

Two-sludge 유형 SBR 공정의 최적 운영 조건 도출

류흥덕 · 황재식* · 김금용 · 이상일†

충북대학교 공과대학 환경공학과 · *한국원자력연구소 원자력화학연구부

(2006년 10월 13일 접수, 2007년 2월 16일 채택)

Optimization for SBR Process of Two-Sludge Type

Hong-Duck Ryu · Jae-Sik Hwang* · Keum-Yong Kim · Sang-Il Lee†

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

*Nuclear Chemistry Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT : In the present work, the sequencing batch reactor process of two-sludge type was optimized. The effects of solid retention time, hydraulic retention time, length of biosorption phase and temperature variation were investigated, respectively. In the T-N removal, the long solid retention time was favored. It was speculated that SCOD biosorption efficiency was higher in long solid retention time than in short solid retention time. In the comparison of hydraulic retention time, the removal efficiency of $\text{NH}_4\text{-N}$ and T-N were almost same in all applied hydraulic retention times which were 8 hr, 10 hr and 15 hr. It was observed that there was no need to have the hydraulic retention time more than 20 min in biosorption phase for enhancement of T-N removal efficiency. An experimental comparison of removal efficiencies with different temperature conditions was carried out. Decrease of temperature didn't affect the performance of the process, however, phosphorus removal efficiency was a little higher at low temperature than high temperature. Consequently, the process developed in this study was much amenable to wastewater treatment which was conducted in the low temperature and high loading rate.

Key Words : Sequencing Batch Reactor, Two-sludge, Solid Retention Time, Hydraulic Retention Time, Biosorption, Temperature

요약 : 본 연구에서는 고흡물 체류시간, 수리학적 체류시간, 생흡착시간 및 온도 변화가 이단슬러지 유형의 연속회분식반응기 공정 운영에 어떻게 영향을 주는지를 조사함으로써 본 공정을 최적화 하고자 하였다. T-N 제거에 있어서 고흡물 체류시간이 증가할수록 T-N 제거효율이 증가하는 경향을 관찰할 수 있었는데 이는 SRT가 증가할수록 SCOD 생흡착효율의 증가와 관련이 있을 것으로 판단된다. HRT 영향에 있어서 HRT 8시간, 10시간 및 15시간에서 암모니아성 제거효율 및 T-N 제거효율은 각각 HRT 영향에 관계없이 거의 같았다. 생흡착시간을 20분 이상 증가시켜도 T-N 제거효율 향상에는 도움이 되지 않는 것으로 관찰되었다. 서로 다른 온도 조건에서 공정 제거 효율 비교에 관해 조사한 결과 온도의 감소가 공정 성능에 영향을 주지는 않았으나 인 제거 효율에 있어서 높은 온도에서보다 낮은 온도에서 인 제거효율이 다소 높게 관찰되었다. 결과적으로 본 연구에서 개발된 공정은 낮은 온도 조건 및 높은 유입 부하를 가진 폐수처리에 적합한 것으로 나타났다.

주제어 : 회분식 반응조, 이단슬러지, 고흡물 체류시간, 수리학적 체류시간, 생흡착, 온도

1. 서론

현재 신규로 설치되는 마을하수도는 정부의 4대강 물관리 종합 대책 및 하수도법 시행규칙상의 방류수 수질 기준 등을 감안하여 생화학적 산소요구량(Biochemical oxygen demand; BOD) 및 부유고형물질(Suspended solid; SS)은 10 mg/L, 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand; COD_{Mn}) 40 mg/L, 총질소(Total nitrogen; T-N) 20 mg/L, 총인(Total phosphorus; 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 매우 높

은 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 재래식 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 호기(acrobic) 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

