

낮은 C/N 비에서 운영되는 SBR 유형의 Two-Sludge 공정의 질소 제거 특성

류홍덕[†] · 김학인 · 이상일

충북대학교 공과대학 환경공학과

(2005년 6월 3일 접수, 2005년 12월 29일 채택)

Nitrogen Removal Characteristics in Two-Sludge System of SBR Type Using Sewage Wastewater of Low C/N Ratio

Hong-Duck Ryu[†] · Hak-In Kim · Sang-Il Lee

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

ABSTRACT : In this study, nitrogen removal characteristics of SBR3 process, which is two-sludge system of sequencing batch reactor (SBR) type, were investigated, with comparison of those of SBR1 process, which is conventional SBR process, and SBR2 process, which was designed to enhance denitrification efficiency through step-feeding of wastewater, using domestic wastewater. SBR3 process of two-sludge type can perform external nitrification, on which nitrification occurs in separated reactor, and enhanced denitrification using biosorbed organics. In the results with domestic wastewater, T-N removal efficiency of SBR3 process was better than those of SBR1 and SBR2 processes. It was observed that bigger difference of T-N removal efficiency between SBR3 process and SBR1 & SBR2 processes was showed at low C/N ratio than that at high C/N ratio resulting from more efficient use of organics by biosorption mechanism in denitrification of SBR3 process than those of SBR1 and SBR2 processes. In addition, T-N removal efficiency of SBR3 process according to influent T-N loading rate was better than those of SBR1 and SBR2, even though influent T-N loading rate of SBR3 process was higher than that of SBR1 and SBR2 process resulting from operation of SBR3 process in short hydraulic retention time (HRT) by external nitrification.

Key Words : Two-Sludge, Biosorption, Domestic Wastewater, C/N Ratio, External Nitrification, HRT

요약 : 본 연구에서는 도시하수를 이용하여 two-sludge 시스템방식의 SBR3 공정의 질소제거 효율 향상능을 평가하기 위해 기존 재래식 SBR 공정(SBR1) 및 분할주입(step-feeding)을 통해 탈질효율 향상을 도모한 SBR2 공정과의 비교 연구를 수행하였다. 도시하수를 대상으로 한 연구결과 two-sludge 시스템 방식으로 질산화 반응이 별도의 반응조에서 진행되며(external nitrification), 질산화된 질산염은 생흡착된 유기물을 이용하여 효과적으로 탈질되는 SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 반응조에 비해 T-N 제거효율면에서 우수함이 관찰되었다. SBR3 공정과 SBR1 및 SBR2 공정의 T-N 제거효율 차이는 낮은 C/N 비에서 더 크게 관찰되었으며 이는 생흡착 기작을 이용하는 SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 탈질시 유기물 이용을 효율적으로 함을 의미한다. SBR3 공정은 T-N 유입 부하율에 따른 T-N 제거효율 관계에서도 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 성능이 우수함을 관찰할 수 있었다. SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 높은 T-N 부하율에서도 질소제거효율이 높은 원인은 SBR3 공정이 two-sludge 시스템 방식으로 운영됨에 따라 질화박테리아가 독립된 반응조에서 질산화를 수행하므로(external nitrification) 질산화 반응시 소요되는 수리학적 체류시간을 단축시킬 수 있기 때문이다.

주제어 : Two-Sludge, 생흡착, 도시하수, C/N 비, 질산화, 수리학적 체류시간

1. 서론

현재 신규로 설치되는 마을하수도는 정부의 4대강 물관리 종합 대책 및 하수도법 시행규칙상의 방류수 수질 기준 등을 감안하여 BOD 및 SS는 10 mg/L, COD_{Mn} 40 mg/L, T-N 20 mg/L, T-P 2 mg/L 이하가 되도록 규제되고 있다. 하지만, 현행 질소 및 인의 방류수 기준 농도는 미국 등 선진국의 유출수 기준(질소: 3~10 mg/L; 인: 0.2~1.0 mg/L)에 비해 매

우 높은 편으로 수질보전과 수서 생태계의 보호를 위해서는 조만간 선진국 수준의 방류수 기준이 법적으로 규제될 것으로 예상된다. 그러나 현재 영양염류 처리 공정으로서 마을 하수도에 적용되고 있는 공정은 외국에서 도입된 A/O 계열의 단일 슬러지 공정(single-sludge system)과 SBR(sequencing batch reactor) 공정이 대부분으로서 이러한 공정으로는 앞으로 선진국 수준으로 강화될 T-N 및 T-P 기준을 맞추기가 어려울 것으로 판단된다. 왜냐하면 우리나라 하수는 C/N 비가 낮아 질소 처리를 하는데 한계가 있다는 점과 마을하수도 처리에 가장 많이 사용되고 있는 SBR 공정은 후탈질 기법을 이용하기 때문에 탈질시 반드시 필요한 유기물이 무산조

[†] Corresponding author

E-mail: nanumenv@hanmail.net

Tel: 043-261-3667

Fax: 043-272-2469

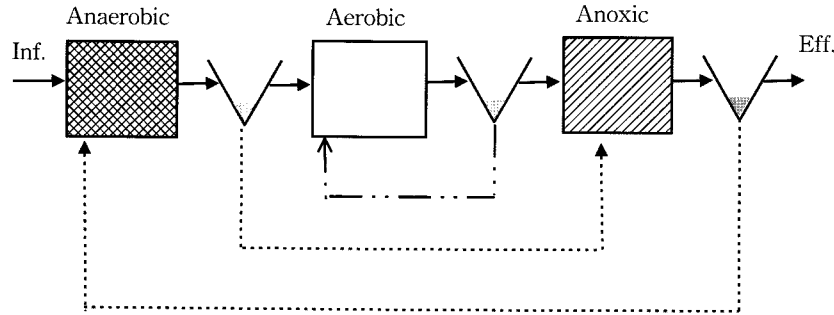


Fig. 1. A basic configuration of a two-sludge system.

