동해안형 전복 순환여과식 양식 기술

박정환, 김유희
강원도립대학
TEL)033-660-3369
E-mail) jpark90@yahoo.co.kr

1. 동해안의 해양 특성 및 양식 산업

강원 동해안은 청정한 자연 및 수질 환경을 가지고 있음에도 불구하고, 남해안 및 서해안과 비교하여 긴 저수온기와 낮은 연평균 수온으로 인해 양식 산업이 활성화되는데 많은 제약점을 가져 왔다. 동해안의 연평균 수온은 8.6~15.9℃로서 주요 산업화 양식종의 적정 성장 수온을 제공하기에 부적절한 수온 환경을 가지고 있다. 월별 수온 변화를 살펴보면 수온 15℃이상 유지되는 시기는 5월 중순부터 10월 중순까지로 연간 생물 사육이 가능한 기간은 불과 5~6개월에 지나지 않는다. 이에 따라 정상적인 생물 사육을 성립시키기 위해서는 긴 저수온기 동안 사육수를 가온해야 하는 에너지 소모적인 방법을 채택할 수밖에 없다. 그러나 타 지역과 비교하여 장기 사육을 하여야 하고 적정 사육 수온을 유지하기 위해 과도한 연료비를 지출해야하므로 단위 생산당 생산 단가의 상승으로 채산성을 확립하기가 어렵다. 실제 강원 동해안 지역에 해산 품종 양식 업체는 2001년을 기준으로 발전소 온배수를 이용한 넙치 양식 8개업체와 전복 종묘 생산 2개업체만이 운영되고 있을 뿐이다. 넙치 양식장의 경우

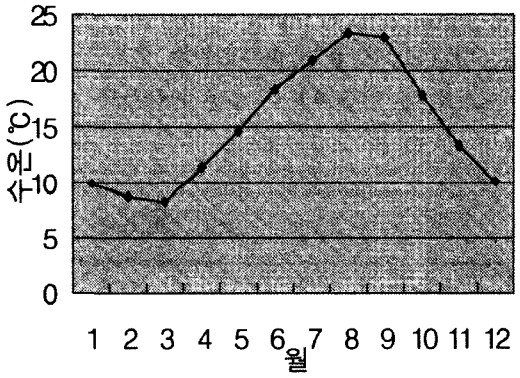

그림 1. 강원 동해안 지역의 연평균 해수 수온 변화

발전소 온배수를 이용하기 위해 양식 업체들이 밀집되어 있어 매년 질병 발생 문제와 지난 수해시 침수로 인해 경영이 어려운 실정이며, 짧은 적정 사육 기간 중에도 잦은 냉수대 등 수온 급변으로 인해 사육 중 대량 폐사가 발생하고 사육 적정 기간이 짧아 양성하여 판매시 까지 4~5년 동안 장기 사육하여야 하는 전복 양식 업체의 경우 자금의 회전률이 낮아 사업의 성립이 어렵다.

2. 동해안의 전복 양식 전망

참전복에는 풍부한 단백질과 글루타민산, 로이신, 알긴산 등의 아미노산이 많이 함유되어 있어

독특한 단맛을 내며, 비타민과 미네랄이 풍부하기 때문에 산모의 수유를 위해서 전복을 고아 먹이기도 하고, 궁중요리는 물론 병후 회복에 효험이 좋아 여러 가지 형태의 음식으로 인기가 있어 왔다. 현재까지도 참전복은 고가식품 또는 희귀식품으로 각광받고 있는 고부가가치 품종으로, 포화 상태에 이른 해산어 양식의 대체 품종으로 양식어가의 주목을 받고 있어 최근 전복 양식 업체가 증가하고 있는 추세이다.

