

## RBC를 이용한 양어장수 암모니아 제거

김병진 · 임성일 · 서근학  
부경대학교 화학공학과

### Ammonia Removal by using RBC in Recirculating Aquaculture System

Byong-Jin KIM, Sung-Il LIM and Kuen-Hack SUH

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

Rotating Biological Contactor (RBC) was tested for the removal of total ammonia nitrogen (TAN) by using simulated aquaculture system. RBC performance was evaluated by controlling revolution rate of disk and hydraulic residence time (HRT). The optimum revolution rate of disk was 4 rpm. As HRT of RBC was increased, TAN removal efficiency of RBC and TAN concentration of rearing water were increased. HRT for maintaining lowest TAN concentration of rearing water was 9.5 minutes and at that condition TAN concentration of rearing tank was 1.03 g/m<sup>3</sup>.

Key words: recirculating aquaculture system, TAN, RBC, rpm, HRT

#### 서 론

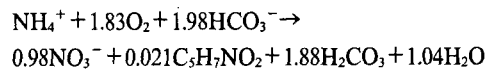
순환 여과식 양식은 사육조에서 유출된 폐수를 양어장 밖으로 방출하지 않고 물리적 및 생물학적 여과과정을 통해 오염물질을 제거한 후 재 사용하는 폐쇄적 시스템으로 최소의 용수를 이용하여 어류를 고밀도로 사육할 수 있어 생산력을 증대시킬 수 있고 배출수에 의한 수질 오염 문제로 인하여 야기되는 각종 환경적 규제를 해결할 수 있을 뿐 아니라 소비자에 인접해 입지 할 수 있으므로 부가가치를 높일 수 있는 장점을 지니고 있는 양식 시스템이다 (Rijn, 1996 ; Chin et al. 1993).

순환여과식 양식 시스템은 앞에서 언급된 장점에 반하여 미섭취 사료와 어류의 배설물 등에 의하여 발생되는 고형물, 고형물의 분해와 어류의 대사 작용에 의해 발생하는 암모니아성 질소, 암모니아성 질소의 생물학적 분해과정에서 발생하는 아질산성 질소와 같은 물질을 일정 수준 이하로 제거하지 못할 경우 수질이 악화되어 어류에 각종 질병을 유발하며, 정도가 심할 경우 어류의 대량 폐사가 발생하여 막대한 경제적 손실을 초래한다.

양어장에서 발생하는 오염물질 중 암모니아는 무지개송어는 0.32 ppm, 메기의 경우 3.10 ppm에서 독성을 일으키며 (Meada, 1985), 이 이상의 농도에서는 어류에 치명적으로 작용하여 어류의 성장 제한 및 각종 질병을 유발한다. 수중의 암모니아성 질소 성분 중 이온성 암모니아보다 비이온성 암모니아는 동물의 세포벽을 통과하여 저농도에서도 어류에게 치명적인 피해를 발생시켜 (Liao and Mayo, 1974) 미국 환경 보호청 (EPA, 1976)에서는 사육조 내의 비이온성 암모니아를 0.02 mg/L 이하로

유지하도록 권장하고 있다.

순환여과식 양식 시스템에서 발생하는 암모니아의 제거는 주로 생물학적 암모니아 제거공정을 이용하고 있다. 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 (EPA, 1975 ; Sharma and Ahler, 1977).



대표적인 양어장 순환수의 생물학적 암모니아제거 공정은 침지여상공법 (Nijhof and Bovendeur, 1990 ; Carmignani and Bennelt, 1977)과 살수여상공법 (Rogers and Klementson, 1985 ; Miller and Libey, 1984), 회전원판공법 (Antonie et al, 1974 ; Wood et al, 1996) 등이 있다. 이들 기술에 대한 연구는 폐수가 반응기를 1회 통과하는 형태로 제거하고자 하는 물질의 유입 농도를 조절하여 최대의 제거율이나 제거속도를 얻는데 목적을 두고 있다. 그러나 순환여과식 양어장의 경우 일반적인 수처리 공정과는 달리 어류의 사료섭취에 따라 발생하는 미섭취 사료와 어류의 생리적 작용에 의해 발생하는 암모니아에 의해 사육조의 오염원 농도가 변화하게 되고 이로 인해 반응기로 유입되는 암모니아의 농도가 변화하게 되어 반응기에 가해지는 오염원의 부하는 변화하게 된다 (Losordo and Westers, 1994). 반응기에서 미처리된

암모니아는 일반적인 폐수처리 공정같이 시스템 밖으로 배출되는 것이 아니라 사육조로 다시 순환하므로 이로 인해 사육조 내의 암모니아 농도는 변화하게 된다. 그러므로 순환여과식 양식에서의 수처리 는 어류를 사육하는 사육조의 암모니아 농도를 적정선 이하로 유지하는 것이 중요하다.

본 실험에서는 양식장에서 많이 이용되고 있으나 최적의 운전인자가 없이 경험에 의존하여 운전되고 있는 회전원판반응기 (rotating biological contactor, RBC)를 모의 순환 여과식 양어장에 적용하여 어류에 유해한 암모니아성 질소의 사육조 내의 농도를 낮게 유지할 수 있는 운전조건을 도출하고자 하였다.

