

무산소-RBC 공정을 이용한 질소제거 특성 및 동력학적 인자 도출

최 명 섭 · 손 인 식
부경대학교 토목공학과
(2003년 6월 9일 접수; 2003년 10월 25일 채택)

Characteristics and Biological Kinetics of Nirtogen Removal in Wastewater using Anoxic-RBC Process

Myung-Sub Choi and In-Shik Shon

Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
(Manuscript received 9 June, 2003 ; accepted 25 October, 2003)

This study was conducted to investigate anoxic-RBC (rotating biological contactor) and its application in advanced municipal wastewater treatment process to remove biologically organics and ammonia nitrogen. Effluent COD and nitrogen concentration increased as the increase of volumetric loading rate. But, the concentration changes of NO_2^- -N and NO_3^- -N were little, as compared to COD and NH_4^+ -N.

When the volumetric loading rate increased, COD removal efficiency and nitrification appeared very high as 96.7~98.8% and 92.5~98.8%, respectively. However, denitrification rate decreased to 76.2~88.0%. These results showed that the change of volumetric loading rate affected to the denitrification rate more than COD removal efficiency or nitrification rate.

The surface loading rates applied to RBC were 0.13~6.01g COD/ m^2 -day and 0.312~1.677g NH_4^+ -N/ m^2 -day and they were increased as the increase of volumetric loading rate. However, the nitrification rate showed higher than 90%.

The thickness of the biofilm in RBC was 0.130~0.141mm and the density of biofilm was 79.62~83.78mg/ cm^2 . They were increased as surface loading rate increased. From batch kinetic tests, the $k_{\text{max}H}$ and $k_{\text{max}N}$ were obtained as 1.586 g C/g VSS-day, and 0.276 g N/g VSS-day, respectively.

Kinetic constants of denitrifer in anoxic reactor, Y , k_e , K_s , and k were 0.678 mg VSS/mg N, 0.0032 day^{-1} , 29.0 mg N/ ℓ , and 0.108 day^{-1} , respectively. P and K_s values of nitrification and organics removal in RBC were 0.556 g N/ m^2 -day and 18.71 g COD/ m^2 -day, respectively.

Key words : Aoxic-RBC, Advanced Municipal Wastewater Treatment, Nitrification, Denitrification, Kinetic Constants

1. 서 론

미생물을 이용한 폐수처리 기술은 반응조내에 유지되는 미생물의 성장형태에 따라 부유성장형 반응조와 미생물고정화 반응조로 대별할 수 있다. 부유성장형 시스템은 반응조내에 미생물을 처리대상 폐수와 혼합시켜 자유롭게 이동가능한 상태로 유지하는 시스템으로 활성슬러지 시스템으로 대표되며 기존 오폐수 처리공정에 가장 많이 사용되는 공법이

기도 하다. 그러나 이 공법은 에너지 소요량이 크고 운전에 상당한 기술이 요구된다는 단점을 안고 있다. 이에 대한 대안으로 제시되는 방법중의 하나가 미생물 고정화 방법을 이용한 폐수처리로서 생물막(biofilm) 공법이 널리 사용되고 있다¹⁻²⁾. 이러한 생물막 공정은 미생물을 미생물이 부착할 수 있는 적절한 담체에 부착시켜 처리하는 공법으로 활성슬러지공법에서 가장 문제가 되는 고액분리 문제를 해결할 수 있고 HRT에 관계없이 긴 SRT를 유지시킬 수 있어 최근 여러 가지 형태의 오폐수처리에 널리 사용되고 있다³⁾. 생물막을 사용하는 공법에는 살수여상, 회전원판법, 침적여상, 생물여과법 등이 있는 데⁴⁾, 특히 회전원판법(rotating biological contac-

Corresponding Author : In-Shik Shon, Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
Phone : +82-51-620-1447
E-mail : shonis@pknu.ac.kr

tors; RBC)은 에너지 비용 및 유지·보수비의 절감, 적은 공간요구도, 짧은 체류시간에서도 높은 처리효율을 달성할 수 있는 점, 원판체가 모줄로 되어 있어 설계에 유연성이 있다는 점 그리고 폭넓은 범위의 폐수 종류와 부하에 적용할 수 있다는 장점이 있다⁵⁾.

한편, 질소성분은 하천이나 호수에 유입되어 조류의 번식을 촉진하고 부영양화를 일으켜 수생 생태계에 악영향을 끼치며, 또한 수중에서 암모니아 형태로 존재하는 질소 성분은 질산화 반응을 일으키는 동안 상당량의 산소를 요구함으로써 수중 용존산소를 고갈시키고 유리 암모니아는 수생 생물에 유독성을 일으킨다.