(anoxic) 조건 전에 운영되는 호기(aerobic) 조건에서 파괴되어 탈질시에 이를 이용할 수 없기 때문이다.¹⁾

우리나라 하수의 낮은 C/N 비 문제를 해결하고 짧은 수리학적 체류시간에서도 효율적인 질소 처리를 하기 위해서는 생흡착에 의한 방법으로 유기물을 흡착, 농축시켜 이를 질소처리에 이용하고 전체 공정의 수리학적 체류시간을 결정하는 질산화 반응의 촉진을 위해 별도의 반응조에 질산화균을 농축시켜 우점화 시키는 two-sludge 공정이 바람직할 것으로 사료된다.

유기물을 흡착시켜 이를 탈질에 활용하는 몇몇 연구로는 활성탄(Granular Activated Carbon, GAC)의 공극표면에 유기물을 흡착시켜 탈질효율을 증가시키는 사례가 보고된 바 있으며,²⁾ Hao 등³⁾은 산화지(Oxidation ditch)의 탈질 효율 향상에 관한 연구에서 기존 산화지에 30분의 활성슬러지 체류시간을 갖는 유기물 접촉조(Contact-tank)를 설치함으로써 기존 45%에서 약 83%까지 T-N 제거효율을 향상시켰으며 탈질 능력이 약 240%까지 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. Kuba 등⁴⁾은 회분식 다단 슬러지 공정(two-sludge system) 연구에서 다단 슬러지 공정(two-sludge system)의 경우 유기물이 호기성 반응조에서 소모되지 않고 활성슬러지에 흡착된 유기물을 영양염류 제거에 이용할 수 있기 때문에 기존 영양염류 처리 공정보다 필요 유기물량을 50%까지 줄일 수 있다고 보고하였다. 국내 연구로는 SBR 반응조 시스템에서 유기물질 농도가 상대적으로 낮은 하수로부터 유기물질을 반송슬러지의 흡착특성을 이용하여 암모니아와 분리한 다음 암모니아성 질소를 질산화시킨 후 탈질과정에서 유기탄소원으로 활용하는 연구가 보고된 바 있으며 연구결과 하수원수를 혐기성 상태에서 10분 접촉시켰을 때 유입 COD의 90% 이상이 혐기성 접촉과정에서 분리되었으며, 흡착된 유기물을 이용하여 TCOD/TKN 비가 6.4로 낮은 상태에서도 T-N 제거효율이 약 90% 정도 되는 것으로 나타났다.⁵⁾

Two-sludge 공정이란 상기에서 언급한 활성슬러지에 의한 유기물 흡착 기작을 이용하여 질산화 미생물과 탈질 및 인 제거미생물이 서로 혼합되지 않고 분리된 공간에서 각자의 역할을 수행하는 공정을 말하며, 다단 슬러지 공정의 가장 기본적인 형태는 Fig. 1과 같다. 다단 슬러지 공정은 크게 네가지 장점을 가지고 있다. 첫째, 질화박테리아가 독립된 반응조에서 질산화를 수행하므로(external nitrification) 질산화 반응시 소요되는 수리학적 체류시간이 짧아지고 결국 반응조 크

기를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 두 번째 장점으로 인 제거와 질소 제거에 대한 최적화를 개별적으로 제어할 수 있는 장점이 있다. 셋째는 질산염을 탈질시키기 위해 활성슬러지를 무산소 반응조로 내부순환(recirculation) 시킬 필요가 없기 때문에 공정 운영에 필요한 에너지가 적게 요구된다. 마지막으로 네 번째 장점으로 유기물을 활성슬러지에 흡착시켜 탈질에 바로 이용할 수 있도록 공정을 구성할 수 있다.⁴⁾

따라서 본 논문에서는 기존 SBR 공정을 two-sludge 공정으로 변형하여 유기물 이용을 극대화 시키고 질산화 박테리아를 별도의 반응조에서 농축 분리 우점화 시킴으로서 짧은 수리학적 체류시간에서도 질산화 반응을 원활히 수행할 수 있도록 하였다. 본 논문의 SBR 유형의 two-sludge 공정의 질소 제거능을 평가하기 위해 기존 SBR 공정을 대조군으로 하여 상호 비교하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 도시하수의 성상

본 연구에 사용한 대상폐수로는 C시의 환경사업소로 유입 처리되는 도시하수를 이용하였으며 대상폐수의 성상은 Table 1과 같다. Table 1에 의하면 유입 하수의 TCOD/TKN비가 약 5로서 미국의 Water Pollution Control Federation에서 출간한 영양염류 제어에 관한 시방서(Manual of Practice No. FD-7)에서 보고된 최적의 탈질조건을 만족시키기 위한 TCOD/TKN = 13~15 이상에 크게 미치지 못함을 알 수 있다.⁶⁾

Table 1. Average characteristics of domestic wastewater used in this research

Parameter	Concentration (mg/L)
TCOD _{Cr}	233.2±79.8*
SCOD _{Cr}	129.8±37.9
TKN	44.4±3.8
NH ₄ ⁺ -N	36.4±4.8
T-P	6.8±1.7
PO ₄ ³⁻ -P	3.5±0.7
TSS	3,150±550
TCOD _{Cr} /TKN	5.2±1.7

* Standard Deviation

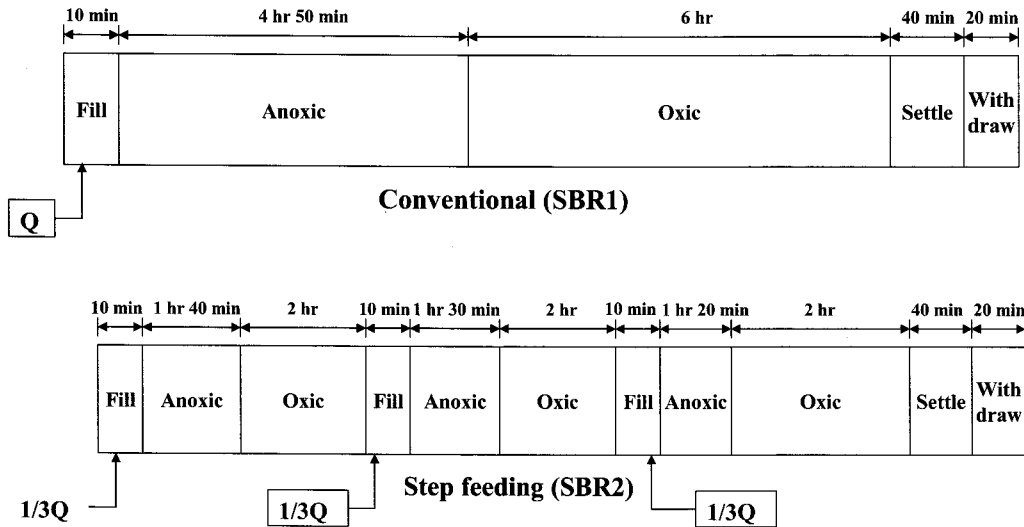


Fig. 2. Operation strategy in SBR1 and SBR2.

