J. Korean Fish. Soc. 30(5), 868~873, 1997 한수지, 30(5), 868~873, 1997

양어장에서 고정화된 질화세균군을 이용한 암모니아 질소 제거

서근학 · 김용하 · 안갑환*
부경대학교 화학공학과, *지산전문대학 환경관리과

Removal of Ammonia-N by using the Immobilized Nitrifier Consortium in Aquaculture System

Kuen-Hack SUH, Yong-Ha KIM and Kab-Hwan AHN*
Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, 608-737 Pusan, Korea.
**Department of Environmental Science & Technology, Jisan Junior College, 609-757 Pusan, Korea.*

Nitrifier consortium entrapped in Ca and Ba-alginate beads were packed into two reactors and studied for removing ammonia-nitrogen in aquaculture system. The ammonia-nitrogen concentration of the influent was continually kept about 2 ppm. At the hydraulic residence time of 0.6 hours, ammonia-nitrogen removal amount of two reactors was about 52.6 and 51.0 g NH_3-N/m^3/day, respectively. The ability of adjusting to an impulsive loading which was happened according to variations of HRT was better at Ba-alginate reactor, but its discrepancy was not so large. At the respect of removing ammonium-nitrogen, two reactors showed the similar ability of treating recirculating water.

Key words : Ca and Ba-alginate, aquaculture system, ammonia-nitrogen

서 론

어류를 고밀도로 사육하는 순환여과식 양식은 어류의 소비가 날로 증가하고 있는 오늘날의 식생활 문화와 잘 부합될 수 있도록 그 생산력을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라 수질오염 문제로 인하여 야기되는 양식장에서의 각종 규제를 해결할 수 있는 장점을 지니고 있는 사육시스템이다. 반면에 어류의 대사작용과 사료찌꺼기 등으로 인하여 발생되는 암모니아 및 아질산 등은 사육중인 어류에 유해한 영향을 끼친다(Miller and Libey, 1984). 일반적으로 암모니아라 함은 총암모니아로서 비이온성 NH_3와 NH_4^+의 합을 말한다. 암모니아(NH_3)는 암모늄 (NH_4^+)이라고 하는 수중 이온형태와 평형을 이루고 있다.

$$NH_3 + H_2O \rightleftarrows NH_4^+ + OH^-$$

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

식에서와 같이 pKa는 pH와 온도의 함수로서 (25℃, pKa=9.245) pH와 온도의 증가는 반응을 왼쪽으로 진행시켜 비이온화 암모니아를 증가시킨다. 위 평형이 가지는 중요한 의미는 비이온화 암모니아가 암모늄보다 수생 생물에게 유독하기 때문이다. 어류의 배설물이나 사료에 의해 발생되는 암모니아는 어류의 성장을 저해하거나 치사시키기 때문에 사육조 내의 비이온성 암모니아를 미국 환경 보호청에서는 0.02 mg/ℓ 이하로 유지하도록 권장하고 있다(Rogers and Klemetson, 1985 ; EPA, 1976). 무지개 송어를 이용한 연구에서 암모니아성 질소의 농도가 1.0 mg/ℓ 정도 증가할 경우에 혈중 산소농도는 대략 14 %가 감소하고 CO_2는 15% 정도 증가하는 것으로 보고되고 있다(Brockway, 1950).

순환여과식 양식 시스템에서 발생되는 암모니아의 제거를 위한 방안으로 최근에 들어와서는 많은 공법들이 연구되어지고 있는데, 회전원판공법 (Antonie et al., 1974; Reyes and Lawson, 1996)과 침지여상 공법 (Nijhof and Bonverdeur, 1990) 및 유동층 공법 (Jewell and Cummings, 1990)등도 여기에 속한다. 우리나라에서는 현재 양식장에서 주로 적용되고 있는 형태가 침지여상 공법으로서 다른 공법 보다도 운전 및 관리가 비교적 용이하나, 타 공법에 비해서 처리효율이 다소 낮은 단점을 지니고 있다.

