

2016년도
국립수산물과학원 사업보고서
Report of National Institute of Fisheries Science

양식어장 적조피해 저감 연구

Research on the mitigation of red tide impacts in fish farm

남동해수산연구소
Southeast Sea Fisheries Research Institute

국립수산물과학원

National Institute of Fisheries Science

제 출 문

국립수산물과학원장 귀하

본 보고서를 ‘양식어장 적조피해 저감 연구’(연구개발 기간 : 2014~2016) 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017년 2월

총괄연구책임자 : 신윤경

협동연구책임자 : 김 효 근(경남수산물기술사무소),
김 형 안(경남수산물기술사무소), 김홍균(경남수산물
기술사무소), 심봉택(경남수산물기술사무소), 김성희
(서남해수어류수협)

참 여 연 구 원 : 김평중, 김두남, 김상수, 구준호,
김영대, 도용현, 민병화, 문승용, 명정인, 박정준,
박종우, 박명애, 박미선, 박노백, 박영철, 박영태,
박태규, 변순규, 백진이, 송준영, 손문호, 이진환,
양용수, 이경훈, 이정용, 안경호, 원경미, 이경훈,
정성재, 전재천, 조규태, 한종철, 황형규, 허영백

보고서 요약

과제 번호	R2016048	연구기간	2014. 1. ~ 2016. 12.(3년 간)		
연구사업명	수산시험연구사업				
연구과제명	양식어장 적조피해 저감 연구				
연구책임자	신윤경	총 연구기간 참여 연구원 수	총 : 40명 내부 : 35명 외부 : 5명	총 연구 개발비	1,940,162 천원
과제책임부서명	남동해수산연구소	참여기업명			
위 탁 연 구	연구기관명 : (2014년) 한국해양연구원 연구책임자 : 명정구 (2014년) 군산대학교 연구책임자 : 김형섭 (2014~2016년) 울산과학기술원 연구책임자 : 이창하 (2015년) (2016년) 부경대학교 연구책임자 : 남종오				
요 약				보고서 면수	77
<p>본 연구에서는 적조생물이 양식생물에 미치는 피해영향을 파악하고, 육상양식장 양식장 및 가두리양식장의 적조생물 대응 기술 개발을 통해 양식장의 적조 피해를 저감 시키는 목적으로 수행하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다. 적조에 의한 양식생물의 환경내성범위를 구명하였으며, 적조생물의 대량배양을 위한 기초조건을 구명하여 대량배양시스템을 구축하였다. 육상양식장내 적용 가능한 물리화학적 수처리 기법의 적조 저감 특성을 사전평가하여 육상양식장의 적조 구제물질 장치로서 과산화수소의 효율성을 구명하였으며, 이러한 결과를 적용하여 적조발생단계별 육상양식장 수처리 대응요령 매뉴얼을 발간하였다. 가두리양식장 적조피해 저감을 위해 적조가 상승적으로 발생하는 지역의 적조피해 특성, 대피어장 선정, 양식어류의 절식효과, 적조발생시기 질병발생 특징 등의 연구 결과를 도출하였으며, 가두리양식어장 매뉴얼을 발간하여 현장 실용화 연구에 적용하였다.</p> <p>본 연구개발의 성과 중 양식생물의 폐사 유발 적조생물 농도 규명 및 유해 적조예방을 위한 양식장 사육관리 방안 매뉴얼은 적조에 의한 신속한 대응으로 양식생물 피해를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 육상 및 가두리양식장 적조피해 저감 기술 개발 연구결과는 국가 및 지자체 정책자료 및 양식재해보험 기초자료로 활용가능하며, 적조 재해에 대한 집중적인 예방 대책 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.</p>					

요 약 문

연구의 목적 및 내용	<p>적조생물에 의한 양식 생물의 적조피해 저감 연구를 통한 수산피해 최소화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 적조생물에 의한 양식생물 폐사메커니즘 구명 - 적조대응 매뉴얼 개발 				
연구개발 성과	<ul style="list-style-type: none"> - 양식어장 맞춤형 적조대응 매뉴얼 발간·배포 및 현장기술지원 - 적조대비 가두리 대피어장 적지조사 지원 및 정책자료 제공 - 적조발생시 양식장 관리요령 대어업인 언론보도(보도자료 언론사) - 적조생물 대량배양 시스템 구축 : 적조생물 5,000 cells/mL 이상 500리터 대량배양체 확보 				
연구개발 성과의 활용계획	<p>본 연구에서는 적조생물이 양식생물에 미치는 피해영향을 파악하고, 육상수조 양식장 및 가두리양식장의 적조생물 대응 기술 개발을 통해 양식장의 적조 피해를 저감 시키는 목적으로 수행하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다. 적조에 의한 양식생물의 환경내성범위를 구명하였으며, 적조생물의 대량배양을 위한 기초조건을 구명하여 대량배양시스템을 구축하였다. 육상양식장 내 적용 가능한 물리화학적 수처리 기법의 적조 저감 특성을 사전평가하여 육상양식장의 적조 구제물질 장치로서 과산화수소의 효율성을 구명하였으며, 이러한 결과를 적용하여 적조발생단계별 육상양식장 수처리 대응요령 매뉴얼을 발간하였다. 가두리양식장 적조피해 저감을 위해 적조가 상습적으로 발생하는 지역의 적조피해 특성, 대피어장 선정, 양식어류의 절식효과, 적조발생시기 질병발생 특징 등의 연구 결과를 도출하였으며, 가두리양식어장 매뉴얼을 발간하여 현장 실용화 연구에 적용하였다.</p> <p>본 연구개발의 성과 중 양식생물의 폐사 유발 적조생물 농도 규명 및 유해 적조예방을 위한 양식장 사육관리 방안 매뉴얼은 적조에 의한 신속한 대응으로 양식생물 피해를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 육상 및 가두리양식장 적조피해 저감 기술 개발 연구결과는 국가 및 지자체 정책자료 및 양식재해보험 기초자료로 활용가능하며, 적조 재해에 대한 집중적인 예방 대책 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.</p>				
핵심어 (5개 이내)	적조	양식생물	가두리양식장	육상양식장	해양환경

SUMMARY

Purpose	<p>To minimize damages to fisheries by reducing red tide algae-causative damages to cultured species</p> <ul style="list-style-type: none"> - Investigating the mechanism of aquaculture species mortality caused by red tide - Developing a manual for red tide control 				
Outcome	<ul style="list-style-type: none"> - Publication and distribution of a customized red tide control manual by farm, and provision of on-site technical support - Investigation of optimal locations of floating aquaculture farms for evacuation, and provision of materials for policy making - Publishment of a media report upon an outbreak of red tide to instruct farmers on how to respond to red tide (media report) - Establishment of a system for the mass cultivation of red tide algae: securing 500 liters of mass embryoid of red tide algae at concentrations of more than 5,000 cells/mL 				
Future Use and Application	<p>This study was conducted to assess the damages red tide algae poses to aquaculture species and aquaculture farms. It also aimed to reduce the damages by developing technology to cope with red tide algae in land-based farms and floating aquaculture cages. Major results of the research are as follows:</p> <p>We investigated the scope of environmental tolerance of aquaculture species against red tide. We also established a mass culture system by investigating the basic conditions for the mass cultivation of red tide algae. In addition, we investigated the effectiveness of hydrogen peroxide as the substance to relieve red tide in land-based farms by making preliminary evaluation on the characteristics of the physicochemical water processing technique that can be applied within land-based farms. Moreover, we developed manuals on how to treat water in land-based farms by each development stage of red tide through the application of the results above. In order to reduce the damages red tide causes to a floating aquaculture cage, we studied characteristics of damages, fasting effect of cultured fish and the characteristics of diseases at the time of red tide occurrence in farms where red tide has occurred on a regular basis. We also selected aquaculture farms for evacuation. The manual on the floating aquaculture farm was published and applied for on-site commercialization research.</p> <p>We expect that both the investigation of the concentration of red tide algae that induces mortality of aquaculture species, and the manual on breeding management to prevent harmful red tide will significantly help to minimize potential damages to cultured species. In addition, the technology that we have developed to reduce damages to land-based farms and floating aquaculture cages can be used as the basic data when the central government and local governments make relevant policies and aquaculture disaster insurance. In addition, they can be used in establishing intensive and in-depth measures to prevent disaster arising from red tides.</p>				
Key words	Red tide	Aquaculture species	Floating aquaculture cage	Land aquaculture farm	Maritime environment

목 차

제1장. 연구개발과제의 개요.....	9
제2장. 국내외 기술개발 현황.....	10
제3장. 연구개발수행 내용 및 결과.....	12
제1절. 연구개발 수행 방법.....	12
1. 적조가 양식생물에 미치는 영향.....	12
2. 육상양식장 맞춤형 적조대응 연구.....	14
3. 가두리양식장 맞춤형 적조대응 연구.....	19
4. 적조피해저감 경제성 분석.....	22
5. 적조생물 실내 대량배양 연구 및 전기자극 적조 생물 구제 시스템 개발.....	23
제2절. 연구개발 수행 결과.....	25
1. 적조가 양식생물에 미치는 영향.....	25
가. 어종별 폐사에 미치는 적조생물의 농도 및 폐사메커니즘 구명.....	25
나. 적조생물 농도에 따른 양식생물 생존율 및 양식생물 반응.....	28
다. 적조생물 농도별 용존산소 감소량.....	34
라. 적조에 따른 양식생물 행동 특성 및 가두리 양식장 피해 대응 연구.....	35
2. 육상양식장 맞춤형 적조대응 연구.....	36
가. 적조대응상황별 사육수조 수질변동 조사 및 양식생물 영향.....	36
나. 물리·화학적 수처리 기법에 따른 적조생물 사멸특성 분석.....	37
다. 오존 및 고도산화기술을 활용한 적조생물 제어 특성 연구.....	42
라. 물리·화학적 수처리 기법의 효과 분석 및 평가.....	44
마. 물리·화학적 수처리 기법의 적조생물 제거효율 검증.....	45
바. 물리·화학적 수처리 기법 적용에 의한 사육생물 영향 평가.....	47
사. 양식생물 피해저감을 위한 수처리 기법을 도입한 운영방안 도출(현장적용 시험)	

.....	47
아. 양식생물 피해저감을 위한 수처리 기법 운영 매뉴얼 작성.....	50
3. 가두리양식장 맞춤형 적조대응 연구.....	51
가. 적조대비 가두리 양식장 적지조사 및 선정.....	51
나. 가두리 양식장 적조피해특성 분석.....	52
다. 적조대비 가두리 시스템 설계 및 현장 적용.....	53
라. 가두리 형태별 양식어류 행동특성.....	53
마. 가두리 양식장 주변해역 하계 해양환경 특성 분석.....	54
바. 가두리양식장 적조피해 대응 연구.....	56
사. 양식어장 맞춤형 적조대응 매뉴얼 작성.....	65
4. 적조피해저감 경제성 분석.....	66
가. 적조 피해 저감 방안별 경제성 분석.....	66
나. 적조 피해 유무에 따른 어장별 효율성 분석.....	66
5. 적조생물 실내 대량배양 연구 및 전기자극 적조 생물 구제 시스템 개발.....	67
가. 적조생물 실내 대량배양 연구 및 기초조건 구명.....	67
나. 적조생물 대량배양 조건 탐색 및 대량배양 기술 확립.....	68
다. 전기자극 적조생물 구제 시스템 개발 및 해양환경 변화 구명.....	71
제4장. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도.....	74
제5장. 연구개발결과와의 활용계획.....	75
제6장. 참고문헌.....	76

CONTENTS

Chapter 1. Summary of research project	9
Chapter 2. Current state of technical development	10
Chapter 3. Contents and results of research	12
Par. 1. Material and Methods	12
1. Effects of red tide algae poses on aquaculture species	12
2. Study to cope with red tide algae in land-based farms	14
3. Study to cope with red tide algae in floating aquaculture cages	19
4. Economic analysis for decrease of the damages of red tide algae	22
5. Establish of mass culture system and Development of electrostimulator technology to remove the red tide algae	23
제2절. Results of research	25
1. Effects of red tide algae poses on aquaculture species	25
가. Study on the mechanism of aquaculture species mortality caused by red tide	25
나. Survival rate and physiological response of aquaculture species with density of red tide algae	28
다. Change of dissolved oxygen in culture system with density of red tide algae	34
라. Behavior features of aquaculture species exposure to different density of red tide algae	35
2. Study to cope with red tide algae in land-based farms	36
가. Investigation on factors affecting the efficiency of red tide algae inactivation	36
나. Evaluation of the inactivation kinetics of red tide algae by oxidative treatments	37
다. Characteristic behaviors of red tide algae inactivation by ozone and advanced	

oxidation technology.....	42
라. Evaluation of effects of oxidative treatment on red tide algae inactivation.....	44
마. Examination of the removal efficiency of red tide algae by advanced oxidation technology...	45
바. Fish acute toxicity test by advanced oxidation technology.....	47
사. Determination of operation parameters for the field scale application.....	47
아. Development of water treatment guidelines to reduce the risk from the red tide.....	50
3. Study to cope with red tide algae in floating aquaculture cages.....	51
가. Investigation of optimal locations of floating aquaculture farms for evacuation.....	51
나. Study on characteristics of damage of red tide	52
다. Design and field application of floating aquaculture system for evacuation.....	53
라. Behavior features of aquaculture species with different cages type.....	53
마. Analysis of marine environment around floating aquaculture cages during summer ...	54
바. Study to cope with red tide algae in floating aquaculture cages.....	56
사. Development of manual for red tide control.....	65
4. Economic analysis for decrease of the damages of red tide algae.....	66
가. Economic analysis with different plan for decrease of the damages of red tide.....	66
나. Assessment of effectiveness with different aquaculture farm.....	66
5. Establishment of mass culture system and Development of electrostimulator technology to remove the red tide algae.....	67
가. Investigating the basic conditions for the mass cultivation of red tide algae.....	67
나. Establishment of mass culture technology	68
다. Development of electrostimulator technology to remove the red tide algae.....	71
Chapter 4. Research achievement and contribution.....	74
Chapter 5. Application plan of research results.....	75
Chapter 6. References	76

제 1 장 연구개발과제의 개요

최근 적조로 인한 양식생물 피해가 지속적으로 발생함에 따라 양식 생산성 안정화의 필요성이 제기 되고, 이를 위한 육상 및 해상가두리 양식장 중심의 적조피해 최소화를 위한 새로운 개념의 적조적응 연구가 필요한 실정이다.

