

論 文

고정화 질산균, 탈질균을 이용한 합성폐수의 처리 특성

Treatment Characteristics of Synthetic Wastewater using Immobilized Nitrobacteria, Denitrobacteria

원찬희 · 허영덕 · 윤재성

Chan-Hee Won · Young-Duck Heo · Jae-Seong Yun

Abstract

The objectives of this study were to find out the optimum treatment conditions for removing nitrogen in a synthetic wastewater by using microorganisms immobilized with a PVA-Freezing method. The samples used as influents to the laboratory scale treatment units were a synthetic wastewater.

The experiments in this study were mainly directed to collect the data of nitrogen and organic matter removal efficiencies for the different hydraulic and internal recycle rates conditions, temperature and influent C/N ratios.

The removal efficiencies of nitrogen and organic matters were investigated for the operating conditions of HRT 2~12hours, internal recycle rates 50~400%, temperatures 15~30°C and C/N ratios 2.5~7.5.

The adequate internal recycle rate for removing T-N and BOD₅ in the synthetic wastewater was found to be about 300% at the temperature of 30°C when the ratio of carbon contents to the nitrogen (C/N) in the influent was around 5.5. Under these conditions, the final effluent concentrations of T-N and BOD₅ were 8.7 and 8.4 mg/l, respectively.

1. 서 론

합류식인 우리나라의 하수도관기형태에서 우수를 배제한 오수만을 처리하는 분류식으로 배제방식이 변해갈 것을 예상하였을 때 정화조유출수에서 유래되는 질소성분의 농도가 높아 큰 영향을 미치게 될 것이다.

하수 중 질소성분은 연근해나 호소에 유입되어 조류의 번식을 촉진하고 부영양화 및 적조를 일으켜 수생생태계에 악영향을 끼치며 또한, 수중에서 암모니아 형태로 존재하는 질소성분은 질산화 반응을 일으키는 동안에 상당량의 산소를 요구하므로 수중용존산소를 고갈시키고¹⁾ 유리암모니아는 수생생물에 유독성을 일으킨다.

하·폐수 중 질소를 제거하는 방법으로는 물리화학적처리법과 생물학적 처리법이 있다. 물

리화학적 처리법으로는 암모니아 Stripping법이 나 불연속전염소 처리법이 있으나 암모니아성 질소 제거가 주이며 다른형태의 질소는 거의 제거되지 않는다. 2)

생물학적처리법으로는 A/O system, pho-strip, Bardenpho process, 활성슬러지순환변법 등이 있다. 모든 생물학적처리법에 있어서는 암모니아성 질소를 질산화균에 의해 아질산성 질소, 질산성 질소로 질산화하며 탈질균에 의해 질산성 질소를 질소가스로 탈질처리를 행하고 있다.

이러한 처리방법들은 잉여슬러지가 다량 발생하며 슬러지반송이 필요하고 또 질산화균의 질산화속도가 유기물 분해속도에 비해 저온시에 특히 저하되기때문에 유기물의 처리와 비교해서 두배이상의 처리시간을 필요로 하고 있어 보다 효율이 좋은 제거기술의 개발이 요구되고 있다. 2)

본 연구에서는 관행 활성슬러지법의 유출수 중에는 질소가 미처리된 상태로 존재하여 하천에 방류되는 경우 수질오염의 원인이 되므로 관행 활성슬러지법의 단점을 보완하면서 가장 효율적인 방법을 도입하고자 고분자재료로 질산화균, 탈질균을 인공적으로 고정화하는 biotechnology의 고정화 기술을 이용해서 생물처리계안에 특수한 기능을 할 수 있도록 질산화균, 탈질균을 고정화 시켜서 배수처리에 적용하였다. 이 방법은 기존의 생물처리법에 비해서 미생물과 처리수분리가 용이하고, 미생물 농도를 훨씬 높이는 것이 가능하며, 유용 세균이 씻겨나가는 것을 방지하며, 잉여오니발생량이 감량되는등 여러가지 잇점을 가지고 있어 활성슬러지법의 단점을 보완할 수 있다.

본 연구의 목적은 정화조 유출수성분과 유사하게 합성폐수를 시료로 조제하고 PVA-냉동법을 이용하여 고정화한 탈질균, 질산균을 활성슬러지순환변법의 탈질조와 질산조에 투입하고 체류시간, 온도, 내부순환율등의 영향인자들을 변화시키면서 질소, BOD제거실험을 실시하여 적정조건을 규명하고 질소, BOD 동시 제거에 대한 효율을 규명하여 기존의 하수처리장에 적

용할 수 있는 새로운 BOD, 질소 동시 제거시설 설계의 기초자료를 마련하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험에 사용된 장치는 그림 1과 같이 탈질조와 질산조의 두개의 반응조로 이루어졌으며 탈질조는 내경 80mm, 높이 450mm인 용적 2.0l, 질산조는 총용적 3l인 air-lift 반응조로 투명한 아크릴원통을 사용하여 제작하였다.

두 반응조는 항온을 유지시키기 위해 항온조 안에 설치하였다. 유입폐수는 Master Flex Tubing Pump에 의해서 연속적으로 탈질조에 유입되고, 탈질조 유출수는 자연유하식으로 질산조로 유입되며 질산조 유출수중 일부는 Master Flex Tubing Pump를 사용하여 탈질조로 내부 순환시켰다.