미생물을 Ca 및 Ba-alginate 에 고정화시켜 입자상으로 만들어 사용할 경우에는 미생물이 반응조 밖으로 유실되지 않아 반응조 내의 미생물 농도를 고농도로 유지할 수가 있게 되어서 유입되는 폐수를 그만큼 짧은 시간안에 처리가 가능할 뿐만 아니라 미생물이 입자상을 형성함으로 인하여 미생물의 분리가 용이함과 동시에 운전 및 관리가 간편한 등의 많은 장점을 지니게 된다. 반면에 미생물을 고정화시킴으로서 발생되는 단점으로는 입자상 내로 물질전달속도의 제한에 따른 처리능력이 다소 저하

될 수가 있고 비 용존성 물질의 처리가 어렵다는 결점을 지니고 있다. 고정화 미생물을 이용한 폐수처리의 실례를 살펴본다면 암모니아 농도가 95~260 mg/ℓ인 고농도의 상태에서 98% 정도의 처리효율을 얻은 실험을 토대로 실규모의 폐수처리 방식에 성공적으로 적용을 시킨 예가 있다 (Tanaka et al., 1991 ; Tanaka et al., 1994). 그러나 이와 같은 고정화 공법을 이용한 수처리 방식은 부분적으로 일반폐수의 처리 (Hunik et al., 1994 ; Tramper et. al., 1985)에 이용되긴 했지만 양식장에서는 거의 적용되지 않고 있는 실정이다.

본 연구는 순환여과식 양식장에서 발생되는 암모니아의 효율적인 제거를 위하여 기존에 메디아 표면에 미생물을 부착시켜 수처리를 하던 방식에서 탈피하여 미생물을 입자상으로 만들어 그 자체가 메디아로서의 기능을 하도록 만들었고 그리고 draft tube의 상부 끝 부분을 높게 제작하여 shear stress로 인한 고정상 미생물입자의 깨어짐 현상을 최대한 줄일 수 있도록 고안하였다. 실험을 위하여 별도로 설계 제작한 반응기에 미리 배양해둔 질산화균을 Ca 와 Ba - alginate로 고정화시켜 입자상으로 만든 다음에 이들을 이용하여 양어장 순환수중 암모니아를 효과적으로 제거 하기 위한 운전을 수행하며 암모니아 제거특성과 운전특성을 연구하려한다.

재료 및 방법

1. 고정화법

본 실험에 사용된 미생물은 부산광역시 수영하수처리장의 활성슬러지를 65 mesh (ϕ : 0.21 mm) 체로 걸러서 먼저 협잡물을 제거시킨 후, 질화세균군 (nitrifier consortium)의 증식을 위하여 Table 1에 나와 있는 기질을 조제하여 주입하면서 1개월동안의 배양과정을 거쳤다. 증식된 질화세균군은 각각 alginate를 이용하여 미생물 농도가 5%가 되도록 고정화시켰으며, 고정화에 있어서는 $CaCl_2$ 용액과 $BaCl_2$ 용액을 이용하여 각각 Ca와 Ba-alginate bead를 만들어 여기에 미생물을 포획하여 실험에 사용하였다. 미생물의 고정화 단계는 Fig. 1에 나와 있는 것과 같다.

2. 실험장치

실험에 필요한 장치는 Fig. 2에 나와 있는 형태로 제작하여 이용하였다. 반응기는 직경이 130 mm이고 높이가 90 mm인 원통형 관을 이용하여 전체 용량이 1ℓ가 되게끔 제작하였고 반응조 하부에는 질산화 과정에서 소비되는 산소를 공급하기 위하여 glass filter (Pore size : G3)를 단 관을 air pump에 연결하였다. 이때에 공급된 공기는 길이가 70 mm이고 직경이 21 mm인 draft tube를 따라서 상향으로 이동하도록 제작하였다. 하부에서의 수류형태는 상부에서 내려온 순환수와 새로이 주입된 기질이 함께 합쳐져서 draft tube를 따라서 상승하게 된다. 본 반응기는 입자상 미생물이 포획되어 있는 지점의 상부와 하부에 미세망을 설치하여 미생물이 반응기 밖으로 유실되지 않을 뿐만 아니라 주입되는 기질이 반응지역 내로 원활히 유입될 수 있도록 설계하였다. 기질과 공기의 공급이 동시에 이루어지고 있는 draft tube의 상부 끝