† Corresponding author

E-mail: gatorlee@chungbuk.ac.kr

Tel: 043-261-2469

Fax: 043-272-2469

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 판단된다. Two-sludge 공정이란 활성슬러지에 의한 유기물 흡착 기작을 이용하여 질산화 미생물과 탈질 및 인 제거 미생물이 서로 혼합되지 않고 분리된 공간에서 각자의 역할을 수행하는 공정을 말하며, 다단 슬러지 공정의 가장 기본적인 형태는 Fig. 1과 같다. 다단 슬러지 공정은 크게 네 가지 장점을 가지고 있다. 첫째, 질화박테리아가 독립된 반응조에서 질산화를 수행하므로(external nitrification) 질산화 반응시 소요되는 수리학적 체류시간이 짧아지고 결국 반응조 크기를 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 장점으로는 유기물을 활성슬러지에 흡착시켜 탈질에 바로 이용할 수 있도록 공정을 구성할 수 있다.²⁾ 류 등³⁾의 사전 연구에서도 two-sludge 유형의 SBR 공정이 기존 재래식 SBR 공정에 비해 질소제거 성능이 탁월하게 좋은 것으로 나타났다.

상기 언급한 바와 같이 two-sludge 유형의 SBR 공정은 폐수에 함유되어 있는 유기물을 선행 흡착시킴으로써 질산화 미생물을 별도의 반응조에서 우점화 시키는 공정이다. 본 공정은 낮은 C/N비에서의 탈질효율 향상과 짧은 수리학적 체류시간에서도 원활한 질산화를 수행하기 위하여 착안한 공정으로서 기존 SBR 공정에서의 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 연구에서는 류 등³⁾의 사전 연구에 기초하여 two-sludge 유형의 SBR 공정의 최적 조건을 도출하고자 슬러지 일령, 공정 수리학적 체류시간, 온도, 유기물 접촉 시간의 영향을 살펴보았다. 슬러지 일령은 5, 10, 20 및 35일로 변화시키며 공정 성능을 검토하였으며, 수리학적 체류시간은 유입유량을 변화시킴으로써 8, 10시간 및 15시간으로 변화시키며 처리 효율을 검토하였다. 온도의 영향은 10~13℃ 범위와 20~24℃ 범위에서 비교 관찰하였으며, 유기물 접촉시간은 20분과 40분을 비교 검토하였다.

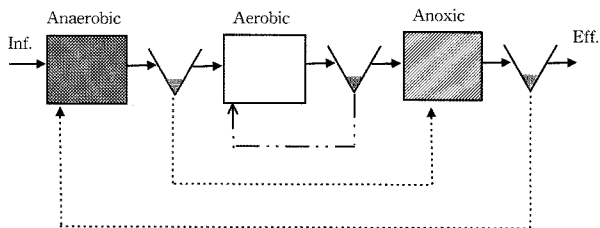


Fig. 1. A basic configuration of a two-sludge system.

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

Parameter	Average concentration(mg/L)
TCOD _{Cr}	242.73 ± 52.89
SCOD _{Cr}	92.88 ± 26.60
TKN	44.34 ± 4.06
NH ₄ ⁺ -N	30.47 ± 2.67
T-P	7.14 ± 2.78
PO ₄ ³⁻ -P	2.44 ± 0.56
TCOD _{Cr} /TKN	5.47 ± 0.95

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/TKN 비가 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.⁴⁾

유입 원수의 평균 pH는 약 7.6으로 관찰되었다.

2.2. SBR 반응조 설치 및 운영

본 연구에 이용된 two-sludge 방식의 SBR 반응조는 직사각형 모양의 아크릴 수지로 제작 되었으며, 공정의 모식도는 Fig. 2와 같다. 질화조를 제외한 반응조에는 교반기를 설치하여 혐기시 혼합을 원활하게 하였다. 반응조 하부에 산기관을 설치하고 산기펌프를 이용하여 산소를 공급하였으며, 폭기 및 비폭기 시간은 time controller를 air pump에 부착하여 조정하였다. 폐수의 유입 및 유출은 time controller에 solenoid valve를 부착하여 PLC(Programmable Logic Controller)로 자동제어 하였다. Two-sludge 유형의 SBR 공정은 1개의 SBR 반응조와 저류조(underflow basin), 질화조(nitrification reactor)로 구성되어 있다. SBR 반응조, 질화조 및 저류조의 부피는 (working volume) 각각 6.2 L, 6.2 L, 3.0 L로 제작되었다. 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, 유기물 흡착이 완료되면 40분 동안 침전이 진행된다. 침전후 유기물이 거의 없고 암모니아성 질소가 농축된 상정수는 저류조로 유입되어(②) 20분간 체류하게 된다. 저류조에서 폐수가 20분간 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 two-sludge 유형의 SBR 공정은 낮은 C/N 비를 가진 하수 처리시에도 높은 질소 제거효율을 보여

