

# 폭기식 잠수여상을 이용한 고밀도 양식장의 순환수 처리

## 1. 해수중의 암모니아 제거 특성

이현모 · 이재관 · 정병곤\* · 양병수

부산수산대학교 환경공학과 \*군산대학교 해양환경학과

# The Recycling Water Treatment of High Density Fish Culture System Using the Aerated Submerged Filter

## 1. Ammonia Removal Characteristics in Sea Water

Heon-Mo LEE · Jae-Kwan LEE · Byung-Gon JUNG\* and Byung-Soo YANG

*Department of Environmental Engineering, National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea*

*\*Department of Ocean Environment, Kunsan National University, Kunsan 573-360, Korea*

Submerged filter process was used to evaluate the nitrifying efficiency of ammonia in the recycling water of marine aquatic culture system.

The ammonia removal efficiency was achieved as high as 99% at the hydraulic surface loading rate of up to  $4.3\ell/m^2\text{-day}$ . And the nitrite accumulation did not occur in the reactor even when the hydraulic surface loading rate of up to  $36.8\ell/m^2\text{-day}$  was applied. In the present study, the relationship between the effluent ammonia concentration and ammonia surface loading rate was formulated as an equation.

The attachment rate of biofilm on the filter media at the ammonia surface loading rate of 62.3 and  $311.7\text{mg}/m^2\text{-day}$  was 15 and  $55\text{mg}/m^2\text{-day}$ , respectively, showing the linear relationship between the attachment rate and ammonia loading rates.

Biofilm thickness and density of the filter media were found to be the function of the ammonia loading rate.

### 서 론

고밀도 양식장의 사육조는 어류의 양에 비하여 면적이 좁기 때문에 인위적인 환경관리가 쉽고 목적에 따라 생산성 증대를 위한 수온 등 일부 환경요인의 조절이 가능하여 자연환경에서는 양식이 불가능하거나 생산성이 낮은 어류를 대량 생산할 수 있다는 이점이 있다. 특히 우리나라의 경우 저수온기가 길어 월동을 위해 가온과 보온으로 필요

한 온도를 유지하여야 하고 양식가능한 연안이 제한되어 있어 수질 환경 관리가 인위적으로 가능한 순환여과식 고밀도 양식의 필요성이 고조되고 있음은 주지의 사실이다. 그러나 이러한 폐쇄적 양식장은 비교적 좁은 사육조에서 많은 어류를 수용하므로 어류의 활동에 의한 수질 등 환경요소의 변화를 가져오기 쉽고 또 양식 어류의 밀도가 높아 집에 따라 노폐물의 축적이 심각한 문제점으로 대두되고 있다. 사육조내에서는 어류의 대사 배설물

이나 먹고 남은 찌꺼기 등이 여러가지 현탁물질로 부유하고 있으며 이들 고형물질이 분해되는 과정에서 생성되는 암모니아는 수중생물에 대하여 강한 독성을 야기시켜 큰 문제점으로 부각되고 있다.

지금까지 외국에서 개발되어 시도되고 있는 순환식 어류양식에 이용되는 고밀도 사육수의 정화 방법으로는 덴마크의 경우 회전원판법의 일종인 Euro-Matic Bio-drum을 개발하여 송어 양식에 적용하고 있으며, 독일의 경우 활성 슬러지법의 일종인 Ahrensburg system을 이용하고 있으나 소요면적이 크게 요구되는 단점을 내포하고 있으며(이, 1990) 1978년에는 Metz Mannheim사가 미생물 이용방식에 의한 어류 고밀도 양식 시스템의 개발에 착수하여 1986년에 전 세계의 양식산업에 패키지 시스템을 판매하기 시작한 바 있으나(Mewis, 1990) 현 단계는 담수어에 적용되고 있는 실정이고 그 구조가 복잡하고 고도의 운전기술이 요구되며 고가이기 때문에 우리나라 양식 현장에서는 아직은 그 적용이 어렵다고 할 수 있다.