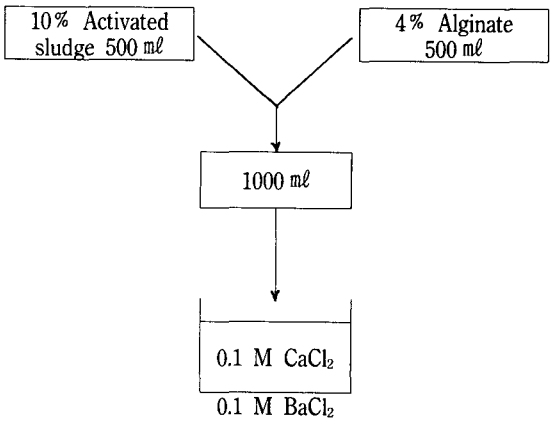

Fig. 1. Immobilizing process of bacteria

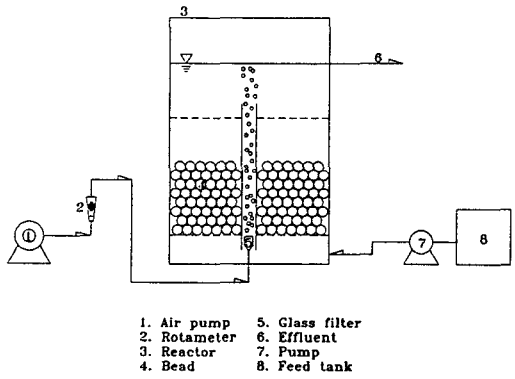

Fig. 2. Schematic diagram of Experimental Apparatus

부분을 미세망 보다도 0.5 cm가 높게 제작하여 유입수의 전단력을 최대한 감소시킬 수 있게끔 만들었다.

3. 시료조제

본 실험에 이용된 합성양어장 수의 조성은 Table 1에 나타나 있는 것과 같다. 반응기 내로 유입되는 암모니아성 질소의 공급을 위하여 NH_4Cl을 이용하였으며, pH 강

하를 막기위하여 중탄산 나트륨($NaHCO_3$)을 매 운전 때마다 필요양 주입하였다. 기질조제에 필요한 희석수는 미량원소의 공급을 위하여 수도물을 이용하였다.

Table 1. Synthetic feedstock solution

Composition	mg/ℓ
Glucose	30
Na_2HPO_4	40
$MnSO_4$	2
NH_3-N	2
$NaHCO_3$	as need

4. 실험방법

반응조 내에는 미생물이 고정화로 Ca와 Ba-alginate bead를 각각 400 mℓ을 airlift 반응기의 원환에 채운뒤에 나머지 부분에는 수도물을 이용하여 반응조 전체용량이 1 ℓ가 되도록 맞추었다. 반응조 내로 주입되는 기질의 성상은 양식장의 현장자료를 토대로 Table 1과 같다(Kim, 1995). 실험단계는 수리학적 체류시간을 0.6~16.0 시간의 범위내에서 운전하였으며 그리고 암모니아성 질소의 부하는 3.0~133.2 g NH_3-N/m^3/day으로 두고 관찰하였다. 이때 반응조 내의 운전온도는 25 ± 1℃가 되도록 일정하게 유지하였다.

5. 분석방법

본 실험에서 채취한 시료는 다음의 방법을 통하여 분석하였는데, 먼저 암모니아성 질소의 분석은 암모니아 선택 전극법(ORION-9512BN)을 이용하였고 그리고 용존산소량은 DO 미터(YSI-55)를 사용하여 분석하였다. 반응조의 운전에 있어서 미생물의 내부상태를 간접적으로 쉽게 알아볼 수 있는 척도가 되는 pH는 pH 미터(SUN TEX SP-701)를 이용하여 상시적으로 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 암모니아성 질소의 제거

반응장치에서 유입수중의 NH_3-N 농도를 대략 2 mg/ℓ 유지되도록 하며 체류시간 변화에 따른 NH_3-N 제거특성의 영향을 조사하기 위하여 반응기내에 주입되는 공기량은 0.1 vvm으로 일정하게 주입하며 체류시간을 16.0, 11.9, 7.0, 3.4, 1.7, 0.9 및 0.6 시간으로 변화시키는데 따른 유출수중의 NH_3-N 질소의 농도를 Fig. 3에 도시하였다.

