

다단층 부착성장 공법(A²/O형)에서 순환비에 따른 질소제거

최규철 · 윤용수* · 정일현*

원광보건전문대학 환경공학과 · *단국대학교 화학공학과

Nitrogen Removal in the Multi-stage Bed Attached Growth Process of A²/O System with Interanal Recycle Ratio.

Kyu-Chul Choi · Yong-Soo Yoon* · Il-Hyun jung*

Dept. of env. ind., Wonkwang Health College. · *Dept. of Chem. Eng., Dankook University.

Abstract

The process which can stabilize water quality of treatment and improve nitrogen removal rate under the condition of high organic loading was developed by charging fibrous HBC media to single sludge nitrification-denitrification process. This process was operated easier, minimized the treatment cost, and shortend the retention time. To improve T-N removal rate, a part of nitrifying liquid at aerobic zone was recycled to anoxic zone by approximate internal recycle ratio. The experimental results are as follows: T-N removal efficiency in the organic volumetric loading 0.14~0.19 kgCOD/m³·d was obtained asmaximum of 85% at internal recycle ratio 2.5 and in more ratio than this it was decreased. Organic removal efficiency was about 91% under the overall experimental conditons and not influenced by recycle ratio.

I. 서론

수질오염원은 대부분 유기물과 부유물질이나 호소, 저수지 그리고 연안 등 정체수역에서는 영양염류인 질소·인 등의 과다 유입으로 부영양화 현상과 적조로 수질 악화가 가속되고 있다. 그러나 W. Lange^{1,2)} 등 많은 연구자들의 연구에 따르면 조류 증식은 인보다는 질소가 더 영향을 주며 빈영양화는 인이 많아도 총질소가 0.2 mg/ℓ 이하이면 부영양화 현상이 발생하지 않는다고 보고하였다. 또한 질소·인의 환경기준 및 배출 허용기준이 제정

됨으로써 유기물 제거는 물론 이들 영양염류를 동시에 제거하는 공정이 요구되고 있는데, 최근 주목을 받는 것이 혐기성조와 호기성조를 조합한 생물막 처리법이다. 질소와 인을 동시에 처리 할 수 있는 대표적인 공법인 A²/O (Anaerobic/anoxic/oxic)시스템^{3,4)}은 질소처리효율이 높으면 인의 제거율이 낮고, 질산화균의 증식속도가 느리기 때문에 질소제거효율을 높이기 위해 긴 체류시간이 필요하고 슬러지 처리에 많은 비용이 소요되는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 공정과 부유성장식인 A²/O공정의 단점을 보완하기 위하여 단일 슬러지 혼합처리공정에 섬유상 레이스형 HBC (Hanging Biological Contactor) 매체를 이용한 고정상의 생물막법을 도입하여 표면적을 증가시킴으로써 부유·부착에 의해 증식속도가 느린 질산화균등의 유실을 방지하였으며 각단을 정류판으로 구분하므로써 기체발생으로 생기는 슬러지부상을 완화시켰다. 유기탄소원으로 메탄올을 사용하지 않고 폐수 중의 유기탄소원을 사용하는 단일탑형 다단층 부착성장(Multi-stage bed attached growth system) 반응기를 설계·제작하여 하나의 반응기에서 탄소산화와 질산화 및 탈질화를 효율적으로 수행하기 위한 최적 내부 순환비와 각 단계별로 유기물 및 질소세거울, 탈질율, 그리고 준협기성조에서 ORP에 따른 탈질영향을 고찰하고자 한다.

II. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 내경 100mm, 높이 2,000mm의 아크릴 원통으로 제작한 주 반응조와 외부폭기조, 공기공급장치, 침전조 등으로 구성되어 있다. 주 반응조 15.7ℓ를 8단으로 구분하여 맨 아래 1, 2단의 3ℓ를 혐기성조로, 그 위 3, 4단 3.5ℓ를 준협기성조로, 나머지 5단에서 8단까지의 9.2ℓ를 호기성조로 구성하기 위하여 정류판(baffle plate)으로 구분하였다. 또한 유기물 부하가 높은 경우 질산화가 일어나기 위해서는 BOD 용적부하를 낮추어야 하므로, 호기성 생물막 반응조를 상단으로 갈수록 용적을 작게 4단계(5단 3.7ℓ, 6단 2.7ℓ, 그리고 7단과 8단은 1.4ℓ)로 세분하여 BOD 부하율을 저하시키면서 충진한 HBC media에 Nitrosomonas 균 등의 부착으로 질산화가 촉진되도록 하였다. 고정생물막에 잠입하는 접촉매체 HBC 재질은 polyvinylidene chloride와 acryl fiber 복합사로 50여개 미세한 filament 속으로 된 것을 사용하였다. 이 매체는 1m당 9,500개의 loop형 ring lace로 되어 있어 플라스틱 판형 매체보다는 공간점유율이 낮고 생물접촉면적과 공극율이 월등히 커 미생물의 부착성이나 통기성이 우수하여 박리나 탈락이 적다.^{5,6)}