우리나라의 경우 비교적 관리가 용이하고 효율이 높은 것으로 평가되고 있는 폭기식 잠수여상을 포함한 회전원판법(RBC) 등이 고밀도 양식어장의 수처리 방법으로 주로 설치 운영되고 있으며 이러한 수처리 시스템의 효율 등에 대한 연구 결과가 보고되어 있으나(김 등, 1987; 이 등, 1992; 원주지방환경청, 1990) 대부분이 담수 양식어장에 대한 연구이고 해산어류 양식장에 대한 연구는 대부분이 어류의 양식 기술 개발 분야에 역점을 두고 있기 때문에(장과유, 1988) 수처리 개발 측면에서는 다소 미흡한 실정이다.

현재 우리나라의 순환 여과식 고밀도 사육 시스템으로 양식을 하고 있는 해산어류 양식장의 경우 담수어의 고밀도 순환 여과식 수처리 시스템에서 얻은 경험에 의해서 도출된 설계자료를 그대로 해산어 양식장의 수처리 시스템에 적용시킴으로써 미생물의 미디어 부착의 어려움은 물론 처리 시스템에 있어서도 비경제적으로 설계 운전되고 있어 영세 양식업의 운영비를 더욱 가중시키고 있는 실정이다(Yang et al., 1992).

따라서 본연구는 해산어 양식장에 관리가 비교적 용이하면서도 효율이 좋은 폭기식 잠수여상 수처리 시스템을 위한 연구의 일환으로 해수중의 암모니아 제거효율 검토 및 미디어에 대한 미생물 부착특성 등 수처리 장치 설계를 위한 기본 설계인자를 평가하는데 본 연구의 목적을 두었다.

## 실험장치 및 방법

### 1. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같이 직경이 10cm인 아크릴 관을 이용하여 병렬 단단으로 4개를 제작하였으며, 반응조는 온도 변화에 따른 영향을 배제하기 위해  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 항온실에 설치하여 운전하였다. 유입수는 약 50ℓ 용량의 플라 스틱 저류조로부터 미량 유량 조절펌프(Cassette Pump, YSI 57)을 통해 반응조로 유입시켰다. 미디어는 두께가 0.5mm인 폴리에틸렌 판을 원통형으로 만들어 사용했으며, 충진 미디어가 부상하거나 반응조 바닥으로 가라앉는 것을 방지하기 위해 미디어 위아래에 분리판을 설치하여 반응조내에 고정시켰다. 그리고 매질 충전층의 하부 5cm, 상부 4cm의 여유를 두어 반응조 내부에서의 혼합이 원활하도록 하였다.

폭기방식은 산소의 공급과 물의 순환이 동시에 이루어지도록 내부 통류관(draft tube)을 통하여 air lift 방식으로 폭기하는 간접 폭기 방식을 택하였다. 산기석은 시중에서 판매되고 있는 직경 150mm의 원형 산기석을 사용했으며 폭기량은 0.553ℓ/min으로 하였다. 이때 순환유속은 1.75m/min였다.

본 실험에 사용된 반응조 및 미디어의 물리적인 특성은 Table 1에 제시하였다.

### 2. 실험방법

반응조의 운전특성을 평가하기 위하여 유입 해수중에 투입된 영양염류 농도는 Table 2와 같으며, 청정해역에서 직접 채수한 해수에 미량의 영양염류를 주입하여 유입수로 사용했다.

폭기식 잠수여상의 수리학적 표면 부하율에 따른 암모니아 제거 효율 및 반응조의 운전 특성을 평가하기 위하여 유입수 암모니아 농도를 평균 12mg/ℓ으로 고정하고, 수리학적 표면 부하율을 0.0043, 0.0091, 0.0164 및 0.0368m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day로 변화시키면서 실험하였다. Table 3은 본 실험에서 운전된 암모니아 표면 부하율과 수리학적 표면 부하율 및 수리학적 체류시간을 나타낸 것이다.

