

고정화된 질화 세균군에 의한 암모니아성 질소 제거

† 서근학·김병진·조문철·조진구·김용하·김성구
부경대학교 화학공학과, ¹부경대학교 생물공학과
(접수 : 1997. 12. 1., 게재승인 : 1998. 2. 2.)

Removal of Ammonia-N by Immobilized Nitrifier Consortium

Kuen-Hack Suh†, Byong-Jin Kim, Moon-Chul Cho, Jin-Koo Cho, Yong-Ha Kim, and Sung-Koo Kim¹
Dept. of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan, 608-737, Korea
¹Dept. of Biotechnology and Bioengineering, Pukyong National University, Pusan, 608-737, Korea
(Received : 1997. 12. 1., Accepted : 1998. 2. 2.)

Nitrifier consortium immobilized in Ca and Ba-alginate beads were packed into two bioreactors and the performances of bioreactors were evaluated for the removal of ammonia nitrogen from synthetic aquaculture water. The total ammonia nitrogen (TAN) concentration of the influent was continually kept about 2g TAN/m³. At the HRT of 0.6hr, ammonia nitrogen removal rate of two bioreactors were about 52.6 and 51.0g TAN/m³/day, respectively. At the respect of ammonia nitrogen removal, two bioreactor showed the similar abilities. The second trial with nitrifier consortium immobilized in Ca-alginate bead was carried out to evaluate the ammonia nitrogen removal rate for 35 days. The highest ammonia nitrogen removal rate was 82g TAN/m³ when HRT was about 0.3hr.

Key word : ammonia, immobilization, nitrifier consortium, aquaculture

서론

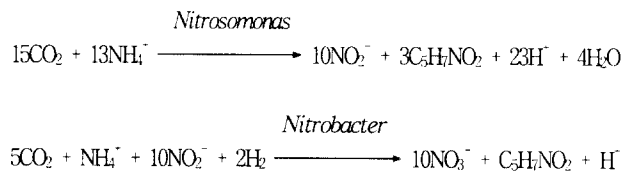
최근 경제력의 상승과 더불어 어류의 소비가 증가하는 반면 오염물질의 수계 방출로 인한 수질악화로 인하여 연근해 어장의 어류 자원이 고갈되고 있고 원양어업에서도 각국의 수자원 보호정책에 의해 타국의 자국 영해내의 조업을 금지하고 있는 상황이다.

부족한 어류 자원은 양식에 의해 보충이 가능한데 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 지속적인 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 소비지에 인접해 입지할 수 있으므로 부가가치를 높일 수 있는 장점을 지니고

있는 양식 시스템이다(1-2).

순환 여과식 양식은 어류를 고밀도로 사육함에 따라 사육조에서 발생하는 오염물질의 양도 많으므로 발생하는 오염물질의 효과적이고 신속한 제거가 요구된다. 사육조에서 어류의 대사작용과 미설취 사료와 어분의 분해에 의해서 발생하는 암모니아는 어류에 유해한 영향을 끼친다(3-6). 수중의 암모니아는 비이온성 암모니아(NH₃)와 이온성 암모니아인 암모늄이온(NH₄⁺)으로 존재하는데 이 중 비이온성 암모니아는 어류의 세포벽을 통과하여 어류에 치명적인 피해를 주게 된다.

암모니아성 질소를 함유한 폐수의 처리공정으로는 자연적인 미생물에 의한 정화기능을 증가시킨 방법이 있는데 이를 생물학적 처리공정이라고 하며 그 화학식과 관여되는 미생물 속은 아래와 같다.



