

## 회전속도와 수리학적 체류시간이 회전원판식(Rotating Biological Contactor; RBC) 여과조의 암모니아 제거에 미치는 영향

오승용\* · 조재윤<sup>1</sup> · 김종만  
한국해양연구원 자원연구본부, <sup>1</sup>부경대학교 양식학과

## Effects of Rotational Speed and Hydraulic Residence Time on the Ammonia Removal of a Rotating Biological Contactor (RBC)

Sung-Yong Oh\*, Jae-Yoon Jo<sup>1</sup> and Jong-Man Kim

Marine Resources Laboratory, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea  
<sup>1</sup>Department of Aquaculture, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Performance of a biological filter, the rotating biological contactor (RBC), is affected by rotational speed and hydraulic residence time (HRT). A RBC with a disc diameter of 62 cm, total surface area of 48.28 m<sup>2</sup>, volume of 0.34 m<sup>3</sup>, and submergence ratio of 35.4% was tested for the combinations of five rotational speeds (1, 2, 3, 4 & 5 rpm) and three HRT (0.5, 1.0 & 2.0 hr) to find out the maximum removal efficiencies of total ammonia nitrogen (TAN) and nitrite nitrogen of a simulated recirculating aquaculture system. Ammonia loading rate in the system was 25 g of TAN/m<sup>3</sup>·day. Removal efficiencies were checked when TAN concentrations in the system stabilized for 3 days in each treatment. The concentration of TAN in the system decreased with increasing rotational speed of the RBC up to 4 rpm in all HRT ( $P < 0.05$ ). At the rotational speed of 5 rpm, the efficiencies decreased in all HRT ( $P < 0.05$ ). When the rotational speeds were 1, 2, 3, 4, and 5 rpm, TAN concentrations in the system were 1.35, 0.94, 0.69, 0.66, and 0.76 mg/L at the 0.5 hr HRT, 2.86, 1.18, 0.96, 0.87, and 1.11 mg/L at the 1.0 hr HRT, and 5.30, 2.44, 1.99, 1.77, and 2.01 mg/L at the 2.0 hr HRT, respectively. The TAN removal efficiencies of the RBC at the rotational speeds of 1, 2, 3, 4, and 5 rpm were 32.9, 49.5, 65.1, 72.9, and 62.9% in 0.5 hr HRT, 33.1, 74.1, 87.1, 95.8, and 78.5% in 1.0 hr HRT, and 35.5, 76.7, 89.6, 97.0, and 85.5% in 2.0 hr HRT, respectively. TAN removal efficiency of RBC per pass increased with increasing HRT. However, TAN concentration in the system also increased. The best operating condition among the treatments was obtained at the treatment of 0.5 hr HRT and 4 rpm ( $P < 0.05$ ). The TAN concentration was 0.66 mg/L. Concentrations of nitrite nitrogen (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N) in the system decreased with increasing rotational speed in all HRT while that in the system increased with increasing HRT in all rotational speeds. The ranges of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N concentrations at HRT of 0.5, 1.0, and 2.0 hr in the system were 0.26~0.32, 0.31~0.56, and 0.43~1.45 mg/L, respectively. The ranges of daily removal rates of TAN in this system were 20.03~23.0 g TAN/m<sup>3</sup>·day and those of nitrite nitrogen were 19.65~30.25 g NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/m<sup>3</sup>·day.

**Keywords:** Recirculating aquaculture system, RBC, TAN, Rpm, HRT

### 서론

순환여과식 양식 시스템은 공간 이용을 효율적으로 할 수 있으며 노동 효율을 높일 수 있고 또한 양식에 의한 주위 환경 오염을 최소화 할 수 있는(Ackefors and Enel, 1992) 환경친화적 양식 방법으로, 대부분의 사육수를 여과시켜 재 사용하면서 어류를 고밀도로 수용하여 사육하는 집약적 양식 방법이다(Arbiv and van Rijn, 1995). 따라서 순환여과식 양식 시스템은 먹이 공

급으로 인해 생성된 노폐물의 여과·정화 작용을 위한 인위적인 처리 장치가 필수적이고, 이 장치의 성능에 따라 양식의 성공 여부가 좌우된다(Delos Reyes and Lawson, 1996).

순환여과식 양식 시스템 내에 발생하는 노폐물 중 가장 중요한 것은 미섭취 사료와 어류 고형 배설물 등의 유기 노폐물과 이들 유기 노폐물의 분해와 어류의 대사 작용에 의해 발생하는 암모니아를 들 수 있다. 이 암모니아는 어류에게 독성을 띠며, 집약적 양식 시스템 내에 방양량과 생산성을 제한하는 주요 인자로 간주되고 있다(Cai and Summerfelt, 1992).

순환여과식 양식 시설 내 암모니아 제거를 위한 가장 일반적

\*Corresponding author: syoh@kordi.re.kr

인 방법은 질산화를 위한 생물여과조를 이용하는 것으로, 대표적인 생물여과조에는 침지식(Nijhof and Bovendeur, 1990), 살수식(Rennert, 1992) 및 회전원판식(Westerman et al., 1993) 등이 있다. 이 중 회전원판식(rotating biological contactor; RBC) 여과조는 순환여과식 양식 시스템에 성공적으로 이용되고 있으며(Rogers and Klemetson, 1985), 전반적인 질산화 효율 역시 다른 형태의 생물 여과조보다 좋은 결과를 보였다(Delos Reyes and Lawson, 1996).

순환여과식 양식 방법의 특성상 생물여과조에서 미처리된 암모니아는 일반적인 폐수처리 공정같이 시스템 밖으로 배출되는 것이 아니라 사육조로 다시 순환하므로 사육조의 암모니아 농도를 사육생물의 폐사, 성장 저해, 대사 불균형 등의 피해가 없도록 적정 농도 이하로 유지하는 것이 중요하다. 또한 적절한 수질 환경과 어류의 빠른 성장 그리고 낮은 생산비용은 서로 상관관계를 가지며, 이용된 수처리 시설의 효율에 따라 달라지기 때문에 이와 같은 여과시설이 최고의 성능을 유지하도록 해주는 것이 필수적이다(Twarowska et al., 1997).

RBC의 성능에 가장 중요한 운전인자는 수리학적 체류시간(hydraulic residence time; HRT)과 여과매질의 회전속도라고 알려져 있다(Hochheimer and Wheaton, 1998). 지금까지 순환 여과식 양식 시설에서 이용되고 있는 RBC의 성능에 대한 연구는 어느 정도 수행되었지만(Delos Reyes and Lawson, 1996; Hochheimer and Wheaton, 1998) 소규모의 실험이 대부분이고, 우리나라의 순환여과식 양식장에서 여과재료로 많이 사용되고 있는 썬라이트 판으로 만든 RBC가 상품으로 나와 있지만 이에 대한 HRT와 회전수를 고려한 최적 운전 조건이 구명되어 있지 않다. 따라서 본 실험에서는 모의 사육조 내에 총암모니아성 질소(total ammonia nitrogen; TAN)의 농도를 적절하게 유지하는데 필요한 운전 조건을 알아보기 위하여 주요 운전인자인 여과매질의 적정 회전속도와 여과조를 거처가는 HRT를 변화시켜 가면서 모의 사육조 내 주요 수질 인자인 암모니아성 질소, 아질산성 질소 농도 변화를 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 실험 장치