그 외 폐수 유입과 혼합 질산화액 공급을 위해 액상유량계(Tokyo Keiso Co.)와 정량 펌프(Johnsam Co.) 및 자

Table 1. The composition of synthetic wastewater

Component	Concentration (g/l)	Component	Concentration (g/l)
Peptone	0.35~1.4	CaCl ₂	0.015
Beef extract	0.23~1.07	MgSO ₄	0.012
Urea	0.059~0.30	K ₂ HPO ₄	0.935 (variable)
NaCl	0.059	KH ₂ PO ₄	0.117 (variable)
KCl	0.015	NaHCO ₃	some supply
		tap water	water 1.0

동 타입 스위치(National, Japan Co.)을 통하여 on-off로 일정량을 공급되도록 하였으며, 동절기에는 스팀과 항온조를 설치하여 반응조의 항온(20℃)을 유지하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용한 합성폐수의 조성은 펩톤, 육 액기스 등 유기물을 주체로 하고 질소원으로 요소, 인산원으로 인산이수소칼륨 등을 사용하였다. 탄소화합물과 질소, 인 등의 화합물은 미생물의 생장에 필요한 영양염이 포함된 것으로 Table 1과 같다. 유입수의 pH는 7.0, COD_{Cr} 농도는 560mg/l, SS 235mg/l, T-N 86mg/l, NH₄-N 농도 50mg/l로 하였다. 합성폐수의 부패를 방지하기 위하여 아래의 성분을 적량의 물에 녹여 분해병에 넣어 120℃에서 30분간 고압증기멸균시킨 후 물 1ℓ에 용해시켜 시료로 사용하였다.

하·폐수 유입량은 36ℓ/d를 기본으로 하고 유입율을 12~48ℓ/d범위에서 내부순환비는 1~3Q, 전체 부피는 20.7ℓ(주 반응조 15.7ℓ + 외부 폭기조 5ℓ), HRT는 10.8hr로 혐기성조와 호기성조에서 각각 3.3과 7.5시간으로 분할하였다. 또한 탈질조와 질산화조의 부피비는 1 : 2, 고형물 체류시간은 10, 19, 30일 등으로 변화시켰고, 슬러지 반송비(RAS ratio)는 0.5Q로 하였다. 특히 호기성조에서 준협기성조로 내부 순환비에 따라 T-N제거 및 탈질에 어떠한 영향을 미치는가를 검토하였다. 그리고 운전 조건은 Table 2와 같다.

