

고정화 생물 반응기에 의한 암모니아 제거

김 병 진 · 이 경 범 · 서 근 학
부경대학교 화학공학과
(1998년 4월 16일 접수)

Removal of ammonia by packed bed bioreactor using immobilized nitrifiers

Byong-Jin Kim, Gyeong-beom Yi, and Kuen-Hack Suh
Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan, Korea
(Manuscript received 16 April, 1998)

Nitrifier consortium entrapped in Ca-alginate bead were packed into aerated packed bed bioreactor and non aerated packed bed bioreactor and the performances of two bioreactors were evaluated for the removal of ammonia nitrogen from synthetic aquaculture water. Total ammonia nitrogen(TAN) removal rate was decrease in aerated packed bed bioreactor below 0.3hr of hydraulic residence time(HRT), but increased in non aerated packed bed bioreactor until 0.5hr of HRT. At HRT of 0.05 hr, TAN removal rate of non aerated packed bed bioreactor was about 335g TAN/m³/day and the optimum ratio of packing height and inside diameter of reactor (H/D) was 4. The performance of two bioreactors indicated that non aerated packed bed bioreactor was better than aerated packed bed bioreactor in ammonia removal from synthetic aquaculture water.

Key word : nitrifier consortium, Ca-alginate bead, aquaculture, ammonia, bioreactor

1. 서 론

현재 이용되고 있는 어류의 양식 시스템으로는 유수식 양식, 가두리 양식과 순환 여과식 양식이 있다. 유수식 양식과 가두리 양식은 양식장이 위치한 자연환경에 의존하는 개방적 시스템으로서 사육조 내로 계속적인 용수 공급을 필요로 하고 한 번 사용된 용수는 수계로 방출되므로 용수 부족과 수질오염 등의 문제점을 유발한다. 순환 여과식 양식은 사육조에서 유출된 폐수를 양어장 밖으로 방출하지 않고 물리적 및 생물학적 여과과정을 통해 오염물질을 제거한 후 재 사용하는 폐쇄식 시스템으로 최소의 용수를 이용하여 어류를 고밀도로 사육할 수 있어 생산력을 증대시킬 수 있고 배출수에 의한 수질오염 문제로 인하여 야기되는 각종 환경적 규제를 해결할 수 있을 뿐 아니라 소비자에 인접해 입지 할 수 있으므로 부가가치를 높일 수 있는 장점을 지니고 있는 양식 시스템이다.¹⁾

순환 여과식 양식은 어류를 고밀도로 사육함에 따라 사육조에서 발생되는 오염물질의 양도 많으므로 발생되는 오염물질의 효과적이고 신속한 제거가 요구된다. 사육조에서 발생하는 오염 물질 중 어류의 대사작용과 미접촉 사료와 어분의 분해에 의해서 발생되는 암모니아는 어류에 유해한 영향을 끼친다.²⁾

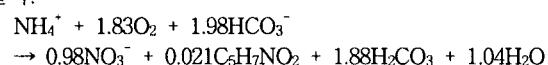
일반적으로 암모니아라 함은 총암모니아로서 비이온성 NH₃와 NH₄⁺의 합을 말한다. 암모니아(NH₃)는 암모늄

(NH₄⁺)이라고 하는 수중 이온형태와 평형을 이루고 있다. 비이온성 암모니아는 동물의 세포벽을 통과하여 저농도에서도 어류에게 치명적인 피해를 주게된다.³⁾ 미국 환경 보호청⁴⁾에서는 사육조 내의 비이온성 암모니아를 0.02 mg/L 이하로 유지하도록 권장하고 있다. 비온성 암모니아와 이온성 암모니아가 수중에 존재하는 비율은 다음의 식에 의해 표시된다.

$$\frac{[NH_3]}{[NH_4^+]} = 10^{(pH - pK_a)}$$

수온 25°C 일 경우 pKa는 9.245이므로 일반적인 어류 양식조건인 pH 7-7.5인 경우 수중의 비이온성 암모니아의 비율은 총암모니아의 0.6-1.2%정도이므로 수중의 비이온성 암모니아를 0.02mg/L이하로 유지하기 위해서는 총암모니아를 2-2.5mg/L이하로 유지하여야 한다.