실험에 이용된 RBC (Fig. 1)는 가로 70 cm, 세로 90 cm, 높이 60 cm (용적 380 L)의 직육면체 나무 수조로 제작하고 실험 기간동안 수량은 340 L를 유지하였다. 여과조 옆에 340 L 용적의 모의 사육조를 설치하여 정량펌프(천세 Feeder, Model VX-14, Model AX 1-21)를 사용해 유량을 조절하며 순환시켰으며, 여과매질은 플라스틱으로 된 스카이라이트 골판을 원판 형태로 제작하였다. 지름이 62 cm인 원판 80장을 체인이 연결된 축에 끼워 감속모터를 이용하여 회전시켰으며, 이 때 속도 조절기(Shin Myung Servo, Model SC-2290D)를 통해 실험기간 동안 회전속도의 변화를 일정하게 조절하였으며, 원판은 45°의 각도

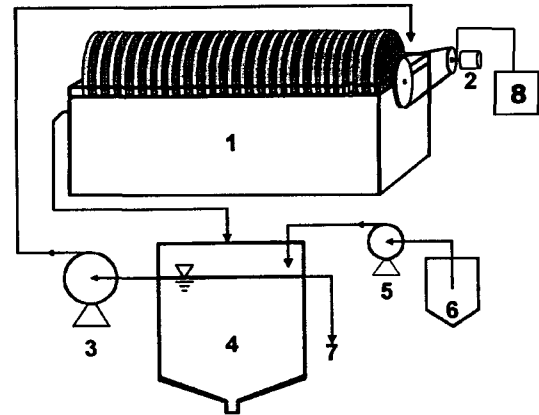


Fig. 1. Schematic diagram of a simulated recirculating aquaculture system used for this experiment. 1. RBC 2. Motor 3. Recirculating pump 4. Rearing tank 5. Feeding pump 6. Feed tank 7. Overflow line 8. Speed controller.

로 축에 끼워 넣어 원판의 끝이 서로 어긋나게 하였다. 동일한 크기와 형태의 RBC 3 set를 실험에 이용하였으며, 이 때 각 RBC 여과매질의 총표면적은 48.28 m<sup>2</sup>였으며, 원판의 침지율은 35.4±0.1%로 유지하여 원판에 부착되어 있는 미생물에 원활한 산소의 공급이 이루어지도록 하였다.

### 질산화 세균막의 원판 부착

실험에 이용된 RBC 여과매질에 질산화 세균막의 형성을 위해 부산광역시 수영 하수 처리장 포기조의 활성슬러지를 65 mesh 표준체로 걸러 고형 찌꺼기를 제거한 후 각각의 RBC에 340 L씩 식중하였다. 이 때의 미생물 농도는 4,878 mg/L였으며, 초기 미생물의 대부분이 중속영양세균일 것으로 판단되어 질산화 세균의 우점과 원판의 안정적 부착을 위해 5개월간의 부착 기간을 거쳤다.

### 합성폐수 조제

시스템 내 암모니아 부하량은 Oh (2001)에 의해 제시된 자료를 토대로 25 g/m<sup>3</sup>·day의 암모니아 부하율로 합성폐수를 조제하였으며, 합성폐수의 사육조 내 유입은 1일 시스템 보충수의 양을 모의 사육조 부피의 10%로 산정하여 34 L/day를 정량 펌프를 이용하여 모의 사육조에 연속적으로 주입하였다. 사용된 합성폐수의 성분은 Rogers and Klemetson (1985)의 방법을 참조하여 조제하였으며, 암모니아원으로 황산암모늄((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 유기탄소원으로 글루코스(C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>)를 그리고 인산염원으로 제 2인산나트륨(Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)을 사용하였다. 질산화시 소모되는 알칼리도를 보충하기 위해 중탄산나트륨(NaHCO<sub>3</sub>)을 이용하였다. 모든 합성폐수는 지하수를 이용하여 매일 40 L 조제하였으며, 조성은 Table 1과 같다.

### 실험 방법

RBC의 여과 효율이 정상상태에 도달하면 각 수질인자에 대

**Table 1.** Composition of the synthetic wastewater used in the present experiment

Composition	Concentration (g/m <sup>3</sup> )
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1183.3
NaHCO <sub>3</sub>	3431.6
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	391.0
Glucose	306.4
MnSO <sub>4</sub>	19.0

한 물질수지는 유입되는 합성폐수 농도가 일정하게 유지될 때 RBC의 제거속도도 일정하게 유지되며, RBC의 여과 효율에 따라 시스템 밖으로 overflow 되는 배출수 또는 RBC 배출수의 농도가 달라지게 된다. 그러므로 순환 시스템 내에서 RBC의 성능 평가는 overflow되는 배출수, 즉 사육조의 농도 또는 RBC 배출수의 농도를 통해 알 수 있으며 만약 이 농도가 낮게 유지된다면 RBC에서의 제거속도가 높음을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 실제 사육 생물을 건강하게 성장시키는데 필요한 모의 사육조 내 각 수질인자의 농도를 적절히 유지하기 위한 운전조건을 조사하였다.

RBC의 회전속도와 수리학적 체류시간 변화에 따른 수질 변화와 각 수질 인자의 제거효율을 알아보기 위해, 25 g TAN/m<sup>3</sup>·day의 암모니아 부하량에서 RBC로 유입되는 수량을 시간당 680 L, 340 L, 170 L로 조절하여 여과조 내 HRT를 0.5, 1, 2시간으로 변화시켰으며, 각 HRT에 대해 원관의 회전속도를 1, 2, 3, 4, 5 rpm (revolution per minute)으로 변화시켜 가면서 모의 사육조의 총암모니아성 질소(total ammonia nitrogen; TAN)와 아질산성 질소 농도 변화를 조사하였다. 실험 기간 동안 수온은 26.7±0.5°C였으며, pH는 7.7±0.1로 유지되었다.

**Table 2.** Effects of rotational speed and hydraulic residence time (HRT) of the RBC on removal rate of total ammonia nitrogen (TAN) in a simulated recirculating aquaculture system

