

회전원판을 이용한 해수 순환여과 시스템에서 암모니아 부하율에 따른 암모니아 제거율

손맹현 · 전임기 · 조기채 · 김광수*
국립수산진흥원 양식개발과, *완도수산종묘시험장

Ammonia removal rate on ammonia loading rates in seawater filtering system using rotating biological contactor (RBC)

Maeng Hyun SON, Im Gi JEON, Kee Chae CHO and Kang Soo KIM
Aquaculture Division, National Fisheries Research and Development Institute,
Kijang-gun, Pusan 626-900, Korea
*Wando Marine Hatchery, National Fisheries Research and Development Institute,
Wando-gun, Chun Nam 537-800, Korea

A series of experiments was conducted to investigate the relationship between ammonia removal rates and ammonia loading rates in seawater filtering system using rotating biological contactor (RBC). In this experiment, RBC system was consisted of rotating polyvinyl film disks, which provided 12 m² of total effective surface area in 0.075 m³ of volume. NH₄Cl was added by 10~150 g as a ammonia nitrogen source to determine ammonia removal rate in RBC system. Relationship between time required for ammonia removal (y: hour) and nitrogen inputted (x: NH₄-N mg/l) in RBC system was as followed: $y=3.51+7.76 \ln x$ ($r^2=0.936$). At ammonia concentration 2 mg/l, it took 10 hours for removal of ammonia in the RBC system. However, at ammonia concentration of 5 and 16.5 mg/l, it took 16 and 27 hours, respectively. There was a decreasing tendency of an increasing ammonia in the rearing water. Finally, the ammonia removal rate in the RBC system increased with the rise of total ammonia concentration up to 16.5 mg/l.

Key words: NH₄Cl, Ammonia loading rate, Ammonia removal rate, RBC system

서 론

육상 수조식이나 축제식 양식방법에 비해 순환여과 양식법은 여과 시스템을 운용하여야 하므로 양식 운영 비용이 상대적으로 높아 최소한의 여과면적과 비용으로 최대의 여과효율을 발휘하는 것은 매우 중요한 일이다.

순환여과 양식에 있어서 사육수의 생물학적 여과방법으로는 침지식 정·역여과, 살수식 및 회전원판식 여과 등이 있는데, 여과 생물과 사육수조에 용존산소를 충분히 공급할 수 있는 장점을 지니고 있는 회전원판식 (Rotating biological contactor, RBC) 여과 시스템은 침지식 및 살수식 여과 방법에 비해 여과효율이 높다고 보고되어 있다 (Van Gorder and Fritch, 1982; Miller and Libey, 1985; Rogers and Klemetson, 1985; Libey, 1994; Westerman et al., 1996). 회전원판 (rotating biological contactor: RBC)에 의한 사육수의 생물학적 여과는 여과 원판에 부착된 생물이 원판의 회전에 의해 공기중에 노출되었을 때 산소를 공급받고 다시 회전에 의해 원판이 물속에 침지되었을 때, 물 속의 암모니아를 질산화 작용에 의해 질산염까지 산화시키는 것이다. 회전원판식 여과조의 질산화 능력은 여과 생물이 부착할 수 있는 여과 표면적과 여과 원판의 회전속도, 수리학적 부하율, 온도 등 여과조의 운용 조건에 따라 크게 달라진다. 이들 중에서도 여과 표면적은 회전원판 여과조의 제작 방법과 규모에 따라 정해져 제작 이후에는 일정하게 고정되어 있으나, 그외의 요인에 의해 운용조건은 다양하게 변화시킬 수 있다.

회전원판 여과조는 원판의 구동 방법에 따라 원판의 회전을 motor와 gear에 의한 기계 구동식 (mechanical drive system)과 원판의 바깥 부분에 설치된 air cup에 공기를 주입하므로써 발생되는 torque에 의해 회전하는 공기 구동식 (air drive system)으로 분류되고 있는데, 본실험에 이용한 공기구동식은 동력비의 절감효과 뿐만 아니라 생물막에 산소 공급량을 증가시키기 때문에 유리한 것으로 알려져 있다.

회전원판 여과조의 여과 효율을 향상하기 위한 연구로서 趙 (1994)는 담수에서 유입수의 암모니아원으로 인공폐수를 사용하여 여 매디아의 미생물 부착특성, 질산화작용에 따른 암모니아 제거 특성 등 수처리 장치설계에 필요한 기본 인자에 대하여 조사하였다. 또한 Tucker (1976)는 회전원판에서 암모니아 제거는 거의 1차식에 가까우며, 수량부하에 따른 유기물의 제거율은 원판의 표면적, 회전속도 및 온도와 같은 여러 가지 변수에 의해서도 영향을 받는다고 보고하였다.

