled filter reactor with aerobic post-treatment" *Biores. Technol.*, **86**, 79-84 (2003).
- Kwon, J. C., Shin, H. S., Bae, B. W., Yoo, K. S., "Wastewater treatment plant comprising upflow anaerobic reactor and wastewater treatment method using thereof" U.S. Patent, 6,352,643 B1 (2002).
- 권중천, 문서연, 양창환, 심광보, "상향류 다층 생물반응조를 이용한 하수의 질소 인 제거 (KNR<sup>®</sup> System) pilot plant 운전" *대한환경공학회지*, **25**(1), 65-71 (2003).
- Kwon, J. C., An, J. Y., Shim, K. B., Shin, H. S., Jun, H. B., "Nitrogen and phosphorus removal of pilot scale plant using UMBR (upflow multi-layer bioreactor) as anaerobic/anoxic reactor" *WEFTEC<sup>®</sup> 2003*, Los Angeles, (2003).
- Kwon, J. C., Park, H. S., An, J. Y., Shim, K. B., Kim, Y. H., Shin, H. S., "Biological nutrient removal in simple dual sludge system with an UMBR (upflow multi-layer bioreactor) and aerobic biofilm reactor" *Wat. Sci. Tech.*, **52**(10-11), 443-451 (2005).
- APHA-AWWA-WEF, "Standard Methods for examination of water and wastewater" 20th ed., American Public Health Association, New York, 1998.
- Narkis, N., Rebhun, M., Sheindorf, C., "Denitrification at various carbon to nitrogen ratios" *Wat. Res.*, **13**(1), 93-98 (1979).
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., "Wastewater engineering: Treatment and reuse" 4th ed, Metcalf & Eddy Inc., McGraw-Hill, New York, 2003.
- Beer, C., Bergenthal, J. F., Wang, L. K., "A study of endogenous nitrate respiration of activated sludge" *Proc. 9th Mid-Atlantic Ind. Waste Conf.*, Bucknell, 207-215 (1977).
- 신항식, 서창원, 이상형, 정형석, 임재립, 권중천, "UMBR (Upflow Multi-layer Bio Reactor)을 이용한 KNR<sup>®</sup> Process에서 유입수의 COD/N 비와 내부반송비가 질소제거율에 미치는 영향" *대한환경공학회지*, **26**(3), 355-361 (2004).
- Wei, Y. S., van Houten, R. T., Borger, A. R., Eikelboom, D. H., Fan, Y. B., "Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment" *Wat. Res.*, **37**(18), 4453-4467 (2003).
- Randall, C. W., Barnard, J. L., Stensel, H. D., "Water quality management library, Vol. 5. Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal" Technomic Pub., Lancaster, Pennsylvania, 1992.