HRT	Rotational speed	TAN concentration in rearing tank, C <sub>1</sub>	TAN concentration of effluent of RBC, C <sub>0</sub>	TAN removal rate of RBC
hr	Rpm	mg/L*	mg/L*	g/m <sup>3</sup> ·day*
0.5	1	1.35±0.05 <sup>a</sup>	0.90±0.06 <sup>a</sup>	21.25±0.30 <sup>a</sup>
	2	0.94±0.03 <sup>b</sup>	0.48±0.05 <sup>b</sup>	22.37±1.34 <sup>a</sup>
	3	0.69±0.07 <sup>cd</sup>	0.24±0.06 <sup>cd</sup>	21.57±0.62 <sup>a</sup>
	4	0.66±0.05 <sup>d</sup>	0.18±0.05 <sup>d</sup>	22.90±0.69 <sup>a</sup>
	5	0.76±0.02 <sup>c</sup>	0.28±0.02 <sup>c</sup>	23.00±1.35 <sup>a</sup>
1	1	2.86±0.07 <sup>a</sup>	1.91±0.07 <sup>a</sup>	22.71±1.18 <sup>a</sup>
	2	1.18±0.06 <sup>b</sup>	0.31±0.03 <sup>b</sup>	21.02±0.68 <sup>a</sup>
	3	0.96±0.01 <sup>c</sup>	0.12±0.01 <sup>c</sup>	20.04±1.35 <sup>a</sup>
	4	0.87±0.01 <sup>d</sup>	0.03±0.07 <sup>c</sup>	20.03±1.67 <sup>a</sup>
	5	1.11±0.14 <sup>bc</sup>	0.24±0.09 <sup>b</sup>	20.87±1.36 <sup>a</sup>
2	1	5.30±0.04 <sup>a</sup>	3.42±0.08 <sup>a</sup>	22.58±0.94 <sup>a</sup>
	2	2.44±0.09 <sup>b</sup>	0.57±0.05 <sup>b</sup>	22.49±0.91 <sup>a</sup>
	3	1.99±0.06 <sup>c</sup>	0.21±0.03 <sup>c</sup>	21.37±0.56 <sup>a</sup>
	4	1.77±0.09 <sup>d</sup>	0.05±0.02 <sup>d</sup>	20.60±1.02 <sup>a</sup>
	5	2.01±0.17 <sup>c</sup>	0.29±0.09 <sup>c</sup>	20.55±1.04 <sup>a</sup>

\*Values within the same column in each HRT with different letters are significantly different ( $P<0.05$ ).

## 분석 방법

시료는 매일 채수하였으며, 모의 사육조와 RBC 배출수의 TAN 분석은 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 분석하였다. pH는 pH meter (Orion Research Inc., Model 720A), 수온은 DO meter (KRK, KDO-5151, Japan)를 이용하였으며, 아질산성 질소 분석은 분광광도계(DR 2000, HACK Co., USA)를 이용하여 측정하였다.

## 통계 처리

통계 처리는 STATISTIX 4.0(Analytical Software, USA) 통계 프로그램으로 ANOVA test를 실시하여 최소 유의차 검정(LSD)으로 평균간 유의성( $P<0.05$ )을 검정하였다.

## 결 과

### 총암모니아성 질소 농도 변화

RBC 여과매질의 질산화 성능은 회전속도 변경 후 3-6일 후 안정되어 정상상태에 도달하였으며, 3일 이상 정상상태를 확인 후 회전속도를 변경하였다. 각각의 HRT에 대해 회전속도별로 모의 사육조와 RBC 배출수의 TAN 농도 변화와 RBC의 일간 TAN 제거속도 변화를 Table 2에 나타내었고, 또 각각의 유입수와 배출수의 농도 차에 의한 TAN 제거효율을 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2에서 보는 바와 같이 각각의 HRT에 대해 회전속도가 빨라질수록 모의 사육조와 RBC 배출수의 TAN 농도가 낮아지다가 적정 회전속도 이상에서는 높아지는 경향이 나타났다. HRT

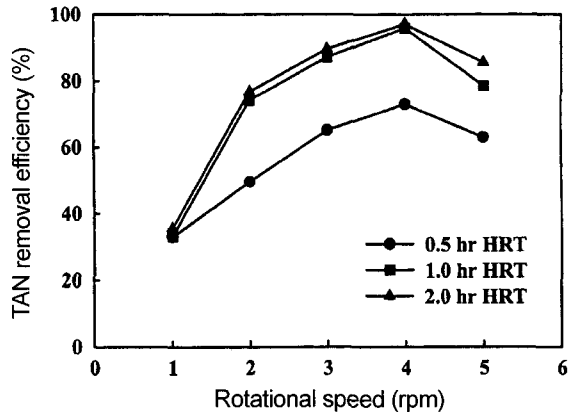


Fig. 2. Average TAN removal efficiency of the RBC under the conditions of five rotational speeds in rpm (revolution per minute) and three hydraulic residence times (HRT).

0.5시간의 경우 회전속도가 빨라질수록 모의 사육조의 TAN 농도가 낮아져 4 rpm에서 0.66 mg/L로 가장 낮게 나타났으나 3 rpm의 0.69 mg/L와는 유의적인 차이를 보이지 않았고( $P>0.05$ ), 5 rpm에서는 0.76 mg/L로 높아지는 결과를 보였다( $P<0.05$ ). RBC에서 처리된 배출수 역시 회전속도가 빨라질수록 TAN 농도가 낮아져 4 rpm에서 0.18 mg/L로 가장 낮았으나 3 rpm의 0.24 mg/L와는 차이가 없었다.

HRT 1시간의 경우도 회전속도가 빨라질수록 모의 사육조의 TAN 농도가 낮아져 4 rpm에서 0.87 mg/L로 가장 낮았으나 5 rpm에서 1.11 mg/L로 높아졌다. RBC 배출수 역시 회전속도가 빨라질수록 TAN 농도가 낮아져 4 rpm에서 0.03 mg/L로 가장 낮아졌으나 5 rpm에서 0.24 mg/L로 높아졌다.

HRT 2시간 역시 HRT 0.5와 1시간의 경우와 마찬가지로 회전속도가 빨라질수록 사육조 TAN 농도가 낮아져 4 rpm에서 1.77 mg/L로 가장 낮았으나 5 rpm에서는 2.01 mg/L로 높아졌다. RBC 배출수 역시 회전속도가 빨라질수록 TAN 농도가 낮아져 4 rpm에서 0.05 mg/L로 가장 낮았으나 5 rpm에서 0.29 mg/L로 높아지는 결과를 보였다.

실험된 모든 HRT에서 나타난 TAN 제거속도는 가해지는 암모니아 부하율보다 약간 낮은 20.03~23.00 g TAN/m<sup>3</sup>·day의 범위였고, RBC 여과매질의 표면적으로 본 TAN 제거속도는 0.14~0.16 g TAN/m<sup>2</sup>·day 범위였으나 유의적인 차이를 보이지 않았다( $P>0.05$ ).

TAN 제거효율의 경우 Fig. 2에서 보는 바와 같이 각각의 HRT에서 회전속도가 빨라질수록 증가하는 결과를 보였다. HRT 0.5, 1, 2시간 모두의 경우 회전속도가 빨라질수록 제거효율이 증가하여 4 rpm에서 각각 72.9, 95.8, 97.0%로 가장 높은 제거효율을 보였고 이때 RBC 원판 주변속도(peripheral speed)가 0.13 m/sec로 나타났다. 그러나 원판 주변속도가 0.16 m/sec인 5 rpm에서는 TAN 제거효율이 각각 62.9, 78.5, 85.5%로 감소하는 결과를 보였다.

실험 결과 HRT 0.5, 1 그리고 2시간 모두 4 rpm의 회전속도 조건에서 사육조의 TAN 농도가 가장 낮게 유지되고 TAN 제거효율이 가장 높은 것으로 나타났으며, 이 중 HRT 0.5시간과 4 rpm의 조건에서 모의 사육조 TAN 농도가 0.66 mg/L로 가장 낮게 나타났다.

HRT 변화에 따른 사육조 내 TAN 농도 변화는 Table 2에서 보는 바와 같이 실험된 모든 회전속도에 대해 수리학적 체류시간이 길어질수록 모의 사육조 내 TAN 농도가 유의적으로 높아지는 결과를 보였다( $P<0.05$ ). RBC의 회전속도 4 rpm에서 사육조 내 TAN 농도는 가장 낮았으나 역시 HRT가 길어질수록 농도가 높아지는 결과를 보였다.

