

생태통합양식 기술 개발 및 미래 발전방향

박미선 · 양용수 · 도용현 · 이동길[†]
(국립수산과학원)

Development of Integrated Multi-Trophic Aquaculture Technology and Future Direction

Miseon PARK · Yongsu YANG · Yonghyun Do · Donggil LEE[†]
(National Institute of Fisheries Science)

Abstract

The expansion of high-density aquaculture in the limited waters has caused a wide variety of problems. The problems include environmental problems nearby aquaculture sites, growth rate of aquatic organisms, quality decline of farmed fish and price fall in the market. The phenomenon of aquaculture industry happens in not only inshore but also offshore. Therefore, the fisheries authorities have been changing their policy paradigms from mass production to sustainable production based on ecosystem. Other countries, however, focusing on relieving poverty and providing protein from fish production have not recognized the degree of seriousness. When it comes to enhancing the problems, National Institute of Fisheries Science has been developing the technology of Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) to reduce and to prevent contaminants from fish and aquaculture sites, remained feed from fish farming process. In long-terms of view, the system is one of the most sustainable fishery production methods based on ecosystem. As integration of nutrient feed system from aquatic organisms is firmly established, the earlier mentioned problems will be diminished gradually. In term of the substantiality, this study was conducted. The research on management system for IMTA also has been incorporated. This study also investigated the features and current status of IMTA and demonstrated the developed management system and direction for the future advancement.

Key words : IMTA, Aquaculture, Monitoring, Feeding, System, Remote control

I. 서론

기존의 국내 천해양식업 생산량은 수산물에 대한 풍부한 시장수요를 바탕으로 1970년 119,211톤에서 2015년 1,672,740톤으로 급격히 성장하였다(KOSIS, 2016). 그러나 자연환경 변화와 한정된 어장에서 고밀도 집약적인 양식업의 확대로 해양

생태계가 파괴되고, 이로 인한 양식생물의 성장 둔화, 품질저하 및 가격하락 등의 문제가 발생하여 양식어가의 경영비용이 증가하고, 국내 양식장의 생산성이 저하되었다.

최근 전 세계적으로 환경친화적이고 지속 가능한 양식업이 대두되고 있다. 주요 국가의 양식관리 전략을 살펴보면 전략어종과 핵심 역량집중에

[†] Corresponding author: 051-720-2572, donggil@korea.kr

* 이 연구는 국립수산과학원 수산시험연구사업(R2016015)의 지원 사업에 의해 수행되었습니다.

의한 환경 중심의 적정시설 관리를 통한 친환경 양식업을 육성하고 있는 것으로 나타나고 있다 (ACFFA, 2012). 국가 정책 또한 환경친화적이고 지속 가능한 양식 산업을 구축하기 위하여 엄격한 기준을 정하여 양식장의 위치를 선정하고, 친환경 양식기자재 사용을 권고하는 추세이다(Putro et al., 2015). 그리고 인력수급, 유류비 상승, 사료비 증가 등과 같은 현실적인 문제를 해결하기 위해서 국내외적으로 양식 산업 자동화 기술이 급속히 발전하고 그 또한 접목되고 있다(Nakada, 2002). 특히 기존에는 대부분 양식장 관리인이 직접 바가지로 사료를 퍼서 먹이를 공급하는 형태였지만, 현재에는 자동화된 먹이공급 장치가 대신하는 형태로 점차적으로 발전해 나가고 있다 (Wang et al., 2012).

국립수산과학원에서는 친환경 양식업 확대를 통해 우리나라 양식업의 문제점으로 지적되고 있는 한정된 어장에서 고밀도 양식생물 사육에 따른 해양생태계 파괴에 대한 해결방법으로 생태통합양식 (Integrated Multi-Trophic Aquaculture : IMTA) 기술과 생태통합양식 관리시스템 개발 연구를 병행하여 수행 중에 있다.

본 논문에서는 생태통합양식 기술, 국내외 개발현황, 생태통합양식의 장단점을 조사하고, 개발한 생태통합양식 관리시스템에 대한 소개, 그리

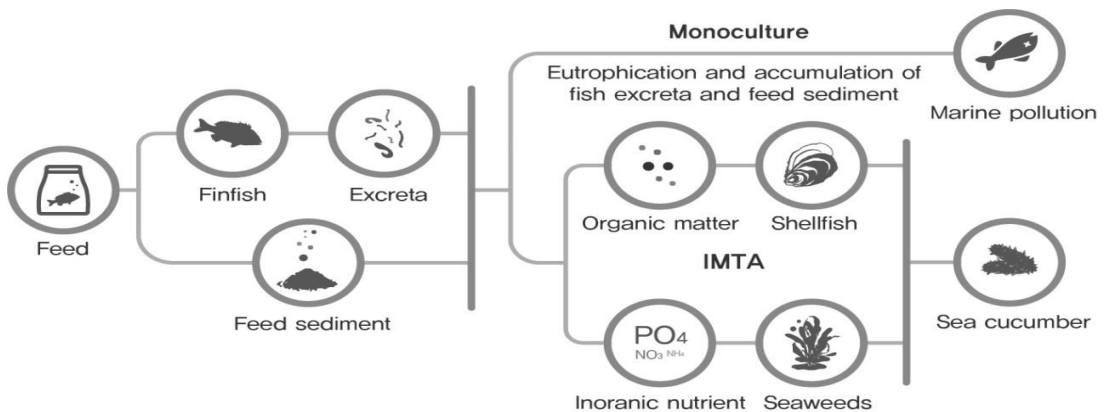
고 생태통합양식 기술과 관리시스템의 미래 발전 방향을 제시하고자 한다.

II. 국내외 생태통합양식 기술 개발 현황

생태통합양식 기술은 먹이사슬을 활용하여 어류의 배설물 및 잔존사료에 의한 해양오염을 방지 또는 저감하는 기술을 말한다.

[Fig. 1]과 같이 어류가 사료를 먹고 배출한 배설물과 잔존하는 사료 찌꺼기 중 용존유기물은 패류, 무기영양염은 해조류, 패류의 배설물 및 해조류 조각 등 기타 찌꺼기는 해삼의 먹이로 이용하는 것이다. 생태통합양식은 2000년대 후반에 개발되어 전 세계적으로 각 해역에 맞는 어종과 해조류, 패류를 양식하기 위해 많은 연구를 수행하고 있는 것으로 나타났다.

생태통합양식 기술 개발 연구가 최초로 시작된 곳은 1980년대 후반 페루에서 무지개송어 (*Oncorhynchus mykiss*)로부터 배출되는 부산물로 인해 오염이 발생하는 양식장 내 수질개선을 위하여 굴과 해조류를 양식하게 된 것이 생태통합양식 연구의 기초가 되었다. 그 후, 1996년 미국에서는 새우양식장의 폐수처리를 위하여 생태통합양식 기술을 이용하였으며(McVey et al., 2002),



[Fig. 1] Concept of IMTA technology

2001년 캐나다에서는 대서양연어(*Salmo salar*), 홍합(*Mytilus coruscus*), 해조류를 활용한 생태통합양식 연구가 활발하게 진행되고 있다(Haya et al., 2004). 그 외 생태통합양식 기술 연구는 연안어장의 환경개선 효과를 주요 목적으로 진행하고 있으나, 중국, 인도네시아 등 아시아 일부 나라에서는 다양한 양식생물의 생산성을 중심으로 연구를 진행하고 있다.

