

RBC 반응조를 이용한 2단 A/O 공정에서 유기물질 및 질소제거

최명섭[†] · 손인식
부경대학교 토목공학과

Removal of Organics and Nitrogen in Wastewater Using 2 Stage A/O(RBC) Process

Myung Sub Choi[†] · In Shik Shon

Department of Civil Engineering, Graduate School, Pukyong National University

(Received June 5, 2003; Accepted August 12, 2003)

ABSTRACT

This study was conducted to investigate anoxic-RBC-anoxic-RBC process and its application to remove biologically organics and nitrogen. BOD and total-nitrogen(T-N) removal efficiencies were decreased as volumetric loading rate increased. But, the removal efficiency changes of T-N were little, as compared to BOD. Increase of internal recycle rate had few affect of BOD and T-N removal rates. Also, influent allocation(to 2nd anoxic reactor) had few affect of BOD removal efficiency rate. However, when the influent allocation rate was 30%, T-N removal efficiency was increased to 84.1%. BOD/N ratio applied to 2nd anoxic reactor was increased to range of 3.65~4.37 as influent allocation rate increased to range 20~35%. But, it might also cause adverse effect such as decrease of denitrification rate in excessive influent allocation rate.

Keywords: Anoxic-RBC-anoxic-RBC, Advanced treatment, T-N, BOD/N ratio

I. 서 론

생물학적 탈질은 *Bacillus*와 같은 혐기성 미생물이 NO_2^- -N 및 NO_3^- -N를 전자수용체로 이용하여 N_2 로 환원시키는 과정으로, 유기물과 같은 전자공여체가 필요하다. 탈질에 이용되는 유기성 전자공여체로는 methanol 및 acetate 등과 같은 외부탄소원, 유입수에 포함된 유기물, 미생물의 자산화시 생성되는 유기물 등이 있다. 미생물 성장을 고려하지 않은 이론적인 유기물 요구량은 NO_3^- -N 및 NO_2^- -N 1 mg당 각각 40 및 24 mg COD로, 이 때 이론적 COD/N 비는 각각 2.86 및 1.71이다.¹⁾ 그러나, 국내의 경우 생활 하수의 집수를 위한 하수관거가 우수와 하수가 함께 유입되는 합류식 관거가 많아 하수종말처리장으로 유입되는 유기물질의 농도가 낮아 생물학적 고도처리시 탈질을 위한 외부탄소원이 많이 요구되고 있다.

하 · 폐수처리장에서의 질소제거를 위한 방법으로써 Anoxic-Oxic 공정과 Anoxic-Oxic-Anoxic-Oxic 공정 등이 많이 이용되고 있다.^{2,4)} 또한, Fujii와 Boonyarat⁵⁾는 Anoxic과 Oxic 반응조의 유출수 중의 NH_4^+ -N, Alkalinity 및 NO_3^- -N가 양론적인 질산화 반응과 탈질 반응으로부터 추정되었고, Anoxic-Oxic-Anoxic-Oxic 공정에서의 계산치 T-N 제거효율을 유입수질, 반송율(Recycling ratio) 그리고 두 번째 Anoxic 반응조로의 유입수 분배율(Influent allocation ratio)의 함수로 나타내었다. 그러나, Anoxic-Oxic-Anoxic-Oxic 공정의 경우에 충분한 질소 제거를 위해 내부순환율(Internal recycling ratio; 1st Oxic→1st Anoxic)을 대부분 적용하고 있어 이에 대한 검토가 필요하다. 박 등⁶⁾은 Anoxic-Oxic-Anoxic-Oxic 공정을 이용하여 질소에 대한 내부순환율 및 반응조 용적비를 계산하여 양론적으로 해석하였다. 그러나, 이들은 일본 하수처리장의 운전 자료를 이용하여 수치적 계산한 것이며, 또한, 활성슬러지에 의한 공정 결과를 이용한 결과이다.

