

고정생물막을 이용한 기존 하수처리장의 생물학적 영양염 제거 신공정개발

김미화 · 이지형* · 전양근** · 박태주

부산대학교 환경공학과
*부산대학교 환경산업·기술개발 연구센터
**현대정공(주) 부설 환경기술연구소

(1999년 8월 30일 접수, 2000년 3월 24일 채택)

Development of New BNR Process Using Fixed-Biofilm to Retrofit the Existing Sewage Treatment Plant

Mi-Hwa Kim · Ji-Hyung Lee* · Yang-Kun Chun** · Tae-Joo Park

Department of Environmental Engineering, Pusan National University
**Institute for Environmental Technology and Industry(IETI), Pusan National University*
***Hyundai Pression & IND. Co. LTD.*

ABSTRACT

The object of this study was to develop new BNR process using fixed-biofilm which could be applied to retrofit the existing wastewater treatment plant or to introduce as tertiary treatment plant. To achieve complete denitrification from typical raw sewage in Korea, external carbon source must be supplied because $SCOD_{Cr}/T-N(NH_4^+-N + NO_x-N)$ of raw sewage was lower than other countries. In this study, the ratio of $SCOD_{Cr}/NH_4^+-N$ was 2.49 and the influent NH_4^+-N concentration during the experimental period was varied from 25 to 37 mg/L. To enhance nitrogen removal from the sewage, the two processes using fixed biofilm were adopted as R-1(anoxic/mid.settler/aerobic/anoxic/aerobic) and R-2(aerobic/mid.settler/anoxic/anoxic/aerobic), respectively. In the comparison of NH_4^+-N , T-N effluent quality and T-N removal efficiency in both processes without external carbon source, R-1 process was better than R-2 process for nitrogen removal from raw sewage. With respect to $SCOD_{Cr}/NO_x-N$ ratio and total nitrogen removal in each anoxic reactor of two processes, R-1's was more effective than R-2's for distributing organic matters of raw sewage. In the both processes using fixed biofilm, the amount of required alkalinity to remove unit NH_4^+-N were 5.18 and 5.76(g · CaCO₃/g · $NH_4^+-N_{removed}$), respectively and were lower than activated sludge BNR process(7.14).

Key Words : Arrangement of Reactors, Alkalinity Consumption, BNR, Carbon ($SCOD_{Cr}$)/Nitrogen(NO_x-N or NH_4^+-N) Ratio, Fixed-biofilm, Retrofit the Existing Plant, Total Nitrogen(T-N) Removal

요 약 문

본 연구의 목적은 국내의 기존 하·폐수처리장에 생물막을 적용하여 BNR공정으로 전환 및 개조하거나 생물막 공법을 적용한 BNR공정을 3차 처리로 적용할 수 있는 새로운 공정을 개발하는데 있다. 우리 나라 하수의 $SCOD_{Cr}/T-N(NH_4^+-N + NO_x-N)$ 비는 다른 나라에 비하여 상대적으로 낮기 때문에 완전한 탈질화를 얻기 위해서는 외부탄소원을 반드시 공급해야만 한다. 본 연구에서의 $SCOD_{Cr}/NH_4^+-N$ 비는 2.49이었으며, 실험기간 동안 유입수 NH_4^+-N 농도는 25에서 37 mg/L로 변화되었다. 하수처리시 질소제거능을 향상시키기 위하여 R-1(무산소/중간침전조/호기성/무산소/호기성)과 R-2(호기성/중간침전조/무산소/무산소/호기성)의 생물막을 이용하는 두 공정을 적용하였다. 외부탄소원을 투여하지 않은 조건에서 NH_4^+-N 와 T-N의 유출수질과 제거효율은 R-1공정이 R-2공정에 비하여 하수로부터 질소제거에 보다 적절한 것으로 평가되었다. 무산소 반응조의 $SCOD_{Cr}/NO_x-N$ 비와 T-N제거효율을 고려하였을 때, R-1공정이 원하수내 유기물질의 분배에 있어서 더 효과적인 것으로 사료되었다. R-1공정과 R-2공정에서 1 g의 NH_4^+-N 를 제거하는데 요구되는 알칼리도는 R-1과 R-2 각각 5.18과 5.76(g $CaCO_3/g$ removed NH_4^+-N)이었으며, 이는 활성슬러지 BNR공정에 비하여 낮았다.

주제어 : 반응조 배열, 알칼리 소모량, 탄소/질소비, 고정생물막, 기존 처리장 개조/개선, 총질소 제거

1. 서 론

1996년 1월부터 시행된 영양염 배출규제치는 하수내 T-N과 T-P농도보다도 높은 T-N 60 mg/L와 T-P 8 mg/L로 법적규제의 의미보다는 배출항목에 영양염이 포함되었다는데 의의를 두어야 할 것이다. 그러나, 2001년부터 T-N 40 mg/L과 T-P 5 mg/L 이하, 2006년부터는 처리수내 T-N 및 T-P의 배출규제 농도는 각각 20 mg/L와 2 mg/L로 강화될 예정이다. 따라서, 기존 하·폐수처리장을 질소와 인을 제거하기 위한 BNR공정으로 시설개조 또는 3차 처리공정 도입에 의한 증설은 늦어도 2000년까지는 완료되어야 한다.