2.2. SBR 반응조 설치 및 운영조건

본 연구에 이용된 SBR 유형의 two-sludge process (SBR3)의 성능을 평가하기 위해 대조군으로서 conventional SBR process (SBR1, top on Fig. 2)와 분할유입 처리방식(step-feeding)의 SBR Process (SBR2, down on Fig. 2)를 동시에 운전하였다. SBR3 반응조의 공정도는 Fig. 3과 같다. 각각의 SBR 반응조는 직사각형 모양의 아크릴 수지로 제작 되었으며, 질화조를 제외한 반응조에는 paddle를 설치하여 혐기시 혼합을 원활하게 하였다. 반응조 하부에 산기관을 설치하고 산기 펌프를 이용하여 산소를 공급하였으며, 폭기 및 비폭기 시간은 time controller를 air pump에 부착하여 조정하였다. 폐수의 유입 및 유출은 time controller에 solenoid valve를 부착하여 자동제어 하였다.

SBR3 공정 및 이의 대조군으로서 운영한 SBR1, SBR2 공정 모두 유입/침전/유출은 모두 동일하게 10 min/40 min/20 min으로 동일하게 운전하였으며, conventional SBR 공정(SBR1)의 경우 anoxic/oxic은 4 hr 50 min/6 hr으로 운전되었다. 유입수를 분할 유입(step-feeding)시키는 SBR2 공정은 각각의 무산소(anoxic) 단계에 유입유량의 1/3씩 원수를 분할하여 주입하였다. Anoxic/oxic/anoxic/oxic/anoxic/oxic 단계에서의 체류시간은 1 hr 40 min/2 hr/1 hr 30 min/2 hr/1 hr 20 min/2 hr으로 운전하였다.

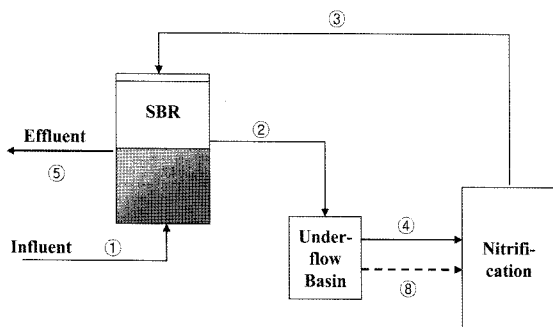


Fig. 3. Schematic diagram of the SBR3 process.

SBR3 공정의 전체 공정도의 개략적인 모습은 전술한 바와 같이 Fig. 3과 같으며 1개의 SBR 반응조와 저류조(underflow basin), 질화조(nitrification)로 구성되어 있다. SBR 반응조는 무산소(anoxic) → 호기(oxic) → 무산소(anoxic) → 호기(oxic) → 침전(settle)순으로 운영이 되며, SBR 반응조가 무산소 조건일 때 유입수가 SBR 반응조로 유입되게 된다(①). 유입된 폐수의 유기물은 무산소 조건에서 활성슬러지에 의해 생흡착(biosorption)되며, 20 min간 유기물 흡착이 완료되면 40 min 동안 침전이 진행된다. 침전후 유기물이 거의 없고 암모니아성 질소가 농축된 상정수는 저류조로 유입되어(②) 20 min간 체류하게 된다. 저류조에서 폐수가 20 min간 체류하는 동안 질화조에서는 질화가 완료된 폐수가 SBR 반응조로 유입(③)된다. SBR 반응조로 유입된 폐수는 생흡착(biosorption)된 유기물을 이용하여 효과적으로 탈질반응이 일어나게 되며, 이러한 기작으로 인해 SBR3 공정이 낮은 C/N 비를 가진 하수 처리시에도 높은 질소 제거효율을 보여주게 된다. 질화조에서 SBR 반응조로 폐수 이동이 완료되면 저류조에서 체류하고 있던 폐수가 질화조로 유입되어(④) 2 hr 동안 질산화반응이 일어나게 된다. 이때 질산화 반응조로 유입되는 폐수는 전단계에서 유기물이 흡착된 폐수이기 때문에 짧은 수리학적 체류시간에서도 질산화 반응이 원활하게 일어나게 된다. 질산화 반응조에는 유동상 매디아를 사용하였으며, 이때 사용된 유동상 매디아는 cubic type의 Linpor(size: 12×12×15 mm)를 사용하였으며, 매디아 충전율은 약 20%로 하였다. 충전율을 20%로 한 이유는 P사의 “페타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술”에서 담체 충전율을 10~20%로 한 것을 근거로 하였다.⁷⁾ SBR 반응조에서 탈질이 완료된 활성슬러지 혼합액은 SBR 반응조를 호기(oxic) → 무산소(anoxic) → 호기(oxic) → 무산소(anoxic)로 운영함으로써 잔류 암모니아성 질소의 질산화와 탈질을 거친 후 상정액을 방류시키게 된다(⑤). 상기 언급한 SBR3 공정의 보다 상세한 운영 방법을 Fig. 4에 도시하였다.