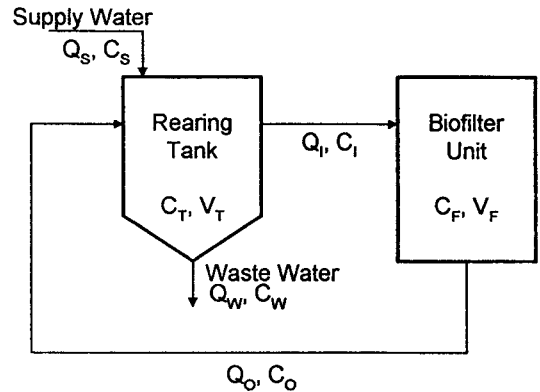


Fig. 1. Schematic diagram of recirculating aquaculture system.

## 이 론

순환 여과식 양어장에 설치 운영되고 있는 생물학적 처리장치의 최적운전인자를 도출하기 위한 실험 장치의 모식도는 Fig. 1과 같으며 수학적 modeling을 보다 간단히 하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

1. 사육조 내에서 발생하는 암모니아의 발생속도는 일정하다.
2. 계 전체에서 순환수의 증발, 누수 등에 의한 손실은 무시한다.
3. 암모니아의 제거는 생물학적 처리 장치 (biofilter unit)에서만 발생한다.
4. 사육조는 완전 혼합체이다. ( $C_T=C_I$ ) 사육조 주위의 순환수 유량의 물질 수지는 다음과 같다.

$$Q_s + Q_o = Q_w + Q_f \quad (1)$$

여기서 시스템 전체에서 증발, 누수에 의한 순환수의 손실이 없으므로 시스템으로 공급되는 보충수의 유량과 시스템 밖으로 유출되는 폐수의 유량은 동일하다. 그러므로 생물학적 처리 장치를 통과하는 순환수의 유량은 동일하다.

$$Q_s = Q_w \quad (2)$$

$$Q_o = Q_f \quad (3)$$

사육조 주변의 암모니아성 질소 (total ammonia nitrogen, TAN)에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$Q_s \cdot C_s + Q_o \cdot C_o = Q_w \cdot C_w + Q_f \cdot C_f \quad (4)$$

$Q_s$ 와  $Q_w$ ,  $Q_o$ 와  $Q_f$ 는 같으므로 다음과 같이 정리된다.

$$Q_s (C_s - C_w) = Q_f (C_f - C_o) \quad (5)$$

$\frac{Q_f}{Q_s}$ 를  $D$ 라 두고, 생물학적 처리장치의 TAN 제거율을  $R$ 이라 두면 식 (5)는 다음과 같이 정리된다.

$$R = \frac{C_f - C_o}{C_f} = 1 - \frac{C_o}{C_f}$$

$$C_o = C_f(1 - R)$$

$$D = \frac{C_s - C_w}{C_f - C_o} = \frac{C_s - C_w}{C_f \cdot R} \quad (6)$$

여기서 사육조는 완전 혼합체로 가정하였으므로  $C_T=C_I=C_w$  이라 두고 식 (6)을 사육조 내의 TAN 농도인  $C_T$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$C_T = \frac{C_s}{D \cdot R + 1} \quad (7)$$

식 (7)은 사육조내의 TAN의 농도는 사육조에 가해지는 오염물의 농도  $C_s$ , 순환수의 유량  $Q_f$ 와 보충수의 유량  $Q_s$ 의 비인  $D$ 와 생물학적 처리장치의 제거율에 의해 결정됨을 의미한다. 시스템에서 발생하는 TAN의 농도는 어류의 사육밀도, 사료 투입량, 미섭취 사료 발생량에 의해 결정되므로 시스템 관리자가 제어할 수 없으며 실제 제어가 가능한 것은  $D \cdot R$ 이다.  $D \cdot R$ 을 가장 크게 운전할 때 사육조의 TAN 농도를 가장 낮게 유지할 수 있다. 일반적으로 순환수의 유량이 커짐에 따라 생물학적 처리 장치의 TAN 제거율은 낮아지게 된다. 그러므로  $D$ 와  $R$ 의 상관 관계를 수학적으로 도출하면  $D \cdot R$ 의 최대값을

추정할 수 있으며 사육조 내의 TAN의 농도를 최저로 유지할 수 있는 운전인자를 도출할 수 있다.

## 재료 및 방법

### 실험장치

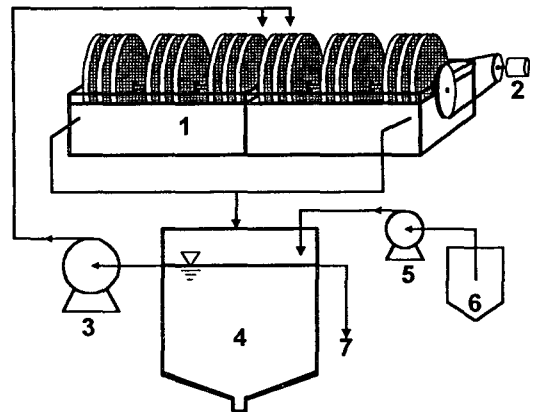
회전원판반응기는 외부에서의 관찰이 쉽게 이루어질 수 있도록 아크릴을 이용하여 제작하였으며 원판은 두께 0.2 cm, 직경 12 cm인 폴리에틸렌 원판을 질화세균의 부착이 원활하도록 하기 위하여 표면을 거칠게 만들어 사용하였다. 원판은 높이에 대하여 37.5%가 수중에 잠기도록 하였고, 나머지 부분은 대기로 노출시켜 원판에 부착되어있는 미생물에 원활한 산소의 공급이 이루어질 수 있도록 하였다. 원판의 회전은 감속 모터를 사용하여 실험 기간동안 원판 회전 속도의 변화가 없이 일정하게 회전하도록 하였다. 유입수는 총 6개의 조로 구성된 반응조의 중간 지점에서 각각 양방향으로 유입시켰으며, 이 유입수는 각각의 조에서 미생물과의 원활한 반응을 거친 후에 다음 단계로 넘어가는 3단 형식이 되도록 제작하였다. 회전원판 반응기의 액본체 부피는 3.5 L였으며 사육조의 액본체 부피는 반응기와 부피 비가 2 : 1 이 되도록 7 L로 제작하였으며, 사육조 하부에는 회전원판 반응기에서 유출되어 침전되는 폐 슬러지를 주기적으로 외부로 제거할 수 있도록 하기 위하여 하부의 cone 부분에 미세망을 설치하였다. 본 실험의 전체 시스템은 Fig. 2와 같다.