표면적이 22cm<sup>2</sup>인 폴리에틸렌 판 5장을 반응조 media사이에 고정시켜 운전하였고 필요시 탈리시켜 biofilm의 두께, 밀도, 부착속도를 측정하였다. 서로 다른 암모니아 표면 부하율에서 미생물막의 두께 및 밀도는 미생물 부착 초기 단계부터 미디어와 미디어 사이에 고정시켜둔 미디어 절편을 떼어내어 미생물을 완전히 탈리시킨 다음 식(1)과 식

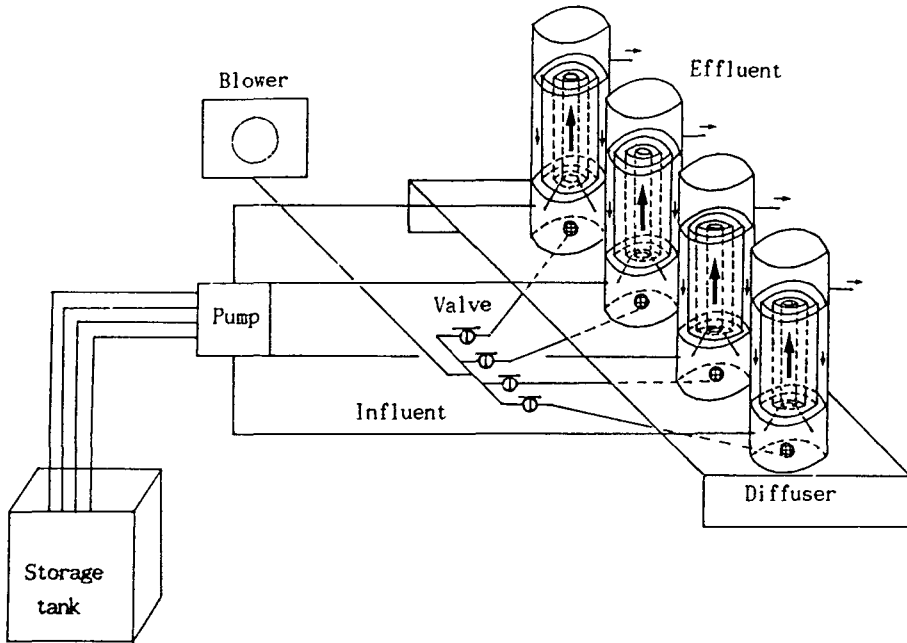


Fig. 1. Schematic diagram of experimental parallel Submerged Filter apparatus.

Table 1. Dimensions and parameters of the each experimental units of parallel aerated submerged filter

Parameter	Single-stage unit
Reactor size, <i>cm</i>	φ10×20H
Media material	Polyethylene(PE)
Thickness, <i>cm</i>	0.05
Surface area, <i>cm</i> <sup>2</sup>	2,710
Volume of tank, <i>ℓ</i>	1.3
Specific surface area, <i>m</i> <sup>2</sup> <i>m</i> <sup>3</sup>	172.6

Table 2. Composition of feed solution

Constituents	Concentration( <i>mg/ℓ</i> )
Yeast extract	10
Urea	5
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	40
NaHCO <sub>3</sub>	125
MnSO <sub>4</sub>	2
NH <sub>4</sub> Cl	38.21

Table 3. The operating characteristics of experimental units

Phase	Influent NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N( <i>mg/ℓ</i> )	Hydraulic loading rate( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>m</i> <sup>2</sup> - <i>day</i> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N loading rate( <i>mg/m</i> <sup>2</sup> - <i>day</i> )	Hydraulic retention time( <i>hours</i> )
1	12	0.0043	54.27	26.9
2	12	0.0091	112.49	12.7
3	12	0.0164	192.79	6.4
4	12	0.0368	454.07	3.1

(2)를 이용하여 구하였다(Namkung, 1990). 그리고 미생물 부착속도는 각 부하율별 실험의 시작과 동시에 새로운 미디어 절편을 기존 운전되던 미디어 사이에 고정시켜 놓고 운전을 계속하여 각 부하율

실험 종료시마다 미디어 절편에 부착된 미생물을 떼어내어 측정하였다.

$$\text{Thickness(Lf)} = \frac{\text{(Weight evaporated)}}{\text{(density of water) (surface area of media)}}$$

$$\text{Density}(X_f) = \frac{\text{mg VSS}}{(\text{biofilm thickness}) (\text{surface area of media})}$$

