

해수 순환 여과 양식 시설의 여과 재료별 암모니아 제거 능력

전임기 · 손맹현 · 조재윤* · 이종문**

국립수산진흥원 양식개발과, *부경대학교 양식학과

**포항수산종묘배양장

Ammonia Removal Capacities of Several Filter Media in a Seawater Recirculating Aquaculture System

Im Gi Jeon, Maeng Hyun Son, Jae-Yoon Jo* and Jong Moon Lee**

Aquaculture Division, National Fisheries Research and Development

Institute, Kijang-gun, Pusan 626-900, Korea

**Department of Aquaculture, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea*

***Pohang Hatchery, National Fisheries Research and Development*

Institute, Pohang 795-920, Korea

Ammonia removal capacities of five submerged filter media, 2~3 mm sand, 30~50 mm gravel, 20~40 mm coral sand, polyethylene net, and corrugated plastic plate in a seawater recirculating system were tested. A rotating biological contactor (RBC) was also tested for comparison. Oxygen consumption rates were measured along with the ammonia removal efficiencies.

The ammonia concentrations in the system were maintained from 0.052 to 0.904 mg/ℓ (mean 0.338 ± 0.219 mg/ℓ) and the water temperature was ranged from 19.2 to 21.4°C (mean $20.2^\circ\text{C} \pm 0.58^\circ\text{C}$). The 1/2-order kinetic model ($Y : \text{g/m}^3/\text{day}$) and the mean ammonia removal rates ($\text{g/m}^3/\text{day}$) of the filter media were :

Sand	: $Y = 135.5X^{0.5} - 25.1$ ($r^2 = 0.8110$), 45.1
Coral sand	: $Y = 125.1X^{0.5} - 33.0$ ($r^2 = 0.7307$), 31.8
Polyethylene net	: $Y = 87.4X^{0.5} - 20.1$ ($r^2 = 0.6780$), 25.2
Corrugated plastic plate	: $Y = 71.1X^{0.5} - 17.6$ ($r^2 = 0.5206$), 19.2
Gravel	: $Y = 43.7X^{0.5} - 5.5$ ($r^2 = 0.2596$), 17.1
RBC	: $Y = 127.6X^{0.5} - 33.4$ ($r^2 = 0.7146$), 32.8

where X is the concentration of ammonia.

Oxygen consumption rates well corresponded to the ammonia removal capacities of each filter medium, thus the sands showing the highest value (442 g/m³/day) followed by coral sands (291.1 g/m³/day), polyethylene nets (236.9 g/m³/day), gravels (135.6 g/m³/day) and corrugated plastic plates (134.2 g/m³/day). Oxygen consumption rate of the RBC was unable to measure because of the characteristics of the structure.

Key words : Ammonia removal rates, Recirculating water system, Biological filters

서 론

우리나라 해산 어류 양식은 연안 해역의 환경 변화로 생산성이 점차 낮아지고 있고, 적조 등과 같은 자연 재해가 증가할 뿐만 아니라, 양식 적지를 확보하기가 어려워짐에 따라 육상에 양식 시설을 갖춘 우수식 육상 수조 양식이 1988년 이후 급속히 확대되어 1996년에는 719개소 329 ha에 이르고 있다. 그러나 육상 수조 양식은 양식 시설의 운영에 많은 에너지가 소요될 뿐만 아니라, 연안 오염 증가로 사육 용수의 안정적인 확보에도 어려움이 뒤따르고 있는 실정이다. 그러므로 사육 환경 조건을 인위적으로 적절히 조절하여 양식 시설의 운영에 사용되는 에너지와 사육 용수를 최대한 효율적으로 이용함으로써 양식의 생산성 및 경제성을 증대시키기 위해서는 순환 여과 양식에 의한 해산 어류의 집약적인 고밀도 생산 기술의 연구가 필요하다.

해산 어류를 육상의 폐쇄 순환 여과 사육 시설에서 양식하기 위해서는 생산 규모에 따라 사육어가 내놓는 배설물, 먹이찌꺼기와 용존 노폐물 등을 처리할 수 있는 적절한 여과 시설을 갖추어야 한다. 이러한 시설에는 고형물을 주로 제거하는 기계적(물리적) 여과와 용존 노폐물의 하나인 암모니아를 제거하는 생물학적 여과가 주로 이용된다. 생물학적 여과에서는 사육 생물에게 유독한 암모니아를 독성이 비교적 적은 질산염으로 산화시키는 생물 여과조의 질산화 능력이 매우 중요하고 해산 미생물의 생물학적 질산화 작용에 관한 연구로는 Hirayama (1960, 1965a, 1965b, 1966a, 1966b, 1970), Kawai et al. (1964, 1965), Saeki (1958) 등이 있으며, Forster (1974)는 직경 15 cm, 깊이 180 cm의 PVC 원통에 자갈을 여과 재료로 up-flow 여과 시스템을 이용하여 수리학적 부하량에 따른 암모니아 산화 능력과 pH와 용존 산소 농도에 따른 질산화 능력을 조사하였고, Wickins (1983)는 직경 15 cm, 깊이 23 cm(용적 4.06 l) 크기의 여과 원통에 자갈을 여과 재료로 한 down-flow 여

과조를 이용하여 질산화 작용에 따른 화학적 변화를 조사하였다. 또한 Nijhof and Bovendeur (1990)는 살수식 여과조를 이용하여 해수 순환 여과 사육 시스템에서 고정막의 질산화 특성을 연구한 바 있다. 그러나 동일 조건에서 여과 재료만 달리하여 질산화 능력을 비교 조사한 연구는 없다. 따라서 본 연구에서는 해산 어류의 순환 여과 사육 시설의 여과조 설계 기준을 설정하기 위하여 해산 어류의 순환 여과 사육에 이용되고 있는 여과 재료들의 여과 능력에 대한 정량적인 비교를 위해 단일의 사육조에 5종류의 침지식 여과조와 1개의 회전원판식 여과조를 설치하여 조피볼락을 사육시키면서 사육수의 암모니아 부하량 변화에 따른 여과 재료별(모래, 자갈, 산호사, 폴리에틸렌 망(네트론), 플라스틱 파판) 암모니아 분해 능력과 산소 소모량 등을 조사함으로써 여과 재료별 여과 능력을 구명하고 비교 검토하였다.

