

## 해수 탈질시스템에서 적정 탈질조건과 어류의 사육효과

손맹현\* · 전임기<sup>1</sup>

국립수산과학원 동해수산연구소, <sup>1</sup>국립수산과학원 남해수산연구소

## Optimum Conditions for Denitrification and Fish Growth in a Seawater Recirculating System

Maeng Hyun SON\* and Im Gi JEON<sup>1</sup>

Aquaculture Division, East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Gangneung 210-860, Korea  
Aquaculture Division, South Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yeosu 556-823, Korea

This study was to survey proper condition of nitrate removal by hydraulic retention time (HRT) and measured growth of black rockfish (*Sebastes schlegeli*) and giant croaker (*Nibea japonica*) in the seawater recirculating culture system designed for nitrate removal. Nitrate conversion to nitrogen at 8 hr-HRT was higher than 16 hr-HRT, amounting to 32.2 g/m<sup>3</sup>/day in the seawater recirculating culture system. The removal efficiency of nitrate improved when dissolved oxygen was situated less than 0.5 mg/L. Daily growth rate (DGR) and feed efficiency (FE) of *S. schlegeli* with mean body weight of 108 g in 8 hr-HRT were significantly higher values than those in 4 hr-HRT (P<0.05). The DGR and FE of *N. japonica* with mean body weight of 12 g in added carbon system showed not differing in the values from *N. japonica* in control system (P>0.05).

Keywords: Denitrification, Hydraulic retention time (HRT), *Sebastes schlegeli*, *Nibea japonica*

### 서 론

육상에서 개방적으로 운용되는 유수식 수조 사육시스템은 새로운 유입수의 양수시 다량의 에너지가 소요되는데 불구하고 한 번 사용된 사육수는 적절한 수처리 과정을 거치지 않고 자연 수계로 바로 방출되므로 수질 오염 등의 문제점을 가지고 있으며, 또한 유수식 사육 시스템 내에서 수질 환경 요인을 인위적으로 조절한다는 것이 거의 불가능하다는 단점을 지니고 있다. 반면 사육수를 재순환하는 순환여과 시스템은 수질 환경 제어 측면에서 여러 가지 장점을 지니고 있다 (Fridley, 1987; Turk et al., 1997). 그렇지만 이러한 순환여과 사육 시스템은 최소 시설하는데 비용이 많이 소요되고 시스템을 운영하는 데 고도의 기술이 필요하기 때문에 다음과 같은 점을 특히 고려하여 설계하고 시공되어야 한다. 즉, 복잡성을 최소화하고 시스템 운용에 필요한 에너지와 노동력 소모를 최소화시키는 설계가 필요하고 (Turk and Lee, 1991; Van Gorder, 1991; Westerman et al., 1993; Lee, 1995), 발전되는 양식 산업에 의해 새로운 기술을 적용할 수 있도록 시공되어야 한다는 것이다 (Muir, 1981).

이러한 순환여과 양식시스템에서 생산성 향상 측면을 고려한 어패류의 고밀도 사육을 위해서는 사육수질을 안정적으로 유지시켜야 하는데, 이를 위해서 사육수를 연속적으로 정화시켜 재사용하는 종합적인 수처리 시스템이 필요하다. 사육 시스템 내에서 고형물은 침전이나 기계적인 여과로 제거시킬 수 있으나, 단백질의 이화작용을 통해 배설되는 암모니아는

생물여과조에서 질산화과정을 통해 제거되어야 하며 (Heales, 1985), 현재 상업적으로 이용되는 방법으로는 살수식, 유동층 및 회전원판식이 있다 (Westerman et al., 1993). 순환여과 시스템의 생물여과조 내에서 암모니아는 자가영양세균인 암모니아 산화세균에 의해 아질산으로 분해된 후 아질산 산화 세균에 의해 질산염으로 된다. 이렇게 산화된 질산염은 사육수에서 점차 농도가 증가하게 되며, 높은 질산염 농도는 어패류에게 유해할 수 있다 (Ng et al., 1993). 그러므로 양식생물의 안정적인 사육을 위해 축적된 질산 농도는 인위적인 방법에 의해 제거되어야 하므로, 이를 위해 수질이 양호한 새로운 사육수의 교환, 해조류 및 생물학적 탈질 방법에 의해 질산염 농도를 낮추어야 한다. 이 중에서 생물학적 탈질작용은 혐기 조건하에서 타가영양세균에 의해 수행되며 탄소와 에너지원이 필요하다고 밝혀져 있다 (Payne, 1973; Esteves et al., 1986).

