Journal of Aquaculture 13 (3) : 223~230 (2000)

광물미립자와 포말분리장치를 이용한 사육수 재사용시스템에서의 넙치(*Paralichthys olivaceus*)사육실험

민병서 · 강필애

대하수산, 경북 울진군 원남면 오산리

Rearing Olive Flounder *Paralichthys olivaceus* in a Water Reuse System with Mineral Particles and Foam Fractionator

Byoung Seo Min and Pil Ae Kang

Daeha Marine Hatchery, Osan-ri, Wonnam-myon, Uljin-kun, Kyounbuk 767-860, Korea

A rearing experiment of the olive flounder was performed in a set of water-reuse system to test the reusability of the water in culture system with (i) a foam fractionator to separate particles from water and (ii) a culture tank contain mineral particles to filter the metabolic wastes by adsorption and/or decomposition. Two kinds of commercially processed loess particles and a dolomite particle (all 50 μ diameter) were tested. The mineral particles were suspended in the culture tank and the water was pumped into the foam fractionator, where the particles were separated and drained out with foam from the system. In a circular culture tank of 4.8 m in diameter with 10 ㎥ water, the juvenile olive flounders (23.1 g/fish, 5,555 fish, 128 kg total body weight) were stocked. 90 % of the rearing water was reused and turnover rate of the water in the tank was two times per hour. Water temperature was maintained 17±1℃. At the end of 75 day-experimental rearing, 5,532 flounders, weighing 468 kg, were harvested. An individual flounder grew to 84.6 g of body weight. The final stocking density was 26.0 kg/㎥. No diseases were observed during the experiment.

Key words : Water reuse system, Mineral particle, Foam fractionator, Olive flounder (*Paralichthys olivaceus*)

서 론

시설양어에 있어 사육수의 재사용은 수자원, 환경, 에너지, 어병 등 관련되는 여러 가지 문제의 해답으로서 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 대부분이 실험실 규모로서 그 결과가 양어현장에 실질적으로 적용된 사례는 거의 없다. 유일하게 IBK System (Kim and Jo, 1999)이 양어현장에 성공적으로 적용되어 완전한 순환여과시스템으로 이스라엘잉어, 틸라피아, 뱀장어 등 담수어종을 산업규모로 생산하고 있고, 현재 해산어를 대상으로 하는 IBK System 시설이 시도되고 있어 (Kim, 2000) 그 결과가 기대되고 있다.

국외의 경우도 국내와 비슷하여 실제 산업규모의 양어장에 순환여과시스템이 성공적으로 적용된 예는 많지 않다. 근래 외국에서 개발된 순환여과 시스템이 국내에 도입된 사례가 몇몇 있으나 시스템 자체가 가지고 있는 범용성의 한계와 구조의 복잡성에 따른 관리유지의 문제, 시설비 및 운영비의 경제성 등의 문제점 때문에 성공적이지 못했다.

순환여과식 양식시설에서 사육수를 재사용하기 위한 과정이 내포하고 있는 기전은 사육의 결과로 생성된 노폐물질들을 사육수로부터 제거하는 것이다. 전통적으로 여과 (screening), 침전 (settling), 분해 (biofiltering)하여, 탈기 (degassing)와 살균 (disinfecting) 하는 과정 등이 포함된다. 이러한 기능을 수행하기 위해서는 상당한 설비가

필요하게 되고 이에 따라 범용성에 한계가 생기고 운영관리에 어려움이 따르게 된다.

광물미립자 (50 μ 이하)는 무한에 가까운 표면적을 가지고 있기 때문에 여과세균의 기질로 이용되어 사육수 중의 암모니아 농도를 급격하게 감소시킬 수 있다는 것이 밝혀졌고 (Peng, 2000), 바다의 적조생물을 흡착시켜 침전시키는 핵으로 작용한다는 것도 알려져 있다 (Shirota, 1987). 광물미립자의 표면적은 소성가공황토 (직경 44 μ 이하)의 경우 600 m^2/g에 이른다 (Lee, 2000). 또한 점토 (粘土, clay, 2 μ 이하)는 판상의 결정구조를 가지고 스스로 성장할 뿐 아니라 다른 분자를 흡수하는 능력을 가지고 있으며, 특히 운모형의 점토는 규산질판 (silicate layer) 사이에서 8,000가지 이상의 유기분자 패턴 (pattern)의 변형 (變形, derivatives)이 확인되었으며 이 유기분자 패턴의 변형들은 암모니아 이온과 알콜분자를 유기분자로 고정시키는 것을 포함하여 마치 템프리트 (template)처럼 작용한다 (Watson.1979). 따라서 광물미립자가 수질정화에 이용될 수 있는 가능성은 크다고 할 수 있다.