이에 따라, 우리나라에서는 1996년부터 농공단지 오·폐수 처리시설을 포함한 방류수 수질기준에 총질소를 규제항목으로 설정함으로써 질소제거 기법에 대한 중요성이 더해지고 있는 실정이며, 2001년부터는 기준을 강화시킴에 따라 하수처리장의 영양소 제거를 위한 고도처리는 불가피한 현실이다⁶⁾. 최근에 총질소가 배출수 규제항목으로 지정됨에 따라 회전원판법을 이용한 질소 제거에 대한 연구가 수행되었다⁷⁻⁹⁾. 그러나 이들의 연구는 회전원판법 단일 공정을 이용한 암모니아성 질소의 질산화에 대한 것이며 타 공법과의 조합한 예는 없다. 질소제거가 대략 20~40 % 밖에 되지 않는 활성슬러지법을 주요 공정으로 하고 있는 하수처리장의 경우 기존공정을 탈피하여 신공정을 개발하여 적용하는 것이 바람직하지만, 공정개발을 위한 시간과 비용이 많이 드는 등 여러 가지 제약이 따라 기존 처리장의 공정 및 시설을 그대로 이용하면서 운전방법을 달리 하든가 또는, 기존 시설의 일부를 수정하여 공정

개선을 유도하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 유기물질 및 질소의 동시 제거를 위한 공정으로서 무산소-호기(RBC) 공정을 이용하여, 부하변화에 따른 각 조의 질소제거 특성과 동력학적 인자를 도출하여 본 공정의 설계인자로 이용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험 장치는 Fig. 1과 같이 아크릴을 이용하여 무산소-RBC 반응조 형태로 만들었으며, 반응기 본체의 규격은 무산소조의 경우 25(W)×25(L)×20(H) cm³, 유효용적 약 9 l였으며, RBC 반응조의 경우 25(W)×75(W)×20(H) cm³, 유효용적 약 28 l, 침전조는 25(W)×25(L)×30(H) cm³, 유효용적 약 15 l로 제작하여 20℃ 항온실에 설치하였다. 무산소조 상부에는 반응조 내 슬러지의 교반을 위해 20 rpm의 교반장치를 부착하였으며, 슬러지의 RBC 반응조로의 유실을 방지하기 위하여 방해판을 설치하였다. RBC 반응조의 회전 원판은 Ø20 cm, 두께 2 mm의 아크릴을 이용하였으며, 미생물의 부착을 위하여 표면처리를 하여 45 % 침적시켰다. 회전원판은 총 54개였으며, 미생물 부착 가능 표면적은 약 3.0 m²이었고, 회전속도는 10rpm으로 하였다. 합성폐수, 내부반송 및 슬러지 반송수는 미량조절펌프(IPC peristaltic pump, IPC-8 (Masterflux, 7520-47)을 이용하여 혼합조로 이송하여 자연유하방식으로 무산소조에 유입시켰다.

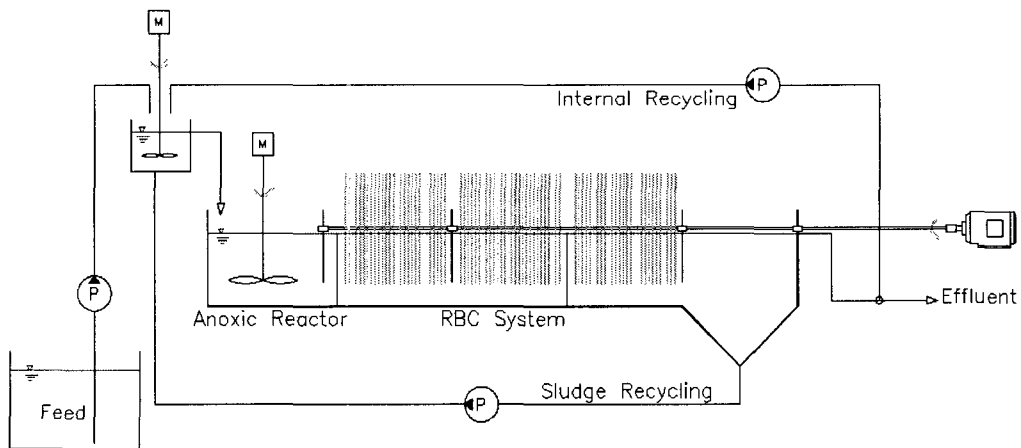


Fig. 1. Schematic flow of the experimental apparatus.

2.2. 시료의 조제 및 분석 방법

2.2.1. 합성 폐수의 조성

실험에 사용한 시료는 인조 합성 폐수로서 조성은 COD, 250 mg/l; NH₄⁺-N, 40 mg/l; NaHCO₃, 250 mg/l; Na₂HPO₄, 50 mg/l, 농축 미소 영양염 (단위 : mg/l) 용액[H₃BO₄, 50; FeCl₂·4H₂O, 2000; ZnCl₂, 50; MnCl₂·4H₂O, 500; AlCl₃·6H₂O, 90; CaCl₂·2H₂O, 80; NiCl₂·6H₂O, 50; (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O, 50; CoCl₂·6H₂O, 2,000; Na₂SeO₃, 100; EDTA, 1800 mg/l; HCl(30%), 1 ml/l], 0.1 ml/l를 수도물에 주입하여 매일 조제하였는데, 이는 일반적인 하수종말처리장의 농도에 준한 것이다.

2.2.2. 식중 미생물

본 실험에 사용한 식중 미생물은 무산소조의 경우 하수종말처리장의 반송슬러지를 이용하여 약 4,000 mg/l 되게 채웠으며, RBC 반응조의 경우 포기조 미생물을 채취하여 반응조에 채우고 상기 2.1.의 인조합성폐수 주입량을 늘려가며 약 60일간 부착 및 순차시켰다.

2.2.3. 시료 채취 및 수질 분석

본 실험의 분석은 유입수에 대하여 pH, TCOD, NH₄⁺-N를 분석하였으며, 유출수에 대하여 SCOD, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, TSS, VSS, 알칼리도를 Standard Methods¹⁰⁾에 의해 분석하였다.