탈질조는 생성되는 질소가스등을 탈기시키고 또한 고정화 탈질균과 폐수의 접촉이 용이하도록 Magnetic Stirrer를 사용하여 완속교반 하였으며 탈기되는 질소가스등이 배출되도록 상부에 배출구를 만들었다. 질산조는 조내 DO농도를 3~4mg/l로 유지하기 위해 포기기를 사용하여 공기를 공급하고 공기의 상승력으로 Pellets을 연속적으로 유동시켰다.

2.2. 실험재료

2.2.1. 질산균, 탈질균

고정화하기 위한 미생물은 J시 하수처리장의

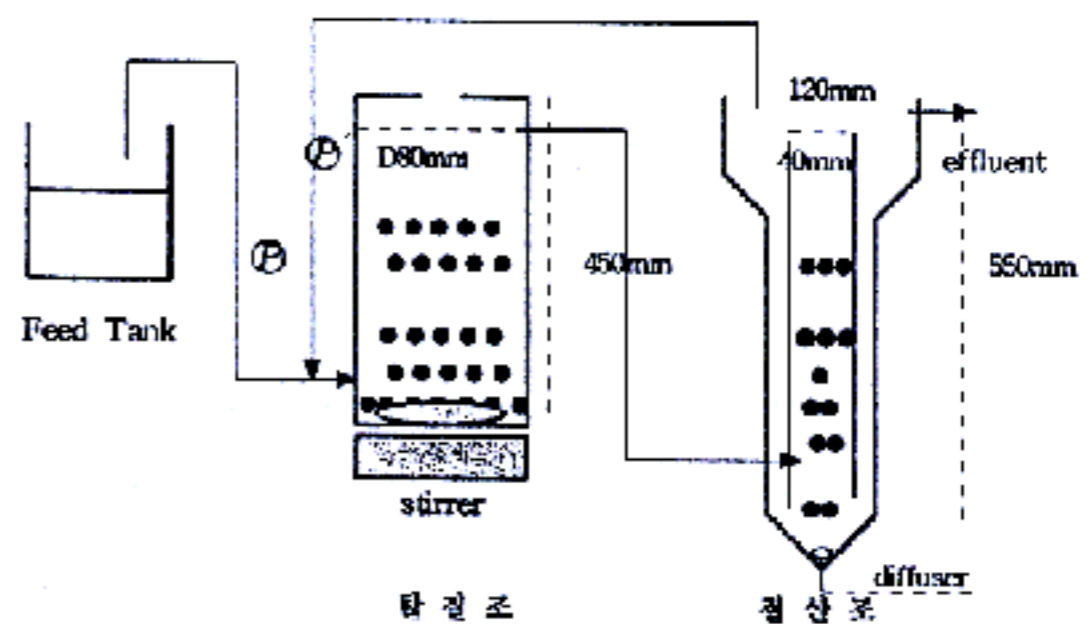


그림 1. 실험장치

표 1. 탈질균과 질산균 배양액의 조성

Components	Concentration (mg/l)	Components	Concentration (mg/l)
KNO ₃	80.0	NH ₄ Cl	76.4
CH ₃ OH	171.0	NaHCO ₃	234
FeCl ₃ ·6H ₂ O	2.0	Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	23.1
CuSO ₄ ·5H ₂ O	2.0	NaCl	10.4
MgSO ₄ ·7H ₂ O	2.0	KCl	4.7
KH ₂ ·PO ₄	5.0	CaCl ₂ ·2H ₂ O	4.7
		MgSO ₄ ·7H ₂ O	16.7

표 2. 합성폐수의 조성 및 특성

Components	Concentration (mg/l)	ITEMS	Concentration (mg/l)
Peptone	122.5	pH	7.8
Beef Extract	80.5	BOD ₅	131.0
Urea	147.5	COD _{Cr}	142.0
NaCl	59.0	Alkalinity	360.0
CaCl ₂	59.0	NH ₄ -N	53.0
KCl	12.0	NO ₃ -N	0.1
MgSO ₄ ·7H ₂ O	35.0	T - N	57.0
KH ₂ PO ₄	35.0	T - P	8.0

반송슬러지를 표 1과 같은 배양액으로 1개월정도 순양시킨후 각각 탈질균과 질산균으로서 고정화에 사용하였다.

2.2.2. 시 료

본 실험에 사용한 시료는 탄소 및 질소원으로서는 펩톤, 육(肉)엑기스 및 요소를 주로 하고 미생물성장에 필요한 화학약품을 정화조 유출수의 수질특성과 비슷하도록 적당한 농도로 조제한 합성폐수로서 그 조성과 수질특성은 표 2와 같다.

2.3. 실험방법

2.3.1. 고정화

본 실험에 사용한 고정화 방법은 PVA-냉동법으로 다음과 같다.

순양된 반송슬러지를 원심분리(3,000RPM, 5분, 2회)에서 농축시킨 농후활성슬러지와 PVA용액(20%)을 중량비 1:1로 잘 혼합한다.

혼합시 PVA용액을 30~40°C에서 혼합하며 기포가 발생치 않도록 주의하고 혼합물을 성형

튜브에 유입하여 -4°C에서 24시간 냉동한다.

냉동에 의해 고정화된 PVA-활성오니의 혼합물을 실온에서 용해한 후 2~3mm간격으로 절단한다. 얻어진 Pellets을 수도수에서 12분간 세정시킨후 실험에 공급한다.