현재 생태통합양식 기술 연구 및 산업화는 우리나라를 비롯하여 노르웨이, 미국, 스페인, 영국, 페루, 캐나다 등에서 활발하게 진행되고 있으며, 친환경 양식 산업화를 위한 기술개발도 꾸준히 진행되고 있는 실정이다.

1. 국내 개발현황

우리나라는 오랜 기간 고밀도 양식으로 해양오염과 어류질병이 빈번하게 나타나고 있다. 일정 수면에서 특정 생물을 지속적으로 양식할 경우, 잔존사료와 양식생물의 대사산물로 인해 자정능력이 떨어진다. 이 때문에 해양오염의 심화와 생태계의 불균형으로 어류의 폐사 증가, 양식생물의 생산성 저하를 초래하여 양식 산업의 경제성이 크게 떨어지게 된다. 따라서 연안을 지속적·효율적으로 이용하기 위해서는 생태계 순환모델을 기반으로 탄소, 질소 등이 배출되지 않는 환경친화적 양식방법인 생태통합양식 기술 연구가 필요하다(Park, 2011a).

국립수산과학원에서는 생태통합양식 기술 개발을 위해 2011년도부터 2013년도까지 강원도 양양군 수산항에서 ‘어항을 활용한 어촌관광형 IMTA 기술 개발’에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에 사용된 생태통합양식 대상생물은 해조류[다시마(*Saccharina japonica*), 모자반(*Sargassum fulvellum*)], 어류[조피볼락(*Sebastes schlegeli*)], 패류[참굴(*Creasostrea gigas*)] 및 극피동물[해삼(*Stichopus japonicus*)]이며, 시험시설은 생태통합양식 개념 적용의 극대화와 시각적으로 안정감 있는 원형가

두리 구조를 채택하였다. 그리고 항내 수심 8-10 m에 설치를 위한 기술적 검토와 해저를 활용한 효율적인 양식방법을 접목함과 동시에 중력식 앵커를 가두리의 수직하단에 설치, 항내 공간점유율을 최소화하고, 파도와 바람 등으로 발생하는 힘에 의한 시스템의 표류 방지를 위하여 2개소에 현수식 계류와 닻을 독립적으로 설치하였다. 또한 어류로 인한 해삼류의 피해방지를 위하여 상하로 구획을 나누어 대상생물을 사육하는 복층설계와 그물갈이의 편의를 위하여 독립된 그물망을 설치하고, 해삼의 탈출방지와 어류부산물 및 잔존사료의 활용을 위하여 하단 그물 둘레에는 체인을 이용하여 해저면에 그물을 완전히 밀착시키는 설계방법을 적용하였다. 그리고 시설의 외곽을 활용한 관람통로 제공 및 휴식공간을 조성하였고, 다시마와 모자반 등을 위한 수하식 양식시설의 외곽배치로 관람통로를 따라 내측과 외측으로 볼거리를 제공하며, 연구 및 작업의 편의성을 추구하는 어항 최적의 생태통합양식 시스템을 개발하였다.

국립수산과학원에서 개발한 생태통합양식 시스템에 대상품종인 다시마, 모자반, 조피볼락, 해삼을 양성하면서 생태통합양식 효과평가 및 적정양식기술 개발, 물질수지 산정, 환경수용력 모델 개발 및 먹이연쇄 경로 규명, 생태통합양식 시스템 성능 개량, 그리고 생태통합양식 시스템을 활용한 어촌관광 대상상품 선정 및 기초 타당성 평가를 실시하였다.

시험어의 전수 조사를 통한 조피볼락의 사료효율은 133.1%(1차 사육), 89.5%(2차 사육)로 남해안 지역의 조피볼락보다 높은 것으로 나타났으며, 간 기능, 단백질 대사 및 삼투압조절 역시 정상적으로 이루어지고 있는 것으로 나타났고, 2차에 걸쳐 사육한 시험어의 생존율은 각각 94.5%, 93.8%로 남해안 지역보다 높았다.

해삼, 참굴, 다시마 및 모자반의 성장도 남해안 지역에 비해 빠른 것으로 나타났다. 특히 해삼의 경우, 남해안 지역의 씨뿌림양성 해삼보다 약 2.7

배 빠른 성장을 보였고, 생존율 역시 74%로 높았다. 기존의 양식방법보다 생태통합양식의 오염 부하량 저감 효과는 5.5배인 것으로 밝혀졌다.

생태통합양식 시스템의 양식이익률은 29.3%, 내부수익률은 62.2%, 순현재가치는 6억4,831만원, 그리고 간접적 경제가치는 연간 5억9,811만원으로 추정되었다. 개발된 생태통합양식 시스템은 직경 23 m, 높이 9 m의 규모 확장이 가능한 복층입체형 원형 구조로 외력(최대 표류력) 13.08 ton의 2배 이상의 하중에도 견딜 수 있는 안전울, SF=2의 견고한 시설로써 자가발전용 전원공급시스템과 WEB 서버 기반 정보관리시스템을 구비하고 있다(Park, 2013).

2014년 11월에는 경상남도 남해군 창선면 가인리 지선에 생태통합양식 시스템을 설치하여 조피볼락 100,000마리, 해삼 20,000마리, 참굴 수하연 100개, 미역(*Undaria pinnatifida*) 연승줄 100 m를 입식하였다. 생태통합양식 시스템 설치 다음해인 2015년 2월에 다시마를 시설하였으며, 여름철 양성 해조류로는 개꼬시래기를 선정, 2015년 7월에 시설하였다. 입식한 양성품종을 대상으로 생태통합양식 양성효과를 평가한 결과, 조피볼락은 전장과 체중의 성장에 있어 생태통합양식 실험구와 대조구(단일양식) 간 유의한 차이가 없었으나, 질병 감염율에 있어서는 대조구의 조피볼락이 어류의 병원성 세균인 *Photobacterium damselae*에 36.7% 감염된 반면, 생태통합양식 실험구의 조피볼락은 감염율이 0%이었다. 참굴은 생태통합양식 실험구가 대조구에 비해 패각 및 전중, 육중 성장이 20% 이상 빨랐으며, 연체부지수가 22.5% 높게 나타났다. 해삼 또한 생태통합양식 실험구가 대조구에 비해 40% 이상 성장이 빠른 것으로 나타났으며, 해조류도 생태통합양식 실험구가 대조구에 비해 미역은 12.8%, 다시마와 개꼬시래기는 각각 9.3%, 29.9%로 성장이 양호하였다. 생태통합양식 저서생물의 유기물 제거능을 평가의 일환으로 해삼의 수온별 유기물 섭취량을 조사하였다. 이때 해삼에게 공급한 먹이는 조피볼락의 배

설물, 조피볼락 배설물 50%+해조류 분말, 해조류 분말이었다.

실험 결과, 10~20℃의 실험구간에서 해삼은 체중 1 g당 일간 조피볼락의 배설물을 0.32~0.48 g, 조피볼락 배설물 50%+해조류 분말 0.10~0.22 g, 해조류 분말 0.04~0.12 g을 섭취하는 것으로 나타났다.