해수에서의 여과에 관한 연구로는 Son et al. (1999)이 회전원판 여과 사육시스템에 조피볼락을 사육하면서 낮은 암모니아 농도에 대한 적정 수리학적 부하율과 회전속도를 구명하여 여과능력을 밝힌 바 있으나, 높은 암모니아 농도에 대한 회전원판의 암모니아 제거능력에 관한 연구는 없다.

따라서, 본 연구에서는 공기구동식 회전원판 시스템에서 염화암모늄을 투입하여 암모니아 부하율이 증가함에 따라 여과조의 암모니아 제거율이 어떻게 변화하는가를 조사하므로써, 순환여과 시스템에서 해산어류의 고밀도 사육시 사료 공급에 따라 암모니아

농도가 높아질 때 회전원판 여과조에서 여과능력이 어떻게 변화하는 지를 밝히기 위하여 실험하였다.

재료 및 방법

실험에 사용된 공기 구동식 회전원판 여과 사육 장치는 60 cm의 축에 직경 32 cm인 원판 (재질: 폴리비닐릴피름)을 각각 2.5 cm 간격으로 띄우고 그 사이에 'Z'형으로 접은 중간재를 채워 물레방아 형태로 만들었다. 원판의 회전은 사육수를 위에서 살수하여 채우는 한편, 아래에서는 원판 밑에 설치한 폭기 배관에서 공기를 불어 넣으므로서 원판이 회전되도록 하였다. 회전원판 1개의 여과 표면적은 12 m²였고 여과원판의 용적은 0.048 m³ (총여과조 용적: 0.075 m³)였다. 실험장치는 6개의 여과조와 1 m³ 용량의 FRP 원형사육조 1개 및 150 l 용량의 저수조 1개로 구성되어 있다. 본 실험에 이용된 공기 구동식 회전원판 여과조의 여과 표면적은 72 m²였고 시간당 수리학적 부하량은 3.6 m³으로 조절하였다. 사육수의 여과 장치는 순환 펌프를 이용하여 사육수를 저수조로 양수시켜 저수조에서 회전원판 여과조로 보내져 생물학적 여과가 이루어지도록 설계하였다 (Fig. 1). 실험을 위해 설계 제작된 회전원판 여과조는 수온 17.2~25°C에서 5주간 숙성시켜 여과미생물에 의해 암모니아성 질소가 질산성 질소로 잘 전환되는 시스템을 실험에 이용하였으며, 공기구동식 회전원판 여과조의 회전속도는 1 rpm으로 조절하였다.

회전원판 여과조 내에서의 질산화 작용에 의한 수질 변화를 조사하기 위하여 암모니아원으로 사용한 염화암모늄의 투입량을 증가시켜, 사육수 내의 암모니아 농도 변화에 따른 회전원판 여과조의 질산화작용에 의한 질산화효율을 조사하였다. 1차 실험에서는 염화암모늄 투입량은 10 g (NH₄-N 1.38 mg/l), 20 g (NH₄-N 2.76 mg/l) 및 30 g (NH₄-N 4.14 mg/l)은 1회, 2차 실험은 염화암모늄 70 g과 80 g은 2시간 간격으로 10 g씩 나누어 7회 및 8회 투입하였고, 100 g은 20 g씩 2시간 간격으로 나누어 5회, 150 g은 30 g씩 나누어 2시간 간격으로 5회 투입하여 각각의 투입량에 대하여 2회 반복하여 실험하였다. 그리고 각각의 암모니아 부하율에 대해 수리학적 부하율을 8.3, 25.0, 41.7 m³/m³/day으로 달리하여 경과 시간에 따른 회전원판 여과조의 암모니아 제거율 및 제거량을 조사하였다.

수질 측정 방법으로 암모니아성 질소는 인도페놀변법, 아질산성 질소는 술페아닐아마이드법, 질산성 질소는 카드뮴 환원법을 이용하여 각각 분석하였다 (APHA, 1989). pH는 디지털 pH 메타 (HI 8014, Hanna Instruments), 수온은 디지털 수온계 (ND-10, Nisso), 염분은 비중계로 현장 비중을 측정하여 온도 보정하여 15°C의 표준밀도로 바꾼 후 밀도-염분대조표에서 비중을 염분으로 환산하였다.