2.3.2. 반응조운전

고정화된 Pellets을 탈질조, 질산조에 각각 충전율 25%로 투입하고 합성폐수를 유입하여 2주일정도 운전한 후 정상상태에 도달하였을 때 수리학적 체류시간(HRT), 내부순환율, 수온, 유입폐수의 C/N비등의 조건을 변화시키면서 질소성분과 유기물질 제거효율에 미치는 영향을 관찰하여 보았다.

2.4. 분석방법

본 연구의 시료분석방법 및 기기는 표 3에 나타내었으며 수질분석은 Standard Method³⁾와 수질오염공정시험법⁴⁾에 준하여 실시하였다.

표 3. 분석방법 및 기기

ITEMS	Analytical Methods and Equipments
pH	pH meter
BOD ₅	Winkler' Azide Modification
COD _{Cr}	K ₂ Cr ₂ O ₇ Reflux Method
T-N	자외선 흡광광도법, 220nm Spectrophotometer
NH ₄ -N	Indo-phenol Method, 640nm Spectrophotometer
NO ₃ -N	Brucine Method, 410nm Spectrophotometer
T - P	Ascorbic Acid Method, 880nm Spectrophotometer

3. 실험결과 및 고찰

3. 1. 수리학적 체류시간 변화에 따른 영향
수리학적 체류시간(HRT)변화에 따른 질소 성분, 유기물제거를 관찰하기 위하여 합성폐수를 사용하여 수온 30°C, 내부순환율 100% C/N비 2.5의 조건에서 HRT를 2~12hrs로 변화시키면서 실험한 결과는 그림 2와 같다. HRT를 2~6hrs로 증가시킴에 따라 T-N제거율은 44.2~66.5%, BOD₅ 제거율은 75.7~90.0%, COD_{Cr} 제거율은 78.9~90.6%로 큰 폭으로 증가하였지만, HRT 6~12hrs의 경우에는 T-N제거율 66.5~72.1%, BOD₅제거율은 90.0~93.4%, COD_{Cr}제거율 90.6~94.1%로 HRT 증가에 따라 제거율이 약간의 증가를 보였다.

그림 2에서 HRT가 클수록 유기물질 제거효율도 높아졌는데 이것은 탈질조로 유입되는 유기물질은 NO₃-N이 탈질하는 과정에서 필요한 전자공여체로 작용하며 이론적으로 1g의 NO₃-

N이 탈질하는데 3.7g의 COD가 소요되므로 HRT가 클수록 질산화과정에서 생성되는 NO₃-N농도가 높아지고 탈질조에서 NO₃-N이 탈질하는 과정에서 전자공여체인 유기물질을 많이 소모하기 때문으로 생각된다.

그림 3은 HRT변화에 따른 유출수중의 질소 성분의 농도를 나타내었는데 HRT가 증가함에 따라 T-N중의 NH₄-N 농도는 감소하지만 NO₃-N농도가 증가함을 알수 있다. 이는 질산조의 HRT가 증가함에 따라 질산화율이 증가하며 탈질조에서 탄소원의 부족으로 효과적인 탈질화를 시키지 못하기 때문이라고 생각된다.

그림 4는 HRT 6hrs일 때 탈질조와 질산조의 HRT를 변화시키면서 질소성분, 유기물질제거에 미치는 영향을 실험한 결과를 나타내었다. 탈질조와 질산조의 HRT가 탈질 2hrs, 질산 4hrs일때 T-N제거율 67.7%, BOD₅제거율 91.1%, COD_{Cr}제거율 92.2%로 가장 좋은 처리효율을 나타내었다.