현재까지 사용되는 암모니아제거 공정은 침지식 생물막 공정, 살수 여상 공정, 회전 원판 집축 공정과 같은 지지체 표면에 자연적으로 부착되는 미생물을 이용하는 고정 생물막 공정이 주로 사용되어 왔다. 이러한 고정 생물막 공정의 경우 생물막을 형성

† Corresponding Author : Department of Chemical Engineering
Pukyong National University, Pusan, 608-737, Korea
Tel : 051-620-6861, Fax : 051-620-6860
e-mail : khsuh@dolphin.pknu.ac.kr

하는데 있어 오랜 시간이 걸리며 자연적으로 부착하기 쉬운 균이 우점종으로 밀집하게 되어 두꺼운 생물막을 형성시킨다. 이로 인해 생물막 내부에서는 혐기적 조건이 형성되고 외부에 부착된 미생물은 생물막과 유체의 접촉시 발생하는 전단응력에 의해 떨어져 나가게 됨으로써 반응기 내부의 생물함량이 낮아지게 되어 암모니아 제거효율이 저하되는 원인이 된다고 알려져 있다. 이와 같은 고정 생물막 공정의 문제점을 개선하는 방법으로 고정화 미생물을 이용한 암모니아 제거 공정에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

미생물의 고정화는 미생물을 담체에 결합시키거나 한정된 공간 내에 포획하는 것으로 생물공학 분야에 오래 전부터 이용되어 왔으며 최근에는 고정화법을 이용하여 산물의 분리 정제를 간단히 하는 방법 등을 개발하고 있다. 고정화 미생물을 이용한 생물반응기는 현재 cellulose, methane, ethanol, L-aspartic acid, L-malic acid, 페니실린의 전구물질, 아크릴아마이드 생산 등 의약, 화학품 제조분야에서는 이미 공업화되어 이용되고 있으며 생물매체를 산물과 쉽게 분리하는 수단으로 고정화법이 이용되고 있다(7-11).

이러한 고정화 미생물을 폐수 속의 오염 물질 제거에 이용할 경우 원하는 미생물을 배양하거나 순치한 후 고정화 할 수 있어 높은 효율을 얻을 수 있고 전단응력에 의한 미생물의 유실이 없어 반응기 내에 유용한 미생물을 고농도로 유지할 수 있다. 또 온도나 pH같은 환경조건이 급격히 변화하거나 독성물질이 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(12).

고정화 미생물을 이용한 폐수처리의 실험으로 암모니아 농도가 95-260mg/L인 고농도의 상태에서 98% 정도의 처리효율을 얻은 실험을 토대로 실 규모의 폐수처리 방식에 성공적으로 적용을 시킨 예가 있으나(13) 아직까지 실용화 단계로는 개발되지 못하였고 양어장의 순환수 처리에 있어서는 적용사례가 거의 없는 실정이다. 또한 실용화를 위해서는 원하는 특성을 가진 고정화 미생물의 개발이 요구되고 있다(14-15).

본 연구는 순환 양어장에서 발생하는 암모니아의 효율적인 제거를 위하여 지지체 표면에 미생물을 부착시켜 생물학적 처리를 하는 고정생물막 방식과는 달리 미생물을 alginate bead에 고정화한 후 간접 폭기식 충전 반응기에 충전하여 합성양어장수 속의 암모니아 제거실험을 수행하며 양어장 순환수중 암모니아를 효과적으로 제거하기 위한 암모니아 제거특성과 반응기 운전특성을 연구하려한다.

재료 및 방법

질화세균군

S하수처리장에 반입된 활성슬러지를 65 mesh(ϕ : 0.21 mm) standard sieve를 이용하여 헹갈물을 제거시킨 후, 질화세균군(nitrifier consortium)의 증식을 위하여 수돗물을 이용하여 Table 1에 나와 있는 기질을 조제하여 주입하면서 1개월 동안의 순양과정을 거쳤으며 고정화 전에는 미생물 주위의 기질을 없애기 위하여 증류수를 이용하여 세척한 후 원심분리를 거쳐 미생물만을 회수하여 Figure 1과 같이 고정화에 사용하였다.