현재까지 탈질에 관한 연구는 주로 지하수 (Eppler and Eppler, 1986), 음용수 (Hollo and Czako, 1987), 오수 찌꺼기 (Hofmann and Hammer, 1999)를 대상으로 이루어졌다. 그러나 해수 순환여과 시스템에서 어패류를 사육하면서 산업적으로 활용될 수 있는 시스템의 적정 조건에 관한 연구는 국내외에서 거의 없는 실정으로 해수 탈질 시스템의 적정 탈질 조건에 관한 연구가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 해수 순환여과 시스템에서 질산화작용에 의해 축적된 질산염을 제거하기 위하여 장치된 탈질 시스템의 적정 운용 조건을 구명하기 위하여 수리학적 체류시간에 따른 탈질 제거 효율을 조사하였으며, 또한 조피볼락 (*Sebastes schlegeli*) 및 큰민어 (*Nibea japonica*) 치어를 대상으로 해수 탈질 시스템에서 탈질 조건에

\*Corresponding author: hyu782@momaf.go.kr

다른 실험어의 성장을 비교 조사하였다.

### 재료 및 방법

본 실험에 이용한 해수 순환여과 탈질 시스템은 사육수조와 질화 여과조 및 탈질 여과조로 구성되어 있다 (Fig. 1). 사육수조는 직경 100 cm, 높이 70 cm의 원형 FRP 수조로서 수용적은 0.5 m<sup>3</sup>, 생물학적 질산화 여과조는 가로 50 cm, 세로 40 cm, 높이 80 cm로서 수용적은 0.18 m<sup>3</sup>, 탈질 여과조는 직경 48 cm, 높이 80 cm의 원통형으로 수용적은 0.18 m<sup>3</sup>이었고 여과 매질은 스키아라이트 골판을 직경 40 cm의 원판 형태로 잘라 30매를 사용하였다.

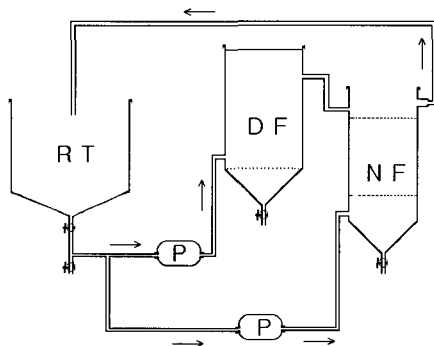


Fig. 1. Diagram of nitrifying/denitrifying filter system. RT: rearing tank, DF: denitrifying filter, NF: nitrifying filter, P: pump.

탈질 시스템의 적정 탈질 조건을 구명하기 위하여 탈질조내 체류시간별 조사는 탈질조를 사육수가 각각 1일 2, 3, 6회 교환되도록 조절하여 1차 실험에서는 체류시간을 4시간과 8시간, 2차 실험에서는 8시간과 16시간으로 조절하였다. 3차 실험에서는 탄소원첨가구와 대조구 (탄소원미첨가)의 탈질을 조사하였다. 탈질 시스템에서 탈질에 필요한 에너지원으로 유기물의 유입은 소형 정용펌프 (AX-21, 25 mL/분)로서 공업용 메틸 알콜 (순도 77.3%)을 이용하여 탄소와 질소의 비율을 3:1로 조절하였으며, 탈질조를 포함한 순환여과 사육시스템에서의 전체 수량에 대한 일간 추가수의 공급량은 정량펌프를 이용하여 3% 내외로 조절하였으며, 모든 실험구는 2반복으로 설치하여 탈질 조건을 조사하였다.

순환여과 탈질시스템에서 어류의 사육 실험은 탈질 조건을 달리한 장치에서 3차에 걸쳐 탈질 조건 변화에 따른 어체의 성장률을 2반복 실험구에서 비교 조사하였다. 1차 실험은 평균체중 108 g의 조피볼락 6 g/m<sup>3</sup>을 수용하여 40일간, 2차 실험은 평균체중 200 g의 조피볼락 20 g/m<sup>3</sup>을 수용하여 28일간, 3차 실험은 평균체중 12 g의 큰민어 2 g/m<sup>3</sup> 수용하여 95일간 사육하였다.