재료 및 방법

실험에 이용한 장치는 Fig. 1과 같이 사육 수조, 저수조 및 여과조 6개를 갖추고 있다. 실험어의 사육을 위한 사육 수조는 원형의 FRP 수조로 수용적은 2톤이고 저수조는 수용적이 0.5톤이었다. 침지식 여과조에 이용된 여과 재료(모래, 자갈, 산호사, 폴리에틸렌 망, 플라스틱 파판)와 회전원판 여과조의 크기, 여과 표면적, 용적 및 유수량은 Table 1과 같다.

여과 재료별 질산화 작용에 대한 실험은 1992년 10월 14일부터 11월 14일까지 30일간 침지식 여과 재료 5종과 회전원판 여과조에 대해 여과 능력을 조사하였다. 각 여과조로 유입되는 수량은 시간당 약 900 l가 순환되도록 일정하게 조절하였다.

여과 재료별 여과 능력을 조사하기 위한 수질 측정에서 암모니아 질소(NH₄-N), 아질산 질소(NO₂-N), pH 및 용존산소는 수용 후 2, 9, 16, 23일 및 30일에 사료 공급 후 30시간까지 7회(0, 3, 6, 9, 12, 24, 30시간), 질산 질소(NO₃-N)

Table 1. Filter media and their experimental parameters used for the test of ammonia removal capacities in a seawater recirculating aquaculture system

Filter material	Size	Surface area (m ²)	Volume (m ³)	Flow rate (ℓ/hr)
Sand	φ 2~3 mm	278	0.086	902.6
Gravel	φ 3~5 cm	44	0.074	907.2
Coral sand	φ 2~4 cm	29	0.067	890.4
Polyethylene net	38×78 cm	21	0.092	902.4
Corrugated plastic plate	31×67 cm	11	0.071	902.4
RBC	φ 33 cm	6	0.061	1017.6

는 2회(0, 8시간) 채수하여 측정하였고, 수온과 비중은 하루에 한 번 측정하였다.

수질 측정법으로 암모니아 질소(NH₄-N)는 phenol에 sodium nitroprusside를 혼합한 시약과 tricitrate desodium에 NaOH, trichlorocyanuric acid를 녹인 시약을 시수에 주입하고 암소에서 6시간 발색시킨 후 분광광도계(DMS 80)로 630 nm에서 측정하여 mg/ℓ로 표시하였다. 아질산 질소(NO₂-N)는 시수에 sulfanilamide와 N-(1-naphthyl)-ethylene diamine dihydrochloride를 주입하고 10분 이상 발색시킨 후 분광광도계(DMS 80)로 543nm에서 2시간 이내에 측정하여 mg/ℓ로 표시하였다. 질산 질소(NO₃-N)는 시수를 Cu-Cd column에 통과시켜 아질산 질소로 환

원시킨 후 아질산 질소(NO₂-N)측정과 동일한 방법으로 측정하여 mg/ℓ로 표시하였다(Stickland and Parsons, 1972).

pH는 디지털 pH 메타(HI 8014, Hanna Instruments), 수온은 디지털 수온계(ND-10, Nisso), 염분은 비중계로 현장 비중을 측정하여 온도 보정하여 15℃때의 표준밀도로 바꾼 후 밀도-염분 대조표에서 비중을 염분으로 환산하였다.

침지식 여과 사육조에는 평균 체중 106 g, 평균 전장 18 cm 크기의 조피볼락 278마리(총어체중 29,372 g)를 수용하고, 사육어는 모이스트 펠렛 사료로 1주일에 6일간 먹는 만큼 공급하였으며, 실험 기간중 사육어의 성장량을 측정하기 위하여 최초 수용일과 실험 종료시에 전체 어체중을 측정하여 일간 사료 공급율, 일간 성장률 및 사료 효율을 계산하였다.

여과 재료별 암모니아 여과율, 여과량 및 산소 소모량의 차이는 student t-test를 실시하여 여과 재료 사이에 유의적인 차이를 조사하였다.

결 과

실험 기간중 순환 여과 사육조의 수온과 염분의 변화는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 수온은 19.2~21.4(20.2±0.58)℃로 실험 기간중 비교적 일정 하였으나, 염분은 33.3~36.0(34.6±0.98)%로 사육 초기에 33.3%에서 실험 종료시에 약 36%로 사육 일수의 경과와 더불어 서서히 상승하였으며 조피볼락의 성장에는 지장이 없는 염분 범위였다.

실험 기간 중의 암모니아 농도 범위는 0.052~

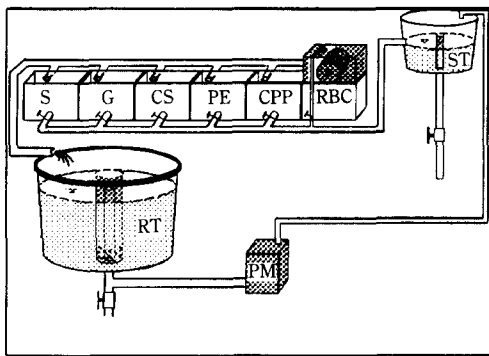


Fig. 1. Diagram of experimental system for the test of ammonia removal capacities of 6 different filter media.

(S : sand, G : gravel, CS : coral sand, PE : polyethylene net, CPP : corrugated plastic plate, RBC : rotating biological contactor, RT : rearing tank, ST : reservoir, PM : pump)

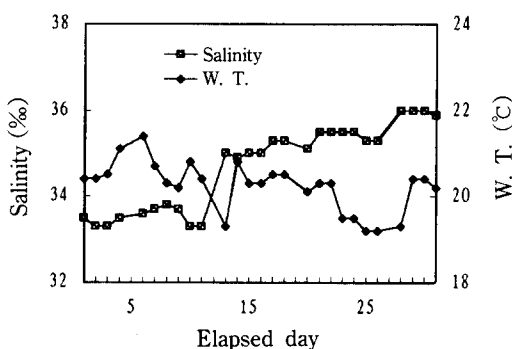


Fig. 2. Daily fluctuation of salinity and water temperature in the experimental system for the test of ammonia removal capacities of 6 different filter media.