주게 된다. 질화조에서 SBR 반응조로 폐수 이동이 완료되면 저류조에서 체류하고 있던 폐수가 질화조로 유입되어(④) 2 시간 동안 질산화 반응이 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 P 사의 “페타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술”에서 담체 충전율을 10~20%로 한 것을 근거로 하였다.⁵⁾ 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 SBR 3 공정의 보다 상세한 운영 방법을 Fig. 3에 도시하였다.

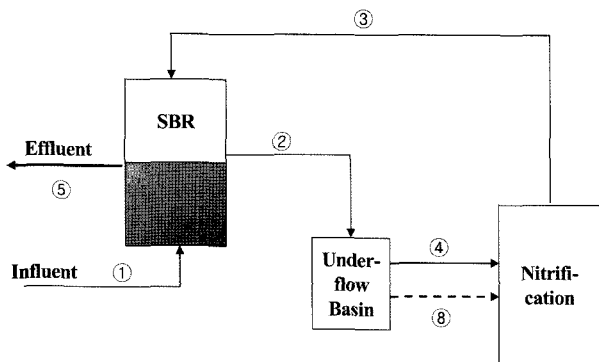


Fig. 2. Schematic diagram of the SBR process of two-sludge type.

Table 2. Analysis items and methods

Items	Test Methods
TCOD _{Cr} & SCOD _{Cr}	Closed Reflux, Colorimetric Method(5220-COD-C & D, 5910-UV-absorbing organic constituent-B-HACH)
TKN	Semi-Micro Kjeldahl Distillation Method
NH ₄ ⁺ -N	Nessler Method(500-NH ₃ -B & C-HACH)
NO ₂ ⁻ -N	Colorimetric Method(4500-NO ₃ ⁻ -B & C)
NO ₃ ⁻ -N	UV Spectrophotometric Screenign Method (4500-NO ₂ ⁻ -B & C)
PO ₄ ³⁻ -P	Ascorbic Acid Method(4500-P-B & E)
T-P	HACH phospho Ver3 method

SRT는 질산화 반응조는 고려하지 않고 SBR 반응조만 고려하여 조절하였다. HRT 영향에 관한 실험에서는 SRT를 20일로 고정하여 실험하였다.

본 논문에 사용된 모든 데이터는 각 조건에서 공정이 정상 상태에 도달하였을 때 시료를 샘플링하여 측정된 값들이다.

2.3. 분석 방법

본 연구에서는 채취된 시료를 분석시 이온성 물질의 경우 0.45 μm 여과막(Whatman 사, 직경 47 mm)로 여과하여 측정하였다. 단 고형성분을 측정할 경우에는 여과하지 않았다. 측정은 Standard method⁶⁾에 준하여 이루어졌으며 측정 항목 및 측정방법은 Table 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지 일령의 영향