2.3. 실험방법

2.3.1. 부하변화에 따른 처리 특성 실험

COD 및 NH₄⁺-N 농도를 각각 250 및 40 mg/l 인 인조합성폐수의 유입량을 늘려가며 실험 Exp. I ~ IV단계에 부가된 유기물질 및 질소 부하량은 Table 1과 같으며, 모든 단계에서 슬러지 순환 및 내부순환은 유입수 유량에 대하여 각각 100 및 200 %로 하였고, 각 단계에서의 운전기간은 정상상태가 10일 이상 될 때까지 운전하였다.

2.3.2. RBC 미생물 부착 특성

회전원판에 미생물을 집중시킨 후 균일한 미생

Table 1. Experimental conditions

| Item | Loading rate(g/l -day) | |
|----------|------------------------|---------------------------------|
| | COD | NH ₄ ⁺ -N |
| Exp. I | 0.26 | 0.041 |
| Exp. II | 0.33 | 0.052 |
| Exp. III | 0.51 | 0.080 |
| Exp. IV | 0.76 | 0.119 |

물막이 형성되어 정상 상태의 유출수 농도를 얻은 이후부터 본 실험을 시작하였다. 습윤상태의 미생물막의 두께 및 밀도는 미생물 부착 초기 단계부터 미디어와 미디어 사이에 고정시켜 둔 소형 미디어 원판(표면적, 39 cm²)을 떼어 내어 미생물을 완전히 탈리시켜 식 (1) 및 (2)에서 함수율을 99 %로 추정하여 미생물막의 두께와 밀도를 계산하였다¹¹⁾. 그리고 미생물 부착속도는 각 부하율별 실험의 시작과 동시에 새로운 소형 미디어 원판을 기존 운전되던 미디어 사이에 고정시켜 놓고 운전을 계속하여 각 부하율 실험 종료시마다 미디어 절편에 부착된 미생물을 떼어 내어 실

$$\text{Thickness}(L_f, \text{mm})$$

$$= \frac{(\text{Weight evaporated})}{(\text{Density of water})(\text{Surface area of media})} \quad (1)$$

$$\text{Density}(X_f, \text{mg/cm}^3)$$

$$= \frac{\text{mg VSS}}{(\text{Biofilm thickness})(\text{Surface area of media})} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 부하변화에 따른 제거 특성

유기물질 및 암모니아성 질소 부하변화에 따른 제거 특성을 평가하기 위하여 COD 및 NH₄⁺-N 농도를 각각 약 240 및 40 mg/l로 유지하면서 유입 유량을 증가시켜 Exp. I ~ IV의 4단계로 실험을 수행하였다. 이 때 COD 및 NH₄⁺-N 부하량을 각각 0.25~0.76 g COD/l-day 및 0.041~0.119 g NH₄⁺-N/l-day 범위로 증가시킨 결과

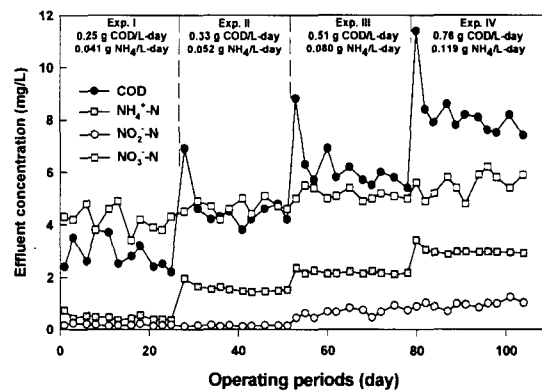


Fig. 2. Variations of effluent COD and nitrogen concentration with operating periods.

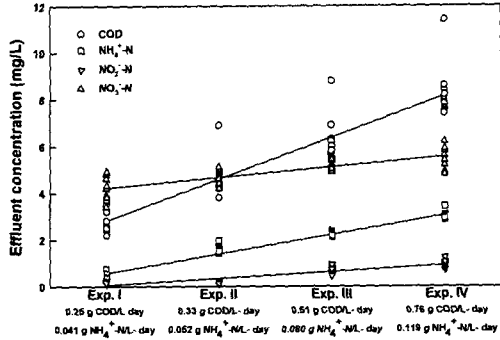


Fig. 3. Effluent COD and nitrogen concentration in each experiment.

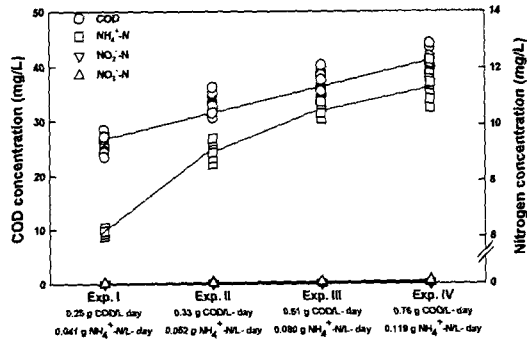


Fig. 5. Influent COD and nitrogen concentration in each experiment.