참굴의 유기물 섭취량은 참굴 1 g(건조중량)당 0.3 $\mu\text{g/h}$ 이었으며, 섭취된 유기물의 체내 흡수율은 0.2 $\mu\text{g/h}$ 로 나타났다. 그리고 해조류의 무기영양염 흡수율은 미역의 경우, 최적 성장조건인 장일(14:10 LD), 10℃ 조건에서 생체중량(습중량) 1 g당, 0.79~1.58 mg의 질소와 0.08~0.32 mg의 인을 흡수하였으며, 개꼬시래기(*Gracilariopsis chorda*)의 경우, 최적 성장조건인 장일, 20℃에서 1 g당 1.50~3.00 mg의 질소와 0.15~0.60 mg의 인을 흡수하는 것으로 확인되었다.

생태통합양식장의 환경개선 효과를 평가하기 위하여 양식장의 퇴적물 산소소모율 및 영양염 용출률을 조사한 결과, 생태통합양식장의 퇴적물 산소소모율은 14.24~99.73 $\text{mmol/m}^2\text{-day}$ 로 대조구의 128.70~237.38 $\text{mmol/m}^2\text{-day}$ 에 비해 2.4~9.0배 낮았으며, 용존무기질소 및 용존무기인 용출률은 생태통합양식장이 대조구에 비해 각각 2.1~15.8, 5.4~18.9배 낮게 나타났다.

생태통합양식의 경제성 분석 결과, 조피볼락 단일양식의 매출이익률은 23.5%, 조피볼락·해삼·참굴의 생태통합양식의 매출이익률은 33%로 분석되었다. 조피볼락 및 해삼의 생존율 변화에 따른 매출이익률 변화를 살펴보면, 단일양식과 비교해 생존율과 시장가격 변화에 대한 대응력이 크게 높아지는 것으로 나타났다. 예를 들어 조피볼락 생존율이 30% 정도로 하락하여도 양(+)의 수익성이 나타나고, 시장가격이 5,000원으로 하락하여도 수익성이 있는 것으로 분석되었다.

단일양식과 생태통합양식 경제성 분석결과를 비교해 보면, 생태통합양식에서 조피볼락 외에 해삼과 참굴의 추가적인 생산에 따라 조피볼락

단일양식에 비해 생산량과 양식수익이 높게 나타났으나, 양식비용은 생태통합양식에서 굴과 해삼의 종묘비, 인건비 등의 상승으로 단일양식에 비해 높게 나타났다.

최종적인 양식이익은 단일양식에서 38.7백만원, 생태통합양식에서 87.1백만원으로 나타나 생태통합양식의 경제성이 단일양식에 비해 훨씬 높은 것으로 평가되었다. 이러한 재무적 이익 외에도 환경적 영향을 경제적 가치로 환산해 보면, 질소 제거 비용을 약 4만원/kg으로 가정할 경우, 환경편익은 29.8백만원으로 추산된다. 따라서 이러한 환경적 가치를 고려할 경우 생태통합양식의 경제성이 훨씬 높은 것으로 나타났다.

이 연구결과를 토대로 2016년부터는 [Fig. 2]와 같이 경상남도 통영시 산양읍 저도 지선에 생태통합양식 시스템을 설치하여 [Fig. 3]과 같은 개념으로 통영지역 맞춤형 생태통합양식 시스템 개발에 관한 연구를 수행 중에 있다.

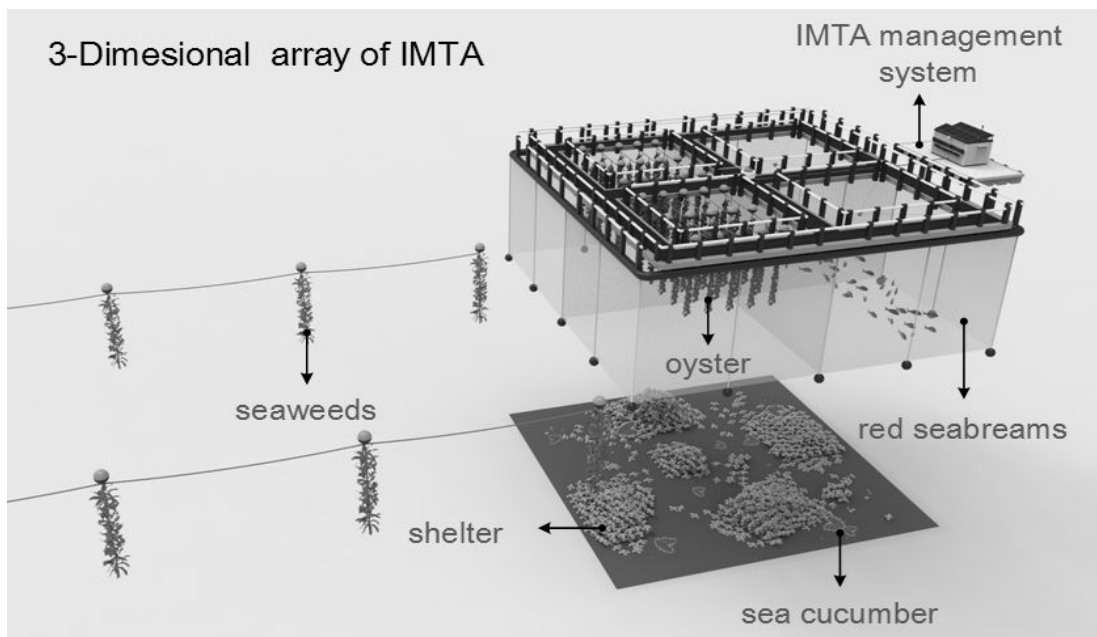


[Fig. 2] The whole view of IMTA site

2. 국외 개발현황

가. 노르웨이

노르웨이의 생태통합양식 기술 연구는 사료에 의해 오염된 연어 양식장 내 수질을 개선하는 방향으로 진행되고 있으며, 이를 통해 양식생물의 성장률 및 폐사율, 생산량을 증가시키는 효과를 가져오고 있다(Wang et al., 2012).



[Fig. 3] Conceptual drawing of developing IMTA system

또한 친환경 양식 산업 육성을 위해 연구기관과 어업인이 공동으로 생태통합양식 기술 연구를 추진하여 수산업 현장에서 나타나는 문제점을 보완하고 최소화하는 방향으로 진행하고 있다.

나. 미국

미국의 생태통합양식 기술에 관한 연구는 주로 코네티컷 및 메인주에서 이루어지고 있으며, 연구소 및 강 하구, 육상과 인접한 연안지역에서 연구를 추진하고 있다(Troell et al., 2009). 또한 생태통합양식장을 활용하여 학생들의 창의성 교육과 체험활동 등의 다양한 교육프로그램도 운영하고 있다. 따라서 미국의 생태통합양식 기술 연구는 양식 산업에 국한되지 않고 신 성장산업 육성과 교육프로그램운영, 일자리창출 등의 활용을 통해 복합 산업화의 방향을 제시하고 있다.

다. 스페인

스페인에서는 중앙정부, 수산관련 연구소, 지역 수산관련 회사 등이 협력체계를 구축하여 지역별 맞춤형 생태통합양식 기술을 개발하고 있다(Freitas Jr. et al., 2016). 또한 해역별 생태통합양식 기술에 적합한 품종을 개발하기 위하여 다양한 실험을 통해 특화된 품종을 찾기 위해 노력하고 있다. 그 외 생태통합양식장에서 생산된 어류, 해조류, 패류 등의 수산 양식생물 자원을 상품화하기 위하여 지역 수산물 가공업체와 연계하여 식품산업으로 발전시키기 위한 중장기 발전계획을 수립하는 방향으로 연구를 추진하고 있다.