본 실험에서 주어진 운전조건과 준정상상태에서 실험결과의 평균 값들은 Table 2에 수록되어져 있는 것과 같으며, 이때의 실험값은 운전이 시작된 후 미생물이 정상

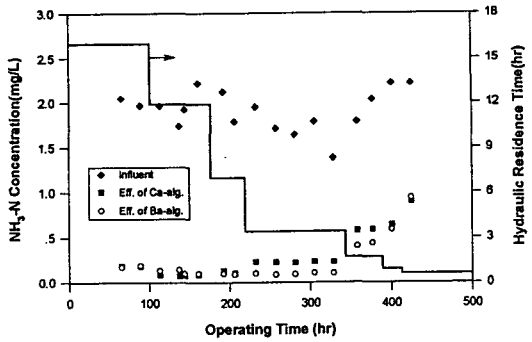

Fig. 3. Variation of NH3-N concentration during operation periods in Ca and Ba-alginate bio-reactors

상태에 도달했을 때 취한 시료를 분석한 평균값들로 구성되어져 있다. Ca-alginate와 Ba-alginate를 충진한 두 반응조에서의 암모니아성 질소의 제거효율은 Table 2에서 알 수 있듯이 전체적으로 서로 큰 차이를 보이진 않으나, 수리학적 체류시간이 3.4인 시간대 에서는 대략 7% 정도의 격차를 나타내었다. 수리학적 체류시간이 0.6~16.0 시간의 범위 내에서 암모니아성 질소의 제거효율은 두 반응조 모두를 통해서 58~96% 범위를 나타내고 있으며, 특히 Ba-alginate를 이용한 실험에서 수리학적 체류시간에 따른 제거효율이 비교적 안정된 값을 보이고 있음을 알 수가 있었다.

Table 2. NH_3-N removal by using Ca and Ba-alginate bead reactors

HRT	Inf. NH_3-N	Effluent NH_3-N (mg/ℓ)		Removal Efficiency (%)	
(hrs)	(mg/ℓ)	Ca-alginate	Ba-alginate	Ca-alginate	Ba-alginate
16.0	2.01	0.18	0.18	91	91
11.9	1.96	0.08	0.12	96	94
7.0	1.96	0.12	0.09	94	95
3.4	1.70	0.23	0.10	87	94
1.7	1.91	0.58	0.42	70	78
0.9	2.22	0.64	0.59	71	71
0.6	2.22	0.90	0.94	59	58

수리학적 체류시간에 따른 유출수 중의 암모니아성 질소의 농도는 Fig. 4에 표시된 것과 같다. 수리학적 체류시간이 3.4시간인 지점까지의 유출수 중의 암모니아성 질소의 농도는 그림에서 보듯이 급격히 감소하는 경향을 보이다가 체류시간이 증가하면서 대략 0.1 mg NH_3-N/L의 범위 내에서 그 농도가 유지되고 있음을 알 수가 있었다. 수리학적 체류시간에 따른 암모니아성 질소의 제거효율은 Fig. 4에서와 같이 Ca-alginate 반응조의 3.4 시간인 지점에서 87%로 나타났고 그리고 11.9 시간에서는

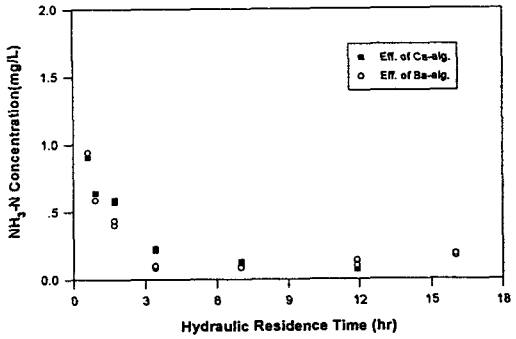

Fig. 4. NH_3-N concentration of effluent versus hydraulic residence time.

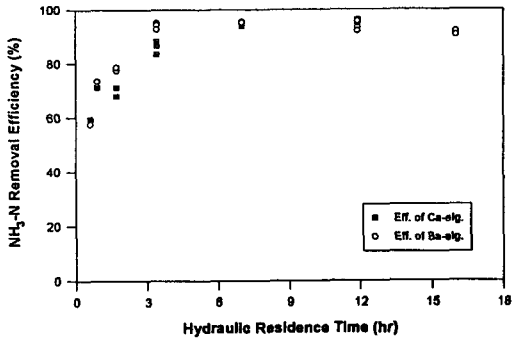

Fig. 5. NH_3-N removal efficiency versus hydraulic residence time.