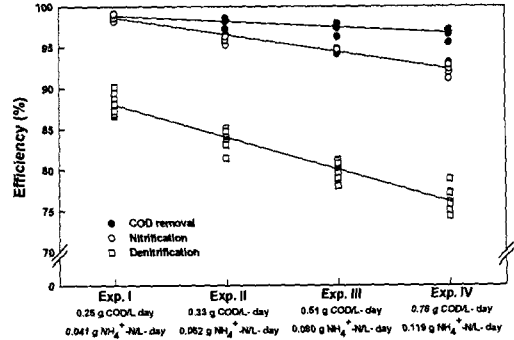


Fig. 4. Efficiencies of COD removal, nitrification and denitrification in each experiment.

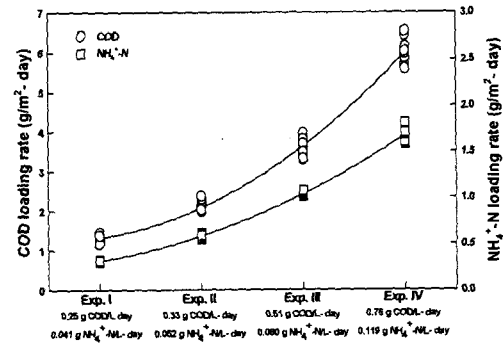


Fig. 6. COD and NH₄⁺-N loading rate applied to RBC in each experiment.

유출수 중의 유기물질 및 질소 농도변화는 Fig. 2와 같이 나타났다. 부하율이 증가함에 따라 유출수 중의 COD 및 질소 농도 모두가 다소 증가하는 경향을 나타내고 있었다. COD 및 NH₄⁺-N의 경우 실험조건 변화시마다 비교적 높은 농도를 나타내었으나 이후 빠른 속도로 정상상태에 도달하였으며, NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N의 경우 COD 및 NH₄⁺-N에 비해 부하량 증가에 따른 농도변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 3은 Exp. I ~ IV의 유출수 중의 COD 및 질소 평균 농도를 나타낸 것이며, Fig. 4는 각 실험단계에서의 유기물질 제거효율, 질산화(NH₄⁺-N 제거율) 및 탈질화율의 평균값을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이, Exp. I ~ IV의 유출수 중의 COD농도는 평균 2.87~8.28 mg/l로서 96.7~98.8%의 높은 제거율을 나타내었으며, 유출수 중의 NH₄⁺-N의 농도 역시 평균 0.46~3.00 mg/l로서 부하량 증가에도 불구하고 92.5~98.8%의 높은 질산화율을 보였다. 유출수 중의 NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N농도를 측정된 결과 각각 평균 0.17~0.95 mg/l 및 0.42~5.54 mg/l의 범위로 나타났으며,

이 때 탈질화율을 계산해 보면 평균 76.2~88.0%로 부하량이 증가함에 따라 탈질화율이 감소하는 경향을 보였다. Fig. 4의 결과에서 부하량의 증가에 따른 유기물질 제거율, 질산화율 및 탈질화율이 모두 감소하는 경향을 나타내는 것으로 나타났다. 각각의 기울기를 볼 때 부하량 증가가 유기물질 제거율 및 질산화율보다는 탈질화율에 영향을 더 크게 미치는 것으로 나타났다.

회전원판법에 의한 도시하수와 각종 산업폐수의 처리는 유기물과 암모니아의 산화를 중심으로 널리 사용되고 있으며 처리효율은 활성슬러지나 살수여상 등의 2차 처리방식에

비해 뒤떨어지지 않으며 부하변동에 강하다고 보고하였다¹²⁻¹⁴⁾. 본 연구에서 사용된 무산소-RBC 공정의 RBC 반응조에서의 질산화율이 매우 높았으며 질소의 탈질화를 위한 질산화의 목적으로 RBC를 이용할 경우에도 매우 효과적임을 알 수 있었다.

3.2. 부하변화에 따른 RBC 유입 특성

Exp. I ~ IV의 각 실험 단계에서 RBC 반응조

에 부가되는 유기물질 및 암모니아성질소의 표면적 부하를 측정하기 위하여 무산소 반응조에서 유출되는 COD 및 질소 농도를 측정한 결과 Fig. 5 및 6과 같이 나타났다. Exp. I의 경우 RBC 반응조로 유입된 COD 농도 및 표면적 부하율은 평균 25.8 mg/l 및 1.30 g COD/m²-day였으며, NH₄⁺-N 농도 및 표면적 부하율은 평균 6.20 mg/l 및 0.312 g NH₄⁺-N/m²-day였다. Exp. II, III 및 IV의 경우 RBC 반응조로 유입된 COD 농도는 각각 평균 33.0, 36.28 및 40.68 mg/l였으며, 이 때 표면적 부하율은 각각 평균 2.16, 3.59 및 6.01 g COD/m²-day였다. 그리고, Exp. II, III 및 IV의 경우 RBC 반응조로 유입된 NH₄⁺-N 농도는 각각 평균 9.06, 10.51 및 11.35 mg/l였으며, 이 때 표면적 부하율은 각각 평균 0.585, 1.039 및 1.677 g NH₄⁺-N/m²-day였다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 유입 용적 부하량이 증가함에 따라 RBC 반응조에 부가되는 COD 및 NH₄⁺-N의 표면적 부하율은 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N는 무산조에 거의 전부 제거되고 있는 것으로 나타났다.