암모니아의 질산화반응에 관여하는 질산화박테리아는 독립영양미생물(*autotrophs*)로 탄소계 유기물질을 분해

[†]Corresponding author : Department of Civil Engineering,
Graduate School, Pukyong National University
Tel: 82-52-277-9101, Fax: 82-52-277-9104
E-mail : mschoipknu@hanmail.net

하는 종속영양미생물(*heterotrophs*)에 비해 세포합성속도와 기질분해속도가 크게 낮아 경쟁적으로 하위에 있으므로,⁷⁾ 부유성장법보다는 일정 매디아에 질산화 박테리아를 부착시킨 침적여상(submerged filter), 살수여상(trickling filter), 회전원판법(rotating biological contactors; RBC) 등의 생물막 공법이 흔히 이용되고 있다.⁸⁻¹¹⁾ 생물막공법은 부유성장공법에 비해 높은 슬러지 체류시간(sludge retention time; SRT)을 유지할 수 있기 때문에 기질의 부하변동에 강하며, 높은 처리효율, 운전관리의 용이함, 슬러지 발생량이 적다는 장점을 가지고 있어 성공적으로 사용되고 있으며, 최근에 총질소가 배출수 규제항목으로 지정됨에 따라 활발한 연구가 수행중이다.⁸⁻¹²⁾

질소제거가 대략 20-40% 밖에 되지 않는 활성슬러지법을 주요 공정으로 하고 있는 하수처리장의 경우 기존 공정을 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 공정개선을 유도하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 비교적 긴 SRT를 유지할 수 있고, 부하변동에 강하며, 높은 처리효율 및 적은 슬러지 발생량으로 운전관리가 용이한 회전원판법과 무산소 반응조를 조합하여 도시하수 중의 유기물질 및 질소를 동시 제거할 수 있는 무산소-RBC-무산소-RBC 고도하수처리 공정을 개발하기 위하여 Y 하수종말 처리장의 일차 율류수를 이용하여 부하변화, 내부순환을 및 유입수 분배비의 변화에 따른 질소제거 특성을 고찰하고자 한다.

II. 연구방법

1. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험 장치는 Fig. 1과 같이 SUS-304를 이용하여 무산소-RBC-무산소-RBC 반응조 형태로 만들었으며, 반응기 본체의 규격은 제 1 및 2 무산소조의 경우 $45^W \times 45^L \times 30^H$ cm³, 유효용적 약 48 l였으며, 제 1 RBC 반응조의 경우 $45^W \times 135^L \times 30^H$ cm³, 유효용적 약 144 l, 제 2 RBC 반응조의 경우 $45^W \times 45^L \times 30^H$ cm³, 유효용적 약 48 l로 각각의 용적비는 1:3:1로 하였고, 침전조는 $45^W \times 45^L \times 50^H$ cm³, 유효용적 약 100 l로 제작하여 설치하였다.

무산조 상부에는 반응조 내 슬러지의 교반을 위해 20 rpm의 교반장치를 부착하였으며, 슬러지의 RBC 반응조로의 유실을 방지하기 위하여 방해판을 설치하였다. RBC 반응조의 회전 원판은 $\Phi 40$ cm, 두께 1.5 mm의 PE 재질을 이용하였으며, 미생물의 부착을 위하여 표면처리를 하여 45% 침적시켰다. 회전원판은 제 1 및 RBC 반응조에 각각 44개 및 22개로 면적비가 약 2:1이었으며, 미생물 부착 가능 표면적은 각각 약 8.8 및 4.4 m²이었으며, 회전속도는 10 rpm으로 하였다. 유입폐수, 내부반송 및 슬러지 반송수는 마그네틱펌프(magnetic pump, LC-100)를 이용하여 혼합조로 이송하여 자연유하방식으로 제 1 무산소조에 유입시켰다.