생물학적 암모니아 제거공정은 자연적인 미생물에 의한 정화기능을 증가시킨 방법으로 *Nitrosomonas* 속의 미생물에 의해 암모니아를 아질산성 질소로 산화시킨 후 *Nitrobacter* 속의 미생물에 의해 아질산성 질소를 질산성 질소로 산화시킨다. 이 생물학적 총괄 반응식은 다음과 같다.⁵⁾



위 반응식에서 보여지듯이 암모니아성 질소 1g의 산화에 약 4.18g의 용존산소가 필요하며 7.14g의 알칼리도가 소모된다.

현재 사용되고 있는 생물학적 암모니아제거 공정으로는 침지식 생물막 공정, 살수 여상 공정, 회전 원판 접촉 공정 등으로 이들 공정은 지지체 표면에 자연적으로 부착되는 미생물을 이용하는 고정 생물막 공정이다.⁶⁾ 이러한 고정 생물막 공정은 생물막을 형성하는데 있어 오랜 시간이 걸리며 자연적으로 부착하기 쉬운 규이 우점종으로 밀집하게 되어 두꺼운 생물막을 형성시키는 단점이 있다. 이로 인해 생물막 내부에서는 협력적 조건이 형성되고 외부에 부착된 미생물은 생물막과 유체의 접촉시 발생하는 전단응력에 의해 떨어져 나가게 됨으로써 반응기 내부의 미생물 농도가 낮아지게 되어 암모니아 제거효율이 저하되는 원인이 된다. 이와 같은 고정 생물막 공정의 문제점을 개선하는 방법으로 포괄고정화 미생물을 이용한 암모니아 제거 공정에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.⁷⁾

미생물의 포괄고정화법은 alginic, carrageenan, agar와 같은 천연 고분자나 polyacryl amide, polyethylene glycol, polyvinyl alcohol과 같은 합성 고분자 용액 속에 미생물을 혼합한 후 결화시켜 한정된 공간 내에 미생물을 포획하는 것으로 생물공학 분야에 오래 전부터 이용되어 왔으며 최근에는 폐수처리에 응용되고 있다.⁸⁾

이러한 고정화 미생물을 폐수 속의 오염 물질 제거에 이용할 경우 원하는 미생물을 배양하거나 순차한 후 고정화 할 수 있어 높은 효율을 얻을 수 있고 전단응력에 의한 미생물의 유실이 없어 반응기 내에 유용한 미생물을 고농도로 유지할 수 있다. 온도나 pH같은 환경조건이 급격히 변화하거나 독성을 질이 유입되어도 고정화 미생물 자체의 완충작용에 의해 활성이 변하지 않는 장점을 가지고 있다. 또한 처리수와 미생물의 분리가 매우 용이하여 별도의 분리시설이 불필요하므로 공정의 규모를 대폭 줄일 수가 있다.⁹⁾

현재 연구되어지고 있는 고정화 미생물을 이용한 암모니아 제거 공정은 대부분 암모니아 산화에 소모되는 산소를 보충하기 위하여 간접 또는 직접 폭기를 하는 혼합 반응기 형태를 하고 있다. 반응기 내부의 고정화 미생물에 직접 폭기를 할 경우 공기의 전단응력에 의해 고정화 미생물이 쉽게 파손되는 문제가 발생한다. 간접 폭기의 경우 반응물이 공정화 미생물에 충분히 접촉하지 못해 제거 효율이 낮은 문제점이 있다.¹⁰⁾

본 연구는 Ca-alginate를 이용한 포괄 고정화 미생물을 간접 폭기식 반응기와 비폭기식 반응기에 충진하여 양어장수중의 암모니아제거 실험을 수행하며 두 반응기의 특성을 비교하여 보다 효과적으로 암모니아 제거를 할 수 있는 공정을 개발하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 질화세균군