적조관련 연구는 주로 사전예방에 관한 연구 또는 적조생물의 생태학적, 생리학적 연구에 치중되어 발생된 적조의 제거 및 방안 연구는 미비하다. 또한 국내의 부영양화 및 조류저감 기술은 사전 예방적 측면에서 점·비점오염원의 관리에 의존하였으나, 대부분 물리·화학적 기술들로 개발 기술의 적용사례가 종합적 대책보다 단편적 기술 적용이 대부분이었다. 적조생물에 의한 양식생물의 폐사원인은 적조생물이 분비하는 점액성분에 의한 호흡곤란과 질식으로 보고되고 있으나, 이에 대한 과학적인 폐사기작 구명이 필요하며, 폐사유발 적조생물의 농도 규명 및 기초 연구로 적조재해에 대한 대비가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 적조가 양식생물에 미치는 영향을 파악하고, 육상수조 양식장 및 가두리 양식장의 적조 대응 기술 개발, 그리고 적조생물 구제를 위한 시스템 개발 연구를 수행할 계획이다. 이러한 연구를 통해 적조대응 매뉴얼을 발간하여 어업인 및 지자체 관련 관계자들에게 배포하고 적조발생시기 어업인이 직접 어장관리를 수행할 수 있도록 교육자료로 활용하는데 목적이 있으며, 적조생물에 의한 양식 생물의 적조피해 저감 및 수산피해를 최소화하는데 목적이 있다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

적조관련 연구는 주로 발생의 사전예방에 관한 연구 또는 적조생물의 생태학적, 생리학적인 연구에 치중되어 발생된 적조의 제거 연구는 미비한 실정이다. 국내의 부영양화 및 조류저감 기술은 사전 예방적 측면에서 점·비점오염원의 관리에 의존하였으나 대부분 물리·화학적 기술들로서, 개발 기술의 적용사례가 종합적 대책보다 단편적 기술 적용이 대부분이다.

적조생물에 의한 양식생물 폐사 관련 국내보고는 코클로디니움 및 편모충류에 의한 양식굴 대량폐사(1979), 어패류 대량폐사(2003), 어류 산소소모량 변화(2009) 등 단편적이며, 치사농도 및 폐사 기작과 관련된 최근 연구는 미흡한 실정이다. 적조를 발생시키는 코클로디니움을 비롯한 편모조류에 관한 연구는 생리, 생태, 생활사 및 독성 등 다수의 보고가 있으며, 적조생물에 의한 어패류의 폐사기작(아카미 흡착, 독성 및 이온변화 등) 및 폐사농도 등에 관하여 단편적으로 보고되고 있다. 국외에서는 코클로디니움 및 *Heterocapsa* sp. 적조에 의한 패류 대량폐사와 침편모조류 등에 의한 어류의 대량폐사에 관하여 다수의 보고가 있다.

국내외 적조대응 기술개발 현황으로 일반적 대응기술인 황토 살포의 경우 황토 입자사이의 공극에 오염물질을 흡착하고, 황토의 콜로이드성 물질이 수중의 현탁물질(미세플랑크톤 등)과 인을 응집·흡착제거함으로써 적조생물의 대응기술로 활용되고 있는 실정이다. 황토의 경우 가급적 1 mm 이하로 분쇄 후 해수와 혼합하여 살포하며, 살포량(Cochlodinium의 경우)은 1 m² 당 100~400 g 정도, 살포면적을 가두리 면적의 3배 정도이며 황토의 효율은 70~80% 정도인 것으로 보고되고 있다(윤 등, 1998). 또한 포항산업과학연구원에서는 해수를 전기분해하여 차아염소산나트륨을 발생시켜 적조 제거연구를 수행하였는데, 차아염소산나트륨의 살균력을 이용하여 적조생물을 제거하였고, 이후 차아염소산은 햇빛에 의해 소멸되는 것으로 보고하였다(정 등, 2002). 한국해양연구원(1997)은 원심분리 방식의 적조생물 제거기를 개발하였으나 부품 교환없이 장시간 사용가능한 장점을 가지고 있지만, 처리용량이 작아 경제성 없는 것으로 보고되었다.

한편 국외의 기술현황으로, 일본에서 적조 회수선박을 이용하여 선상에서 원심분리기, 응집, 혼화, 가압부상조를 구성하여 최종으로 가압부상의 미세기포를 이용하여 적조생물의 흡착, 부상분리하여 회수하는 방법으로 연구되었으나 실용화 되지 못하였으며, 초음파를 이용하여 적조생물의 세포를 파괴하는 연구가 1974년 일본에서 수행되었으나 적조 세포제거를 위한 주파수 발생 범위 제약으로 대규모 적조발생 처리에 어려움이 있는 것으로 보고되고 있다(Zhang, 2006). 미국에서는 오존처리법이 1977년 연구되어 적조발생수역에 고압의 오존을 투입하여 제거하였으나, 오존의 생성비용과 다와 조류뿐만 아니라 유용미생물을 사멸하여 해양생태계에 문제를 일으키는 것으로 보고되었다(Schmitz, 1977). 또한 과거 적조에 치사력이 있는 황산동 또는 유기화합물 등을 이용한 연구가 수행되었으나 화학약품이 다른 생물에 대해 영향을 미치거나 대규모 사용에 대한 지속성이 없고 경제성이 없는 것으로 나타났다(Galveson, 1971). 부상분리의 일종인 가압부상법(Dissolved-air flotation, DAF)은 침전공정의 대안으로 과거 20년 전부터 유럽과 미국을 중심으로 정수처리공정과 조류제거를 위한 방법으로 개발되었으며(Zabel, 1985; Malley and Edzwald, 1991; Edzwald et al., 1994), DAF는 발생하는 기포의 크기가 50~100 μ m 정도로 입자와 기포사이에는 충돌, 침강,

흡착 및 부착 등의 메커니즘으로 입자성 물질 및 조류제거가 가능하며, 응집 및 침전 공정과 결합할 경우 시설면적을 감소할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Zabel, 1985; Frederick, 1990; Malley and Edzawald, 1991).

적조생물에 의한 폐사원인은 적조생물이 분비하는 점액성분에 의한 호흡곤란과 질식으로 보고 되고 있으나, 이에 대한 과학적인 폐사기장 구명이 필요하며, 폐사 유발 적조생물의 농도 규명 및 기초연구로 적조재해에 대한 대비가 절실히 필요한 실정이다.

적조로 인한 피해액은 2003년 215억원, 2007년 114억원, 2013년 247억원으로 적조로 인한 양식생물 피해규모가 날로 증가하는 추세로서 남해안 가두리양식장을 중심으로 적조피해를 최소화하기 위한 새로운 개념의 적조적응 연구가 수행되어 양식 생산성 안정화가 시급한 실정이다.

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1절 연구개발 수행 방법

1. 적조가 양식생물에 미치는 영향

가. 어종별 폐사에 미치는 적조생물의 농도 및 폐사 메커니즘 구명

양식생물의 폐사에 미치는 적조생물 (*Cochlodinium polykrikoides*)의 농도를 분석하기 위해 참돔 성어 및 치어, 조피볼락, 방어, 쥐치 및 전복 성패 및 치패를 실험어로 사용하였다(표 1). 실험어는 경남 거제시에 소재하고 있는 양식어장에서 구입하여 3일간 순치시킨 후 사용하였다. 적조생물의 밀도는 3000, 4000, 4500, 7000, 11,000 ± 200 cells/mL 으로 구분하여 실험하였으며, 환경조건은 명암주기 12L:12D, 수온 24±1℃, 염분 33±1 psu으로 설정하여 24시간 동안 진행하였다. 적조생물의 밀도는 혈구계수관을 이용하여 현미경하에서 계수하여 농도를 산정하였고, 적조생물 밀도별 용존산소변화량은 용존산소검량기(Orbisphere 3600)를 사용하여 1시간 간격으로 자동측정하여 분석하였다.

적조생물의 농도분석을 위해 실험에 사용한 적조생물은 2014~2015년에는 경남 거제시 시방선 착장과 경남 남해군 미조지역 등 4곳에서 자연발생한 적조생물을 7회 채수하여 실험에 사용하였으며, 2016년에는 남해수산연구소에서 인공배양한 적조생물을 분양받아 사용하였다. 환경조건은 명암주기 12L:12D, 수온 24±1℃, 염분 33±1psu으로 설정하여 24시간 동안 진행하였다.

Table 1. Size of Experimental animal

어 종		성어(전장)	치어(전장)
어류	참돔성어	35±2 cm	17±2 cm, 6.64±0.64 cm
	조피볼락	29.2±1.5 mm	
	방어	23.4±2.4 mm	
	쥐치	21.8±1.8 mm	
패류	전복	74~92 mm	15~31 mm, 3.26±0.67 cm

나. 적조생물의 농도에 따른 양식생물 생존율 및 양식생물 반응

적조생물의 밀도에 따른 어종별 생존율을 조사하기 위하여 수조크기 150 L, 80 L, 40 L, 10 L를 사용하여 실험생물의 크기별 수조를 달리하여 사용하였으며, 각 적조생물 밀도별 실험생물의 수는 10마리씩 수용하였으며, 실험기간동안 절식하였다. 실험기간은 24시간이었으며, 적조생물 밀도별 실험어의 생존율 분석을 위하여 1시간 간격으로 실험어의 생존여부를 관찰하였으며, 생존여부는 어류의 복부가 뒤집어진 상태가 되고 아가미호흡이 정지된 상태에 사망한 개체로 간주하였다. 적조생물의 농도에 따른 양식생물의 생리적 반응(그림 1, 2)은 적조생물 밀도별로 노출시킨 후 넙치와 참돔치어에서 호흡수변화를 측정하였으며, 스트레스정도를 파악하기 위하여 혈액성상과 SOD, 아가미반응을 비교 분석하였다. 혈액성상은 글루코스, 총콜레스테롤 및 NH₃변화를 분석하였다. 아가미반응은 적조생물에 노출시킨 양식생물의 아가미를 해부하여 아가미에 침적된

적조생물 유무를 관찰하였다.

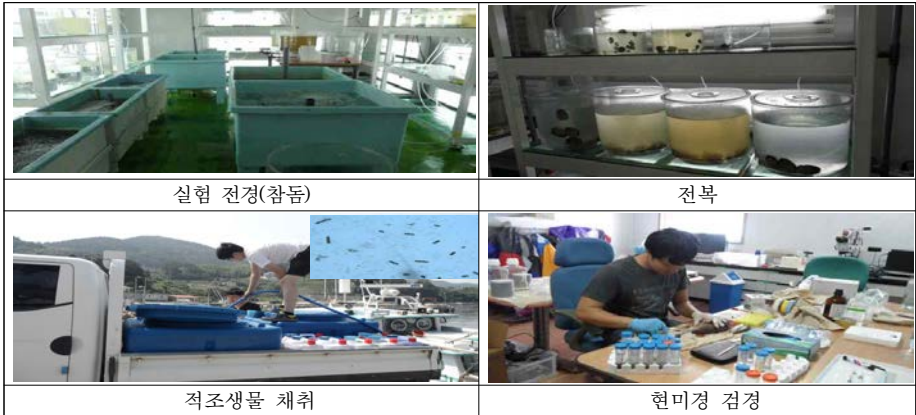


Fig. 1. Analysis of physiological response of experimental animal exposed to harmful algae *Ochrodinium polykrikoides*.