제거효율이 가장 높은 96% 이라는 결과를 얻었다. 이와는 반대로 체류시간이 0.6인 지점에서는 제거효율이 59%로서 다소 낮은 값을 보였다. Ba-alginate 반응조에서의 제거효율은 수리학적 체류시간이 3.4 시간에서 Ca-alginate 반응조 보다도 높은 94%에 해당되는 값을 보였고 그리고 0.6 시간에서는 58% 으로서 서로 비슷한 경향을 나타내었다. 수리학적 체류시간이 16.0인 지점에서의 제거효율은 두 반응조 모두에서 공통적으로 91% 이라는 결과를 얻었다. 이것은 반응조 내에 들어있는 미생물 양에 비하여 주입되는 기질의 양이 적은 관계로 인하여, 기질의 농도가 낮아 암모니아제거속도(암모나아 농도에 1차식)가 감소하여 발생된 현상으로 여겨진다. Fig. 5의 자료에 의하면 수리학적 체류시간을 최소한 4.0 시간 이상인 상태로 유지할 경우에 유출수 중의 암모니아성 질소의 농도를 대략 0.1 mg/ℓ 정도의 수준에서 운전이 가능한 것으로 판단된다. 수리학적 체류시간이 3.4인 지점에서의 암모니아성 질소의 처리효율은 Ca-alginate 반응조 보다도 Ba-alginate 반응조가 7% 정도 높은 것으로 나타난 것으로 볼 때 Ba-alginate 반응조의 처리효율이 수리학적 체류시간에 의한 부하변동에 대해선 다소 완충능력이 높을 것으로 판단된다. 침지식 생물막 공법에서 cloth, corrugater skylight plate, gravel의 4가지 다른 종류의 메디아를 이용한 실험에서 수리학적 체류시간이 0.2~0.4 시간으로 운전할 경우에 유입수 중의 암모니아성 질소의 농도가 0.635~1.02 mg/ℓ가 일 때 유출수 중의 암모니아성 질소의 농도는 각각 0.547~0.945 mg/ℓ, 0.582~0.965 mg/ℓ, 0.582~0.959 mg/ℓ, 0.608~0.967 mg/ℓ의 처리결과를 보고하였다(Jea, 1987). 유동층 반응기와 오존접촉조를 함께 설치한 실험에서 체류시간이 1~61분 사이로 운전할 때 유입수중의 암모니아성 질소의 농도가 4.1 mg/ℓ일 때 유출수 중의 암모니아성 질소의 농도는 0.8~1.6 mg/ℓ로 유지가 가능하다고 하였다(Paller and Lewis, 1988).

본 반응조를 이용한 실험에서 수리학적 체류시간이 0.6시간으로 운전시 유입수 중의 암모니아성 질소의 농도가 2.22 mg/ℓ인 상태일 때 유출수 중에는 대략 0.9 mg/ℓ의 농도를 유지할 수가 있었는데, 이것은 침지식 생물막 공법 보다는 안정된 처리효율을 보이고 있으며 그리고 오존 접촉조를 함께 설치한 유동층 공법 보다는 처리 효율이 다소 낮은 것을 알 수가 있었다.

Fig. 6은 수리학적 체류시간에 따른 암모니아성 질소의 1일 제거량을 나타낸 것으로서 체류시간이 짧을수록 그 제거량은 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이것은 총량적 양으로 계산한 것이므로 단순히 암모니아성 질소의 제거효율만을 고려한 Fig. 5와는 서로 상반되는 결과를 나타내고 있다. Ca-alginate 반응조와 Ba-alginate 반응조에서 체류시간이 0.6시간인 지점에서의 암모니아성 질소의 총 제거량은 Fig. 6에서 표시된 바 각각 52.6 과 51.0 g NH_3-N/m^3/day으로 나타났으며, 16.0 시간인 경우에는 2.7 g NH_3-N/m^3/day으로서 두 반응조 모두 동일한 제거량을 보였다.