TAN 제거효율의 경우 HRT가 길어질수록 TAN 제거효율은 증가하는 경향을 보였다. RBC의 회전속도 1 rpm의 경우 HRT가 길어질수록 TAN 제거효율이 각각 32.9, 33.1, 35.5%로 증가하는 경향이었으나 유의적인 차이는 없었다( $P>0.05$ ). 그 이외의 RBC의 회전속도 2, 3, 4, 5 rpm에서는 HRT 0.5시간보다 HRT 1시간과 2시간의 TAN 제거효율이 높은 것으로 나타났지만( $P<0.05$ ) HRT 1시간과 2시간 사이의 TAN 제거효율에는 차이가 없었다( $P>0.05$ ). 따라서, RBC를 거처가는 HRT가 길어질수록 사육조 내 TAN 농도는 상승하지만 제거효율은 증가하는 결과를 보였다.

#### 아질산성 질소 농도 변화

HRT와 RBC 원판의 회전속도 변화에 따른 모의 사육조와 RBC 배출수의 NO<sub>2</sub>-N 농도 및 제거속도 변화를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보는 바와 같이 HRT 0.5시간의 경우 모의 사육조 내 NO<sub>2</sub>-N 농도는 0.26~0.32 mg/L로 회전속도에 따른 유의적인 차이는 보이지 않았으며, RBC의 회전속도 1 rpm에서는 RBC 배출수의 NO<sub>2</sub>-N 농도가 오히려 증가하여 축적되는 결과를 보였다. RBC에서 처리된 배출수는 회전속도가 빨라질수록 NO<sub>2</sub>-N 농도가 낮아져 3 rpm에서 가장 낮은 0.15 mg/L의 농도를 보였으나 5 rpm에서는 0.23 mg/L로 증가하는 결과를 보였다. NO<sub>2</sub>-N 제거속도 역시 회전속도가 빨라질수록 증가하여 RBC의 회전속도 4 rpm에서 가장 높은 26.90 g NO<sub>2</sub>-N/m<sup>3</sup>·day의 제거속도를 보인 반면, 5 rpm에서는 제거속도가 24.92 g NO<sub>2</sub>-N/m<sup>3</sup>·day로 감소하였다.

HRT 1시간의 경우도 역시 HRT 0.5시간과 마찬가지로 RBC의 회전속도 1 rpm에서는 RBC 유출수의 NO<sub>2</sub>-N 농도가 오히려 증가하여 축적되는 결과를 보였다. 모의 사육조 내 NO<sub>2</sub>-N 농도는 회전속도가 빨라질수록 감소하여 5 rpm에서 가장 낮은 0.31 mg/L의 농도를 보였고, RBC 배출수 역시 회전속도가 빨라질수록 농도가 감소하여 4 rpm과 5 rpm에서 0.15 mg/L로 가장 낮은 농도를 보였다. NO<sub>2</sub>-N 제거속도 역시 RBC의 회전속도에 따라 증가하여 4 rpm에서 가장 높은 26.43 g NO<sub>2</sub>-N/m<sup>3</sup>·day의 제거속도를 보였으나, 5 rpm에서 24.63 g NO<sub>2</sub>-N/m<sup>3</sup>·day로 감소하는 결과를 보였다.

**Table 3.** Effects of rotational speed and hydraulic residence time (HRT) of the RBC on removal rate of nitrite nitrogen ( $\text{NO}_2^-$ -N) in a simulated recirculating aquaculture system

HRT	Rotational speed	$\text{NO}_2^-$ -N concentration in rearing tank, $C_1$	$\text{NO}_2^-$ -N concentration of effluent of RBC, $C_0$	$\text{NO}_2^-$ -N removal rate of RBC
hr	Rpm	mg/L*	mg/L*	$\text{g/m}^3 \cdot \text{day}^*$
0.5	1	0.32±0.02 <sup>a</sup>	0.36±0.03 <sup>a</sup>	19.65±0.77 <sup>c</sup>
	2	0.30±0.03 <sup>a</sup>	0.25±0.04 <sup>b</sup>	24.61±1.57 <sup>b</sup>
	3	0.26±0.03 <sup>a</sup>	0.15±0.01 <sup>c</sup>	26.69±0.60 <sup>ab</sup>
	4	0.26±0.06 <sup>a</sup>	0.17±0.03 <sup>c</sup>	26.90±1.13 <sup>a</sup>
	5	0.27±0.04 <sup>a</sup>	0.23±0.03 <sup>b</sup>	24.92±1.55 <sup>ab</sup>
1	1	0.36±0.04 <sup>cd</sup>	0.40±0.03 <sup>a</sup>	21.91±0.31 <sup>c</sup>
	2	0.56±0.03 <sup>a</sup>	0.38±0.04 <sup>a</sup>	25.50±0.63 <sup>ab</sup>
	3	0.45±0.05 <sup>b</sup>	0.23±0.05 <sup>b</sup>	25.24±0.37 <sup>ab</sup>
	4	0.42±0.03 <sup>bc</sup>	0.15±0.04 <sup>c</sup>	26.43±1.06 <sup>a</sup>
	5	0.31±0.06 <sup>d</sup>	0.15±0.02 <sup>c</sup>	24.63±0.64 <sup>b</sup>
2	1	0.43±0.03 <sup>d</sup>	0.31±0.05 <sup>c</sup>	24.02±0.66 <sup>b</sup>
	2	1.45±0.01 <sup>a</sup>	0.81±0.02 <sup>a</sup>	30.25±0.59 <sup>a</sup>
	3	1.08±0.23 <sup>b</sup>	0.43±0.12 <sup>bc</sup>	29.17±1.33 <sup>a</sup>
	4	0.90±0.14 <sup>bc</sup>	0.48±0.08 <sup>b</sup>	25.60±0.83 <sup>b</sup>
	5	0.72±0.03 <sup>c</sup>	0.40±0.02 <sup>bc</sup>	24.43±1.25 <sup>b</sup>

\*Values within the same column in each HRT with different letters are significantly different ( $P < 0.05$ ).

HRT 2시간의 경우 모의 사육조 내  $\text{NO}_2^-$ -N 농도는 1 rpm에서 가장 낮은 0.43 mg/L였고 2 rpm에서는 1.45 mg/L로 증가하였다가 회전속도가 빨라질수록 감소하여 5 rpm에서 0.72 mg/L의 농도를 보였으나 4 rpm과는 유의적인 차이를 보이지 않았다 ( $P > 0.05$ ). RBC에서 처리된 배출수 역시 모의 사육조 내 농도와 같은 경향으로 나타나 2 rpm에서 증가하였다가 회전속도가 빨라질수록 감소하여 5 rpm에서 0.40 mg/L로 나타났다.  $\text{NO}_2^-$ -N 제거속도는 2 rpm에서 가장 높은 30.25  $\text{g NO}_2^-$ -N/ $\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 이었으며, HRT 0.5와 1시간에서와 마찬가지로 더 빠른 회전속도에서 제거속도는 감소하는 것으로 나타나 4 rpm과 5 rpm에서 각각 25.60  $\text{g NO}_2^-$ -N/ $\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 와 24.43  $\text{g NO}_2^-$ -N/ $\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 로 감소하였다. 실험된 모든 HRT에서 나타난 여과매질의 표면적 당  $\text{NO}_2^-$ -N 제거속도는 0.138~0.213  $\text{g NO}_2^-$ -N/ $\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 의 범위를 보였다.