2. 폐수의 성상 및 분석 방법

1) 유입 폐수의 성상

본 실험에 사용된 Y 하수종말처리장의 1차 율류수의

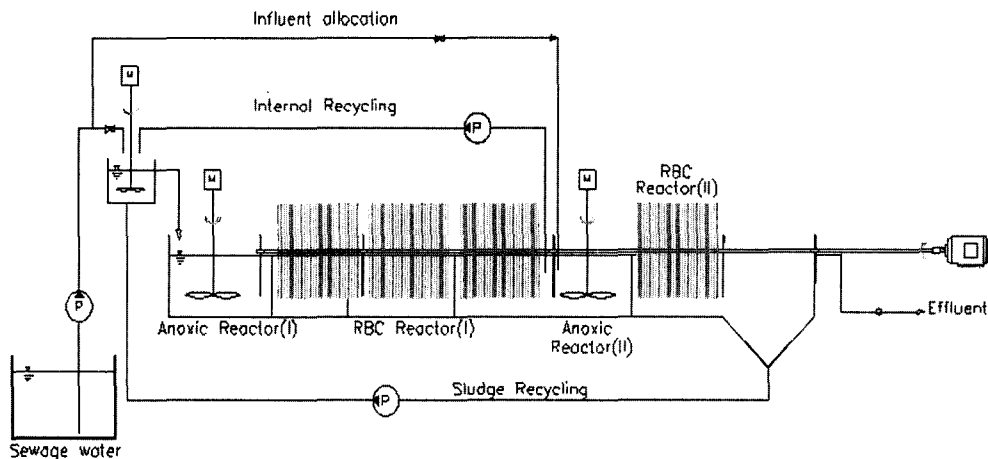


Fig. 1. Schematic flow of the experimental apparatus.

Table 1. Conditions of each experiment

Item	Loading rate(g/l-day)	
	BOD ₅	T-N
Exp. I	0.157	0.023
Exp. II	0.233	0.033
Exp. III	0.317	0.044

조성은 실험기간동안 45개의 시료를 채취하여 분석한 결과 평균 COD_{Mn}, 196 mg/l; BOD₅, 165 mg/l; T-N, 23.5 mg/l; T-P, 3.16 mg/l, NH₄⁺-N, 21.6 mg/l; NO₃⁻-N, 0.65 mg/l; SS, 16 mg/l이었다.

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 유입하수 주입량을 늘려가며 약 60일간 부착 및 순치시켰다.

3) 시료 채취 및 수질 분석

본 실험의 분석은 유입수 및 유출수에 대하여 pH, BOD₅, T-N 및 SS를 수질오염공정시험방법¹³⁾에 의해 분석하였다.

3. 실험방법

1) 부하변화에 따른 처리 특성 실험

유입하수의 유입량을 늘려가며 실험 Exp. I~III단계에 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) 내부순환을 변화에 따른 처리 특성

1)의 Exp. III의 부하조건에서 내부 반송율을 100 (Exp. IV, 200(Exp. III), 250(Exp. V) 및 300(Exp. VI) %로 조정하여 실험을 수행하였다.

3) 유입분배비 변화에 따른 처리 특성

1)의 Exp. VI의 조건에서 제 2 무산소조로 유입유량의 20(Exp. VII), 30(Exp. VIII) 및 35(Exp. IX) %를 분배 유입시켜 실험을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 부하변화에 따른 제거 특성

유기물질 및 질소 부하변화에 따른 제거 특성을 평가하기 위하여 유입 유량을 증가시켜 Exp. I~III의 3단계로 실험을 수행하였다. 이 때, BOD 및 T-N 부하량은

각각 평균 0.157~0.317 g BOD/l-day 및 0.023~0.044 g N/l-day 범위로 증가하였으며, 실험결과 유출수 중의 BOD 및 T-N 농도변화는 Fig. 2와 같이 나타났다. 부하율이 증가함에 따라 유출수 중의 BOD 및 T-N 농도 모두가 다소 증가하는 경향을 나타내고 있었으나 큰 차이는 없었으며, 운전기간 경과에 따라 각 반응조의 미생물이 잘 순치되고 있는 것으로 판단되었다.

보다 자세한 평가를 위하여 각 실험 단계의 평균 농도를 이용하여 Fig. 3과 같은 그림을 나타내었는데, 그림에 나타난 바와 같이, Exp. I-IV의 BOD 제거율은 평균 89.7~94.3%로 부하량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 유출수 중의 T-N 제거율 역시 평균 72.6~78.9%로 부하량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으나, 제거율 감소의 정도가 BOD 제거율 보다는 T-N 제거율의 감소가 더 큰 것으로 나타났다.

2. 내부 반송이 질소제거에 미치는 영향

배 등¹⁴⁾의 보고에 의하면 반송율을 유입유량에 대해

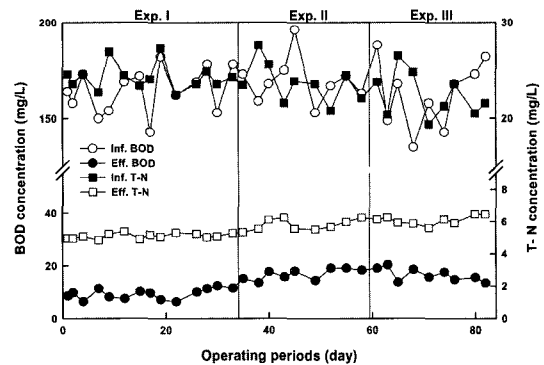


Fig. 2. Variations of effluent BOD and T-N concentration in each experimental.