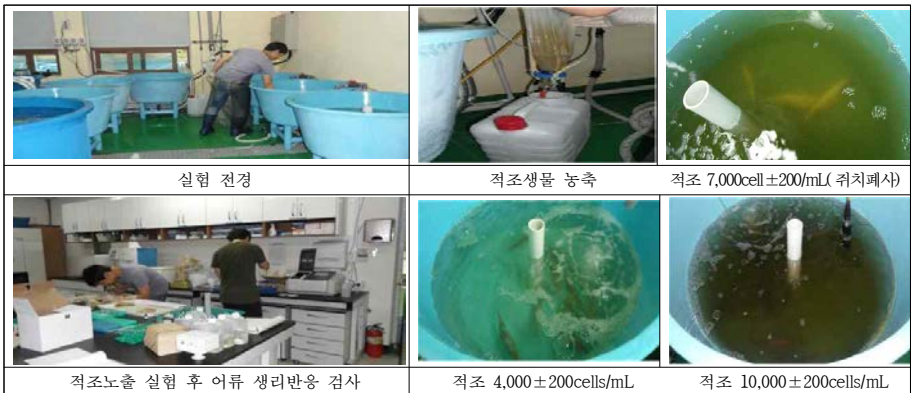


Fig 2. Experimental process of effect on cultured animal exposed to harmful algae *Ochrodinium polykrikoides*.

다. 적조생물 농도별 용존산소 감소량

적조생물 농도별 수중 내 용존산소량 변화를 조사하기 위하여 10 L 수조에 적조생물 밀도 4000 \pm 200 cells/mL, 7000 \pm 200 cells/mL, 10,000 \pm 200 cells/mL로 설정하여 12시간 동안 용존산소 검량기(Orbisphere 3600)를 이용하여 매 시간 간격으로 각 적조생물 밀도별 용존산소 변화를 측정하였다.

라. 적조에 따른 양식생물 행동 특성 및 가두리 양식장 피해 대응 연구

적조에 따른 어종별, 크기별 행동반응 분석 및 적조에 따른 어종별, 크기별 폐사특성 분석하였다. 또한 통영 가두리양식장 주변 해역의 하계 해양환경 특성분석을 분석하였으며, 통영해역 적조발생 특성분석(장기분석, 피해지도작성) 실시하였고, 적조유입시 가두리양식장주변 어장환경 모니터링, 가두리 그물형태별, 수심별 사육생물 특성 분석 및 적조대비 통영해역 가두리양식장 적지조사를 실시하였다.

2. 육상양식장 맞춤형 적조대응 연구

가. 적조대응 상황별 사육수조 수질 변동조사 및 양식생물 영향

육상양식장내 적조대응 연구를 위하여 2014년 본 연구가 착수된 후 육상양식장내 물리적, 화학적, 생물학적 수처리 시설 현황 조사하였고, 육상양식장에서 적조대응으로 사용되고 있는 과산화수소 사용에 따른 영향 평가(추가)를 실시하였으며, 적조 대응 시나리오에 따른 사육수조내 수질 변동 및 양식생물 영향 평가를 위한 실험실 조사를 실시하였다. 또한 육상양식장 단수시 사료 주입 유무 및 용존산소에 따른 수질 변동 조사 및 양식생물 영향 평가를 위하여 혼화, 응집, 침전, 여과 후 적조제거 실험실 조사를 실시하였다. 육상양식장 적조피해 현황조사 및 특성 분석은 2015년 경남 통영지역 소재 육상양식장을 중심으로 직접 방문하여 피해량을 조사하였으며, 정확한 집계량 산정을 위해 각 지자체에 의뢰하여 피해현황을 조사 분석하였다.

나. 물리·화학적 수처리 기법에 따른 적조생물 사멸 특성 분석

물리·화학적 수처리 기법에 따른 적조생물 사멸 특성 분석을 위해 해수내과산화수소 거동 및 적조사멸 효과, 해수 내 과산화수소 주입에 따른 부산물 생성 거동, 육상양식장 적조대응 시나리오에 따른 사육수조 수질 모니터링 및 적조생물 구제물질별 적조생물 제거효과를 분석하였다.

다. 오존 및 고도산화기술을 활용한 적조생물 제어 특성 연구

오존 및 고도산화기술별 적조생물 사멸 동역학 조사를 실시하였으며, 산화제(오존 및 수산화라디칼 등) 노출정도의 정량화 및 기본 수질인자 분석, 적조생물 농도, 오존농도 변화에 따른 적조생물 사멸효율 연구 및 RSM(Response Surface Method) 기법을 통한 사멸 효율 최적조건 도출하였다.

라. 물리화학적 수처리 기법의 효과 분석 및 평가

적조생물 사멸 및 산화제 주입농도 실험을 위해 오존은 매 실험에 앞서 오존발생기(Ozonetech, Korea)로부터 발생된 오존가스를 초순수에 과포화시켜 오존 포화수(~ 30 ppm)를 제조하고 이를 원하는 농도로 희석하여 사용하였다. 오존에 의한 적조생물 사멸실험은 회분식 반응으로 이루어졌으며, 코클로디니움의 초기 밀도는 0.5×10^3 , 1.0×10^3 , 2.0×10^3 cells/mL로 조절하였다. 실험에 사용된 오존의 주입농도는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0 ppm으로 조절하였으며, 오존 주입을 통한 반응개시 이후 반응시간에 따라 샘플링하였다.

과망간산염(과망간산칼륨) 분석법은 과망간산칼륨 자체의 색을 측정하는 Direct method와 DPD를 이용하여 산화제를 간접적으로 정량하는 DPD method가 있다. Direct method는 고농도의 과망간

산염 분석시 흡광도 525 nm에서 UV-Vis spectrophotometer로 분석 가능하다. 고농도의 과망간산염은 그 자체로도 보라색을 띄고 있어 Direct method로 흡광도 값을 보이지만 0.39 ppm이하로는 분석이 어려우며 색 유발물질이 있을 경우 분석에 방해요인으로 작용할 수 있다. 저농도의 과망간산염 용액의 색은 눈에 띄지는 않지만, DPD 시약과 반응하면 열은 붉은색을 띄므로 551 nm의 흡광도에서 UV-Vis spectrophotometer를 이용하여 분석할 수 있다. 과망간산염에 의한 적조생물 사멸실험은 회분식 반응으로 이루어졌고, 코클로디니움의 초기 밀도는 0.5×10^3 , 1.0×10^3 , 2.0×10^3 cells/mL로 조절하였으며, 초기농도는 0.1, 0.5, 1.0, 5.0 ppm으로 조절하여 실험을 진행하였다. 염소에 의한 적조생물 사멸실험 역시 회분식 반응으로 이루어졌고, 코클로디니움의 초기 밀도는 0.5×10^3 , 1.0×10^3 , 2.0×10^3 cells/mL로 조절하였으며 염소의 초기농도는 0.1, 0.5, 1.0, 5.0 ppm으로 조절하였다. 과산화수소의 농도는 Titanium sulfate method (Eisenberg, 1943)로 405 nm의 자외선 흡광도에서 UV-Vis Spectrophotometer를 이용하여 측정하였다. 실험에 사용된 과산화수소는 30 wt.%로 Sigma-Aldrich (USA)사에서 구매하였다. 과산화수소에 의한 적조생물 사멸실험은 회분식 반응으로 이루어졌고, 코클로디니움의 초기 밀도는 0.5×10^3 , 1.0×10^3 , 2.0×10^3 cells/mL로 조절하여 실험하였으며, 동시에 해수 내 코클로디니움의 밀도에 따른 과산화수소 분해특성을 평가하였다. 실험에 사용된 과산화수소의 주입농도는 0.1, 1.0, 5.0, 10.0 ppm으로 조절하였으며, 반응시간에 따라 샘플링하였다.

마. 물리·화학적 수처리 기법의 적조생물 제거효율 검증

1) 적용산화제의 전환에 따른 총잔류산화제 생성

오존은 오존발생기로부터 발생된 오존가스를 초순수에 과포화시켜 오존포화수를 제조하고, 이를 원하는 농도로 희석하여 사용하였다. 실험에 사용된 과망간산칼륨과 염소, 30 wt% 과산화수소는 Sigma-Aldrich (USA)사에서 구매하였다. 오존과 과망간산염, 염소, 과산화수소의 전환에 따른 총잔류산화제 생성 실험은 코클로디니움 초기 밀도 0.5×10^3 , 1.0×10^3 , 2.0×10^3 cells/mL일 때 산화제의 농도와 반응시간에 따라 샘플링 한 후 DPD (N, N-diethyl-p-phenylenediamine) method를 이용하여 자외선 흡광도 515 nm에서 UV-Vis spectrophotometer로 분석하였다. 총잔류산화제의 농도는 염소농도로서 $\mu\text{mol Cl}_2/\text{L}$ 로 정량하였다.

2) 산화제에 의한 반응부산물(브롬산염)

Table 2. Analysis condition for the low concentration of bromate by IC (Ion Chromatography)

분석조건	
Columns	Dionex IONPAC AS9-HC Guard (4×50 mm) Dionex IONPAC AS9-HC Analytical (4×250 mm)
Eluent	9 mM NaHCO_3 + 1.8 mM Na_2CO_3
Flow rate	1 mL/min
Temperature	60°C
Sample Volume	1000 μL
Detection (Absorbance)	450 nm
PC10 Pressure	40 psi

브롬산염 분석방법은 주로 IC (Ion Chromatography) 기기를 사용하는데 (표 2), 현재 먹는 물 수질 기준인 10 ppb 수준까지 검출하는데 많은 어려움이 있다. 이러한 문제는 발색시약인 o-dianisidine

(ODA)를 사용하여 UV-Vis detector로 검출하였다 ($\lambda_{\max} = 450 \text{ nm}$).

3) 산화제에 의한 어류독성평가

적용 산화제의 양식어류에 미치는 독성영향을 평가하기 위한 실험은 국내에서 발생하는 적조의 피해가 가장 많은 참돔치어를 대상으로 수행하였다. 실험어는 평균 체중 5.8 g, 체장 8.3 cm의 크기를 사용하였다. 실험용 수조는 약 150 L의 FRP 수조를 사용하였고, 실험 전에 깨끗이 세척하여 건조시켰다. 수조에는 해수 공급을 할 수 있는 배관 연결과 aeration을 설치하고, 각각의 수조에 해수 100 L와 참돔치어 30마리 썩 넣어 순치시킨 이후 실험에 사용하였으며, 먹이의 공급은 실험개시 24시간 이전에 중단하였다. 또한 수조 내 부유물질은 산화제 주입 전 사이펀을 이용하여 모두 제거하였다(그림 3).

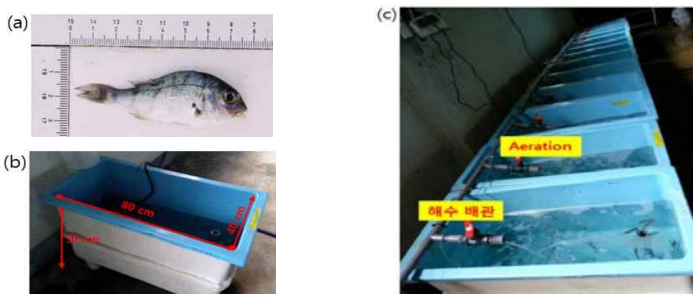


Fig. 3. Images of juvenile red sea bream (a), experimental tank (b) and tank setting (c).

어류독성평가 실험은 산화제를 처리하지 않은 대조구와 실험 수조 내 농도별 산화제를 처리한 실험구를 준비하여 실행하였다. 반수치사농도 (LC_{50})는 반응 72시간 동안 폐사한 개체수를 관찰하여 조사하였고, 폐사 판정은 아가미 개폐운동이 정지된 실험어 중에서 유리봉으로 자극하여 반응이 없는 개체를 기준으로 하였다(그림 4).