암모니아 부하량 및 수리학적 부하량별로 암모니아 제거율의 차이는 student t-test를 실시하여 암모니아 부하량별로 유의적인 차이를 조사하였다.

결과 및 고찰

1차 실험은 총수량이 1,535 l인 회전원판식 여과 사육시스템에 염화암모늄 10 g (N: 2.62 g), 20 g (N: 5.23 g) 및 30 g (N: 7.85 g)을 투입한 다음 2시간 후의 사육수의 암모니아성 질소 (NH₄-N) 농도는 각각 1.26, 3.34 및 4.66 mg/l로 나타났다 (Fig 2). 이후 회전원판 여과시스템 내의 암모니아성 질소의 농도는 질산화작용에 의해 시간이 경과함에 따라 감소하였고, 또한 아질산성 질소는 암모니아성 질소 농도와 유사하게 변화하였으나, 질산성 질소는 증가하는 양상을 나타내었다. 용존무기질소 (Dissolved inorganic nitrogen, DIN)는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 시간의 경과와 상관없이 사육조 내에서 거의 일정한 값을 유지하였다.

Table 1은 사육수의 수온 21°C, 염분 35.1‰, 용존산소 8.4 mg/l의 조건에서 염화암모늄 10~30 g 투입 후, 회전원판식 여과조의 수리학적 부하율별로 평균 암모니아 제거율을 나타낸 것으로서 암모니아 부하량과 수리학적 부하량이 높을수록 회전원판 여과조의 암모니아 제거율이 유의적으로 높았다 (P<0.05).

Fig. 3은 회전원판 사육조에 암모니아 부하율 (염화암모늄 10 g, 20 g, 30 g 투입)에 따라 사육수의 암모니아 농도변화에 따른 수리학적 부하량별로 암모니아 제거율을 나타낸 것으로서, Fig. 2에서 보는 바와 같이 회전원판 여과조의 질산화를 위한 적정 암모니아 농도 범위는 1~1.5 mg/l이었고, 회전원판 여과조의 질산화는 3~4 mg/l의 고농도의 암모니아를 여과한 이후, 현저한 여과율의 저하가 나타남을 알 수 있었다.

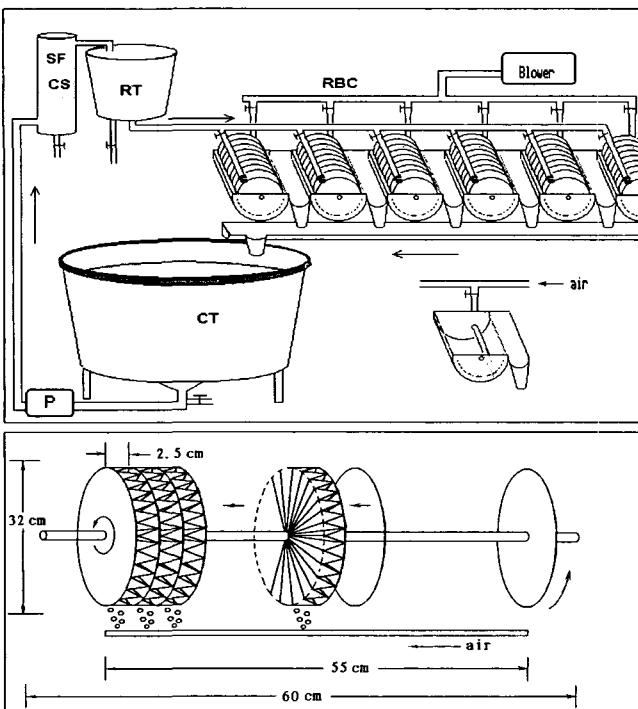


Fig. 1. Diagram of experimental system for the test of nitrification in the RBC system. (CT) culture tank; (P) pump; (RT) reservoir tank; (RBC) rotating biological contactor; (SF) submerged filter; (CS) coral sand.