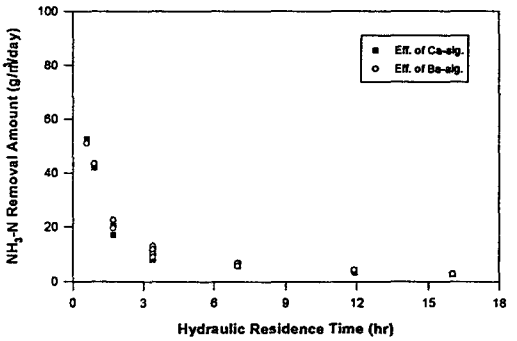

Fig. 6. NH_3-N removal amount versus hydraulic residence time.

2. 고정상 반응조내에서 DO 와 pH의 변화

본 실험에서 이용된 반응조 내의 용존산소와 pH 변화를 알아보기 위하여 반응조 상부의 유출구 부분에 DO와 pH 미터를 매 측정 때 마다 설치하여 관찰하여 Fig. 7 로 도시하였다. 수리학적 체류시간의 변화에 따른 실험에서 반응조 내의 DO 농도와 pH는 각각 4.8~5.7 mg/ℓ 그리고 7.5~7.9 정도의 범위를 유지할 수가 있었는데, 양식장에서 일반적으로 권장되고 있는 이들의 값은 DO가 5.0 mg /ℓ (Klontz, et al., 1979), 4.0 mg/ℓ (Environment Cannada, 1979)이고 그리고 pH는 6.5~8의 범위 이므로 (Nightingale, 1976), 본 시스템을 양식장의 순환수 처리에 적용할 경우 이들에 대한 유해한 영향은 초래되지 않을 것으로 여겨진다. 본 반응조의 운전에 있어서 질산화에 필요한 용존산소의 공급은 draft tube안에 설치되어있는 glass filter (Pore size : G_3)를 이용하였는데, 이때에 반응기 내로 주입되는 산소의 양은 수리학적 체류시간에 관계없이 0.1 vvm 으로서 일정하게 주입하였다. Fig. 7은 반응조내에 유지되고 있는 용존산소의 농도를 표시한 것으로서 1 mg의 NH_4^+-N가 질산화에 필요한 산소 소비량은 일반적으로 대략 4.33 mg에 해당되는 것으로 알려져 있는데, 본 실험에서도 Fig. 6에 나와 있는 암모니아성 질소의 총량적인 제거량과 비교해 볼 때 수리학적 체류시간이 0.6 시간인 지점에서 DO 농도가 낮게 나타나는 것은 산소 소모량이 증가하여 나타난 현상임을 알 수 가 있다. 이때 두 반응조 내에서의 용존산소량은 Ca-alginate에서 5.1 mg/ℓ이고 Ba-alginate가 4.8 mg/ℓ 으로서 비교적 산소의 공급이 원활하게 이루어진 것으로 보여진다.

NH_3-N 1 mg이 질산화 과정을 거칠 때 요구되는 알칼리도의 소비량은 일반적으로 7.14 mg 정도로 보고 있다. Fig. 7에서 나와 있는 것 처럼 암모니아성 질소의 제거량이 많은 부분에서 알칼리도의 소비량도 증가하므로 pH가 약간 낮게 나타나는 경향의 결과를 얻을 수가 있다.

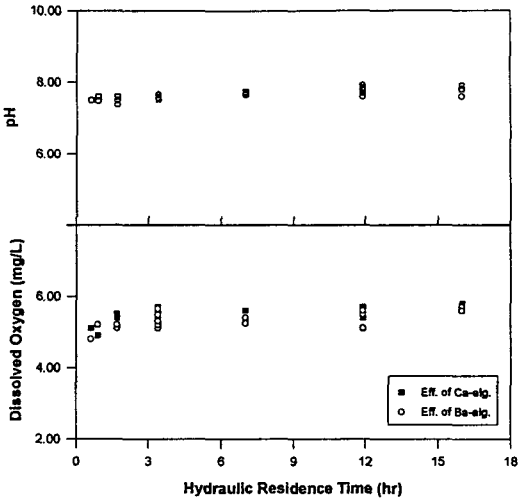

Fig. 7. DO concentration and pH variation of the effluent versus hydraulic residence time.

요 약

양어장 순환수 처리에 고정화된 질화세균을 이용한 실험에서 고정상 미생물의 상태는 마지막 단계에 까지 양호한 상태를 유지할 수가 있는 것으로 보아 shear stress에 의한 고정상 미생물 입자의 깨어짐 현상은 없는 것으로 나타났다.