최근 국내에서 건설되거나 이미 건설되어 운전중인 생물학적 하·폐수처리장에서는 유기물 및 부유고형물질만 처리하도록 설계되어 있어 질소와 인을 제거하기 위한 BNR공정으로의 시설전환 또는 3차 처리 공정으로 BNR공정의 도입이 시급한 실정이다. 기존 하·폐수처리장에 3차 처리공정을 도입하여 BNR공정으로 전환하는 방법은 기존 처리장에 별도의 부지가 확보되어 있지 않은 경우는 실현가능

성이 낮으므로 기존 시설과 부지를 최대한으로 활용할 수 있는 방안제시가 요구된다.

기존 처리장의 BNR공정으로의 전환은 첫째, 기존 처리장에 설계유량 이상으로 유입폐수의 수량 및 부하량(유기물, 부유고형물질, 영양염 등)이 증가될 때 기존 처리장의 개선 및 보완 그리고 3차 처리공정을 도입하게 된다. 둘째, 배출기준이 강화되어 COD, SS, BOD_5 이외의 NH_4^+-N , T-N, 그리고 T-P와 같은 추가항목에 대한 처리가 요구될 때 3차 처리공정의 도입 또는 처리장 시설을 개선하게 된다.¹⁾ 기존 하·폐수처리장의 시설개조 및 보완 또는 공정을 처리목적에 맞게 전환하고자 할 때에는 철저한 사전조사를 통하여 가장 적절한 방법을 선택하고, 선택된 방법들을 단계적인 절차를 거쳐서 평가한 뒤 Pilot Plant 실험에서 얻어진 결과를 기존 처리장의 개선 및 보완방법으로 적용한다.

기존 하·폐수처리장을 BNR공정으로 전환하거나 처리장의 운전효율을 향상시키기 위하여 미국,¹⁾ 유럽,²⁾ 독일,³⁾ 스웨덴⁴⁾과 덴마크,⁵⁾ 그리고 가까운 일본⁶⁾과 같은 여러 나라에서는 많은 연구를 수행하고 있으며, 그 결과를 현장에 적용하고 있다. Fig. 1에

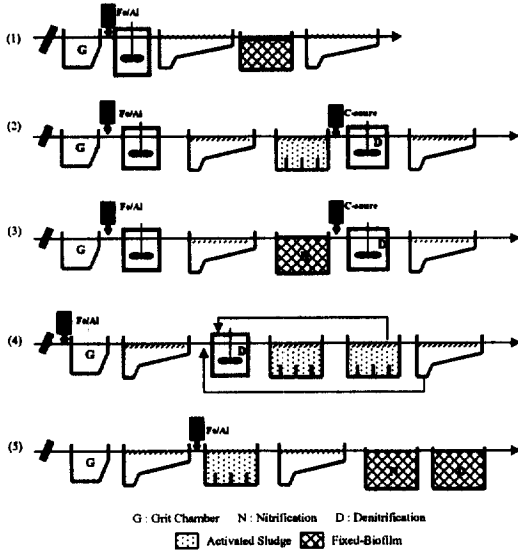


Fig. 1. Examples of step-wise development of wastewater treatment plants.

서 보는 바와 같이 기존 처리장에서 유기물만 제거 하도록 되어 있는 경우, BNR공정으로 전환하는 경우((2), (3), (4), (5))와 BNR공정으로의 전환시 생물막을 도입하는 경우((3), (4))를 볼 수 있다.

독일³⁾의 경우, 기존 처리장에 생물막 담체를 반응조 부피비의 18~28%를 충전하여 처리용량 및 처리효율을 증가시키고 있다. 기존 처리장의 개선 및 보완에 생물막 담체를 적용하여 폭기조의 비경제적인 확장없이 안정적인 처리수질을 확보할 수 있으며, 질산화가 안정적으로 일어나는 처리장의 경우에는 동시에 탈질화를 수행할 수 있다고 하였다. 뿐만 아니라 적용하고자 하는 매디아 종류와 형태에 따라 산소전달효율이 충분히 유지될 수 있도록 산기관과 매디아 설치를 고려하고 매디아 재료는 실험을 통하여 결정하거나 경제성을 분석하여 선택해야 한다고 하였다.

스웨덴, 덴마크 등은 처리장에 자동화 시스템을 도입하여 처리장을 개선 및 보완하고 있으며 특히 질소와 인처리에 있어서 on-line 센서를 이용한 제어방법을 사용하여 처리효율을 향상시키고 있다.^{4,5)}

일본에서는 현재 중·소규모의 오수처리시설에도 영양염을 제거하는 공정을 도입하고 있으며, 제시된 공정에 따라 각각 다른 배출규제치를 적용하고 있으며, Fig. 2와 같이 기존 처리장을 BNR공정으로 전

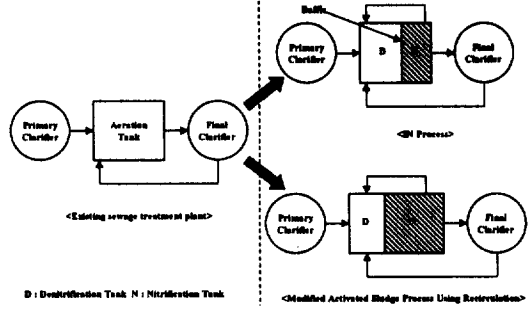


Fig. 2. The methods of retrofitted the existing sewage treatment plant as a BNR process in Japan.