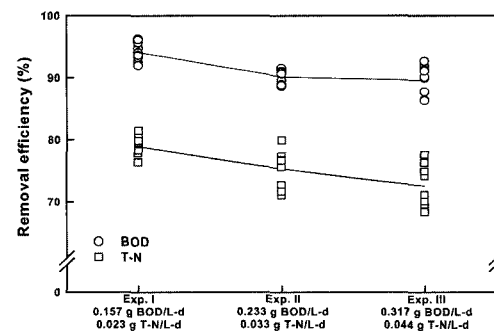


Fig. 3. Efficiencies of BOD and T-N removal, in each experimental.

약 6배까지 증가시킴에 따라 고농도의 질소를 함유한 유입수의 희석 효과에 의해 탈질율이 약 30% 정도 향상되었다고 하였다. 따라서, 본 연구에서도 내부 반송율의 증가에 따른 탈질화에 대한 영향을 고찰하기 위하여 Exp. III(내부순환율 200%)의 용적 부하량 약 0.317 g BOD/l-day 및 0.044 g T-N/l-day에서 내부 반송율을 100, 250 및 300%로 변화시켜 보았다. 그 결과 Fig. 4 및 5와 같은 결과를 얻을 수 있었는데, 그림에 나타난 바와 같이, 내부 반송율이 증가함에 따라 BOD 제거율 및 탈질율이 모두 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 내부 반송율을 300%까지 증가시켰으나 BOD 및 T-N 제거율이 각각 평균 91.3 및 77.8%로 나타나 Exp. III의 경우보다 각각 약 2.6 및 5.2%만이 증가하였을 뿐이었다. 이러한 결과는 배 등의 연구와 상이한 결과인데, 이는 그들이 수행한 대상 폐수는 고농도의 NH₄⁺-N를 포함한 침출수로서 본 연구에서보다 질소 부하량이 매우 높아 희석에 의한 충격 부하의 감소로 내부 반송율이 탈질효율에 큰 영향을 미

친 것으로 판단된다.

3. 유입 분배율의 변화에 따른 제거 특성

Exp. VI의 용적 부하량 0.32 g BOD/l-day 및 0.043 g N/l-day, 내부반송율 300%의 조건에서 제 1 및 제 2 무산소조로의 유입 유량 분배비를 80:20, 70:30 및 65:35로 변화시켜 가며 실험을 수행한 결과, Fig. 6 및 7과 같이 나타났다. 그림에 나타난 바와 같이, 제 2 무산소조로의 유입 유량 분배율 0~30%까지 증가시킨 Exp. VI~VIII단계까지는 BOD 및 T-N 제거율이 각각 91.3~93.6% 및 77.8~84.5%로 유입 유량 분배율이 증가함에 따라 제거효율이 증가하는 경향을 나타내었으나, 유입 유량 분배율을 약 35%로 증가시킨 Exp. IX에서는 BOD 및 T-N 제거율이 각각 93.1 및 83.1%로 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 유입 분배율을 30% 이상 증가시킬 경우 제 2 무산소조 및 RBC 반응조에 추가되는 BOD 및 T-N의 부하량이 높아져 오히려 제거효율을 감소시킨 결과로 추측되어진다.

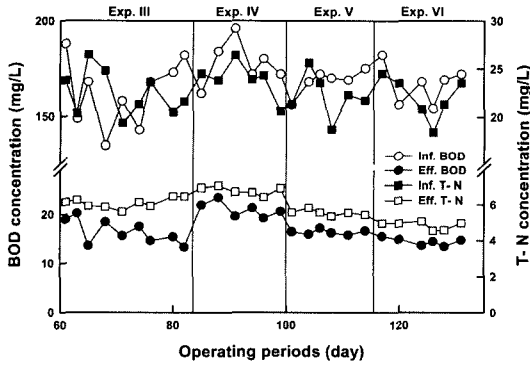


Fig. 4. Variation of BOD and T-N concentration in each experimental.