S하수처리장에 반입된 활성슬러지를 65 mesh(ϕ : 0.21mm) 표준체를 이용하여 협잡물을 제거시킨 후, 질화세균군(nitrifier consortium)의 증식을 위하여 수돗물을 이용하

여 Table 1에 나와 있는 기질을 조제하여 주입하면서 1개월 동안의 순양과정을 거쳤다. 고정화 전에는 미생물 주위의 기질을 없애기 위하여 종류수를 이용하여 세척한 후 원심분리를 거쳐 미생물만을 회수하여 Fig. 1과 같이 고정화에 사용하였다.

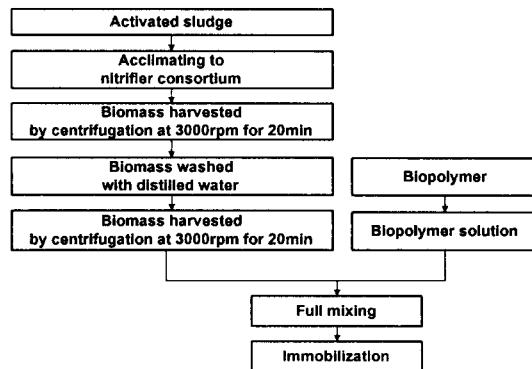


Fig. 1. Block diagram for the preparation of nitrifier consortium and polymer for immobilization.

Table 1. Composition of nitrifier acclimating solution

Composition	Concentration(g/m ³)	Function
NH ₄ Cl	59.43	N source
NaHCO ₃	71.4	Alkalinity control
Na ₂ HPO ₄	18.85	P source

2.2. 고정화 방법

질화세균군의 고정화 장치는 Fig. 2와 같다. 5%(W/V) sodium alginate용액과 4%(DW/V) 질화세균군 부유용액을 동일 부피로 혼합한 후 자석 교반기를 이용하여 교반되고 있는 0.1M CaCl₂ 용액 속에 사출하여 Ca-alginate bead로 제조하였다.

균일한 크기의 bead를 제조하기 위하여 정량펌프를 이용하여 질화세균군과 alginate 혼합용액을 16mL/min으로 일정하게 사출기로 공급하였으며 사출기 needle의 크기는 2mm이었다. 사출된 bead는 각각 0.1M CaCl₂ 용액 속에 24시간 동안 보관한 후 사용하였으며 제조된 bead의 평균 직경은 4mm이었다.

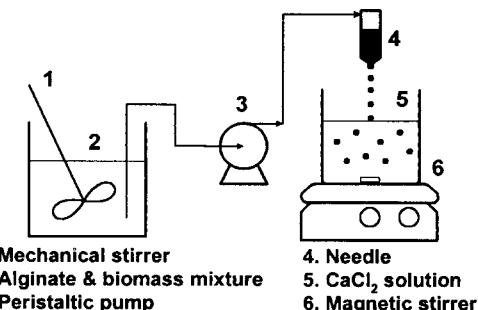


Fig. 2. Schematic diagram for the immobilization apparatus.

2.3. 간접 폭기식 충진 반응기

실험장치는 Fig. 3에 나와 있는 형태로 반응기는 내경이 130mm이고, 높이가 90 mm인 원통형 관을 이용하여 전체 용량이 1L가 되도록 제작하였다. 반응기 중앙에는 내경이 21 mm이고 높이가 70 mm인 draft tube를 설치하였으며 draft tube와 반응기의 내벽 사이의 원환에 미세망을 설치하여 500mL의 고정화 미생물을 충진하였다. 고정화 미생물이 충진되어 있는 지점의 상부에도 미세망을 설치하여 bead가 반응기 밖으로 유실되지 않고 주입되는 기질이 반응지역 내로 원활히 유입될 수 있도록 설계하였다. Draft tube의 하부에는 절화 과정에서 소비되는 산소를 공급하기 위하여 유리여과기(Pore size : G3)를 이용하였다. 하부에서의 유체 흐름 형태는 상부에서 내려온 순환수와 새로이 주입된 기질이 함께 합쳐진 후 공급된 공기와 함께 draft tube를 따라서 상승하여 혼합되게 된다. 기질과 공기의 공급이 동시에 이루어지고 있는 draft tube의 상부 끝 부분을 미세망보다도 0.5cm 높게 제작하여 유입수와 기포의 전단응력에 의한 bead의 파괴를 최소화하여 bead의 수명을 보다 길게 연장할 수가 있도록 제작하였다.