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

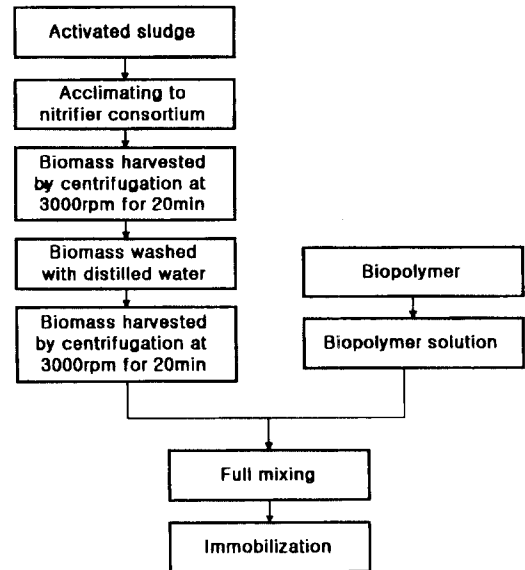


Figure 1. Block diagram for the preparation of nitrifier consortium and polymer for immobilization.

고정화 방법

질화세균군의 고정화 장치는 Figure 2와 같다. 5%(W/V) sodium alginate용액과 4%(DW/V) 질화세균군 부유용액을 동량 혼합한 후 0.1M CaCl₂ 용액과 BaCl₂ 용액에 사출하여 Ca와 Ba-alginate bead로 제조하였다. 이때 균일한 크기의 bead를 제조하기 위하여 peristaltic pump를 이용하였으며 사출기의 needle의 크기는 2mm였고 유량은 16mL/min으로 유지하였다. 사출된 bead는 각각 4°C의 0.1M CaCl₂ 용액과 BaCl₂ 용액 속에 24시간 동안 보관한 후 사용하였다.

질화 반응기

실험장치는 Figure 3에 나와 있는 형태로 반응기는 내경이 130mm 이고, 높이가 90 mm인 원통형 관을 이용하여 전체 용량이 1L가 되도록 제작하였고 반응기 중앙에는 내경이 21 mm 이고 길이가 70 mm인 draft tube를 설치하였으며 draft tube의 하부와 반응기의 내벽 사이의 원환에 미세망을 설치하여 500mL의 고정화 미생물을 충전하였다. 고정화 미생물이 충전되어 있는 지점의 상부에도 미세망을 설치하여 bead가 반응기 밖으로 유실되지 않고 주입되는 기질이 반응지역 내로 원활히 유입될 수 있도록 설계하였다. Draft tube의 하부에는 질화 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 공기

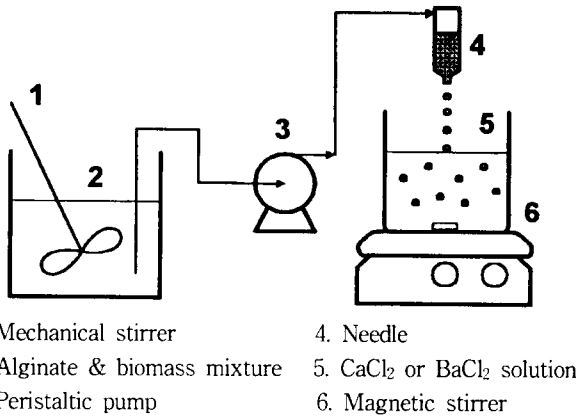


Figure 2. Schematic diagram for the immobilization apparatus.