포말분리법 (foam fractionation, FF)은 용액으로부터 용질을, 액상혼합물로부터 특정물질을 분리하는데 널리 이용되고 있다. 원소와 화합물을 액체로부터 분리하는 용도만 92가지나 되며, 해수로부터는 Ca, Cu, Mg, Mn 등을 분리하는데 이용되고 있고 (Rubin and Goden, 1962) 사육수로부터 부유물질을 분리하고 (Wheaton, 1977) 입자성 유기물 (POC)을 제거한다 (Spotte, 1979). 또한 사육수 중의 부유성미생물의 수를 감소시키며 (Schlesner and Rheinheimer, 1974), 굴 양식을 위한 순환여과 시스템에서 벤츄리를 이용한 포말분리법으로 세균수를 22,100 cells/$m\ell$에서 220 cells/$m\ell$로 낮출 수 있었다고 Dwivedy (1973)는 보고하고 있다. 그리고 어류와 패류 사육시스템에서 용해성유기물 (DOC)을 제거함에 따라 (Dwivedy, 1973; Spotte, 1979; Lomax and Wheaton, 1975) 단백질 성분의 세균분해에 의한 암모니아 발생을 억제하고, BOD와 COD 및 질산염이 사육수 내에 축적되는 것을 완화시킨다고 한다 (Dwivedy, 1973). 또한 유기산 형태의 DOC를 제거함으로서 사육수의 pH를 조절하며 (Dwivedy, 1973), 포말분리법의 폭기 과정이나 포말에 의하여 사육수 중의 암모니아 일부가 제거되기도 한다 (Wheaton, 1977).

이 외에도 포말분리법은 DOC와 POC를 사육수로부터 제거할 뿐만 아니라 효과적인 폭기 기능을 가지고 있으며 해수에 적용했을 때 효과가 좋고 생물여과시설과 달리 넓은 공간을 필요로 하지 않으면서 관리가 용이하다. 생물여과시설의 대체로서가 아니고 그것과 연계되어 활용된다 (Huguenin and Colt, 1989). 실제로 IBK system (Kim and Jo, 1999)에서 생물여과시설 앞에 포말분리 장치를 설치하여 운영함으로서 큰 효과를 거두고 있다.

이와 같이 광물미립자와 포말분리법을 효과적으로 이용하므로써 이들 미립자가 사육수에 교질 (膠質)상태 (colloidal)로 현탁 (懸濁)되어 그 표면에서 사육수에 존재하는 노폐물질들을 흡착, 분해하고, 포말분리장치를 통하여 사육시스템 밖으로 배출된다면 사육수 정화에 필요한 제 과정과 이에 따르는 시설을 단순화시킨 새로운 순환여과 시스템이 가능하다는 가설 하에 넙치를 대상으로 하여 사육실험을 시도하였다.

재료 및 방법

사육시설은 사육수조와 이에 연결된 포말분리장치로 구성되었다 (Fig. 1). 사육수조는 직경 4.8 m의 PE판넬 (옅은 미색) 벽체, 콘크리트 바닥의 원형으로, 중앙에 배수 스탠드파이프, 외부 배수로 쪽에 수위조절 스탠드파이프가 장착된 구조이다. 바닥 경사는 중앙배수 스탠드파이프를 향하여 10%이며 평균수심 60 cm, 사육수량은 10 m^3이다. 포말분리장치는 직경 500 mm, 높이 2 m의 원통형으로 벤추리관 (Venturi tube) 현상에 의한 흡기 (吸氣)펌프 (aspiration pump)를 이용하여 60 l /min의 공기를 흡입하여 기포를 발생시켰으며 사육수가 장치를 통과하는 시간 (retention

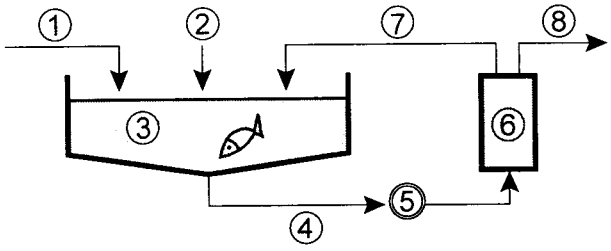

Fig. 1. Schematic configuration of the water reuse system for the experiment. ① Make-up water (seawater 34‰, heated to 17±1℃, 2 ㎥/hr); ② Mineral particle supply; ③ Rearing tank (4.8 m in diameter, circular, 0.6 m deep, 10 ㎥ in water volume); ④ Drain from rearing tank; ⑤ Pump (2HP, 20 ㎥/hr); ⑥ Foam fractionator (0.5 m in diameter, 2 m deep, retention time of 80 seconds); ⑦ Returning water (18 ㎥/hr); ⑧ Drain with foam from the foam fractionator (2 ㎥/hr).

time)은 80초이다. 사육시스템의 배치는 Fig. 1과 같다.