### 질화 세균균의 원판 부착

본 실험에 이용된 미생물은 부산광역시 수영 하수처리장 내 포기조의 활성슬러지를 65 mesh의 표준체로 거른 다음 이것을 다단으로 구성되어 있는 회전원판 반응기에 각각 2000 ppm 농도로 각각 250 mL씩 식중하였다. 하수처리장에서 채집하여 온 미생물의 우점종은 총속 영양체 미생물이 주종일 것으로 판단되어져 암모니아성 질소를 제거하는데 필요로 한 질화세균의 활성을 높이고 원판의 안정적 부착을 위하여 3개월간의 배양기간을 거쳤다.

### 합성 폐수

시스템에 가해지는 암모니아의 양은 어류 사육밀도를 100 kg fish/m<sup>3</sup> rearing tank, 1일 사료 공급량을 0.015 kg feed/kg fish라고 가정하고 공급사료에서 발생하는 암모니아성 질소의 분율을 3%라고 가정 (Liao and Mayo, 1974 ; Speece, 1973) 하여 다음과 같이 계산하여 45 g TAN/m<sup>3</sup>/day으로 공급하였다.



- |                       |                 |
|-----------------------|-----------------|
| 1. RBC                | 2. Motor        |
| 3. Recirculating pump | 4. Rearing tank |
| 5. Feeding pump       | 6. Feeding tank |
| 7. Overflow line      |                 |

Fig. 2. Schematic diagram for ammonia removal experiment using RBC in simulated recirculating aquaculture system.

Rearing Density : 10%

$$1 \text{ m}^3 \text{ rearing tank} \times 0.1 \frac{\text{kg Fish}}{\text{m}^3 \text{ Rearing tank}} = 100 \text{ kg Fish}$$

Feed level : 1.5%/day

$$100 \text{ kg Fish} \times 0.015 \frac{\text{kg Feed}}{\text{kg Fish}} = 1.5 \text{ kg Feed/day}$$

TAN product : 3%/feed

$$1.5 \frac{\text{kg Feed}}{\text{day}} \times 0.03 \frac{\text{kg TAN}}{\text{kg Feed}}$$

$$= 0.045 \text{ kg TAN/day} = 45 \text{ g TAN/day}$$

암모니아성 질소의 사육조 내 투입은 1일 보충하는 시스템 보충수의 양을 사육조 부피의 10%라고 산정하여 사육조 부피에 대하여 10%에 해당되는 부피인 700 mL의 합성폐수를 정량 펌프를 이용하여 29.2 mL/hr의 유속으로 사육조에 연속적으로 공급하였다.

합성 폐수의 조성은 Table 1과 같다. 유기탄소원으로 포도당 (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>)을 이용하였으며 암모니아원으로 염화암모늄 (NH<sub>4</sub>Cl)을 사용하였다. 질산화시 소모되는 알칼리도는 중탄산나트륨염 (NaHCO<sub>3</sub>)을 사용하여 공급하였으며 희석수는 염소이온의 질산화 저해 작용을 방지하기 위하여 염소이온이 비교적 적은 지하수를 이용하여 제조하였다.

### 원판 회전수 변화 실험

회전원판 반응기의 최적 원판 회전수를 알아보기 위하여 회전원판 반응기의 수리학적 체류시간을 20분으로

Table 1. Composition of synthetic feedstock solution

Component	Concentration, g/m <sup>3</sup>
Glucose	143
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	429
MnSO <sub>4</sub>	14
NaHCO <sub>3</sub>	4714
NH <sub>4</sub> Cl	1714

하여 원판의 회전수를 2, 4, 6 rpm으로 변화시키면서 원판 회전수에 따른 사육조 내의 암모니아성 질소 농도 변화와 운전 안정성을 비교하였다. 사육조의 온도는 질산화에 영향을 미치지 않도록 30°C를 유지하였으며 시료는 매일 동일한 시각에 채취하였다.

#### 수리학적 체류시간 변화 실험

수리학적 체류시간의 변화에 따른 사육조의 암모니아성 질소 및 COD 농도 변화를 알아보기 위하여 원판의 회전수를 4 rpm으로 하여 반응기의 수리학적 체류시간을 9.5, 20, 30, 40분으로 변화시키면서 사육조와 회전원판 반응기 유출수의 암모니아성 질소 농도와 COD의 변화를 측정하였으며 운전조건 및 시료 채취는 원판 회전수 변화실험과 동일하게 하였다.