수질 측정 방법으로 암모니아성 질소는 인도페놀변법, 아질산성 질소는 술페아닐아마이드법, 질산성 질소는 카드뮴 환원

법을 이용하여 각각 분석하였다 (APHA, 1989). pH는 디지털 pH 미터 (Orion 520A), 탁도는 디지털 탁도계 (DRT-15CE), 수온은 디지털 수온계 (ND-10, Nisso), 염분은 비중계로 현장 비중을 측정 후 온도를 보정하여 15°C의 표준밀도로 바꾼 후 밀도-염분대조표에서 비중을 염분으로 환산하였다.

탈질 조건 변화에 따른 조피볼락 및 큰민어의 성장에 대한 유의성 검정은 ANOVA-test에 의해서 실시하였으며, 탈질 조건 변화에 대한 실험구간 성장의 유의적인 차이는 Duncan (1955)의 다중 검정 방법으로 실시하였다.

### 결과 및 고찰

해수 탈질 순환여과 시스템에서 탈질 조건 중 적정 체류시간 구명을 위한 1차 실험에서 사육수의 수온은 21.0-23.4°C (22.3±0.8), 염분은 32.4-33.6‰ (33.1±0.4) 및 pH는 7.5-8.2 (7.8±0.2)로 유지되었다. 1차 실험의 순환여과 탈질시스템에서 탈질조내 4시간 체류구와 8시간 체류구의 유입수와 유출수의 용존산소, 아질산성 질소, 질산성 질소 및 COD를 측정 한 결과는 Table 1과 같았다. 용존산소 값은 4시간 체류구는 5.9 mg/L에서 0.7 mg/L로, 8시간 체류구는 5.7 mg/L에서 0.8 mg/L로 감소하였다. 아질산성 질소 값은 4시간 체류구는 0.02 mg/L에서 0.08 mg/L로, 8시간 체류구는 0.02 mg/L에서 0.09 mg/L로 증가하였으나, 질산성 질소 값은 4시간 체류구는 3.0 mg/L에서 1.6 mg/L로, 8시간 체류구는 2.6 mg/L에서 1.4 mg/L로 감소하여 4시간 체류구와 8시간 체류구의 탈질 효율은 각각 46.7%와 46.2%로 유사한 값을 나타내었다.

Table 1. Water quality in the denitrification filter system during the first experimental period

	4 hr-HRT		8 hr-HRT	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent
COD (mg/L)	2.3-7.0	2.9-6.9	2.1-7.1	2.7-8.6
	3.9±1.5	5.3±1.2	4.0±1.6	4.7±1.9
DO (mg/L)	5.2-6.6	0.2-1.4	4.6-6.6	0.3-1.4
	5.9±0.4	0.7±0.4	5.7±0.6	0.8±0.4
Nitrite (mg/L)	0.01-0.04	0.01-0.21	0.01-0.05	0.01-0.29
	0.02±0.01	0.08±0.06	0.02±0.01	0.09±0.10
Nitrate (mg/L)	1.3-4.9	0.4-3.5	1.4-4.4	0.5-3.7
	3.0±1.2	1.6±1.3	2.6±1.2	1.4±1.2

Table 2는 탈질조내 체류시간별 (체류시간을 4시간과 8시간)로 1차 실험기간의 순환여과 탈질시스템을 이용하여 탈질 조건에 따른 조피볼락을 대상으로 성장을 비교한 결과이다. 최초 평균체중 108 g의 조피볼락을 수용하여 40일간 사육하였을 때 4시간 및 8시간 체류구의 최종 평균체중은 각각 125 g과 136 g으로 성장하였으며, 일간성장률과 사료효율은 4시간 체류구에서 각각 0.4%와 33.0%, 8시간 체류구에서 각각 0.6%와 47.0%로 8시간 체류구가 4시간 체류구에 비해 성장의 유의성 있게 높았다 (P<0.05).