라. 이탈리아

이탈리아는 다른 나라에서 시행하고 있는 생태통합양식 기술 연구를 바탕으로 자국 내 양식장 환경에 적합한 양식품종 및 양식 기술을 개발하기 위한 연구를 추진하고 있다.

이탈리아 Castellammare 지역의 Sicily Bay 생태통합양식 기술은 양식장 내 수질개선에 따라 양식품종의 성장률과 폐사율 등이 일반 양식장에 비해 현저하게 개선되는 연구성과를 바탕으로 산업화를 추진할 계획에 있다(Sarà et al., 2012).

또한 기존 타국가의 생태통합양식장에서 개발된 양식 가능한 품종을 참고하여 자국 해양환경에서 양식에 적합한 양식품종을 개발하고, 양식장의 환경개선을 통해 지속 가능한 양식 산업 육성을 추진할 계획에 있다.

마. 중국

중국의 생태통합양식 기술 연구는 자국 내 수산업 여건에 의해서 생산중심형 생태통합양식 시스템으로 진행되었으나, 점차 수산자원 관리 및 양식장 환경개선 중심의 연구로 범위를 확대해가고 있다.

특히, 중국은 다양한 품종을 활용하여 양식하고 있는 것으로 나타났으며, 현재 생태통합양식 기술을 활용하여 양식하고 있는 품종은 해삼, 굴, 해조류, 새우 등의 고부가가치 품종으로 수산업의 품질을 향상시키고 있는 것으로 파악되고 있다. 또한 지역 내 어업인들에게 생태통합양식 기술을 전수하여 어가소득 향상에도 기여하고 있다(Mao et al., 2009).

바. 칠레

칠레에서는 생태통합양식 기술 연구 추진으로 연어의 대량폐사가 일어나는 문제가 발생하였으며, 이 문제를 해결하기 위하여 칠레정부, 수산관련 연구소, 지역어민이 공동연구를 추진하게 되었다.

칠레 생태통합양식장의 연어 대량폐사 원인을 조사하던 Chiloe Island 에는 해양 기생충(caligus rorescresseyi)이 연어에 영향을 주어 폐사하게 된다는 사실과 주로 해면 가까이에 서식한다는 것을 발견하게 되어 이를 바탕으로 생태통합양식장을 해면에서 일정 부분 떨어진 위치에 설치하여 양식실험을 진행한 결과, 해양생태계 개선효과와 연어양식의 생산량 증가 효과를 가져오게 되었다(Buschmann et al., 2009).

사. 캐나다

캐나다에서는 전 세계에서 가장 많은 생태통합양식 기술 연구가 이루어지고 있으며, 정부기관,

수산관련 연구소, 대학, 어업인 등의 협력네트워크를 구축하여 체계적인 연구프로그램을 운영하고 있다.

캐나다는 생태통합양식 기술을 산업화하기 위한 노력의 일환으로 New Brunswick주 Fundy Bay에서 산업용 생태통합양식 시스템 개발 사업을 추진하여 친환경 양식 산업을 육성하기 위한 기반을 조성하고 있다. 또한 대구, 해삼 등 고부가가치 양식품종을 통해 지역 어업인들의 소득향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다(Nelson et al., 2012).

아. 호주

현재 호주에서는 해조류와 전복을 활용한 친환경 양식시스템 개발을 추진하고 있으나, 2012년 하반기 추진했었던 연구에서는 연구성과가 없는 것으로 조사되었다. 그러나 호주는 전복 양식 산업 육성과 지속 가능한 친환경 양식 산업을 바탕으로 지역 전복가공회사와 연계하여 전복의 질병 해결, 폐사율 개선, 어장환경 개선 등에 대한 연구를 추진하고 있는 것으로 나타났다(Buschmann et al., 2009).

<Table 1>은 국가별 생태통합양식 기술의 연구 배경, 주요품종, 연구결과를 종합적으로 분석하여 나타내고 있다.

<Table 1> Overall analysis on IMTA research in foreign country

Nation	Background	Major aquatic organism	Research result
Norway	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Increase of pollutants ◦ Sustainability of aquaculture 	salmon, blue mussel, seaweed	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Mussel - Growth rate : 15% increase - Production : 20% increase ◦ DIN rate : 20% decrease
USA	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Promotion of local aquaculture ◦ Activation of aquaculture industry 	seaweed, fish	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Use of multi-trophic system ◦ Bio-energy from seaweed
Spain	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Mass death by virus diseases ◦ Promotion of local aquaculture 	Flatfish, oyster, Mussel, seaweed, gastropods	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 5% increase of growth rate in gastropods
Italy	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Enhancement of aquacultural environment ◦ Efficient utilization of fish farming site 	fish, seaweed, shellfish	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Growth rate : <ul style="list-style-type: none"> - 26% increase in mussel - 35% increase in oyster ◦ Death rate : 35% decrease in mussel
China	<ul style="list-style-type: none"> ◦ eco-friendly aquaculture ◦ supply for domestic fishery demand 	abalone, sea cucumber, seaweed, shellfish etc.	In progress
Chile	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Sustainable aquaculture based on ecosystem ◦ Enhancement of fish farming environment 	trout, oyster, seaweed	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Decrease of organic matter (80%)
Canada	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Increase of contamination from aquaculture ◦ Reduce of fish feed usage 	mussel, salmon, cod, sea cucumber, seaweed	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Growth rate <ul style="list-style-type: none"> - 66% increase in blackcod - 33% increase in sea cucumber
Australia	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Environmentally friendly aquaculture ◦ Aquaculture production decrease 	abalone, oyster, seaweed	In progress

Ⅲ. 생태통합양식 기술의 장단점

1. 장점

생태통합양식 기술은 양식어가 경영비용 감소, 양식장의 효율적 이용, 양식장 환경개선 효과의 장점이 있다.

양식어가 경영비용 감소에 있어서 생태통합양식 기술은 사료를 공급하면 어류 이외의 기타 양식생물은 어류에서 배설되는 부산물 및 양식장 내 유기물을 영양공급원으로 활용하여 양식어가의 사료 비용을 감소하는 효과를 나타낸다. 국내 양식어가의 경영비용 중 약 40% 이상을 사료비가 차지하고 있으며, 양식생물 원가 가중 요인의 하나로 작용하고 있어 생태통합양식 기술 적용을 통해 양식장을 운영할 경우 경영비용 감소의 효과를 기대할 수 있다.

양식장의 효율적 이용에 있어서 첫 번째, 국내 양식 산업은 현재 면허권의 권리개념으로 인하여 양식어업권자들이 양식장의 규모를 확장하는데 어려움을 겪고 있는 반면, 생태통합양식 기술의 경우 한정된 어장에서 여러 양식품종을 사육할 수 있어 양식장의 공간적 효율화를 도모할 수 있다.

두 번째, 생태통합양식 기술은 한 개의 가두리에서 어류, 해조류, 패류 등 최소 3개 이상의 품종을 양식할 수 있기 때문에 양식어민들은 외부 요인에 의한 수산물 가격 변동에 적절히 대처할 수 있으며, 양식생물의 수급조절이 가능한 효과를 기대할 수 있다.