강원 동해안은 국내 관광 명소로 인식될 만큼 천혜의 관광 자원이 풍부하며, 영동 고속도로 개통으로 서울·경기 지역과 인적·물적 소통이 더욱 활발해 질 것으로 예상된다. 실제 영동 고속도로 개통과 주 5일 근무의 시행으로 강원 지역의 관광객 방문자 수가 크게 늘어 2002년 기준으로 내국인 관광객이 약 6,300만명이 방문하였고 외국인 관광객의 경우 약 97만명이 방문하여 전년대비 각각 23.5%와 27.3% 증가하여 지속적으로 관광객의 수가 늘어날 것으로 예상되므로 향후 수산물의 현지 대량 소비와 고속도로 개통에 의한 대형 시장에 접근성이 용이하여 유통 환경의 개선과 더불어 수도권 지역에서의 대량 소비도 가능할 것으로 생각된다. 특히 동해안은 강원도 지역의 해중림 복원사업에 의해 생산되는 해조류를 먹이로 이용하는 전복 연계 산업을 발전시킬 수 있어 청정 해역에서의 청정 수산물 생산 개념에 의해 타 지역 품종과 차별화된 고부가가치 특산물로서의 높은 경쟁력을 가질 수 있다.

3. 동해안형 순환여과식 전복 양식 기술 개발

전복 육상 양식은 주로 치패 또는 중간 종묘

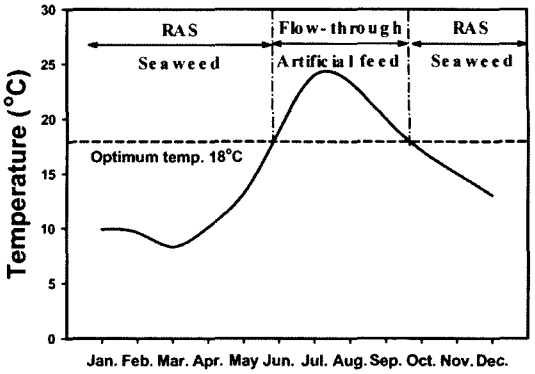

그림 2. 강원지역의 자연수온의 변화와 적합한 전복 양식방법

RAS : Recirculating Aquaculture System
(순환여과식 사육 방법)
Flow-through (유수식 사육 방법)

생산에 이용되고 있고, 육성을 위해서는 주로 바닥식이나 가두리식 등 주로 자연 생산력에 의존하고 있다. 전복 육상 양식 시설의 경우도 대부분 유수식 양식 형태로서 자연 수온에 영향을 많이 받으므로 자연 생산력에 의존하는 양식 방법과 실제 사육 가능한 시기는 매우 제한적이다.

따라서 기존의 양식 방법으로는 전복 자체의 느린 성장률과 사육 환경 상의 문제로 인해 동해안 지역에서 전복 양식 산업의 한계성을 극복하기 어려우므로 동해안 지역의 환경 특성을 극복할 뿐만 아니라 겨울철에도 성장을 지속시킬 수 있는 환경 독립적인 양성 시설의 개발이 필요하다.

그러므로 여름철 고수온기 동안에는 기존의 유수식 사육 방법 또는 순환여과식과 병행한 반 폐쇄식 사육 방법을 적용하여 전복을 사육하고, 전복의 적정 성장 수온 이하로 내려가는 10월 중순부터 이듬해 5월말까지 순환여과식 양식 방법을 이용하여 전복을 사육함으로써 연중 지속적인 전복 양성을 실현할 수 있다.

순환여과식 양식 기술 개발은 세계적으로 1960~1970년대에서 최초 시작되어 1980년대에 급속도로 발전하면서 산업적 경제 규모를 갖출 수 있게 되었다. 현재 덴마크를 포함한 서북 유럽, 미국, 중국, 일본 및 대만 등지에서 주로 많이 이용되고 있으며 적용 국가가 점차 확산되어 순환여과식 양어장에서 출하되는 생산량이 연간 수천 톤에 이르고 있을 정도로 담수 양식에서는 상용화되어 가고 있다. 특히 덴마크와 네덜란드에서는 뱀장어 양식에 순환 여과 양식 기술을 이용하여 유럽에서 양식되는 생산량의 절반을 넘는 것으로 알려져 있고 노르웨이는 해산어 육상 순환 여과식 양식 기술을 개발하여 보급하고 있을 정도로 세계적으로 중요한 비중을 차지해 가고 있다.