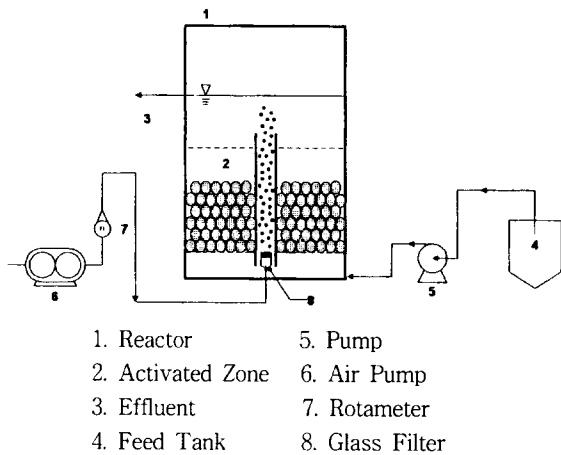


Figure 3. Schematic diagram of experimental apparatus for continuous nitrification.

의 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.

합성양어장수

본 실험에 이용된 합성양어장수는 실제 양어장수를 토대로 한 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 2g/m³이 되도록 하였으며 질화에 소모되는 알칼리도의 보충을 위해 중탄산나트륨(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
NaHCO ₃	as need

실험방법

Ba-alginate와 Ca-alginate bead 충전 반응기의 암모니아 제거실험에서는 수력학적 체류시간을 0.6 - 16.0 시간의 범위 내에서 운전하였으며 그리고 암모니아성 질소의 부하는 3.0 - 133.2 g NH₃-N/m³/day으로 두고 관찰하였다. Ca-alginate bead 충전 반응기의 암모니아 제거실험에서는 수력학적 체류시간을 2.0시간부터 0.2시간까지 운전하였으며 반응기 내의 운전온도는 27 ± 1°C가 되도록 일정하게 유지하였고 공기는 체류시간에 상관없이 0.1vvm으로 공급하였다.

분석방법

채취한 시료의 암모니아 농도의 분석은 암모니아 선택 전극법(ORION-9512BN)을 이용하였으며 pH 미터(SUN TEX SP-701)와 DO 미터(YSI-55)를 사용하여 시료 채취와 동시에 pH와 DO를 측정하였다.

결과 및 고찰

Ba-Alginate와 Ca-Alginate bead 충전 반응기의 특성 비교

일반적으로 alginate의 고정화에 사용되는 이온은 Ba와 Ca가 있다. 두 가지 이온을 사용하였을 경우 고정화 미생물의 안정성은 사용하는 환경에 의해 변할 수 있다. 본 실험에서는 질화세균균을 각각 Ba-alginate와 Ca-alginate로 고정화하여 합성양어장수 속의 암모니아성 질소의 제거 운전시 나타나는 활성 및 안정성의 변화를 관찰하여 양어장 순환수 처리에 적합한 고정화법을 선택하고자 하였다.

체류시간 변화에 따른 Ba-alginate와 Ca-alginate bead 충전 반응기의 암모니아 제거특성을 조사하기 위하여 체류시간을 16.0, 11.9, 7.0, 3.4, 1.7, 0.9 및 0.6 시간으로 변화시키는데 따른 유출수중의 암모니아의 농도를 Figure 4에 도시하였다. 수력학적 부하의 변화에 대해 Ca-alginate 반응기와 Ba-alginate 반응기의 유출수 중의 암모니아 농도는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

Figure 5는 수력학적 체류시간에 따른 암모니아성 질소의 제거속도 및 제거율을 도시한 것이다. 제거속도란 반응기 일정체적에서 일정시간동안 제거할 수 있는 양이므로 제거 속도가 최대일 때 처리량이 최대이므로 반응기의 성능이 최대라 볼 수 있다. 순환여과식 양어장의 경우 양어장수가 순환되므로 생물반응기를 한번 빠져나갈 때의 처리율도 중요하지만 1회의 흐름을 통해 제거된 암모니아의 제거율이 작다고 하더라도 재순환시 제거하여 사육조 내의 잔류 암모니아의 농도를 낮게 유지하는 것이 더 중요하므로 높은 제거율을 유지하는 것보다는 제거속도를 높게 유지하는 것이 더 중요하다고 할 수 있다. 수력학적 체류시간이 16.0 시간인 경우 암모니아성 질소의 제거율은 Ca-alginate와 Ba-alginate 반응기 모두 90% 이상의 높은 값을 보이나 암모니아성 질소의 제거속도는