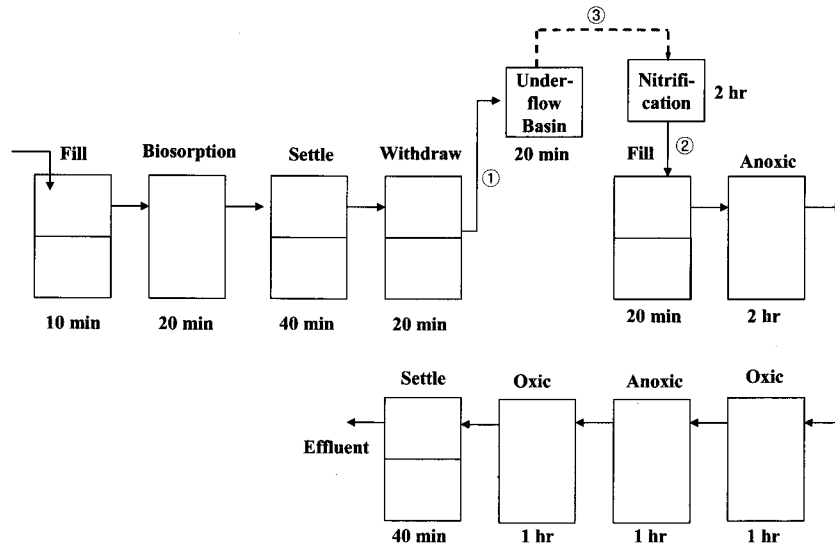


Fig. 4. Operating strategy of SBR3 process.

상기 언급한 바와 같이 SBR3 공정은 폐수에 함유되어 있는 유기물을 선행 흡착시킴으로서 질산화 미생물을 별도의 반응조에서 우점화 시키는 two-sludge 공정이다. SBR3 공정은 낮은 C/N비에서의 탈질효율 향상과 짧은 수리학적 체류시간에서도 원활한 질산화를 수행하기 위하여 착안한 공정으로서 기존 SBR공정에서의 단점중 하나였던 질산화에 의한 유기물 파괴를 최소화하기 위하여 유기물 흡착과 질산화를 별도의 반응조에서 수행하고 질산화된 질산염은 흡착된 유기물을 이용하여 효과적인 탈질이 일어나도록 고안된 공정이다.

본 공정은 two-sludge 시스템으로서 질산화 반응조 내에서 질화균의 우점화를 꾀할 수 있다는 점과 질산화 반응조에 유동상 매다이를 사용하기 때문에 기존 SBR 공정에 비해 온도 및 독성물질의 영향을 덜 받을 수 있다는 점을 가장 큰 장점으로 꼽을 수 있다.

SBR1 및 SBR2 반응조 크기는 각각 동일하게 8.45 L로 하였으며, SBR3 공정(Fig. 3)에서 SBR, 저류조, 질산화 반응조의 크기는 각각 8.45, 8, 8.45 L로 하였다. SBR1, SBR2 및 SBR3의 전체 수리학적 체류시간은 SBR3 공정은 10 hr 20 min, SBR1 및 SBR2 공정은 SBR3 공정보다 긴 12 hr으로 운영하였다. 고형물 체류시간(Sludge Retention Time; SRT)은 세 공정 모두 25 day로 운영하였으며, 실험시 온도는 18~25°C 범위였다.

본 연구에서는 기존 SBR 공정인 SBR1 및 SBR2 공정과 본 연구에서 개발하고자 한 two-sludge 공정으로써 유기물 이용을 극대화 시키고 질산화 박테리아를 별도의 반응조에서 농축 분리 우점화 시킴으로서 짧은 수리학적 체류시간에서도 질산화 반응을 원활히 수행할 수 있도록 한 SBR3 공정을 질소 제거를 중심으로 상호 비교하고자 하였다.

2.3. 측정항목 및 방법

본 연구에서는 채취된 시료를 분석시 이온성 물질의 경우 0.45 µm membrane filter(Whatman 사, 직경 47 mm)로 여과

하여 측정하였다. 단 고형성분을 측정할 경우에는 여과하지 않았다. 측정은 Standard method⁸⁾에 준하여 이루어졌으며 측정항목은 ML(V)SS(2540-solid), COD_{Cr}(5220-COD-C & D, 5910-UV-absorbing organic constituent-B-HACH), NH₄⁺-N(4500-NH₃-B & C-HACH), NO₂⁻-N(4500-NO₂⁻-B), NO₃⁻-N(4500-NO₃⁻-B & C) 및 PO₄³⁻-P(4500-P-B & E) 등이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거 특성

SBR 공정에서의 유기물질 제거는 anoxic/oxic step 모두가 이에 해당된다. anoxic step에서는 탈질(denitrification)에 필요한 에너지원으로서의 유기물질 제거기작과 인 제거 미생물에 의한 phosphate(PO₄³⁻)의 방출에 필요한 에너지원으로서의 유기물질 제거 기작이 있으며, oxic step에서는 종속영양 미생물에 의한 유기물질 제거가 그것이다.

Fig. 5는 운영기간 동안 SBR1, SBR2, SBR3 공정의 TCOD 및 SCOD 제거 특성을 나타낸 것이다. 세 공정의 TCOD의 평균 유입, 유출 농도는 약 233 mg/L의 원수가 반응조 내로 유입되어 SBR3 공정은 23 mg/L, SBR1 공정은 32 mg/L, SBR2 공정은 29 mg/L로 유출되었으며, SCOD의 평균 유입, 유출 농도는 130 mg/L의 원수가 반응조 내로 유입되어 SBR3, SBR1 및 SBR2 공정의 유출농도는 각각 17 mg/L, 22 mg/L 및 23 mg/L로 관찰되었다. 즉 SBR1, SBR2 및 SBR3 공정의 TCOD 제거효율은 각각 약 84%, 85%, 89%로 관찰되었으며, SCOD 제거효율은 각각 약 81%, 80%, 86%로 관찰되어 유기물 제거효율에 있어서는 세 공정이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