남궁⁵⁾은 고농도 암모니아 함유폐수 질산화 연구에서 암모니아성 질소의 유입수 농도 345 mg NH₄⁺-N/l에서 표면적 부하율 4.9 g NH₄⁺-N/m²-day 이상에서, RBC 시스템에서 아질산성 질소(NO₂⁻-N)가 축적되는 것으로 보고하였다. 그러나, 본 연구에서는 최대 암모니아 표면적 부하율이 1.677 g NH₄⁺-N/m²-day로 남궁의 연구에서보다 매우 낮았는데, 이는 무산소조에서 원활한 탈질화가 일어나 RBC 반응조에서 NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N의 축적이 일어나지 않기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 무산조에서 제거되는 COD는 유입량에 대하여 약 56~68%가 제거되었는데 용적 부하량이 증가함에 따라 제거율이 감소하는 경향을 나타내었으며, 무산조에서 제거되는 NH₄⁺-N 역시 COD 제거와 유사하게 용적 부하량이 증가함에 따라 제거율이 감소하는 경향을 나타내었지만

그 양은 유입량에 대해 약 15% 이하로 COD 제거량에 비해 상당히 낮게 나타나는 것으로 보아 무산조에서의 암모니아의 산화가 일부 일어나기는 하지만 탈질화가 우세한 것으로 나타났다.

암모니아성 질소의 생물학적 제거 방법인 질산화-탈질화 공정에서 중요한 환경인자 중의 하나가 COD/N 비인데, 이러한 탈질에 요구되는 이론적인 COD/N 비는, 질산성 질소의 경우(NO₃⁻-N → N₂) 2.86 g COD/g N, 아질산성 질소의 경우(NO₂⁻-N → N₂)는 1.71 g COD/g N으로 보고되고 있다¹⁵⁾. 무산소조에서의 용적 부하량의 증가에 따른 COD 제거율이 감소하는 정도의 차이는 NH₄⁺-N의 용적 부하량의 증가함에 따라 질산화율이 감소함에 따라 탈질화에 요구되는 탄소원의 감소량과 거의 일치하는 값으로 계산되었다.

3.3. RBC 반응조의 생물막 특성

Exp. I ~ IV 단계의 RBC에 부가되는 표면적 부하율의 증가에 따른 미생물의 두께와 밀도를 측정된 결과를 Table 2에 나타내었다. RBC 시스템의 미생물 평균 두께는 0.130~0.141 mm의 범위로 표면적 부하율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 생물막의 미생물 밀도 역시, 79.62~83.78 mg/cm³ 범위로 표면적 부하율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 7은 Table 2의 자료를 이용하여 Exp. I ~ IV의 RBC 반응조에 부가되는 표면적 부하율의 증가에 따른 미생물 부착속도를 나타낸 것으로서, Exp. I에서는 평균 398 mg/m²·day였으며, Exp. II, III 및 IV에서는 평균 411, 430 및 472 mg/m²·day로 표면적 부하율이 증가할수록 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, Komegay와 Andrews¹⁶⁾는 생물막의 두께가 증가함에 따라 기질의 제거량은 증가하나, 두께가 어느 한계 이

Table 2. Biofilm thickness and density in each experiment

| Item | Exp. I | Exp. II | Exp. III | Exp. IV |
|--------------------------------------|--------|---------|----------|---------|
| L _f (mm) | 0.130 | 0.132 | 0.136 | 0.141 |
| X _f (mg/cm ³) | 79.62 | 81.02 | 82.34 | 83.78 |

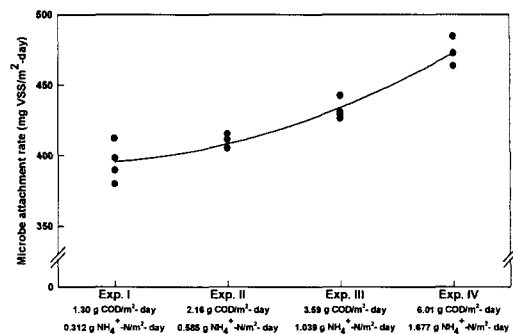


Fig. 7. Microbial attachment rates in each experiment.

상이 되면 더 이상 두꺼워지지 않으며 생물막의 밀도 또한 일정하게 유지되므로 기질의 제거율은 감소한다고 보고하였다. 본 연구의 무산소-RBC 공정의 RBC 반응조에서도 장기간 운전할 경우 그들의 보고와 동일한 결과가 얻어질 것으로 판단된다.

본 연구에서 이용된 RBC 반응조의 생물막 내에는 질산화박테리아(*Nitrifer*)와 및 종속영양미생물(*Heterotrophs*)이 공존하고 이들이 경쟁관계에 있기 때문에 정량분석을 위한 개별적인 미생물량을 구하는 것은 필수적이다 그러나, 이들을 증량법에 의해 직접적으로 측정할 수 없으므로 간접적 방법을 이용하여 측정하였다. 따라서, 본 연구에서는 Yoda¹⁷⁾가 사용한 방법을 응용한 것으로서 최대 반응속도에 기초한 *Heterotrophs*와 *Nitrifer*의 질량을 평가하기 위하여 아래의 식을 이용하였다.

$$\frac{(\gamma_{\max H}/X_T)}{k_{\max H}} + \frac{(\gamma_{\max N}/X_T)}{k_{\max N}} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{\gamma_{\max H}}{\gamma_{\max N}} = \frac{X_H}{X_N} \cdot \frac{k_{\max H}}{k_{\max N}} \quad (4)$$

여기서, $\gamma_{\max H}$ = 유기물제거 최대반응속도(g COD/day); $\gamma_{\max N}$ = 암모니아제거 최대반응속도(g N/day); $k_{\max H}$ = 최대 유기물제거 비속도(mg COD/g VSS · day); $k_{\max N}$ = 최대 암모니아제거 비속도(mg N/g VSS · day); X_H = *Heterotrophs*의 질량(g VSS); X_N = *Nitrifer*의 질량(g VSS)이다.