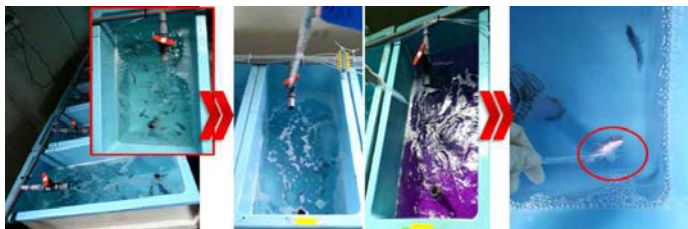


Fig. 4. Experimental methods for fish acute toxicity test.

바. 물리·화학적 수처리 기법 적용에 의한 사육생물(넙치, 강도다리) 영향 평가

육상양식장으로 유입되는 적조생물의 제어를 위해 과산화수소(H_2O_2)를 적용하였다. 적용산화제의 양식어류에 미치는 독성영향을 평가하기 위하여 실험어는 넙치의 경우, 평균 체중 11.9 g, 체장 11.3 cm, 강도다리의 경우, 평균 체중 4.3 g, 체장 1.58 cm의 크기를 사용하였다. 실험어 사육에 사용된 해수는 경남 남해군 상주면에서 채수한 해수를 사용하였으며 대성원수에 대한 수질인자 조사를 다음과 같이 수행하였다. 수질분석은 pH, 전기전도도, Alkalinity, 탁도, DOC, A254, 음이온, 양이온을 조사하였으며 분석결과는 아래 표 3과 같다.

Table 3. Water quality analysis of seawater (Namhae)

분석 항목		해수	비고
pH		8.05	-
Conductivity (mS/cm)		47.74	-
Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)		107.60	-
탁도 (NTU)		0.03	-
DOC (mg/L)		3.69	0.45 μ m 필터 후 분석
A ₂₅₄ (cm^{-1})		0.009	0.45 μ m 필터 후 분석
음이온 (mg/L)	Cl^-	18,374	0.45 μ m 필터 후 분석
	SO_4^{2-}	1,962	0.45 μ m 필터 후 분석
양이온 (mg/L)	Na^+	11,304	0.45 μ m 필터 후 분석
	K^+	454	0.45 μ m 필터 후 분석
	Mg^{2+}	1329.6	0.45 μ m 필터 후 분석
	Ca^{2+}	373.7	0.45 μ m 필터 후 분석

실험용 수조는 용량 약 150 L의 FRP 수조를 사용하였고, 실험 전에 깨끗이 세척하여 건조시켰다. 수조에는 해수 공급을 할 수 있는 배관 연결과 aeration을 설치하고, 각각의 수조에 해수 100 L와 넙치 및 강도다리 치어 30마리씩 넣어 순치시킨 이후 실험에 사용하였으며, 먹이의 공급은 실험개시 24시간 이전에 중단하였다. 또한 수조 내 부유물질은 산화제 주입 전 사이펀을 이용하여 모두 제거하였다. 어류독성평가 실험은 산화제를 처리하지 않은 대조구와 실험 수조 내 농도별 산화제를 처리한 실험구를 준비하여 실행하였다. 반수치사농도(LC_{50})는 반응 72시간 동안 폐사한 개체수를 관찰하여 조사하였고, 폐사 판정은 아가미 개폐운동이 정지된 실험어 중에서 유리봉으로 자극하여 반응이 없는 개체를 기준으로 하였다.

사. 양식생물 피해저감을 위한 수처리 기법 도입한 운영방안 도출 (현장적용 시험)

육상양식장의 사육조 내 산화제 공정도입을 위해 배양 적조생물과 치어를 활용한 모의실험을 통해 적조생물의 사멸과 폐사된 어류, 산화제의 확산특성 및 분해를 확인하였다. 이 때 주입된 산화제의 농도를 샘플링 지점별 H_2O_2 의 제거율을 조사하고 실험은 450 L 수조에 적조생물 0.5×10^3 cells/mL를 포함하는 해수 100L를 주입하고, 실험개시 24시간 이전에 먹이의 공급을 중단시킨 넙치치어 30마리를 준비하여 수행하였다. 또한 수조에는 용존산소 유지를 위해 aeration을 설치하였다. 사육조 내 산화제 확산특성 실험은 450 L 수조에 200L의 해수를 주입하여 준비하여 진행하였고(그림 5), 실험조건에 따라 과산화수소를 수조에 주입하여 실험을 개시하였다. 과산화수소의 농도는 Titanium sulfate method (Eisenberg, 1943)로 405 nm의 자외선 흡광도에서

UV-Vis Spectrophotometer를 이용하여 측정하였다. 실험에 사용된 과산화수소는 30 wt.%로 Sigma-Aldrich (USA)사에서 구매하였다.



Fig. 5. Images of experimental setup for the diffusion of oxidants.

실험조건은 과산화수소 농도별로 고농도 (100 ppm)와 저농도 (10 ppm), 주입방법별로 한점 주입과 분산 주입을 실시하는 것으로 총 4가지이다. 과산화수소의 농도는 출수구 기준으로 기준점을 포함한 양 끝점과 중간점, 길이방향으로 이등분하는 세점, 수심방향으로 두점 (위, 아래)을 격자형으로 측정하여 총 18개의 지점을 시간에 따라 분석하였다 (그림 6).

적조생물의 사멸은 Sedgwick-Rafter 챔버를 이용하여 광학현미경 (Zeiss, Germany)으로 개체수를 관찰하여 평가하였다. 적조생물의 사멸효과는 유영형, 정지형, 파열형으로 각각 구분하였다. 유영형은 산화제에 영향을 받지 않아 활동성이 크고 개체가 서로 연결되어 군집으로 자유롭게 유영하는 개체이고, 정지형은 산화제의 영향을 받아 연결된 개체가 각각 독립개체로 분리되며 운동성이 없어진 개체, 파열형은 독립개체의 세포팽창과 이에 따른 세포막의 파괴 및 용해가 관찰된 개체를 의미한다 (그림 7). 어류 독성평가는 반응 72시간 동안 폐사한 개체수를 관찰하여 조사하였고, 폐사 판정은 아가미 개폐운동이 정지된 실험어 중에서 유리봉으로 자극하여 반응이 없는 개체를 기준으로 하였다. 과산화수소의 확산특성 및 분해는 전술한 것과 동일한 지점에서 Titanium sulfate method로 분석하여 확인하였다.

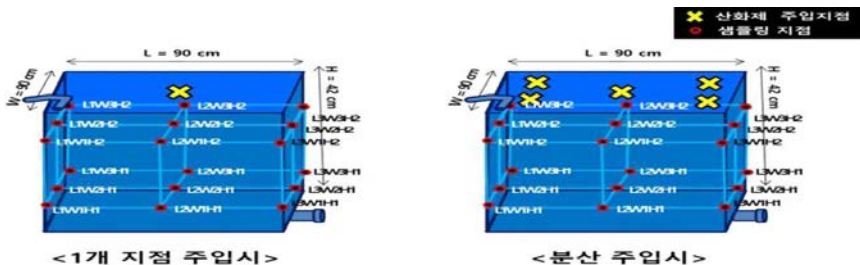


Fig. 6. Experimental method for the diffusion of oxidants.



Fig. 7. On-site photos for application of the oxidant process.

아. 양식생물 피해저감을 위한 수처리 기법의 운영 매뉴얼 작성

육상양식장 적조 피해 저감을 위해 본 연구를 통해 얻은 결과를 토대로 적조발생단계별 수처리 대응요령을 정리하여 매뉴얼을 작성하여 배포하였다.

3. 가두리양식장 맞춤형 적조대응 연구

적조대비가두리양식장 적지조사 및 적지 선정을 위해 환경요인, 적조발생, 지형특성 등을 분석하였고, 지역별, 어장형태별, 어종별 피해분석 등 적조피해 특성을 분석하였다. 또한 가두리시스템 설계, 현장적용실험 등을 통해 적조 발생 전 적조대응 연구를 실시하였으며, 적조발생전 및 적조발생시 적조대응 연구를 위해 가두리 이동방법 및 생존특성, 행동특성, 가두리시스템 설계, 등을 조사하였으며, 가두리 양식장 적조피해 대응 연구를 위해 적조출현시 절식과 섭식의 영향 등을 조사하였다.

가. 적조대비 가두리양식장 적지 조사 및 선정

가두리적지 선정을 위해 가두리 양식장 주변 해역 해양환경특성 및 적조피해 발생 현황 등을 조사하였으며, 가두리양식장 적지를 선정하기 위한 기초자료로 활용하기 위해 임시대피지(7 해역)와 적조 상습발생해역(3 해역)를 2015년 7월부터 9월까지 2주 간격으로 환경조사를 실시하였다. 물리적 수질환경으로서 수온, 염분, 용존산소(DO), 수소이온농도(pH)를 매월 수질분석 장치(YSI-650MDS)를 이용하여 구역별, 수층별로 조사하였다. 화학적 수질환경을 조사하기 위하여 저층 해수 1 L를 채수하여 실험실에서 해양수질조사 공정법에 따라 화학적 산소요구량(COD), 암모니아성 질소($\text{NH}_4\text{-N}$), 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$), 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 용존무기질소(DIN), 인산염($\text{PO}_4\text{-P}$), 규산염($\text{SiO}_2\text{-Si}$), 클로로필 $a(\text{Chl.-a})$, 부유물질(SS)을 측정하였다. 조사 지점별 해양저질의 특성은 채니기(grab sampler)를 이용하여 직접 해양저질을 채취한 후 실험실에서 화학적 산소요구량(COD), 산화발성화합물(AVS), 함수율, 강열감량(IL)을 측정하였다.

나. 가두리양식장 적조피해 특성 분석

남해안 가두리양식장을 중심으로 적조피해 특성을 조사하기 위하여 10년간 자료를 경남도 지자체에 의뢰하였으며, 경상남도에서 출판된 해양수산현황과 통계청 자료 그리고 국립수산물학원

의 적조정보시스템 자료를 기반으로 적조피해 특성을 분석하였다.

다. 적조대비 가두리시스템 설계 및 설치

주변해역 수심이 약 15 m이상인 가두리양식장에서는 적조대비하여 가두리 수층을 조절하는 방안을 고려하여 3가지 형태의 가두리를 설계하였다. 내파성 사각가두리(5, 10 m)와 원형(지름 15 m)으로 구분하여 평상시는 그물깊이가 10-20 m로 유지하다가 적조발생시 수심 15-30 m로 침하시켜 적조에 대비하는 형태로 통영시 산양읍 시험어장과 육지도 연구교습어장에 설치하였다.

라. 가두리 형태별 양식어류 행동특성

적조생물 유입에 따른 어류행동 특성 파악하기 위해 전자태그를 이용한 바이오로깅 기술이 양식 어류의 행동 특성을 파악하는데 유용한지를 검토하고자 하였다. 조피볼락과 참돔을 대상으로 예비실험을 실시하고, 본 실험에 사용된 전자태그(그림 8)는 3축가속도, 수온, 수심이 기록되는 데이터 로거(G6+, Cefas)로써 약 일주일간 실험 대상어에 부착 후 평소 유영행동 및 돌출행동에 대하여 비교 검토하였다. 예비실험에서는 돌출행동을 먹이 섭식에 따른 행동 반응으로 정의하였고, 태그 회수 후 먹이 섭식시 행동과 평소 행동 차이를 그래프로 확인하여, 현장에서의 활용 가능성에 대해서 조사하였다.



Fig. 8. Swimming figure of experimental fish attached by electronic tag.

마. 가두리 양식장 주변해역 하계 해양환경 특성 분석

2015년 7월 10일부터 9월 17일 까지 남해~통영~거제에서 대피어장 및 적조해역(그림 9)의 영양염류량과 수온, 염분, DO, pH를 조사하고, 코클로디니움 이외의 종조성을 파악하여 해양환경 특성을 조사하였다.



Fig. 9. Investigation area of fish farms for evacuation (left) and red tide bloomed seawater (right).

2016년 6월부터 9월까지 남동해역 내측 및 외측해역을 중심으로(그림 10)의 영양염류량과 수온, 염분, 코클로디니움 이외의 종조성을 파악하여 해양환경 특성을 조사하였다.



Fig. 10. Investigation point of outer(left) and around area(right) of fish farms.

바. 가두리양식장 적조피해 대응 연구

2014년부터 2016년까지 본 연구를 수행하는 동안 2014년과 2015년에는 적조피해가 발생하였으며, 이 기간 동안 가두리를 제작·설치하여 적조피해를 저감하기 위한 현장 시험을 수행하였다. 본 시험의 목적은 여름철 적조발생시기에 적조에 의한 피해를 줄이기 위해 방안으로 절식효과를 검증하기 위해 수행하였다. 실험어는 참돔, 조피볼락, 농어, 넙치성어 및 전복을 대상으로 수행하였다.