2.7g TAN /m³/day정도로 낮게 나타났으며 수력학적 체류시간이 0.6시간인 경우 암모니아의 제거율은 Ca-alginate 반응기는 59%, Ba-alginate 반응기는 58%였으나 암모니아성 질소의 제거속도는 각각 52.6 과 51.0 g TAN/m³/day으로 나타나 낮은 수력학적 체류시간에서 반응기가 최대의 성능을 발휘할 수 있는

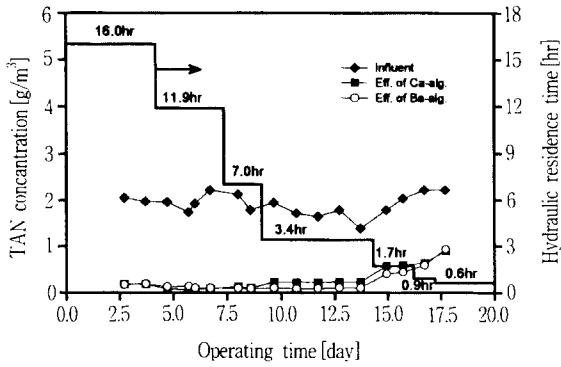


Figure 4. Variation of TAN concentration in bed bioreactor.

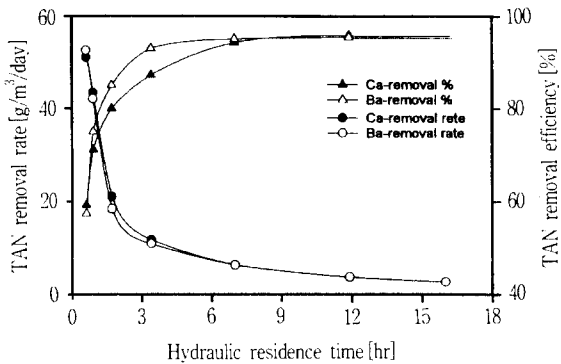


Figure 5. Changes of TAN removal rate and removal efficiency on hydraulic residence time in bioreactor.

것으로 나타났다.

질화 세균군 고정화 alginate bead의 비교 실험을 통해 두 고정화 방법의 암모니아성 질소의 제거 속도는 차이가 없으므로 밝혀졌으나 Ca 이온을 순환수가 보충해 줄 수 있으므로 Ca-alginate를 이용하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

Ca-alginate bead 충전 반응기 운전

수력학적 체류시간 변화에 따른 암모니아성 질소 제거특성을 조사하기 위하여 반응기내에 공기량은 0.1vvm으로 일정하게 주입하고 유입수의 암모니아성 질소 농도를 약 2 g/m³으로 연속 공급하면서 체류시간을 2.00, 1.00, 0.75, 0.55, 0.40, 0.30, 0.25 및 0.20시간으로 변화에 따른 유출수의 암모니아 농도는 Figure 6에 도시된 바와 같이 수력학적 체류시간이 감소함에 따라 서서히 증가하였다. 수력학적 체류시간의 변화가 있을 때 유출수의 농도는 24시간 이내에 안정된 값을 나타내었으며 체류시간이 짧아질수록 안정된 상태에 도달하는 속도가 빠른 것으로 나타났다.