#### 분석방법

실험에 필요한 수질의 분석은 TAN의 분석을 위하여 NH<sub>3</sub> 선택전극 (Orion Research Inc., 9512BN)이 부착된 Ion meter (Orion Research Inc., Model 720A)를 이용하여 이온선택성 전극법 (APHA et al., 1992)에 의해 분석하였고, COD는 산성 KMnO<sub>4</sub>법 (산업기술연구원, 1990)에 따라 시료 채취 즉시 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### RBC 반응기의 최적 원판 회전수

회전원판공법에서 원판의 회전속도는 원판에 고정화된 미생물이 대기중의 산소를 섭취하는 시간과 유입수 속의 영양성분과의 접촉시간을 결정하며 생물막 형태를 결정한다 (Wheaton et al. 1994). 원판이 회전하여 반응기 내의 폐수를 지나감에 따라 원판의 표면에는 전단응력이 발생하여 과잉 부착성장된 미생물을 탈리시킨다. 회전에 의한 전단응력에 의한 미생물의 탈리속도가 미생물의 부착속도 빠를 경우 원판에 부착되어 있는 미생물의 양은 감소하여 반응기 처리 효율을 급격히 감소시키고 탈리속도보다 부착속도가 빠를 경우 생물막이 너무 두꺼워져 생물막 내부가 혐기적 조건이 되고 이로 인해 생물막 내부로부터 미생물이 부패하여 일시에 탈리되는 현상이 발생하므로 원판 회전수를 적정 수준으로 유지하는 것이 중요하다.

본 실험에서 최적의 회전수를 구하기 위하여 반응기 내 합성양어장수의 체류시간을 20분으로 운전하면서 원판의 회전수를 2, 4, 6 rpm으로 변화시켜 모의 사육조의 암모니아성 질소의 농도 변화를 측정하였다. 원판 회전속도를 변화의 가한 후 3~7일 정도가 경과하여 사육조 내의 암모니아성 질소 농도는 정상상태에 도달하였으며 4일 이상 정상상태를 확인 한 후 회전수를 변화시켰다. 정상상태에서의 사육조와 반응기 유출수의 암모니아성 질소의 농도와 반응기의 암모니아성 질소 제거속도를 Table 2에 나타내었으며 원판의 회전수 변화에 따른 정상상태에서 나타난 회전원판 반응기의 암모니아성 질소의 제거율을 Fig. 3에 도시하였다.

Table 2. Effect of revolution velocity of disk on the removal of TAN

rpm	TAN concentration in rearing Tank, C <sub>1</sub>	TAN concentration of effluent of RBC, C <sub>0</sub>	TAN removal rate* of RBC
min <sup>-1</sup>	g/m <sup>3</sup>	g/m <sup>3</sup>	g/m <sup>3</sup> /day
2	1.38	0.18	86.40
	1.33	0.16	84.24
	1.32	0.16	83.52
	1.34	0.15	85.68
4	1.39	0.13	90.72
	1.39	0.13	90.72
	1.38	0.14	89.28
	1.39	0.14	90.00
6	1.61	0.37	89.28
	1.61	0.35	90.72
	1.56	0.34	87.84
	1.51	0.32	85.68

$$* \text{Removal rate} = \frac{(C_1 - C_0)}{t}$$

Table 2에서 보는 바와 같이 원판 회전 속도의 변화에 따른 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 2 rpm의 원판 회전 속도에서 가장 낮았으며 4 rpm인 경우 2 rpm과 거의 비슷한 사육조 수질을 나타내었으나 6 rpm에서는 2와 4 rpm에 비하여  $0.15 \text{ g/m}^3$  이상 높은 값을 나타내었다. 회전원판 반응기의 암모니아성 질소의 제거율은 원판의 회전속도가 6 rpm인 경우 80% 정도의 제거율을 나타내었으며 2와 4 rpm의 원판회전수에서 반응기의 암모니아성 질소의 제거율은 큰 차이는 없었으나 4 rpm인 경우가 90.6%의 제거율로 2 rpm의 88.0%에 비하여 약간 높은 값을 보였다.

원판의 회전수가 감소함에 따라 사육조의 수질이 양호해 지고 제거율이 높은 것은 원판의 회전수가 적을수록 원판에 발생하는 전단응력이 감소하여 부착되어있는 미생물의 양이 증가함에 따른 것으로 6 rpm의 회전 속도에서는 미생물의 탈리속도가 부착속도보다 커서 원판에 부착되어있는 미생물 양이 2와 4 rpm에 비해 적은 것으로 사료된다.

2 rpm의 경우 4 rpm일 때 보다 낮은 제거율을 나타내는 반면 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 더 낮게 나타났다. 이는 시스템에 발생하는 암모니아성 질소 부하량의 차이에서 발생하는 것으로 사료된다. 정상상태에서 시스템에 가해지는 암모니아의 부하는 제거량과 동일하므로 두 조건에서 동일한 암모니아성 질소 제거속도를 나타내어야 하나 2 rpm의 경우  $85 \text{ g/m}^3/\text{day}$  정도의 암모니아성 질소 제거속도를 나타내는 반면 4 rpm의 경우 약  $90 \text{ g/m}^3/\text{day}$ 로 2 rpm에 비하여 높은 제거속도를 보이는 것에서 알 수 있다. 암모니아성 질소 부하량이 변화하는 것은 실험 장치 주변의 온도와 습도의 변화에 따라 시스템에서 대기로 증발되는 순환수의 양이 변화하여 발생하는 현상으로 2 rpm의 실험 조건에 비해 4 rpm에서의 증발량이 더 많아 순환수 내의 암모니아성 질소의 농도가 높아 졌기 때문인 것으로 사료된다.