환시키고 있다. IN process의 경우는 기존 처리장의 폭기조에 격벽을 설치하여 탈질화와 질산화를 유도하는 것이며, 활성슬러지 순환 변법의 경우는 독립된 탈질화조와 질산화조를 이용하는 방법이다.⁶⁾

청주 하수처리장의 하수를 처리한 Choi 등(1998)의 연구에서는 MUCT공정을 응용하였으며, 혐기성/무산소/호기성을 이용한 8단계와 9단계의 활성슬러지 공법을 이용한 BNR공정을 적용하였다.⁷⁾ 청주 하수처리장 하수의 $SCOD_{Cr}/NH_4^+-N$ 는 4.0이며 BOD_5/NH_4^+-N 비는 4.2로, $SCOD_{Cr}/T-N$ 비는 7이상, BOD_5/NH_4^+-N 비는 5이상인 다른 나라⁸⁾에 비하여 탄소원이 부족한 상태임을 알 수 있다. Yun 등(1997)의 연구는 Choi 등(1998)이 사용한 공정에서 얻어진 처리수내 NO_x-N 을 탈질화시키기 위하여 3차 처리공정으로 denitrifying filter에 외부탄소원을 첨가하여 운전한 예를 보여주고 있다.⁹⁾

이와 같이 기존의 VIP, MUCT, MLE, A^2/O , Bardenpho 공정 등을 변형하여 국내 하수특성에 맞는 BNR공정을 개발하고자 하는 연구를 수행하고 있으며, DeN&P 공정(삼성), HINT 공정(현대), DNR 공정(대우)과 같은 국내 BNR공정이 제시되고 있다.¹⁰⁾ DeN&P 공정의 경우 기존 하수처리장의 3차 처리공정으로써 BNR공정을 도입한 경우로 외부탄소원을 반드시 첨가하여야 하며, DNR공정의 경우 UCT공정과 A^2/O 공정의 장점을 조합하여 multi-stage로 변형한 것으로 둘 다 활성슬러지 공법을 이용한 BNR공정이다. 이에 반하여 HINT 공정은 A^2/O 시스템에 고정생물막을 적용한 것이며, 혐기성/무산소/호기성(1)/호기성(2)/호기성(3)으로 구성되어 있다.

C. Helmer 등(1999)의 연구에서 BNR공정의 호기성 반응조내에서 질산화-탈질화 박테리아와 질산화 박테리아인 *Nitrosomonas europaea*와 *Nitrosomonas eutropha*가 탈질화를 수행할 수 있다는 연구결과를 보고하였으며, 생물막을 적용한 질산화 공정에서의 질소유실에 관하여 보고하고 있으며, 이는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ stripping과 호기성 탈질화 가능성에 관하여 언급하고 있다.¹¹⁾ 특히 최근의 마이크로일렉트로드와 Gene 프로브를 이용한 생물막 구조 및 특성에 관한 연구에서 BNR공정에서의 호기성 탈질화 가능성을 제시하고자 하고 있으며, 호기성 탈질화가 일어날 경우 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 1g을 산화시킬 때 요구되는 알칼리도를 감소시킬 수 있으므로 원하수의 알칼리도가 낮은 경우 요구되는 알칼리도 보충에 사용되는 약품량을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

앞에서 언급한 여러 사례들과 마찬가지로 우리나라에서도 2000년까지 기존 하·폐수처리장을 BNR 공정으로 개선 및 보완하거나 3차처리 공정을 도입하여 질소와 인을 제거하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 국내 하수특성에 적합하고 기존 처리장의 시설개조에 의하여 손쉽게 BNR공정으로 전환할 수 있는 공정을 제시하고, 유기물 농도가 상대적으로 낮은 국내 하수를 처리하는 데 있어 최소한의 약품투여(외부탄소원, 알칼리 보충)로 T-N제거효율을 향상시킬 수 있는 고정생물막을 적용한 BNR공정을 개발하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치 및 유입수 특성

본 연구에 사용된 실험장치는 아크릴로 제작되었으며, 무산소(1)/중간침전조/호기성(1)/무산소(2)/호기성(2)으로 구성된 R-1공정과 호기성(1)/중간침전조/무산소(1)/무산소(2)/호기성(2)으로 구성된 R-2공정을 동시에 운전하였다(Fig. 3). 중간침전조(5.7 L)를 제외한 각 반응조 부피는 6.7 L로 총부피는 26.8 L이며, 미디어는 원통형 세라믹 미디어(내경 1 cm, 외경 2 cm, 높이 3~5 cm)를 반응조 부피비로 20%로 bed상에 충전하였다. 무산소

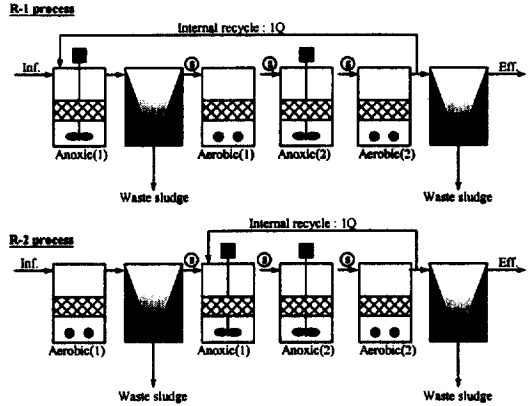


Fig. 3. Schematic diagram of lab. scale reactors for determining the optimum process arrangement with anoxic/aerobic reactor (⊙ : sampling port, ⊠ : media packing box).