보충수 (Fig. 1,①)로서는 17±1℃로 가온된 자연해수가 2 m^3/hr로 공급되었으며 동일한 양의 사육수가 포말분리장치를 통하여 포말과 함께 배출 (Fig. 1,⑧)되었다.

사육수는 사육수조 (Fig. 1,③)의 외부 수위조절용 스텐드파이프에 연결된 펌프 (Fig. 1, ⑤)에 의하여 포말분리장치 (Fig. 1,⑥)로 보내져서, 분리된 포말이 보충수와 동일한 양의 배출수 (Fig. 1,⑧)와 함께 외부로 배출되고 나머지는 사육수조로 순환 (Fig. 1,⑦)된다. 순환사육수 양은 18 m^3/hr 이며 사육수의 재사용율은 90%이고 사육수조의 순환율은 48회/일이었다.

실험에 사용된 광물미립자는 시중에 제품으로 공급되는 2종의 황토 (A, B)와 돌로마이트 (dolomite) (C) 이었다. 입자 크기는 50 μm 이하였으며 12시간 간격으로 1일 2회, 1회 400 g (40 ppm)을 사육수에 직접 살포하였다. 3종의 광물미립자는 시험기간 중 Table 1과 같이 실험되었다.

사료는 Turbot 육성용 펠렛사료 (Le Gouessant사 제품, 조단백 54%, 조지방 12%)를 사용하였으며 공급 전 10%의 담수를 흡수시켰다. 하루 3회 (07:00, 13:00, 20:00시) 공급하였다.

사육시험에 사용된 넙치는 자가생산된 종묘로서 1999년 생산되어 판매되고 남은 것이사용되었다. 실험시작 시 평균체중 23.1 g, 5,555마리를 수용, 총중량 128 kg, 수용밀도 7.11 kg/m^2였다. 75일간 사육하였으며 성장을 파악하기 위하여 무작위 추출된 200마리를 25일 간격으로 3회 측정하였다.

사육시험 기간 중 사육수의 수온과 용존산소는 DO Meter (YSI-55)로 pH는 pH meter 900 (Fisher Scientific Co.)으로 측정하였다. 암모니아는 10일 간격으로 WAK-NH_4 간이테스트킷 (Kyoritsu Chemical-Check Lab. Corp.)으로 측정하였으며, 이의 확인을 위하여 실험 시작 60일째 오전 먹이공급과 광물미립자 투입 직전인 06:00시에 채수하여 국립수산진흥원 동해수산연구소 포항분소에 의뢰하여 일반수질 항목을 조사하였다. 사육수조 중앙 수면 위 2.5 m에 40 w형광등을 설치하여 06:00시 점등, 20:00시 소등하였다.

결 과

1. 성장

사육실험 기간 중 넙치의 성장 결과는 Table 2와 같다.

Table 1. Scheme of mineral particles added for the water reuse system

Days elapsed	1st-25th	26th-50th	51st-55th	56th-60th	60st-70th	71st-75th
Scheme	A	A + B	B	A + C	B + C	C

A: Processed and burnt residual reddish soil produced for red-tide control
B : Processed residual reddish soil for fish feed additive
C: Dolomite particles.

Table 2. Results of the rearing experiment

Initial		days		
		25	50	75
No. of fish	5,555	5,539	5,536	5,532
Body weight				
Mean (g)	23.1	35.7	58.9	84.6
Total (kg)	128	198	326	468
Feed consumed (kg)		62	108	121
Daily feeding rate (%)		1.52	1.65	1.22
Feed efficiency (%)[1]		113	119	117
Daily growth rate (%)[3]		1.74	1.99	1.45
Stocking density (kg/㎡)	7.11	11.0	18.11	26.0

[1]Feed efficiency (%): (G/F) x 100
[2]Daily growth rate (%) : ($\log_e$ Wt_2-loge Wt_1)/days x 100
F: Total feed consumed, G: Total weight gained, T: Days of one term (25days),
Wt_1: Total body weight initial, Wt_2: Total body weight final

사육 전 기간 중 어병은 관찰되지 않았으며 실험 개시 후 6일사이에 16 마리가 폐사 하였다. 그 후 개체량 측정 및 사육수조의 중앙배수스텐드파이프 교체작업 후 1-3 마리씩의 지느러미 등이 훼손된 폐사체가 7 마리 발견되어 사육실험 총 75일간 23 마리가 폐사 하였다. 그밖에 어체에서의 육안적인 이상은 발견되지 않았다.