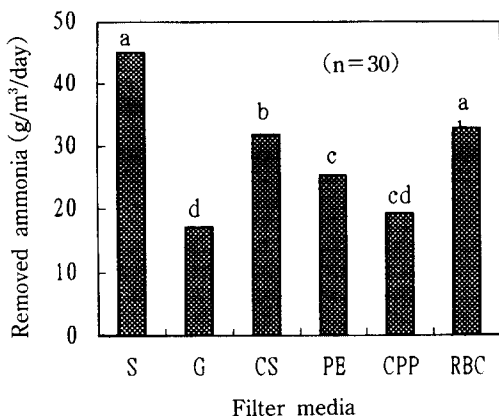


Fig. 3. Comparisons of amount of ammonia removed by 6 different filter media in a recirculating aquaculture system.

(S : sand, G : gravel, C : coral sand, PE : polyethylene net, CPP : corrugated plastic plate, RBC : rotating biological contactor)

0.904(0.338±0.219) mg/l 였으며, 여과 재료별 암모니아 제거량을 단위 용적(m³)으로 환산하였을 때, 각 여과 재료별 평균 일간 암모니아 제거량은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 모래 여과조에서 45.1 g/m³/day로 회전원판 여과조의 32.8 g/m³/day과 산호사 여과조의 31.8 g/m³/day에 비해 많았고, 또한 폴리에틸렌 망 여과조의 25.2 g/m³/day에 비해서도 많았으며, 플라스틱 파판

여과조의 19.2 g/m³/day 및 자갈 여과조의 17.1 g/m³/day에 비해서 유의성 있게 많았다(P<0.01).

Fig. 4는 각 여과 재료별로 사육 유입수의 암모니아 농도에 대한 각 여과조를 통과한 유출수의 암모니아 농도를 비율로 계산한 값, 즉 암모니아 제거율을 나타낸 것으로서 모래 여과조는 59.8%로 폴리에틸렌 망 및 산호사 여과조의 36.3%와 34.2%에 비해 유의성 있게 높았으며, 또한 폴리에틸렌 망 여과조는 회전원판, 자갈 및 플라스틱 파판 여과조에서의 여과율 26.7%, 22.7% 및 21.1%에 비해 유의성 있게 높았다(P<0.05).

실험 기간 동안 여과 재료별 평균 아질산염 농도는 암모니아 농도가 가장 낮게 유지된 모래 여과조에서 0.029(0.012~0.063) mg/l로 가장 낮게 유지되었고, 다음으로 산호사, 폴리에틸렌 망 및 회전원판 여과조의 아질산염 농도는 각각 0.044(0.016~0.095), 0.044(0.015~0.093) 및 0.046(0.016~0.107) mg/l로 낮았고, 파판 및 자갈 여과조는 0.050(0.016~0.107)와 0.050(0.016~0.112) mg/l로 사육조의 아질산염 농도 0.050(0.018~0.107) mg/l와 별로 차이가 없었다.

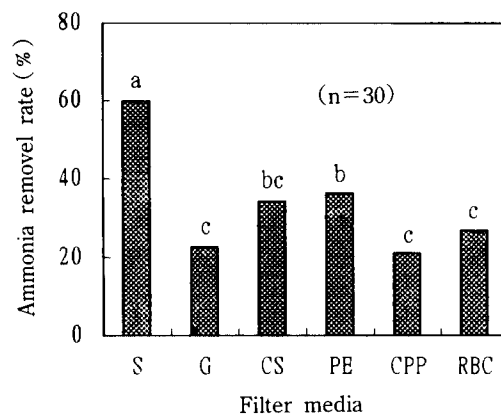


Fig. 4. Comparisons of ammonia removal rate of 6 different filter media in a recirculating aquaculture system.

(S : sand, G : gravel, C : coral sand, PE : polyethylene net, CPP : corrugated plastic plate, RBC : rotating biological contactor)

실험 기간중 사육수의 질산염 농도는 실험어 수용 후 2, 9, 16, 23, 30일째에 각각 8.19, 20.44, 26.38, 48.73, 55.51 mg/l로 사육수의 질산염 농도가 지속적으로 증가함을 알 수 있었고, 여과조와 사육수의 질산 농도 차이는 거의 없었다.

사육 실험 기간중 여과 재료별 평균 수소이온 농도(pH)는 모래, 폴리에틸렌 망, 자갈, 파판, 산호사 여과조에서 각각 7.12(6.89~7.44), 7.16(6.93~7.51), 7.18(6.96~7.50), 7.18(6.93~7.51), 7.20(6.98~7.51)으로 사육수의 pH 7.21(6.98~7.51)에 비해 낮았으나 회전원판 여과조는 7.29(7.07~7.57)로 사육수에 비해 오히려 높게 유지되었다.

순환 여과 사육조의 용존 산소 농도 범위 3.8~7.5(5.7±0.98) mg/l과 암모니아 농도 범위 0.052~0.904(0.338±0.219) mg/l에서 여과 재료별 단위 용적당 평균 산소 소모량은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 모래 여과조에서 442.1 g/m³/day로 가장 많았고, 다음이 산호사 여과조로 291.1 g/m³/day였고, 그 다음이 폴리에틸렌 망 여과조로 236.9 g/m³/day였고, 자갈과 파판 여과조는 135.6와 134.2 g/m³/day로 산소 소모량이 가장 적었다 (P<0.05). 그러나 회전원판 여과조는 모래, 산호

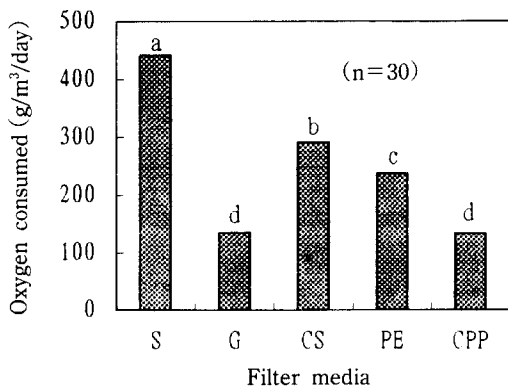


Fig. 5. Comparisons of amount of oxygen consumed by 5 different filter media in a recirculating aquaculture system.