반응조에는 1기의 교반기를 설치하였으며, 호기성 반응조에서는 150 L/min 용량의 blower를 이용하여 반응기 하부에 2조의 fine-bubble diffuser로 공기를 공급하였다. 두 공정은 HRT=8.0시간에서 내부순환을 100%로 운전하였다. 유입폐수의 공급과 탈질화를 위한 호기성 반응조에서 무산소 반응조의 내부순환에는 Masterflex펌프를 사용하였다.

본 연구에 사용된 폐수는 부산광역시 수영하수처리장의 원하수를 사용하였다. 월평균 하수특성은 Table 1에서 보는 바와 같이 유기물 농도가 낮고 비교적 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 높은 전형적인 우리나라 하수 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

2.2. 공정배열 특성

기존의 VIP, A²/O, MUCT, 그리고 5단계 Bard-enpho와 같은 BNR공정에서는 일반적으로 무산소:호기성 반응조 부피비를 1:3으로 적용하고 있는 것에 반하여,¹²⁾ 본 연구에서는 무산소/호기성 반응조 부피비를 1:1로 하여 기존 BNR공정에 비하여 폭기에 의한 에너지소모량을 감소시키고자 하였다. 유입되는 하수내의 유기물을 적절하게 분배할 수 있다면 외부탄소원 공급량을 감소시킬 수 있을 것이다. R-1 공정은 호기성(2)에서 내부반송되는 반응수내 NO_x-N를 탈질화시키는데 유입수내 유기물을 이용할 수 있

Table 1. Raw sewage characteristics of Sooyoung STP, Pusan(1997, monthly average)

Item Month	Raw Sewage, mg/L					Item Month	Raw Sewage, mg/L				
	COD _{Mn}	BOD ₅	TSS	T-N	T-P		COD _{Mn}	BOD ₅	TSS	T-N	T-P
1	57.2	132.0	207.0	28.4	3.37	8	38.4	104.4	95.1	24.2	2.09
2	44.8	104.6	120.0	32.8	3.47	9	43.4	102.9	115.0	28.6	2.77
3	40.7	93.1	105.0	32.6	3.36	10	46.2	106.8	125.0	30.5	3.13
4	39.3	93.8	93.2	29.4	3.25	11	50.3	112.8	124.0	30.8	3.21
5	40.8	97.8	93.0	32.7	3.59	12	57.2	132.0	207.0	32.8	3.59
6	44.6	121.5	96.0	29.8	3.22	Min.	34.2	93.1	83.0	23.1	2.09
7	34.2	83.9	83.0	23.1	2.28	Max.	43.6	140.9	190.5	29.4	3.07
Mean	BOD ₅ =107.1, TSS=121.9, T-N=29.6, T-P=3.1										
Measured values	BOD ₅ =89.0, TSS=90.5, NH ₄ ⁺ -N=29.7, TCOD _{Cr} =114.8										

도록 하기 위하여 무산소(1)/중간침전조/호기성(1)/무산소(2)/호기성(2)의 공정배열을 설정하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 원하수의 비교적 낮은 BOD₅/T-N=4.03, 그리고 SCOD_{Cr}/NH₄⁺-N=2.49를 고려하였을 때, 호기성 반응조에서 바로 질산화를 유도할 수 있을 것으로 예상하여 호기성(1)/중간침전조/무산소(1)/무산소(2)/호기성(2)의 R-2공정 배열을 설정하였다. R-1공정의 중간침전조는 호기성(1)로 유입되는 SS농도를 감소시켜 SS가 생물막 활성화에 미치는 영향을 감소시키고 탈질화시 발생되는 N₂를 bulk liquid에서 완전히 탈기시키기 위한 것이다. R-2공정은 호기성(1) 유출수내 잔존 DO농도를 제거하여 무산소 반응조로의 O₂ 유입을 감소시키기 위한 것이다.¹²⁾ 뿐만 아니라 Lee(1997)의 내부순환율의 증가는 탈질효율과 총질소제거효율을 향상시키지만 무산소 반응조내 DO농도 증가로 인한 불완전한 탈질화와 호기성 반응조에서의 완전 질산화에 요구되는 체류시간 감소로 인한 아질산성 질소의 축적을 유발하여 전반적인 질소제거에 악영향을 미칠 수도 있다는 연구결과를 반영한 것이다.¹³⁾

A²/O공정에 생물막을 도입하여 영양염을 제거한 연구^{13,14)}에서 질산화 및 탈질효율, 그리고 경제성을 고려하여 최적 내부순환율로 도출된 100%를 R-1공정과 R-2공정에 적용(호기성(2)→무산소(1))하여 운전하였다.