각 실험 단계에서 RBC 반응조 생물막 내 존재하는 질산화 박테리아와 종속영양미생물의 정량화를 위해 회분식 실험을 통한 자료를 이용하여 $\gamma_{\max H}$ 및 $\gamma_{\max N}$ 는 각각 0.807~0.963 g COD/day 및 0.107~0.136 g N/day의 범위로 측정되었다. 이 자료와

식 (3)을 이용하여 Fig. 8과 같이 도시한 결과 $k_{\max H}$ 및 $k_{\max N}$ 는 각각 1.568 및 0.276 day⁻¹로 도출되었다. 이 값들을 식 (4)에 대입하여 *Heterotrophs*와 *Nitrifer*의 질량을 평가한 결과 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.

그림에 나타난 바와 같이, 전체적으로 부하율이 증가함에 따라 RBC 반응조 내에 *Heterotrophs* 비율은 감소하는 반면 *Nitrifer*의 비율은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 Fig. (3)나타난 바와 같이 무산소조에서 탈질을 위한 탄소원으로 유기물질이 많이 소모되었기 때문에 RBC 반응조에서 유입되는 유기물질의 증가량이 암모니아성질소의 증가량보다 상대적으로 적기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 결과에 대한 신뢰성은 매우 낮다고 볼 수 밖에 없다. 왜냐하면 본 자료가 단일 기질에 대한 경쟁관계가 성립되지 않으며, 또한 *Heterotrophs*가 *Nitrifer*에 비해 기질이용 및 세포합성속도가 빠르기 때문에 NH₄⁺-N 제거시 유기물질의 질산화에 대한 영향이 있다고 보고한 바¹⁸⁻²⁰⁾ 있기 때문이다. 다만, RBC 반응조 생물막 내 존재하는 질산화 박테리아와 종속영양미생물의 정량화를 위한 방법으로는 이용 가능할 것으로 판단되는데, 본 실험에서 Exp. I ~ IV에서 RBC 반응조에 부가된 COD/N의 비가 각각 4.15~3.45로 점차 감소하고 있는 것으로 보아 Fig. 9와 유사한 경향을 보일 것으로 추측된다.

3.4. 동력학적 인자

무산조 반응조에 대한 동력학 계수 Y , k_e 및 반응속도상수 k , K_s 를 Fig. 2의 실험결과를 이용하여 구하였다. 생화학 반응에 대한 기타 동력학적 개념은 Monod²¹⁾ 식을 기초로 하여 다음 식이 유도된다.

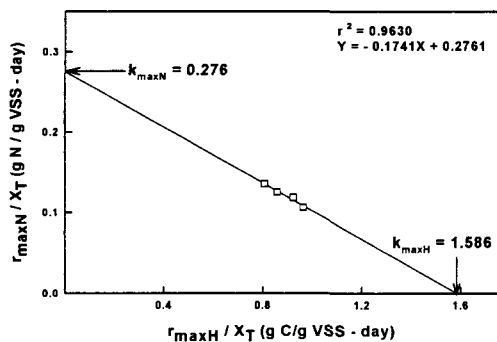


Fig. 8. The correlation between $\gamma_{\max H}/X_T$ and $\gamma_{\max N}/X_T$ to determine the k_{\max} value.

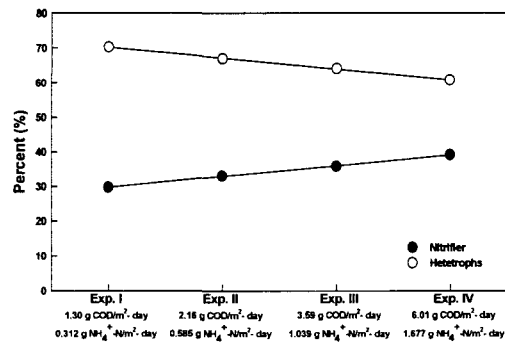


Fig. 9. Percentage of *Heterotrophs* and *Nitrifer* in each experiment.

$$\frac{S_o - S}{X_1 \theta_i} = \frac{k_e}{Y} + \frac{1}{Y} \frac{1}{\theta_c} \quad (5)$$

$$\frac{X_1 \theta_i}{S_o - S} = \frac{K_s}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k} \quad (6)$$

여기서, S_o = 유입수 N 농도(mg/l); S = 유출수 N 농도(mg/l); X_1 = 미생물 농도(mg/l); θ_i = 수리학적 체류시간(day); θ_c = 평균 미생물 체류시간(day); k_e = 내생호흡계수 (day^{-1}); K_s = 반포화속도상수(mg/l); k = 속도상수(day^{-1})이다.