(S : sand, G : gravel, C : coral sand, PE : polyethylene net, CPP : corrugated plastic plate)

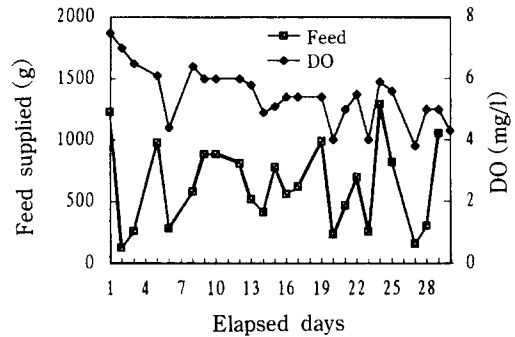


Fig. 6. The amount of feed supplied and fluctuation of dissolved oxygen in the rearing tank of recirculating system used for the test of ammonia removal capacities by 6 different filter media.

사, 자갈, 폴리에틸렌 망, 파판 여과조와는 달리 여과 원판이 회전하면서 사육수가 대기중의 공기와 접촉하여 산소가 녹아들어가므로서 저수조의 산소 농도보다 오히려 높아, 산소 소모량을 계산할 수 없었다. 즉 회전원판 여과조에서는 사육수가 여과조를 통과하면서 질산화 작용에 의해 산소가 소모되었음에도 여과조 내에서 444 g/m³/day의 산소가 증가되었다.

Fig. 6은 실험어에 공급한 일간 사료량과 용존 산소의 변화를 나타낸 것으로서 사료 공급량은 실험어가 사료를 섭취하는 정도를 관찰하면서 먹는 만큼 공급하였으므로 일간 사료 섭취량의 변화 정도가 컸다. 실험 기간중 용존 산소는 3.8~7.5(5.7±0.98) mg/l를 유지하였으며 사료 섭취량의 변화 패턴과 용존 산소 농도의 변화는 유사한 경향을 나타내었다.

Table 2와 Fig. 7은 사육조의 암모니아 농도가 0.052~0.904(평균 : 0.338±0.219) mg/l일 때의 사육수의 암모니아 농도에 따른 여과 재료별 암모니아 제거량을 1/2-order kinetic을 적용시켜 나타낸 식이다. 사육수의 암모니아 농도에 따른 여과 재료별 암모니아 제거량을 보면 모래, 산호사, 폴리에틸렌 망 및 회전원판 여과조는 상관 계수 0.6 이상으로 높은 상관을 나타내었으나, 자갈 및 파판 여과조와 같이 여과량이 적은 여과조는