실험 조건 중 운전안정성이 가장 높은 것은 4 rpm으로 사육조와 반응기 유출수의 암모니아성 질소 농도의 변화가 거의 없었으며 암모니아성 질소의 제거속도도 거의 일정하게 나타났으나 6 rpm의 경우 운전 기간 중 사육조의 농도와 제거속도의 변화폭이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 원판의 회전속도가 변화함에 따라 원판에 부착된 미생물의 양이 변화함에 따른 것으로 원판 회전 속도가 4 rpm일 경우 미생물의 탈리속도와 부착속도가 가장 적절히 균형이 이루고 있는 것으로 생각된다. 본 실험의 결과 4 rpm의 원판 회전수에서 가장 안정적으로 생물막이 유지되고 가장 높은 제거율을 나타내어 본 시

스템에서의 최적의 회전수라고 결정하였다.

#### 수리학적 체류시간의 변화에 따른 사육조 내 TAN농도 변화

반응기내 합성양어장수의 수리학적 체류시간의 변화에 따른 사육조 암모니아성 질소의 농도변화를 측정하기 위하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 수리학적 체류시간을 20, 9.5, 30, 40분으로 변화하면서 52일 동안 실험을 수행하였다. 본 시스템에 가해지는 암모니아성 질소의 부하량은 사육조를 기준으로 하여  $45 \text{ g/m}^3 \text{ rearing tank/day}$ 이고 질산화 반응기인 회전원판 반응기의 부피는 사육조의 부피의 1/2이므로 반응기의 양론적 암모니아성 질소의 제거 속도는  $90 \text{ g/m}^3 \text{ reactor/day}$ 이다. 반응기가 정상상태에 도달하면 암모니아성 질소의 제거속도는 수리학적 체류시간에 관계없이 일정하므로 만일 반응기의 최대 암모니아성 질소제거속도가 부하량보다 작을 경우 사육조의

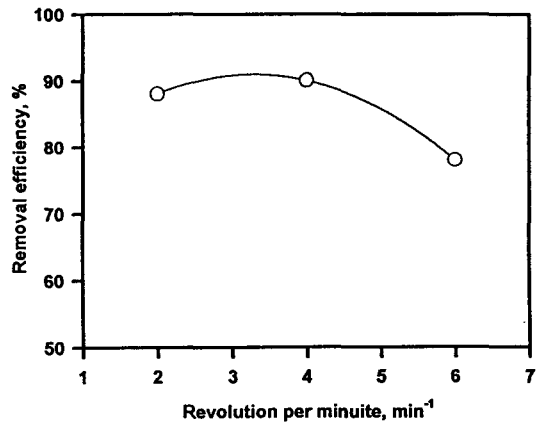


Fig. 3. Changes of TAN removal efficiency of RBC with variable revolution velocity of disk.

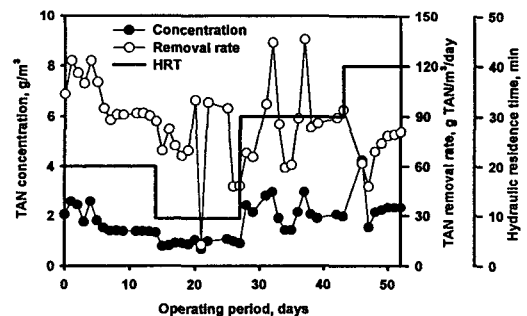


Fig. 4. Variation of TAN concentration of fishing tank and TAN removal rate on operating period.

암모니아성 질소 농도는 계속하여 증가하게 된다. 본 실험의 결과 수리학적 체류시간의 변화 후 나타난 정상상태에서의 암모니아성 질소 제거속도는  $80\sim 90\text{ g/m}^3/\text{day}$ 로 양론적인 암모니아성 질소 제거속도와 같거나 약간 낮은 값을 나타냈다. 이는 1일 공급되는 700 mL의 보충수에 의해 시스템 밖으로 유출되는 유출수속에 포함된 암모니아성 질소와 사육조 내의 미생물에 의해 제거되는 양의 변화에 의해 시스템에 가해지는 암모니아성 질소의 부하량에 비해 회전원판 반응기의 암모니아성 질소의 제거속도보다 낮은 것으로 사료된다.

원판에 부착되는 미생물의 양은 원판의 회전수 뿐 아니라 수리학적 체류시간에 의해서도 변화한다. 수리학적 체류시간이 짧을수록 반응기를 통과하는 유량이 증가하여 원판표면의 전단응력이 증대하여 미생물의 탈리속도가 커지게 된다. 운전 기간 중 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 순환수의 반응기 내의 수리학적 체류시간이 9.5분일 경우가 가장 낮게 유지되었으나 유속의 증가에 의한 전단응력의 증가에 의해 원판의 생물막이 일부 탈리되어 수질이 급격히 악화되는 현상을 나타내었다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 시스템에 수리학적 체류시간의 변화가 발생할 경우 수처리 장치에 가해지는 부하가 변화하여 수질의 변화가 발생하며 질산화 반응기가 정상상태에 도달하기까지 5~15일 정도가 소요되었다. 수리학적 체류시간이 짧아짐에 따른 수질의 변화는 크지 않았으나 수리학적 체류시간이 길어질 경우 정상상태에 도달하는 시간이 많이 소요되었다. 이러한 현상은 수리학적 체류시간이 짧아질 경우 원판에 부착되어 있는 미생물이 일정수준까지 탈리되지만 하면 정상상태에 도달하지만 체류시간이 길어질 경우 미생물이 원판에 더 많이 부착, 성장되어야 하므로 성장속도가 느린 질화세균의 경우 정상상태에 도달하는 시간이 긴 것으로 사료된다.