수력학적 체류시간에 따른 유출수 중의 정상상태에서의 평균 암모니아 농도 변화와 암모니아 제거율은 Figure 7에 표시된 것과 같이 수력학적 체류시간이 0.4시간인 지점까지의 유출수 중의 암모니아의 농도는 그림에서 보듯이 급격히 감소하는 경향을 보이다가 체류시간이 증가하면서 유출수 중의 암모니아 농도는 대략 0.5 g TAN/m³의 범위 내에서 그 농도가 일정하게 유지되고 있음을 알 수가 있다. 암모니아의 제거율은 수력학적 체

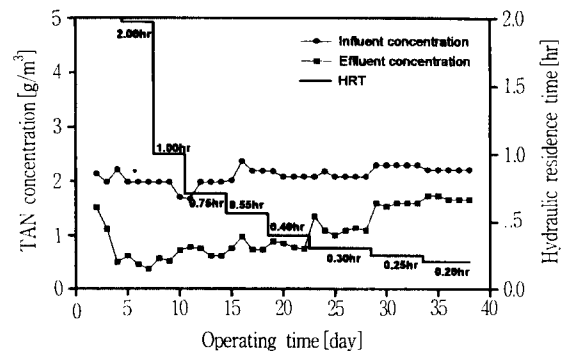


Figure 6. Variation of TAN concentration in bioreactor.

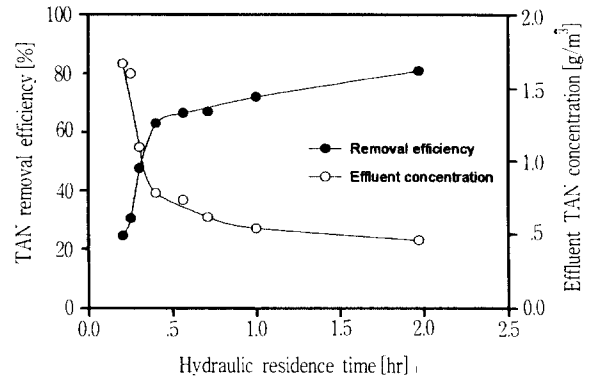


Figure 7. Changes of TAN removal efficiency and effluent concentration on hydraulic residence time.

류시간이 길수록 높은 것으로 나타났다. 제거율은 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.

Figure 8은 수력학적 체류시간에 따른 암모니아 제거속도를 도시한 것으로 수력학적 체류시간이 감소하여 유량이 증가함에 따라 암모니아 제거속도도 증가하여 0.3시간의 체류시간에서는 82g TAN/m³/day로 최대값을 나타내었고 0.3시간 이하의 체류시간에서는 암모니아 제거속도가 급격히 감소하였다. 수력학적 체류시간이 감소할수록 유출수의 농도가 증가하여 암모니아 제거율은 떨어지나 수력학적 체류시간이 감소에 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 0.3시간 이하의 체류시간에서는 TAN이 bead내부로 확산되어 제거되는 속도보다 유속이 훨씬 빠르기 때문에 미처리된 암모니아성 질소의 양이 많아졌기 때문으로 사료되었다.

본 실험에서 이용된 반응기 내의 용존산소와 pH 변화를 알아보기 위하여 반응기 상부의 유출구 부분에 DO와 pH를 측정하여 Figure 9에 도시하였다. 수력학적 체류시간의 변화에 따른 실험에서 반응기 내의 pH는 7.2-7.9 정도이고 DO 농도는 6.8-

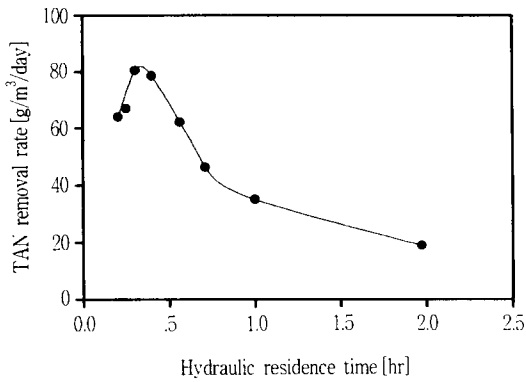


Figure 8. Changes of TAN removal rate on hydraulic residence time in bioreactor.