끝으로 생태통합양식 관리시스템을 설치하여 운영할 경우 양식장의 유기물 감소효과로 어류의 폐사를 줄일 수 있으며, 다영양 연결경로에 의해 양식장의 수질오염을 감소시키는 효과가 있다.

2. 단점

생태통합양식 기술의 단점은 적용가능한 양식 품종의 한계와 초기에 높은 시설투자 비용이 발

생한다는 점이다.

생태통합양식장 내 다영양 연결경로를 통해 양식생물을 사육하는 방법으로 각 양식생물의 영양공급원이 규명되어야하기 때문에 양식 가능한 품종을 선정하는데 어려움이 있다.

현재 국내에서 적용 가능한 품종은 조피볼락, 다시마, 해삼, 전복 등으로 한정되어 있다. 해외의 경우 캐나다에서는 어류(송어, 연어), 패류, 해조류, 연체류 등 다양한 양식생물을 생태통합양식 기술을 통해 사육할 수 있는 방법을 연구하고 있다. 이와 같이 국내의 생태통합양식 기술 연구도 한정된 품종에서 벗어나 다양한 양식품종을 사육할 수 있도록 양식 가능한 품종 개발이 필요한 실정이며, 또한 초기 투자비용이 기존 가두리 양식장에 비해 높아 양식어가의 경제적 부담이 크므로 비용을 줄이기 위한 연구도 필요하다.

Ⅳ. 생태통합양식 관리시스템 개발

국립수산과학원에서는 생태통합양식 기술 개발을 도모하고 과학적인 데이터 수집 등 체계적인 양식장 관리를 위해서 [Fig. 4]와 같이 생태통합양식 관리시스템을 개발하였다.



[Fig. 4] IMTA management system

생태통합양식 관리시스템은 모바일 기기(스마트 폰)를 이용하여 원격지에서 어류의 먹이를 정량공급하고, 사육환경 모니터링과 사육일지 등을 자동으로 관리할 수 있다. 현재 개발한 생태통합양식 관리시스템은 2016년부터 통영시 산양읍 저

도에 시범적으로 설치하여 운영하고 있으며, 현재 최적화 작업 중에 있다.

생태통합양식 관리시스템은 [Fig. 5]와 같이 크게 사육환경모니터링 장치, 자동먹이공급 장치와 이러한 장치들을 자동으로 제어하기 위한 임베디드 PC 기반을 둔 제어장치, 그리고 장치들의 운용에 필요한 전기에너지를 공급하기 위해서 태양광 발전시스템으로 구성되어 있으며, 이를 원격지에서 제어·관리하고 각종 데이터(수온, 용존산소, 염분, 사육량, 먹이량 등)를 수집할 수 있는 생태통합양식 관리시스템 전용 앱으로 구성된다.

1. 사육환경모니터링 장치

사육환경모니터링 장치는 수온, 용존산소, 염분과 같은 양식장 환경을 측정하는 다항목 측정 센서와 어류의 질병감염에 따른 유영능력 변화 및 먹이활동을 관찰하기 위한 수중 카메라로 구성된다.

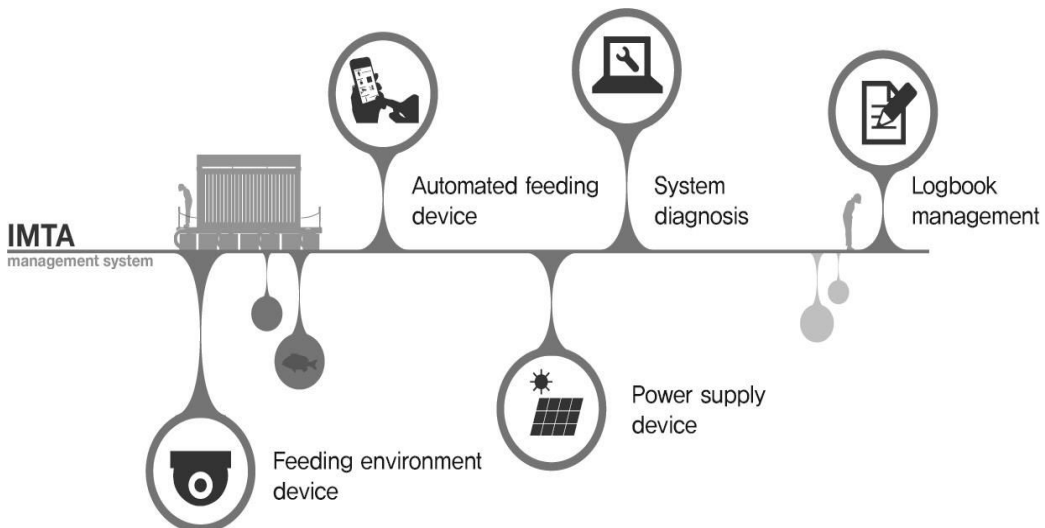
2. 자동먹이공급 장치

기존 대부분 양식장에서는 어류의 먹이(배합사료)를 사람이 직접 바가지로 퍼서 공급하며, 어

류가 먹이를 먹지 않을 때까지 공급한다. 이와 같은 경우 일정시간마다 직접 먹이를 주어야 하며, 그 양은 사람의 경험에 따라 다르다. 이러한 방식은 정량적으로 사료를 공급하지 못하고, 사료의 허실로 인한 사료비 증가 및 환경오염을 초래한다. 이를 해결하기 위해서 국내에서 다양한 자동먹이공급 장치가 개발되었다. 기본적으로 먹이를 이송하는 힘은 공압을 기반으로 하고, 먹이가 저장된 호퍼에서 먹이를 공급하는 방식은 대부분 스크루 펌프를 많이 이용한다.

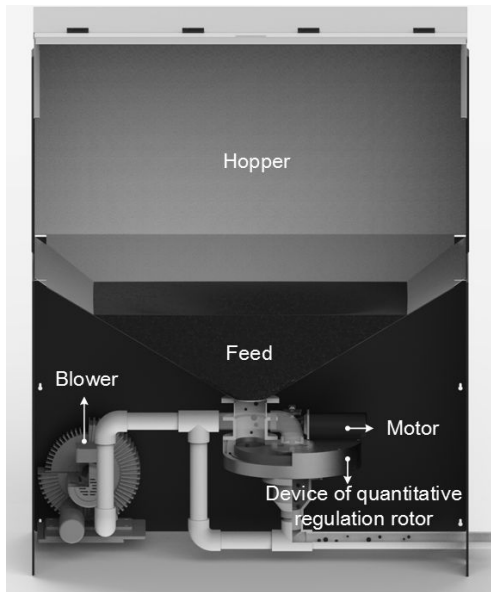
스크루 펌프의 경우 금속 또는 PVC 재질로 관로 내부에 스크루가 설치되어 있으며, 마찰력을 최소화하고 원활한 모터회전을 위해 스크루를 감싸고 있는 하우징 및 관로 사이에 공극이 발생한다. 그 공극으로 인해 첫 번째로 호퍼 내부에 밀폐능력이 떨어져 양식장 내의 습기에 의한 사료의 부패 및 막힘 현상을 초래할 수 있다.