3. 분석방법

합성폐수의 성장과 실험조건에 따른 pH, 온도, DO, COD_{Cr}, SS, NH₄-N, NO₃-N 등의 분석은 수질오염공정

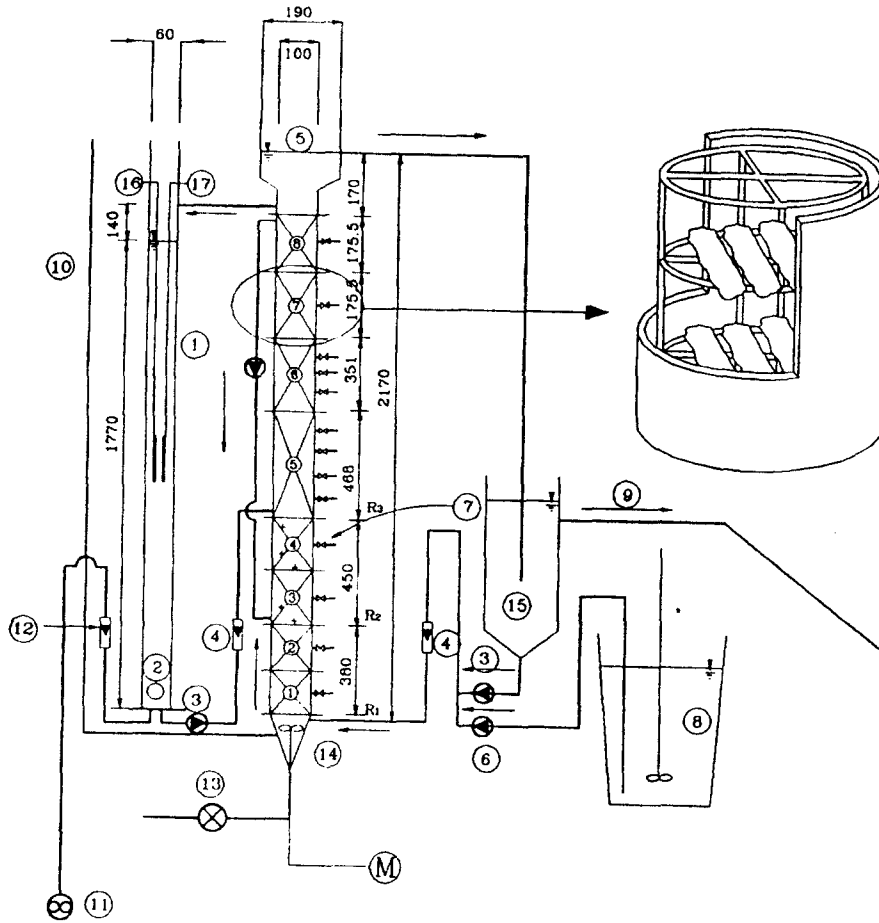


Fig. 1. Schematic diagram of multi-stage fixed biofilm reactor.

- | | | |
|------------------------|---------------------|---------------------|
| R1 : anaerobic reactor | R2 : anoxic reactor | R3 : oxic reactor |
| 1 : aeration tank | 2 : air diffuser | 3 : recycle pump |
| 4 : flow meter | 5 : retention tank | 6 : feeding pump |
| 7 : sampling port | 8 : feed tank | 9 : effluent |
| 10 : manometer | 11 : aerator | 12 : air flow meter |
| 13 : back wash sludge | 14 : distributor | 15 : settling tank |
| 16 : DO | 17 : pH | |

Table 2. Operation conditions of HBC biofilm process

Parameter	Condition
HBC ring loading	8~12 g/m
CODcr loading rate	0.14~0.65 kgCOD/m ³ ·d
(CODcr + SS) loading	1.4~1.9 kgCOD/m ³ ·d
(T-N+SS) loading	0.59~0.73 kgT-N/m ³ ·d
Surface loading rate	6.1 m ³ /m ² ·d
Air flow rate	0.2~0.5 ℓ/min

시험법⁷⁾과 Standard Methods⁸⁾에 준하여 분석하였다. pH는 유리전극의 pH meter (Orion Co., Model 920A)로, 포기조의 DO 측정용 용존산소계(YSI Co., Model 57)로, 흡광도계는 UV-visible spectrophotometer(Shimadzu Co., Model 1601)를 그리고 혐기성조의 ORP는 Redox/ORP 전극(Orion Co., Model 96-78)을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 각 반응조에서 순환비에 따른 질소 농도

1.1 T-N 농도 변화

내부 순환비에 따라 총질소 농도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 유기물 부하 0.14~0.19 kgCOD/m³·d, COD/T-N 비 6.4, 외부반송 (RAS) 0.5Q, pH 7.5, 온도 30℃ 일 때 내부 순환비를 0, 1Q, 2Q, 2.5Q 그리고 3Q로 변화시키면서 각단에서의 T-N 농도를 측정 한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에 보인 것처럼 질산화 혼합액을 준 혐기성조에 반송하지 않은 경우 유출수 T-N 제거율이 57.6%에 불과하였으나 내부순환비가 기질수를 처리 효율이 증가하여 2.5Q에서 85%(13mg/l)의 제거율을 나타내었다. 그러나 순환비가 3Q 일 경우 78%(19mg/l)로 2.5Q에서 보다 제거율이 감소되었다. 결과적으로 순환비 3Q 이상에서는 준 혐기성 생물막조에 반송된 질산화 혼합액의 DO 농도가 높아져 오히려 탈질반응을 저해하는 것으로 사료되며, 또한 T-N 감소율은 NO_x-N의 탈질을 의하여 결정되는데 이것은 순환비에 따라 탈질조에 순환된 NO_x-N 양과 수소공여체로 유입구에서 공급되는 폐수중의 유기탄소원의 양의 비가 적정비를 이룰때 최대의 제거율을 얻게 된다.