Fig. 5는 수리학적 체류시간의 변화에 따른 사육조의 암모니아성 질소 농도와 질산화 반응기인 회전원판반응기의 암모니아성 질소 제거율을 도시한 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 합성 양어장 순환수의 반응기 내 수리학적 체류시간이 길어짐에 따라 암모니아성 질소의 제거율은 증가하였으나 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 더 높아져 어류 사육환경에는 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 짧은 수리학적 체류시간에서 반응기의 암모니아성 질소의 제거율이 낮음에도 사육조의 암모니아성 질소 농도를 낮게 유지할 수 있는 것은 수리학적 체류시간이 짧아짐에 따라 반응기의 암모니아성 질소의 제거율이 감소하는 반면 암모니아성 질소의 제거속도가 증가하는 현상(Kim et al., 1997)과 많은 유량에 의한

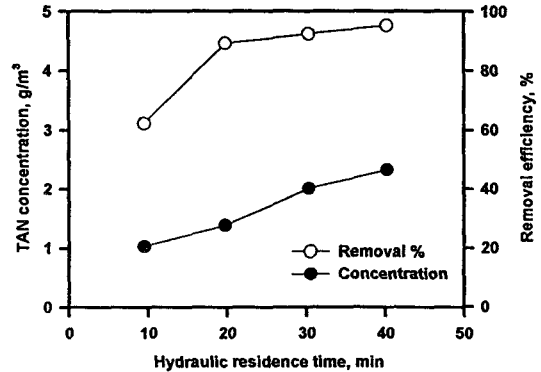


Fig. 5. Changes of TAN concentration of rearing tank and removal efficiency on hydraulic residence time of RBC.

회석 효과(Lee et al., 1992)에 기인하는 것으로 생각된다. 본 시스템의 경우 시스템 전체에 가해지는 암모니아성 질소의 부하량이 모든 수리학적 체류시간에 대해 동일하여 정상상태에서 나타나는 암모니아성 질소의 제거속도는 동일하지만 실제 반응기가 가지는 암모니아성 질소의 제거속도는 수리학적 체류시간이 짧을 경우 더 높아 사육조의 암모니아성 질소의 농도를 더 낮게 유지할 수 있는 것으로 사료된다. 또 수리학적 체류시간이 짧을 경우 사육조 내에서 발생하는 암모니아성 질소를 신속하게 생물학적 처리 장치로 유입시켜 제거함과 동시에 처리수가 유입됨으로 인해 사육조의 암모니아성 질소 농도를 낮게 유지할 수 있으나 수리학적 체류시간이 긴 경우 순환수가 사육조에서 머무르는 시간이 길어져 동일 유량에 발생하는 암모니아성 질소의 부하량이 커서 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 높은 것으로 사료된다. 그러므로 사육조 내 암모니아성 질소의 농도를 낮게 유지하기 위해서는 반응기의 암모니아성 질소 제거율을 높게 유지하는 것보다는 적절한 수리학적 체류시간의 조절을 통해 사육조에서 발생하는 암모니아를 신속히 사육조로부터 제거하여 생물학적 처리장치에서 처리하는 것이 더 중요하다고 사료된다.

#### 이론식의 적용 가능성 검토

Fig. 6은 순환수의 유량  $Q_1$ 와 보충수의 유량  $Q_2$ 의 비인  $D$ 의 변화에 대한 회전원판 반응기의 암모니아성 질소 제거율  $R$ 의 변화를 2차 선형 회귀 분석한 결과이다.  $D$ 의 변화에 따른 암모니아성 질소 제거속도의 변화는 2차 선형 회귀 곡선으로 잘 표현되었으며 결정계수  $r^2$ 은 0.9982였다. 회석률  $D$ 의 변화에 따른 암모니아성 질소의 제거율의 변화는 다음의 식으로 표현된다.

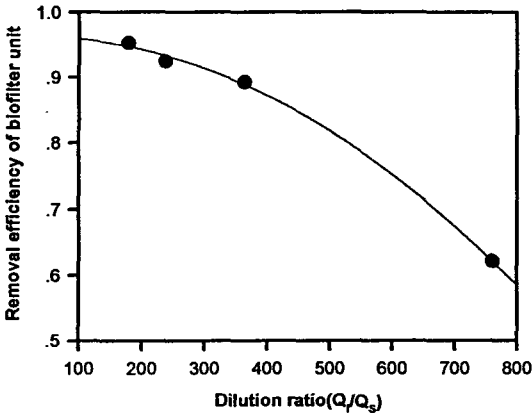


Fig. 6. Correlation between TAN removal efficiency of biofilter unit and recirculating ratio.