실험 결과 모의 사육조 내  $\text{NO}_2^-$ -N 농도를 가장 낮게 유지할 수 있는 회전속도는 HRT 0.5, 1시간 및 2시간에 대해 각각 3 rpm, 5 rpm 및 1 rpm으로 나타났다.

HRT 변화에 따른  $\text{NO}_2^-$ -N 농도 변화는 실험된 모든 회전속도에 대해 HRT가 길어질수록 모의 사육조 내  $\text{NO}_2^-$ -N 농도가 높아지는 결과를 보여, 앞선 TAN 농도 변화와 유사한 결과를 나타내었다. 2 rpm에서는 HRT가 1시간, 2시간으로 길어짐에 따라  $\text{NO}_2^-$ -N 농도가 유의적으로 높아지는 결과를 보였지만, RBC의 회전속도 1, 3, 4, 5 rpm에서는 0.5시간과 1시간에서는 유의적인 차이를 보이지 않았고 2시간에서 높아지는 결과를 보였다 ( $P < 0.05$ ).

## 논 의

### RBC의 TAN 제거를 위한 최적 원판 회전속도

회전원판식 여과조의 처리 효율에 미치는 운전인자로는 유

입수 유기물의 농도, 원판의 표면적과 침지면적, 회전속도, 체류시간, 수온, RBC 단수(段數) 등(Kim, 1983)을 들 수 있는데, 이중 가장 중요한 것 중의 하나가 원판의 회전속도이다. RBC는 일반적으로 여과매질이 수중에 약 35~45% 정도로 침지되어 물과 공기를 번갈아 회전하기 때문에 원판에 부착해 있는 여과세균은 전체 시간의 절반 이상이 공기 중에 있게 되므로 만약 회전속도가 너무 빠르다면 물을 거쳐 지나가는 판에 형성된 전단력이 판 표면 여과 세균의 부착력을 초과해 판에서 떨어져 나가게 되고(Hochheimer and Wheaton, 1998), 만약 너무 느리다면 여과 세균의 탈락속도보다 부착속도가 빨라져 생물막이 너무 두꺼워지게 되므로 생물막 내부가 혐기적 조건이 되어 생물막 내부로부터 미생물이 부패하여 일시에 탈락되는 현상이 발생하게 되므로 원판의 회전속도를 적정 수준으로 유지하는 것이 중요하다(Kim et al., 1998).

본 실험에서는 HRT를 0.5, 1, 2시간으로 고정하여 각각의 HRT에 대해 원판의 회전속도를 1, 2, 3, 4, 5 rpm으로 변화시켜 가면서 모의 사육조의 TAN 농도가 가장 최저로 유지되는 회전속도를 조사해 본 결과 실험된 모든 HRT에 대해 원판의 회전속도가 4 rpm일 때 모의 사육조 내에 가장 낮은 TAN 농도가 유지되는 것으로 나타났으며, 제거효율 역시 4 rpm에서 가장 높은 것으로 나타났다. 가장 빠른 회전속도인 5 rpm의 경우 실험된 모든 HRT에 대해 모의 사육조 내 TAN 농도가 상승하고 제거효율이 감소하는 결과를 보여, 사육조 내 TAN 농도는 모든 HRT에 있어 3 rpm의 결과와 유의적인 차이를 보이지 않았고 제거효율의 경우 HRT 0.5시간일 때 3 rpm, HRT 1시간일 때 2 rpm의 결과와 유의적인 차이를 보이지 않았으며 HRT 2시간일 때는 3 rpm보다 유의적으로 감소하는 결과를 보였다. 이와 같은 현상은 회전속도 5 rpm의 경우 여과 세균의

탈락속도가 부착속도보다 커서 원판에 부착되어 있는 여과 세균이 탈락되어 3 rpm 또는 2 rpm 일 때의 여과 세균 양과 거의 같아지기 때문으로 사료되었다. Kim et al. (1998)은 HRT 20분에서 회전속도를 2, 4, 6 rpm으로 변화시켜 실험한 결과 4 rpm이 최적 회전속도인 것으로 나타나 본 실험 결과와 일치하였다. 느린 rpm에서 사육조 TAN 농도가 높게 유지되고 제거 효율이 떨어지는 것은 회전속도가 느려짐에 따라 여과 매질의 긴 공기 노출 시간 및 과도한 수중 체류시간에 따른 사육수 중의 TAN을 제거하기 위한 충분한 원판의 접촉시간이 부족하거나 과도하게 생성된 여과 세균의 부패 현상으로 탈락작용이 일어나는 것으로 사료되었다. 따라서 본 실험 조건에서는 4 rpm이 가장 적절한 여과 세균의 부착속도와 탈락속도가 유지되는 것으로 간주되었으나 HRT 0.5시간의 경우 사육조 내 TAN 농도가 3 rpm과 유의적인 차이를 보이지 않아 HRT 0.5시간일 때는 3 rpm으로 운전하여도 무방한 것으로 나타났다.

TAN 제거속도의 경우 정상상태에서 시스템에 가해지는 TAN 부하는 제거량과 동일하므로 실제 시스템 내에 부하된 25 g TAN/m<sup>3</sup>·day과 제거량이 같아야 하나 일간 공급되는 34 L의 보충수에 의해 시스템 밖으로 배출되는 총암모니아성 질소와 증발 등에 의해 제거되는 암모니아성 질소 때문에 시스템에 가해지는 암모니아성 질소의 부하량에 비해 RBC의 TAN 제거속도가 낮은 것으로 생각되며, 각 HRT에 있어 회전속도에 따른 TAN 제거속도의 차이 역시 실험 장치 주변의 온도와 습도의 변화에 따라 시스템에서 대기로 증발되는 순환수의 양이 변화하는 현상 때문일 것으로 Kim et al. (1998)이 보고한 바 있다.

RBC는 회전 원판의 크기에 따라 대략 2~6 rpm으로 운전되는데, 원판의 최대 회전속도는 원판이 물을 거쳐 지나갈 때 판의 가장 빠른 부분의 선속도에 의해 일반적으로 제한된다. 최대 회전속도는 판 표면의 특성, 즉 제작 매질과 판 또는 매질 표면의 위치적 설계 함수와 여과 세균의 건강도와 나이 그리고 여러 다른 인자들에 따라 달라지게 된다(Hochheimer and Wheaton, 1998). RBC의 여러 설계 인자 중 최대 선속도에 영향을 미치는 변수들 중 한가지가 RBC 원판이나 드럼의 직경으로, RBC의 회전속도가 일정할 경우 원판의 바깥 가장자리의 선속도, 즉 주변속도(peripheral speed)가 빨라지게 된다. 이와 아울러 RBC의 회전속도를 제한하는 인자들로 수중의 산소 농도와 공기 중에서의 건조 정도를 들 수 있다. 어떠한 여과 세균도 공기 중으로 다시 나오기 전에 산소가 결핍되도록 수중에 남겨 두어서는 안되며 또한 세균이 공기 중에 있는 동안 기능을 하지 못할 정도로 건조되게 해서는 안된다. 이 두가지 조건이 RBC의 회전속도를 제한하는 가장 기본적인 인자들이다(Hochheimer and Wheaton, 1998).