Wang⁹⁾의 섬유상 침적생물막법에 의한 질소제거에서 유입 NH₄⁺-N 농도는 36.54mg/l, COD는 500mg/l보다 적은 가정하수를 A/O 분리 시스템으로 처리한 경우 T-N 제거율은 1.5배의 순환비에서 79.5%로 최대제거율을 얻었고 2.0 배일 때 T-N 제거율이 69.7%로 오히려 감소하는 것으로 보고되었다.

또한 平山¹⁰⁾은 플라스틱 여재를 사용한 고정상 2단식 순환탈질법으로 BOD 평균 농도 189mg/l (COD_{Mn} 102 mg/l), T-N 농도 46.3mg/l 의 인공폐수를 실험한 결과 순환비 200%에서 최고 75%의 제거율을 얻었으나 그 이상에서는 저하되어 본 결과와 유사하였다.

1.2 NH₄⁺-N 농도 변화

유기물 부하 0.14~0.19 kgCOD/m³·d, pH 7.6, 온도 30℃, COD/T-N 6.4인 합성폐수를 외부 반송율 0.5Q로 하고 내부 순환비를 0 (DO : 3.5 mg/l), 1Q (DO : 2.5 mg/l), 2Q (DO : 2.5 mg/l), 2.5Q (DO : 3.0 mg/l) 그리고 3Q (DO : 1.87 mg/l)인 조건에서 NH₄⁺-N 경향을 Fig. 3에 나타내었다.

혐기성 생물막조인 1, 2단에서는 유기성 질소가 Clostridium

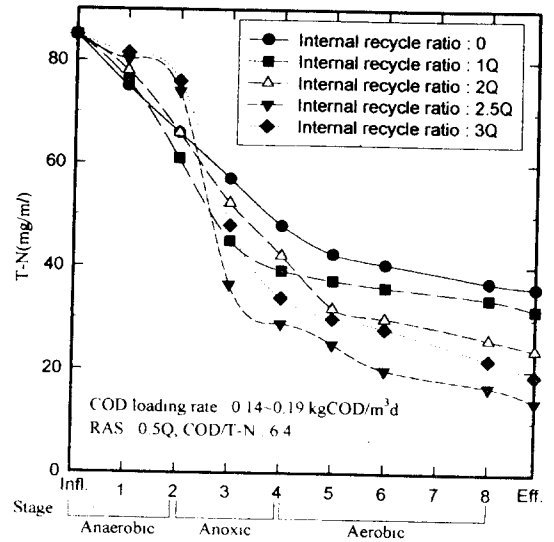


Fig. 2. The variation of T-N concentration according to internal recycle ratio in each reactor zone

등에 의하여 NH₄⁺-N로 분해되기 때문에¹¹⁾ 농도가 상승 경향이 있는 반면에 세포합성으로 감소되기도 한다. 또한 0.5mg/l 정도의 용존산소가 존재하여도 질산화가 일어나기¹²⁾ 때문에 비교적 급한 경사를 나타내기도 한다. 즉 탈질조인 3, 4단에서는 8단에서 3단에 반송되는 혼합 질산화액을 수소 수용체로 하고 유입구인 혐기성조에서 유입된 폐수중의 유기탄소원을 수소 공여체로 하여 Pseudomonas 등에 의하여 탈질되기 때문에 암모늄의 감소율이 크다. 4단은 아래 혐기성 혼합액과 외부 포기조에서 공급되는 포기액이 혼합되는 경계로 주로 탈질이 되나 질산화도 동시에 일어난다.

8단 호기성조에서 탈질조 3단에 0, 1Q, 2Q, 2.5Q로 순환하므로써 전 공정에 대한 암모니아성 질소 감소율은 84, 86, 94, 97.6%으로 증가되었으나, DO 농도가 1.87mg/l 이고 내부 순환비가 3Q일 때는 암모니아성 질소 감소율이 90%이었다.

유기물 부하율이 약간 높은 0.217 kgCOD/m³·d일 때 내부 순환비를 1Q (DO : 1.7mg/l), 1.5Q (DO : 2.5mg/l) 그리고 2.5Q (DO : 2.5mg/l) 로 변화시켰을 때 암모니아성 질소의 감소 경향은 Fig. 4와 같다. 그림에 나타낸 바와같이 DO 농도가 약 1.7mg/l 이고 순환비가 1Q일 때는 감소율이 83%인데 반하여 DO 농도가 2.5mg/l 이고 순환비가 2.5Q인 경우는 감소율이 96%이었다. C/N 비가 거의 일정할 때 암모니아성 질소의 감소율은 유기물 부하율보다 DO 농도의 영향이 큰 것으로 판단된다.