森直道⁵⁾ 등은 활성슬러지 순환변법을 이용하여 수온20°C, 내부순환율 300%의 조건에서

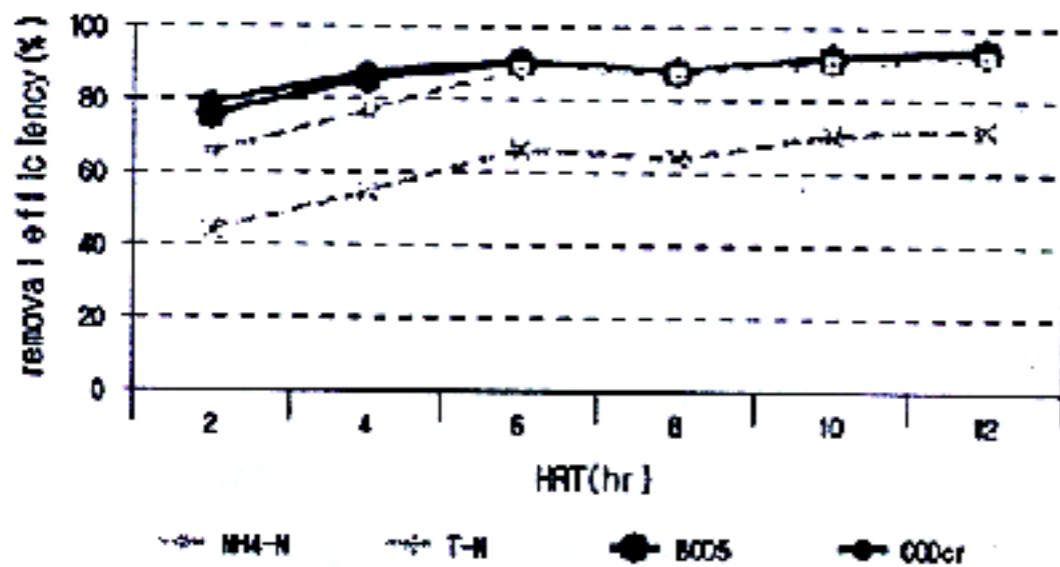


그림 2. 수학적 체류시간변화에 따른 총질소, BOD₅, COD_{Cr} 제거율

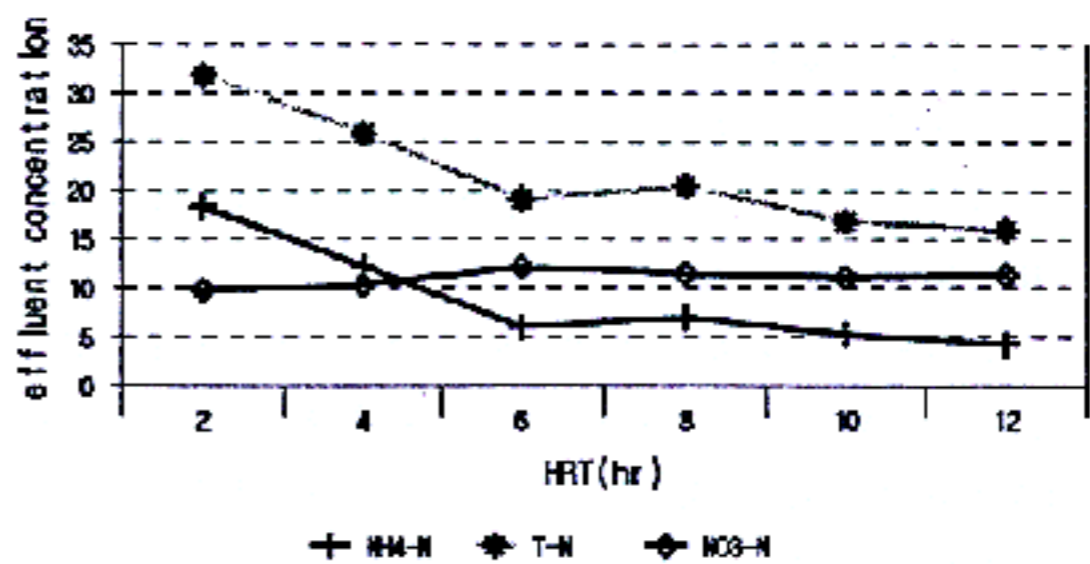


그림 3. 수리학적 체류시간변화에 따른 유출수질

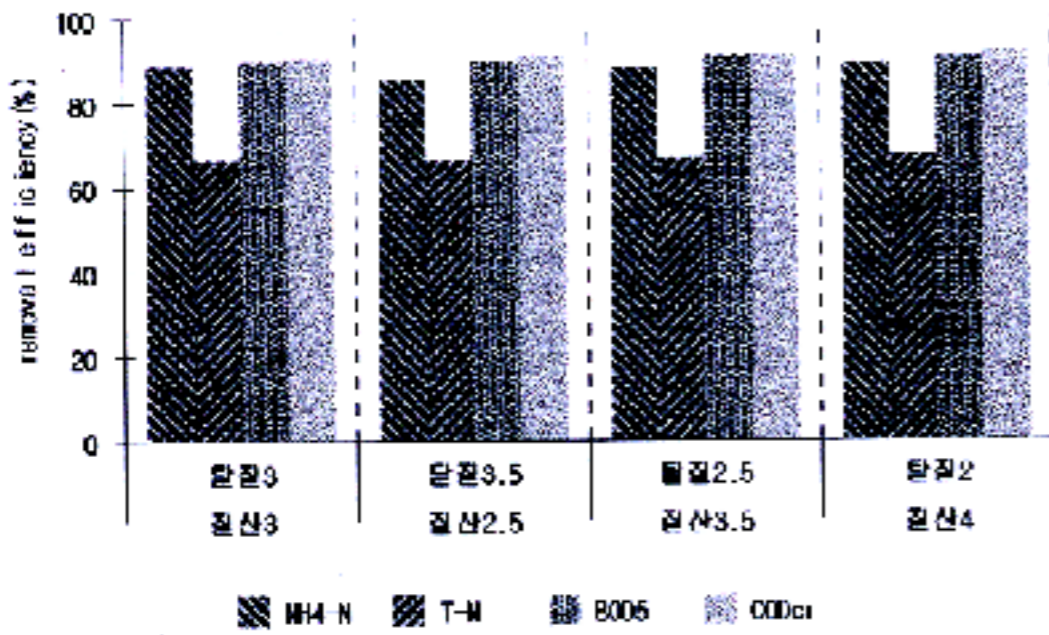


그림 4. 탈질조와 질산조의 체류시간변화에 따른 질소 및 유기물 제거율

70% 이상의 T-N제거를 위해서 16hrs의 HRT가 필요하다고 보고하였는데, 본 실험에서는 동조진(수온 20°C, 내부순환율 300%)에서 6hrs의 HRT로 70% 정도의 T-N제거율과 94%의 BOD₅제거율을 얻을 수 있었고 기존의 하수처리장의 포기조의 HRT가 6~8hrs인 점을 감안하면 기존하수처리상 포기조를 탈질조와 질산조로 개조하여 적용시킬 수 있다고 판단된다.