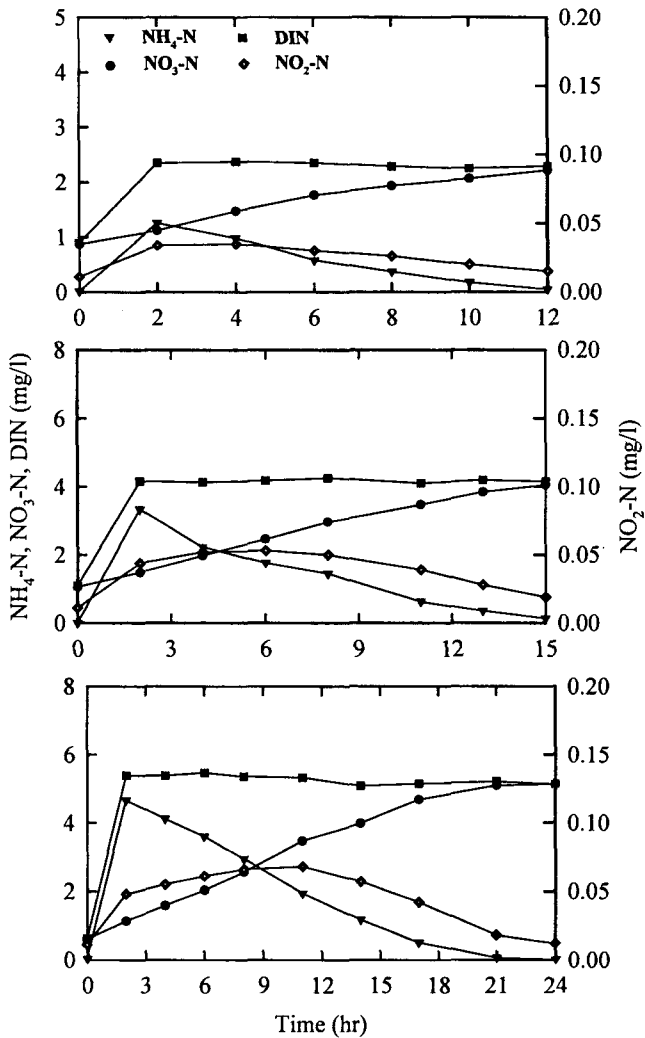


Fig. 2. Concentration of ammonia nitrogen (NH₄-N), nitrite nitrogen (NO₂-N), nitrate nitrogen (NO₃-N) and dissolved inorganic nitrogen (DIN) in the RBC system after addition of 10 g (top), 20 g (middle) and 30 g (bottom) NH₄Cl.

Table 1. Mean ammonia removal rate at different hydraulic loading rates in the RBC system by different addition of 10~30 g NH₄Cl

Ammonia source (NH ₄ Cl, g)	Hydraulic loading rate (m ³ /m ³ /day)		
	8.3	25.0	41.7
10	31.8 ± 10.2 ^a	71.7 ± 15.9 ^b	82.1 ± 14.5 ^b
20	42.3 ± 13.4 ^a	108.2 ± 23.5 ^b	115.3 ± 20.7 ^b
30	64.5 ± 18.5 ^a	139.1 ± 33.6 ^b	172.5 ± 38.9 ^c

사육수의 암모니아가 4.66 mg/l 이하일 때의 수리학적 부하율별로 사육수의 암모니아 농도 (x: mg/l) 변화에 대한 암모니아 제거율 (y: g/m³/day)을 나타내면 다음과 같다.

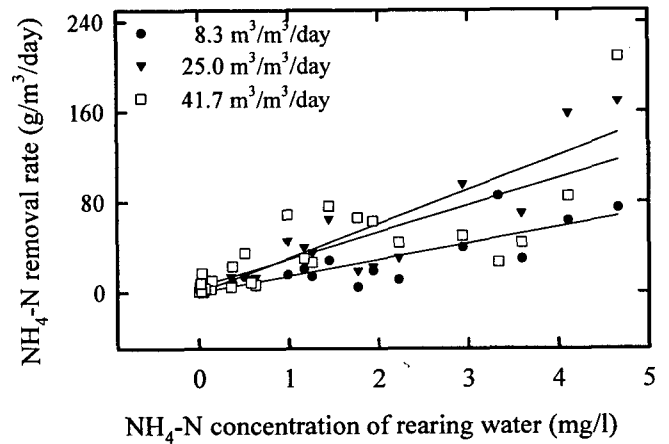


Fig. 3. Relationship between ammonia nitrogen (NH₄-N) of rearing water and ammonia removal rates at different hydraulic loading rates in the RBC system after addition of 10~30 g NH₄Cl.

8.3 m³/m³/day : y=4.77+14.46x
 25.0 m³/m³/day : y=0.29+30.18x
 41.7 m³/m³/day : y=5.57+23.88x

이 실험에서 암모니아 제거율은 수리학적 부하율이 가장 적은 8.3 m³/m³/day에서 가장 적었다. 반면 수리학적 부하량이 큰 25.0 m³/m³/day와 41.7 m³/m³/day의 암모니아 여과량에는 유의적인 차이가 없었다.