본 반응기의 암모니아성 질소의 제거량은 수리학적 체류시간이 0.6인 지점에서 Ca-alginate와 Ba-alginate 반응조가 각각 52.6과 51.0 g NH_3-N/m^3/day 으로서 그 효율은 59%와 58%인 것으로 나타났으며 이는 침지식공법 보다는 제거효율이 좋은 것으로 나타났으며, 오존 산화조가 함께 연결되어 있는 유동층공법과 비교했을 때에는 그 처리능력이 다소 낮은 경향을 나타내었다.

미생물을 고정화하는데 사용된 Ca-alginate와 Ba-alginate의 비교 실험 결과 Ba-alginate를 이용한 반응조가 Ca-alginate 보다도 수리학적부하의 변화에 대한 완충능력이 다소 좋은 것으로 나타났으나 암모니아성 질소의 제거량은 Ca-alginate와 Ba-alginate 모두가 큰 차이없이 서로 비슷한 처리 능력을 지니고 있음을 알 수가 있다.

수중의 암모니아성 질소의 농도가 2 mg/ℓ 정도의 범위에서는 반응조 내에 주입되는 공기량을 0.1 vvm 으로 공급하더라도 질산화에 필요한 용존산소량을 충분히 유지할 수가 있는 것으로 나타났으며 pH는 7~7.9의 범위를 유지할 수가 있어서 pH 변화에 따른 위해 요소는 없는 것으로 나타났으며, 또한 별도의 중화제를 첨가할 필요가 없기 때문에 이것으로 인한 추가적인 경비부담은 불필요한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농림부에서 시행한 농림수산 특정연구사업의 연구결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Antonie, R.L., D.L. Kluge and J. H. Mieke., 1974. Evaluation

of a rotating disk wastewater treatment plant. J. WPCF, 46. 298~311.

Brockway, D.R. 1950. Metabolic products and their effects. Prog. Fish-Cult. 12 : 127~129.

Environment Cannada. 1979. Water Quality Sourcebook, A Guide to water quality parameters, Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Ottawa.

EPA (Environmental Protection Agency). 1976. Quality Criteria for Water. Washington D.C.

Jea, Y.O. 1987. The ammonia removal capacity of several kinds of filter media in a water reuse aquaculture system. M.S. Thesis NFUP, Korea.

Jewell, W.J. and Cummings, R.J. 1990. Expanded bed treatment of complete recycle aquaculture system. Wat. Sci. Tech., 22, 443~450.

Hunik, J.H. et al. 1994. Co-immobilized nitrosomonas europaea and nitrobacter agilis cells.

Biotech. Bioeng., 43, 1153~1163.

Tanaka, K. et al. 1991. Development of new nitrogen removal system using nitrifying bacteria immobilized in synthetic resin pellets. Wat. Sci. Tech., 23,. 681~690.

Tanaka, K. et al. 1994. Application of immobilized nitrifiers gel to removal of high ammonium-nitrogen. Wat. Sci. Tech., 29, 241~250.

Kim, J.S. 1995. Aquaculture water treatment by biofilm processes. Ph.D Thesis NFUP, Korea.

Klontz, G.W., Downev, P.C. and Focht, R.L. 1979. A good deal from egg sac to creel, Amanual for trout and salmon production, sterling H. Nelson and Sons, Murray, Utah.

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.

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., Seatle. Washington.

Nijhof, M. and J. Bonverdeur. 1990. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculating fish culture system. J. Aquaculture. 87.

Paller, M.H. and W.M Lewis. 1988. Use of ozone and fluidized-bed biofilters for increased ammonia removal and fish loadings rates. The Progressive Fish-Culturist 50, 141~147.

Reyes, A.A. and T.B. Lawson. 1996. Combination of a bead filter and rotating biological contactor in a recirculating fish culture system. Aquacultural Engineering, 15, 27~39.

Roger, G.L and S.L. Klementon. 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. Aquacultural Engineering, 4, 135~154.

Tramper, J., G.S. Borowie and A. Klapwijk. 1985. Characterization of nitrifying bacteria immobilized in calcium alginate. Enzyme. Microb. Technol., 7, 155~160.

1997년 7월 4일 접수
1997년 9월 5일 수리