1) 적조 출현 시 절식과 섭식이 참돔과 조피볼락에 미치는 영향

적조 출현 시 절식과 섭식에 따른 영향을 조사하기 위해, 통영시 산양읍 풍화리에 위치한 가두리(가로 6 m×세로 6 m×깊이 6 m)에 참돔과 조피볼락을 동시 사육하며 6주간 사료 섭식구와 절식구로 구분하여 실험을 진행하였다. 6주간 섭식구는 1주일 3회 사료를 공급하였으며, 적조 발생시 사료공급 유무에 따른 영향을 조사하였다.

2) 어종별 적조 노출에 따른 생리적 반응

적조 발생시 가두리양식장의 어종별(참돔, 조피볼락, 농어) 생리적 반응을 관찰하기 위하여 남해군 미조면 미조리해상에 위치한 가두리(가로 11 m×세로 11 m×깊이 5m)에서 2015년 8월 21일부터 10월 20일까지 총 8회에 걸쳐 생존율과 성장 그리고 혈액성상변화를 조사하였다. 현장샘플시기마다 폐사개체를 확인하여 생존율을 산정하였다.

3) 고수온기 절식기간에 따른 생리적 변화 분석

가두리 양식대상종인 조피볼락과 참돔의 성어와 치어를 대상으로 고수온기 실험을 진행하였다. 남해양식연구센터 해상가두리에서 치어는 수조 당 100마리씩, 성어는 수조 당 40마리씩 2반복으로 사육하였고, 수온 21.3~25.7℃, DO 7.3~9.8 mg/L의 환경조건에서 수행되었다. 실험 개시 후 포식구는 지속적으로 사료를 공급하였고, 절식구는 사료를 공급하지 않고, 4, 8, 16, 32일째에 포식구와 절식구 모두 수조당 10마리씩 샘플링하여 생리학적인 변화를 비교분석하였다. 생존율은 매일 죽은 개체를 파악하여 누적 생존율로 역산하였고, 성장 분석은 실험 시작 시와 실험 종료 시에 표본된 포식구와 절식구, 각 20마리의 조피볼락 및 참돔을 대상으로 성장 항목(전장성장률, 체중성장률, 일일성장률, 비만도 등)을 파악하였다. 형질 분석은 실험 시작 시와 실험 종료 시에 표본된 포식구와 절식구, 각 10마리의 조피볼락 및 참돔을 대상으로 체장, 체중, 내장피 제거 체중, 내장피무게, 내장피지수, dressing비를 조사하였다. 간 중량지수는 실험 시작시부터 실험 종료 시까지 포식구와 절식구에서 표본된 각 10마리의 조피볼락 및 참돔을 대상으로 간중량지수 변화

를 조사하였다.

4) 포식 및 절식에 따른 양식어종의 적조 시 생존율 분석

3400~3500 cells/mL 밀도의 *Chocloclodium polykrikoides*이 포함된 160 L 용량의 FRP 수조에 10마리씩 사육하여 24시간동안 실험을 진행하였다. 생존율은 매 시간 죽은 개체를 파악하여 이로부터 누적 생존율로 역산하였고, 실험 종료 후 생존 개체에 한 해 채혈하였으며, 이후 고수온기 양식어종별 치어기 절식기간에 따른 생리적 변화 분석조건과 동일하게 혈액 성분 분석을 진행하였다.

5) 적조 미발생시 가두리양식어장 모니터링 및 양식생물의 절식효과

적조대비 가두리 양식생물 사육관리 방안 마련을 위하여 적조발생시기 2016년 7월부터 9월까지 적조가 많이 발생하는 통영과 남해지역에 소재하고 있는 주요 가두리 양식어종(참돔, 조피볼락)을 대상으로 질병검사 및 건강도를 조사하였으며, 적조발생시기 양식생물의 절식효과를 검증하기 위하여 참돔, 넙치 및 전복을 대상으로 실내에서 8주간 절식시키면서 성장, 건강도변화, 대사변화, 조직학적 반응 및 절식 후 회복도 등을 실내시험을 통해 조사하였다. 질병은 세균, 바이러스 및 기생충을 조사하였다. 건강도 분석을 위하여 혈액학적조사로서 혈액내 알부민(albumin), AST, ALT, 글루코스, 암모니아 및 총콜레스테롤 변화를 분석하였으며 스트레스정도를 파악하기 위하여 SOD (superoxide dismutase)를 분석하였다. 절식효과 검증을 위한 지표로서 절식기간동안 성장도는 절식전후 체중증가량으로 산정하였으며, 건강도 분석을 위해 혈액내 알부민(albumin), AST, ALT, 글루코스, 암모니아, 총콜레스테롤 및 SOD (superoxide dismutase)을 분석하였다. 산소소비량은 산소검량기(Ocean tech 3600)을 이용해 측정하였으며, 조직병리학적 조사는 어류는 간 조직, 전복은 간체장을 분석하였다. 혈액학적 성상의 분석을 위해 실험어를 가두리에서 신속히 포획하고 MS-222(Sigma, USA) 100 ppm으로 마취한 후 헤파린처리 주사기를 이용하여 미부동맥으로부터 신속하게 채혈하였다. 이후 4℃, 12,000 rpm으로 5분간 원심분리하여 혈장을 분리한 후 -74℃에 보관하면서 분석하였다. 혈장을 FUJI DRI-CHEM 3500i(Fujifilm, Japan)로 전용 분석 kit 슬라이드를 사용하여 AST (aspartate aminotransferase), CPK (creatine phosphokinase), CLU (glucose), ALB (albumin), TP (total protein), IP (inorganic phosphorus) 등을 분석하였다.

사. 양식어장 맞춤형 적조대응 매뉴얼 작성

가두리양식장과 육상양식장을 구분하여 어류, 전복의 적조발생 단계별 대응요령 및 조치사항을 제시한다. 적조 발생 전, 적조출현주의보 (10 cells/mL), 적조주의보 (100 cells/mL), 적조경보 (1,000 cells/mL), 적조해체의 단계로 나누어 사육관리, 시설 점검, 조기출하, 긴급방류, 임시대피장 이동 등 체계적인 대응방안을 제시하였다. 그리고 양식품종별 표준 사육기준, 적조예보 종류 및 발령 기준, 전국 연도별 적조 발생상황, 적조예보 발령 및 통보체제 정보를 추가했다. 또한 현장 교육을 통한 능동적 대응으로 적조 피해 최소화에 기여하기 위해 본 연구 착수 시기인 2014년부터 적조대응 매뉴얼을 발간하고, 포스터를 제작하여 경남권역 전체를 순회하면서 현장 방문 기술설명회를 개최하였다. 2015년 및 2016년도에는 연구결과를 반영하여 매년 매뉴얼을 보완 발간하여 배주하였으며, 현장 방문 및 설명회자료로 활용하였다.

4. 적조피해저감 경제성 분석

적조피해 저감 경제성분석은 본 연구를 수행하면서 도출한 결과, 선행연구, 각종 통계자료,

정책자료 등 문헌조사와 관련 사업에 식견과 조예가 깊은 전문가 면담 등을 병행하며, 연구의 목적 달성을 효과적으로 추진하고자 연구과정을 3단계로 구분하여 체계적으로 수행하였다.

1단계로서 국내외 문헌조사, 현장 조사, 국내외 전문가 자문을 중심으로 수행하였으며, 2단계는 적조 피해 저감 방안별 효율성 및 비용편익 분석 그리고 3단계는 적조 피해 저감 방안별 경제적 기대효과 비교 분석하여 우리나라 양식어장의 적조 피해와 방제사업 관련 객관화된 자료를 확보하고, 적조 피해 저감 관련 연구에 적합한 경제성 분석 이론을 적용하여 의미 있는 정량적 효과를 도출하였으며, 최적의 적조 저감 대책에 관한 시나리오별 기대효과를 비교·분석하였다.

5. 적조생물 실내 대량배양 연구 및 전기자극 적조 생물 구제 시스템 개발

가. 적조생물 실내 대량 배양

적조생물 대량배양 기초조건 구명을 위한 물리·화학적, 생물학적 배양조건 조사를 위해 배양규모 0.3~2 L, 최종 수확 배양밀도 1×10^4 cell/mL로 하였으며, 적조생물 실내 대량배양 시험은 대량배양 기초조건을 바탕으로 배양규모 2~20 L, 최종 수확 배양밀도 1×10^4 cell/mL를 목표로 하였다. 적조생물 실내 대량배양 시험을 위한 대량배양 기초조건 조사결과 실내 대량배양 적용시험은 물리·화학 및 생물학적 조건을 토대로 배양규모 2~20 L, 최종 수확 배양밀도 1×10^4 cell/mL 배양조건 구명을 위해 성장, 배양기간 등 조사하였다. 또한 안정적 대량배양 시스템 구축을 위해 배양용기별, 관리방법별(정체, 강제통기, 배양기 등) 대량배양 시험 조사(성장, 배양기간, 유지기간 등)를 실시하였다.

나. 적조생물 대량배양 조건 탐색, 기초조건 구명 및 대량배양 시스템 구축

대량배양 기초조건 조사결과를 실내 대량배양에 적용하여 물리·화학 및 생물학적 조건을 토대로 배양규모 0.5~500 L, 최종 수확 배양밀도 1×10^4 cells/mL의 배양조건 구명을 위해 영양염(질소, 인)의 농도에 따른 성장 그리고 에어버블 공급 유무와 에어버블의 직경에 따른 성장 밀도를 조사하였다. 적조생물 대량배양 기초조건 구명을 위해 물리적 조사 조건인 광조건(광원, 광량, 광주기), 배양온도, 수처리별(Axenic 등), Agitation 방법(정체, 강제포기 등)에 따른 배양특성(성장률, 클로로필 함량 등)을 배양규모별(0.3~2 L)로 조사하여 최적 조건 구명하였으며, 화학적 배양조건 조사를 위해 염분별, 배지조성별(대량영양염, 미량영양염, 비타민 등), 수소이온농도(pH)별 배양특성(성장률, 클로로필 함량 등)을 배양규모별 (0.3~2 L)로 조사하여 최적 조건 구명하였다. 생물학적 배양조건은 최초 접종농도별, 계대배양시기에 따른 배양특성(성장률, 클로로필 함량 등)을 배양규모별 (0.3~2 L)로 조사하여 최적 조건 구명하고자 하였다. 2014년도 적조생물 대량배양 기술 개발에 따라 대량배양 시스템 구축을 위해 적조생물 전용 대량배양수조(0.1~0.5 ton) 및 시스템을 고안하여, 배양용기, 관리방법 등의 대량배양 시스템에 따른 성장, 배양기간, 유지기간 등을 조사하였다.

다. 전기자극 적조생물 구제시스템 개발

배양에 사용할 코클로디니움 선별로 NFRDI-CP001(2013년 8월, 통영분리, 남해수산연구소 분리종), CP(통영), DP(거제), YD(2014년 9월, 동해), MJ(2014년 9월, 남해), DS(2014년 9월, 여수) 6개의 strain 성장을 비교하였다. 물리·화학적 고밀도 성장조건을 탐색하기 위하여 기본적으로 F/2 배지에서 온도 24 °C, 염분 33, 조도 $100 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 조건에서 배양하며 1~2일 간격으로 개체수를 조사하여 성장을 비교하였다. 최적 광원을 탐색하기 위하여 광량측정계(quantum meter, MQ-200)로 동일하게 $100 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 설정하여 일반 형광등, 수조전용 형광등 3종(오리지널 : 적색과 청색을 강조하여 광합성에 최적인 빛 공급, 테이라이트 : 밝기를 강조한 자연스러운 색상, 선라이트 : 청색과 적색을 강조), 메탈할라이드 램프 및 LED(청색, 녹색, 적색, 백색)에서 성장을 조사하였다. 성장에 자기장 효과를 파악하기 위하여 페라이트 자석(Ferrite magnet), 네오디움 자석(Neodymium magnet), 고무판 자석을 조합하여 100, 200, 400, 500, 700, 1,000G(Gauss)의 세기로 배양용기(원형 플라스크)의 외벽 중간에 부착하여 성장률을 조사하였다. 셀레늄(Na_2SeO_3) 첨가에 따른 *C. polykrikoides*의 성장촉진은 F/2 배지에 셀레늄 최종농도를 0.5, 1, 5 μM 이 되도록 첨가하여 300mL 원형플라스크에서 성장률을 조사하였다. 코클로디니움의 최적 배지농도를 탐색하기 위하여 F/2배지를 4, 8, 16, 64배 희석하여 F/2, F/8, F/16, F/64, F/128로 성장률을 측정하였다.