3.2. 내부순환율 변화에 따른 영향

내부순환율이 질소성분, 유기물질제거효율에 미치는 영향을 검토하기 위해 내부순환율을 50%, 100%, 200%, 300%, 400%로 변화시키면서 실험한 결과는 그림 5와 같다.

내부순환율을 50%~300%로 증가시키기에 따라 NH₄-N제거율 74.2~97.2%, T-N제거율 51.9~79.5%로 크게 증가했으며 300~400%로 증가시킨 경우에는 T-N제거율이 감소되었다.

또한 Katagai Nobuyuki¹⁰⁾ 등은 폴리에틸렌 連通氣泡體층전 생물여과법에 의한 질소제거에서 BOD제거에서는 순환비의 영향이 적고 T-N제거는 순환비의 영향을 받기 쉬우며 순환비 300%인 경우에 가장 높은 제거율을 나타냈다고 보고하였다.

이것은 北浜弘幸⁶⁾ 등이 세라믹 담체층전의 생물여과법을 이용하여 질소를 고도로 제거하는데 있어 최적순환비는 300~400%라는 연구

결과와 유사한 양상을 보이고 있다.

Rozick⁷⁾ 등은 유입수중의 암모니아성 질소농도가 클때 암모니아성 질소농도는 질산화 미생물에 독성영향을 주게 된다고 보고하였다.

그러므로 내부순환율을 300%까지 증가시킬 때 질산화된 NO₃-N이 탈질조에 더 많이 유입되므로 유입수중의 암모니아성 질소농도가 희석되고 T-N제거율이 향상되지만 400% 이상에서는 내부순환율의 증가에 의한 T-N제거율의 향상은 거의 없어졌다.

즉, 순환율을 너무 높게하면 질산조에서 탈질조로 들어오는 순환수량 증가로 탈질조의 용존산소농도가 높아져 탈질반응을 저해하므로 질소제거율은 낮아진다고 판단된다. 이는 혐기-호기성 고농도 활성슬리지법⁸⁾과 유사한 경향을 나타냈다.

또한, 그림 5는 내부순환율에 따른 BOD₅, COD_{Cr} 제거율의 영향을 나타내고 있다. 내부순환율 50~200%까지는 약간의 차이로 BOD₅, COD_{Cr} 제거율이 증가하지만 200% 이상에서는 큰 영향을 미치지 않는다. 질소성분의 제거와 비교해서 내부순환율에 대한 영향이 적은 것으로 나타났는데 최⁹⁾ 등이 무산소/호기공법을 이용하여 HRT를 총 7~8시간으로 운전하였을 경우 유기물 제거효율은 200% 내부반송에서 비교적 좋은 처리효율을 보였고 T-N제거효율은 70~300%로 증가시키기에 따라 더 높게 나타났다고 보고한 결과와 일치하였다.

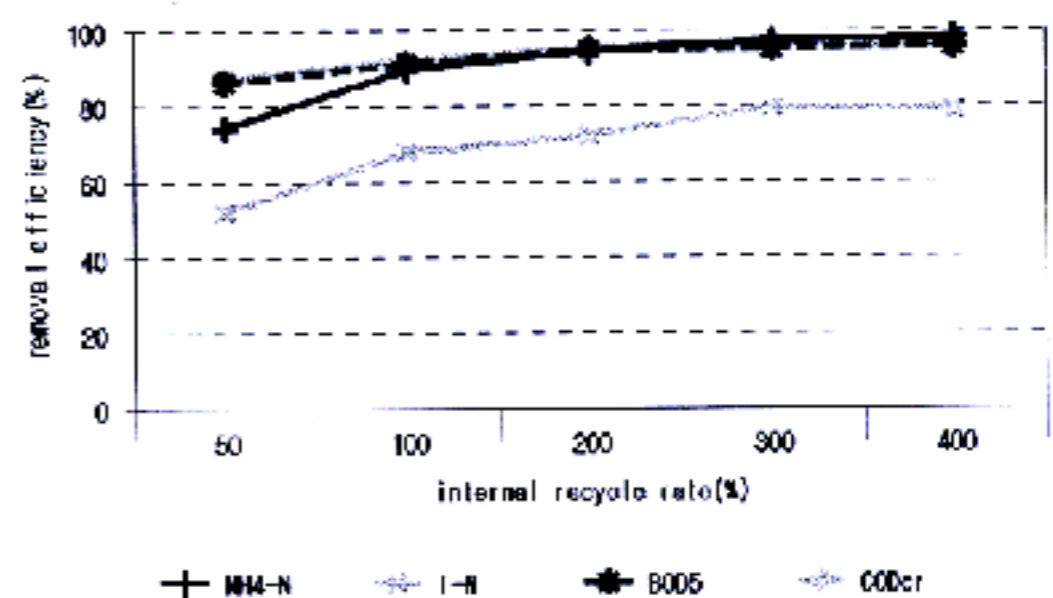


그림 5. 내부순환율변화에 따른 질소 및 유기물 제거율

3.3. 수온변화에 따른 영향

합성폐수를 사용하여 HRT 6hrs(탈질2hrs, 질산4hrs), 내부순환을 300%의 조건에서 온도를 15°C, 20°C, 25°C, 30°C로 변화시키면서 질소성분과 유기물질 제거에 미치는 영향을 검토해 보았다.