2. 수질

사육수의 수온은 17±1℃가 유지되었다. 수온변화가 12시간 동안 1℃ 범위에서 변화한 경우 먹이섭취, 행동 등에 아무런 변화가 관찰되지 않았다.

pH는 전 기간 중 7.15~7.20의 범위에 있었다. 시판 가공황토 중 사료첨가제인 제품은 pH를 낮추고 돌로마이트는 pH를 높이는 경향이 있었으나 전체 pH의 경향에는 변화가 관찰되지 않았다.용존산소는 보충수에서 포화농도의 96%, 사육수조 내 위치에 따라 가장자리로부터 중앙배수 스탠드파이프를 향하여 포화농도의 75~50%로 측정되었으며, 사육수조에서 배수되는 물에는 포화농도의 50%, 포말분리장치를 통과하여 수조로 들어가는 순환공급수에는 포화농도의 85%로 유지되었다.

시험 기간중 간이 비색 측정에 의한 NH_4-N은 5 ppm 이하였고 국립수산진흥원에서 측정한 일반수질은 Table 3과 같다.

3. 광물미립자

광물미립자로 사용된 2종의 황토와 돌로마이트는 모두 사육수에 살포된 후 사육수조 전면에 고르게 퍼져 나갔으며 바닥에 잔류하지 않고 사육수와 함께 포말분리장치를 거쳐 순환하였으며 일부는 배출되었다. 40 ppm이 살포된 직후에는 사육수조 바닥의 어체가 보이지 않을 정도로 탁도가 높았으며, 사육수면 아래 10 ㎝에서 넙치의 형체가 확인되는 정도였다. 시간의 경과와 함께 투명도가 높아져 12시간 후인 다음 살포 전 까지는 사육수조의 바닥에 있는 넙치의 어체를 확실히 구별할 수 있을 정도로 맑아졌다.

광물미립자의 살포 자체나 이에 따른 탁도의 변화로 인한 사육중인 넙치의 행동 등에 이상현상은 관찰되지 않았다. 살포직후 사육수 표면에 떠오른 개체가 표면에 떠있는 펠렛사료를 섭취하는 것이 관찰될 정도로 탁도와 넙치의 행동은 무관하였다. 광물미립자 종류에 따른 차이는 관찰되지 않았다.

4. 포말분리장치

사육수조에 사료를 공급한 직후를 제외하고는 계속하여 거품이 대량 발생되어 배출되었다. 포말분리장치는 거품에 의한 노폐물과 광물미립자의 분리 배출기능 이외에 용존산소를 높이는 기능도 하였다, 즉, 사육수조 배출수의 용존산소는 포화도 50%였으나 포말분리장치를 통과한 순환공급수의 포화도는 85%로 높아졌다.

고 찰

남해안과 서해안에 위치한 일부 육상수조식 넙치양식장과 종묘배양장에서 사육수로 인입되는 해수에 갯펄의 미세한 입자가 혼입되는 경우가 있다. 그럼에도 아무런 문제가 없으며 오히려 어병에 의한 피해가 적은 것으로 관찰된다. 그렇다면 그 미세한 갯펄의 입자들이 사육수에 어떤 긍정적인 영향을 주고 있을 가능성은 없을까?

일반적으로 순환여과식 양식 시설 내에 고형물 생성은 사료 공급에 따른 미섭취 사료와 어류의 배설물에 기인하며 이것은 시스템 내에 탁도를 높이는 원인이 된다. 이와

Table 3. Concentrations (㎎/ℓ) of COD, SS and nitrogen compounds in culture water of the system on the 69th day at 6 a.m. just before feeding and the application of mineral particles

	COD	SS	NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	Total-N	Remarks
Make-up sea water	0.88	0.4	0.003	0.002	0.353	0.358	Fig.1,①
Effluent water from reaing tank	1.82	4.7	1.629	0.357	0.189	2.175	Fig.1,④
Returning water from foam fractiontor	1.78	4.3	1.885	0.384	0.155	2.424	Fig.1,⑦
Waste water from foam fractionator	1.97	8.6	1.958	0.420	0.132	2.511	Fig.1,⑧

같은 고형물은 분해되어 암모니아 농도를 증가시키며 병원성 미생물의 증식을 조장하여 어류 성장에 큰 지장을 초래한다. 또한 해수중의 용해성유기물이 이온교환수지의 표면을 오염시켜 이온의 교환을 방해하는 현상이 보고된 바 있다 (Jorgesen et al. 1976; Frisch and Kumin, 1960).

그러나 Batooshingh et al. (1969)은 해수 중의 모든 미립자 (0.22~1.2μ)는 씨앗 (seed matter) 또는 핵 (nuclei)으로서 고형유기물입자들이 집합체 (aggregates)를 형성하고 이를 촉진하는데 중요한 역할을 하는 사실을 발견하였다.

따라서 인위적으로 사육수에 투입되어 현탁 (懸濁)하는 광물미립자가 핵으로 작용하여 사육수에 있는 입자성유기물을 모아 집합체를 만들고 용해성유기물을 흡착하여 사육수를 정화할 가능성은 충분하다. 이와 같은 방법으로 사육수를 정화하여 재사용 하는 것을 구상한 것은 1997년 부경대학교 김동수 교수가 개발한 수퍼미꾸라지를 대상으로 한 순환여과식양식시스템을 염두에 둔 것이었다. 미꾸라지는 그 생태특성상 사육수 중의 현탁물이나 암모니아 농도가 문제되지 않는 어종이므로 그 가능성이 충분하다고 생각되었다.