두 번째는 공급 사료양의 측정 및 정량토출이 어려울 뿐만 아니라, 스크루의 회전수와 먹이 공급량 데이터 보정과정을 통해 먹이 공급량을 추정하는 방식을 사용하기 때문에 정확한 먹이 공급량을 측정하기가 어렵다.



[Fig. 5] Configuration of IMTA management system

세 번째는 공극으로 인해 사료가 끼어 사료가 부서지는 현상을 초래한다. 이와 같은 현상은 사료의 허실은 물론 사료효율도 저하시키는 원인이 된다(Avnimelech, 1994).



[Fig. 6] Drawing of Automated feeding device on the study

[Fig. 6]과 같이 본 연구에서 개발한 자동먹이공급 장치는 블로워(Blower)로부터 토출된 송풍 공기를 이용하여 사료를 공급시키도록 하되, 동일 치수의 원형통로식 사료투입공간이 방사상으로 형성된 분배로터를 상, 하부커버의 내측에서 회전시키는 방식의 정량분배기를 적용함에 따라, 먹이가 저장된 호퍼(Hopper)로부터 배출된 사료가 상부커버를 거쳐 분배로터의 사료투입공간으로 순차 투입되도록 되어 있다.

사료투입공간에 저장된 사료를 하부커버 및 에어송풍관과 각각 연결된 낙하관을 거쳐 먹이이송관을 따라 양식장 또는 가두리 그물 쪽으로 순차 공급시킬 수 있도록 함으로서, 정량분배기를 통한 사료의 유입 및 배출방향과 분배로터의 회전 방향이 90도를 이루도록 하여 사료의 손상을 최소화시키는 조건으로 정확하고 합리적이며 경제

적인 방식의 정량공급을 수행할 수 있도록 하는 한편 분배로터의 회전수를 측정하여 먹이 공급량을 측정할 수 있도록 하였다.

개발한 자동먹이공급 장치의 경우 사용자 편의성 향상을 위해 먹이공급 방법에 자동기능과 수동기능을 추가하였다. 자동기능은 먹이공급 시간과 먹이량을 설정할 수 있도록 하여 설정된 먹이공급 시간에 먹이를 공급할 수 있다. 수동기능은 사람이 직접 모바일 기기의 앱으로 수중영상 및 어류의 먹이활동 관찰을 통해서 먹이를 공급할 수 있도록 구성하였다.

3. 제어장치

생태통합양식 관리시스템의 제어장치는 임베디드 PC를 기반으로 모든 장치의 제어 및 상태 정보를 확인할 수 있도록 구성하였다. 모바일 기기로 임베디드 PC에 접속하여, 자동먹이공급 장치 제어, 사육환경모니터링 데이터 확인 및 수집 등이 가능하다.

4. 전원공급 장치

해상에서 생태통합양식 관리시스템을 운영하기 위해서 전기에너지는 필수적이다. 현재 해상에서 대표적으로 많이 이용되고 있는 신재생에너지는 풍력과 태양광이다.

풍력 발전의 경우는 블레이드 회전 시 많은 소음을 동반하고 블레이드 손상 등에 의한 안전사고가 태양광 발전보다 높다. 하지만 태양광 발전과는 달리 밤, 낮으로 바람이 불 때 에너지를 생산한다는 장점이 있다.

태양광 발전의 경우 풍력 발전보다 해상의 환경적응력이 안정적이지만 태양광이 존재할 때만 전기에너지를 생산한다는 단점이 있다. 이러한 단점들을 해결하기 위해서 풍력과 태양광을 함께 쓰는 방법이 있지만 비용 면에서 비싸다.

본 연구에서는 전기에너지를 안정적으로 생산하고 설치비용 등을 최소화하기 위해서 2kw 태

양광 발전시스템과 5 kw 발전기를 도입하였다. 발전기의 경우는 지속되는 흐린 날로 인한 배터리 용량 부족 시 발전기를 가동시켜 배터리 충전 및 각 장치에 전기에너지를 원활하게 공급할 수 있도록 하였다.

5. 앱 구성

향후 생태통합양식 기술 보급을 위해서는 체계적이고 과학적인 연구개발을 통한 데이터 확보 및 분석이 필수적이다. 이러한 이유로 생태통합양식 기술을 개발하는 연구자를 대상으로 하여 앱을 구성하였다. 세부적으로 앱은 사육환경, 자동먹이공급 장치, 보안카메라, 수중영상, 사육일지, 데이터 확인, 기상관측, 각 장치의 상태를 확인할 수 있는 시스템 진단으로 구성하였다.

본 연구가 완료된 시점에서는 앱 구성을 단순화하여 양식 어업인들도 손쉽게 사용할 수 있도록 수정할 계획이다.

V. 생태통합양식 관리시스템의 장단점

실질적인 생태통합양식 관리시스템의 구현과 각 장치들의 현장실험을 바탕으로 생태통합양식 관리시스템의 도입에 따른 장단점을 분석해보고자 한다.

1. 장점

현재 개발한 생태통합양식 관리시스템은 모바일 기기 앱을 통해서 수질정보(수온, 용존산소, 염분), 자동 먹이공급, 양식기자재 및 시설물 보안 대비를 위한 CCTV 영상 확인, 기상관측, 생태통합양식 관리시스템 고장여부 확인 등이 가능하다. 그리고 수중 카메라를 통해서 바닷물의 탁도, 부착생물, 조도의 영향에 따라 제한적이지만 어류의 유영행동까지 관찰 가능하다. 이러한 장치들의 구성과 기능들을 종합해 볼 때 생태통합

양식 관리시스템의 장점을 3가지로 요약할 수 있다.

첫 번째, 태풍을 제외한 기상악화 시에도 양식생물의 관리가 가능하다. 즉 모바일 기기 앱으로 임베디드 PC에 접속하여 양식장의 환경과 어류의 유영행동 관찰, 먹이공급 등이 가능하다.

두 번째, 시간과 장소에 구애받지 않고 양식생물의 관리가 가능하다. 즉 모바일 기기를 통해서 인터넷 이용이 가능한 국내외 어느 곳에서도 사육환경 모니터링 및 먹이공급 등의 양식장 관리에 필요한 일련의 작업이 가능하다.

세 번째, 과학적인 데이터 수집 및 관리를 통해 향후 양식생물 관리에 정보 활용이 가능하다. 개발한 생태통합양식 관리시스템의 경우 임베디드 PC에서 사육환경(수온, 용존산소, 염분), 금일 먹이 공급량, 먹이 누적량, 기상 데이터 등을 실시간 모니터링할 수 있을 뿐만 아니라 시간별, 일자별로 데이터가 기록 및 관리되기 때문에 향후 양식생물의 사육조건 구명, 질병 발생원인 규명 등에 기초자료로 활용될 수 있는 장점이 있다.

2. 단점

생태통합양식 관리시스템의 최대 단점은 첫 번째로 제작 및 시설비용이 비싸다는 점이다. 현재 초기 연구단계에서 양식생물의 관리에 필요한 모든 기능을 구현함은 물론, 육상과 떨어진 해상에서 독립적으로 각 장치의 운용과 전기에너지를 생산함에 따라 그에 따른 초기 투자비용이 높다.

두 번째, 생태통합양식 관리시스템을 구성하는 각 장치들의 유지 및 관리가 필수적이다. 그 이유는 사육환경을 모니터링하는 다항목 수질 측정 센서와 수중 카메라는 수중의 부착생물로 인해 정확한 수질 측정과 수중 영상 관찰이 어렵기 때문이다.