그럼 6에서 수온 20~30°C사이에서는 약간의 차이로 제거효율이 증가하였지만 수온 15°C에서는 20°C에 비해 10% 이상으로 제거효율의 감소를 보였다. 수온 30°C일때 NH₄-N제거율은 97.2%, T-N제거율은 79.5%로 가장 좋은 처리효율을 나타냈으며 수온 15°C일 때 NH₄-N제거율은 74.5%, T-N제거율은 60.4%로 가장 낮은 제거율을 보였다.

특히, NH₄-N제거율은 15°C일 때 20°C에 비해 15% 이상으로 감소되었는데 Painter¹¹⁾, Focht¹²⁾ 등은 질산화미생물의 성장가능온도는 4~50°C이며 최적온도범위를 30~36°C라고 보고하였고 Borchardt¹³⁾는 15°C 이하의 온도에서는 성장속도가 급격히 감소되어 12°C의 성장속도는 50% 정도로 저하된다는 보고와 유사하였다.

본 실험에서는 15°C일 때 질산화 미생물에 의한 NH₄-N제거율은 70% 이상으로 PVA-냉동법에 의한 포괄고정화 미생물이 상기한 활성슬러지 질산화미생물에 비해 온도조건에 강하다고 판단되었다.

그럼 6에서 BOD₅, COD_{Cr} 제거율은 수온 15°C 이상에서 89%, 90% 이상으로 나타났으며 수온 15~30°C로 증가시킴에 따라 약간의 차이로 제거효율이 상승한 것으로 나타나 질소성분 제거율에 비해 온도의 영향이 적은 것으로 나타났다. 이것은 角野立夫¹⁴⁾ 등이 포괄고정화법은 미생물이 외액과 직접 접촉하지 않고 미생물을 유지하는 효소가 안정하기 때문에 온도의 환경조건에 강하다고 보고한 결과와 유사한 양상을 보이고 있다.

3.4. C/N(CODCr/ T-N)비 변화에 따른 영향

그림 7은 합성폐수를 사용하여 HRT 6hrs(탈

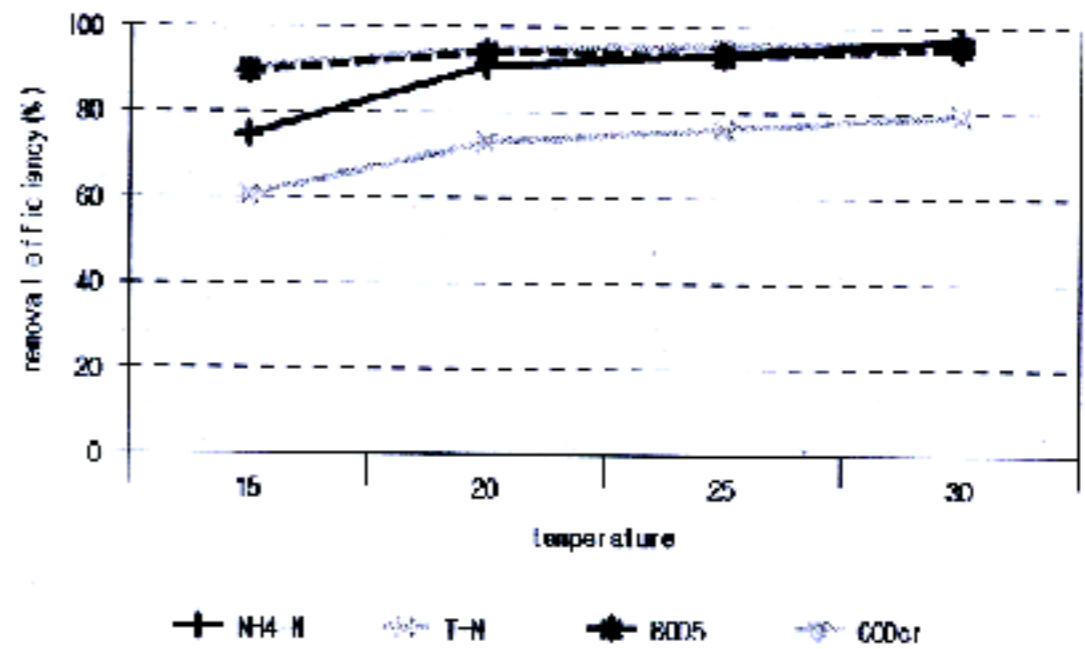


그림 6. 온도변화에 따른 질소 및 유기물 제거율

질2, 질산4), 수온 30°C, 내부순환을 300%의 조건에서 유입폐수중의 C/N비 변화에 따른 질소성분, 유기물질 제거에 미치는 영향을 나타내었다. 본 실험에서는 탈질을 위한 수소공여체로서 유입폐수중의 유기물을 사용하므로 유기물이 부족한 경우 탈질반응이 탄소에 의하여 세이되기 때 문에 외부로부터 메탄올(CH₃OH)처럼 값싼 유기화합물을 보충할 필요가 있다.

그럼 7에서 NH₄-N제거율은 C/N비에 따라 큰 영향을 받지 않았으며, T-N제거율은 C/N비 3.5일때 86.1%로 가장 좋은 처리효율을 나타내었고 C/N비를 증가시킴에 따라 비슷한 처리효율을 나타내었다.

이것은 김¹⁵⁾ 등이 고정생물막을 이용한 질소, 인 동시 제거 process에서 무산소반응조에서의 효과적인 탈질을 위한 유입폐수의 C/N비는 3~5사이라고 보고한 결과와 유사한 경향을 보였다.