위에 언급된 두가지 제한인자를 고려할 때 RBC 설계에 이용될 수 있는 다양한 회전 속도가 있다. Antonie (1976)는 RBC의 원판 주변속도가 최고 0.350 m/sec (1 ft/sec)까지는 암모니아 제거가 높아지지만 이 이상의 속도에서는 주변속도가 증가

하여도 일정하다고 보고하였다. Biodrum을 이용한 Wortman (1990)은 주변속도를 10.37 cm/sec (0.34 ft/sec)이 되도록 하여 이용하였고, Weng and Molof (1974)는 RBC의 주변속도가 0.1에서 0.34 m/sec (0.3~1.1 ft/sec)까지 주변속도가 빨라짐에 따라 질산화가 증가한다고 보고하였다. Easter (1992)는 버지니아 주립대학에서 사용한 Libey 시스템은 3 rpm으로 RBC (약 0.94 ft/sec)를 운전하였다고 보고하였다. Gilbert et al. (1986)은 상업적으로 이용되는 대부분의 RBC가 약 0.3 m/sec (1 ft/sec)의 주변속도로 운전되고 있었지만 그들이 조사한 105개의 시스템은 다소 달랐다고 보고하였다.

본 실험에서는 실험된 모든 HRT에서 원판의 주변속도가 0.04에서 0.13 m/sec까지 증가함에 따라 사육조 내 TAN 농도가 감소하고 제거효율이 증가하는 결과를 보여 앞선 연구자들의 결과에 비해 비교적 느린 주변속도에서 최적의 효율을 보이는 것으로 나타났다. 이것은 이용된 여과매질의 크기 및 재질의 차이나 침지면적, RBC 단수(段數)등 운전인자의 차이에 의한 것으로 사료된다.

앞선 여러 연구자들의 결과와 본 연구의 결과 회전속도가 증가함에 따라 여과 효율은 올라가지만 어느 정도 증가한 후에는 회전속도가 증가한 비율만큼 효율이 증가하지 않거나 일정하게 되며 오히려 감소하는 결과를 보였다. 하지만 회전속도 증가에 따른 동력 비용은 기하급수적으로 증가하게 되어, 회전속도를 2배로 높였을 때 동력 비용은 5~6배가 된다는 연구 결과(정 등, 1993)에 따라 최적의 회전속도를 구명하여 실제에 적용하는 것이 중요하리라 생각된다.

### 수리학적 체류시간에 따른 TAN 제거효율

RBC는 다른 질산화 여과 방법보다도 수량, 수질의 변동에 대해 안정성이 크다고 보고되어 있지만, 통과하는 유량의 변화(증대)쪽이 통과하는 물 속의 농도 변화(증대)쪽보다도 효율 저하가 커 RBC 내 체류시간이 길고 단수(段數)가 많을수록 제거율의 저하가 적다(정 등, 1993). 이것은 RBC 원판에 부착되는 여과 세균의 양이 원판의 회전속도 뿐 아니라 수리학적 체류시간(HRT)에 의해서도 변화하기 때문으로, 수리학적 체류시간이 짧을수록 RBC를 통과하는 유량이 증가하여 원판 표면의 전단력 증가로 인한 여과 세균의 탈락속도가 커지게 된다. 따라서 RBC의 HRT가 짧아질수록 원판에 가해지는 전단력 증가로 인한 일부 생물막이 탈락되어 수질이 급격히 나빠지는 것을 예상할 수 있었지만 본 실험에서는 HRT가 짧아질수록 모의 사육조 내 TAN 농도가 낮게 유지되었으며, 반면에 HRT가 길어질수록 RBC의 TAN 제거효율은 증가하는 것으로 나타났다.

짧은 HRT에서 RBC의 단위 시간당 TAN 제거효율이 낮음에도 모의 사육조 내 TAN 농도를 낮게 유지할 수 있는 것은 HRT가 짧아짐에 따라 RBC의 단위 시간당 TAN 제거효율은 감소하는 반면 전체적으로 TAN 제거속도가 증가하는 현상(Kim et al., 1997)과 많은 유량에 의한 희석 효과(Lee et al., 1992)에 기

인하는 것으로 생각된다. 본 실험의 경우 시스템 내에 가해지는 암모니아성 질소 부하량이 모든 HRT에 대해 동일하며 정상 상태에서 나타나는 TAN 제거속도 역시 거의 동일하지만 실제 RBC가 가지는 전체적인 TAN 제거속도는 HRT가 짧을 경우 더 높아 모의 사육조 내 TAN 농도를 더 낮게 유지할 수 있었던 것으로 사료된다. 또 HRT가 짧을 경우 모의 사육조 내에서 발생된 암모니아성 질소를 신속하게 질산화 여과조로 유입시켜 제거함과 동시에 처리된 순환수를 다시 사육조로 유입시킴으로써 TAN 농도를 낮게 유지할 수 있으나 HRT가 긴 경우 순환수가 사육조 내에 머무르는 시간이 길어져 동일 유량에서 발생하는 암모니아 부하량이 커서 사육조의 TAN 농도가 높은 것으로 생각된다. 즉 HRT가 짧은 경우 일간 또는 정해진 시간 내에 RBC를 통과하는 수량이 많으므로 단위 시간당(1회 통과시) 처리되는 TAN 양은 적지만 일간 또는 정해진 시간 내에 전체적인 TAN 처리량은 증가하기 때문이다. Kim et al. (1998)이 HRT를 9.5, 20, 30, 40분으로 변화시켜 가면서 RBC를 이용한 암모니아 제거 실험에서 HRT가 길어질수록 사육조 내 TAN 농도가 높아지고 TAN 제거효율은 증가하는 결과를 보여 본 실험과 동일한 결과를 보였다.

RBC의 처리 효율은 RBC 내 체류시간과 밀접하게 관련되어 있으며, 정 등(1993)에 의하면 체류시간이 100분 이하일 때 유량을 증가시켜 체류시간이 짧아지면 1회 통과 중의 암모니아 제거효율이 감소하지만 체류시간이 100분 이상으로 증가하여도 암모니아 제거효율이 그다지 상승하지 않는다고 보고하였다. 본 실험에서도 체류시간이 30분, 60분 일 경우 유량이 증가하여 체류시간이 짧아짐에 따라 암모니아 제거효율이 감소하는 결과를 보였으며 체류시간이 120분인 경우에는 제거효율이 증가하는 경향은 있었으나 60분인 경우와 유의적인 차이는 보이지 않았다.

Westerman et al. (1993)은 상업적 규모의 틸라피아 양식 시스템에 상향류식 모래 여과조와 RBC를 연계한 실험에서  $0.28 \text{ L/m}^2 \cdot \text{min}$ 의 수리학적 부하율로 운전한 결과 TAN 제거속도가  $250 \text{ mg TAN/m}^2 \cdot \text{day}$ 였다고 보고하였고, Delos Reyes and Lawson (1996)은 bead filter와 RBC가 연계된 틸라피아 양식 시스템에서 원관의 회전속도를 3 rpm, RBC 내 체류시간을 18.4분으로 운전한 결과  $257 \text{ mg TAN/m}^2 \cdot \text{day}$ 의 TAN 제거속도와 52%의 TAN 제거효율을 얻었다고 보고하였다. 본 실험의 경우 수리학적 부하율을 각각  $338.0 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ ,  $169.0 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ ,  $84.5 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 운전한 결과, RBC 여과매질의 표면적 당 TAN 제거속도는  $141 \sim 160 \text{ mg TAN/m}^2 \cdot \text{day}$ 와 32.9~97.0%의 TAN 제거효율을 보여 위의 연구자들보다 효율이 떨어졌으나 이것은 수리학적 체류시간이 짧았기 때문으로 사료된다.