탈질 조건 중 적정 체류 시간 구명을 위한 2차 실험에서 사육수의 수온은 18.0-21.1°C (19.6±0.7), 염분은 34.0-36.0%

Table 2. Growth of black rockfish in the denitrification filter system during the first experimental period. Values in the same column not sharing a common superscript are significantly different ( $P < 0.05$ )

		HRT	
		4 hr	8 hr
Initial	Number	28	28
	Total weight (g)	3,018	3,018
	Mean weight (g)	107.8±0.0	107.8±0.0
Final	Number	28	28
	Total weight (g)	3,492	3,806
	Mean weight (g)	124.7±0.7	135.9±5.5
Survival rate (%)		100	100
Daily feeding rate (%)		1.20±0.07	1.28±0.07
Daily growth rate (%)		0.40±0.05a	0.60±0.03b
Feed efficiency (%)		33.0±2.1a	47.0±0.3b

(35.0±0.5) 및 pH는 7.5-8.2 (7.8±0.2)로 유지되었다. 2차 실험의 순환여과 탈질시스템에서 탈질조내 8시간 체류구와 16시간 체류구의 유입수와 유출수의 사육 수질 조사 결과는 Table 3과 같았다. 용존산소 값은 8시간 체류구는 4.6 mg/L에서 0.8 mg/L로, 16시간 체류구는 4.9 mg/L에서 0.9 mg/L로 감소하였다. 아질산성 질소 값은 8시간 체류구는 0.05 mg/L에서 0.09 mg/L로, 16시간 체류구는 0.04 mg/L에서 0.15 mg/L로 증가하였으나, 질산성 질소 값은 8시간 체류구는 42.5 mg/L에서 31.7 mg/L로, 16시간 체류구에서 37.2 mg/L에서 25.3 mg/L로 감소하였다. 이 탈질 시스템에서 체류시간별로 질산성 질소의 제거 효율과 제거량을 비교하면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 8시간 체류구에서 각각 25.4%와 32.2 g/m<sup>3</sup>/day, 16시간 체류구에서 각각 31.9%와 17.8 g/m<sup>3</sup>/day로 탈질조내 체류시간이 긴 16시간 체류구에서 제거효율은 높았으나, 질산성 질소의 제거량은 탈질조내 체류시간이 짧은 8시간 체류구가 유의성 있게 많았다 ( $P < 0.05$ ).

Table 4는 탈질조내 체류시간별 (체류시간을 8시간과 16시간)로 2차 실험기간의 순환여과 탈질시스템을 이용하여 탈질

Table 3. Water quality in denitrification filter system during the second experimental period

	8 hr-HRT		16 hr-HRT	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent
Turbidity (NTU)	0.3-2.6 1.3±0.5	0.4-1.9 1.1±0.5	0.7-4.9 2.6±1.5	0.7-2.1 1.4±0.5
COD (mg/L)	3.8-5.9 4.9±1.0	2.5-5.4 4.4±0.9	4.1-7.7 5.7±1.2	0.5-4.3 2.5±2.1
DO (mg/L)	3.1-6.4 4.6±0.9	0.4-1.6 0.8±0.3	4.0-6.5 4.9±0.7	0.4-2.1 0.9±0.6
Nitrite (mg/L)	0.02-0.11 0.05±0.03	0.01-0.17 0.09±0.06	0.02-0.09 0.04±0.02	0.02-0.45 0.15±0.17
Nitrate (mg/L)	21.1-74.9 42.5±19.4	16.2-57.7 31.7±12.9	16.2-63.9 37.2±17.8	12.2-46.1 25.3±10.9

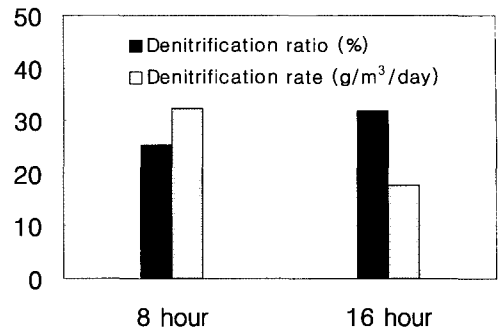


Fig. 2. Comparison of removal efficiency and removal rate on 8 hr-HRT and 16 hr-HRT.