2.3. 시료채취 및 분석

R-1공정과 R-2공정의 유입수, 유출수와 sampling

port에서 시료를 채취하였으며(Fig. 2), pH, DO, 온도와 유입유량은 매일 측정하였다. COD, SS, Alkalinity, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, 그리고 NO₃⁻-N는 1회/2~3일 간격으로 분석하였다. NO_x-N을 제외한 측정항목은 Standard Methods(19th, APHA)에 의하여 분석하였으며, NO₂⁻-N와 NO₃⁻-N는 Ion Chromatography(Waters, USA)로 분석하였다. NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, 그리고 NO₃⁻-N 분석에는 채취된 시료를 GF/C로 1차 여과한 여액을 0.45μm 멤브레인 여지로 여과한 여액을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공정배열에 따른 유기물질 및 NH₄⁺-N 제거

Fig. 4는 R-1공정과 R-2공정의 운전기간 동안의 수질을 나타낸 것으로, 두 공정 모두 양호한 처리수질을 나타내었다. R-1공정과 R-2공정의 유출수내 TCOD_{Cr}농도는 각각 28.2 mg/L와 29.8 mg/L이었으며, SCOD_{Cr}는 각각 15.9 mg/L와 17.8 mg/L이었다. R-1공정과 R-2공정의 처리수질 TCOD_{Cr} 변동폭은 각각 4.0 mg/L와 7.0 mg/L였으며, SCOD_{Cr}의 경우 각각 2.0 mg/L와 4.0 mg/L로 R-1공정의 처리수질이 보다 안정적이었다.

Fig. 5는 두 공정에서의 유입 및 유출수내 NH₄⁺-N 농도를 나타낸 것이다. 정상상태에서 R-1공정 유출수내 평균농도는 5.36 mg/L였으며, R-2공정은

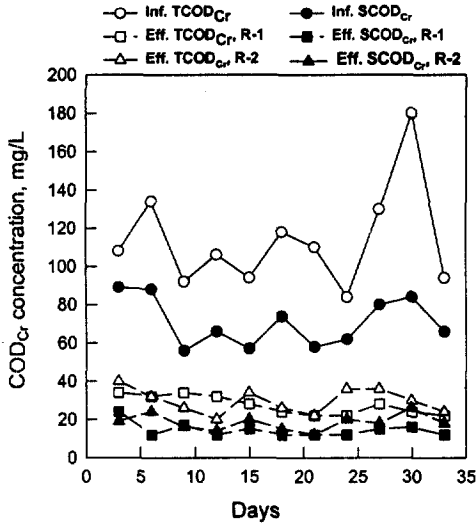


Fig. 4. Influent and effluent COD_{Cr} concentration in the R-1 and R-2 process.

11.40 mg/L를 나타내어, NH₄⁺-N제거에 있어서 R-1공정이 훨씬 우수함을 알 수 있었다. 45일의 acclimation 기간을 거친 후 35일의 정상상태 동안 R-1공정에서는 평균 88.3%의 제거효율을 얻을 수 있었으나 R-2공정은 평균 66.6%의 낮은 제거효율을 나타내었다. R-2공정의 경우 유입수 SCOD_{Cr}/NH₄⁺-N비가 평균 2.49로 질산화가 유리한 조건^{13~16)}이었음에도 불구하고 탈질화가 먼저 수행되는 R-1공정에 비하여 상당히 낮은 제거효율을 나타내었다. 뿐만 아니라 외부탄소원을 투입하여 완전 탈질화를 유도할 경우 R-1공정에서 보다 낮은 T-N 농도와 높은 T-N제거효율을 얻을 수 있을 것으로 사료되었다.

3.2. SCOD_{Cr}/NH₄⁺-N비와 NH₄⁺-N제거량

Fig. 6은 R-1공정과 R-2공정의 호기성(1)과 호기성(2)에서의 SCOD_{Cr}/NH₄⁺-N비와 각 호기성 반응조에서의 NH₄⁺-N제거량과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 R-1공정과 R-2공정의 호기성(1)의 평균 SCOD_{Cr}/NH₄⁺-N비는 각각 3.21과 2.49이었으며, 이때 호기성(1)에서 제거된 NH₄⁺-N양은 각각 평균 70.76 g/m³/day와 53.34 g/m³/day였다. 이때의 R-1공정과 R-2공정의 호기성(1)에서의 NH₄⁺-N제거효율은 각각 36.1%와

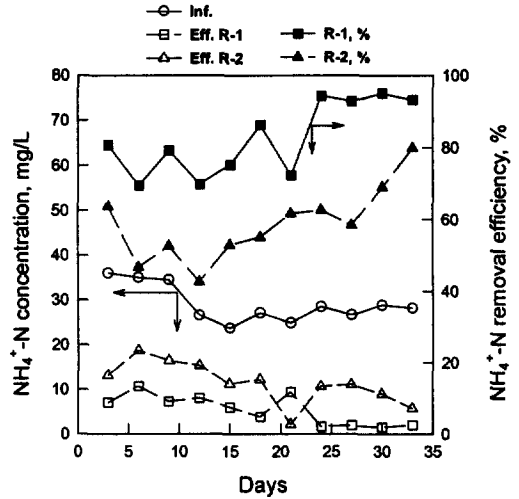


Fig. 5. NH₄⁺-N concentration and removal efficiency in the R-1 and R-2 process.