이상의 결과에서 RBC를 이용하여 사육조 내 암모니아성 질소 농도를 낮게 유지하기 위해서는 RBC의 암모니아성 질소 제거효율을 높게 유지하는 것보다는 적절한 수리학적 체류시간(수리학적 부하율) 및 최적의 회전속도를 구명하여 사육조에서

발생하는 암모니아를 신속히 제거하여 RBC에서 처리하는 것이 중요한 것으로 판단되었다.

### 아질산성 질소 제거효율

모의 사육조 내 아질산성 질소 농도는 Table 3에 나타낸 바와 같이 RBC의 회전속도가 1, 2, 3, 4 및 5 rpm으로 빨라질수록 대체로 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 HRT 1시간과 2시간에서는 1 rpm보다는 2 rpm에서 모의 사육조의 아질산성 질소 농도가 높게 나타났는데 그 이유는 RBC의 회전속도가 빨라짐에 따라 모의 사육조 내 암모니아성 질소 농도가 급격히 감소(Table 2)하면서 전환된 아질산성 질소를 질산성 질소로 전환시키지 못한 때문으로 생각되며 이는 아질산성 질소 산화 세균들이 암모니아 산화 세균보다 증식 속도가 늦어 아직 충분한 양으로 증식하지 못하였기 때문으로 사료된다. Anthonisen et al. (1976)은 아질산성 질소를 질산성 질소로 전환시키는 *Nitrobacter* spp.가 암모니아성 질소를 아질산성 질소로 전환시키는 *Nitrosomonas* spp. 보다 비이온화된 암모니아에 더 민감하기 때문에 아질산성 질소가 축적될 수 있다고 보고하였다.

RBC의 회전속도가 빨라짐에 따라 모의 사육조 내 아질산성 질소 농도는 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 RBC의 회전속도가 3, 4 그리고 5 rpm으로 증가함에 따라 아질산성 질소 산화 세균들이 암모니아성 질소에서 아질산성 질소로 전환되어지는 양에 적응하고 산화 작용에 필요로 하는 용존 산소와 암모니아성 질소를 충분히 이용할 수는 회전속도 조건으로 변화함에 따라 암모니아성 질소 산화 세균과 마찬가지로 아질산성 질소 산화 세균의 양과 활성 그리고 여과 세균의 부착속도와 탈락속도가 적절하게 유지되기 때문으로 사료된다.

아질산성 질소 제거속도가 암모니아성 질소 제거속도 보다 높게 나타난 결과는 암모니아성 질소 농도가 일정하게 유지된 정상상태 시점에서 아질산성 질소를 측정하였기 때문에 시스템 내에 축적되어 있던 아질산성 질소가 활성이 높아진 아질산성 질소 산화 세균에 의해 일시적으로 많이 제거된 것으로 생각된다. 본 실험에서 여과매질의 표면적 당 아질산성 질소 제거속도는  $0.138 \sim 0.213 \text{ g NO}_2\text{-N/m}^2 \cdot \text{day}$ 의 범위를 보였으며, bead 여과조와 RBC를 연계한 틸라피아 양식에서  $0.282 \text{ g NO}_2\text{-N/m}^2 \cdot \text{day}$ 의 아질산성 질소 제거속도를 보인 Delos Reyes and Lawson (1996)의 결과에 비해 약간 낮게 나타났으나 이것은 이용된 여과매질의 크기 및 재질의 차이나 침지면적, 암모니아성 질소 부하량, 수리학적 체류시간과 같은 운전인자의 차이에 의한 것으로 사료된다.

HRT 변화에 따른 아질산성 질소 농도 변화 역시 HRT가 길어질수록 모의 사육조 내 농도가 높아지는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 암모니아성 질소 농도와 마찬가지로 체류시간이 길어짐에 따라 순환수가 모의 사육조 내에 머무르는 시간이 길어져 암모니아성 질소가 아질산성 질소로 전환됨에 따른 동일 유량에서 발생하는 아질산성 질소 부하량이 커져 사육조의

아질산성 질소 농도가 높은 것으로 사료된다. 즉, HRT가 짧은 경우 RBC에서 처리된 아질산성 질소를 신속하게 질산화 여과조로 유입시켜 제거함과 동시에 처리된 순환수를 다시 사육조로 유입시킴으로써 아질산성 질소 농도를 낮게 유지할 수 있으나 HRT가 긴 경우 순환수가 사육조 내에 머무르는 시간이 길어져 동일 유량에서 발생하는 아질산성 질소 부하량이 커서 모의 사육조의 아질산성 질소 농도가 높은 것으로 생각된다.

HRT 0.5시간에서는 모의 사육조 내 아질산성 질소 농도가 평균 0.26~0.32 mg/L의 농도 범위를 보인 반면, HRT 1시간에서는 0.31~0.56 mg/L, 2시간에서는 0.43~1.45 mg/L의 농도 범위를 보였다. 무지개송어와 cutthroat trout의 아질산성 질소의 반수치사농도 범위가 각각 0.19~0.39 mg/L와 0.48~0.56 mg/L로 본 실험에서 유지된 아질산성 질소 농도 범위 내에 있지만, HRT 0.5시간, 3 rpm의 조건으로 운전한다면 잉어와 차벨메기, 금붕어, bluegill (Russo and Thurston, 1991)과 같은 어종에 대해서는 사육에 지장이 없을 것으로 사료되었다.

## 결론

회전원판식 여과조(RBC)는 암모니아 처리능력에 있어서 침지식 여과조보다 우수하다고 알려져 있으며 RBC의 성능에 가장 중요한 운전인자는 수리학적 체류시간(hydraulic residence time; HRT)과 여과매질의 회전속도라고 알려져 있다. 지금까지 RBC의 성능에 대한 연구는 어느 정도 수행되었지만 소규모의 실험이 대부분이고, 우리 나라의 순환여과식 양식장에서 여과재로 많이 사용되고 있는 썬라이트 판으로 만든 RBC가 상품으로 나와 있지만 이에 대한 HRT와 회전수를 고려한 최적 운전 조건이 구명되어 있지 않다. 따라서 모의 사육조 내에 총 암모니아성 질소(total ammonia nitrogen; TAN)의 농도를 적절하게 유지하는데 필요한 운전 조건을 알아보기 위하여 직경 62 cm, 표면적 48.28 m<sup>2</sup>, 용적 0.34 m<sup>3</sup>, 침적율 35.4%의 RBC를 HRT 0.5, 1.0 및 2.0시간과 각각의 HRT에 대하여 회전속도를 1, 2, 3, 4 및 5 rpm으로 변화시키면서 RBC의 성능을 조사하였다.