Table 4. Growth of black rockfish in denitrification filter system during the second experimental period

		HRT	
		8 hr	16 hr
Initial	Number	50	50
	Total weight (g)	10,006	10,038
	Mean weight (g)	200.1±0.2	200.8±0.6
Final	Number	50	50
	Total weight (g)	11,073	10,944
	Mean weight (g)	221.5±3.7	218.9±7.4
Survival rate (%)		100	100
Daily feeding rate (%)		0.74±0.02	0.69±0.02
Daily growth rate (%)		0.36±0.06	0.31±0.11
Feed efficiency (%)		74.9±11.3	69.1±17.3

조건에 따른 조피볼락에 대상으로 성장을 비교한 결과이다. 최초 평균체중 200 g의 조피볼락을 수용하여 28일간 사육하였을 때, 8시간 및 16시간 체류구의 최종 평균체중은 각각 222 g과 219 g으로 성장하였으며, 일간성장률과 사료효율은 8시간 체류구에서 각각 0.36%와 74.9%, 16시간 체류구에서 각각 0.31%와 69.1%로 8시간 체류구가 약간 높았으나, 유의적인 차이는 없었다 ( $P > 0.05$ ).

탈질 조건 중 탈질조내 체류 시간은 탈질율에 크게 영향을 주는 것을 본 실험의 1, 2차 결과에서 밝혀졌는데, 이러한 결과는 탈질시스템에서 탈질율은 세균의 생물량과 수리학적 체류시간에 의해 제한된다고 밝힌 (Bengtsson and Annadotter, 1989) 결과와 일치하였다. 따라서 본 실험에서 유수량이 증가하면 체류시간은 짧아져서 탈질율은 감소하지만, 반면, 유수량이 감소하면 체류시간은 길어져 탈질율은 증가하게 된다. 그러므로 다른 조건이 동일하다면 체류시간의 증가는 우수한 탈질 효과를 가져올 것이다.

탄소원 첨가 여부에 따른 탈질시스템에서 효율을 알기 위한 3차 실험에서 사육수의 수질변화를 조사한 결과는 Table 5와 같이 사육수의 수온은 18.9-27.4°C (24.6±2.2), 염분은 31.1-34.2‰ (32.5±0.5), pH는 7.3-8.1 (7.6±0.3) 및 탁도는 0.2-3.0 NTU (1.8±0.4)를 유지하였다. 용존산소 값은 탄소첨가구는 5.0 mg/L에서 0.6 mg/L로, 대조구는 4.8 mg/L에서 1.7 mg/L로

Table 5. Water quality in denitrification filter system during the third experimental period

	Carbon supply		Control	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent
Turbidity (NTU)	0.4-3.0 1.0±0.9	0.5-2.8 1.6±1.0	0.9-2.7 2.1±0.7	0.2-1.9 1.0±0.6
COD (mg/L)	5.6-9.1 7.9±1.5	1.6-6.0 3.8±4.4	3.6-9.1 6.0±2.1	2.0-6.4 4.6±1.7
DO (mg/L)	4.3-5.5 5.0±0.4	0.3-1.1 0.6±0.3	4.4-5.0 4.8±0.2	1.4-2.2 1.7±0.2
Nitrite (mg/L)	0.02-0.04 0.02±0.01	0.04-1.77 0.45±0.66	0.02-0.03 0.03±0.00	0.02-0.07 0.04±0.01
Nitrate (mg/L)	6.8-13.2 10.8±1.9	2.0-6.5 4.3±1.5	11.1-26.8 17.3±5.2	7.6-29.9 16.1±7.0

감소하였다. 아질산성 질소 값은 탄소첨가구에서 0.02 mg/L에서 0.45 mg/L으로, 대조구는 0.03 mg/L에서 0.04 mg/L로 증가하였으나, 질산성 질소 값은 탄소첨가구는 10.8 mg/L에서 4.3 mg/L로, 대조구는 17.3 mg/L에서 16.1 mg/L로 감소하여 탄소첨가구와 대조구의 탈질율은 각각 60.2%와 6.9%로 탄소첨가구에 비해 대조구는 탈질 효율이 낮은 이유는 탈질 시스템내에서 용존산소량 높게 유지되었기 때문으로 추정된다.

Table 6은 탄소원 첨가여부에 따른 순환여과 탈질시스템을 이용하여 큰민어 치어를 대상으로 90일간 성장을 비교한 결과이다. 최초평균체중 12 g의 큰민어를 수용하여 사육하였을 때, 탄소원첨가구와 대조구의 최종평균체중은 각각 86.2 g과 87.0 g으로 성장하여 차이가 거의 없었으며, 일간성장률과 사료효율은 각각 1.58%와 1.59% 및 103.7%와 102.5%로 실험구간 유의적인 차이가 없었다 ( $P>0.05$ ).