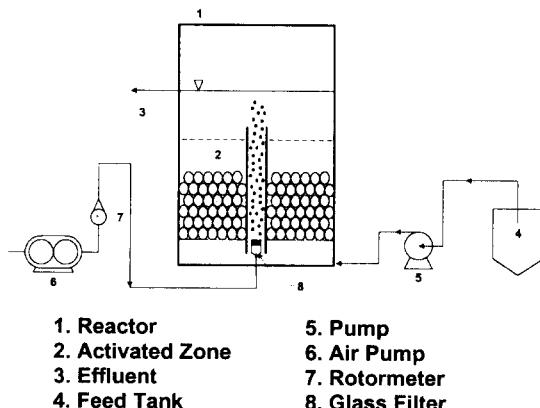


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus for aerated packed bioreactor

2.4 비풀기 충전 반응기

본 실험에 사용한 장치는 Fig. 4와 같으며 충전 반응기는 내경 3.2cm, 높이 25cm의 아크릴 관으로 제작하였으며 반응기 하부로부터 5cm 높이에 망을 설치하여 상부의 head를 밟쳐 죽 수 있도록 하였다.

합성양어장수는 정량펌프를 이용하여 반응기의 하부로 공급하였으며 미세망과 유입수 공급관 사이에 공간을 두어 충진층 단면에 대해 암모니아 농도의 구배가 없이 공급될 수 있게 하였으며 바닥에 30° 의 경사를 주어 유입된 고형물이 침강할 경우 아래로 잘 내려갈 수 있도록 하고 이를 제거할 수 있는 고형물 배출구를 설치하였다.

반응기 직경(D)에 대한 충진총 높이(H)의 비의 영향을 알아보기 위한 처리수 배출구는 소규모 반응기는 하부 미세망으로부터 9.5, 13.5, 17.5cm 높이에 설치하였으며 충진총 직경에 대한 배출구의 높이 비는 각각 30, 42, 55이었다.

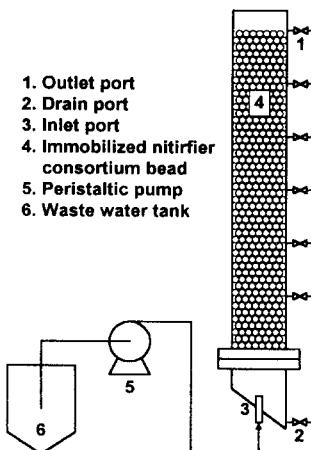


Fig. 4. Schematic diagram of experimental apparatus for packed bed bioreactor.

2.5 합성양어장수

본 실험에 이용된 합성양어장수는 Table 2 와 같은 조성으로 수돗물을 이용하여 제조한 뒤 사용하였다. 반응기 내로 유입되는 암모니아성 질소의 공급은 염화암모늄(NH₄Cl)을 이용하여 total ammonia nitrogen(TAN)이 2 - 2.5g/m³ 이 되도록 하였으며 질화에 소모되는 알칼리도의 보충을 위해 쯔탄산나트륨(NaHCO₃)을 이용하였다.

Table 2 Synthetic feedstock solution

Composition	g/m ³
Glucose	30
Na ₂ HPO ₄	40
MnSO ₄	2
NH ₃ N	2.0 - 2.5
NaHCO ₃	17.3 - 21.5

2.6 실험방법

간접 폭기식 충진 반응기의 암모니아 제거실험은 수력학적 체류시간을 2.0시간부터 0.2시간까지 변화시키면서 총 30일간 운전하였으며 공급 공기량은 체류시간에 상관 없이 0.1vvm으로 공급하였다.