현재 우리나라의 양식 산업은 일부 담수 어류 양식에 순환여과식 사육 방법이 적용되기는 하였지만, 전체 양식 산업에서 보다 중요한 비중을 차지하고 있는 해수 어류 양식에는 적절히 이용된 예가 거의 없어, 대부분 유수식 육상 수조 또는 내만의 가두리에서 양식이 이루어지고 있다. 가두리 양식과 유수식 양식은 내만의 오염과 병원균에 오염된 해수를 사용한다는 측면에서 심각한 질병 발생의 문제점을 안고 있다. 그러나 외부 환경으로부터 독립적으로 운전될 수 있는 순환여과식 기술의 적용으로 단위 면적당 생산량의 증가, 물의 절약, 폐수의 감소, 에너지(동력, 연료)의 절약이 가능하면서도 질병의 방지까지 가능한 좋은 사육 환경을 유지 관리할 수 있어 오염과 질병에 의한 문제점들을 극복할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 동해안과 같은 생물 사육에 부적절한 수온 환경을 가지는 해역의 경우, 이중 비닐막을 이용한 보온 기술 및 보충수의 최소화와 물의 연속적인 재처리로 열손실을 극소화할 수 있는 순환여과식 사육 기술의 적용이 절실히 필요하다.

최근에는 어류 양식에서 뿐만 아니라, 고부가가치 품종인 새우 양식에 기술을 적용하여 안정적으로 대량 생산 체제를 구축하면서 전 세계적으로 적용 품종의 범위가 점차 확대되고 있어 현 시점에 발 빠른 전복의 순환여과식 사육 방법에 의한 양성 기술 개발을 통해 기술력에서 우점적인 위치와 경쟁력을 구축할 수 있을 것이다.

4. 전복 순환여과식 양식의 실현 가능성

동해안의 해양 특성 및 환경에서 동절기간 중 전복의 적정 성장 환경을 제공함으로써 전복의 연중 지속적인 사육으로 사육 기간의 단축과 건강한 생물 생산 가능성을 판단하기 위하여 pilot plant 전복 순환여과식 사육 시설에서 전복을 사육하고 시설 내 적정 수온 및 수질 유지 여부 및 전복의 성장률과 생존율을 평가하였다.