.....(1)

.....(2)

본 실험의 모든 분석방법은 암모니아 질소(공정 시험법, 1992)을 제외한 모든 항목의 분석은 Standard method(1989)에 따라 행하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 암모니아 제거특성

서로 다른 암모니아 표면 부하율에서 암모니아의 제거율을 평가하기 위하여 수리학적 표면 부하율을 0.0043, 0.0091, 0.0164 및 0.0368 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day로 변화시키면서 운전한 결과는 Fig. 2와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 수리학적 부하율이 증가함에 따라 유출수의 암모니아 농도가 단계적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며 동일 부하율에서 운전된 4개 반응조의 암모니아 유출수 농도가 비교적 안정하게 유사한 경향을 보이고 있다. 각 부하율을 변화시킬 때 부하 변화에 따라 4~5일 정도의 비정상

상태가 유지되다가 정상상태로 전환시 비교적 빠르게 이동되고 있음을 볼 수 있다. 또 유입수의 변동폭이 다소 있음에도 불구하고 각 부하에서 4개 반응조 공히 안정된 유출수를 얻을수 있어 부착 미생물을 이용한 수처리 공법이 부하 변동을 잘 수용하고 있음을 알 수 있다.

Table 4는 정상상태에서 얻어진 각 반응조별 수리학적 부하율, 유입 및 유출수 농도를 나타내고 있다. 암모니아 질소 유입수 평균 농도는 12mg/ℓ 였으며, 수리학적 부하율 0.0043, 0.0091, 0.0164 및 0.0368 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day에서 암모니아 제거율은 각각 99%, 97.4%, 87.4% 및 61.8%로 나타났다.

Fig. 3은 각각의 수리학적 부하율에 따른 유입수 암모니아와 유출수 암모니아, 아질산 및 질산 질소 농도를 나타낸 것이다. 특히 수리학적 부하율 0.0043 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day에서 질산화율이 99%으로써 해수에서도 2단계에 의한 질산화 즉 암모니아 질소에서 아질산 질소로 그리고 아질산 질소에서 질산 질소로 완전하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 수리학적 부하율이 낮은 경우에는 암모니아와 아질산 질소의 축적이 거의 없으나 수리학적 부하율 0.0164와 0.0368 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day의 경우 아질산 질소의 농도를 비교해 보면 수리학적 체류시간이 배 이상으로 증가하였는데도