폭우나 장마 때 육상수조식 양식장에 뻘물이 들어오는 경우가 있다. 뻘물이 지나간 후 많은 경우 어병이 발생하여 피해를 보게된다. 양식장에서는 뻘물이 들어올 경우 먹이공급을 중단하고, 뻘물이 지나간 후에는 약욕을 시키는 등의 대책을 강구한다. 이러한 현상은 뻘 자체가 원인인지 아니면 뻘과 함께 상류로부터 씻겨 내려온 유해물질 또는 병원생물이 원인인지는 명확하지 않다. 연안에 서식하는 해산어종이나 강, 하천, 댐호에 서식하는 담수어종들 역시 태풍, 폭우, 장마 등에 의하여 일시적으로 높은 탁도에 노출되게 된다. 이 경우 피해가 관찰되거나 조사보고된 바 없다.

그러나 광물미립자를 이용하여 사육수를 정화하여 재사용 하려는 시도의 대상을 미꾸라지에서 양식어류 전체로 일반화 할 경우 다음 두 가지 문제가 고려되어야 한다. 첫째가 광물미립자가 높은 탁도로 현탁될 때 사육중인 어류의 생리에 미칠 수 있는 부정적인 영향과 어체에 물리적인 피해를 줄 수 있는 가능성이다. 둘째는 사육수 중의 암모니아의 처리문제이다.

본 사육실험에서는 인위적으로 광물미립자를 사육수에 현탁 (40 ppm, 1일 2회)시켜 높은 탁도가 실험기간 동안 반복하여 계속되었다. 사육중인 넙치는 어떤 특이한 반응도 보이지 않았으며 어병의 발생도 없었다. 수심 60 cm에서 바닥의 넙치를 전혀 관찰할 수 없고, 수면 아래 10 cm에서 넙치의 윤곽을 확인할 수 있는 탁도에서 수면에 뿌려진 펠렛사료를 넙치가 찾아먹는 것이 관찰되었다. 넙치는 연안에 서식하기는 하나 내만성 어종은 아니며 저질이 사니질인 비교적 맑은 해역에 서식하는 것으로 알려져 있다. 이러한 넙치가 높은 탁도에 적응하여 정상적인 행동과 성장 (Table 2)을 보여준 것으로 보아 일반 어류의 사육시, 광물미립자 현탁에 의한 사육수의 탁도 자체는 일정범위 내에서 부정적인 영향이 없을 것으로 판단된다. 이는 광물미립자를 사육수에 현탁시켜 사육수를 정화시켜 재사용하는 사육시스템을 미꾸라지를 비롯하여 여타의 양식대상어종에 일반화할 수 있는 가능성을 보여주는 것으로 생각된다.

순환여과양식시스템에서 사육수의 암모니아는 그 독성 때문에 제거되어야 하는 제1의 표적물질이다. 사육수 중의 암모니아를 제거하는데 사육수를 교환하는 방법 외에 현재 이용되고 있는 방법은 미생물을 이용한 생물여과가 유일하다. 이에는 고정식이든 유동식이든 질화세균이 부착할 수 있는 기질을 필요로 하고 이 기질을 장착할 수 있는 별도의 시설 (생물여과조)이 필요하다. 또한 이들 질화세균 자체의 활성을 유지하기 위하여 이에 관련되는 요소들이 관리되어야 한다. 수온, 용존산소, 물의 흐름과 입자성유기물 및 용해성유기물의 양은 물론이고 암모니아 자체의 농도와 절대량이 이에 관련이 있다. 따라서 생물여과에 의한 암모니아 제거방법에는 시설과 관리에 기술적인 면이나 경제적인 면에서 여러 가지 어려움이 따른다.

광물질인 황토는 많은 분야에서 이용되고 있으며 수산분야에도 이미 적조방제에 활용되고 있고, 최근에는 넙치의 스쿠치카충 구제에 활용 가능성 (Choi, 1999)이 있다는 보고가 있다. 또한 황토의 광범위한 흡착능력에 관한 많은 미확인 정보가 있다. 황토를 비롯한 광물미립자는 그 표면적이 아주 넓고 (Lee, 2000), 점토의 경우 다른 분자를 흡수하는 능력을 가지고 있으며, 특히 운모형의 점토는 암모니아 이온과 알콜 분자를 유기분자로 고정시키는 작용이 Watson (1970)에 의해 알려져 있다.