비폭기 충진 반응기의 실험은 반응기 직경에 대한 충진 높이의 비가 높은 것부터 시작하여 하나의 높이에 대한 실험을 행한 후 충진되어 있는 bead를 제거하여 보다 낮은 충진 높이에 대한 실험을 행하였으며 하나의 높이에 대해 수리학적 체류시간을 0.5시간에서부터 0.05시간까지 줄이며서 행하였다.

2.7. 분석방법

채취한 유출시료의 암모니아 농도의 분석은 공정시험법¹¹⁾에 따라 100mL의 시료에 1N, NaOH 1mL을 첨가한 후 자석 교반기에 의해 교반하면서 암모니아 섭택 점을

(ORION 9512BN)에 의해 전위차를 측정하여 미리 작성된 검량선에 의해 농도로 환산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 간접 폭기식 충진 반응기에 의한 암모니아성 질소 제거 수력학적 체류시간 변화에 따른 암모니아성 질소 제거 특성을 조사하기 위하여 반응기내에 공기량은 0.1vvm으로 일정하게 주입하고 유입수의 암모니아성 질소 농도를 약 2 g/m^3 으로 연속 공급하면서 체류시간을 2.00, 1.00, 0.75, 0.55, 0.40, 0.30, 0.25 및 0.20시간으로 변화시킴에 따른 암모니아 제거 속도와 제거율의 변화를 Fig. 5에 도시하였다.

제거속도란 반응기 일정체적에서 일정시간동안 제거할 수 있는 량이므로 제거 속도가 최대일 때 처리량이 최대이므로 반응기의 성능이 최대라 볼 수 있다. 생물반응기를 한번 통과할 때의 처리율도 중요하지만 1회의 흐름을 통해 제거된 암모니아의 제거율이 작다고 하더라도 유출수를 재순환시키면 원하는 제거율을 얻을 수 있으므로 반응기 1회 통과 시 높은 제거율을 유지하는 것보다는 제거속도를 높게 유지하는 것이 더 중요하다고 할 수 있다.

수력학적 체류시간에 따른 암모니아 제거속도는 수력학적 체류시간이 감소하여 유량이 증가함에 따라 암모니아 제거속도도 증가하여 0.3시간의 체류시간에서는 $82\text{g TAN}/\text{m}^3/\text{day}$ 로 최대값을 나타내었고 0.3시간 이하의 체류시간에서는 암모니아 제거속도가 급격히 감소하였다. 수력학적 체류시간이 감소할수록 유출수의 농도가 증가하여 암모니아 제거율은 떨어지나 수력학적 체류시간이 감소함에 따라 유량이 증가하여 전반적인 처리능력은 증대되는 경향을 나타낸다. 최적치로 나타난 0.3시간이하의 체류시간에서는 유입되는 암모니아성 질소가 미생물에 의해 처리되기 전에 밖으로 유출되는 비율이 급속히 증가하여 유량이 증가함에 따라 처리속도는 오히려 감소되는 것으로 보여진다. 이는 0.30시간 이하의 체류시간에서는 TAN이 bead내부로 확산되어 제거되는 속도보다 유속이 훨씬 빠르기 때문에 미처리된 암모니아성 질소의 양이 많아졌기 때문으로 사료되었다.

수력학적 체류시간의 변화에 따른 암모니아 제거율의

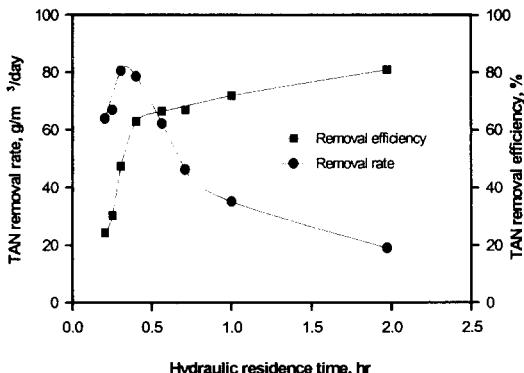


Fig. 5. Changes of TAN removal efficiency on hydraulic residence time in aerated packed bed bioreactor.