SBR 공정은 하나의 반응조에서 슬러지의 반응이 없이 이루어지는 공정으로 슬러지 체류시간이 공정 운영 효율에 큰

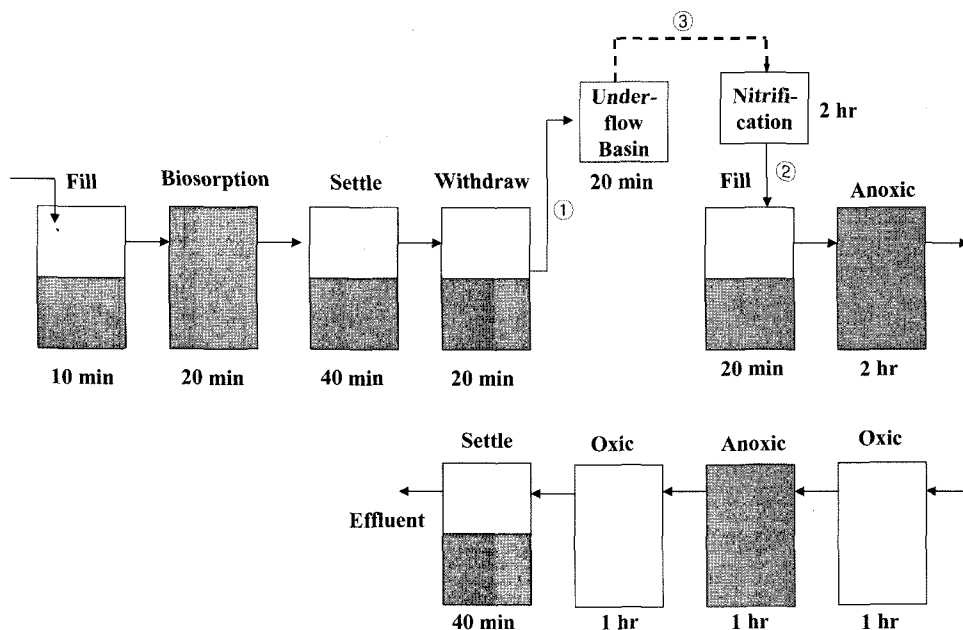


Fig. 3. Operating strategy of the SBR process of two-sludge type.

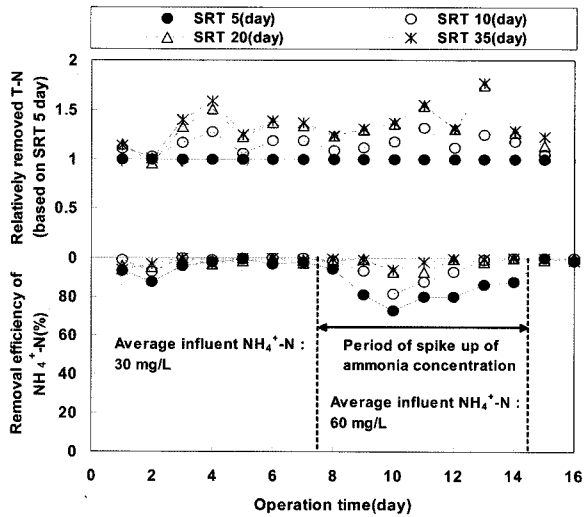


Fig. 4. Characteristics of nitrogen removal according to solid retention time(SRT).

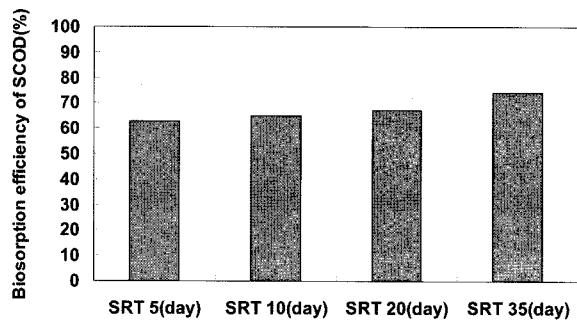


Fig. 5. Biosorption efficiency according to SRT.

영향을 미친다. Fig. 4는 SRT별로 T-N제거량과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거율을, Fig. 5는 유기물의 흡착율을 나타내었다. SRT 5, 10, 20, 35 일에서 T-N제거량을 비교한 결과 SRT가 증가할수록 T-N 제거량도 증가하는 현상을 관찰 할 수 있었다. SRT 증가에 따른 T-N 제거량 증가는 SRT 증가에 따른 유기물 흡착효율이 증가했기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 5). SRT가 증가함에 따른 유기물 흡착효율의 증가는 SRT가 증가함에 따라 MLSS 농도가 증가하였기 때문인 것으로 판단 된다. SRT 5, 10, 20, 35일에서 평균 MLSS 농도는 각각 1,189, 1,501, 2,122, 2,152 mg/L로 관찰되었다.

SRT 5, 10, 20, 35 일에서의 T-N 제거효율은 각각 약 42, 47, 54, 55%로 관찰되었다.