전기자극에 의한 코클로디니움 구제 메커니즘 연구에서, 교류전극 자극시 코클로디니움의 영향을 받는 과정을 관찰하기 위해, 25mL 배양용기(Culture flask, SPL)에 전극이 들어갈 수 있을 정도의 구멍을 1cm 간격으로 뚫어 전극을 꽂아 넣은 후, 전압(5V, 12V, 24V), 주파수(60Hz) 조건으로 3초간 실제현미경(Zeiss Stereo Discovery, Germany)으로 코클로디니움 구제과정 관찰 및 영상촬영하였다. 전기자극에 따른 환경변화를 측정을 위해, 여과된 해수 5L에 5cm 간격으로 전극을 유지하여, 전압(1V, 2V, 5V, 10V, 12V) 주파수(60Hz) 조건으로 1, 5, 10분간 각각 전기자극을 준 이후, 수온, 염분, 용존산소, pH를 CTD(Idronaut, Ocean Seven 320, Italy)로 측정하였다. 극간 간격에 따른 전류량 변화를 측정하기 위해, 전압(5V), 주파수(60Hz), 처리시간(3초) 조건에서, 지름 1.6, 2.0, 3.2mm 전극(아르곤용접봉)을 각각 여과해수에 8cm 깊이로 고정하여 10초간 측정하여, 평균값을 활용하였다. 전극별 구제효과의 조사는 7개 전극(구리, 은, 알루미늄, 금도금, 스테인레스, 철, 텅스텐)을 활용하여, 전압(5V), 주파수(60Hz), 처리시간(3초) 조건으로 전기자극을 주었을 때, 코클로디니움 광합성활성의 차이를 측정하여 구제유무를 판단하였고, 광합성 활성측정은 PhytoPAM(Walz, Germany)를 활용하였다. 최적 전기자극 조건을 찾기 위해 2가지 종류의 교류전압(지속자극, 순간자극)으로 구제효율실험을 수행하였고, 지속자극은 주파수 60Hz의 정류파로 형성되어 있으며, 순간자극은 1/120초 수준의 펄스파가 형성되어 전기자극에 활용되었다. 전기자극에 의한 동물플랑크톤 및 어류 영향조사를 위해, 동물플랑크톤은 알테미아를 부화시켜 활용하였고, 어류는 돌돔, 감성돔 치어를 10L 수조에 넣어 전류량 1A 이하 수준으로 전기자극을 주어 어류행동에 미치는 영향을 육안으로 관찰하였다.

전기자극에 의한 적조구제 시스템 개발을 위해, 실내실험에 근거한 최적 적조구제 전기자극 조건으로 현장 예인형 적조구제 장치를 개발하였고, 장치의 안전성 및 안정성 등의 현장실험은 10톤 내외의 동력선을 활용하여 평가하였다.

제 2절 연구개발 수행 결과

1. 적조가 양식생물에 미치는 영향

가. 어종별 폐사에 미치는 적조생물의 농도 및 폐사메커니즘 구명

양식생물의 폐사에 미치는 적조생물의 영향을 조사하기 위하여 적조생물의 생물학적 특성을 조사하였다. 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides*의 전자현미경적 관찰결과 적조세포는 외형적으로 작은 탄두 모양이며, 나선형의 섬모띠(cingulum)가 관찰되었다(그림 11A). 나선형의 섬모띠에 의해서 적조세포의 정단부분에는 열구(sulcus)가 형성되어졌고, 열구는 다른 적조세포의 기저부분과 연결되어 적조세포띠를 형성하게 된다(그림 11B). 적조세포의 기저부의 가운데 부분은 홈이 형성되어 있다(그림 11C).

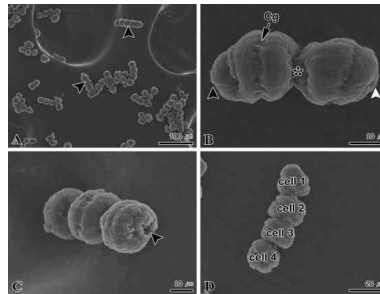


Fig. 11. Scanning microscopic picture of harmful algae, *Cochlodinium polykrikoides*.

A: connection of each red tide algae(2-5). B: connection with top and base part of red tide algae, spiral band(Cg)on the cell body. C: groove on the base of cell body. D: red tide algae composed of 4 cells.

적조생물의 세포질에는 원형의 핵과 다수의 분비과립, 다포체들이 관찰되었으며(그림 12A, B), 세포막 주변에는 크기가 다양한 다수의 구형 액포들이 존재하고(그림 12C), 구형의 색소체는 다양한 미세구조적 특징을 나타내었다. 특히 틸라코이드는 비정형화되었으며, 이중막으로 구성되어있고, 몇몇 색소체들의 중심부는 전자밀도가 높은 물질들이 존재하고 있었으며(그림 12D), 틸라코이드의 사이에는 전자밀도가 낮게 관찰되었다(그림 12E). 분비물질은 화학성분은 매우 다양하지만, 주로 mucopolysaccharides와 glycoprotein 그리고 carbohydrate로 구성되어(Prezant, 1981), Polykrikos속의 적조생물은 세포질에 막을 가지고 있으며, 전자밀도가 높고 매우 균질한 지질단백질 과립이 관찰되었다(Hoppenrath and Leander, 2007).

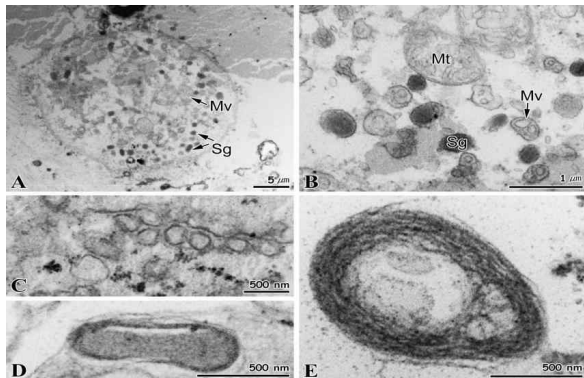


Fig. 12. Transmission scanning microscopic picture of harmful algae, *Cochlodinium polykrikoides*. A: observation of cell organelle in cytoplasm. B: observation of secretory granule(Sg) and many vacuole(Mv). C: endoplasmic reticulum of double membrane D, E: thylakoid of double membrane, Mt: mitochondria.

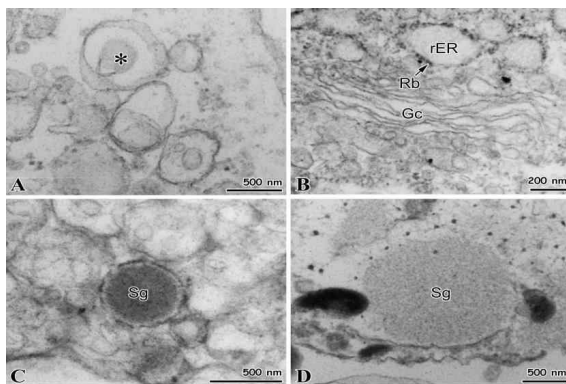


Fig. 13. Transmission scanning microscopic picture of harmful algae, *Cochlodinium polykrikoides*. A: various size of body cell. B: granular endoplasmic reticulum(rER) and ribosome(Rb) around Golgi body(Gc) C: secretory granule(Sg) I type. D: II type.

표 4는 참돔 성어와 전복 성패의 폐사에 영향을 미칠 수 있는 코클로디니움 반수치사농도를 나타낸 것이다. 참돔의 경우 4,466 cell/mL 이상, 전복은 5,612 cell/mL 이상으로 나타났으며 (표 6), 50%이상이 폐사할 수 있는 반수치사농도(LC₅₀)는 참돔 4,999 cell/mL 이상, 전복 7,848 cell/mL 이상으로 나타났다.

Table 4. LC_{50} of *Cochlodinium polykrikoides* in experimental animal (red sea bream and abalone)

품종	반수치사 농도 (LC_{50})	영향농도(LC_{20})
참돔	4999.0~5449.5 (4229.3~5769.9)	4466.3~4868.6(3222.6~5078.5)
전복	7848.5 (6449.3~10924.8)	5612.6(2104.0~6985.5)

그림 14은 적조생물에 노출된 참돔과 전복의 아가미에 흡착한 적조생물을 나타낸 것으로 아가미에 침적된 적조생물의 양은 많지 않았으나 대부분의 개체에서 관찰되었다.

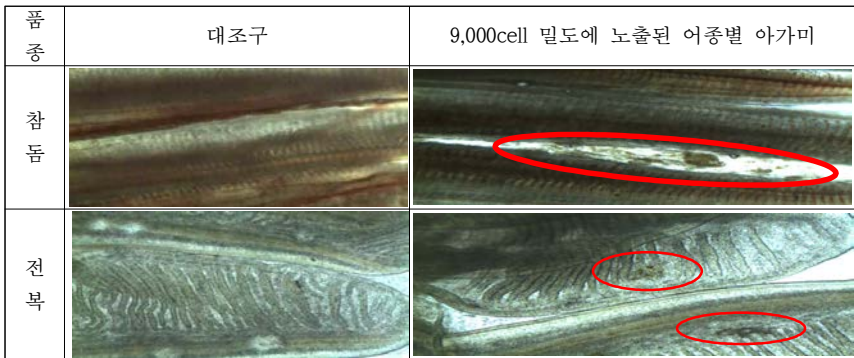


Fig. 14. Harmful algae *Cochlodinium polykrikoides* attached on gill of experimental animal exposed on red tide.

코클로디니움 농도별 참돔치어와 넙치치어의 호흡수변화를 조사한 결과 참돔치어의 경우 코클로디니움 농도 4,500 cell/mL에서 호흡수가 124 ± 7 회/min으로 대조구에 비해 8.7% 증가하였다. 반면 넙치의 경우에는 65 ± 5 회/min에서 64 ± 3 회/min으로 다소 감소하였다(표 5). 이는 적조생물 노출에 의한 외부 자극으로 순간 호흡수가 상승 또는 감소의 반응을 나타낸 것으로 여겨지며 생존에 영향을 미칠 수 있는 농도는 아닌 것으로 사료된다.

Table 5. Change of breathing rate of experimental animal with density of *Cochlodinium polykrikoides*
(단위: cell/mL)

품종	대조구		시험구			
	참돔	넙치	참돔 3,000	4,500	넙치 3,000	4,500
호흡수 (횟수/min)	113 ± 3	65 ± 5	116 ± 6	124 ± 7	66 ± 4	64 ± 3

적조생물 농도 4,500 cells/mL에 노출시킨 참돔치어, 넙치 치어 및 전복 치패의 아가미를 조사한 결과 모든 시험생물에서 적조생물 침적은 관찰되지 않았다(그림 15).

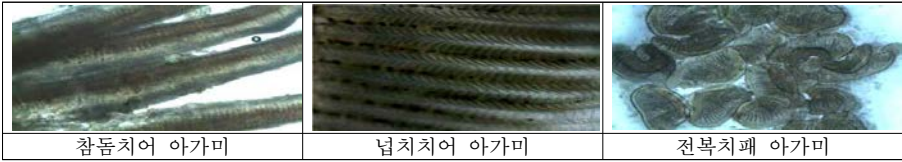


Fig. 15. Gill of experimental animals exposed to harmful algae *Cochlodinium polykrikoides*.

나. 적조생물 농도에 따른 양식생물 생존율 및 양식생물 반응

1) 적조생물 농도에 따른 양식생물 생존율

적조생물의 밀도 및 명암에 따른 참돔과 전복의 성어 및 치어의 생존율을 표 6와 7에 나타내었다. 참돔과 전복은 적조생물 밀도 4,000 cell/mL이하에서는 24시간까지 폐사가 발생하지 않았으며, 참돔 성어의 경우, 코클로디니움 밀도 6,000 cell/mL에서 3시간이 경과하면서 사망하기 시작하여 17시간째 모두 사망하였다. 9,000 cell/mL에서는 1시간 후부터 사망하기 시작하여 8시간째 모두 사망하였으며 명암간의 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다.