• 순환여과식 사육 시설

약 60평 부지에 30톤 규모의 pilot 순환여과식 양식 시설을 강원도립대학 양어장에 설치하고 동

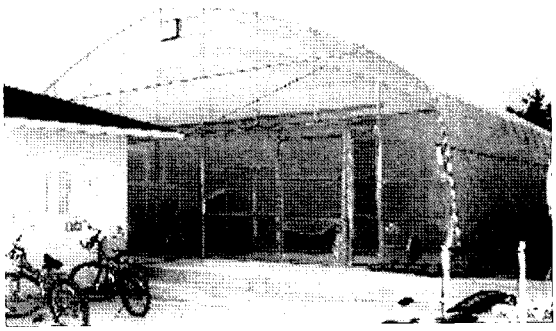

그림 3. 이중 비닐막을 설치한 green house

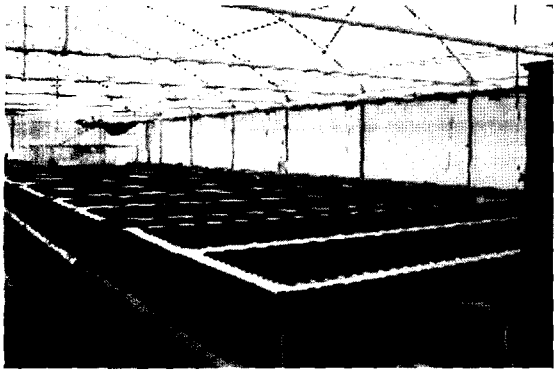

그림 4. Pilot 규모의 순환여과식 사육 시설

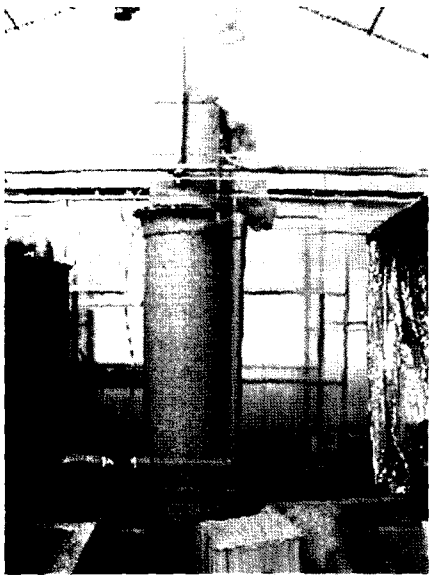

그림 5. 시스템 내 거품 분리기

절기 동안 전복 사육 실험을 실시하였다. 양식 시설 외부에는 이중 비닐막 구조의 green house(그림 3) 설치하여 자연 복사열에 의해 비닐막 사이에 보온층을 형성함으로써 낮 동안의 자연 복사열을 이용하여 실내 온도를 유지하고 야간에는 열손실을 최소화하였다. 또한 수온이 낮은 유입 보충수를 최소화하고 지속적으로 물을 재처리하여 사용하는 순환여과식을 채택함으로써 동절기에도 적정 수온을 유지하도록 하였다.

순환여과식 양식 시설(그림4) 4m×0.8m×0.6m(약 1.9톤) 크기의 pp 사육 수조 11개, 생물학적 여과조 1기 및 거품 분리기 1기로 구성되어 있었으며, 1.2HP 순환펌프 1대를 이용하여 전체 사육수를 순환하였다.

거품 분리기는 상승하는 공기방울의 계면활성에 의해 수중의 미세한 먹이 찌꺼기와 유기 고형물에 흡착하여 수표면에 형성된 거품 덩어리를 제거함으로써 수중으로부터 오염물을 제거하는 장치로서(그림 5), 직경 50cm, 높이 2m의 FRP 재질로 자체 고안·제작되었으며, 사육수와의 접촉시간의 연장을 위해 공기가 상승하는 방향과 반대로 사육수를 유입시키는 count-current형의 거품 분리기를 설계하였다. 따라서 60kW 블로워를 이용하여 거품 분리기 아래쪽으로부터 에어를 공급하여 공기 방울은 상승하고 사육수는 거품 분리기 위쪽으로부터 유입되어 아래쪽으로 빠져나갔다.

거품 분리기에서 토출된 사육수는 다시 1.8m×3.5m×2.0m 생물학적 여과조로 유입되었는데, 생물학적 여과조는 전복의 배설물, 점액성분 및 먹이 찌꺼기로부터 기원한 유기물 내 단백질의 아미노산 성분이 무기물화되어 생성되는 유독한 암모니아와 암모니아성 질소의 산화산물인 아질산성 질소를 제거하기 위한 질산화 미생물이 대량 부착하여 산화 작용을 하는 수처리 장치로서, 여과 미생물이 부착할 수 있도록 플라스틱 투명 골판을 매질로 이용하였다. 여과조 내부는 거품 분리기로부터 제거되지 않은 고형물이 침전될 수 있도록 4부분으로 구획을 나눠, 최초 상부로 유입된 물이 벽면을 타고 아래로 내려갔다가 다시 아래쪽의 구멍을 통해 다음 구획으로 넘어가 상