$$R = A \times D^2 + B \times D + C$$

$$= -6.1158 \times 10^{-7} D^2 + 1.4629 \times 10^{-5} D + 0.9643 \quad (8)$$

Fig. 7은 식 (8)을 식 (7)에 대입하여 얻어진 수리학적 체류시간의 변화에 따른 사육조의 암모니아성 질소의 농도변화와 실험에서 얻어진 결과를 비교한 것이다. 식의 적용에 있어 C<sub>s</sub>는 450 g/m<sup>3</sup>, Q<sub>s</sub>는 700 mL (7×10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>)로 하였다. 그림에서 나타나는 바와 같이 실제 장치의 거동과 수학적 해석을 통해 얻어진 결과식에 의한 계산값은 30분 이하의 체류시간에서는 거의 유사하였으나 40분의 체류시간에서는 실험값이 계산값에 비해 약간 낮게 나타났다. 이는 수리학적 체류시간이 길수록 반응기가 아닌 사육조 등의 영역에서 암모니아가 제거되는 비율이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

사육조 수질을 가장 양호하게 유지할 수 있는 생물학적 처리장치의 운전조건은 순환수의 양을 D·R을 최대가 될 수 있도록 하는 것이다. D·R을 최대로 하는 D의 조건은

$$\frac{d(D \cdot R)}{dD} = 0 \quad (9)$$

이므로 본 시스템의 경우 최적 순환비 D<sub>opt</sub>는 733으로 반응기 기준의 수리학적 체류시간은 9.82분이었으며 이때의 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 0.9477 g TAN/m<sup>3</sup>이었다.

수리학적 체류시간의 변화에 따른 COD제거

Fig. 8은 수리학적 체류시간의 변화에 따른 COD의 사육조 농도와 회전원판 반응기의 제거율을 도시한 것이다. 수리학적 체류시간에 따른 사육조 내에서의 COD

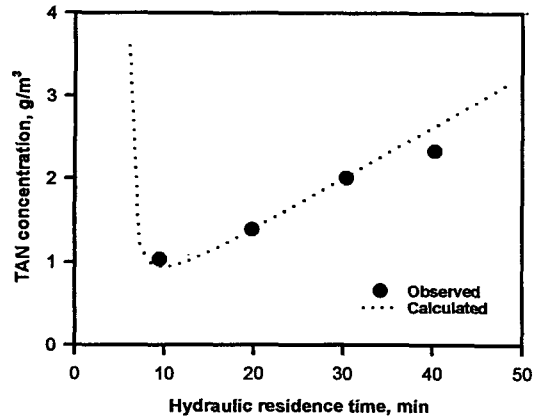


Fig. 7. Comparison of observed and calculated TAN concentration of rearing tank.

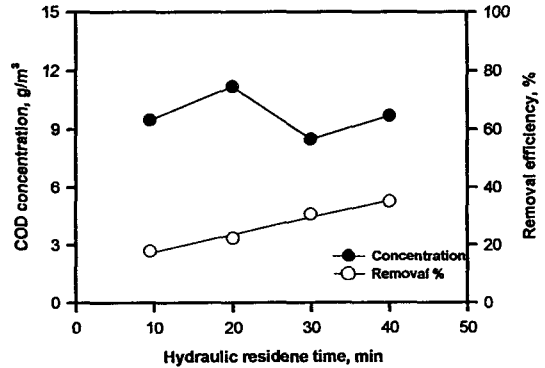


Fig. 8. Changes of COD concentration of rearing tank and TAN removal efficiency of RBC on hydraulic residence time of RBC.

농도는 8 g/m<sup>3</sup>에서 10 g/m<sup>3</sup> 사이의 대체적으로 일정한 수준을 나타내었으며 COD의 제거율은 수리학적 체류시간이 9.5분일 경우 18%를 나타내었으며 수리학적 체류시간이 증가함에 따라 제거율도 선형적으로 증가하여 40분의 체류시간에서는 35%의 제거율을 나타내었다.

회전원판 반응기의 원판에 부착되어 질화 반응을 일으키는 질화세균은 무기탄소를 탄소원으로 이용하는 자가영양체이므로 유기탄소원인 포도당을 분해할 수 없으나 (Sharma and Ahlert, 1977) 반응기에서 COD의 제거가 발생하는 것은 반응기 내부에 타가영양체 미생물이 일부 존재하는 것임을 알 수 있다. 사육조의 COD 농도는 최고 10 g/m<sup>3</sup> 정도의 저농도이므로 타가영양체 미생물의 과도한 성장에 의한 우점종화는 일어나지 않는 것으로 생각된다.

수리학적 체류시간이 길어짐에 따라 COD 제거율이 증가하는 것은 살수여상공법을 이용하여 인공양식수의

COD 제거효율의 변화를 고찰한 Kim and Lee (1996)의 결과와 같았다. 이는 수리학적 체류시간이 길어짐에 따라 반응기를 통과하는 순환수 속의 COD원인 포도당과 반응기 내의 타가영양체 미생물의 접촉시간이 길어져서 접촉기회가 증대하여 발생하는 현상으로 사료된다. 타가영양체 미생물의 수가 많지 않아 제거율은 그리 높지 않은 것으로 사료된다.

## 요 약

본 연구에서는 양식장에서 많이 이용되고 있는 RBC 반응기를 모의 순환 여과식 양어장에 적용하여 어류에 유해한 암모니아성 질소의 사육조 내의 농도를 낮게 유지할 수 있는 운전인자를 도출하고자 하였다.