여과판은 하수처리장에서 가져온 여과세균과 합성폐수로 5개월간 숙성시켰으며 시스템에 부과되는 암모니아의 양은 1일 25 g TAN/m<sup>3</sup>였다. 각각의 운전조건마다 암모니아 농도가 3일 이상 일정하게 유지된 후 효율을 측정하였다.

RBC의 회전속도 1, 2, 3, 4, 5 회전에서 HRT 0.5시간일 때 시스템내의 TAN 농도는 각각 1.35, 0.94, 0.69, 0.66 및 0.76 mg/L이었고, HRT 1.0 시간에서는 각각 2.86, 1.18, 0.96, 0.87 및 1.11 mg/L이었으며, HRT 2.0 시간에서는 각각 5.30, 2.44, 1.99, 1.77 및 2.01 mg/L로 나타나 모든 HRT에서 RBC의 회전속도 4 rpm까지는 시스템 내의 TAN 농도가 지속적으로 감소하였지만 5 rpm에서는 모든 HRT에서 오히려 증가하였다. 사육수가 RBC를 한번 통과할 때 TAN 제거효율은 회전속도 1, 2, 3, 4, 5회전에서 HRT 0.5시간의 경우 각각 32.9, 49.5, 65.1,

72.9 및 62.9%로 나타났고, HRT 1시간의 경우 각각 33.1, 74.1, 87.1, 95.8, 및 78.5%로 나타났으며, HRT 2시간의 경우 각각 35.5, 76.7, 89.6, 97.0 및 85.5%로 조사되었다. 따라서 TAN 제거효율도 모든 HRT에서 회전수 4 rpm까지 지속적으로 증가하다가 5 rpm에서는 오히려 모두 감소하였다.

HRT가 증가할수록 RBC에서의 TAN 제거효율은 높아지지만 단위 시간당 RBC를 거치는 수량은 감소하기 때문에 시스템 전체의 TAN 농도는 많이 제거되지 못하고 증가하였다. 최적 운전 조건은 HRT 0.5시간, RBC 회전속도 4 rpm일 때였고( $P < 0.05$ ), 이 때 모의사육조 내의 TAN 농도는 0.66 mg/L로 가장 낮게 나타났다.

아질산성 질소(NO<sub>2</sub>-N) 농도의 경우 실험된 모든 HRT에서 회전속도가 빨라질수록 모의사육조 내 농도는 감소하였고, HRT가 길어질수록 농도가 상승하는 결과를 보였다. 모의사육조 내 NO<sub>2</sub>-N 농도는 HRT 0.5, 1.0 및 2.0시간에서 각각 0.26~0.32 mg/L, 0.31~0.56 mg/L 및 0.43~1.45 mg/L 범위를 보였고, HRT 0.5시간, RBC 회전속도 3 rpm에서 0.26 mg/L로 가장 낮게 나타났다. 이번 실험에서 일간 제거되는 TAN 및 NO<sub>2</sub>-N의 범위는 각각 20.03~23.00 g TAN/m<sup>3</sup>·day와 19.65~30.25 g NO<sub>2</sub>-N/m<sup>3</sup>·day였다.

## 참고문헌

- Ackefors, H and H. Enel, 1992. Pollution loads derived from aquaculture: Land-based and water-based systems. (in) Abstracts of the Workshop on Fish Farm Effluents and their Control in EC Countries, (eds.) H. Rosenthal and V. Hilge. Hamburg, Germany. pp. 4.
- Antonic, R. L., 1976. Fixed biological surfaces-wastewater treatment: the rotating biological contactor. CRC Press, Inc., Cleveland, Ohio. 200 pp.
- Anthonisen, A. C., R. C. Loehr, T. B. C. Parksam and D. E. Srinath, 1976. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. Journal of the Water Pollution Control Federation, **48**: 835-852.
- APHA, AWWA and WEF, 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th Ed., EPS Group, pp. 122-124.
- Arbiv, R and J. van Rijn, 1995. Performance of a treatment system for inorganic nitrogen removal in intensive aquaculture systems. Aquacult. Eng., **14**: 189-203.
- Cai, Y. J. and R. C. Summerfelt, 1992. Effects of temperature and size on oxygen consumption and ammonia excretion in wall-eye. Aquaculture, **104**: 127-138.
- Delos Reyes, A. A. and T. B. Lawson, 1996. Combination of a bead filter and rotating biological contactor in a recirculating fish culture system. Aquacult. Eng., **15**, 27-39.
- Easter, C., 1992. Water chemistry characterization and component performance of a recirculating aquaculture system producing hybrid striped bass. Unpublished M.S. thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.



- Gilbert, W. G., J. F. Wheeler and A. MacGregor, 1986. Energy usage of rotating biological contactor facilities. *J. Water Pollut. Con. Fed.*, **58**: 47-52.
- Hochheimer J. N. and F. Wheaton, 1998. Biological Filters: Trickling and RBC Design. *Proceedings of The Second International Conference on Recirculating Aquaculture*, pp. 291-318.
- Kim, B. J., S. I. Lim and K. H. Suh, 1998. Ammonia removal by using RBC in recirculating aquaculture system. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **31**: 622-630 (in Korean).
- Kim, G. I., 1983. An experimental approach to determine the optimum conditions of rotational speed and retention time in the RBC process. Master thesis, Dong-A University, Pusan, Korea, 30 pp (in Korean).
- Kim, S. K., I. S. Kong, J. K. Seo, B. J. Kim, M. G. Lee and 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).
- Nijhof, M and J. Bonverdeur, 1990. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculating fish culture system. *Aquaculture*, **87**: 133-143.
- Oh, S. Y., 2001. Nitrogen loading rate of Nile tilapia and nitrification rate of rotating biological contactor. Ph. D. thesis, Pukyong National University, Pusan, Korea, 155 pp (in Korean).
- Rennert, B., 1992. Simple recirculation systems and possibility of combined fish and vegetable production. *European Aquacult. Soc., Special Publ.*, **17**: 91-97.
- Rogers, G. L. and S. L. Klemetson, 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquacult. Eng.*, **4**: 135-154.
- Russo, R. C. and R. V. Thurston, 1991. Aquaculture and water quality, *Advances in World Aquaculture*, The World Aquaculture Society. Baton Rouge, Louisiana. Vol. 3.
- Twarowska, J. G., P. W. Westerman and T. M. Losordo, 1997. Water treatment and waste characterization evaluation of an intensive recirculating fish production system. *Aquacult. Eng.*, **16**: 133-147.
- Weng, C. and A. H. Molof, 1974. Nitrification in the biological fixed-film rotating disk system. *Journal Water Pollution Control Federation*. **46**: 1674 pp.
- Westerman, P. W., T. M. Losordo and M. L. Wildhaber, 1993. Evaluation of various biofilters in an intensive recirculating fish production facility. (in) *Techniques for Modern Aquaculture*. American Society of Agricultural Engineers, (ed.), Jaw-Kai Wang, St. Joseph, MI, pp. 326-334.
- Wortman, B., 1990. Effect of temperature on biofilm nitrification. Unpublished M.S. thesis. University of Maryland. College Park, MD.
- 정재춘·조남영·한영교, 1993. 회전원판법, 동화기술, 서울, 한국, 434 pp.

---

원고접수 : 2003년 4월 19일

수정본 수리 : 2003년 6월 23일

책임편집위원 : 손맹현