본 실험에 사용한 합성폐수의 C/N비는 2.5인데 C/N비 2.5~5.5에서는 BOD₅, COD_{Cr} 제거효율이 약간의 차이로 증가하다가 C/N비 7.5에서는 감소하는 경향을 보였으나 C/N비에 관계없이 BOD₅ 제거율 95% 이상, COD_{Cr} 제거율 96% 이상의 효율을 나타내었다.

3.5 유기물 부하변동에 따른 영향

그럼 8은 유기물부하량(KgBOD/m³.d)이 유기물질 제거에 미치는 영향을 나타내었는데, 유기물부하량이 1.67kgBOD/m³.d의 고부하에

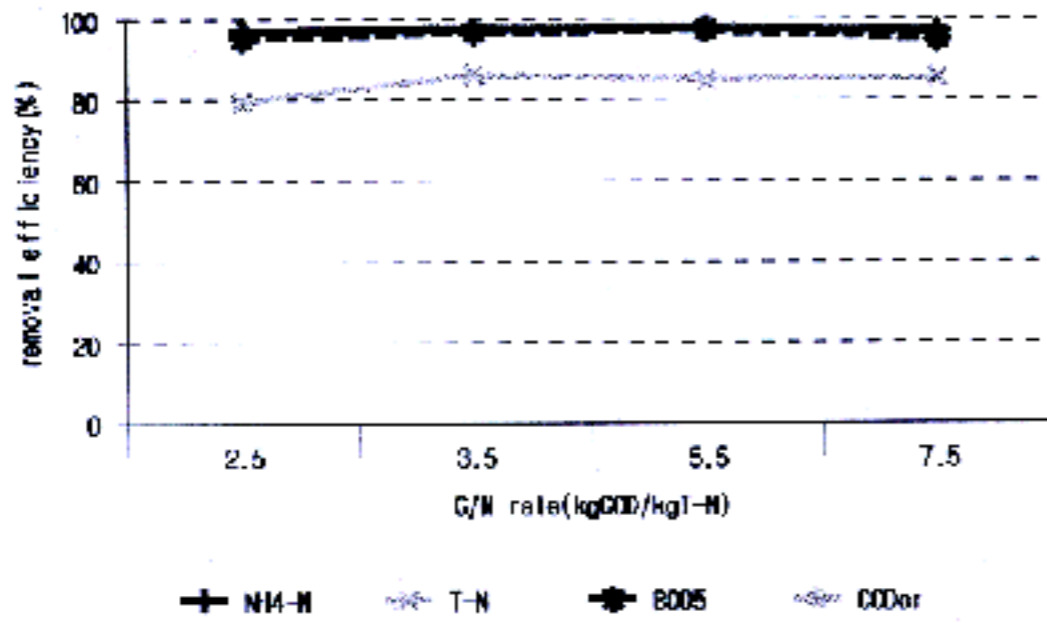


그림 7. C/N비 변화에 따른 질소 및 유기물 제거율

서도 BOD₅ 제거율 94.8%, COD_{Cr} 제거율 96.2% 이상의 제거효율을 나타내었다.

이것은 古川憲治¹⁶⁾ 등이 고정화시킨 황성오니 Pellet을 이용하여 TOC용적부하 0.5~2.35kg·TOC/m³·d의 부하에서 합성하수의 처리시험을 행하여 TOC 93% T-N을 30~40%의 효율에서 제거할수 있었다고 보고한 것과, 또한 橋本獎¹⁷⁾ 등이 고정화황성오니를 이용하여 1.33~2.96kg·TOC/m³·d의 고부하역에서 합성폐수를 연속처리 실험한 결과 TOC 90% 이상, T-N 25~44.6%의 처리효율 이상의 유기물 제거효율이다.

이처럼 고용적부하 운전이 가능한 것은 단위 용적당 많은양의 미생물을 유지할 수 있는 고정화법의 특성에 기인한 것이다.

4. 결 론

고정화 질산균, 탈질균을 이용하여 합성폐수의 처리실험을 행한 결과는 다음과 같다.