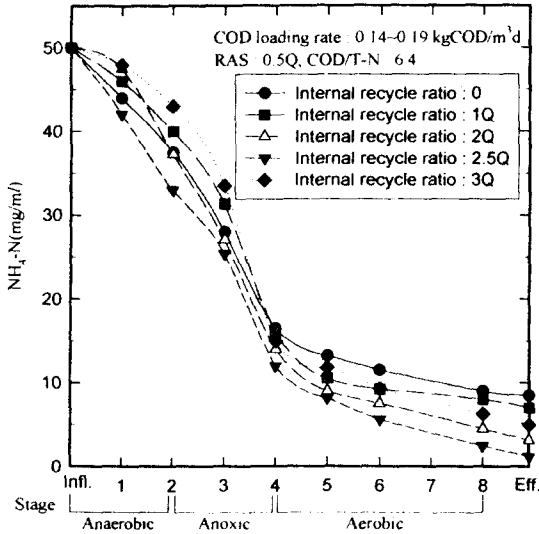


Fig. 3. The variation of NH_4^+-N concentration according to internal recycle ratio in each reactor zone.

1.3 유기물 농도 변화

유기물(CODcr) 제거도 앞의 질소와 같은 조건에서 순환비를 0~3Q까지 변화시키면서 각 반응조의 농도 변화

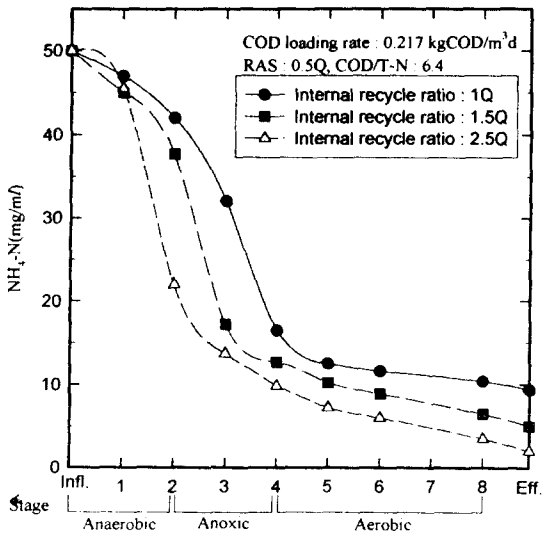


Fig. 4. The variation of NH_4^+-N concentration according to internal recycle ratio in each reactor zone.

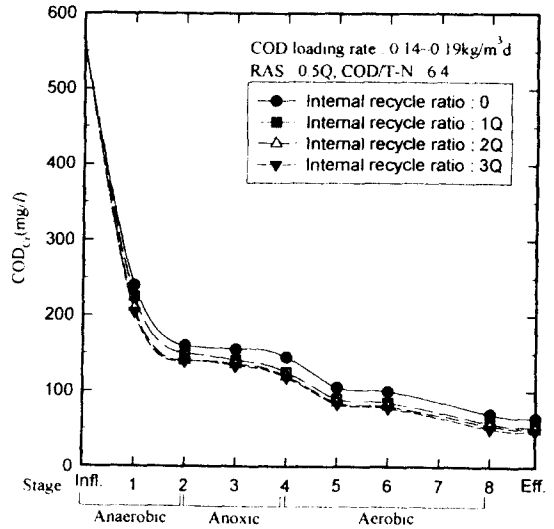


Fig. 5. The variation of COD_{cr} concentration according to internal recycle ratio

를 측정하였다. 외부반송(RAS)과 내부 반송이 없는 경우 유출수에서 유기물 제거율은 평균 85%이었다. Fig. 5에 나타난 바와같이 내부순환비 1Q와 2.5Q에서는 비슷한 제거율을 보였으며, 각 단별로 제거율을 보면 혐기성 2단계에서 61%, 3단계에서 73%로 급격하게 감소되었고 호기성조에서는 완만하게 감소되어 최종 유출수에서 91%의 제거율을 나타내었다. 유기물 제거는 순환비에 큰 영향을 받지 않는다는 결과를 얻었으며, 포기조 공기 공급량을 조절하여 DO 농도가 2.0mg/l 이하일 때는 제거율이 82%로 저조하였다.