3.2. 질소제거 특성

Fig 6은 NH₄⁺-N와 TKN의 유입, 유출농도의 변화량과 그에 따른 제거효율을 나타낸 것이다. 실험결과 SBR1, SBR2

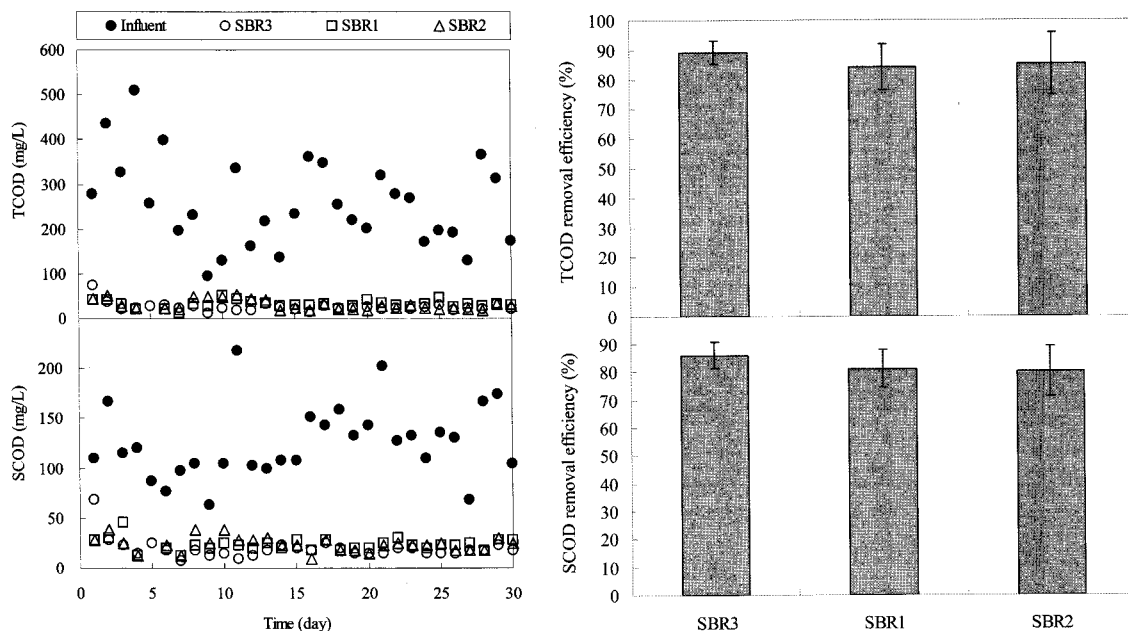


Fig. 5. Temporal variations(left) and removal efficiencies(right) of TCOD and SCOD in SBR1, SBR2 and SBR3.

및 SBR3 공정의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거효율은 각각 약 99%, 97%, 98%로 관찰되었으며, TKN 제거효율은 93%, 91%, 94%로 나타나 세 공정 모두 질산화는 매우 원활히 일어나는 것으로 관찰되었다. 하지만 탈질효율에 있어서는 SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 우수한 것으로 나타났다. Fig. 7에서 나타난 것처럼 방류수 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 및 T-N 농도가 SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 더 낮은 것을 관찰할 수 있었다. SBR1, SBR2 및 SBR3 공정의 방류수 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 각각 16 mg/L, 12.2 mg/L, 10.8 mg/L로 SBR3 공정이 SBR2 및 SBR1 공정에 비해 약 1.4 ~ 5.2 mg/L 더 낮은 것을 관찰

할 수 있었으며, 방류수 T-N의 경우 SBR1, SBR2, SBR3 공정이 각각 18.9 mg/L, 16.7 mg/L, 13.1 mg/L 로 관찰되어 SBR3 공정이 SBR2 및 SBR1 공정에 비해 약 3.6~5.8 mg/L 더 낮은 것을 관찰 할 수 있었다. 효율적인 측면에 있어서는 SBR1, SBR2, SBR3 공정의 T-N 제거효율이 각각 약 58%, 62%, 70%로 관찰되어 SBR3 공정이 SBR1 공정에 비해 약 12%, SBR2 공정에 비해서는 약 8% 더 높게 관찰 되었다.

각 공정에서 하루에 제거된 T-N 제거량을 일별로 나타낸 그림(Fig. 7)에 의하면 SBR1, SBR2, SBR3 공정에서 제거된

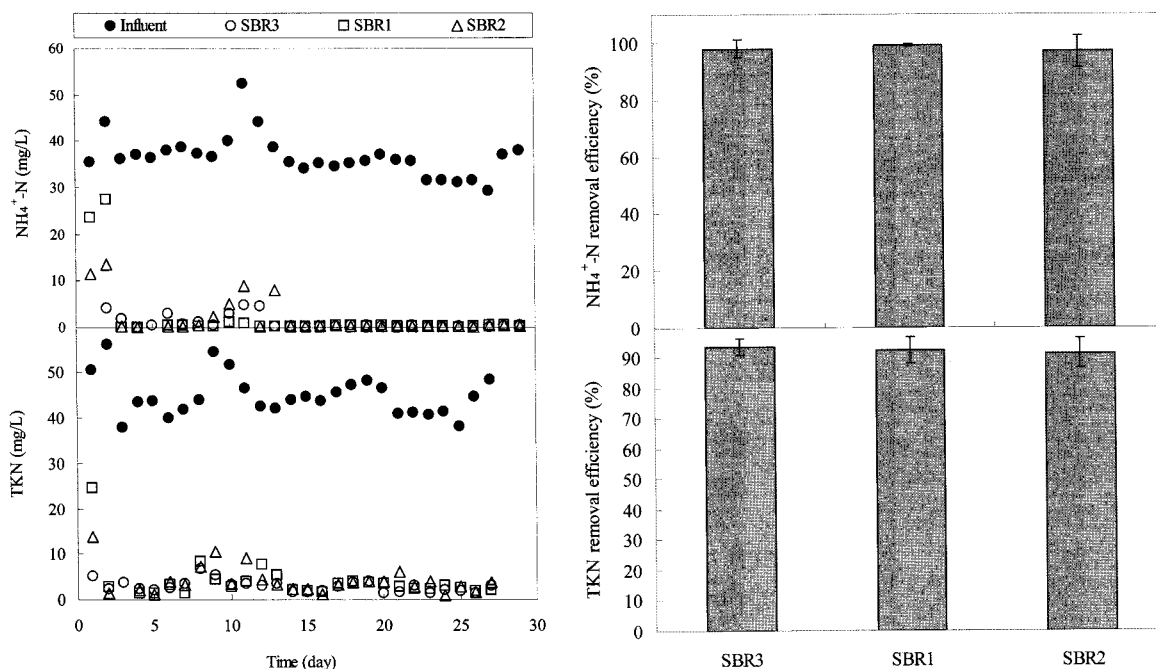


Fig. 6. Temporal variations(left) and removal efficiencies(right) of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TKN in SBR1, SBR2 and SBR3.