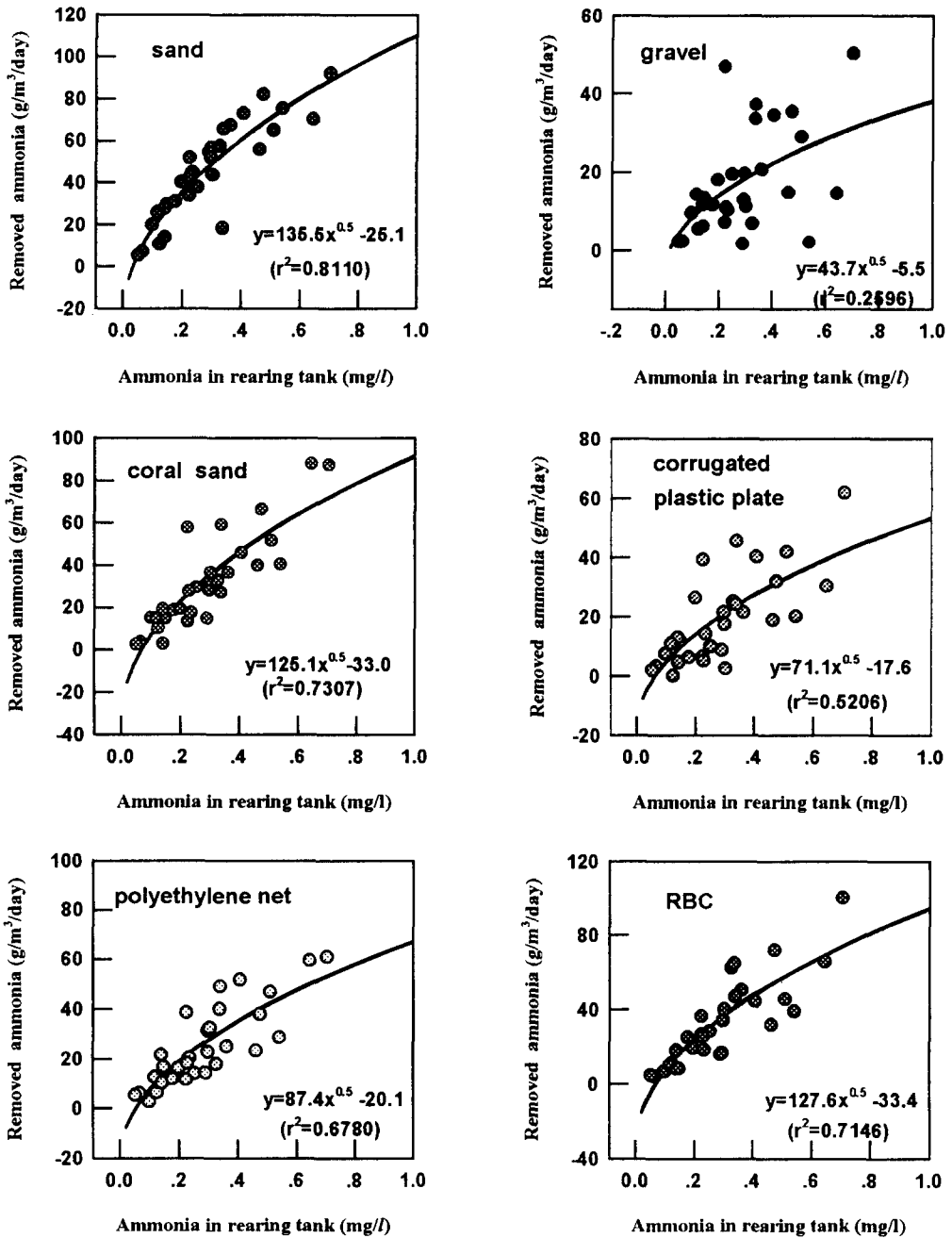


Fig. 7. Relationship between ammonia concentration in the rearing tank and ammonia removal efficiencies of each of the 6 different filter media.

Table 2. Relationship between ammonia concentration in rearing tank and ammonia removal rate of each of 6 different filter media

Filter media	Amount of ammonia removed (g/m ³ /day)
Sand	$Y = 135.5X^{0.5} - 25.1$ ($r^2 = 0.8110$)
Coral sand	$Y = 125.1X^{0.5} - 33.0$ ($r^2 = 0.7307$)
Polyethylene net	$Y = 87.4X^{0.5} - 20.1$ ($r^2 = 0.6780$)
Corrugated plastic plate	$Y = 71.1X^{0.5} - 17.6$ ($r^2 = 0.5206$)
Gravel	$Y = 43.7X^{0.5} - 5.5$ ($r^2 = 0.2596$)
RBC	$Y = 127.6X^{0.5} - 33.4$ ($r^2 = 0.7146$)

X: Ammonia concentration of rearing water (mg/ℓ)

Y: Amount of ammonia removed (g/m³/day)

분산 범위가 커서 상관 계수가 낮았다.

실험 기간(실제 사료 공급 일수 24일)중 실험어에 공급한 사료의 양은 15,244 g(건중량 10,213 g)이었고, 폐사량은 100 g, 성장량은 최초 어체중 29,372 g에서 35,901 g으로 6,529 g이 증중하였다. 따라서 일간 사료 공급율, 일간 성장률 및 사료 효율은 각각 1.25%, 0.85% 및 65% 이었다.

고 찰

생물학적 여과를 이용한 순환 여과 양식 시설로 어류를 사육하기 위해서는 시설의 수용 능력을 산정하지 않으면 안된다. 만약 수용 능력이 산정되어 있지 않으면 어류 사육시 수용 능력 이하로 수용할 경우 생산성이 낮아지게 될 것이며, 반대로 수용 능력 이상으로 수용하게 될 경우는 성장률이 감소하고, 사료 효율이 저하되며, 어체가 쇠약하게 되어 병원균의 감염이 용이해짐으로서 폐사율이 높아져 역시 생산성이 낮아지게 된다. 그러므로 생물학적 여과에 의한 순환 여과 양식 시설의 수용 능력을 정확히 산정하는 것은 순환 여과 양식의 성패를 좌우하는 가장 중요한 요인 중의 하나이다. 그리고 수용 능력은 여과조의 여과 능력에 직접적인 영향을 받게 된다.

순환 여과 사육 시설에서 어류가 사료 섭취후 대사 산물로서 배설하는 고형물과 사료 찌꺼기는 여과망이나 침전조 등의 기계적인 여과로서 제거되나, 암모니아와 같은 용존성 배설물은 물의

교환에 의해 희석되거나 또는 화학적으로 흡착되지 않으면 생물학적 여과 방법에 의해서만 제거될 수 있다(Spotte, 1979). 생물학적 여과는 여과 생물에 의한 질산화 작용에 의해 일어나며, 여과조에서 질산화 작용이 효과적으로 일어나기 위해서는 질산화 세균이 착생할 수 있는 여과 표면적이 있어야 하고 용존성 유기물이 이 표면과 효과적으로 접촉할 수 있도록 여과 재료 사이가 막히지 않고 사육수가 균일하게 흐를 수 있도록 고안되어야 한다. 지금까지 여과조 시설에 이용되는 여과 재료로는 모래, 자갈, 산호사, 폴리 에틸렌 망, 파판 등이 사용되어 왔으나, 각 여과조에 대한 여과 능력이나 여과 특성에 대한 비교 연구가 없었기 때문에 침지식 여과 재료와 회전원판에 대해 같은 사육 조건에서 비교 검토하였다.

순환 여과 사육 시스템에서 산소 충전율이 높을 수록 여과조의 여과 능력이 커지게 되며(Miller and Libey, 1984), 용존 산소의 농도가 높을 때 질산화 작용이 증가하나 낮을 때는 질산화 작용이 저하되고 질산염이 아질산염으로 환원되게 된다(Mevel and Chamroux, 1981). 그러므로 침지식 생물막 여과조에서 여과를 제한하는 주요한 제한 요소 중의 하나는 무기물화와 질산화 작용에 필요한 용존 산소량이며(Haug and McCarty, 1972), 침지식 자갈 여과조에서 질산화 작용이 일어나기 위해서는 최소한 2 mg/ℓ 이상이 유지되어야 한다(Manthe et al., 1988). 따라서 본 실험에서 용존 산소의 농도는 3.8~7.5(5.7±0.98)

mg/ℓ로 비교적 높게 유지되어 질산화 과정은 정상적으로 이루어진 것으로 보인다.