1.4 유기물 용적 부하와 NH_4^+-N 농도변화

Fig. 6은 내부 순환을 하지 않을 때와 내부 순환(2.5Q)을 하는 경우에 유기물 부하가 NH_4^+-N 제거에 미치는 영향을 나타내었다. 유기물 용적 부하가 0.14~0.65 $kgCOD/m^3 \cdot d$ 일 때 내부 순환을 하는 경우가 순환하지 않은 경우보다 NH_4^+-N 제거율이 14% 이상 향상되어 각각 97.6%와 78.5%로 나타났다. 유기물 용적 부하가 증가할수록 중속영양미생물이 생물막의 주종을 이루고 질산화균인 독립영양미생물의 증식이 억제되기 때문에 NH_4^+-N 제거율이 낮아지며, 한편 Fig. 3에 표시된바와 같이 순환비를 증가시키면 유기물부하가 지하여 NH_4^+-N 제거효율이 증가된다.

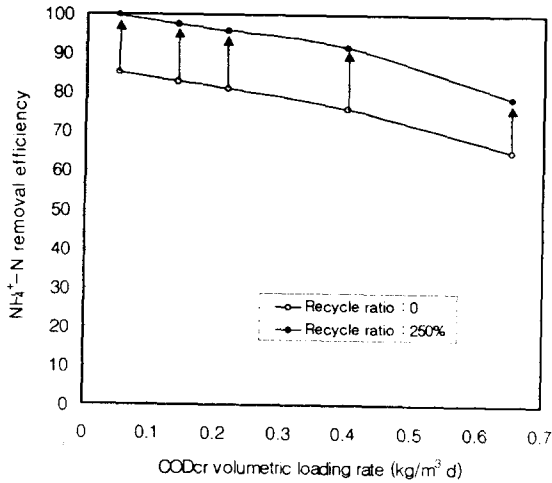


Fig. 6. Effect of COD_{cr} volumetric loading rate on NH₄⁺-N removal

Karnchanawong¹³⁾ 등이 연구한 AGCR (attached-growth circulating reactor)에서는 유기물 부하 0.17~0.21 kgCOD/m³·d에서 79~96%, 0.41~0.49 kgCOD/m³·d에서는 46~68%의 NH₄⁺-N 제거율을 얻었다. 본 시스템의 처리율이 우수한 것은 다단층으로 생물이 부착할 수 있는 표면적을 확대시켜서 유기물이나 암모늄 기질 부하를 낮출 수 있고, 암모늄 산화균이나 아질산 산화균이 증식과 생식할 수 있는 환경이 마련되었기 때문에 본 시스템과 비슷한 AGCR보다 질산화율이 높다.

1.5 탈질소화

수온 30~32°C, 포기조의 DO 농도 2.4~2.5 mg/l, 나머지 조건은 동일한 실험에서 순환비에 따라 각 단별로 NO₃⁻-N 농도 변화를 측정한 결과를 Fig.7에 나타냈다.

탈질을 위한 유기탄소원으로 폐수중의 탄소원을 혐기성 생물막조 하부에서 주입하고 수소수용체로 질산화액을 순환비에 따라 1~3Q의 비로 공급하였다. 외부 포기조에서 호기성 생물막조 5단에 포기액을 일정한 양 순환시켜 COD를 저하하도록 하였다.

탈질조 3단에 순환비에 따라 NO₃⁻-N 농도 5.4~24.5mg/l이 4단에서 감소되어 3Q 순환비에서 51%, 2Q와 2.5Q일 때 유출수의 NO₃⁻-N 감소율이 약 70%로 되어 순환비가 높아질수록 탈질율이 저하되었다. 탈질은 중속영양 세균에 속하는 혐기성 세균이 수소공여체인 유기탄소원과 수소수용체인 NO_x⁻-N의 비가 적정을 이룰 때 탈질세

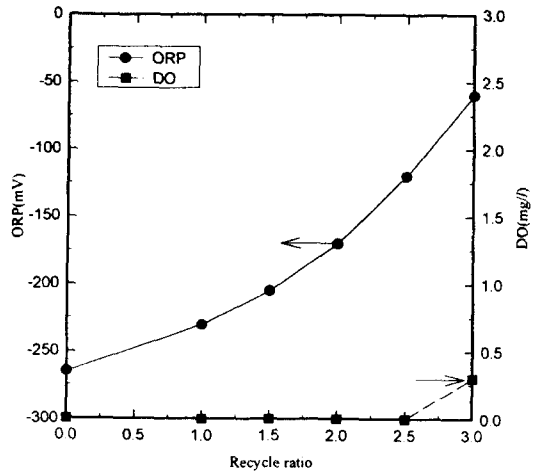


Fig. 7. The variation of NO₃⁻-N Concentration according to internal recycle ratio.