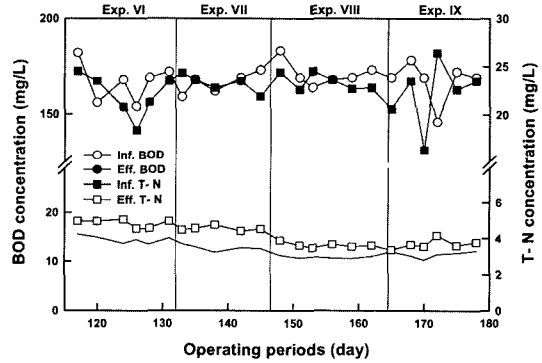


Fig. 6. Variation of BOD and T-N concentration in each experimental.

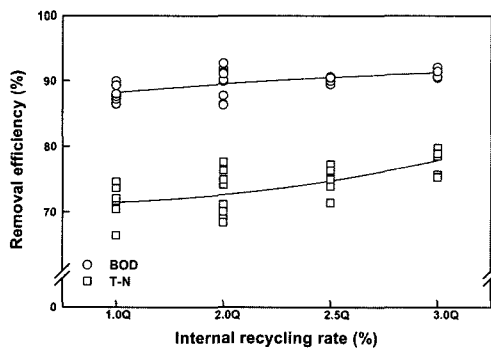


Fig. 5. Efficiencies of BOD and T-N removal, in each internal recycle rate.

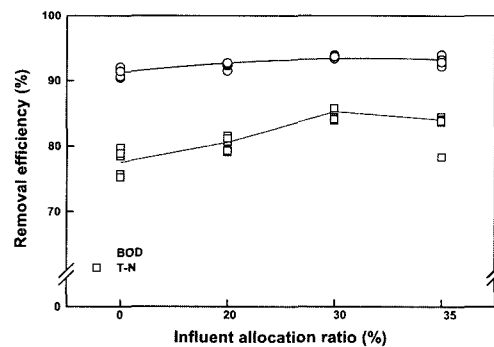


Fig. 7. Efficiencies of BOD and T-N removal, in each influent allocation ratio.

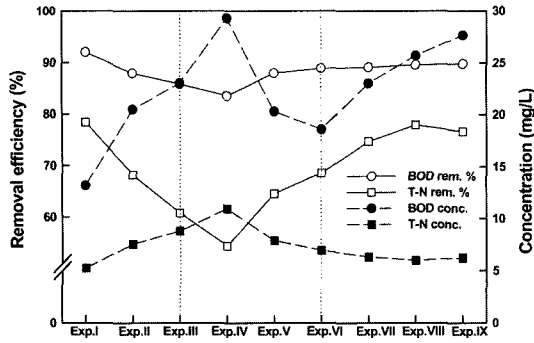


Fig. 8. Variation of BOD and T-N from 1st reactor in each experiment.

이러한 원인을 보다 정확히 규명하기 위하여 각 실험 단계에서 제 2 무산소조 및 RBC 반응조로 유입되는 부하되는 BOD 및 T-N 부하를 측정하기 위하여 제 1 RBC 반응조내의 BOD 및 T-N 농도를 측정된 결과와 제 1 무산소조 및 RBC 반응조에서의 BOD 및 T-N 제거율을 계산한 결과 Fig. 8과 같이 나타났다. 유입분배 없이 동일한 내부 반송비에서 부하량을 증가시킨 Exp. I-III단계에서는 유입 부하량이 증가함에 따라 제 1 무산소조 및 RBC 반응조에서의 BOD 및 T-N 제거율이 감소하여 제 2 무산소조로 유입되는 BOD 및 T-N 농도가 높아지는 경향을 나타내었다. 이 때, 유입 부하량의 증가에 따른 제거효율의 감소 정도는 Fig. 3에서와 마찬가지로 BOD 보다는 T-N이 더 큰 것으로 나타났다.

동일한 유입 부하량에서 내부 반송비를 변화시킨 Exp. IV~VI단계에서의 제 2 무산소조에 부가되는 BOD 및 T-N 농도 및 제거효율 변화를 관찰한 결과 반송비를 100%로 감소시킨 Exp. VI의 경우 BOD와 T-N 모두 그 변화 정도가 크게 나타났으나, 반송비를 300%로 증가시킨 Exp. VI의 경우에는 그 변화 정도가 둔화되는 것으로 나타났다.