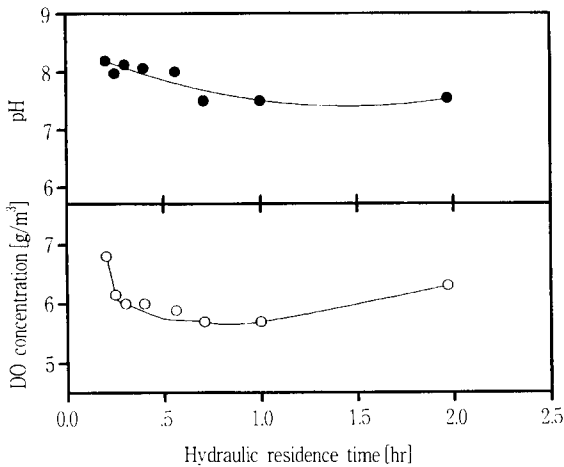


Figure 9. Changes of pH and DO consumption on hydraulic residence time in bioreactor.

5.7 g/m³ 정도의 범위를 유지할 수가 있었다. 양식장에서 일반적으로 권장되고 있는 이들의 값은 DO가 4.0 g/m³(16)에서 5.0 g/m³(17)이고 pH는 6.5 - 8의 범위이므로(18) 본 시스템을 양식장의 순환수 처리에 적용할 경우 이들에 대한 유해한 영향은 초래되지 않을 것으로 사료된다.

Figure 9에서 보는 바와 같이 수력학적 체류시간이 감소함에 따라 pH는 천천히 증가하였다. 1g의 암모니아성 질소의 질화 과정에서 요구되는 알칼리도의 소비량은 일반적으로 7.14g 정도로 보고 있다. 유입수와 유출수의 암모니아성 질소 농도차가 클 경우 즉 동일 유량에서 암모니아의 제거량이 많은 부분에서 알칼리도의 소비량도 증가하므로 pH가 낮아지는 현상이 발생한다. Figure 7에서 나타난 바와 같이 체류시간이 길수록 유입수와 유출수의 암모니아성 질소의 차가 커지는 것과 같이 pH도 체류시간이 길수록 유출수의 pH가 낮아졌으며 체류시간이 짧을 경우 동일 유량에 있어 제거되는 암모니아성 질소의 양이 적으므로 pH의 강하도 적은 것으로 나타났다.

Figure 9에 나타나는 바와 같이 수력학적 체류시간이 감소함에 따라 DO는 천천히 감소하다가 체류시간 0.5시간 이하에서는 증가하였다. 이러한 현상은 공급되는 합성양어장수가 증가함에 따라 공급되는 용액 중의 용존산소는 증가하고 암모니아 제거속도가 감소함에 따라 소용되는 용존산소량이 감소하여 나타나는

것으로 사료된다.

요 약

양어장 순환수 속의 암모니아성 질소의 제거를 위한 Ba-alginate와 Ca-alginate 반응기는 0.6시간의 수력학적 체류시간에서 51.0, 52.6 g NH₃-N/m³/day의 거의 유사한 암모니아성 질소의 제거속도를 나타내었다.

Ca-alginate를 이용한 합성양어장수 속의 암모니아성 질소의 제거 실험에서 본 반응기의 암모니아성 질소의 제거속도는 수력학적 체류시간이 0.3시간인 지점에서 82.0 g NH₃-N/m³/day로서 최고의 제거속도를 나타냈으며 이때 암모니아 제거율은 48%이었다.

수중의 암모니아의 농도가 2mg/L 정도의 범위에서는 반응기 내에 주입되는 공기량을 0.1vvm으로 공급하더라도 용존산소 농도를 7.0 - 5.6 g/m³로 유지할 수 있었으므로 질화에 필요한 용존산소량을 충분히 유지할 수가 있는 것으로 나타났으며 pH는 7.2 - 7.9의 범위를 유지할 수가 있어서 pH 변화에 따른 위해 요소는 없는 것으로 나타났다.