2차 실험에서는 회전원판식 여과 사육시스템에 염화암모늄 70 g (N: 18.34 g), 80 g (N: 20.96 g), 100 g (N: 26.16 g) 및 150 g (N: 39.25 g)을 투입후 사육수의 암모니아 농도의 최고값은 각각 6시간째에 4.89 mg/l, 10시간째에 7.45 mg/l, 11시간째에 10.1 mg/l 및 11시간째에 16.45 mg/l였다.

Table 2는 사육수의 수온 20.2°C, 염분 35.7‰, 용존산소 8.9 mg/l에서 염화암모늄 70~150 g 투입 후, 회전원판식 여과조의 수리학적 부하율별로 평균 암모니아 제거율을 나타낸 것으로서 암모니아 부하량과 수리학적 부하량이 높을수록 암모니아 제거율이 높았다 (P<0.05).

회전원판 여과 사육조에 고농도 암모니아 부하율 (염화암모늄: 70~150 g 투여)에 따른 수리학적 부하율별로 사육수의 암모니아

Table 2. Mean ammonia removal rate at different hydraulic loading rates in the RBC system by different addition of 70~150 g NH₄Cl

Ammonia source (NH ₄ Cl, g)	Hydraulic loading rate (m ³ /m ³ /day)		
	8.3	25.0	41.7
70	52.8 ± 12.2 ^a	94.1 ± 19.2 ^b	153.1 ± 48.1 ^b
80	70.1 ± 25.1 ^a	138.2 ± 45.5 ^b	224.3 ± 74.7 ^b
100	84.5 ± 28.5 ^a	175.1 ± 23.6 ^b	254.9 ± 48.9 ^c
150	126.5 ± 38.9 ^a	234.2 ± 58.5 ^a	320.1 ± 88.5 ^a

농도 (x : mg/l) 변화에 대한 암모니아 제거율 (y : g/m³/day)을 나타내면 다음과 같다.

$$8.3 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{day} : y = 1.58 + 2.54x$$

$$25.0 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{day} : y = 5.95 + 24.50x$$

$$41.7 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{day} : y = 16.95 + 30.16x$$

암모니아 제거율은 수리학적 부하율이 큰 25.0 m³/m³/day과 41.7 m³/m³/day이 수리학적 부하율이 적은 8.3 m³/m³/day에 비하여 현저하게 많았다 (Fig. 4). 본 실험에서 수리학적 부하율이 큰 여과 원판에서의 암모니아 제거율이 높았으나, 실제 양식시스템에서는 수리학적 부하율은 질산화 효율의 향상 및 산소의 추가 공급 효과 등의 장점이 있으나, 양수 에너지의 추가적인 공급이 따르기 때문에 이러한 점을 고려하여 적정 수리학적 부하율을 산정하여야 한다. 수리학적 부하량 변화에 따른 암모니아 여과율에 관하여 Rogers and Klemetson (1985)는 직경 25.4 cm의 16개 원판 (총 여과 표면적 1.66 m²)으로 구성된 RBC의 수리학적 부하량 변화에 따른 암모니아 제거율 및 비이온화 암모니아 농도를 조사한 결과, 수리학적 부하량 0.019~0.060 m³/m²/day에서 암모니아 제거율은 90% 이었고, 수리학적 부하량 0.04 m³/m²/day에서 비이온화 암모니아 농도는 0.02 mg/l 이하로 유지되었다고 보고하였다. 또한 趙 (1994)는 직경 15 cm, 여과표면적 0.31 m², 회전수 10 rpm, 침지율 45%의 회전원판 여과조를 이용하여 수온 20 ± 0.5°C에서 해수중의 암모니아 제거 특성, 매디아에 대한 질산화에 대한 박테리아의 부착 특성 및 수처리 장치 설계를 위한 동력학인자 등 질산화에 대한 회전원판법의 기본 운전 인자를 평가하기 위하여 유입수의 암모니아 농도를 평균 12 mg/l로 고정하고 암모니아 표면 부하량을 47.06, 98.48, 158.30, 392.62 mg/m²/day로 하고 각각의 암모니아 부하량에 대해 수리학적 부하량을 0.0038, 0.0078, 0.0136, 0.0294 m³/m²/day로 조절했을 때, 유출수의 암모니아 농도는 0.04, 0.23, 0.96, 2.00 mg/l로 암모니아 제거율은 99.7%, 98.1%, 92.0%, 83.3%라고 밝혔다. Nijhof (1995)는 직경 1.2 m, 높이 2.5 m의 살수식 여