SRT 증가에 따른 질산화 효율은 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으나, 유입 암모니아성 질소의 농도가 증가할 경우 SRT가 짧을수록 암모니아성 질소 제거효율이 감소하는 것을 관찰 할 수 있었다(Fig. 4). 유입 암모니아성 질소 농도를 30 mg/L에서 60 mg/L로 증가시킨 결과 SRT 5일에서의 암모니아성 질소 제거효율이 97%에서 73%까지 감소하는 것을 관찰 할 수 있었으며, SRT 10일에서는 100%에서 81%로 감소하는 것을 관찰 할 수 있었다. 암모니아 증가에 따른 질산화 효율 감소는 SRT가 짧아짐에 따라 미생물 농도가 감소하고 이에 따라 성장률이 기타 다른 종속영양미생

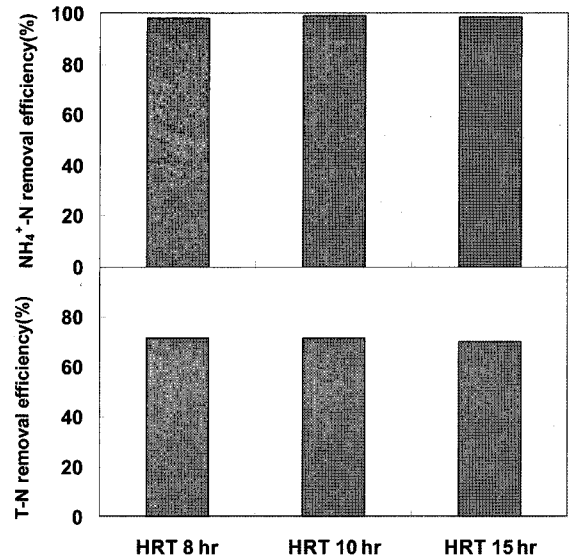


Fig. 6. Removal efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN according to HRT, respectively.

물에 비하여 낮은 질산화균의 개체수가 상대적으로 적어지기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 폐수가 고농도로 유입될 경우를 대비하여 원활한 질산화를 위해서는 질산화균이 충분히 성장할 수 있는 긴 SRT를 유지하는 것이 바람직 한 것으로 나타났다.

3.2. 수리학적 체류시간의 영향

Fig. 6은 수리학적 체류시간을 8시간, 10시간, 15시간으로 운전하여 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 및 T-N제거율을 나타낸 결과이다. 실험결과 조사된 수리학적 체류시간 범위에서는 암모니아성 질소 및 T-N제거효율이 큰 차이를 보이지 않음을 관찰할 수 있었다. 수리학적 체류시간 8시간, 10시간, 15시간에서 암모니아성 질소 제거효율은 각각 98.04%, 99.02%, 98.54%로 관찰되었으며, T-N제거효율은 각각 71.3%, 71.5%, 70%로 관찰되었다.

3.3. 유기물 흡착시간의 영향

본 연구에서 개발된 공정은 two-sludge 유형의 SBR 공정 이므로 유기물 흡착율이 전체 공정운영에 큰 영향을 미친다. 앞에 기술한 바와 같이 흡착된 유기물의 양에 따라 탈질 효율이 달라지게 되며, 우리나라와 같은 낮은 C/N비의 하수의 처리 시 유기물의 효과적인 이용은 매우 중요하다. 본 공정에서 흡착 효율은 본 공정의 가장 중요한 부분을 차지하게 된다. 흡착 효율이 낮아지게 되면 독립된 질산화조에 유기물이 유입하게 되어 질산화균의 성장에 영향을 주게 되며, 탈질 반응시 유기물 부족으로 인하여 질소 제거 효율이 감소하게 된다.