Table 6. Growth of giant croaker in denitrification filter system during the third experimental period

	Carbon supply		Control
	Number	83	83
Initial	Total weight (g)	1,000	1,000
	Mean weight (g)	12.0±0.0	12.0±0.0
Final	Number	80	82
	Total weight (g)	6,899	7,133
	Mean weight (g)	86.2±2.0	87.0±1.2
	Survival rate (%)	96.4±1.7	98.8±0.0
	Daily feeding rate (%)	1.52±0.01	1.55±0.06
	Daily growth rate (%)	1.58±0.01	1.59±0.01
	Feed efficiency (%)	103.7±0.3	102.5±4.2

탈질 시스템의 질산성 질소 제거에 필요한 탄소원의 종류에 따라 탈질의 효율에 미치는 영향을 미친다는 보고하였다 (Sperl and Hoare, 1971). 본 탈질시스템의 탈질에 필요한 에너지원으로는 메탄올을 사용하였는데, 메탄올은 다른 유기화합물에 비해 상대적으로 가격이 저렴하고 슬러지 생산량이 적기 때문에 유기탄소원으로 적합하다고 보고한 바 있다 (Koch and Siegrist, 1997). 또한 담수 및 해수 시스템에서 메탄올은 혐기성 세균의 배양에 있어서 질산이나 아질산으로부터 질소

가스와 이산화탄소를 방출한다고 보고되어 왔다 (Whitson et al., 1993; Lee et al., 1995). 탈질조내 체류시간이 적정 범위 (1-2시간)라면, 메탄올의 사용은 2배의 탈질 상승효과가 있다고 밝혔다 (Balderston and Sieburth, 1976; Whitson et al., 1993; Lee et al., 1995). 따라서 해수 탈질 시스템에서 메탄올을 탄소원으로 이용은 적합하다고 사료되며, 본 실험에서 메탄올 첨가기가 미첨가기에 비해 탈질 효과도 우수하였다. 또한 본 순환여과 탈질시스템에서 실험용 탈질 미디어는 세균의 부착이 비교적 용이한 스키아라이트 골판을 이용하였는데 순환여과 시스템에 이용되는 미디어의 유형, 특히 플라스틱 미디어는 탈질 여과조의 세균 성장에 영향을 주는 것으로 밝혀져 있다 (Kaiser and Wheaton, 1983).

Yoo et al. (1999)은 질산화 및 탈질화가 동시에 일어나는 순환여과 시스템에서 질산화가 원활히 일어나기 위해 필요한 최소 용존산소 농도는 2.0-2.5 mg/L 유지되어야 하고, 활발한 탈질화를 위한 탈질조내 용존산소 농도는 1 mg/L 이하가 유지되어야 한다고 보고하였다. 본 탈질 시스템에서 체류시간별로 탈질 효율을 비교한 실험에서 탈질조를 통과한 유출수의 용존산소 농도는 체류시간 4, 8, 16시간에서 각각 0.7, 0.8, 0.9 mg/L로 모든 실험구에서 1 mg/L 이하로 유지되어 탈질효율이 높게 나타난 반면, 대조구 (탄소미첨가)의 경우 탈질조를 통과한 유출수의 용존산소 농도가 1.7 mg/L로 1 mg/L 이상을 유지하여 탈질 효율이 매우 낮게 나타나 Yoo et al. (1999)의 결과와 마찬가지로 용존산소 농도가 탈질시스템에 있어서 중요한 요인임을 알 수 있었다. 그러므로 본 실험에서의 탄소원 첨가구에 비해 미첨가구 (대조구)의 결과는 산소로 인하여 효율이 영향을 받음을 알 수 있었다.

이상의 사육 실험 결과, 해수 순환여과 탈질시스템에서 탈질 조건의 변화에 따라 실험 대상어의 성장에 약간의 차이는 있지만, 탈질 조건이 어류에 성장에 직접적인 영향을 미치는 것으로는 사료되지 않았다.

### 참 고 문 헌

APHA. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. American Public Health Association, pp. 1532.

Balderston, W. and J.M. Sieburth. 1976. Nitrate removal in closed-system aquaculture by columnar denitrification. *Appl. Environ. Microbiol.*, 32, 808-818.

Bengtsson, G and H. Annadotter. 1989. Nitrate reduction in groundwater microcosm determined by <sup>15</sup>N gas chromatography-mass spectroscopy. *Appl. Environ. Microbiol.*, 55, 2861-2870.