균의 대사활동이 원활하여 탈질이 향상된 것으로 생각된다. 한편 순환비가 2.5Q 이상으로 높아도 탈질세균의 대사활동이 저하되어 탈질율이 감소되었다. Wang¹¹⁾의 침지 생물막법에서 순환비가 200%이상 증가하면 탈질이 억제된다는 보고가 있고, Jimenez¹⁴⁾ 등은 분리식 침지여상을

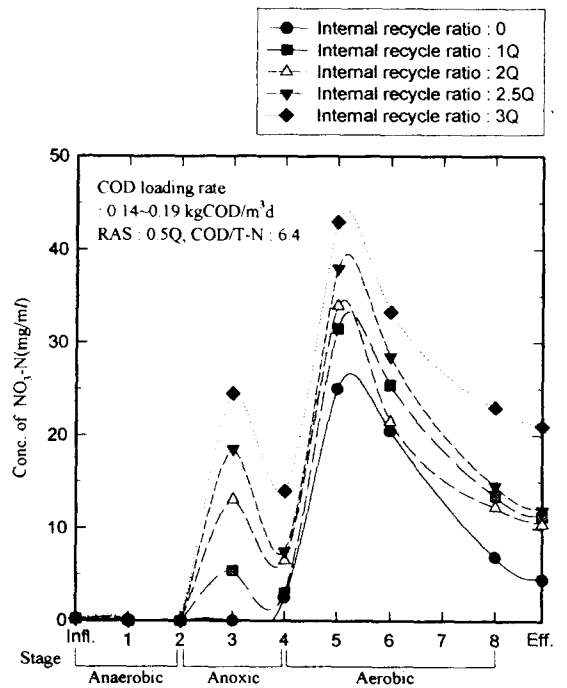


Fig. 8. Relationship of ORP, DO and internal recycle ratio in anoxic biofilm zone.

이용한 질산화·탈질공정에서 2.5Q의 순환비로 체류시간에 따라 90% 이상의 탈질율이 이루어진 것으로 보고하였는데, 본 연구와 거의 일치하였다. 본 실험장치와는 달리 분리식 공정에서는 서로 다른 환경조건을 유지시켜 줄 수 있기 때문에 단일 슬러지 방식보다 처리효율을 높일 수 있는 장점이 있다.

1.6 준협기성조에서 ORP 변화와 탈질능

준협기성 생물막조에서 탈질속도는 ORP와 밀접한 관계에 있고 또 DO는 ORP의 중요 영향인자이다. 준협기성 생물막조에서 탈질속도를 고찰하기 위하여 내부순환비에 따라 ORP 변화를 Fig. 8에 나타냈다.

순환비가 1~2.5Q범위내에서는 준협기성조내에 DO는 존재하지 않았으나 3Q에서는 0.1~0.3mg/l 정도로 나타났다. 그런데, ORP는 용존산소가 없는 조건하에서 산화환원상태의 정도를 알 수 있는 중요한 지표로 사용된다.

본 공법인 준협기성 생물막조에서는 순환비가 없을 때 ORP가 -260 ~ -270 mV인데 순환비 1Q, 2Q, 2.5Q 그리고 3Q로 변화함에 따라 ORP는 평균 -230mV, -170mV, -120mV 그리고 -60mV로 나타났다. 즉, 순환비가 높아짐에 따라 ORP는 상승하는 경향을 보였다. 이것은 탈질을 효과적으로 높이기 위해서는 ORP가 대단히 중요함을 의미한다.

이와같이 준협기성 생물막조에서 탈질속도는 ORP와 밀접한 관계에 있으므로 순환비가 2.5Q일 때 -120 mV 부근을 나타내어 최고의 탈질이 이루어지는 것으로 확인된다. 渡辺¹⁵⁾은 탈질을 위해서 최적의 ORP가 -100 ~ -200 mV 부근인 것으로 보고하였고 稻森悠平¹⁶⁾은 혐기·호기여상법에서 순환비 2인 조건에서 ORP -125mV에서 최적의 탈질을 보였다. 본 연구도 이에 거의 일치하고 있는 것으로 나타났으며, 이 최적값은 호기성 생물막조에서 ORP가 높은 혼합 질산화역이 준협기성 생물막조 3단에 반송하였기 때문에 생화학적으로 탈질을 높이는 최적의 산화·환원전위값이 형성된 것으로 생각된다. 이것은 앞에서 실험결과 Fig. 6, 7에 나타낸 바와같이 순환비 2.5Q일 때 질소제거율이 최대인 것과 일치한다.