본 연구에서는 최적의 접촉시간을 구하기 위하여 접촉시간을 20분과 40분으로 나누어 접촉시간이 증가 하였을 때 생흡착이 어떻게 달라지는지에 관하여 실험하였다. 본 공정에서 TCOD의 흡착율을 관찰한 결과 접촉시간 20분과 40분에서

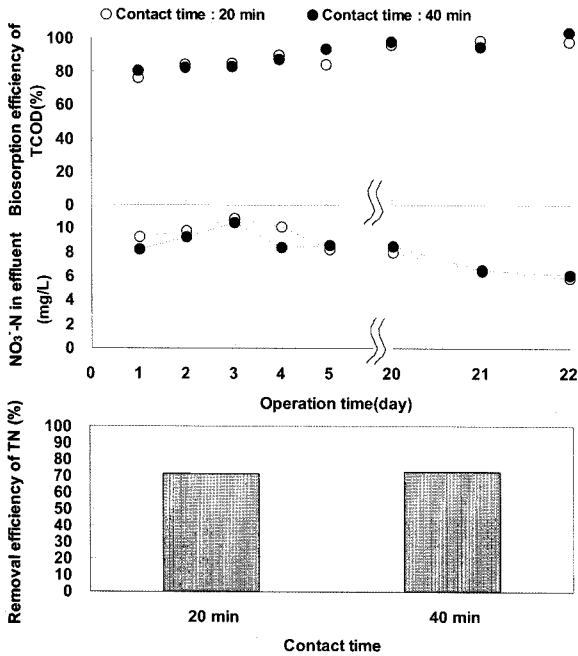


Fig. 7. Effect of contact time on nitrogen removal.

평균 81% 및 81.2%를 나타내어 큰 차이가 없음이 관찰되었으며, 이에 따라 접촉시간에 따른 T-N 제거효율도 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 7). 접촉시간 20분과 40분에서의 T-N 제거효율은 각각 72.3% 및 72.1%로 관찰되었다.

이러한 실험 결과는 접촉시간이 증가 하여도 유기물 흡착량은 더 이상 증가하지 않으며, 흡착된 유기물의 영향을 받는 탈질효율도 증가하지 않음을 나타내는 것이라 할 수 있다. 생흡착을 이용한 되새김 SBR공정에서는 접촉시간을 20분으로 두어 운전하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

3.4. 온도의 영향

하·폐수의 생물학적 처리에 있어서 온도는 중요한 영향

을 미친다. 특히, 국내에는 사계절이 뚜렷하여 여름철과 겨울철의 온도가 20℃ 이상 차이가 나므로 영양염류 처리 공정에 있어서 온도의 영향을 고려하지 않을 수 없다.

Fig. 8에는 10~13℃와 20~24℃에서 TCOD, NH₄⁺-N, T-N 및 T-P 제거효율 비교결과를 나타내었다. TCOD, NH₄⁺-N 및 T-N 제거효율은 온도 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났으나, 10~13℃의 온도범위에서 20~24℃의 온도범위에서보다 제거효율이 다소 낮은 것으로 관찰되었다. 온도 차이가 비교적 컸음에도 불구하고 제거효율 차이가 크지 않은 원인은 본 연구에서 개발한 SBR이 two-sludge 유형의 공정이자 하이브리드 공정으로서 부유성장 미생물만을 이용하는 공정에 비해 온도 영향을 덜 받기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 질산화 반응조는 매디아를 충전시켜 질산화 미생물만을 선택적으로 부착시켜 운전하였다.

T-P의 경우 낮은 온도 범위에서 제거효율이 더 높게 관찰되었는데 이는 낮은 온도 범위에서 질산화 효율의 저하로 인한 질산염 농도가 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 인 제거 미생물의 경우 중온성(mesophiles) 및 친냉성(psychrophiles) 미생물로서 높은 온도에서보다 낮은 온도에서 인 제거 효율이 더 높았다는 사전 연구결과^{7~9)}도 본 연구 결과를 잘 뒷받침하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

Two-sludge 시스템방식의 SBR 공정 운영에 있어 여러 공정 운영 인자를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 슬러지 일령이 증가함에 따라 유기물 흡착효율이 증가하였으며, 이는 T-N 제거효를 증가로 나타났다.
- 2) 유기물 흡착 시간을 20분과 40분으로 나누어 비교 실험한 결과 TCOD 흡착효율에 있어 큰 차이가 관찰되지 않았으며, 이에 따라 T-N 제거효율도 거의 같게 나타났다. 즉, 접