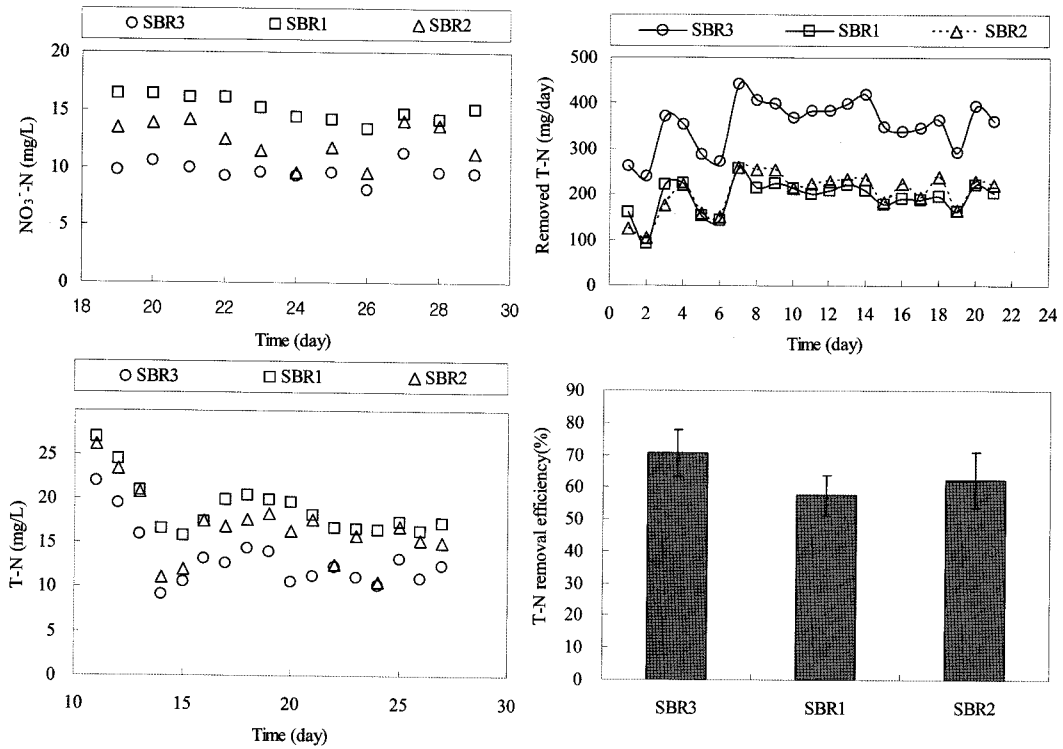


Fig. 7. Characteristics of T-N removal and effluent $\text{NO}_3\text{-N}$ and T-N in SBR1, SBR2 and SBR3.

T-N 제거량이 평균 각각 약 198 g/day, 215 g/day, 364 g/day로 관찰되어 SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 약 149~166 g/day가 더 많은 것으로 관찰되었다. 이렇게 SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 T-N 제거효율이 높은 원인은 SBR3 공정은 전단계에서 기흡착된 유기물을 이용(평균 약 79%의 TCOD 생흡착율이 관찰되었음)하여 질산염을 탈질시키는 기작을 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다. 즉 같은 C/N 비라 하더라도 SBR3 공정이 탈질시 유기물을 효율적으로 이용할 수 있다는 의미로 해석할 수 있다. SBR1 및 SBR2 공정은 단일 슬러지 시스템(single sludge system)으로서 SBR1 공정의 경우 유입된 유기물이 무산소(anoxic) 단계에서 효율적으로 쓰이지 못하고 호기(oxic) 조건에서 고갈되며, SBR2 공정은 유기물 이용을 SBR1 공정보다 효율적으로 하기 위해 분할주입을 시도했지만 탈질에 필요한 유기물 양의 부족으로 SBR3 공정에 비해 질소제거효율이 낮았던 것으로 사료된다.

SBR1 공정에 비해 SBR2 공정에서 방류되는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 T-N 농도가 더 낮게 관찰되었다. 이는 SBR2 공정의 무산소(anoxic) 단계에서 유입수를 분할주입(step-feeding)하였기 때문인 것으로 사료되며, 이로 인해 SBR2 공정이 SBR1 공정에 비해 탈질시 필요한 유기물을 효율적으로 사용했기 때문인 것으로 사료된다.

3.3. C/N 비 및 유입 질소 부하의 영향

SBR1 및 SBR2 공정에 비해 생흡착 기작을 이용하는 SBR3 공정의 질소제거 우수성은 낮은 C/N 비에서 더 극명하게 나타나고 있음을 Fig. 8을 통해 관찰할 수 있다. Fig. 8은 유입

SCOD와 각 SBR 반응조에서의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 비에 따른 T-N 제거 효율을 나타낸 그래프이다. Fig. 8을 관찰해보면 C/N 비가 감소할수록 SBR3 공정의 T-N 제거효율과 SBR1 및 SBR2 공정의 T-N 제거 효율 차이가 크고 C/N 비가 증가할수록 그 차이가 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 유입 하수의 C/N 비가 낮을 때 SBR3 공정이 기존의 SBR 공정(e.g. SBR1 and SBR2)에 비해 유기물 이용에 효과적임을 보여주는 것이며, 이러한 결과는 우리나라와 같이 낮은 C/N 비를 가진 하수의 질소처리에 있어서는 기존의 단일 슬러지 시스템(single sludge system)보다 two-sludge 시스템이 보다 효율적임을 보여준다. Two-sludge 공정은 유기물 손실을 최소화시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.⁴⁾ 즉, 질소제거에 있어 생흡착에 의한 유기물 이용은 C/N 비가 낮을 경우 더 효율적임을 알 수 있다.