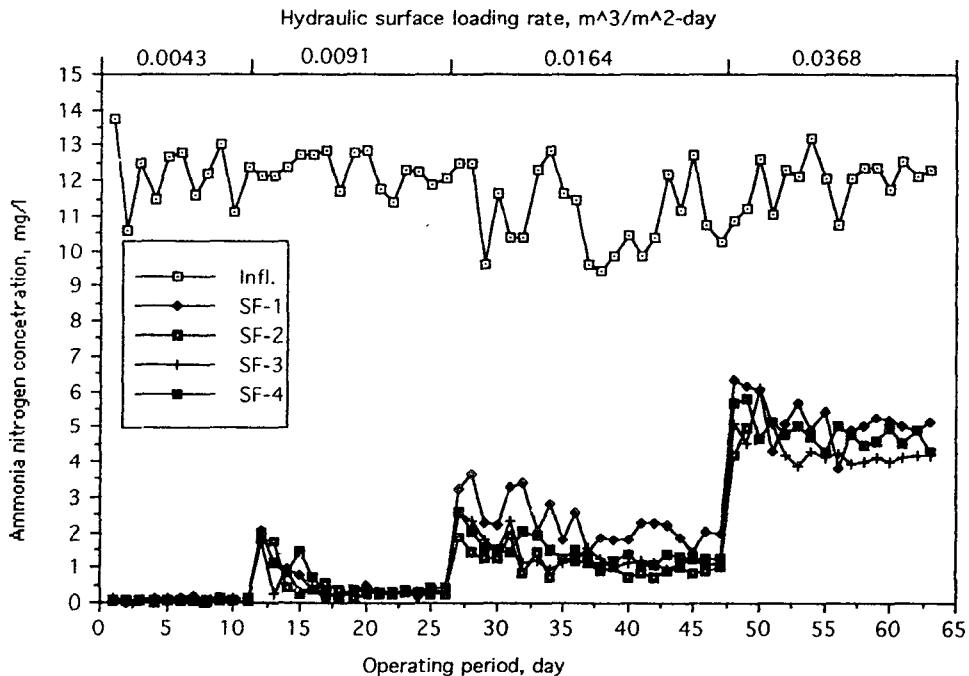


Fig. 2. Influent and effluent ammonia nitrogen concentrations versus hydraulic surface loading rate and the operating period of the four parallel submerged filter units.

Table 4. Ammonia efficiency at different hydraulic surface loading rates

Hydraulic loading rate( $m^3/m^2$ -day)	Influent conc.( $mg/\ell$ ) $NH_4^+$ -N	Unit	Effluent conc.( $mg/\ell$ )		
			$NH_4^+$ -N	$NO_2^-$ -N	$NO_3^-$ -N
0.0043	12.65	SF-1	0.0892	0.0752	10.0350
		SF-2	0.0519	0.0298	9.8654
		SF-3	0.0933	0.1006	9.0643
		SF-4	0.0622	0.0921	9.4109
		Ave.	0.0742	0.0744	9.5939
0.0091	12.35	SF-1	0.2852	0.2459	9.0756
		SF-2	0.2581	0.1481	9.8652
		SF-3	0.3384	0.2410	9.1686
		SF-4	0.4042	0.2997	9.2488
		Ave.	0.3215	0.2337	9.3396
0.0164	10.72	SF-1	2.0983	0.4227	7.5389
		SF-2	0.9720	0.2361	7.7823
		SF-3	1.1283	0.4254	8.2898
		SF-4	1.2815	0.3281	8.7719
		Ave.	1.3470	0.3531	8.0957
0.0368	12.29	SF-1	5.1383	0.3083	5.9509
		SF-2	4.5988	0.3295	6.3254
		SF-3	4.1799	0.3923	6.6842
		SF-4	4.7815	0.3081	6.8528
		Ave.	4.6999	0.3362	6.4960

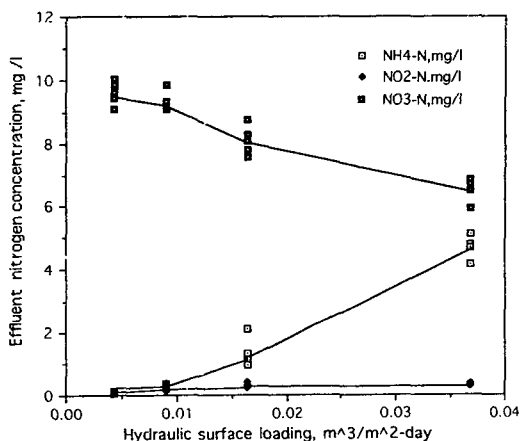


Fig. 3. Effluent nitrogen concentrations at various hydraulic surface loading rates.

아질산 질소의 농도는 축적됨이 없이 거의 같거나 오히려 낮은 경향을 보이고 있는 반면 암모니아 질소의 농도는 크게 증가하고 있다. 이러한 결과는 해수중의 암모니아 질산화에서 제한인자는 암모니아에서 아질산 질소로의 전환이 제한 단계임을 잘

나타내 주고 있다.

담수의 경우 암모니아 함유 폐수 질산화 연구에서는 암모니아 질소의 유입수 농도  $345mg/\ell$ 에서  $4.9g/m^2$ -day이상의 부하를 주었을 경우, RBC system내에서 아질산 질소가 축적되는 것으로 보고된 바 있어(남궁, 1990) 본 연구와는 상반되는 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 담수와 해수에 기인된 염분농도의 차이와 본 연구에서는 유입수  $12mg/\ell$ 의 암모니아 질소로 최대  $0.5g/m^2$ -day까지 운전한 결과로써 암모니아의 농도 및 부하율의 차이에서 기인된 것으로 평가된다.