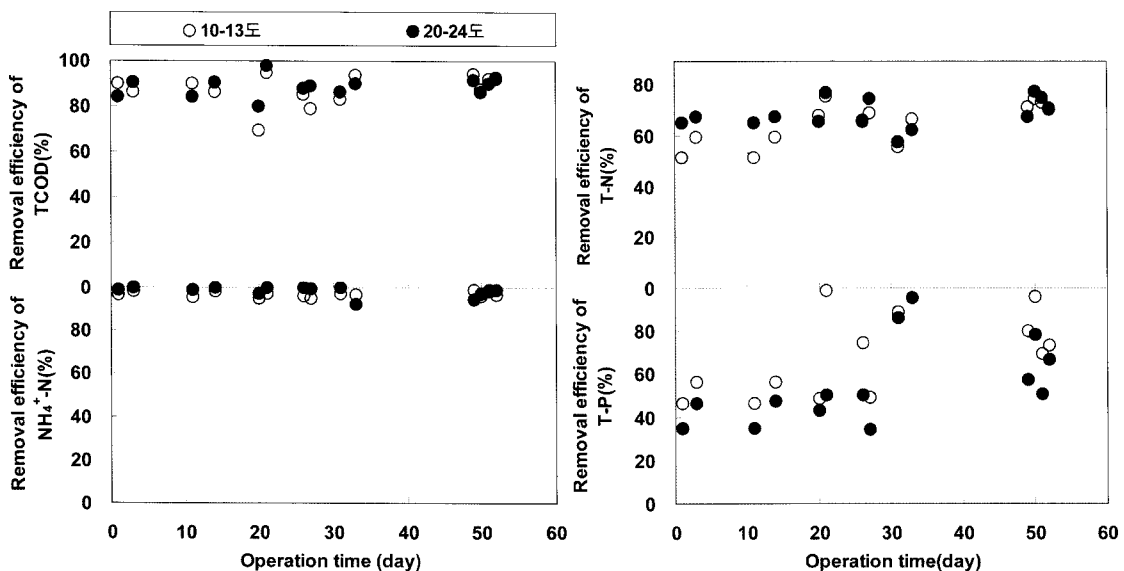


Fig. 8. Effects of temperature on the removal of organic matter, nitrogen and phosphorus, respectively.

축시간을 증가시켜도 유기물 흡착량은 증가하지 않았으며 탈질효율도 증가하지 않았다.

3) 수리학적 체류시간이 본 공정에 미치는 영향을 살펴본 결과 HRT 8시간, 10시간 및 15시간에서 암모니아성 질소 및 T-N 제거 효율이 각각 거의 비슷한 것으로 나타나 본 공정이 유기물 부하 변동에 강한 것을 알 수 있었다.

4) 온도 범위 10~13℃와 20~24℃에서 온도의 영향을 비교 관찰한 결과 질소제거 측면에서 높은 온도범위에서 다소 높은 제거효율이 관찰되었으나 그 차이가 크지 않은 것으로 나타나 본 연구에서 개발된 two-sludge 유형의 SBR 공정이 온도의 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 환경관리연구소, 2002 환경산업총람(2002).
2. 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).
3. 류홍덕, 김학인, 이상일, "낮은 C/N 비에서 운영되는 SBR 유형의 two-sludge 공정의 질소 제거 특성," *대한환경공학회지*, **28**(1), 7~14(2006).
4. 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).
5. 환경관리공단, "환경기술검증보고서," 페타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술, pp. 4~5 (2001).
6. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Ed. APHA, AWWA, and WEF, Washington D.C.(1995).
7. Mulkerrens, D., Dobson, A. D. W., and Colleran, E., "Parameters affecting biological phosphate removal from wastewater," *Environ. Int.*, **30**, 249~259(2004).
8. Florentz, M., Caille, D., Bourdon, F., and Sibony, J., "Biological phosphorus removal in France," *Water. Sci. Technol.*, **19**(4), 1171~1173(1987).
9. Panswad, T., Doungchai, A., and Anotai, J., "Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system," *Water Res.*, **37**(2), 409~415(2003).