광물미립자로서 사육수의 정화를 목적으로 시도될 수 있는 것으로는 황토, 돌로마이트 (dolomite)와 고령토, 벤토나이트 (bentonite) 제오라이트 (zeolite) 등이 있으며 본 사육실험에서는 50μ m이하의 가공황토 2종과 돌로마이트가 사용되었다. 사육실험 중 사육수의 암모니아 농도는

2 ㎎/ l 를 넘지 않았다 (Table 3). 이는 암모니아가 계속 어떤 경로를 통하여 제거되었다는 사실을 확인시켜 준다. 광물미립자의 표면에 흡착되었을 가능성과 이들 미립자를 핵으로 한 활성오니에 의하여 분해되었을 가능성이 있다. 그러나 사육수에 살포된 광물미립자 대부분이 12시간 이내에 포말분리장치를 통하여 사육시스템 밖으로 배출되었으므로 사육수 중의 암모니아가 전부 활성오니의 과정을 통하여 분해되었다고 추정하기는 어렵다. 따라서 광물미립자가 암모니아를 부분적으로 흡착한 것으로 추정된다. 따라서 현재까지의 결과로 사육수에 현탁된 광물미립자가 사육수 중의 암모니아 제거에 어떤 형태로든 기여했으리라는 판단에는 무리가 없다. 따라서 광물미립자를 이용하여 사육수를 정화하여 재사용하는 방법을 여러 어종에 이용해볼 수 있다고 생각된다.

본 실험에서 사육수를 정화하기 위하여 사육수에 광물미립자를 현탁시킨 것이 사육수재사용시스템의 한 축이라면 이에 상응하는 또 하나의 중요한 축은 포말분리장치이다. 포말분리법은 미세 공기 기포를 이용하여 수중의 용해 및 입자상태의 물질을 제거할 수 있으며 (Rubin and Goden, 1962; Wheaton, 1977; Spotte, 1979), 또한 사육수 중의 부유성미생물의 수를 감소시키고 (Schlesner and Rheinheimer, 1974), 세균수를 낮출 수도 있었다 (Dwivedy, 1973). 또한 포말분리법은 에너지 소비가 낮고 제거효율이 높으며 다른 수질 정화 공정에 비하여 운전 및 유지비가 저렴하여 양어장 및 활어 수조에 적용하기 좋은 방법이다 (Chem, 1994; Suh et al. 1997). Lomax (1976)는 생물 여과기에 침전조, 포말분리 장치 또는 기계적 여과기를 각각 장치하여 사육한 어류 양식 시스템의 성능을 비교한 결과, 비용이나 효율성의 측면에서 포말분리장치를 함께 사용한 생물여과기가 가장 좋은 결과를 나타내었다고 하였으며, Dwivedy (1973)는 포말분리장치에 의해 굴양식장 폐수에서 부유성유기물과 용존성유기물을 제거할 수 있었다고 하였다. 또한 Huguenin and Colt (1989)에 의하면 포말분리장치는 용해성유기물과 입자성유기물을 사육수로부터 제거할 뿐만 아니라 효과적인 폭기 기능을 가지고 있으며 해수에 적용했을 때 효과가 좋고 생물여과시설과 달리 넓은 공간을 필요로 하지 않으면서 관리가 용이하고 생물여과시설의 대체로서가 아니고 그것과 연계되어 활용되었다 (Huguenin and Colt, 1989).

실제로 IBK system (Kim and Jo, 1999)에서 생물여과시설 앞에 포말분리 장치를 설치하여 운영함으로서 큰 효과를 거두고 있다. 그러나 본 실험의 사육시스템은 사육수조의 배수구에서 펌프로 사육수를 포말분리장치로 보내 포말분리한 후 사육수조로 순환시키는 구성으로 생물여과시설이 생략되었다. 사육실험기간 중 사육수의 암모니아 농도가 허용치 이하로 유지된 것 (Table 3)은 생물여과시설의 기능을 사육수에 현탁된 광물미립자와 이를 사육수로부터 분리, 배출시키는 포말분리장치의 기능이 감당한 것으로 생각된다. 이러한 결과가 광물미립자의 기능에 의한 것인지, 또는 포말분리의 기능에 의한 것인지, 광물미립자의 기능에 의한 것이라면 흡착기능인지, 분해기능인지, 포말분리의 기능에 의한 것이라면 폭기에 의한 것인지, 거품 자체에 의한 것인지 등의 많은 의문에 대하여는 앞으로 면밀한 연구가 필요하다.

또한 포말분리 장치의 폭기과정은 암모니아를 제거하는 외에 부수적으로 사육수에 산소를 공급하는 것으로 확인되었다. 사육수조에서 배수되는 사육수의 용존산소는 50% 포화도였으나 포말분리장치를 거쳐 순환되는 사육수는 포화도가 85%로 증가되었다. 이는 별도의 산소공급설비의 필요성을 감소시켜주는 것으로 생각된다.