IV. 결 론

고부하 조건에서 처리 수질을 안정화하고 제거효율을 향상시킬 수 있는 공정으로 단일슬러지 질산화-탈질공정에 섬유상 HBC 매체를 충전하여 A²/O 시스템 방식을

다단층식 고정생물막으로 수정 운전 함으로써 증식속도가 느린 질산화균의 유실을 막고 생장을 유지할수 있으므로 질산화율을 높일 수 있다. 단일탑형 다단층 부착성장식 공법을 이용한 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유기물 용적부하 0.14~0.19 kgCOD/m³·d 에서 내부순환비 2.5일 때 85%의 T-N제거율을 얻을 수 있었고 이 이상의 순환비에서는 낮아졌으며 유기물(COD) 제거율은 순환비에 거의 영향을 받지 않았으며 91%의 처리효율을 얻었다.
2. 유기물 용적부하 0.14 kgCOD/m³·d 에서 NH₄-N는 97.6%, 0.65 kgCOD/m³·d 에서는 78.5%로 감소되었으며 다른 연구보다는 10% 이상 처리율이 높게 나타났다.
3. 유기물 용적부하 0.14~0.65kgCOD/m³·d에서 내부순환비를 2.5Q로 순환한 때가 순환하지 않을 때 보다 NH₄-N 제거율이 약 14%향상되었으나, 내부순환비는 탈질에 더욱 영향을 미치어 T-N 제거율은 27% 이상 향상되었다.
4. 순환비에 따른 탈질은 순환비가 2.5Q일 때 ORP가 -120mV 부근을 나타내어 최적 탈질을 보였으며, 이 이상 순환비가 증가하면 ORP가 높아져 탈질율이 저하된다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 원광보건전문대학 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Willy Lange : Limiting Nutrient Elements in Filtered Lake Eri Water, Water Reasearch Vol 5, 1031, 1971.
2. 遠矢泰典 : 窒素除去 目的とした新しい 下水處理技術, 837, 1985.
3. Alberson, O.E : The control of bulking sludges, From the early innovators to current practice, Jour. WPCF, Vol. 59, 172, April, 1987.
4. 須藤隆一 外 7 : 微生物 固定化法による 排水處

- 理, 産業用水調査會, 2-31, 1993.
5. Weston, Roy F. Inc : Advanced Waste-water Treatment Performance Summary Report. USEPA Contract No. 68-03-3019, 1984.
 6. 金亨泰 : 懸垂微生物 接觸法(HBC)에 의한 生活汚水の 處理效果, 韓國技術士 會誌, 第 21卷 第 2號, 1988.
 7. 崔圭喆 : 水質汚染公定試驗法註解, 東和技術, 1994.
 8. Standard Methods for the Examination and Wastewater, APHA, AWWA, WPCF, 18th Ed. Franson, M.A.H. (Ed), 1992.
 9. B. Wang, G.L., etc : Nitrogen removal by a submerged Biofilm Process with fibrous carriers, Wat. Sci. Tech, Vol 26, No. 9-11, 2039-2042, 1992.
 10. 平山照康 : 固定床2段式循環脫窒法 による 生活排水かるの窒素除去, 用水の廢水, Vol. 30, No. 2, 127-132, 1988.
 11. 都留信也 : 環境と微生物, 共立出版, 35-36, 1979
 12. Mccarty, P.L. : Themodynamics of Bio logical Synthesis and Growth. Proceedings of the 11th Int. Conf. on Water Poll. Res, 169-199, Tokyo, Japan. 1964.
 13. Kamchanawong s. & Polprasert C : Organic carbon and Nitrogen Removal in Attached-Growth Circulating Reactor, Wat. Sci. Tech., Vol. 22, No. 314, 179-186, 1990.
 14. Jimenez, B., Capdeville, B., Rogues, H. and Faup, G.M : Design considerations for a nitrification-denitrification process using two fixed-bed reactors in series, Water Sci. Tech. Vol. 19, 139-150, 1987.
 15. 渡辺昭二, 馬場研二, 野北舜介 : 生物學的 脫窒素プロセスのための管理指標の實驗的 檢討, 下水道協會誌, 120 (10), 66-75, 1984.
 16. 稻森悠平, 谷野充, 須藤隆一 : 嫌氣·好氣 濾床法の淨化特性に及ばず循環比の影響, 下水道協會誌, Vol. 22, No. 255, 23-32, 1985.