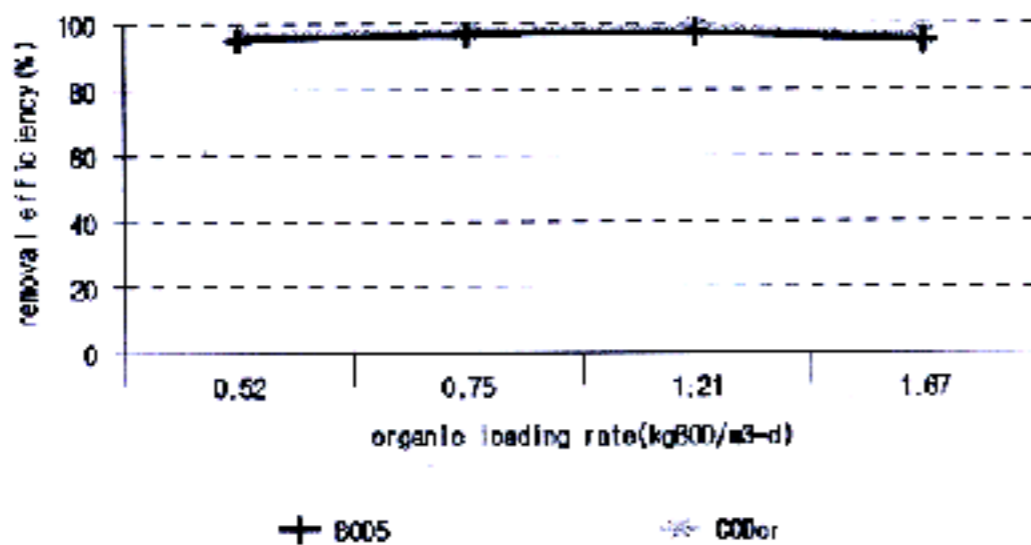


그림 8. 유기물 부하변동에 따른 BOD₅, COD_{Cr} 제거율

1. HRT 2~12hrs, 내부순환율 50~400%, 온도 15~30°C, 유입C/N비 2.5~7.5로 각각의 조건을 변화시키면서 질소와 유기물제거에 미치는 영향을 검토한 결과, HRT 2~6hrs에 시는 큰폭으로 제거효율이 상승하다가 6hrs 이상에서는 거의 비슷한 제거효율을 보였다.

내부순환율은 50~300%의 범위에서 T-N제거율의 민감한 변화를 보였고 유기물질은 50~200%에서 상승하다가 200% 이상에서는 거의 비슷한 제거효율을 보였으며, 수온은 15~20°C에서 민감하게 반응하였고 20°C 이상에서는 덜 민감하였다.

유입 C/N비 변화에 따라서는 거의 비슷한 제거효율을 보여 질소와 유기물제거에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.

2. 수온 20°C, 내부순환율 300%에서 HRT 6hrs(탈질 2hrs, 질산 4hrs)로 처리하였을 때, T-N제거율 72.8%, BOD₅제거율 94.0%의 처리효율을 얻었으며, 동 조건에서 동 처리효율을 얻기위한 기존 황성슬러지 순환변법의 HRT(16hrs)를 크게 단축할 수 있고 슬러지반송이 필요치 않아 장치의 compact화를 기대할 수 있으며, 본 실험결과로부터 HRT 6~8hrs인 기존의 하수처리상의 포기조를 개조하여 사용할 수 있을 것이다.

3. HRT 6hrs(탈질 2hrs, 질산 4hrs), 내부순환율 300%, 수온 30°C, C/N비 5.5일때, T-N제거율 84.7%, BOD₅ 제거율 97.2%로 가장 좋은 처리효율을 얻었으며, 처리수중의 T-N농도가 8.7mg/l, BOD₅ 농도가 8.4mg/l로 양호한 결과를 보였다.

또한, 유기물부하 1.21~1.67kgBOD/m³d의 고부하에서도 BOD₅ 94%, COD_{Cr} 96% 이상의 처리효율을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 전북대학교 도시 및 환경연구소의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Barnes, D. and P. J. Bills., "Biological Control Of Nitrogen in Wastewater Treatment", p. 2(6) (1983)
2. 富澤健二, "固定化微生物による窒素除去", Vol. 23, No. 267, p. 1(1986)
3. APHA, AWWA & WEF., "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 18th Ed, Washinton, D.C., pp. 2~53 (1992)
4. "수질오염공정시험법", 동화기술, pp. 189~197 (1994)
5. 森直道, "포괄고정화 미생물을 이용한 하수질소 제거 기술", 資源環境對策誌, pp. 26~32(1996/18)
6. 北浜弘幸(Kitahama Hirouuki), "세라믹담체층 전의 생물여과법에 의한 질소제거", 첨단환경기술, p. 41 (1995.7)
7. Rozich A. F., & Castens, D.J., "Inhibition Kinetics of Nitrification in Continuous-flow Reactors", Journal WPCF, Vol. 58, No. 3, pp.220~226 (1986)
8. 김갑수, 김오식共譯, "신활성슬러지법", 동화기술, pp.55~63.
9. 최용수, "compact형 반응기에 의한 오폐수의 질소, 인제거공정", 첨단환경기술, p. 9 (1995. 7)
10. Katagi Nobuyuki., "플리에틸렌 連通통기체층 전 생물여과법에 의한 질소제거", 첨단환경기술, p. 54(1995. 7)
11. Jeris, J.S., et al., "Biological Fluidized-Bed Treatment For BOD and Nitrogen Removal", Journ. WPCF, Vol.49, pp 851~857 (1984)
12. Painter, H. A., Wat. Res., Vol.4, pp. 393~450 (1970)
13. Buswell, A.M., et al., "Laboratory Studies on the Kinetics of the Growth of Nitrosomonas with Relation to the Nitrification Phase of the BOD Test", Appl. Microbiol., Vol.2, p. 21 (1954)
14. 角野立夫外 3人, "包括固定化微生物を用いた廢水處理", PPM, pp. 28~35(1987. 6)
15. 김진홍외 3인, "고정생물막을 이용한 질소, 인동시제거(II)", 대한환경공학회 논문초록집, E-14. (1995)
16. 橋本 獎, 古川憲治, 濱宏., "活性汚泥の固定化とその淨化機能に關す研究. PAV-ホウ酸法について", Vol. 23, No. 262, pp. 41~49 (1986/3)
17. 橋本獎, 古川憲治, 濱宏., "活性汚泥の固定化とその淨化機能に關る研究. PAV-冷凍法について", Vol. 23, No. 261, pp. 16~22 (1986/2)
18. Vasanthadevi Aravinthan외 2인, "Nitrogen Removal From Domestic Wastewater Using Immobilized Bacteria", Water Quality International' 96, pp. 367~374 (1996)