미생물 전환계수 Y 와 내생호흡계수 k_e 의 결정은 비기질이용속도, $(S_o - S)/(X_1 \cdot \theta_i)$ 에 대한 슬러지 일령의 역수, $1/\theta_c$ 를 도시한 Fig. 10의 직선 회귀분석으로부터 산출한 결과, Y 및 k_e 의 값은 각각 0.678 mg VSS/mg N 및 0.0032 day^{-1} 로 나타났다. 이 값들은 문헌²²⁾에 보고된 탈질공정의 대한 Y 및 k_e 의 전형적인 값인 0.8 mg VSS/mg N, 0.04 day^{-1} 와 유사하게 산출되었다.

또한, $1/S$ 에 대한 $(X_1 \cdot \theta_i)/(S_o - S)$ 의 도시로부터 산출한 K_s 및 k 값은 각각 29.0 mg N/l 및

0.108 day^{-1} 로 나타났다.

Fig. 11은 RBC 반응조에서의 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 의 질산화 및 유기물질 제거 동력학적 인자를 산정하기 위하여 Fig. 5의 자료를 이용한 결과를 나타낸 것으로서, Kornegay¹⁶⁾의 model을 1차식으로 변형한 결과는 식 (7)과 같다.

$$\frac{A_w}{Q \cdot (S_o - S)} = \frac{K_s}{P} \cdot \frac{1}{S} + \frac{1}{P} \quad (7)$$

여기서, A_w = 미생물에 의해 부착된 매질의 표면적(m^2); S_o = 유입수 농도(mg/l); S = 유출수 농도(mg/l); K_s = 반포화속도상수(mg/l); P = $\{(\mu_m)_A \cdot X_A\}/Y_A$ (area capacity constant, $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$); Y_A = 부착성장상에 대한 이론적인 생성계수이다.

직선의 기울기로부터 구한 제거속도 P 값은 질산화 및 유기물 제거에 있어 각각 $0.556 \text{ g N}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 및 $18.71 \text{ g COD}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 였으며, 절편으로부터 반포화 상수인 K_s 값은 질산화 및 유기물 제거에 있어 각각 $2.869 \text{ mg N}/\text{l}$ 및 18.71 mg

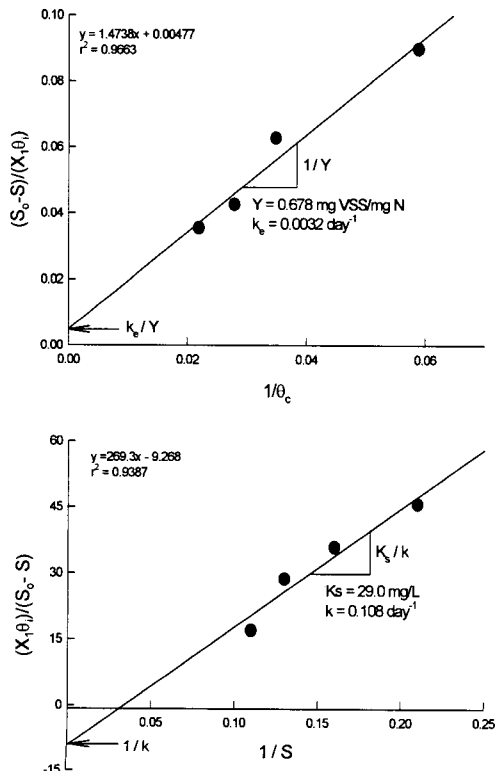


Fig. 10. Graphical determination of kinetic constants for anoxic reactor.

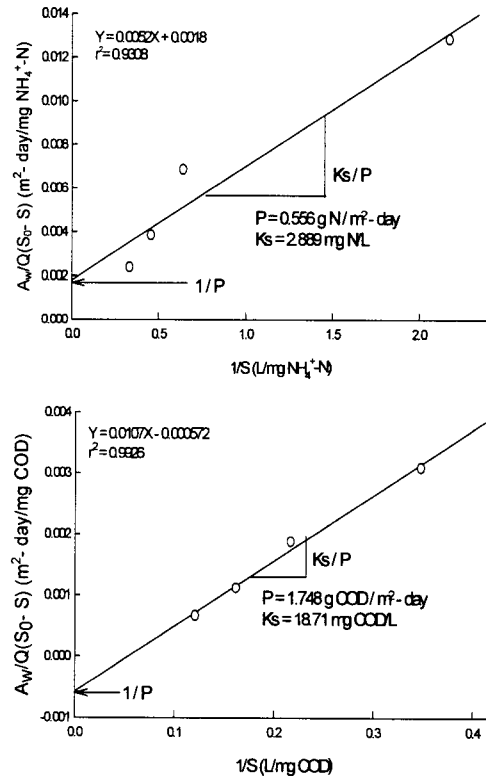


Fig. 11. Graphical determination of kinetic constants for RBC reactor.

COD/ℓ로 산정되었다.