세 번째, 각 장치의 고장에 따른 즉각적인 수리가 어렵다. 그 이유는 생태통합양식 관리시스

템은 해상에 설치되어 운용되다 보니 육상보다 접근성이 떨어진다. 따라서 현장 방문하여 고장 진단을 한 후, 수리가 이루어지기 때문에 즉각적인 수리가 어려울 수밖에 없다.

네 번째, 양식생물 관리를 완전 자동화하기는 어렵다. 그 이유는 육상보다 해상 양식생물 관리가 사람이 쉽게 느끼지 못하는 환경의 변화 속에 놓여 있고 그 변화가 생물학적, 물리적, 화학적으로 다양하게 발생하고, 이러한 변화가 규칙적이지 않기 때문에 그 모든 변화를 수용하면서 양식생물 관리를 완전 자동화하기는 현실적으로 매우 어렵다.

Ⅵ. 미래 발전방향

국외 생태통합양식 기술 현황 자료, 현재 국내에서 개발 중인 생태통합양식 기술과 관리시스템 연구자료 등의 선행연구 경험을 바탕으로 생태통합양식 기술에 대한 미래 발전방향을 제시하고자 한다.

1. 생태통합양식 기술

생태통합양식 기술은 먹이사슬을 이용하여 어류의 배설물과 사료 잔여물에 의한 어장의 해양 오염을 방지함으로써 연안 양식장을 지속적으로 이용하기 위한 신개념의 양식방법이며, 어류의 배설물 및 사료의 찌꺼기로부터 배출되는 유기물을 섭취하는 패류와 무기물을 섭취하는 해조류, 그리고 바닥에 가라앉은 찌꺼기를 섭취하는 해삼 등을 청소자로 하는 가장 친환경적인 양식방법이다.

생태통합양식은 환경적인 측면에서의 지속성을 넘어 경제적인 측면도 기대할 수 있다. 즉, 양식 수익성도 증대시키며, 경제적인 위험 부담도 감소시킬 수 있다. 이 이점을 최대한 살리기 위해서는 무엇보다도 적절한 대상품종을 선정하는 것이 가장 중요하다.

이제는 단일 품종만의 양식으로 고소득을 창출 하던 시대는 지났다고 생각한다. 물론 우리의 입맛에 딱 맞고, 수출 전망도 밝은 새로운 양식 대상종을 발견해 양식기술을 개발한다면 일정 기간 동안의 고수익은 보장받을 수 있을 것이다. 그러나 단일 품종만 생산하는 양식업체가 난무하고, 과잉생산으로 경제성이 떨어지는 시기가 언젠가는 도래할 것이다. 생태통합양식이 이러한 문제를 일정 부분 해결해 줄 것으로 기대한다. 또한 생태통합양식 기술을 이용해 양식을 할 경우, 양식생산물량의 수급 조절도 가능해질 것이며, 생태학적인 특성이 유사한 다른 품종의 대체 양식도 쉬워질 것이다. 다시 말해, 시장의 요구에 빠르게 대응할 수 있다는 장점이 있다.

우리나라에서 생태통합양식 기술을 개발, 산업화하기 위해서는 해결해야 할 많은 규정상의 과제가 있다. 상업적인 규모의 생태통합양식을 개발하기 위해서는 적절한 규정과 정책적인 구상이 필요하다. 현재의 양식 관련 규정과 정책은 일정 부분 한계를 나타내고 있으며, 이전의 잘못된 제도를 그대로 계승하고 있기도 하다. 양식산업의 장기적인 발전을 위해서는 현행의 양식 관련 규정 및 정책을 재점검해 볼 필요가 있다. 또한 사과의 유연성과 혁신적인 마인드를 겸비한 정책입안자에 의해 개발된 적용 가능한 규정이 마련되어야만 할 것이다. 생태통합양식 기술 개발과 산업화를 위해서는 R&D&C (연구 개발 및 산업화)가 연속적으로 이루어질 수 있도록 정책적인 지원과 양식업계의 적극적인 협조가 필요하다(Park, 2011b).

2. 생태통합양식 관리시스템

현재 개발된 생태통합양식 관리시스템이 가까운 미래 해상 양식장 현장에 보편화되기 위해서는 첫 번째로 완전 자동화 기술보다 단순한 자동화 기술로 양식에서 이루어지는 일련의 작업에 순응하고 보조적인 역할을 할 수 있는 자동화 기

술 개발이 필요하다.

기업체 및 각 지자체 연구기관에서는 수산업이 노동집약적 산업이며, 인력이 부족하다는 이유로 사람을 대신하기 위한 양식장 자동화 기술에만 매진하고 있다. 이에 따라 사람을 대신하는 완전 자동화 실현을 위해 개발되는 장치들은 고사양이고, 대형화되어 현장에서 이용가치가 떨어지고 있는 실정이다. 따라서 비록 단순한 자동화 기술이지만 작업 현장에 순응하며, 사람의 노동 부하를 최소화시키면서 원활한 작업이 이루어 질 수 있는 기술 개발이 시급하다.

두 번째, 사람의 노동 부하를 최대한으로 줄이기 위해서는 과학적 데이터 수집 및 분석을 통해 양식생물 관리 자동화 기술 개발이 이루어져야 한다. 왜냐하면 자동화 장치 또는 시스템은 사람보다 환경에 대한 적응력이 떨어지기 때문에 적응력을 향상시키기 위해서 환경에 대한 데이터가 기반이 되었을 때 이상적인 작업수행이 가능하다.

세 번째, 국내 수산업 현실에 맞는 양식 자동화 기술 개발이 필요하다. 기업체 또는 각 지자체에서는 [Fig. 7], [Fig. 8]과 같이 국외에서 선형적으로 개발한 양식 자동화 기술을 많이 접하고 있다. 이러한 자료를 바탕으로 양식 자동화 기술을 앞다투어 개발하고 있지만 국내 수산업 현실에서는 이용가치가 매우 떨어진다는 그 이유는 국외의 경우 대형화, 기업화되어 있지만 국내 수산업은 소규모, 생계수단의 활동이 중심이기 때문이다.

이와 같이 국외 사례를 통한 기초연구 수준에서는 효용가치가 있겠지만 지금 당장에 양식 어업인들의 고충을 해결하지 못하는 어려움이 있다. 따라서 국외 기술이 국내에 적용이 가능한지를 객관적으로 판단하는데 시간을 더욱더 할애하여야 한다.

네 번째, 질병 및 해적 그 밖에 장해를 조기에 자동 검출하여 예방할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 양식장 관리에 대한 자동화 기술은 현재에

도 많이 개발되었으며, ICT 기술 등의 도입으로 많이 진보되고 있는 실정이다. 하지만 해상에서 양식생물의 질병과 해적, 그 밖에 장해를 조기에 자동으로 검출하는 기술들이 개발되지 않았다. 조기에 자동으로 검출된다면, 양식생물들의 조기 대량 폐사 등을 미연에 방지하고 구제 할 수 있기 때문에 안정적으로 생산할 수 있는 발판을 마련할 수 있다.