Exp. VI의 조건에서 제 2 무산소조로의 유입 유량을 20, 30 및 35%로 증가시킨 Exp. VII~IX단계에서는 제 1 반응조에서의 BOD 제거효율은 88.9~89.7%로 거의 변화가 없었다. 그러나, T-N 제거효율은 유입 유량 분배율의 영향이 큰 것으로 나타났는데, 유입 유량 분배율 30%의 Exp. VIII단계에서는 제 1 반응조에서의 T-N 제거율이 77.8%까지 증가하였으며, Fig. 7에 나타난 바와 같이 전체 T-N 제거율이 약 84.5%까지 나타났으나, 유입 유량 분배율 35%의 Exp. IX단계에서는 제 1 반응조에서의 T-N 제거율이 76.5%로 다시 감소함과 동시에 전체 T-N 제거율 역시 약 83.1%로 감소

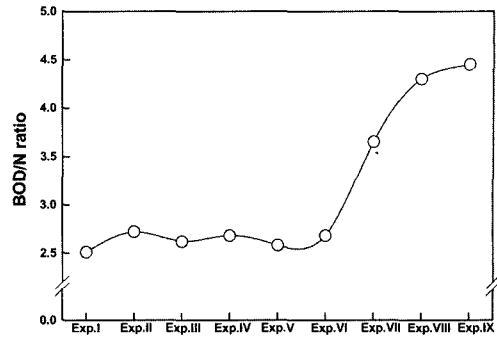


Fig. 9. Variation of BOD/N ratio applied on 2nd anoxic reactor in each experiment.

하는 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 Fig. 8의 자료를 이용하여 각 실험 단계에서의 BOD/N를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이, 유입수 분배를 하지 않은 Exp. I-VI단계에서는 제 2 무산소조로 유입되는 BOD/N비가 2.51~2.72로 거의 일정한 것으로 나타나, 본 공정에서 유입 부하량 및 내부 반송비를 증가하여도 제 2 무산소조에서의 탈질 가용 탄소원의 결핍으로 인한 T-N 제거율의 증가를 이루지 못하는 것으로 나타났다. 그러나, 유입 유량 분배율을 20, 30 및 35%로 증가시킨 Exp. VII-IX단계에서는 BOD/N비가 3.65~4.37로 증가함에 따라 제 2 무산소조에서의 탈질 가용 탄소원의 증가에 의한 T-N 제거율의 증가가 일어남을 알 수 있었다.

따라서, 본 실험의 결과는 제 2 무산소조로의 유입 유량 분배율을 변화에 따른 제 2 무산소조에서 질소의 탈질화에 요구되는 탄소원의 양과 거의 일치하는 값으로 계산되었다고 판단된다. 이것은 여러 연구자들^{1,14-16)}이 보고한 질산화-탈질화 공정에서 COD/N 비가 매우 중요하며 탈질을 위한 가용 유기물질의 결핍은 탈질율을 감소시킨다는 결과와 일치하였다.

그러나, Exp. IX단계의 경우 BOD/N 비가 4.37임에도 불구하고 전체 BOD 및 T-N 제거효율이 93.1 및 83.1%로 감소하였는데, 이는 제 2 반응조에 부가되는 부하량의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 박 등⁹⁾은 내부순환을 포함한 Anoxic-oxic-anoxic-oxic 공정에서 질소제거를 위한 이론적 고찰에서 최적유입수분배비를 22%로 계산되었으며, 이 때 탈질효율은 약 85%였으며, 30 및 40%에서 탈질효율은 각각 약 80 및 75%로 선형적으로 감소한다고 보고하였다. 본 연구의 결과와는 다소 차이가 있으나, 본 연구에서 이용된 무산소-RBC-무산소-RBC 공정 역시 적당한 유입수 분배가 탈질 효율을 증가시킬 수 있으나, 제 2 반응조로의 과다

한 유입수 분배는 오히려 탈질 효율을 감소시킨다는 점에서 실험 결과의 일치성을 보이는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