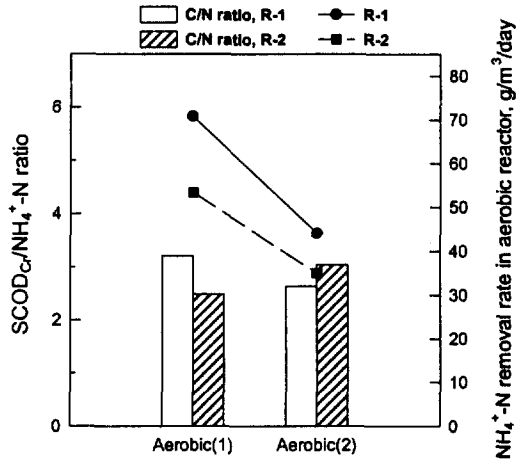


Fig. 6. SCOD_{Cr}/NH₄⁺-N ratio vs. NH₄⁺-N removal rate in the each aerobic reactor of the R-1 and R-2 process.

16.5%로 R-1공정이 우수하였다. 호기성(2)의 경우 R-1공정이 44.07 g/m³/day, R-2공정이 35.01 g/m³/day로 제거효율은 각각 39.0%와 14.3%로 R-1공정이 R-2공정에 비하여 24.7% 높은 제거효율을 나타내었다. 호기성(1)과 (2)의 SCOD_{Cr}/NH₄⁺-N비와 NH₄⁺-N제거량을 비교하였을 때 C/N비가 3이하로 유지될 때 NH₄⁺-N제거율이 증가하였으며, 이는 여러 연구자들^{13,16)}의 연구결과와 일치하는 것이다.

무산소와 호기성 반응조 배열에 따른 각 공정의 호기성 반응조 유입 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 부하량을 비교하면 호기성(1)의 경우 R-1은 $196.5 \text{ g/m}^3/\text{day}$, R-2공정은 $323.6 \text{ g/m}^3/\text{day}$ 으로 증가되는 결과를 가져왔으며, R-2공정의 호기성(2)도 $244.2 \text{ g/m}^3/\text{day}$ 로 $113.9 \text{ g/m}^3/\text{day}$ 의 R-1공정보다 높아지는 결과를 초래하였다. R-1공정과 R-2공정의 호기성 반응조 C/N비와 각 호기성(1)과 (2)에서의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거량을 비교한 결과, 질산화를 먼저 수행하도록 공정 배열을 설정한 R-2공정의 경우 $\text{SCOD}_{\text{Cr}}/\text{NOx-N}$ 비가 2.49로 낮았음에도 불구하고 호기성 반응조 유입 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 부하량 상승효과로 인하여 탈질화를 먼저 수행하는 R-1공정 보다 낮은 제거효율을 나타내었다.

그러므로 유입 $\text{SCOD}_{\text{Cr}}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 비가 낮은 우리나라 하수를 고정생물막 공법을 적용한 BNR공정으로 처리하고자 할 경우, 탈질화를 먼저 수행하는 R-1공정배열이 질산화를 먼저 수행하는 R-2공정배열에 비하여 더 적합한 공정인 것으로 사려되었으며, 기존 하·폐수 처리장을 생물막을 이용한 BNR공정으로 전환하는데 있어 R-1공정을 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 신규 처리장 건설시 BNR공정으로 적용할 수 있을 것으로 사료되었다.^{1,3,16)}

3.3. 무산소 반응조의 $\text{SCOD}_{\text{Cr}}/\text{NOx-N}$ 비와 T-N제거

Fig. 7은 R-1공정과 R-2공정의 무산소 반응조내 $\text{SCOD}_{\text{Cr}}/\text{NOx-N}$ (C/N)비와 T-N농도를 나타낸 것이다. 외부탄소원을 공급하지 않은 조건에서의 두 공정의 무산소(1)과 무산소(2)에서의 C/N비는 R-1공정의 경우 각각 7.32와 5.10이었으며, R-2공정은 4.69와 5.50이었다. 무산소 반응조내 C/N비를 고려할 때, R-1공정의 무산소(1)과 무산소(2)가 R-2공정의 두 반응조에 비하여 높게 유지됨을 알 수 있었다. C/N비가 7로 유지된 R-1공정의 무산소(1)에서는 유입 T-N농도 28.2 mg/L 에서 유출수내 T-N농도는 20.86 mg/L 로 26.0%의 T-N제거가 일어난 반면 C/N비가 6이하인 무산소(2)에서는 유입 T-N농도 17.47 mg/L 에서 유출수내 T-N농도는 15.25 mg/L 로 저하되었으나 탈질효율은 무산소

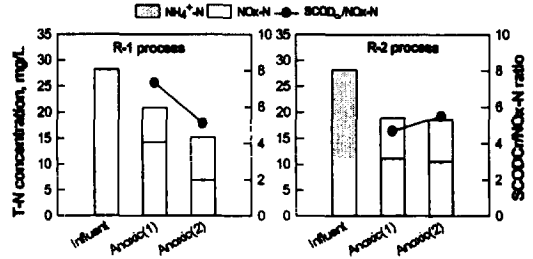


Fig. 7. Comparison of T-N concentration and $\text{SCOD}_{\text{Cr}}/\text{NOx-N}$ ratio in the anoxic reactors of R-1 and R-2 process.