Duncan, D.B., 1955. Multiple-range and multiple F tests. *Biometrics*, 11, 1-42.

Eppler, D. and A.L. Eppler. 1986. Innovative procedures for biological denitrification of groundwater. *Wasserwirtschaft*, 76, 492-494.

- Esteves, J.L., G. Mille, F. Blane and J.C. Bertrand. 1986. Nitrate reduction activity in a continuous flow-through in marine sediments. *Microbiol. Ecol.*, 12, 283-290.
- Fridley, R.B. 1987. Modeling identification and control of aquaculture processes and facilities. In: *Automation and Data Processing in Aquaculture*. J.G. Balchen, Pergamon, Oxford, pp. 17-21.
- Heales, D. 1985. Water quality changes during the conditioning of small, closed seawater systems. Report 176. CSIRO Marine Laboratories, Cleveland, Queensland, Australia, pp. 7.
- Hofmann, K. and E. Hammer. 1999. Anaerobic formation and degradation of toxic aromatic compounds in agricultural and communal sewage deposits. *Chemosphere*, 38, 2561-2568.
- Hollo, J. and L. Czako. 1987. Nitrate removal from drinking water in a fluidized bed biological denitrification bioreactor. *Acta Biotechnol.*, 7, 417-423.
- Kaiser, G.E. and F.W. Wheaton. 1983. Nitrification filters for aquatic culture systems: state of the art. *J. World Maric. Soc.*, 14, 302-324.
- Koch, G. and H. Siegrist. 1997. Denitrification with methanol with tertiary filtration. *Wat. Res.*, 31, 3029-3038.
- Lee, P.G. 1995. A review of automated control systems for aquaculture and design criteria for their implementation. *Aquacult. Eng.*, 14, 205-227.
- Lee, P.G., P.E. Turk and J.L. Whitson. 1995. Automated control of a closed, recirculating mariculture system with attached denitrification filter. In: *Aquaculture Engineering and Waste Management*, M. Timmons, Ithaca, New York, pp. 23-39.
- Muir, J.F. 1981. Management and cost implications in recirculating water systems. In: *Proceedings of the Bio-Engineering Symposium for Fish Culture*, L.J. Allen and E.C. Kinney, Ithaca, New York, pp. 116-127.
- Ng, W.J., K. Kho, S.L. Ong, T.S. Sim, J.M. Ho and S.H. Tay. 1993. Preliminary estimation of tropical ornamental fish metabolite production rates. *Aquaculture*, 110, 263-269.
- Payne, W.J. 1973. Reduction of nitrogenous compounds by microorganism. *Bacteriol. Rev.*, 37(4), 409-452.
- Sperl, G.T. and D.S. Hoare. 1971. Denitrification with methanol: selective enrichment for *Hyphomicrobium* spp. *J. Bacteriol.*, 108, 733-736.
- Turk, P.E. and P.G. Lee. 1991. Design and economic comparison of airlift versus electric pump driven recirculating systems. In: *Engineering Aspects of Intensive Aquaculture*, J.S. Popow, Ithaca, New York, pp. 271-283.
- Turk, P.E., A.L. Lawrence and P.G. Lee. 1997. Design and operation of an environmentally isolated, marine shrimp broodstock culture system using closed, recirculating water filtration. In: *Recent Advances in Aquacultural Engineering*, M.B. Timmones and T. M. Losordo, Ithaca, New York, pp. 209-218.
- Yoo, H.S., K.H. Ahn, H.J. Lee, K.H. Lee, Y.J. Kwak and K.G. Song. 1999. Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor. *Wat. Res.*, 33(1), 145-154.
- Van Gorder, S. 1991. Optimizing production by continuous loading of recirculating systems. In: *Design of High Density Recirculating Aquaculture Systems*, T.M. Losordo, Baton Rouge, L.A., pp. 10-15.
- 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*, J.K. Wang, Joseph, Michigan, pp. 326-334.
- Whitson, J., P. Turk and P. Lee. 1993. Biological denitrification in a closed recirculating marine culture system. In: *Techniques for Modern Aquaculture*. American Society of Agricultural Engineers, J.K. Wang, Joseph, Michigan, pp. 458-466.
- Wickins, J.F. 1983. Studies on marine biological filters. Model filter. *Water Res.*, 17(2), 1769-1980.

---

2002년 9월 16일 접수  
2003년 10월 18일 수리