감 사

본 연구는 농림부에서 시행한 첨단 기술 개발 사업 연구의 97년도 연구비 지원에 의해서 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Rijn, J. V. (1996), The Potential for Integrated Biological Treatment Systems in Recirculating Fish Culture, *Aquaculture*, **139**, 181-201.
- Chin, K. K., S. L. Ong and S. C. Foo (1993), A Water Treatment and Recycling System for Intensive Fish Farming, *Wat. Sci. Tech.*, **27**(1), 141-148.
- Miller, G. E. and G. S. Libey (1984), Evaluation of a Trickling Biofilter in a Recirculating Aquaculture System Containing Channel Catfish, *Aquacultural Engineering*, **3**, 39-57.
- Roger, G. L. and S. L. Klementon (1985), Ammonia Removal in Selected Aquaculture Water Reuse Biofilters, *Aquaculture Engineering*, **4**, 135-154.
- Liao, P. B. and R. D. Mayo. (1974), Intensified Fish Culture Combine Water Reconditioning with Pollution Abatement, *Aquaculture*, **3**, 61-85.
- Spotte, S. H. (1979), *Seawater Aquariums, the Captive Environment*, p.413, Wiley, New York.
- Nakasaka, K., T. Murai, and T. Akiyama (1989), Dynamic Modeling of Immobilized Cell Reactor: Application to Ethanol Fermentation, *Biotech. & Bioeng.*, **33**, 1317-1323.
- Tanaka, H., H. Kurosawa and H. Murakami (1986), Ethanol Production from Starch by a Coimmobilized Mixed Culture System of *Aspergillus Awamori* and *Zymomonas*

- Mibilis, *Biotech. & Bioeng.*, **28**, 1761-1768.
9. Furui, M., and K. Yamashita (1985), Horizontal Baffle Effects on Compaction of Immobilized Cell Catalyst Beds, *J. Ferment. Technol.*, **63**(1), 73-78.
 10. Kim, J. H., D. K. OH, Y. H. Park, and D. A. Wallis (1985), Production of Penicillin in a Fluidized-bed Bioreactor Using a Carrier-supported Mycelial Growth, *Biotech. & Bioeng.*, **28**, 1838-1844.
 11. Arcuri, E. J., J. R. Nichols, T. S. Brix, V. G. Santamarian, B. C. Buckland, and S. W. Drew (1983), Thienamycin Production by Immobilized Cells of *Streptomyces cattleya* in a Bubble Column, *Biotech. & Bioeng.*, **25**, 2399-2411.
 12. 김의용 (1993), 고정화 미생물을 이용한 유동층 반응기에서의 폐수처리, *생물화학공*, **7**(1), 85-91
 13. Tanaka, K., M. Tada, T. Kimata, S. Harada, Y. Fujii, T. Mizuguchi, N. Mori, and H. Emori (1991), Development of New Nitrogen Removal System Using Nitrifying Bacteria Immobilized in Synthetic Resin Pellets, *Wat. Sci. Tech.*, **23**, 681-690.
 14. Furusaki, S. (1988), Engineering Aspects of Immobilized Biocatalysts, *J. Chem. Eng. J.*, **21**(3), 219-230.
 15. Karel, S. F., S. B. Libicki, and C. R. Robertson (1985), The Immobilization of Whole Cells : Engineering Principles, *Chem. Eng. Sci.*, **40**(8), 1321-1354.
 16. Environment Canada. (1979), Water Quality Sourcebook, A Guide to Water Quality Parameters, Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Ottawa.
 17. Klontz, G. W., P. C. Downey and R. L. Focht (1979), A Good Deal from Egg Sac to Creel, A Manual for Trout and Salmon Production, Sterling H. Nelson and Sons, Murray, Utah.
 18. Nightingale, J. W. (1976) Development of Biological Design Criteria for Intensive Culture of Warm and Cool Water Species, Technical Report of Krammer, Chin and Mayo Inc., Seattle. Washington.