Table 6. Survival rate of adult red sea bream with density of *Cochlodinium polykrikoides*

노출시간	성어 (Light)			성어 (Dark)		
	4,000 cell	6,000 cell	9,000 cell	4,000 cell	6,000 cell	9,000 cell
90 min	100	100	75	100	100	75
150 min	100	100	50	100	100	50
210 min	100	75	25	100	75	25
8 hr	100	50	25	100	50	0
15 hr	100	50	0	100	50	0
17 hr	100	0	0	100	0	0
24 hr	100	0	0	100	0	0

Table 7. Survival rate of juvenile red sea bream with density of *Cochlodinium polykrikoides*

노출시간	치어 (Light)			치어 (Dark)		
	4,000 cell	6,000 cell	9,000 cell	4,000 cell	6,000 cell	9,000 cell
90 min	100	100	100	100	100	100
150 min	100	100	100	70	100	60
180 min	100	60	50	70	70	40
210 min	100	60	30	60	70	40
300 min	100	40	0	60	50	0
8 hr	100	20	0	60	20	0
15 hr	100	20	0	60	20	0
17 hr	100	20	0	60	20	0
24 hr	100	20	0	60	20	0

참돔 치어의 경우에는 코클로디니움 밀도 6,000 cell/mL에서 24시간동안 생존율은 20%였으며, 9,000 cell/mL에서는 노출 5시간째 모두 사망하였으며, 명암간의 유의한 차이는 없었으며, 전복의 경우, 코클로디니움 밀도 6,000 cell/mL에서 24시간동안 생존율 20~60%, 9,000cell/mL에서 명조건에서 22시간째 모두 사망하였으나 암조건에서는 생존율 40%를 나타내었다(표 8). 전복 치패의 경우에는 코클로디니움 밀도 6,000 cell/mL 이상에서 생존율 80% 이상을 나타내어 성패보다 내성이 강한 것으로 나타났다(표 9).

Table 8. Survival rate of adult abalone with density of *Cochlodinium polykrikoides*

노출시간	성패 (Light)			성패 (Dark)		
	4,000 cell	6,000 cell	9,000 cell	4,000 cell	6,000 cell	9,000 cell
10 hr	100	100	100	100	100	100
16 hr	100	100	60	100	100	100
19 hr	100	100	60	100	70	60
20 hr	100	50	20	100	70	60
22 hr	100	20	0	100	60	40
24 hr	100	20	0	100	60	40

Table 9. Survival rate of juvenile abalone with density of *Cochlodinium polykrikoides*

노출시간	치패 (Light)			치패 (Dark)		
	4,000 cell	6,000 cell	9,000 cell	4,000 cell	6,000 cell	9,000 cell
10 hr	100	100	100	100	100	100
16 hr	100	100	60	100	100	60
20 hr	100	80	85	90	100	95
22 hr	100	80	85	85	90	90
24 hr	100	80	85	85	90	90

적조생물의 농도에 따른 조피볼락, 쥐치 및 방어어의 생존율을 조사한 결과(그림 16), 쥐치의 경우 적조생물 농도 7,000 cells/mL 이하에서 24시간 동안 폐사는 발생하지 않았으며, 10,000 cells/mL에서 노출 1시간째 사망하기 시작하여 3시간째 모두 폐사하였다. 방어도 쥐치와 유사하게 10,000 cells/mL에서 노출 후 3시간째 모두 폐사하였으며, 7,000 cells/mL 이하에서 모두 생존하였다. 조피볼락은 10,000 cells/mL에서 노출 90분 쯤 10%가 사망하였으나, 이후 24시간 실험기간 동안 폐사는 발생하지 않아 조피볼락이 쥐치와 방어에 비해 다소 강한 종으로 나타났다.

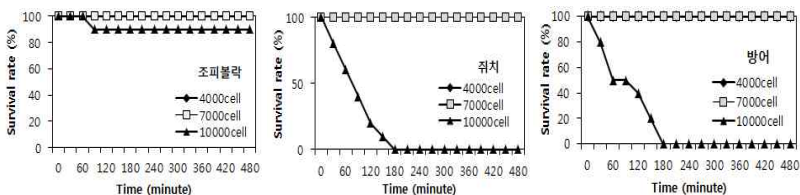


Fig. 16. Survival rate of experimental animal with density of *Cochlodinium polykrikoides*.

코클로디니움에 의한 적조생물은 미발생으로 남해수산연구소와 남동해수산연구소에서 인공배양한 코클로디니움을 이용하여 넙치치어(체장 $6.15 \pm 0.38\text{cm}$), 참돔치어(체장 $6.64 \pm 0.64\text{cm}$) 및 전복치패(각장 $3.26 \pm 0.67\text{cm}$)를 대상으로 인공배양한 코클로디니움의 농도 3,000 cell/mL과 4,500 cell/mL에서 24시간 노출 시험한 결과 생존율은 100%였다(표 10).

Table 10. Survival rate of experimental animals with density of artificially cultured *Cochlodinium polykrikoides*

	코클로디니움 농도 (cell/mL)	
	3,000	4,500
참돔	100	100
넙치	100	100
전복	100	100

적조생물 밀도별 참돔과 전복의 호흡수 및 혈액내 pH변화를 표 11에 나타내었는데, 참돔의 호흡수는 대조구에서 114 회/min였으며, 적조생물 노출에 따라 감소하거나 불규칙한 경향을 나타내었다. 혈액내 pH는 대조구에서 7.25~7.67이었으며, 시험구에서는 4,000 cell/mL에서 7.27~7.51, 6,000 cell/mL에서 7.23~7.71, 9,000 cell/mL에서 7.36~7.69으로 실험생물별 유의한 차이를 나타내지 않았다.

Table 11. pH changes in blood of experimental animals with density of *Cochlodinium polykrikoides*

품 종	대조구		시험구					
	참돔	전복	참돔			전복		
			4,000cell	6,000cell	9,000cell	4,000cell	6,000cell	9,000cell
호흡수	114회/min	-	117	110-115	75	-	-	-
혈액내 pH	7.34~7.50	7.35	7.36- 7.47	7.41- 7.71	7.42- 7.61	7.24- 7.31	7.32- 7.36	7.29- 7.35

적조생물에 노출시킨 참돔과 전복의 반응을 조직학적으로 분석하였다(그림 17). 적조생물이 없는 환경수에 노출된 참돔의 아가미는 정상적인 구조 및 세포학적인 특징이 나타났다(그림 17 좌A, D). 9,000 cell/mL의 농도에 노출된 참돔 치어의 아가미는 호산성 과립세포들이 관찰되었고(그림 17 좌B), 적조생물은 새판과 새판사이에서 관찰되었다(그림 17 좌C). 참돔 성어 아가미의 경우 새판의 융합과 상피세포의 괴사가 관찰되었으며, 새판 사이에 존재하는 상피세포들은 편편형에서 입방형으로 변한 것으로 나타났다(그림 17 좌E).

전복의 아가미는 단층의 원주형 상피세포들이 아가미 새판을 둘러싸고 있는 조직상이 관찰되었으며(그림 17 우A, C), 9,000 cell/mL의 농도에 노출된 치패 아가미의 경우 새판의 상피세포가 모두 괴사되었으며, 원주형에서 입방형으로 변화된 상피세포의 핵은 대부분 응축되었고(그림 17 우B), 성패의 아가미는 핵의 응축이 나타났으며, 호산성 과립세포들이 출현하였다(그림 17 우 D).

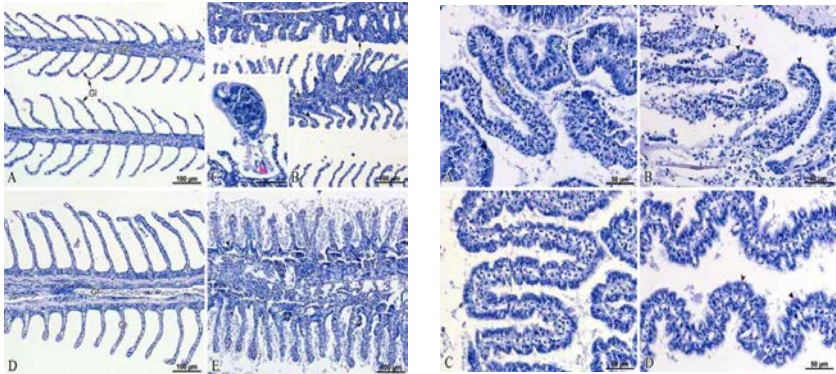


Fig. 17. Observation of gill of experimental animals exposed to *Cochlodinium polykrikoides*. (left) red sea bream, (right) abalone.

상기의 결과를 종합하여 보면 참돔과 전복에서 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides* 농도 4,000 cell/mL에서 사망을 일으키는 영향농도인 것으로 나타났으며, 적조생물밀도별 수중 용존 산소의 변화는 명암조건에 관계없이 감소하는 경향을 보였고, 이는 활성산소를 생성하는 *Chattonella maritima*와 *Karenia mikimotoi* 등과 같은 적조 편모조류에도 유사한 결과를 보여 본 연구의 실험적조생물 *Cochlodinium polykrikoides*도 활성산소를 분비하는 것으로 추정되었다.

또한 적조생물 노출시 참돔과 전복의 대사량 감소, 조직학적 병변 및 혈액학적 성분의 불규칙한 반응 등은 적조생물 노출에 의한 반응으로 노출시간이 지속됨에 따라 적조생물이 발생하는 활성산소에 의해 생물이 사망하는 것으로 사료되며, 코클로디니움에 노출시킨 후 스트레스 지표로 이용되고 있는 혈액내 글루코스, 헤모글로빈 등 혈액성분은 밀도 4,000 cell/mL에서는 대조구와 유사하였으나, 9,000 cell/mL에서는 대조구에 비해 높거나 불규칙한 양상을 보여 적조생물에 의한 영향이 나타난 것으로 판단된다.

2) 적조생물에 노출된 양식생물의 생리학적 반응

가) 혈액학적 반응

적조생물에 노출된 조피볼락, 쥐치, 방어를 대상으로 스트레스 반응 정도를 알아보기 위하여 혈액내 글루코스, 암모니아, 헤모글로빈, 헤마토크릿, GOT, GPT, 총콜레스테롤 및 pH 등을 분석한 결과, 조피볼락의 경우, 글루코스는 10,000 cells/mL에서 대조구에 비해 감소하였으며 암모니아는 유의한 차이를 나타내지 않았음. 헤모글로빈과 헤마토크릿은 대조구에 비해 10,000 cells/mL에서 다소 감소하였으나 유의한 차이를 나타내지 않았으며, GOT, GPT, TCHO 등에서도 유의한 차이를 보이지 않아 적조생물에 의한 영향이 적은 것으로 나타났다 (그림 18). 쥐치 및 방어의 경우, 암모니아와 글루코스가 폐사가 발생했던 10,000 cells/mL에서 대조구에 비해 현저히 증가하였으며, 헤모글로빈과 헤마토크릿은 현저히 감소하였다. 또한 GOT, GPT, TCHO는 대조구에 비해 적조농도별 불규칙한 변화를 보였는데, 이러한 결과는 적조생물에 의한 스트레스로 인해 혈액성분의 불규칙한 반응이 나타나며, 특히 헤모글로빈과 헤마토크릿의 감소는

세포내 산소운반능력이 감소하여 신진대사를 감소시킬 수 있으며 이러한 스트레스 반응이 지속될수록 생존에 영향을 미칠 것으로 여겨진다.

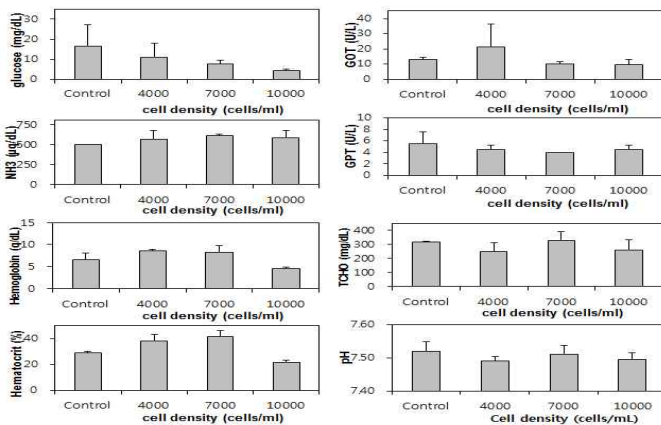


Fig. 18. Change of blood composition of black rock fish exposed to *Cochlodinium polykrikoides*.

또한 적조생물에 노출된 조피볼락, 쥐치 및 방어 of 항산화효소 반응을 조사한 결과(그림 19), 조피볼락은 모든 적조농도에서 유의한 차이를 보이지 않았으나, 방어의 경우 10,000 cells/mL에서 쥐치의 경우, 4,000 cells/mL 이상의 농도에서 증가한 것으로 보아 적조생물 스트레스로 인한 체내 활성산소의 유해한 영향을 현저히 받는 것으로 여겨진다. 이러한 결과, 조피볼락은 방어와 쥐치에 비해 적조생물에 의한 유해한 영향이 적은 것으로 판단된다.