여과조에서 질산화 작용이 일어나면 pH가 지속적으로 감소되며, 이로 인해 암모니아의 산화가 저해된다고 보고하였다(Balakrishnan and Eckentelder, 1969). 또한 Haug and McCarty (1972)는 pH 6.0에서 질산화 작용이 급격히 떨어지고 pH 5.5에서 중지한다고 하였으며, Painter (1970)도 pH 6.3~6.7에서 질산화 속도가 감소했으며, pH 5.0~5.5에서는 완전히 멈추었다고 보고하였다. 해산 질산화 세균에 대해 연구한 Srna and Baggaley (1975)는 이들 세균이 질산화 작용에 적합한 pH 범위는 7.0~8.2였으며, pH 7.45에서 가장 질산화 작용이 좋았다고 보고하였다. 본실험에서 침지식 여과 재료별 pH는 6.95~7.51로 Srna and Baggaley (1975)가 보고한 적정 범위내에서 유지되었고 Haug and McCarty (1972)와 Painter (1970)의 연구에서의 pH 값에 비해서는 높게 유지되었다.

30일간의 실험 기간중 여과 재료별 단위 용적당 1일 평균 암모니아 제거 능력은 모래(45.6 g/m³/day)가 자갈(18.2 g/m³/day)과 플라스틱 파판 여과재료(19.0 g/m³/day)에 비해서는 유의성이 있었으나(P<0.05), 회전원판(35.3 g/m³/day), 산호사(33.8 g/m³/day), 폴리에틸렌 망 여과 재료(25.4 g/m³/day)와는 유의적인 차이를 나타내지 않았다(P>0.05). Nijhof and Bovendeur (1990)는 해수(수온 24℃)에서 플라스틱 여과 매디아(Filterpak CR 50, Mass Transfer Int., Heversham, Cumbria, Great Britain)로서 살수식 여과조를 설치한 다음 2개월간 적응 후 생물막의 암모니아 제거 능력을 조사하였는데, 이 여과 시스템에서 여과 표면적(m²)당 일간 암모니아(TAN) 제거 능력은 0.28 g로 제시하였다. 이를 단위 용적당(살수 여과조의 단위 용적당 여과 표면적이 200 m²/m³) 일간 암모니아 제거량으로 환산하면 55.9 g/m³/day(0.28 g/m²/day×200 m²/m³)으로 산정된다. 따라서 본 연구의 해수(수온 20.2℃) 침지식 여과조에서의 모래 여과조

45.1 g/m³/day에 비해 약간 많았다.

일반적으로 담수 여과조에서의 여과 능력은 해수보다 높은 것으로 보고되고 있다. Gujer and Boller (1986)에 의하면 살수식 담수 여과조(220 m²/m³)에서 수온 12℃와 총암모니아 농도 약 1.2 mg/ℓ일 때 암모니아 제거율은 0.75 g TAN/m²/day라고 보고하였는데 이를 단위 용적(m³)으로 계산하면 164.9 g/m³/day 였다. 또한 Nijhof and Bovendeur (1990)에 의하면, 24℃의 담수 여과조에서 최대 암모니아 제거량은 138 g/m²/day(0.69 g/m²/day×200 m²/m³)였으며, 해수에서의 최대 암모니아 제거량이 이보다 적은 것은 해수 중에 있는 염소의 여과 억제 효과에 기인하는 것으로 설명하였다. 그리고 같은 담수 여과조에서도 살수식 여과조의 여과 능력이 침지식 여과조보다 높게 나타나는 것은, Remmerswaal (1993)이 살수식 여과조와 침지식 여과조의 여과 능력을 비교 연구한 결과, 용존 산소가 포화 농도일 때 여과 표면적 1m²당 1일간의 암모니아 제거 능력이 살수 여과조는 0.5~0.7 g 인데 침지 여과조는 0.2~0.6 g으로 보고한 바와 같이, 살수되는 과정에 공기중의 산소를 더 많이 이용할 수 있으므로 살수식 여과조의 여과 능력이 침지식 여과조보다 더 높은 것으로 보인다.

본 연구에서 여과 재료별 암모니아 여과 능력에 현저한 차이가 있었다. 모래, 회전원판, 산호사의 여과 능력이 비교적 높았고, 폴리에틸렌 망, 플라스틱 파판, 자갈의 여과 능력이 비교적 낮았다. 그러나 이 가운데 모래, 산호사, 폴리에틸렌 망, 자갈 여과조의 여과 표면적은 단위 용적내에서 일정하여 더 이상 증가시킬 수가 없으나, 플라스틱 파판과 회전원판은 재질과 제작 방법에 따라 여과 표면적을 몇 배로 증가시키는 것이 가능하다. 3 배로 여과 표면적을 증가시킬 경우 플라스틱 파판 여과조는 모래 여과조 보다 여과 능력이 1.2배 이상 증가하게 되고, 회전원판은 2.3배 이상 증가하게 된다. 한편 Kim et al. (1987)은 침지식 여과조를 일정 기간 사용 후 여과조 안에서 노폐물이 축적되면서 노화 현상으로 인하여 여과

능력이 떨어지게 되었고, 이 때 자갈은 청소하기가 대단히 힘들어 대형 여과조에서 사용하기가 곤란하다는 것을 밝혔으며, 또한 침모직 직물도 배수 청소시 젖은 직물의 무게로 인하여 형태 유지가 어렵다는 것을 알게 되어 플라스틱 제품을 사용하는 것이 실용적이라고 보고하였는데, 본 연구에서도 자갈, 산호사, 모래 여과조는 관리하기가 힘든 반면, 폴리에틸렌 망, 플라스틱 파판과 같은 플라스틱 제품의 여과 재료는 관리가 비교적 용이하였으며, 특히 회전원판의 관리가 가장 용이하였다.