(1)에서 얻어진 T-N제거효율의 50% 정도인 12.7%의 T-N제거효율을 나타내었다. R-2공정의 경우 무산소(1)의 5.2%, 무산소(2)는 1.7%의 T-N제거효율을 나타내어 거의 탈질화가 일어나지 않음을 알 수 있었으며, 무산소(2)에서의 C/N비가 무산소(1)에 비하여 증가되었음에도 불구하고 T-N제거효율은 1.7%로 거의 일어나지 않았다.

기존 하수내 유기물 분배효과를 확인하기 위하여 외부탄소원을 전혀 투여하지 않고 R-1공정배열과 R-2공정배열을 적용하였을 때, 두 공정배열에서 얻어진 전체 T-N제거효율은 각각 48.6%와 40.2%, 최종 유출수내 T-N농도는 각각 14.46 mg/L 와 16.87 mg/L 를 나타내어 T-N제거에 있어서도 R-1공정이 더 우수함을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, 외부탄소원을 첨가하지 않고서도 T-N배출기준이 20 mg/L 로 강화되는 2001년의 배출기준에 만족하는 처리수질을 얻을 수 있을 것으로 사료되었다.

R-1공정과 R-2공정의 C/N비와 T-N제거효율을 비교한 결과 C/N비가 6이상일 때 탈질화가 원활히 일어난다는 여러 연구자들의^{8,13,14)} 연구결과를 반영하는 것이다. 탈질화효율을 향상시키기 위해서는 R-1공정의 경우 무산소(2)에 외부탄소원을 공급하여 C/N비를 증가시켜야 하며, R-2공정의 경우는 무산소(1)에 외부탄소원을 주입하여야 할 것으로 판단되었다. C/N비를 6까지 증가시키고자 할 경우 R-1공정이 R-2공정에 비하여 상대적으로 낮은 외부탄소량으로 요구되는 C/N비를 얻을 수 있음을 예상할 수 있었다.

3.4. NH₄⁺-N 제거량과 알칼리도 소모량

Fig. 8은 R-1공정과 R-2공정의 호기성(2)에서 제거된 NH₄⁺-N양과 소모된 알칼리도를 Lee,¹⁷⁾ K. Chidiadi,¹⁸⁾ 그리고 활성슬러지 공정에서 1 g의 NH₄⁺-N를 제거하는 데 소모되는 알칼리도인 7.14 g과 비교하여 나타낸 것이다. R-1공정과 R-2공정에서 제거된 평균 NH₄⁺-N양 중 15%가 세포합성에 이용되었다고 가정할 때, 소모된 알칼리도는 각각 5.18 g과 5.76 g으로 나타나 Lee와 K. Chidiadi의 연구에서 얻어진 알칼리도 소모량보다 낮게 나타났다. 이는 생물막 구조 및 특성에 따라서 호기성 탈질화의 가능성을 보여주는 것으로 C. Helmer 등¹¹⁾의 연구결과를 반영하는 것이다. 호기성 탈질화에 의한 알칼리도 회복은 고정생물막을 이용하는 BNR공정에서 NH₄⁺-N를 완전 질산화시키는 데 요구되는 알칼리량을 보다 경제적으로 산출할 수 있어 부족한 알칼리도를 보충하는 데 요구되는 약품량에 따른 유지관리비 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서 고정생물막을 적용한 BNR 공정에서 제거된 NH₄⁺-N량과 소모된 알칼리량과의 정량적인 관계는 앞으로 진행될 모든 조건의 연구에서 재현성이 확인됨으로써 설계인자로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

무산소/중간침전조/호기성/무산소/호기성의 R-1공정과 호기성/중간침전조/무산소/무산소/호기성의 R-2공정을 사용한 원하수 처리결과 기존 하수처리장에 고정생물막을 적용한 BNR공정으로 개조 및 전환하는데 적용할 수 있는 공정으로는 탈질화를 먼저 수행하도록 공정배열된 R-1공정이 보다 적절함을 알 수 있었으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고정생물막을 적용한 BNR공정인 R-1과 R-2 모두에서 양호한 처리수질을 나타내었다. 유출수내 NH₄⁺-N농도는 R-1공정과 R-2공정에서 각각 5.36 mg/L와 11.4 mg/L를 나타내었으며, 제거효율은 평균 88.3%와 66.6%를 나타내어 R-1공정이 보다 우수하였다.

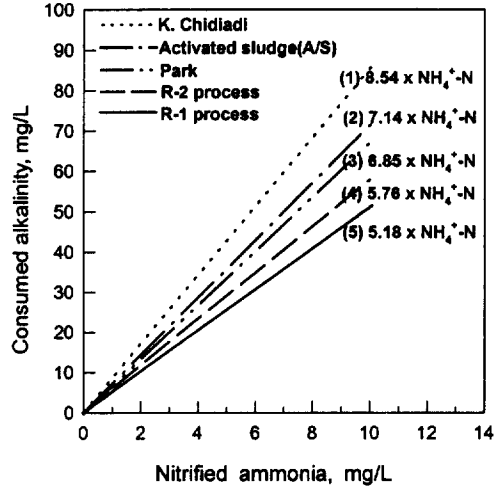


Fig. 8. Alkalinity consumption with respect to various treatment processes.