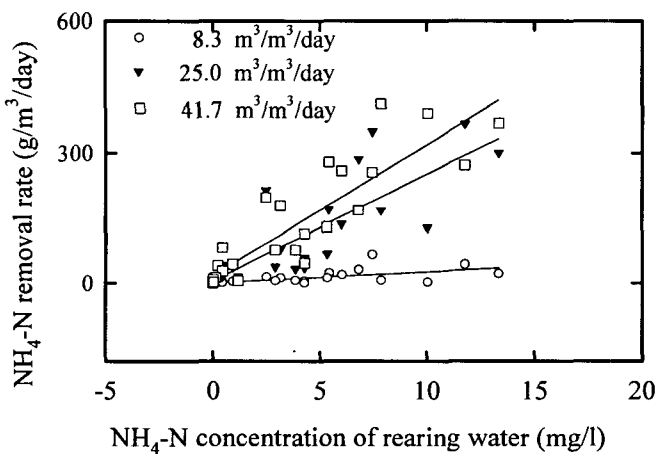


Fig. 4. Relationship between ammonia nitrogen (NH₄-N) of rearing water and ammonia removal rates at different hydraulic loading rates in the RBC system after addition of 70~150 g NH₄Cl.

과조를 이용해서 수리학적 부하율을 75, 150 및 300 m³/m³/day으로 달리하여 유입수의 암모니아 농도 (g NH₄-N/m³)에 대한 암모니아 제거율 (g NH₄-N/m²/day)을 조사하였는데 유입수의 암모니아 농도가 5 g NH₄-N/m³까지는 유입수의 암모니아 농도의 증가에 따라 암모니아 제거율이 증가함을 알았다. 또한, 암모니아 부하율 (g NH₄-N/m²/day)에 대한 암모니아 제거율 (g NH₄-N/m²/day)을 조사하여 암모니아 부하율 증가에 따라 암모니아 제거율이 증가함을 밝혔다. 이러한 결과를 회전원판식 여과 사육 시스템을 이용한 본 실험의 결과와 직접 비교하는 것은 어려우나 유입수의 암모니아 농도 증가에 따른 수리학적 부하율별로 암모니아 제거율의 증가는 유사한 경향이였다.

본 실험의 결과와 비교하여 菊池 等 (1989)은 플라스틱 여과 재료를 이용한 침지식 여과조에서 암모니아 농도를 변화시켰을 때 질산화 속도에 대해 조사한 결과, 2 mg/l에서 숙성된 여과조의 질산화 속도는 50 mg/l까지는 암모니아 농도의 상승에 따라 증가하였지만, 100과 500 mg/l 농도는 50 mg/l과 비교하여 감소하는 것으로 보고하였는데, 실제 양식 시스템에서 사육수의 암모니아 농도를 菊池 等 (1989)의 연구 결과에서와 같이 높일 수는 없을 것이다.

최대 암모니아 부하율에 관해서 Liao and Mayo (1972)은 0.976 g NH₄-N/m²/day를 초과하지 않아야 하며, 만약 이 값을 초과하면 암모니아 전환 능력이 감소한다고 밝혔다. 본 실험에서는 어류를 사육하지 않고 암모니아원으로 염화암모늄을 공급하였기 때문에 이들의 암모니아 부하율에 비해 훨씬 컸다.

Fig. 5는 염화암모늄 100 g (N: 26.16 g) 및 150 g (N: 39.25 g) 투입 후, 경과 시간에 따른 사육수의 아질산성 질소와 pH의 변화를 나타낸 것이다. 염화암모늄 100 g 투입시에는 아질산성 질소는 24시간에 1.35 mg/l까지 상승한 다음, 이후 감소하기 시작하여 최초 투입 전의 농도까지 감소하는데 총 34시간이 소요되었고, pH의 변화는 실험 시작시 8.16에서 24시간째에 7.77까지 낮아진 후, 아질산성 질소의 농도와 반대로 34시간 후에 7.91로 상승하였다. 또한 염화암모늄 150 g 투입시에는 아질산염 농도는 28시간에 1.76 mg/l까지 상승한 다음, 이후 감소하기 시작하여 최초 투입 전

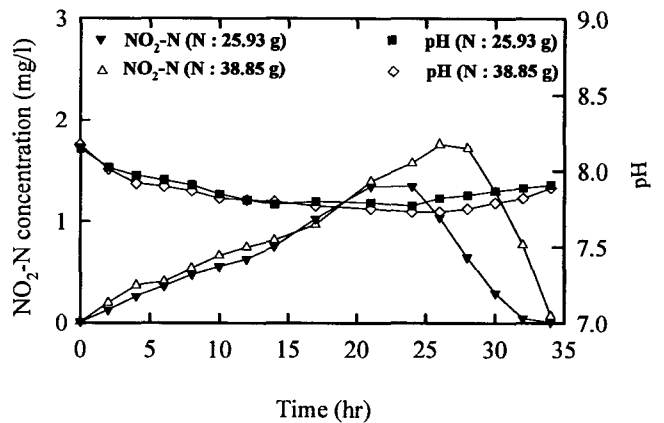


Fig. 5. Variations of nitrite nitrogen and pH in the RBC system after addition of 100 g and 150 g NH₄Cl.