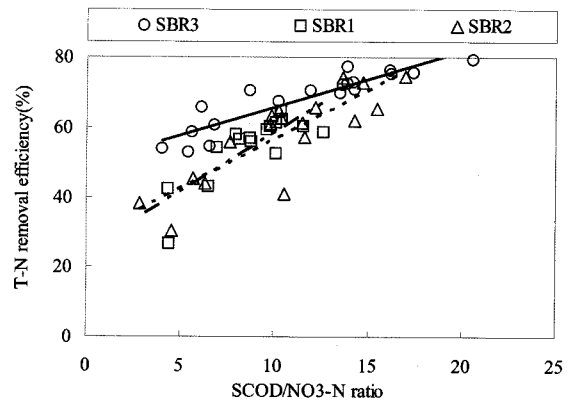


Fig. 8. T-N removal efficiencies as function of SCOD/ $\text{NO}_3\text{-N}$ ratio in SBR1, SBR2 and SBR3.

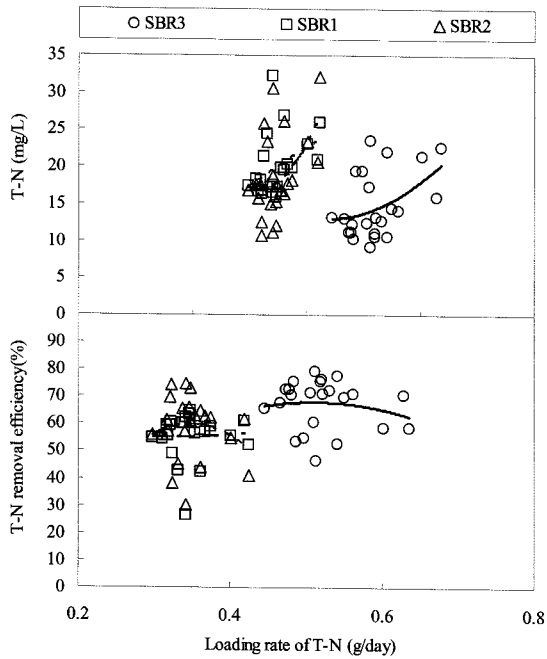


Fig. 9. Characteristics of T-N removal according to loading rate of T-N of SBR1, SBR2 and SBR3.

유입 T-N 부하에 따른 T-N 제거효율은 Fig. 9에 나타내었다. 전술한 바와 같이 SBR3 공정의 경우 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 수리학적 체류시간이 짧았기 때문에 SBR3 공정으로 유입되는 T-N 부하율(약 0.53 g/day)이 SBR1 및 SBR2로 유입되는 T-N 부하율(0.35)보다 컸음에도 불구하고 SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 T-N 제거효율이 더 높은 것으로 관찰되었다. 즉, SBR3 공정의 T-N 제거효율

은 약 66%로 나타났으나, SBR1 및 SBR2 공정의 T-N 제거효율은 각각 55%, 58%로 나타나 SBR3 공정이 SBR1 공정에 비해서는 11%, SBR2 공정에 비해서는 8% 더 높은 효율을 보이고 있음을 관찰할 수 있었다. SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 높은 T-N 부하율에서도 질소제거효율이 높은 원인은 SBR3 공정은 탈질과 질산화가 별개의 반응조에서 수행되는 two-sludge 공정이기 때문이며, two-sludge 공정을 비롯하여 다단 슬러지 공정은 SBR3 공정처럼 질화 박테리아가 독립된 반응조에서 질산화를 수행하므로(external nitrification) 질산화 반응시 소요되는 수리학적 체류시간이 짧아지고 결국 반응조 크기를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

3.4. 인 제거 특성

인 제거 특성은 Fig. 10에 나타내었다. SBR1, SBR2, SBR3 공정의 인 제거 효율은 전반적으로 낮게 관찰되었다. 즉, SBR1, SBR2, SBR3 공정의 평균 PO_4^{3-} -P 제거효율은 각각 약 18%, 9%, 16%, T-P 제거효율은 각각 30%, 37%, 35%의 제거효율이 관찰되었다. SBR3 공정은 two-sludge 공정으로서 타 연구에서처럼 DPB(Denitrifying phosphorus removing bacteria)에 의해 인 제거효율이 높을 것으로 기대했으나¹⁾ 유입 도시하수의 낮은 C/N비와 인 처리에 부적합한 SBR 공정이라는 한계로 인해 기대했던 인 제거효율을 달성하지 못한 것으로 사료된다.

인 제거특성에 있어서 전반적으로 TCOD/TP 비 증가로 인해 인 제거효율이 증가하는 경향을 관찰 할 수 있었으며, 반응조내의 NO_3^- -N가 증가함에 따라 방류수에 함유된 인 농도가 높은 것을 관찰할 수 있었다.