Fig. 4는 암모니아 표면 부하율에 따른 유출수 농도를 나타낸 것이다. 암모니아 부하율이 높아감에 따라 각 반응조의 자료가 다소 분산되는 경향을 보이고 있으나 상관성이 비교적 높은 곡선 관계식을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 1ppm 이하의 처리수를 얻기 위해서는 잠수여상 표면 부하율이  $180mg NH_4-N/m^2$ -day 이하로 운전해야 되며 이때의 수리학적 표면 부하율은  $0.016m^3/m^2$ -day로 나타났다. 이는 담수의 경우에서  $1mg/\ell$ 을 얻기 위한 표면 부하율  $0.021m^3/m^2$ -day(이 등, 1992)에 비해 다소 낮

은 값이나 이는 해수에서 암모니아의 질산화율이 담수에 비해 속도가 느린데(Nijhof and Bovendeur, 1990) 그 원인이 있는 것으로 평가된다.

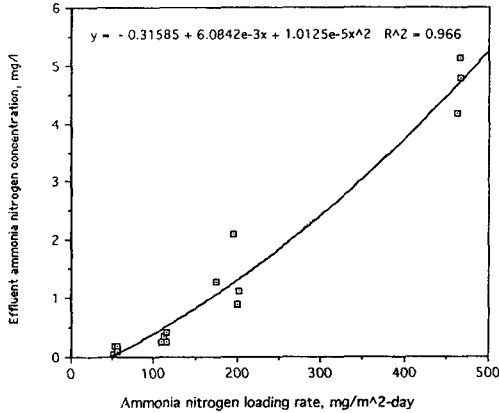


Fig. 4. Effluent ammonia nitrogen concentrations versus ammonia nitrogen surface loading rates in submerged filter unit.

2. 미생물 부착 특성

본 실험에 사용된 매디아는 넙치를 양식하고 있는 순환 여과식 양식장의 RBC 순환수에 약 4주 동안 매디아를 침적시켜서 미생물을 집중시킨 후 실험실의 항온실로 옮겨 계속해서 미생물을 부착시켰다. 초기 단계에서는 회분식으로  $5mgNH_4^+ - N/l$ 를 주입하면서 암모니아의 제거속도를 측정하였다. 일정 기간 경과 후 암모니아 제거속도가 일정 해

지자 연속흐름 형태로 바꾸어 운전하였는데 약 70일이 지나서 매디아 전체에 진한 갈색의 얇은 미생물막이 균일하게 형성되었다. 이러한 결과는 Hirayama(1974)가 20~22℃에서 질산화 미생물막을 형성하는데 약 60일정도 소요되었다는 연구보고와 유사한 값으로써 담수에 비해 미생물 부착이 비교적 느려 실제 해산어류 양식장의 수처리 시스템의 초기 운전시에 미생물 부착에 상당한 어려움이 있을 것으로 평가되었다.

각 부하율별 미생물의 두께와 밀도는 Table 5에 제시하였다.

미생물의 두께는 0.1~0.38mm 범위에 있었으며 전체 매디아에 골고루 짙은 갈색의 얇은 막이 형성되었다. 본 연구에서 관측된 미생물의 두께는 유기물을 기질로 하는 중속 영양성 미생물막에 비해 아주 낮은 편이었다.  $192mgBOD_5/l$ 의 합성 우유 폐수를 프라스틱 망으로 충전한 잠수여상의 경우 관측된 미생물 두께 1.325~1.855mm에(서와유, 1993) 비하면 10~20%정도에 달하고 있음을 알 수 있다. 이렇게 상대적으로 얇은 이유는 본 실험의 경우 유입된 암모니아 농도가 어류 양식장에서 최대로 예측될 수 있는  $12mg/l$ 정도로 낮게 유입된데 기인된 것으로 평가된다. 이러한 사실은 Table 5에서도 나타난 바와 같이 표면 부하율이  $54.27mg/m^2-day$ 로 낮은 경우 미생물막 두께는 평균 0.14mm에서, 부하율이  $454.07mg/m^2-day$ 로 가장 높은 경우에는 평균 0.32mm로 증가되고 있는 실험 결과로 볼때 암모니아의 표면 부하율이 증가되어 감에 따라 미생물막의 두께가 상대적으로 증가되