4. 결 론

유기물질 및 질소의 동시 제거를 위한 공정으로서 무산소-호기(RBC) 공정을 이용하여, 부하 변화에 따른 각 조의 질소제거 특성과 동력학적 인자를 도출한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용적 부하율이 증가함에 따라 유출수 중의COD 및 질소 농도 모두가 다소 증가하는 경향을 나타내고 있었으며, NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N의 경우 COD 및 NH₄⁺-N에 비해 부하량 증가에 따른 농도변화는 크지 않은 것으로 나타났다.
- 2) 유출수 중의 COD 제거율 및 질산화율은 용적 부하율이 증가함에도 불구하고 각각 96.7~98.8 % 및 92.5~98.8 %로 매우 높게 나타났으나, 탈질화율은 76.2~88.0 %로 부하량이 증가함에 따라 탈질화율이 감소하는 경향을 보여 부하량 증가가 COD 제거율 및 질산화율보다는 탈질화율에 영향을 더 크게 미친다는 것을 알 수 있었다.
- 3) RBC 반응조에 부가되는 COD 및 NH₄⁺-N 표면적 부하를 측정된 결과 용적 부하율이 증가함에 따라 각각 0.13~6.01 g COD/m²-day 및 0.312~1.677g NH₄⁺-N/m²-day의 범위로 증가하였으나, RBC 반응조에서의 질산화율은 90 %이상으로 매우 높게 나타났다.
- 4) RBC 시스템의 미생물 평균 두께 및 생물막의 미생물 밀도는 각각 0.130~0.141 mm 및 79.62~83.78 mg/cm²의 범위로 표면적 부하율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 회분식 실험을 통해 계산된 k_{maxH} 및 k_{maxN} 는 각각 1.586 g C/g VSS · day 및 0.276 g N/g VSS · day로 도출되었다.
- 5) 무산소 반응조의 탈질 미생물에 대한 Y 및 k_e 의 값은 각각 0.678 mg VSS/mg N 및 0.0032 day⁻¹로 나타났으며, K_s 및 k 값은 각각 29.0 mg N/ℓ 및 0.108 day⁻¹로 나타났다.
- 6) RBC 반응조의 제거속도 P 값은 질산화 및 유기물 제거에 있어 각각 0.556 g N/m² · day 및 18.71 g COD/m² · day였으며, 반포화 상수인 K_s 값은 질산화 및 유기물 제거에 있어 각각 2.89 mg N/ℓ 및 18.71 mg COD/ℓ로 도출되었다.

참 고 문 헌

- 1) Kinner, N.E. and T.T. Eighmy, 1987, Biological fixed-film systems, J. Wat. Pollut. Control Fed., 59, 395-400.
- 2) Stathis, T.C., 1980, Fluidized bed for biological wastewater treatment, Environ. Eng., ASCE, 106, 227-241.
- 3) Cheetham, P.S. J. and Bucke, C., 1984, Immobilization of microbial cells and their use in wastewater treatment. In : Microbiological Methods for Environ. Biotechnol., 219-234pp.
- 4) Metcalf, L. and H.P. Eddy, 1991, Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse, 3rd ed, McGraw-Hill, New York, 403-429pp.
- 5) 정재춘, 1994, 생물막(Biofilm)의 미생물학적 측면, 대한환경공학회지, 16(5), 589-600.
- 6) 환경부, 1996, 수질환경보전법시행규칙, 제8조.
- 7) 남궁 완, 1990, 회전 원판을 이용한 고농도 암모니아 폐수처리 가능성, 대한상하수도학회지, 4(1), 35-42.
- 8) 서형석, 유성호, 1993, 군용 시설물 폐수 처리를 위한 고정 생물막 공법의 연구, 대한상하수도학회지, 7(1), 37-43.
- 9) 이석모, 김도희, 송교욱, 1992, 순환여과식 양식장의 암모니아 제거를 위한 최적 수리학적 부하, 한국수산학회지, 25(3), 176-180.
- 10) APHA, AWWA, and WPCF, 1992, Standard methods for the examination of water and wastewater.
- 11) Namkung, E., G. S. Richard and E. R. Bruce, 1983, Predicting removal of trace organic compounds by biofilms, J. Wat. Pollut. Control Fed., 55(11), 1366-1372.
- 12) Antonie, R. L., 1974, Nitrification of activated sludge effluents, Water and Sew. Works, 121, 44-53.
- 13) Antonie, R.L., 1976, Fixed biological surface-wastewater treatment, the rotating biological contactor, CRC Press Inc., Cleveland, Ohio, 103-176pp.
- 14) Lue-Hing, C., 1976, Biological nitrification of sludge supernatant by rotating disks, J. Wat. Poll. Control Fed., 48, 25-33.

- 15) U. S. EPA, 1993, Manual; Nitrogen Control, EPA/625/R-93/010.
- 16) Kornegay, B. H. and J. F. Andrews, 1968, Kinetics of fixed-film biological reactors, J. Wat. Poll. Control Fed., 40, 44-60.
- 17) Yoda, M., M. Kitagawa and Y. Miyaji, 1987, Long term competition between sulfate-reducing and methane-producing bacteria for acetate in anaerobic biofilm, Wat. Res., 12, 1547-1556.
- 18) Hanaki, K., C. Wantawin and S. Ohgaki, 1990, Effect of the activity of heterotrophs on nitrification in the suspended-growth reactor, Wat. Res., 24(3), 289-296.
- 19) Hanaki, K., C. Wantawin and S. Ohgaki, 1990, Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor, Wat. Res., 24(3), 297-302.
- 20) Bovendeur, J., A. B. Zwaga, B. C. J. Lobee and J. H. Blom, 1990, Fixed-biofilm reactors in aquacultural water recycle systems : Effect of organic matter elimination on nitrification kinetics, Wat. Res., 24(2), 207-213.
- 21) Monod, J., 1949, The growth of bacterial cultures, Annual review of Microbiology, 3, 371-375.
- 22) Metcalf, L. and H. P. Eddy, Inc., 1991, Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 705-706pp.