본 연구에서 Table 1에 표시된 각 여과조의 1일 평균 산소 소비량은 모래 38.0, 폴리에틸렌 망 21.8, 산호사 19.6, 자갈 10.0, 플라스틱 파판 9.5 g/day이며, 회전원판은 배출수의 용존 산소 농도가 유입수보다 높아 배출수로부터 산소 소비량을 측정할 수 없었다. 그리고 이 여과조들을 1m³으로 환산했을 때의 1일 평균 산소 소비량은 모래 442.1, 폴리에틸렌 망 236.9, 산호사 291.1, 플라스틱 파판 134.2, 자갈 135.6 g/m³/day이다. 이들을 이용하여 여과조의 암모니아 제거량(x)과 산소 소비량(y)과의 관계식을 구하면: $y = 11.058x - 66.058$ ($r^2 = 0.987$)이 된다(Fig. 8). 이 관계식에서 회전원판의 1일 평균 암모니아 제거량

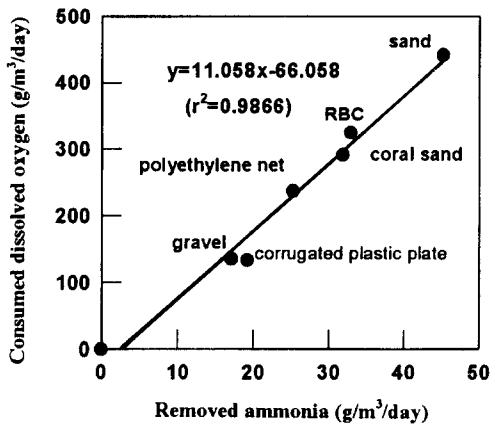


Fig. 8. Relationship between ammonia removal and DO consumed by 6 different filter media in a recirculating seawater aquaculture system.

35.2g/m³/day으로부터 1일 산소 소비량 324.3 g/m³/day을 구할 수 있다. 회전원판 여과조는 여과후 444 g/m³/day의 산소가 증가하였으므로, 회전원판 여과조는 구조적 특성으로 인하여 여과 과정에 소비된 324.3 g/m³/day의 산소를 포함하여 총 768.3 g/m³/day이 공기중에서 용해되어 온 것으로 추산된다. 그리고 용적이 0.061m³인 회전원판 여과조의 1일 산소 소비량은 19.8 g/day로 환산할 수 있으므로, 6개의 전체 실험 여과조에서 하루에 소비한 산소량의 합은 118.7 g/day이며 30일간 소비한 총산소량은 3,561 g이 된다.

John and John (1989)는 사료 1 kg당 1일에 어류가 소비하는 산소량은 200 g이라고 하였는데, 이러한 자료를 바탕으로 동 실험 기간 동안에 총 15.244 kg의 사료를 공급하였으므로 사료량을 기준으로 한 산소 소비량은 3,048.8 g이 되어 여과조에서 측정된 산소 소비량과 비교하여 큰 차이가 없었다. 한편 본 실험 여과조에서 암모니아 1 g이 산화되기 위해서는 평균하여 모래 9.7 g, 산호사 8.6 g, 폴리에틸렌 망 9.3 g, 자갈 7.5 g, 플라스틱 파판 7.1 g의 산소가 소비되므로서 여과 재료 사이에 산소 소비량의 차이가 인정되었다. 이러한 현상은 여과 재료에 형성된 여과 생물막의 특성에 기인하는 것으로 추정된다.

침지식 여과조를 이용하여 해산 어류를 사육하기 위해서는 침지식 여과조에 사용되는 여과 재료의 여과 능력과 특성을 구명하는 것이 필요하다. 침지식 여과 재료는 여과 능력 이외에도 관리의 효율성도 매우 중요하다. 침지식 여과 재료로 많이 사용되고 있는 모래와 산호사는 단위 용적당 여과 표면적이 크며 여과량도 많고 기계적인 여과 효과도 크나 공극률이 적어 잘 막히고 재료의 무게로 인하여 관리가 불편한 결점이 있다. 더욱이 순환 여과 양식 시스템은 고밀도로 사육하기 때문에 어류의 배설량과 사료 찌꺼기가 많아 모래, 산호사와 자갈 여과조는 쉽게 막히게 되며, 정화 기능을 정상적으로 회복하기 위하여 여과 재료를 꺼내어 세척하는 동안 여과조의 작동과

사료 공급을 중단하지 않으면 안된다. 이에 비하여 플라스틱 파판 여과조의 여과 능력은 본 실험에서 모래 여과조의 42%에 불과하나 여과조가 막히지 않고 관리가 대단히 용이하다. 더욱이 플라스틱 파판 여과조는 본 실험의 경우보다 현재의 용적에 3배 이상의 플라스틱 파판을 설치할 수 있으므로써 여과 능력을 3배 이상 증대시킬 경우는 모래나 산호사보다 더 큰 여과 능력을 발휘할 수 있을 것으로 추정된다.

한편 회전 원판 여과조는 구조상 산소 공급이 효과적으로 이루어지므로 여과 능력이 크다. 본 실험에서는 두께 1 cm의 스티로폼 판을 사용하여 여과 표면적이 적어 모래 여과조 보다 여과 능력이 낮았으나, 얇은 막으로 된 재료를 사용하면 여과 표면적을 현저히 증가시키므로써 다른 재료에 비해 단위 용적당 여과 능력을 월등히 높일 수 있을 것이다. 그러나 모래와 산호사 여과조는 사료 찌꺼기와 배설물을 여과조에 들어가기 전에 미리 기계적으로 여과하므로써 여과조에 유입되는 오염 부하량을 현저히 감소시킬 수 있으며, 플라스틱 파판 여과조는 침전조 역할을 겸할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 효율적인 순환 여과 사육 시스템을 개발하기 위해서는 여과 능력이 크고 관리가 용이한 여과 재료의 개발과 함께 각 여과 재료의 특성을 이용하여 수용 능력이 큰 순환 여과 사육 시스템의 개발을 위한 연구가 필요하다고 사료 된다.

요 약

해수 순환여과식 양식 시스템의 여과 재료별 암모니아 제거 능력을 정량적으로 평가하기 위하여 5종류의 침지식 여과 재료인 모래(직경 2~3 mm), 산호사(직경 30~50 mm), 자갈(직경 20~40 mm), 폴리에틸렌 망(네트론) 및 플라스틱 파판(스카이라이트)의 암모니아 제거량과 산소 소비량을 측정하고 그리고 회전원판식 여과 재료의 암모니아 제거량을 측정하여 비교하였다.