Table 5. Biofilm thickness and density at the different ammonia loading rates

Phase	Ammonia surface loading( $mg/m^2-day$ )				
	54.27	112.49	192.79	454.07	
Lf (mm)	1	0.16	0.20	0.26	0.34
	2	0.19	0.24	0.24	0.38
	3	0.12	0.16	0.20	0.28
	4	0.10	0.14	0.20	0.28
	Ave.	0.14	0.18	0.23	0.32
	Range	0.10~0.19	0.14~0.24	0.20~0.26	0.28~0.38
Xf ( $mg/cm^3$ )	1	5.655	5.595	6.136	7.003
	2	5.138	5.655	7.837	8.521
	3	8.532	7.589	8.452	8.248
	4	5.238	6.293	6.905	7.993
	Ave.	6.140	6.283	7.333	7.941
	Range	5.138~8.532	5.595~7.589	6.136~8.452	7.003~8.521

고 있는 현상을 알 수 있다. 본 연구에서 조사된 미생물 막의 미생물 밀도는  $6.140 \sim 7.94 \text{mg/cm}^3$  정도로 평균  $6.9 \text{mg/cm}^3$ 으로 나타났다. 미생물의 밀도는 암모니아 표면 증가율에 따라 미생물 막의 두께와 달리 비교적 미미한 증가를 보였으나 단위표면적당 미생물량은  $0.085 \sim 0.25 \text{mg/cm}^3$ 으로 나타났으며 이 수치는 우유를 기질로 한 종속 영양성 미생물의 미생물 막의 경우  $2.01 \sim 2.82 \text{mg/cm}^3$ 에 비해 (서와유, 1993) 역시 4.2~9%의 범위에 있었으며 acetate를 기질로 하여 얻은 값(NamKung et al, 1983)의 약 10%에 해당된다. 그러나, 본 연구의 경우 미생물의 막이 얇아서 실제 기질 제거에 크게 관여하는 활성 미생물(active mass)를 기준으로 할 경우에는 다소 차이가 좁혀질 수 있을 것으로 평가된다.

Fig. 5는 각 부하율별 미생물의 부착속도를 나타낸 것이다. 암모니아 표면 부하율이 낮은  $62.3 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 에서 미생물 부착 속도는  $15 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 이고 5배 부하율이 높은  $311.7 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 에서는  $55 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 로 2.2배 부착 속도가 증가하고 있다. 미생물의 부착속도는 그림에서도 알 수 있듯이 암모니아의 부하율에 거의 직선적인 함수 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서, 미생물 부착 속도가 느린 해수 양어장의 순환수 처리를 위한 메디아의 미생물 부착은 높은 암모니아 부하율에서 이루어지는 것이 초기 수처리 장치를 안정화시키는데 바람직한 것으로 사려된다.

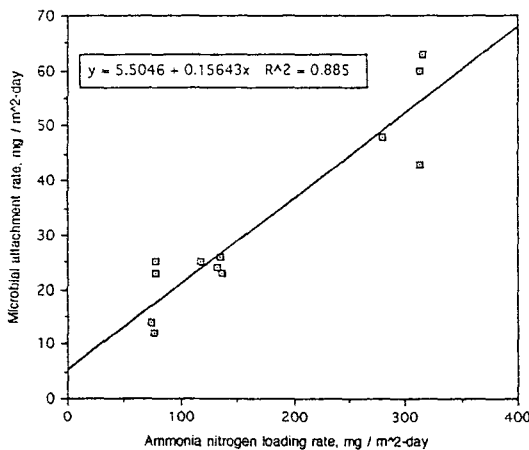


Fig. 5. Relationship between ammonia loading rates and microbial attachment rates in submerged filter unit.