변화는 그림에서 나타나는 바와 같이 체류시간이 2시간일 때 81%부터 0.4시간에서의 63%까지는 선형적으로 감소하다가 0.4시간이후부터 급격히 감소하였다. 0.4시간이하의 체류시간에서는 bead내부로의 물질전달 속도보다 액본체의 흐름속도가 매우 빨라 암모니아 제거율이 급속히 감소하는 것으로 생각된다.

3.2. 비폭기 충전반응기에 의한 암모니아성 질소 제거 일반적으로 충전총 반응기는 액의 흐름이 플러그 흐름과 유사한 형태로 이동하면서 반응하게 되어 농도의 증가에 따라 제거속도가 증가하는 반응인 암모니아 제거반응인 경우 동일한 부피의 혼합흐름반응기에 비해 높은 제거효율을 얻을 수 있다.¹²⁾ 보다 높은 암모니아 제거속도를 얻기 위하여 원통형 반응기 내부에 고정화 미생물을 충진하여 합성 양어장수를 반응기 하부에서 상부로 통과시키는 비폭기 충진 반응기를 제작하여 실험하였다. 비폭기 충진 반응기에서 수리학적 체류시간의 변화와 반응기 직경에 대한 충진 높이의 변화에 대한 암모니아 제거속도와 제거율의 변화를 Fig. 6에 도시하였다.

암모니아성 질소의 제거 속도는 체류시간의 감소에 따라 서서히 증가하다가 0.3시간 이하의 체류시간에서는 급격히 증가하여 0.05시간의 체류시간에서도 암모니아 제거속도는 감소하지 않고 $200 - 335\text{g TAN}/\text{m}^3/\text{day}$ 의 높은 제거속도를 나타내었다.

충진 높이가 높아짐에 따라 반응기 내부의 암모니아 농도의 구배가 커져서 유출수의 암모니아 농도는 낮아지며 액의 흐름 또한 보다 이상적인 플러그흐름으로 접근하게 되어 높은 제거속도를 기대할 수 있다. 그러나 용액 속에 용존산소가 없으면 더 이상의 암모니아를 제거할 수 없으므로 일정 높이 이상의 충전총은 반응기 용적만을 증가시키게 된다. Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 반응기 내경(D)에 대한 충진총 높이(H)의 비(H/D)가 4.2인 경우와 5.5인 경우 0.1 시간 이상의 수리학적 체류시간에서는 거의 같은 제거속도를 보였으나 0.1시간 이상의 체류시간에서는 H/D가 4.2일 때 더 높은 제거속도를 나타내었다.

암모니아 제거율은 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 수리학적 체류시간이 0.5시간 일 경우 40 - 56%였으며 체

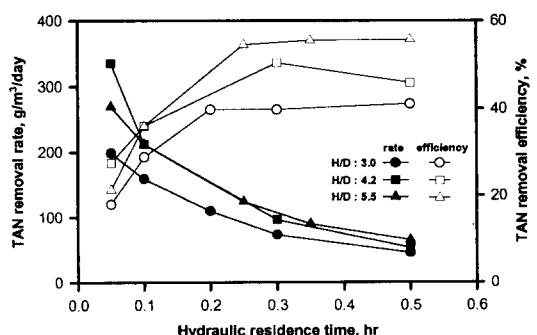


Fig. 6. Changes of TAN removal rate and TAN removal efficiency on hydraulic residence time in non aerated bed packed bioreactor.