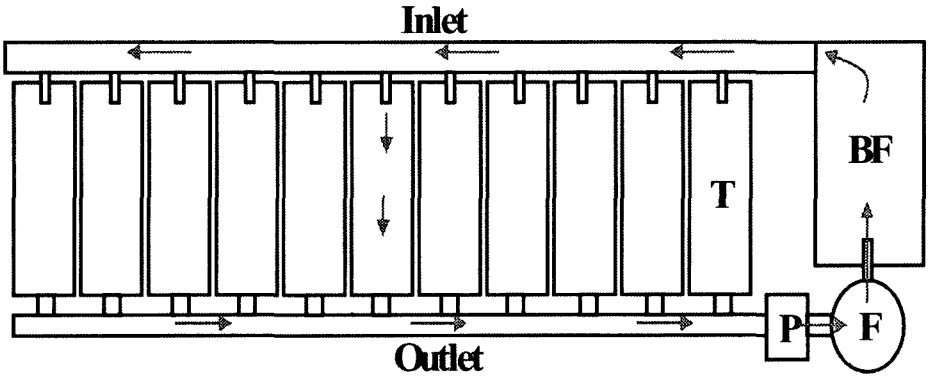

그림 6. 전복 순환여과식 양식 시스템 및 사육수 순환 모식도
Inlet: 유입수 관, Outlet: 배출수 관, T: 사육조, P: 펌프,
F: 거품 분리기, BF: 생물학적 여과조 →: 사육수 순환 방향

승하도록 설계하였다.

최초 사육조에 유입된 물은 사육조를 거쳐 각 사육조가 연결된 배출관을 통해 펌프로 유입되었다. 펌프에 의해 양수된 물은 거품분리기의 상부로 유입되어 먼저 유기 고형물을 제거한 다음, 다시 생물학적 여과조로 유입되었는데, 이 생물학적 여과조에 의해 최종적으로 용존 무기태 질소(암모니아, 아질산)를 제거하여 사육조로 재순환하였다(그림 6). 사육조 내부는 망목 약 5mm 정도의 플라스틱 망을 이용하여 전복 도피망을 수조 바닥 약 10cm 상부에 설치하고 에어스톤을 이용하여 사육수를 전체적으로 유동시켰다. 각 사육조의 유입 유량은 10L/min로서 시설 내 일간 총 순환율은 약 5회전하였으며, 일간 총사육수의 약 5% 미만의 자연 해수를 보충하였다.

• 동절기간 중 수온 변화

순환여과식 사육 시설에서 전복의 성장이 멈추는 동절기 4개월 (1월~4월) 동안 자연수와 사육수를 측정한 결과, 자연수의 평균 수온이 9.2℃이었던 반면에, 시설 내 사육 수온은 16.7℃로 전복

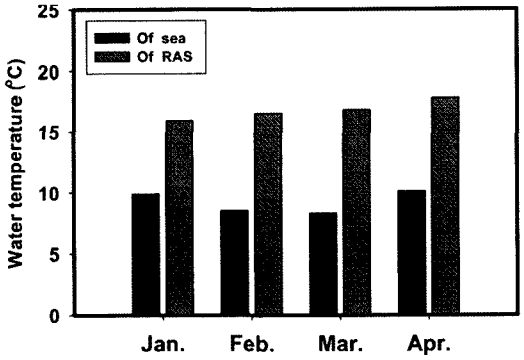

그림 7. 동절기간 중 자연수와 사육수의 수온 변화

이 성장하기에 적절한 수온을 유지하였다(그림 7). 따라서 동절기가 길어 전복의 사육 기간이 상대적으로 짧아 사업성이 확립되지 못한 동해안의 해양 환경에서도 사육 가능성을 확인하였다.

• 전복 사육 및 성장

평균 각장 2.45cm(A 실험군)와 4.3cm(B 실험군)의 전복을 각각 5,500마리와 4,500마리를 전 수조에 균일하게 수용하고, 2002년 1월부터 3월까지 혹한기 동안 사육하여 성장률을 측정하였다.