실험 기간 중 사육조의 암모니아 농도는 0.052~

0.904(평균 0.338 ± 0.219) mg/l 였고 수온은 19.2~21.4(평균 20.2 ± 0.58)°C 의 범위였으며 사육수의 암모니아 농도(x : mg/l)에 대한 여과 재료별 단위 용적당 일간 암모니아 제거량(y : g/m³/day)의 1/2-order kinetic 식과 1일 평균 암모니아 제거량(g/m³/day)은 다음과 같다.

모래 :

$$y = 135.5x^{0.5} - 25.1 \quad (r^2 = 0.8110), \quad 45.1$$

자갈 :

$$y = 43.7x^{0.5} - 5.5 \quad (r^2 = 0.2596), \quad 17.1$$

산호사 :

$$y = 125.1x^{0.5} - 33.0 \quad (r^2 = 0.7307), \quad 31.8$$

폴리에틸렌 망 :

$$y = 87.4x^{0.5} - 20.1 \quad (r^2 = 0.6780), \quad 25.2$$

플라스틱 파판 :

$$y = 71.1x^{0.5} - 17.6 \quad (r^2 = 0.5206), \quad 19.2$$

회전원판 :

$$y = 127.6x^{0.5} - 33.4 \quad (r^2 = 0.7146), \quad 32.8$$

사육조의 용존산소 농도 범위 3.8~7.5(평균 5.7 ± 0.98) mg/l 에서의 여과 재료 단위 용적(m³) 당 1일 산소 소비량은 모래, 산호사, 폴리에틸렌 망을 이용한 여과조에서 각각 442.1, 291.1, 및 236.9 g/m³/day 로 모래 여과조의 산소 소비량이 가장 많았으며, 자갈과 플라스틱 파판은 각각 135.6 및 134.2 g/m³/day로 가장 적었다. 한편 회전원판 여과조는 물에 노출되는 구조적 특성 때문에 산소 소비량 측정은 불가능하였다.

참 고 문 헌

- Balakrishnan, S. and W. W. Eckenfelder, 1969. Nitrogen relationship in biological treatment processes-II. Nitrification in trickling filters. *Water Research*, 3 : 167-174.
- Forster, J.R.M., 1974. Studies on nitrification in marine biological filters. *Aquaculture*, 4 : 387-397.
- Gujer, W. and M. Boller, 1986. Design of a

- nitrifying tertiary trickling filter based on theoretical concepts. *Water Research*, 20 (11) : 1353-1362.
- Haug, R.T. and P.I. McCarty, 1972. Nitrification with submerged filters. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 44 : 2086-2102.
- Hirayama, K., 1960. On operation of filter of marine closed-system aquarium. *Suisan Zoshoku*, 8 : 123-132.
- Hirayama, K., 1965a. Studies on water control by filtration through sand bed in a marine aquarium with closed circulation system-I. Oxygen consumption during filtration as an index in evaluating the degree of purification of breeding water. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish*, 31 : 977-982.
- Hirayama, K., 1965b. Studies on water control by filtration through sand bed in a marine aquarium with closed circulation system-II. Relation of filtering velocity and depth of sand layer to purification of breeding water. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish*, 31 : 983-990.
- Hirayama, K., 1966a. Studies on water control by filtration through sand bed in a marine aquarium with closed circulation system-III. Relation of grain size of filter sand to purification of breeding water. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish*, 32 : 11-19.
- Hirayama, K., 1966b. Studies on water control by filtration through sand bed in a marine aquarium with closed circulation system-IV. Rate of pollution of water by fish, and possible number and weight of fish kept in an aquarium. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish*, 32 : 20-27.
- Hirayama, K., 1970. Studies on water control by filtration through sand bed in a marine aquarium with closed circulating system-VI. Acidification of aquarium water. *Nippon Suisan Gakkaishi* 36 : 26-34.
- John E. H. and C. John, 1989. Design and operating guide for aquaculture seawater systems. pp.264.
- Kawai, A., Y. Yoshida and M. Kimaia, 1964. Biochemical studies on the bacteria in the aquarium with a circulating system-I. Change of the qualities of breeding water and bacterial population of the aquarium during fish cultivation. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 30(1) : 55-62.
- Kawai, A., Y. Yoshida and M. Kimaia, 1965. Biochemical studies on the bacteria in the aquarium with a circulating system-II. Nitrifying activity of the filter sand. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 31(1) : 65-71.
- Kim, I.-B., P.-K. Kim and Y.-O. Chee, 1987. The ammonia removal capacity of a few kinds of filter media in a water reuse aquaculture system. *Bull. Korean Fish. Soc.* 20 (6) : 561-568.
- Manthe, D.P., R.F. Malone and S. Kumar, 1988. Submerged rock filter evaluation using an oxygen consumption criterion for closed recirculating systems. *Aquacultural Engineering* 7 : 97-111.
- Mevel, G. and S. Chamroux, 1981. A study on nitrification in the presence of prawns (*Panaeus japonicus*) in marine closed systems. *Aquaculture* 23 : 29-43.
- 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. Bovendeur, 1990. Fixed film nitrification characteristics in sea water recirculation fish culture systems. *Aquaculture* 87 : 133-143.
- Painter, H. A., 1970. A review of literature on inorganic nitrogen metabolism in microorganisms. *Water Res.* 4 : 393.
- Remmerswaal, R.A.M., 1993. *Recirculating Aquaculture Systems*, INFOFISH Technical Handbook 8., Dutch Aquacultural Engineering, The Netherlands.
- Saeki, A., 1958. Studies on fish culture in the aquarium of closed-circulating system. Its fundamental theory and standard plan. *Nippon Suisan Gakkaishi* 23 : 684-695.
- Spotte S., 1979. *Fish and Invertebrate Culture-Water Management in Closed Systems*. 2nd ed. pp.179. John Wiley and Sons, New York.
- Srna, R.F. and A. Baggaley, 1975. Kinetic response of perturbed marine nitrification systems. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 47 : 472-486.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons, 1972. *A practical handbook of seawater analysis*. Fish. Res. Bd. Canada, Bull. 167, Ottawa, Canada.
- Wickins, J.F., 1983. Studies on marine biological filters. Model filter. *Water Res.*, 17(12) : 1769-1780.