류시간이 감소함에 따라 서서히 감소하다가 0.2시간 이하의 체류시간에서는 급격히 감소하였다. 0.2시간 이상의 체류시간에서는 H/D가 5.5인 경우가 54 - 57%의 가장 높은 제거율을 보였으며 0.1시간 이하의 체류시간에서는 H/D가 4.2인 것이 더 높은 제거율을 나타내었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 비폭기 충진 반응기의 공탑 액체 속도의 변화에 따른 암모니아 제거속도와 제거율의 변화를 도시한 것이다. 공탑 액체속도는 충진층 반응기 내부에 충전물이 없을 때 공급되는 액체의 이동 속도로서 내부 충전물에 가해지는 유량 및 반응 물질의 부하량을 의미한다. 공탑액체속도의 증가에 따라 암모니아 제거속도는 선형적으로 증가하였으며 제거율은 감소하였다. 이는 공탑 액체유속이 빠를수록 고정화 미생물과 유입수 속의 암모니아의 접촉시간이 짧아져서 제거율은 감소하지만 유량의 증대에 의한 접촉기회가 증가하여 단위시간에 제거할 수 있는 암모니아의 총량은 증가하여 제거속도가 증가하는 것으로 사료된다. 또한 반응기 내경에 대한 충진층 높이비가 4.2보다 높은 경우 충진되어 있는 고정화 미생물의 량에 비해 유입되는 암모니아의 량이 적어 고정화 미생물의 처리능력을 극대화시키지 못하는 것으로 사료된다.

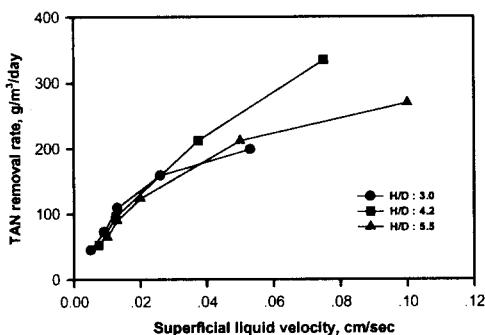


Fig. 7. Changes of TAN removal rate on superficial liquid velocity in non aerated packed bed bioreactor.

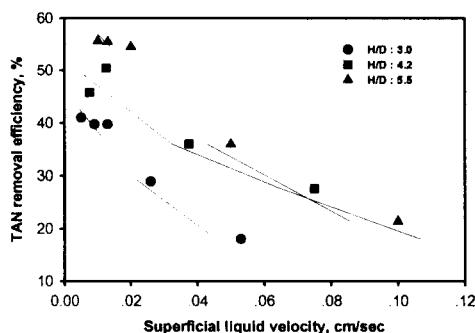


Fig. 8. Changes of TAN removal efficiency on superficial liquid velocity in non aerated packed bed bioreactor.

3.3. 간접 폭기식 충진반응기와 비폭기 충진 반응기의 비교
Fig. 9는 간접 폭기식 충진반응기의 수리학적 체류시간의 변화에 따른 암모니아제거속도의 변화와 H/D가 4.2인

비폭기 충진 반응기의 암모니아 제거속도 변화를 비교하여 도시한 것이다. 간접 폭기식 충진 반응기가 0.3시간의 체류시간에서 82g TAN/m³/day의 최고의 암모니아 제거속도를 나타내고 0.3시간 이하의 수리학적 체류시간에서는 암모니아 제거속도가 감소하였다. 비폭기 충진반응기는 수리학적 체류시간이 0.3시간인 경우 95g TAN/m³/day 정도로 간접 폭기식 충진반응기의 암모니아 제거속도와 큰 차이를 보이지는 않았으나 0.3시간 이하의 수리학적 체류시간에서는 암모니아 제거속도가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 0.3시간 이상의 체류시간에서는 두 반응기의 암모니아 제거속도는 큰 차이를 보이지 않으나 유속이 증대함에 따라 간접폭기식 충진 반응기의 암모니아 제거속도는 감소하지만 비폭기 충진 반응기는 체류시간이 짧아질수록 암모니아 제거속도가 더 커져 큰 차이를 보이고 있다.