혹한기 3개월간 전복을 사육하는 동안 생존률

표 1 . 각 실험군의 각장 성장 및 증중량

	각장(cm)		마리수	전중량(kg)	
	최 초	최 종	(마리)	최 초	최 종
A실험군	2.45±0.5	3.48±0.3	5,500	15.6	22.5
B실험군	4.30±0.5	5.07±0.8	4,500	34.9	50.0

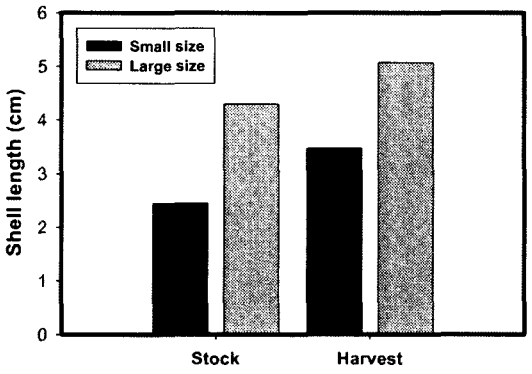

그림 8. 동절기간 중 전복의 성장률

은 96%로 매우 높아, 적정한 수질 및 환경 조건이 제공된 것으로 판단된다.

성장률의 경우도 일반적으로 성장이 멈추는 동절기 동안 정상적인 성장을 하여, A 실험군은 0.35cm/월, B 실험군은 0.26cm/월의 각장 성장률을 나타내었다(그림 8, 표 1).

• 순환여과식 사육 시설 내 수질 변화

순환여과식 양식 시스템에서 전복을 사육하는 동안 생물학적 여과조의 질산화 효율과 pH 변화를 관찰하고 거품분리기에 의한 현탁 고형물 및 용존 유기물을 제거 효율을 관찰하기 위하여 매 1주일 간격으로 채수하여 암모니아, 아질산, 질산염, pH 및 고형물량(Suspend Solid)를 측정하였다.

사육 기간 중 암모니아의 농도는 지속적으로 상승하다 생물학적 여과조의 운전 후 55일경에 최고치인 0.4ppm에 도달하였다가 평균 0.1ppm이하로 낮아졌는데, 일반적인 안전 농도인 1ppm과 비교하여 매우 낮은 농도를 유지하였다. 암모니아 농도가 점차적으로 감소하면서 아질산염이 증가하였는데, 암모니아가 최고치에 도달한 약 20일 이후에 최고치에 도달하였다가 다시 감소하였다. 이것은 생물학적 여과조에 여과 미생물들이 충분히 증식, 부착하여 정상적인 질산화 과정이 진행되는 숙성상태에 도달하였기 때문으로 판단되며, 담수 순환여과식 사육시설에서 나타나는 전형적인 생물학적 여과조의 숙성 과정과 동일한 경향을 나타내었다. 충분히 숙성된 이후에는 암모니아와 아질산은 안정적인 농도를 나타내어 해수 조건에서도 정상적으로 생물학적 여과조를 운전하였다. pH는 전 사육 기간동안 평균 pH 8.0 수준을 유지하였으나, 전복이 성장하여 방양밀도가 높아지고 생물학적 여과조의 질산화 효율이 높아짐에 따라 7.4까지 감소하여, 장기 사육 시 pH 감소 방지를 위한 부수적인 시설이 필요하였다.

고형물량은 거품분리기 전후에서 각각 측정하였는데, 거품분리기를 통과하면서 사육수 내 고형물이 제거되어 배출수 내에서 2.5ppm이하 농도를 유지하였다. 순환여과식 양식 시스템 내 일반적인 기준 안전 농도는 15ppm으로 전 사육 기간 동안 안전 농도보다 낮게 유지되어 거품분리기를