의 농도까지 감소하는데 총 37시간이 소요되었다. 또한 pH 농도의 변화는 실험 시작시 8.17에서 28시간에 7.73까지 감소한 다음, 이후 상승하여 37시간째에는 7.89이었다. 따라서 사육수의 아질산성 질소의 농도가 상승할수록 pH는 낮아졌다가 아질산성 질소 농도가 감소함에 따라 다시 높아지는 경향을 보였으나 최초 수준까지 회복되지는 않았다.

佐伯 (1958)는 해수 시스템에서 암모니아와 아질산 산화를 위한 이상적인 pH는 7.8~7.1이라고 보고하였고, Sarner and Baggaley (1975)는 해산 질산화균을 위한 적정 pH 범위는 7.0~8.2이고 7.45가 가장 적합하였다고 보고하였다. 본 실험에서 염화암모늄 100~150 g 투입시 사육수의 pH 변화는 8.2~7.7로서 질산화 작용에 적당한 pH 농도였다고 사료된다.

1, 2차 실험결과를 종합하며, Fig. 6은 회전원판식 순환여과 사육시스템의 사육수에 염화암모늄을 10~150 g 투입하여 사육수의 암모니아 농도 (x : $\text{NH}_4\text{-N}$ mg/l)에 따라 회전원판 여과조에서의 암모니아 제거에 필요한 시간 (y : hr)을 조사하였으며, 그 관계식은 다음과 같았다.

$$y = 3.51 + 7.76 \ln x \quad (r^2 = 0.936)$$

사육수의 암모니아 농도가 2 mg/l일 때 회전원판 여과 사육시스템에서 암모니아 제거에 소요되는 시간은 10시간이었으나, 5와 16.5 mg/l에서는 각각 16과 27시간이 소요되었다. 따라서 사육수의 암모니아 농도가 높아질수록 암모니아 제거에 소요되는 시간이 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과로부터 여과조의 여과생물은 여과 표면적에 비례하여 항상 일정한 양의 암모니아를 산화시키는 것이 아니고 사육수의 암모니아 농도에 따라 암모니아 산화량이 변하는 것으로 암모니아 부하가 높을수록 질산화율도 높아진다는 것을 알 수 있다 (Tijhuis et al., 1992).

회전원판식 순환여과 사육시스템에서 실험어를 사육하면서 배설된 암모니아를 제거하는 양과 암모니아원으로 염화암모늄을 투입하였을 때의 암모니아 제거량 사이에는 상당한 차이를 보였다.

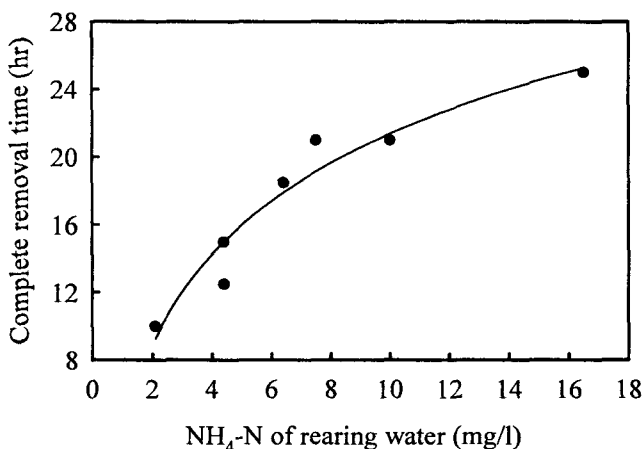


Fig. 6. The time required for the complete removal of $\text{NH}_4\text{-N}$ at different $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations after addition of 10~150 g NH_4Cl .

본 실험은 여과 원판의 여과 능력을 알아보기 위하여 이전의 실험 (Son et al., 1999)과는 달리 사육수조에 실험어로서 조피볼락을 수용하지 않고 암모니아 부하원으로 염화암모늄을 투입하였기 때문에 암모니아 농도를 높일 수 있었다.