간접폭기식 충진 반응기 내부의 액의 흐름은 혼합흐름 형태로 유입유량이 증가함에 따라 유입수 중의 암모니아가 반응 부위인 고정화 미생물과 접촉하지 못하고 유출되는 량이 증가하여 암모니아 제거속도가 감소하게 되나 비폭기 충진 반응기의 경우 유입수가 플러그 흐름 형태로 반응기를 통과하므로 유입되는 모든 암모니아 성분이 고정화 미생물과 접촉할 수 있어 매우 짧은 수리학적 체류시간에도 제거속도가 감소하지 않고 계속하여 증가하는 것으로 사료된다.

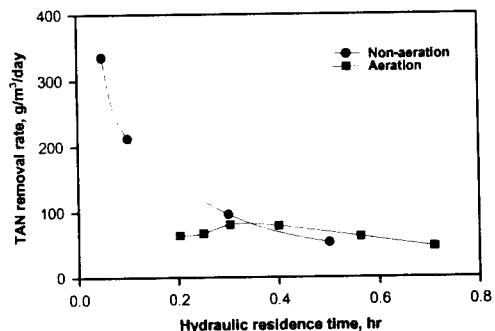


Fig. 9. Comparison between aerated packed bioreactor and non packed aerated bioreactor.

4. 결 론

질화세균을 고정화한 Ca-alginate bead를 충진한 간접폭기식 충전반응기와 비폭기 충전반응기를 이용하여 합성양어장수 속의 암모니아성 질소의 제거 실험을 수행하였다. 간접폭기식 충전반응기는 낮은 체류시간에서 유입되는 암모니아와 고정화 미생물이 충분히 접촉하지 못하여 0.3시간 이하의 체류시간에서는 제거속도가 감소하였다. 비폭기 충전 반응기는 체류시간이 짧아지더라도 암모니아 제거속도가 계속하여 증가하였다. 비폭기 충전반응기에서 최적의 반응기 내경에 대한 높이는 4.22였으며 0.05시간의 체류시간에서 335g TAN/m³/day의 제거속도를 보였다.

두 반응기의 비교를 해 본 결과 비폭기 충진 반응기가

간접폭기식 충진 반응기에 비해 훨씬 높은 암모니아 제거 속도를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국해양수산부에서 시행한 수산특정연구개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Rijn, J. V., 1996, The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture, *Aquaculture*, 139, 181-201.
- 2) Roger, G. L. and S. L. Klementon, 1985, Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquaculture engineering*, 4, 135-154.
- 3) Liao, P. B. and R. D. Mayo, 1974, Intensified fish culture combine water reconditioning with pollution abatement, *Aquaculture*, 3, 61-85.
- 4) Environmental Protection Agent, 1976, Quality Criteria for Water, Office of technology transfer.
- 5) Sharma B. and R. C. Ahlert, 1977, Nitrification and nitrogen removal, *Water research*, 11, 897-925.
- 6) Grady, C. P. L. and Henry C. Lim, 1980, Biological wastewater treatment ; Theory and applications, Marcel Dekker, Inc.
- 7) Asano, H., H. Myoga, M. Asano and M. Toyao, 1992, A study of nitrification utilizing whole microorganisms immobilized by the PVA-freezing method, *Water Sci. Tech.* 26, 1037-1046.
- 8) Nitisoravut, S. and P. Y. Yang, 1992, Denitrification of nitrate-rich water using entrapped-mixed-microbial cells immobilization technique, *Water Sci. Tech.* 26, 923-931.
- 9) 김의용, 1993, 고정화 미생물을 이용한 유동층 반응기에서의 폐수처리, *생물화공*, 7(1), 85-91.
- 10) 김성구, 공인수, 서재관, 김병진, 이민규, 서근학, 1997, 고정화된 Nitrifier consortium을 이용한 Total Ammonia-Nitrogen(TAN)의 제거, *생물공학회지*, 12(5), 451-458.
- 11) 산업기술연구소, 1990, 환경오염공정시험법, 168~169pp.
- 12) Levenspiel, O., 1972, Chemical reaction engineering 2nd ed., John Wiley & Sons.