어류의 성장에서는 23.1 g의 넙치를 수온 17±1℃, 환수율 2회전/시간에서 순환여과식으로 75일간 10 ㎡ (바닥면적 18 ㎡)에서 사육하여, 실험 종료시 평균 84.6 g으로 성장하였으며 일일성장율 1.43~1.95%였고 최종 수용밀도는 26.0 ㎏/㎡였다 (Table 2). Jeon et al. (1993)은 40-44 g의 넙치를 수온 20~25℃, 환수율 2회전/시간에서 유수식으로 37일간 250 l 수조 (바닥면적 0.5 ㎡)에서 사육밀도 실험을 하였다. 실험이 끝났을 때 넙치는 93~113 g으로 성장하여 일일성장율 2.13~2.36%였으며 최종 수용밀도는 41 ㎏/㎡였다. 두 실험의 결과를 수평 비교하기에는 무리가 있으나 사육수온과 사육수조의 규모를 감안하면 본 실험에서 넙치의 성장은 유수식 사육에 뒤지지 않는 결과라고 생각된다. 육상수조식 넙치양식장에서 환수율 0.5~0.75회전/시간 (1일 12~18회전)을 기준으로 20~100 g의 중간종묘의 수용밀도가 5~10 ㎏/㎡인 점을 감안한다면 본 사육수 재사용 시스템의 수용밀도는 상당히 높은 수준이다.

특기할 것은 실험 시작시나 사육 중 어체 측정을 위하여 사육 중인 넙치에 손을 댄 후 등 전 실험기간을 통하여 약제 처리를 않았음에도 어병에 의한 피해는 물론 어병의 징후조차도 없었다. 유수식 넙치양식장에서 사육밀도가 높아지면 어체가 검어지고 지느러미가 갈라지는 현상이

나타나게 된다. 본 사육실험에서도 체색은 검어졌으나 지느러미가 갈라지는 현상은 관찰되지 않았다. 실험 시작을 위하여 전 어체를 측정한 후 일주일간 16마리의 폐사가 있었으며 그 후 폐사체로 발견된 7개체는 폐사 원인을 알 수 없었다. 사육수조의 중앙 스텐드파이프 교체와 어체 측정을 위한 표본 채취시의 손상으로 추정된다. 실험 시작을 위해서 전 어체를 측정 한 후 일반적으로 실행하는 약욕을 하지 않았음에도 어병이 발생하지 않은 것은 광물미립자와 포말분리법이 병원생물을 제거할 수 있는 기능을 가졌다는 간접적 증거로 생각되며 확인될 경우 본 사육시스템이 가지는 또 하나의 장점이 될 수 있다.

본 실험의 사육시스템은 사육수의 정화, 재사용을 위한 정화 방법의 원리가 기존 순환여과시스템의 그 것과는 근본적으로 다르다. 사육의 결과로 생성되는 모든 노폐물이 사육수에 현탁된 광물미립자와 포말분리 기능만으로 정화 처리되며 넙치를 정상적으로 사육할 수 있었다. 본 사육시스템은 구조가 간단해서 관리 유지에 특별한 어려움이 없다. 앞으로 넙치를 사육하는 육상수조식 양식장에는 물론 내수면의 시설 양어 전반에 확대 적용이 가능 할 것으로 생각된다. 특히 수자원의 부족이 예상되고 환경보호가 중요한 문제로 대두되는 현 시점에서 범용성이 예상되고 실용성이 있을 것으로 사료된다.

사육수에 광물미립자를 현탁시키고 현탁된 미립자가 사육수 중의 노폐물과 병원생물을 흡착 또는 분해하고 이를 포말분리장치에서 분리 배출함으로서 사육수를 정화하여 재사용 하는 사육시스템이 실용화되기 위해서는 다음과 같이 관련 연구와 기술의 개발이 필요하다.

1. 이용 가능한 광물미립자의 개발 : 현재 실험에 사용된 2종의 가공황토와 돌로마이트미립자 외에 고령토, 벤토나이트, 제오라이트 등이 가능성이 있다. 이 이외의 광물에 대한 전문적인 조사 및 각 광물의 특성 파악이 필요하다.
2. 광물미립자의 기능 : 황토를 예로 들어보면 경험에 의한 효능에 대한 미확인 정보 뿐으로 과학적인 정보가 없다. 기타 광물미립자와 사육수에 대하여는 아무런 정보도 없다. 이들 미립자가 사육수 중에서 발휘할 수 있는 기능의 정성적, 정량적 연구가 필요하다.
3. 포말분리장치의 기능 향상 : 필요한 동력을 줄이면서 성능을 높이고 거품과 같이 배출되는 사육수의 양을 줄일 수 있는 구조의 개발이 필요하다.