요 약

회전원판식 해수 여과시스템에서 암모니아성 질소 부하율과 수리학적 부하량이 암모니아 제거율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 일련의 실험을 실시하였다.

이 실험에서 회전원판 시스템은 폴리비닐릴론 원판으로 여과조를 제작하였는데, 여과조의 표면적은 12 m²으로 용적은 0.075 m³이다. 회전원판식 시스템에서 암모니아성 질소부하율에 따른 암모니아 제거율을 조사하기 위하여 암모니아원으로 염화암모늄을 10~150 g 첨가하였다.

회전원판식 순환여과 사육시스템의 사육수에 암모니아원으로 염화암모늄을 10~150 g 투입하여 사육수의 암모니아 농도 (x : $\text{NH}_4\text{-N}$ mg/l)에 따라 회전원판 여과조에서의 암모니아 제거에 필요한 시간 (y : hr)을 조사하였으며, 그 관계식은 다음과 같았다.

$$y = 3.51 + 7.76 \ln x \quad (r^2 = 0.936)$$

사육수의 암모니아 농도가 2 mg/l일 때 회전원판 여과사육 시스템에서 암모니아 제거에 소요되는 시간은 10시간이었으나, 암모니아 농도가 5와 16.5 mg/l에서는 각각 16과 27시간이 소요되었다. 따라서 사육수의 암모니아 농도가 높아질수록 암모니아 제거에 소요되는 시간이 감소하는 경향을 나타내었다. 결론적으로 회전원판 여과 사육시스템의 최대 암모니아 제거율은 사육수의 암모니아 농도가 16.5 mg/l까지 상승함에 따라 증가함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- APHA. 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th Edition, Washington. D.C. 1268 pp.
- Liao, P.B. and R.D. Mayo. 1972. Salmonid hatchery water reuse systems. *Aquaculture*, 1: 317~335.
- Libey, G.S. 1994. Maximizing nitrification with rotating biological contactor, in "Design of high-density recirculating aquaculture systems" (A workshop proceeding, September 25~27, 1991), Louisiana sea grant communications office, Baton rouge, pp. 24~28.
- Miller, G.E. and G.S. Libey. 1985. Evaluation of three biological filters suitable for aquacultural applications. *J. World Mariculture Soc.*, 16: 158~168.
- Nijhof, M. 1995. Bacterial stratification and hydraulic loading effects in a plug-flow model for nitrifying trickling filters applied in recirculating fish culture systems. *Aquaculture*, 134: 49~64.
- Rogers, G.L. and S.L. Klemetson. 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquacultural Engineering*, 4: 135~154.
- Sarner, R.F. and A. Baggaley. 1975. Kinetic response of perturbed marine nitrification systems. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 47: 472~486.

- Son, M.H., I.G. Jeon, J.Y. Jo and H.M. Lee. 1999. Performance of rotating biological contactor (RBC) under different hydraulic loading rates and rotational speeds on ammonia removal in a recirculating system. *J. Fish. Sci. Tech.*, 2(1): 52~57.
- Tijhuis, L., M.C.M. van Loosdrecht and J.J. Heijnen. 1992. Nitrification with biofilms on small suspended particles in airlift reactors. *Wat. Sci. & Tech.*, 26: 2207~2211.
- Tucker, A.L. 1976. A case study of ammonia nitrogen oxidation rates in a biological rotating disc system. Master Thesis, Department of Civil Engineering, University of Pittsburgh. 45 pp.
- Van Gorder, S.D. and J.D. Fritch. 1982. Filtration techniques for small-scale aquaculture in a closed system. *Proceedings of the Annual Conference of the Southeastern Association of Fish and Wildlife Agencies*, 34: 59~66.
- Westerman, P.W., T.M. Losordo and M.L. Wildhber. 1996. Evaluation of various biofilters in an intensive recirculating fish production facility. *Trans. Asae*, 39(2): 723~727.
- 菊池弘太郎, 佐伯 功, 植本弘明, 清野通康. 1989. 高効率魚類生産のための水質浄化技術の開発. 2. 生物膜によるアンモニア硝化に諸影響を与える諸要因. 電力中央研究所 研究 報告: U89034.
- 佐伯有常. 1958. 魚貝類の循環濾過式飼育法の研究. *日水誌*, 23: 684~695.
- 趙永開. 1994. 回轉圓板法에 의한 海水中の 암모니아 窒酸化. 석사학위 논문. 부경대학교. 부산. 54 pp.

2000년 3월 25일 접수

2000년 7월 28일 수리