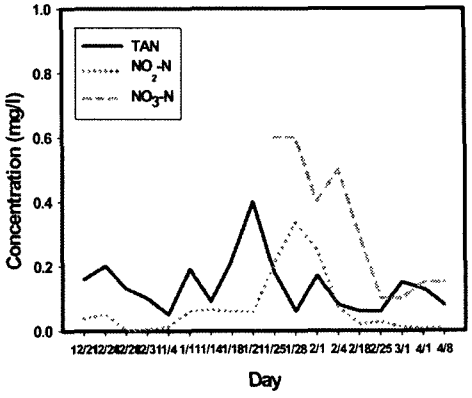

그림 9. 사육 기간 중 사육수 내 암모니아, 아질산염 및 질산염 변화

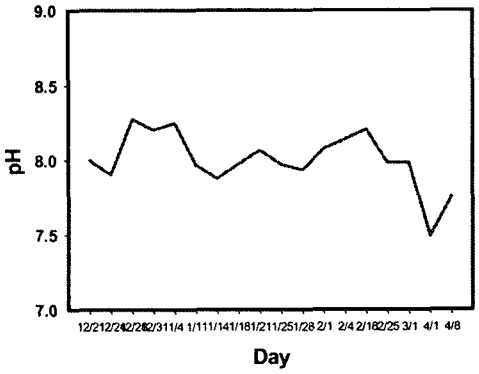

그림 10. 사육 기간 중 사육수 내 pH 변화

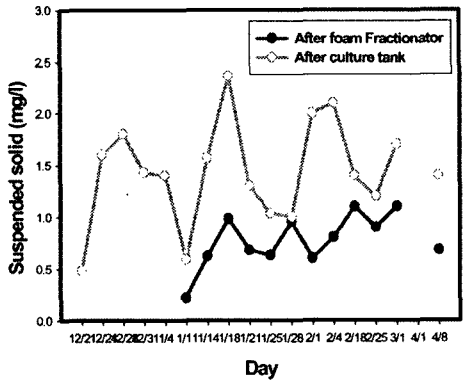

그림 11. 사육 기간 중 거품 분리기 전후의 부유물의 농도 변화

이용해 효과적으로 고형물을 제거할 수 있었다.

• 결 론

전 실험 기간 동안 사육수 내 암모니아 농도는 시스템 내에서 점차 증가하여 최고 0.4ppm까지 상승하였으나 생물학적 여과조가 숙성된 후 평균 약 0.1ppm의 농도를 유지하였다. 암모니아 및 아질산 독성은 어종 및 사육 환경에 따라 정도의 차이가 있지만, 담수 순환여과식 양식 시스템에 있어 암모니아의 경우 일반적인 안전 농도인 1.0ppm에 비해 매우 낮은 값을 나타내었으며, 아질산염 역시 여과조 숙성 이후, 평균 0.02ppm 농도를 나타내어 안전 농도 기준인 0.1ppm 보다 매우 낮은 농도를 나타내어 해수 조건에서도 생물학적 여과조를 이용하여 성공적으로 암모니아 및 아질산를 산화시켜 안정적인 수질 환경을 유지할 수 있었다.

또한 부유 고형물의 경우, Alabaster and Lloyd(1982)는 25ppm에서 어류에게 유해한 영향을 준다고 하였으며, Muir(1982)는 20~40ppm 이하의 농도를 유지하는 것이 바람직하다고 하는 등, 순환여과식 사육 시스템 내 부유 고형물에 대한 명확한 기준이 아직 확립되어 있지는 않지만, 일반적으로 15ppm 이하로 유지하는 것이 바람직하다고 보고된 바 있다(FIFAC, 1980). 본 실험에서는 전 실험 기간 중 평균 1.5ppm 이하의 농도를 나타내어 부유 고형물에 의한 환경 악화가 일어나지 않았으며 매우 낮은 농도를 유지함으로서 거품 분리기에 의해 효과적으로 시스템 내 탁도를 조절할 수 있었다.