본 시스템에서 사용된 회전원판 반응기의 최적 원판 회전수는 4 rpm으로 가장 안정적으로 생물막이 유지되고 가장 높은 제거율을 나타내었다. 수리학적 체류시간의 증가에 따라 회전원판반응기의 암모니아성 질소 제거율은 증가하여 40분의 수리학적 체류시간에서 95.3%로 매우 높은 값을 나타내었으나 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 2.33 g/m<sup>3</sup>으로 가장 높은 값을 나타내었으며 20분의 수리학적 체류시간에서는 암모니아성 질소의 제거율은 62.2%로 실험조건 중 가장 낮았으나 사육조의 암모니아성 질소농도는 1.03 g/m<sup>3</sup>으로 가장 낮게 나타났다.

본 시스템에서 순환수의 유량 Q<sub>i</sub>와 보충수의 유량 Q<sub>s</sub>의 비인 D의 변화에 따른 암모니아성 질소 제거율의 변화는 다음의 2차 선형 회귀 곡선으로 잘 표현되었으며 이를 사육조의 물질수지식에 적용하여 수리학적 체류시간의 변화에 따른 사육조 내의 암모니아성 질소의 농도 변화를 추정해본 결과 실험치와 거의 일치하였다.

$$R = -6.1158 \times 10^{-7} D^2 + 1.4629 \times 10^{-5} D + 0.9643$$

$$(\gamma^2 = 0.9982)$$

수학적 해석의 결과 사육조의 암모니아성 질소 발생량이 45 g/m<sup>3</sup> rearing tank/day이고 보충수의 양이 사육조 부피의 10%일 경우 최적 순환비 (D<sub>opt</sub>)는 733으로 반응기 기준의 수리학적 체류시간은 9.82분이었으며 이때의 사육조의 암모니아성 질소의 농도는 0.95 g TAN/m<sup>3</sup>으로 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

COD의 제거율은 수리학적 체류시간이 9.5분일 경우 18%를 나타내었으며 수리학적 체류시간이 증가함에 따라 제거율도 선형적으로 증가하여 40분의 체류시간에서는 35%의 제거율을 나타내었다.

사용기호

C : concentration, g/m<sup>3</sup>

Q : volumetric flowrate, m<sup>3</sup>/day

D : Dilution ratio, dimensionless

V : volume, m<sup>3</sup>

t : hydraulic residence time, min<sup>-1</sup>

R : removal efficiency of bioreactor unit, dimensionless

하첨자

F : biofilter unit

I : input to biofilter unit

O : output from biofilter unit

S : supply water

T : rearing tank

W : waste water

## 사 사

본 연구는 해양수산부에서 시행한 수산기술 첨단 기술 개발사업의 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 water treatment plant. J. WPCF. 46. 298~311
- APHA, AWWA and WEF, 1992, Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th Ed., EPS Group, pp. 4-122~4-124.
- Carmignani, G.M. and J.P. Bennelt, 1977. Rapid start-up of a biological filter in a recirculating aquaculture system containing channel catfish. Aquacultural Engineering. 3, 39~57.
- 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, 141~148.
- Environmental Protection Agency, 1975, Process design for nitrogen control, Office of technology transfer, Cincinnati, Ohio.
- Environmental Protection Agency, 1976, Quality criteria for water, Washington D. C. Kim, J.S. and B.H. Lee, 1996, Recirculating water treatment of aquaculture by using trickling filter processes, J. Korean Fish Soc., 29, 230~237 (in Korean).
- Kim, S.K., I.S. Kong, J.K. Seo, B.J. Kim, M.G. Lee, K.H.



- Suh, 1997, Removal of total ammonia-nitrogen (TAN) using immobilized nitrifier consortium, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, 12, 543~549 (in Korean).
- Lee, S.M., D.H. Kim and K.O. Song, 1992, Optimal hydraulic loading for ammonia control in water recycling fish culture system, *Bull. Korean Fish. Soc.* 25, 176~180 (in Korean).
- Liao, P.B. and R.D. Mayo, 1974, Intensified fish culture combine water reconditioning with pollution abatement, *Aquaculture*, 3, 61~85.
- Losordo, T.M. and H. Westers, 1994, System carrying capacity and flow estimation, *Aquaculture water reuse system : engineering design and management*, M.B. Timmons and T.M. Losordo eds, Elsevier, Amsterdam, pp. 14~19.
- Meada, J.W., 1985. Allowable ammonia for fish culture. *Progressive Fish-culturist*. 47, 135~148.
- 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.
- Nijhof, M. and J. Bonverdeur, 1990. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculating fish culture system. *J. Aquaculture*, 87, 133~143.
- Rijn, J.V., 1996, The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture, *Aquacultural*, 139, 181~201.
- Roger, G.L. and S.L. Klementson., 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquacultural Engineering*, 4, 135~154.
- Sharma B. and R. C. Ahlert, 1977, Nitrification and nitrogen removal, *Water Research*, 11, 897~925.
- Speece, R.E., 1973, Trout metabolism characteristics and the rational design of nitrification facilities for water reuse in hatcheries, *Trans. Amer. Fish. Soc.*, 102, 323~334.
- Wheaton, F.W., J.N. Hochheimer, G.E. Kaiser, M.J. Krones, G.S. Lievey and C.C. Easter, 1994, Nitrification filter principle, *Aquaculture water reuse system : engineering design and management*, M.B. Timmons and T.M. Losordo eds, Elsevier, Amsterdam, pp. 155.
- 산업기술연구원, 1990, 환경오염공정시험법, pp. 117~118.

---

1998년 5월 20일 접수

1998년 8월 25일 수리