- 2) SCOD_{Cr}/NH₄⁺-N비와 NH₄⁺-N제거량을 비교하였을 때 R-1공정과 R-2공정의 호기성(1)과 호기성(2)의 C/N비는 각각 3.21과 2.49, 2.64와 3.04이었다. C/N비는 3이하로 전질산화에 유리한 조건이었으나 각 공정의 호기성 반응조에서의 NH₄⁺-N 제거량을 비교한 결과 R-1공정의 호기성(1)과 (2)에서의 제거량은 각각 70.76과 53.34 g/m³/day로 R-2의 44.07과 35.01 g/m³/day보다 R-1공정이 훨씬 우수함을 알 수 있었다.
- 3) SCOD/NO_x-N비와 T-N제거를 고려하였을 때 무산소 반응조 C/N비가 7이상으로 유지된 R-1공정의 무산소(1)의 탈질화율이 가장 높았으며, R-2의 경우 두 무산소 반응조에서 거의 차이가 없었다. R-1공정과 R-2공정의 T-N 제거효율은 각각 48.6%와 40.2%를 나타내었으며, 처리수질은 각각 14.46 mg/L와 16.87 mg/L로 R-1공정이 더 우수하였다.
- 4) 고정생물막을 이용한 R-1공정과 R-2공정의 호기성(2)에서 1g의 NH₄⁺-N을 제거하는데 있어서의 알칼리도 요구량은 5.18 g과 5.76 g로 활성슬러지공정의 7.14 g에 비하여 매우 낮은 요구도를 나타내었다.

사 사

본 연구는 현대정공(주) 부설기술연구소의 연구비 지원과 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제번호 : 97-10-21-99-B-1)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Glen T. Daigger and John A. Buttz, "Upgrading Wastewater Treatment Plants," *Water Quality Management Library, TECHNOMIC PUBLISHING*, Vol. 2(1992).
- Mogens Henze and Hallvard Ødegaard, "An analysis of wastewater treatment strategies for eastern and central Europe", *Wat. Sci. Tech.*, **30**(5), 25~40(1994).
- Müller N., "Implenting biofilm carriers into activated sludge process 15 years of experience", *Wat. Sci. Tech.*, **37**(9), 167~174(1998).
- Andersson B., Aspegren H., Nyberg U., J. la Cour Jansen and H. Ødegaard, "Increasing the capacity of an extended nutrient removal plant by using different techniques", *Wat. Sci. Tech.* **37**(9), 175~183(1998).
- Sørensen J., Andersen J., Andreasen K. and Hald K., "Experience with the upgrading of 14 treatment plants to N&P removal in the municipality of AARHUS," *Wat. Sci. Tech.*, **37**(9), 201~208(1998).
- 첨단환경기술, "포괄고정화 미생물을 이용한 하수의 질소제거 기술," *환경관리연구소*, **7**, 26~39(1996).
- Euiso Choi, Daewhan Rhu, Zuwhan Yun and Euisin Lee, "Temperature effects on biological nutrient removal system with weak municipal wastewater," *Wat. Sci. Tech.*, **37**(9), 219~226(1998).
- Randall C. W., Barnard J. L. and Stensel H. D., "Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal," *Water Quality Management Library, Technomic Publishing Company, Inc.* Vol. 5(1992).
- Zuwhan Yun, Euiso Choi and Young T. Han, "Polishing of BNR process effluent by tertiary denitrifying filter," *Wat. Sci. Tech.*, **36**(12), 29~37(1997).
- 환경관리공단 환경신기술 초록집, "환경신기술 보급·촉진을 위한 기술전시회-수처리분야 환경신기술," 4월 2일~3일, 환경부·경상남도(1999).
- C. Helmer, S. Kunst, S. Juretschko, M. C. Schmid, K. H. Schleifer and M. Wagner, "Nitrogen Loss in a Nitrifying Biofilm System," *Wat. Sci. Tech.*, **39**(7), 13~21(1999).
- Water Environment Federation, Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, Water Environment Federation, **2**, Chapter 11, 12(1998).
- 이규훈, 복합생물막공법을 이용한 하·폐수내 영양염의 생물학적 제거, 공학박사학위논문, 부산대학교(1997).
- Sedlak R. I., Principles and Practice of Phosphorus and Nitrogen Removal from Municipal Wastewater, The Soap and Detergent Association, New York, N.Y.(1989).
- Randall C. W. and Buth D., "Nitrite Build-up in Activated Sludge Resulting from Temperature Effects," *J. WPCE.*, **56**(9), 1039~1049(1984).
- 김미화, A²/O system과 고정생물막공법을 적용한 A²/O System에서의 질소제거 비교, 공학석사학위논문, 부산대학교(1995).
- Kyou-Hoon Lee, Dong-Seog Kim, Chang-Won Kim, Tae-Joo Park, "Operation Characteristics of an Aerobic Submerged Fixed-Film Reactor in a High Organic Loading," *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, **17**(5), 471~480(1995).
- K. Chidiadi, Low-level nitrification with biofilm systems, University of Missouri-Rolla, p. 136(1992).