3개월간의 혹한기 동안 실험 시스템을 이용하여 전복을 사육하여 성장 실험을 실시한 결과, A 및 B 실험군이 각각 3.4mm 및 2.5mm의 월간 각

장 성장률을 나타내었으며, 체중 증가율은 A 및 B 실험군에서 각각 0.4~1.1g으로 나타내어, 동절기간 동안 실험 시스템에서 정상 성장을 하여 적절한 사육 환경을 제공하였다고 판단 된다.

5. 앞으로의 해결 과제

앞선 pilot plant 시설 내 실험 결과에서 보여주듯이, 순환여과식 사육 기술을 이용한 참전복의 양성이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 완전한 순환여과식 사육의 성립을 위해서는 몇 가지 선결되어야 하는 과제들이 남아 있다.

순환여과식 사육 시설은 사육중인 생물에 의해 오염된 사육수를 연속적으로 재처리하여, 참전복이 적절하게 성장할 수 있는 수질 환경을 지속적으로 조성하여야 한다. 따라서 수처리 시설의 정확한 성능과 효율을 평가하여야 한다. 또한 이러한 수처리 시설들의 성능에 따른 크기의 산정과 운전 인자들을 설정하기 위해선 먼저 사육하고자 하는 참전복의 배설 특성에 관한 구명이 선결되어야 한다.

외국의 경우 여러 어종에 대해 분 배출 및 암모니아 배설 특성에 관한 많은 기초 자료들이 이미 실험되어 알려져 있으며, 이러한 자료들을 토대로 사육하고자 하는 어종의 시설 내 배출 가능한 오염 부하량을 산정함으로써, 이 오염원들을 처리해야 하는 수처리 시설들의 크기와 운전 조건들을 산정하고 있다. 이러한 계산을 통해 안정적인 순환여과식 사육 시설을 설계하고 성공적으로 운전하고 있다. 주먹구구식의 시설 설계나 설치로는 성공적인 순환여과식 시설의 운전은 불가능하다. 더욱이 외국에서 사용되는 단편적인 장치의 도입과 적용은 기존의 시설에 부가적인 도움을 줄 수 있을지 모르지만, 단지 일회적인 적용에 불과하고 전체 시스템의 밸런스를 유지함으로서만 효율적으로 운전될 수 있는 순환여과식 사육 시설에서는 에너지 효율적이지 못한 경우가 많다. 전체 시스템을 도입한다고 하더라도 핵심 기술이나 운전 기술에 관한 정보의 공개가 완전히 이루어지지 않고, 국내와는 적용환경이 다를 수 있으므로 성공적으로 접목되기가 쉽지 않으므로 국내 실정에 맞는 시설 개발이 필요하다.

전복의 경우는 어류와는 달리 아직 분 및 암모니아 등 시설 내 오염원의 배출 특성에 관한 연구가 많이 이루어져 있지 않으므로, 순환여과식 기술을 적용하기 위해선 먼저 앞서 언급한 바와 같이 전복의 배설 특성에 관한 기초 연구부터 선행되어야 할 것이다. 또한 해수 조건에서 효율적으로 운전될 수 있는 수처리 시설들을 개발하고 각 시설들의 성능 및 효율 평가함으로써 배설 특성에 따른 수처리 시설들의 설치 및 운전 조건의 구명이 뒤따라야 한다. 이러한 구명을 통해 얻어진 설치 및 운전 인자들을 토대로 pilot plant 실험을 거쳐 완성도를 높혀 실제 현장 적용 시 발생할 수 있는 오차들을 최소화시키고 에너지 효율적인 시설 개발을 위한 노력이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

Alabaster, J. S. and Lloyd, R. 1982. water guality criteria for freshwater fish, Second Edition, London, Butterworth

Muir, J. F 1982. Recirculated system in aguaculture (Muir, J. F and Roverts, R. J. editions), In : Recent Advances in Aguaculture, Vol. 1 Croom Helm and Westview Press, London,

453pp

FIFAC, 1980. Symposium on new developments in the unilization of heated effluent and recirculation system for intensive aguacu Hure, FIFAC, 1Hr Session, Stavanger, Norway, May 28-30th