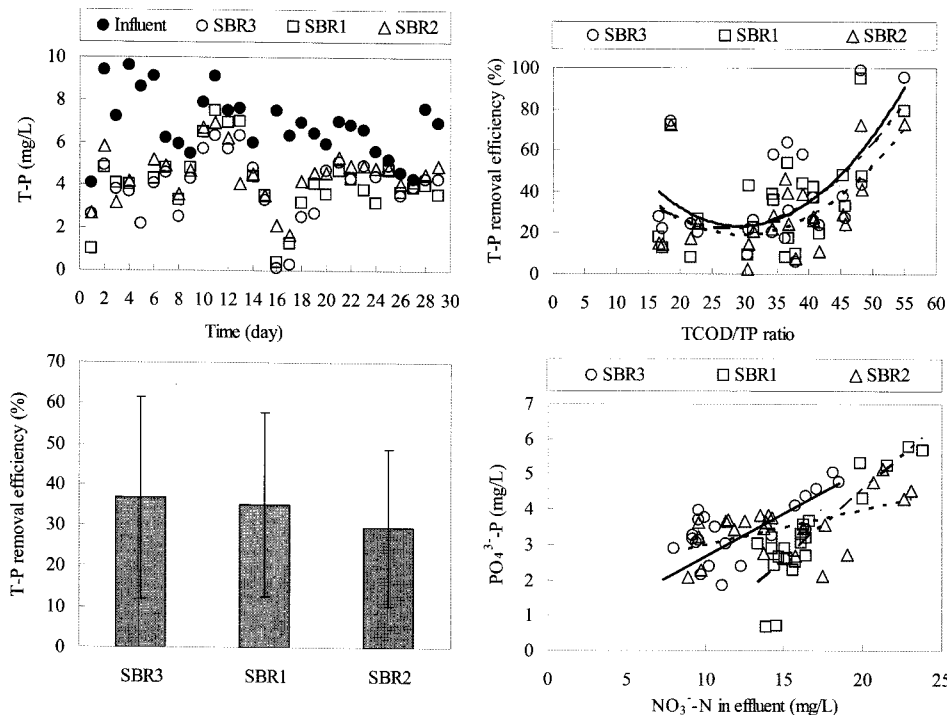


Fig. 10. Characteristics of phosphorus removal in SBR1, SBR2 and SBR3.

4. 결론

Two-sludge 시스템방식의 SBR3 공정의 질소제거 효율 향상능을 평가하기 위해 기존 재래식 SBR 공정(SBR1) 및 분할주입을 통해 탈질효율 향상을 도모한 SBR2 공정과의 비교 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유기물 제거효율에 있어서 two-sludge 방식의 SBR3 공정은 기타 대조공정(SBR1, SBR2) 공정과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 관찰되었다.

2) SBR1, SBR2, SBR3 공정의 질소제거능을 비교 평가한 결과 SBR3 공정에서 방류되는 NO_3^- -N 농도는 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 각각 5.2 mg/L 및 1.4 mg/L 더 낮게 관찰되었으며 T-N 제거효율은 SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정보다 각각 약 12% 및 8% 더 높게 관찰되었다. SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 T-N 제거효율이 더 높은 원인은 생흡착 기작을 통해 탈질시 하수중 유기물을 효과적으로 이용했기 때문인 것으로 사료된다.

3) C/N 비에 따른 질소제거효율을 관찰한 결과 C/N 비가 높을 때보다 C/N 비가 낮을 때 SBR3 공정과 SBR1 및 SBR2 공정의 질소제거효율 차이가 크게 관찰되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 two-sludge 방식의 SBR3 공정이 기존 SBR 방식의 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 낮은 C/N 비에서 유기물 손실을 최소화시켜 탈질시 유기물 이용을 극대화시킬 수 있음을 시사한다고 하겠다.

4) 유입 T-N 부하율에 따른 각 공정의 T-N 제거효율을 관찰한 결과 SBR3 공정의 T-N 유입 부하율이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 컷음에도 불구하고 SBR3 공정의 T-N 제거효율이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 각각 약 11%, 8% 더 높게 관찰되었다. SBR3 공정이 SBR1 및 SBR2 공정에 비해 높은 T-N 부하율에서도 질소제거효율이 높은 원인은 SBR3 공정이 two-sludge 시스템 방식으로 운영됨에 따라 질화박테리아가 독립된 반응조에서 질산화를 수행하므로(external nitrification) 질산화 반응시 소요되는 수리학적 체류시간을 단축시킬 수 있기 때문이다.

5) SBR3 공정은 T-N 제거(탈질 및 질산화)에 있어 기존 SBR 공정(SBR1, SBR2) 공정에 비해 낮은 C/N 비에서도 유기물 이용을 극대화시킬 수 있는 공정이므로 우리나라와 같이 낮은 C/N 비를 가진 하수나 부지면적이 부족한 지역에서 매우 효율적으로 사용할 수 있는 공정이다. 따라서 기존 유기물 처리만을 목적으로 설계된 중, 소규모 하수처리장을 영양염류 처리장으로 upgrade시 좋은 대안이 될 수 있을 것으로 사료되며, pilot-plant 규모의 실험들을 통해 실용화를 하기 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 산업자원부에서 지원한 2004년도 지역혁신인력 양성사업(CN-031)의 일환으로 연구를 수행한 논문으로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경관리연구소, 2002 환경산업총람(2002).
2. Sison, N. F., Hanaki, K., and Matsuo, T., "Denitrification with External Carbon Source Utilizing Adsorption and Desorption Capability of Activated Carbon," *Water Res.*, **30**(1), 217~227(1996).
3. Hao, X., Doddema, H. J., and van Groenestijn, J. W., "Use of Contact Tank to Enhance Denitrification in Oxidation Ditches," *Water Sci. Technol.*, **34**(1~2), 195~202 (1996).
4. 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).
5. 전항배, 이상형, 박종호, 이종대, "Separated SBRs 시스템에서 분리된 유입 COD를 이용한 탈질 연구," 대한환경공학회지, **20**(5), 655~664(1998).
6. Orris, E. A., Takashi, A., Tony, K., James, L. B., Steve, L. L., Edwin, F. B., III, Alan, W. M., Bechir, M. H., Matsch, L. C., James, J. B. Jr., Isadore, N., Trevor, R. B., Robert, W. O., David, C. C., Raymond, P., Ronald, S. D., Clair, N. S., John, F. F., Robert, E. S., Gregory, M. G., Arthur, S., Carl, L. H. Jr., Stensel, H. D., William, R. H. Jr., Richard, W. S., Robert, H., Richard, A. S., Bruce, J., Richard, E. T., John, S. J., and Eliot, F. T., "Nutrient Control; Manual of Practice No. FD-7," in *Water Pollution Control Federation*, 2626 Pennsylvania Avenue, N. W. Washington, D. C. 20037, pp. 65~135(1983).
7. 환경관리공단, "환경기술검증보고서," 페타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술, pp. 4~5(2001).
8. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Ed. APHA, AWWA, and WEF, Washington D.C.(1995).