[Fig. 7] Feed barge developed by AKVA group



[Fig. 8] Operating and monitoring system for Feed barge

다섯 번째, 향후 생태통합양식 관리시스템이 실용화되기까지 다양한 분야의 전문가들이 더 많은 정보와 아이디어를 공유하여야 한다. 일반 산업계의 공장과 같이 정해진 공정처리와 제한된 환경에서의 자동화 기술 개발이 아니라, 해상에

서는 계절별, 그리고 어장환경에 따라 불규칙적으로 변화하기 때문에 그 변화를 과학적인 분석을 통해 수용하면서 생태통합양식 관리시스템이 개발되어야 이용가치 및 효용성이 높아진다. 따라서 양식, 해양환경, 생물, 병리, 기계, 전자전기 전공자들이 함께 참여하여 연구개발이 진행되어야 한다.

여섯 번째, 양식 어업인의 적극적인 참여와 젊은이들을 수산업계에 종사할 수 있도록 실질적인 정책과 제도 마련이 필요하다.

본 연구가 성공적으로 수행되었다더라도 양식 어업인들이 사용하지 않으면 실용적 가치는 매우 떨어진다. 따라서 양식 어업인들의 적극적인 참여로 개발 요구사항 정립 및 현장에로사항 등이 반영되어 연구개발이 원활히 추진될 수 있도록 지속적인 관심이 필요하다.

오래전부터 양식장 종사자들은 고령화되어 외국인 노동자들이 많이 유입되고 있는 것이 현실이다. 이와 같은 고령화에 대한 문제를 해결하고자 기업체 및 각 지자체의 참여로 양식생물 관리에 필요한 자동화 장치 등을 개발하여 적용하려고 해도 변화에 대한 두려움 때문에 사용하기를 꺼려한다. 따라서 수산업계에 대한 현실, 귀어·귀촌 제도 및 교육프로그램에 대한 홍보활동을 통해 젊은층을 유도하고, 변화에 대한 두려움을 해소할 수 있도록 구체적이고, 실질적인 정책과 제도 마련이 필요하다.

VII. 결론

자연 생태계에서 양식생물은 인간이 파괴하지 않은 자연 환경에서 건강하게 잘 자란다. 하지만 현재 인간의 욕심과 기존의 양식 방법으로 인한 해양오염이 심각한 상태이기 때문에 생태통합양식과 같이 환경친화적인 양식 기술 개발이 필요한 것이 현실이다. 따라서 향후 이러한 양식 기술이 정착되기 위해서는 과학적인 데이터 확보

및 분석을 통해 양식 기법의 안정성과 해양오염 저감 효과 등에 대한 검증이 우선시 되어야 한다.

현재 개발한 생태통합양식 관리시스템은 생태통합양식 기술 개발을 도모하는 목적에서 개발되었다. 컨테이너 내부에 사육환경모니터링, 자동먹이공급 장치, 과학적인 데이터 수집을 위한 장치 등을 설치하여 운영하고 있으며, 연구 목적에 맞게 각 장치들은 고사양이고 대형화되어 있다. 이와 같은 시스템을 양식장 현장에 적용할 시에는 높은 시설투자 비용이 발생함은 물론 양식장 현장에서의 이용가치는 떨어진다. 따라서 본 연구가 완료되는 시점에서는 실 사용자인 양식 어업인을 대상으로 시스템을 단순화시켜야 하며, 국내 양식어가에 생태통합양식 관리시스템을 적용하여 운영할 경우를 대비하여 시설비용을 절감할 수 있는 방법을 모색할 필요가 있다.

References

- ACFFA, Atlantic Canada Fish Farmers Association (2012). Annual Technical Workshop Research Review
- Avnimelech, Y. · Kochva, M. & Diab, S.(1994). Development of controlled intensive aquaculture systems with a limited water exchange and adjusted carbon to nitrogen ratio. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 46(3), 119~131.
- Buschmann, A. H. · Cabello, F. · Young, K. · Carvajal, J. · Varela, D. A. & Henríquez, L.(2009). Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. *Ocean & Coastal Management*, 52(5), 243~249.
- Freitas, Jr. J. R. C. · Morrondo, J. M. S. & Ugarte, J. C.(2016). *Saccharina latissima* (Laminariales, Ochrophyta) farming in an industrial IMTA system in Galicia (Spain). *Journal of Applied Phycology*. 28, 377~385.
- Haya, K. · Sephton, D. H. · Martin, J. L. and Chopin, T.(2004). Monitoring of the rapeutants and

- phycotoxins in kelps and mussels co-cultured with Atlantic salmon in an integrated multi-trophic aquaculture system. *Bulletin of Aquaculture Association Canada*, 104, 29~34.
- KOSIS.(2016). Korean Statistical Information Service. <http://kosis.kr>.
- Mao, Y. · Yang, H. · Zhou, Y. · Ye, N. & Fang, J. (2009). Potential of the seaweed *Gracilaria lemaneiformis* for integrated multi-trophic aquaculture with scallop *Chlamys farreri* in North China. *Journal of applied phycology*, 21(6), 649~656.
- McVey, J. P. · Stickney, R. R. · Yarish, C. and Chopin, T.(2002). Aquatic polyculture and balanced ecosystem management: new paradigms in seafood production In: Stickney, R.R., McVey, J.P. (Eds.), *Responsible Marine Aquaculture*. CABI Publishing, Oxon, 91~104.
- Nakada, M.(2002). Yellowtail culture development and solutions for the future. *Reviews in Fisheries Science*, 10(3-4), 559~575.
- Nelson, E. J. · MacDonald, B. A. & Robinson, S. M. C.(2012). The absorption efficiency of the suspension - feeding sea cucumber, *Cucumaria frondosa*, and its potential as an extractive integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) species. *Aquaculture*, 370~371, 19~25.
- Park, M. S.(2011a). Development of Integrated Multi-Trophic Aquaculture System 1. *Aquainfo vol. 5(3)*: 22~35 (in Korean).
- Park, M. S.(2011b). Development of Integrated Multi-Trophic Aquaculture System 2. *Aquainfo vol. 5(4)*: 24~35 (in Korean).
- Park, M. S.(2013). Proceedings of the 1st International Integrated Multi-Trophic Aquaculture Symposium, p. 3-14. Busan, Republic of Korea.
- Putro, S. P. · Widowati, Suhartana & Muhammad, F. (2015). The application of integrated multi trophic aquaculture (IMTA) using stratified double net rounded cage (SDFNC) for aquaculture sustainability. *International Journal of Science and Engineering*, 9(2), 85~89.
- Sarà, G. · Reid, G. K. · Rinaldi, A. · Palmeri, V. · Troell, M. & Kooijman, S. A. L. M.(2012). Growth and reproductive simulation of candidate shellfish species at fish cages in the Southern Mediterranean: Dynamic Energy Budget (DEB) modelling for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture*, 324, 259~266.
- Troell, M. · Joyce, A. · Chopin, T. · Neori, A. · Buschmann, A. H. & Fang, J. G.(2009). Ecological engineering in aquaculture—potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine offshore systems. *Aquaculture*, 297(1), 1~9.
- Wang, X. · Olsen, L. M. · Reitan, K. I. · & Olsen, Y.(2012). Discharge of nutrient wastes from salmon farms: environmental effects, and potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture Environment Interactions*, 2(3), 267~283.

-
- Received : 05 August, 2016
 - Revised : 06 September, 2016
 - Accepted : 12 September, 2016