회전원판법과 무산소 반응조를 조합하여 도시하수 중의 유기물질 및 질소를 동시 제거할 수 있는 무산소-RBC-무산소-RBC 고도하수처리 공정을 개발하기 위하여 본 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용적 부하율이 증가함에 따라 BOD 및 T-N 제거율 모두 감소하는 경향을 나타내었으나, T-N 제거율이 BOD 제거율보다 부하율 변화에 따른 영향이 더 큰 것으로 나타났다.
2. 내부 반송율의 증가가 BOD 및 T-N 제거율에 거의 영향을 미치지 못했다.
3. 유입수 분배율의 증가가 BOD 제거율에는 거의 영향을 주지 못했으나, T-N 제거효율은 유입 유량 분배율의 영향이 큰 것으로 나타났는데, 유입 유량 분배율 30%에서는 T-N 제거율이 약 84.5%까지 증가하였다.
4. 유입수 분배를 하지 않은 경우에는 제 2 무산소조로 유입되는 BOD/N비가 2.51~2.72로 거의 일정한 것으로 나타났으나, 유입 유량 분배율을 20, 30 및 35%로 증가시킨 경우에는 BOD/N비가 3.65~4.37로 증가함에 따라 제 2 무산소조에서의 탈질 가용 탄소원의 증가에 의한 -N 제거율의 증가가 일어났다.
5. 무산소-RBC-무산소-RBC 공정에서 적당한 유입수 분배가 탈질 효율을 증가시킬 수 있으나, 제 2 반응조로의 과도한 유입수 분배는 오히려 탈질 효율을 감소시키는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. U. S. EPA : Manual; Nitrogen Control, EPA/625/R-93/010, 1993.
2. Bachelor, B. : Kinetic analysis of alternative configurations for single-sludge nitrification/denitrification, *Wat. Poll. Cont. Fed.*, **54**, 1492-1504, 1982.
3. Toshihled, M., Tetsuo, T. and Tenichi, M. : Nitrification-denitrification operation in a full-scale plant Utilization of step-feed and return sludge storage tank, 28th Annual Conference of Japan Sewage Work Association, 505-507, 1991.
4. Hiroshi I., Hidero E., Junko I. and Hirouki W. : Some problems of denitrification-dephosphorus operation in full-scale plant, 28th Annual Conference of Japan Sewage Work Association, 529-531, 1990.
5. Fujii, S. and Boonyarat, F. : Characteristics of ammonium removal in A/O process, The 2nd Ku-Kaist-Nut Tri-Lateral Seminar/Workshop on Environmental & Sanitary engineering, 219-222, 1993.
6. 박영규, 이철희, 이병대 : 내부순환을 포함한 Anoxic-oxic-anoxic-oxic 공정에서 질소제거를 위한 이론적 고찰. *대한환경공학회지*, **17(9)**, 873-885, 1995.
7. Nijhof, M. and Bovendeur, J. : Fixed film nitrification characteristics in sea water recirculation fish culture systems. *J. Aquaculture*, **87**, 1990.
8. Rogers, G. L. and Klemetson, S. L. : Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilter. *Aquacultural Engineering*, **4**, 135-154, 1985.
9. 남궁 완 : 회전 원판을 이용한 고농도 암모니아 폐수 처리 가능성. *대한상하수도 학회지*, **4(1)**, 35-42, 1990.
10. 서형석, 유성호 : 군용 시설물 폐수 처리를 위한 고정 생물막 공법의 연구. *대한상하수도 학회지*, **7(1)**, 37-43, 1993.
11. 이석모, 김도희, 송교욱 : 순환여과식 양식장의 암모니아 제거를 위한 최적 수리학적 부하. *한국수산학회지*, **25(3)**, 176-180, 1992.
12. 장영진, 유성규 : 순환여과 사육시스템에 의한 해산어류의 고밀도 양식가능성. *한국양식학회지*, **1(1)**, 13-24, 1988.
13. 환경부 : 수질오염공정시험방법. 동화기술, 1998.
14. 배재호, 김상근, 장현식, 이동욱 : 매립지 침출수의 암모니아성 질소 및 유기물질 제거-III. COD/N비가 탈질에 미치는 영향 및 질소 제거효율. *대한환경공학회지*, **21(1)**, 159-169, 1999.
15. 윤조희, 이상훈 : A₂O 공정을 이용한 고정생물막법에서 C/Nql 변화에 따른 유기물과 질소 제거 특성. *대한환경공학회지*, **21(6)**, 1037-1045, 1999.
16. 차수길 : Cellulose triacetate 포괄 고정화 담체를 이용한 고도하수처리. *부경대학교 대학원 박사학위논문*, 2003.