## 결 론

해산어류 양식장 순환수 중 가장 문제시되는 암모니아 제거를 위해 폭기식 잠수여상 수처리 장치를 적용시켜 질산화 특성 및 기본 운전 인자 평가 실험을 실시하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 표면부하율  $4.3 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 이하에서 암모니아 제거율은 99% 이상으로 완전한 질산화가 일어났으며, 표면부하율을  $36.8 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 로 증가시켜도 반응조내 아질산의 축적은 일어나지 않는 반면 암모니아 농도가 축적되는 경향을 보여 해수 중의 질산화 속도 제한 단계는 암모니아에서 아질산으로의 산화 과정인 것으로 평가되었다.

2. 잠수여상을 이용한 어류 양식어장의 순환수 중 암모니아 제거에 있어서 암모니아 표면 부하율이  $54 \text{mg/m}^2\text{-day} \sim 454 \text{mg/m}^2\text{-day}$  범위에서 유출수 암모니아 농도와 표면 부하율은 상관성이 높은 함수 관계에 있음을 확인할 수 있었다.

3. 암모니아 표면 부하율이  $54 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 에서  $454 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 로 증가함에 따라 미생물막 두께는  $0.14 \text{mm}$ 에서  $0.32 \text{mm}$ 로 증가하는 경향을 보였으며 미생물막 밀도 역시  $6.14 \text{mg/cm}^3$ 에서  $8.0 \text{mg/cm}^3$ 로 증가하는 경향을 보여 암모니아 표면 부하율이 미생물막 두께와 밀도에 다소 영향을 주고 있는 것으로 판단된다.

4. 해수중의 암모니아 제거를 위한 부착 미생물막 공법에서 질산화 박테리아의 부착속도는 암모니아 표면 부하율이  $62.3 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 에서  $15 \text{mg/m}^2\text{-day}$ , 표면 부하율이  $311.7 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 에서  $55 \text{mg/m}^2\text{-day}$ 로 부착속도가 비교적 느리며 부착속도는 암모니아 부하율과 직선적인 상관관계를 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 부산수산대학교 해양산업개발연구소(RCOID)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- Eun Namkung, Richard G. S. and Bruce E. R. 1983. Predicting removal of trace organic compounds by biofilms. WPCF, 50.

- Hirayama, K. 1974. Water Control by Filtration in Closed System. *J. Aquaculture*, 4, 369~385.
- Mewis, N. 1990. Metz Mannheim의 물고기 양식의 첨단 신기술. 한국 송어 양식 25주년 기념집, 197~207.
- Nijhof, M. and Bonverder J. 1990. Fixed Film Nitritification Characteristics in Sea-Water Recirculating Fish Culture Systems. *J. Aquaculture*, 87.
- Rogers and Klemetson. 1976. Ammonia Removal in selected aquaculture Water Reuse Biofilter. *Aquaculture Engineering*, 4, 135~154.
- Standard Methods for the Examination of water and wastewater. 1989. 17th ed., APHA-AWWA-WPCF, washington D. C.
- Yang, B. S., Lee H. M. and Jeong, B. G. 1992. Water Quality Control in the Semiclosed Culture System Growing a Flounder. *Paralichthys Olivaceus*. *Bull. Korean Fish. Soc*, 25(3), 197.
- 김인배·김병기·지영옥, 1987. 여과지에 따른 암모니아 제거능력. *한수지*, 561.
- 남궁완. 1990. 회전원판을 이용한 고농도 암모니아 폐수처리 가능성. 대한 상하수도 학회지, 4(1), 35.
- 이석모·김도희·송교욱, 1992. 순환 여과식 양식장의 암모니아 제거를 위한 최적 수리학적 부하. *한수지*, 25(3), 176.
- 이정렬. 1990. 양어 사육수의 여과 시스템 및 기계화. 한국 송어 양식 25주년 기념집, 156~173.
- 원주지방환경청. 1990. 내수면 양식으로 인한 수질 오염 방지 대책 연구.
- 서형석·류철호. 1993. 군용 시설물 폐수처리를 위한 고정 생물막 공법의 연구. 대한 상하수도 학회지, 7(1), 37~45.
- 장영진·유성규. 1988. 순환여과 사육시스템에 의한 해산어류의 고밀도 양식가능성. 한국 양식 학회지, 1(1), 13~24.

1993년 8월 5일 접수

1993년 9월 10일 수리