요 약

사육수에 광물미립자를 현탁시켜 노폐물을 흡착, 분해시킨 후 이를 분리, 배출시킴으로서 사육수를 정화시켜 재 사용할 수 있다는 가설 하에 사육수조와 포말분리장치로만 구성된 사육수 재사용 시스템에서 광물미립자를 현탁시켜 넙치를 실험사육 하였다.

두 종류의 가공황토 (processed residual reddish soil, 50 μ이하)와 돌로마이트 (dolomite, 50 μ이하)미립자를 사육수에 현탁시키고 포말분리장치로 이를 분리, 배출시킴으로서 사육수를 정화하였다. 직경 4.8 m의 원형사육수조 (사육수량 10 m^3), 사육수 순환율 시간당 2회전, 재사용율 90%, 수온 17±1℃에서 평균체중 23.1 g의 넙치 치어 (5,555마리, 총중량 128 kg)를 75일간 사육하여 평균체중 84.6 g (5,532마리, 총중량 468 kg)으로 육성하였다. 최종 수용밀도는 26.0 kg/m^3였다. 실험기간 동안 어병은 관찰되지 않았다.

사육수에 광물입자를 현탁시켜 사육수 중의 노폐물을 흡착, 분해시킨 후 포말분리장치로 이를 배출시킴으로서 사육수를 정화하여 재사용하는 방법은 새로운 사육수 재사용 어류양식시스템으로서 가능성이 있다.

참 고 문 헌

Batooshingh, E., G. A. Riley, and B. Keshwar, 1969. An analysis of experimental methods for producing particulate organic matter in sea water by bubbling. Deep-Sea Res., 16 : 213-219.

Chen, S., 1994. Modeling surfactant removal in foam fraction I. Aquaculture Engineering 13 : 163-181.

Choi, H. S., 1999. Unpublished data. Tong-young Lab., South Sea Fish. Res. Inst., Nat. Fish. Res. Dev. Agency.

Dwivedy, R. C., 1973. Removal of dissolved organics through foam fractionation in closed cycle systems for oyster production. Paper No. 73-561, American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Mich.

Frisch, N. W., and R. Kunin, 1960. Organic fouling of anion-exchange resins. J. Am. Water Works Assoc., 52 : 875-887.

Huguenin, J. E., and J. Colt, 1989. Design and operating guide for aquaculture seawater systems. Elsevier Science Publishers B. V., 170-171 pp.

Jeon, I. G., K. S. Min, J. M. Lee, K. S. Kim, and M. H. Son, 1993. Optimal stocking density for olive

flounder, *Paralighthys olivaceus*. rearing in tanks. Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency, 48 : 57-70.

Jorgensen, S. E., O. Libar, K. L. Graber, and K. Barkacs, 1976. Ammonia removal by use of clinoptilolite. Water Res., 10 : 213-224.

Kim, I. B., J. Y. Jo, 1999. The environmentally friendly "Intensive Bio-Production Korean" (IBK) system. Recirc Today, 1(2) : 22-23.

Kim, I. B., 2000. Personal communication. Department of Aquaculture, Pukyong National University. Pusan 608-737, Korea.

Lee, I. S., 2000. Personal communication. Sam Jung Biotech. San 780 Kajoadong, Chinju, Kyeongnam 660-750 Korea.

Lomax, K. M., 1976. Nitrification with water pretreatment on a closed cycle catfish culture system. Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park, MD. USA.

Lomax, K. M. and F. W. Wheaton. 1975. Fish culture waste : Solids affect nitrification. Paper No. 75-5544 American Society of Agricultural Engineers, St. Joshph, Mich.

Peng, L., 2000. Water quality, nutrient budget, and fish production in intensive aquaculture pond with and without biofilter. Master Thesis. Pukyong National University. Pusan. Korea. 39 pp.

Rubin, E. and E. L. Goden, Jr., 1962. Foam separation, in new chemical engineerig separation techniques. Schoen, H.M. Ed. Wiley-Interscience, New York, 319-385 pp.

Schlesner, H. and G. Rheinheimer, 1974. Auswirkungen einer ozonisierungsanlage auf den backteriengehalt des wassers eines schauaquariums. Kiel. Meeresforsch, 30 : 117-129.

Shirota, A., 1987. Status of study on occurrence mechanism and control of red tide. Proceedings of Symposium on Red Tide and Conservation of the Coastal Environment., 129-163.

Spotte, S., 1979. Fish and invertebrate culture. Wiley-Interscience, New York, 46-50 pp.

Suh, K. H., M. G. Lee, M. S. Lee, B. J. Kim, E. J. Kim, and M. C. Cho, 1997. Treatment of aquacultural recirculating water by foam separation-II. Characteristics of solid removal. J. Korean. Aquaculture Society.

Watson, L., 1979. Lifetide. Simon and Schuster, New york. 36 pp., 40 pp.

Wheaton, F. W., 1977. Aquacultural engineering. Wiley-Interscience, New york, 538-555 pp.