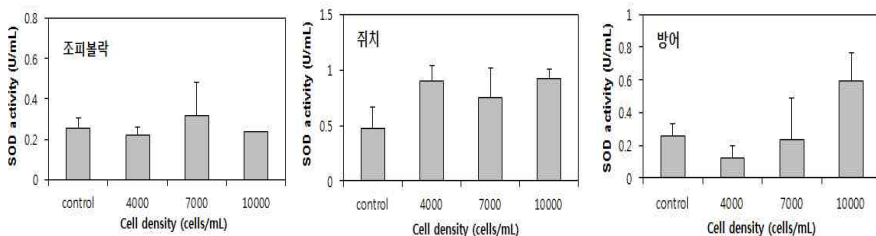


Fig. 19. SOD responses of experimental animals exposed to *Cochlodinium polykrikoides*.

나) 조직학적 반응

혈구의 조직병리학적 관찰결과, 적조생물 4,000 cells/mL 농도에 노출된 조피볼락, 쥐치, 방어의 혈액에서 적혈구는 응축 또는 비대되어진 핵이 관찰되었으며, 호염기구, 단구, 림프구 등의 백혈구의 수가 다소 증가하였다. 7,000 cells/mL 농도에 노출된 양식품종의 혈액 도말표본에서는 대부분의 적혈구들의 핵의 염색성이 감소하였으며, 구형으로 변형된 적혈구도 관찰되었다 (그림 20).

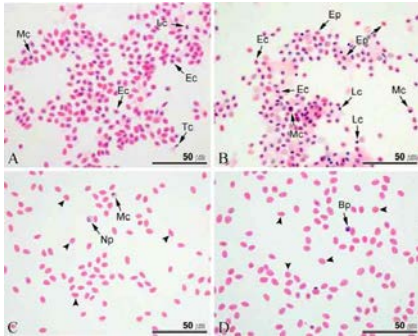


Fig. 20. Histological view of blood of rockfish exposed to different concentration of red tide algae. A: 0 cell/mL, (erythrocyte; Ec), (monocyte; Mc) (thrombocyte; Tc). B: 4,000 cell/mL, (Ec, eosinophil; Ep, monocyte; Mc, lymphocyte; Lc). C: 7,000 cell/mL, D: 10,000 cell/mL, decrease of leukocyte.

아가미의 조직병리학적 관찰결과, 조피볼락과 방어의 경우, 적조생물 7,000 cells/mL 농도에 노출된 아가미의 새관 호흡상피세포들이 비대되거나 과증식되었으며, 새엽의 상피세포들은 과증식되어 상피층의 두께가 증가하였다. 10,000 cells/mL 농도에 노출된 아가미 새관의 호흡상피세포들이 과증식 되었으며, 비대해진 상피세포들은 핵의 비대도 함께 관찰되었다. 새엽의 상피세포들은 비대되면서 핵이 응축되었으며, 점액세포가 감소하였다. 쥐치는 적조생물 4,000 cells/mL 농도부터 노출된 쥐치의 아가미는 새엽 상피세포들이 과증식 되었고, 몇몇 세포들은 비대되어 핵은 세포의 가장자리에 관찰되었다 (그림 21).

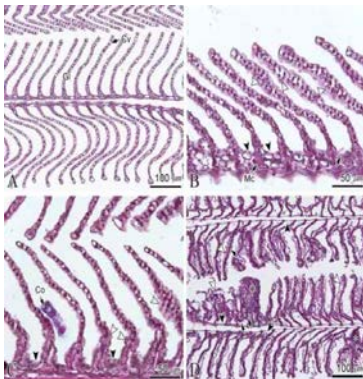


Fig. 21. Histopathological view of gill of filefish exposed to different concentration of red tide algae. A: 0 cell/mL, gill lamella; Gl) B: 4,000 cell/mL, (Mc increase). C: 7,000 cell/mL, D: 10,000 cell/mL, Co; *Cochlodinium polykrikoides* Cv; capillary vessel.

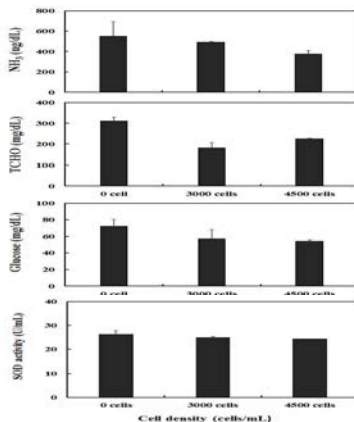


Fig. 22. Changes of blood composition and SOD response of juvenile red sea bream with *Cochlodinium polykrikoides*.

적조밀도별 노출시킨 참돔치어의 스트레스의 정도를 파악하기 위하여 혈액성상 및 SOD활성의 변화를 분석하였다. 적조밀도별 24시간 노출시킨 후 참돔치어의 혈액성상 및 SOD는 뚜렷한 변화는 관찰되지 않았다(그림 22).

결론적으로 인공배양한 적조를 대상으로 참돔, 넙치치어 및 전복치패의 폐사 미치는 영향은 적조밀도 3,000 cell/mL과 4,500 cell/mL에서는 없는 것으로 나타났다.

다. 적조생물 농도별 용존산소 감소량

수온 $24 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 용존산소량은 적조생물이 없는 일반해수인 대조구에서 $4.9 \sim 4.2 \text{ mg/L}$ 으로 변화하였으며, 적조생물 밀도별 용존산소량은 9,000 cell/mL에서 명조건에서 $4.9 \sim 3.9 \text{ mg/L}$ (20.4%감소), 암조건에서는 $4.9 \sim 3.1 \text{ mg/L}$ (36.7% 감소)으로 암조건에서 용존산소량이 큰 폭으로 감소하였다. 6,000 cell/mL에서 명조건에서 $5.2 \sim 4.9 \text{ mg/L}$ (5.7% 감소), 암조건에서는 $5.1 \sim 4.5 \text{ mg/L}$ (11.7% 감소)으로 암조건에서 용존산소량 감소가 나타났으며, 용존산소량은 명암에 관계 없이 적조생물의 밀도에 따라 감소하였으며, 암조건에서 감소량은 크게 나타났다(그림 23).

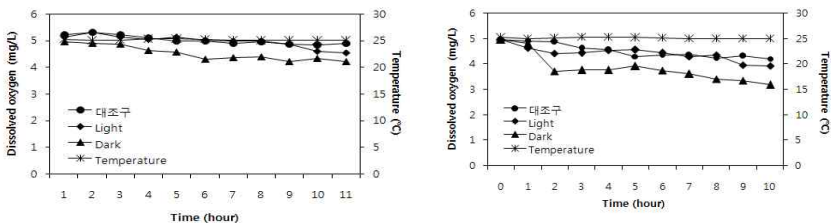


Fig. 23. Changes of dissolved oxygen level in sea water with density of *Cochlodinium polykrikoides* (left: 6,000 cell/mL, right: 9,000 cell/mL).

그림 24은 적조생물 밀도 4000, 7000, 10000 \pm 200 cell/mL에서 12시간 동안 용존산소측정기를

이용하여 매 시간 간격으로 적조생물 농도별 수중 내 용존산소량 변화를 관찰한 결과이다. 모든 적조생물 밀도에서 초기 용존산소량은 6.25 mg/L였으며, 12시간 후 7,000 cells/mL이하에서는 19.8~20.9%감소하였으며, 10,000 cells/mL에서는 35.7% 감소하여 적조생물 고밀도 시험구에서 용존산소 감소량이 크게 나타났다. 이는 그림 8과 7을 종합하여보면 적조생물 고밀도와 암조건에서 수중내 용존산소가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 적조가 발생하는 시기 야간에 양식생물의 관리에 주의해야 할것으로 여겨진다.

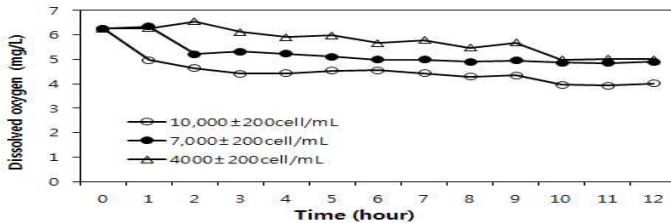


Fig. 24. Changes of dissolved oxygen level in sea water with density of *Cochlodinium polykrikoides*.

라. 적조에 따른 양식생물 행동 특성 및 가두리 양식장 피해 대응 연구

1) 적조에 따른 어종별, 크기별 행동반응, 혈액학적 변화

통영 지역 하절기 적조 발생 지역 유속에 따른 참돔 치어의 성장률 결과를 분석하였다. 실험 기간 동안 참돔 치어의 증체량은 31.0~31.9 g/fish을 보였고, 일간성장률, 사료섭취율 그리고 사료효율은 각각 1.9~2.0%/day, 1.1~1.2%/day 그리고 142.7~159.1% 범위로 나타나 유속에 따른 차이는 없었다($P>0.05$). 생존율의 경우 저유속구가 평균 89.0%로 고유속구의 평균 55.0%보다 높게 나타났지만 통계적 유의성은 없었다($P>0.05$).

통영 지역 하절기 적조 발생 지역 유속에 따른 참돔 미성어의 혈액 성상 변화를 나타내었는데, 혈액 내 Hb의 경우 초기 농도에 비해 적조 발생 후 샘플이 이루어진 9월 2일과 9월 17일의 농도가 유의하게 증가하는 것으로 나타났지만($P<0.05$), 저농도(즉, 9월 2일)와 고농도(즉, 9월 17일) 적조 발생 후에는 차이가 없었다($P>0.05$). 혈액 내 GLU의 경우 고농도 적조 발생 후 저유속구가 저농도 적조 발생 후(즉, 9월 2일)보다 높게 나타났다($P<0.05$).

2) 적조대비 통영지역 가두리양식장 적지조사

통영지역 양식장 적조대비 대피장지정을 위한 후보지 3곳을 탐색하였다. 통영시 산양읍 신전리와 한산면 두억리 대혈도를 연결하는 북부해역으로 수심 15~17 m의 평탄한 해저지형으로 적조영향이 다소 적은해역으로서 항로와 주변에 굴, 멍게 양식장이 산재되어 있으며, 태풍의 영향을 직접적으로 받는 해역으로서 최종 적지선정시에 신중한 검토가 필요할 것으로 보인다. 두 번째로 통영시 산양읍 연화리 소장두도와 주변해역으로서 수심이 25~35 m로서 동서가 개방되어 있어 조류소통이 양호지역으로서 적조피해는 적은 곳이지만 연안 가두리양식장과 원거리에 위치하고 있는 단점이 있는 것으로 나타났다(그림 25).



Fig. 25. Investigation of optimal locations of floating aquaculture farms for evacuation.

2. 육상양식장 맞춤형 적조대응 연구

가. 적조대응상황별 사육수조 수질변동 조사 및 양식생물 영향

경북 포항 일대의 6곳의 육상양식장 현장조사를 실시하였으며, 6곳의 양식장내 수처리 시설은 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」에서 규정하고 있는 침전 시설만이 운영되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 사육조 내 오염물질 배출을 위해 물 사용량이 높아 고형물질의 침전 분리를 위한 적정체류시간을 유지하지 않고 침전지가 운영되어 침전지의 역할이 유명무실한 상황이며, 또한 침전지 관리를 위한 추가 인력투입 및 침전슬러지의 2차 처리에 대한 대안 부재로 현장에서의 침전지 유지관리 방안은 전무한 상황인 것으로 나타났다.

방문한 양식장 6곳에서 2013년 적조발생시 대응은 단수조치, 액산주입, 간헐적 황토살포 등으로 육상양식장내 적조대응을 한 것으로 조사되었으나, 적조생물에 의한 양식어류의 피해가 발생되었고, 양식장 현장에서 적조 구제물질로 국내 수산용 소독제인 과산화수소(H_2O_2 , Hydrogen peroxide)를 사용하고 있는 것으로 나타났다. 과산화수소가 강산화제이기 때문에 적조 구제에 효과가 있는 것으로 판단되나, 소독제를 적조구제물질로의 사용이 금지되어 있으며, 해수 배출수의 과산화수소 농도가 0.7 ppm 이하로 희석 배출해야 함에도 양식장 전반적으로 적조구제물질로 과산화수소를 사용하고 있는 실정인 것으로 나타났다. 따라서 양식장내 적조생물 제거를 위한 과산화수소 사용에 따른 영향평가가 필요할 것으로 판단된다.

1) 육상양식장 적조피해특성

적조 발생시기의 질식, 액화산소 공급 등 사육관리는 양호하게 이루어지고 있으나, 적조 대량 발생 장기화에 따른 사육수 환수로 피해가 발생하므로 사육수 환수를 위한 예비 수조의 확보나 저밀도 사육 등 사전 대응이 필요할 것으로 여겨진다.

2) 육상양식장 적조피해 현황조사 및 특성 분석(2015)

경남 및 울산지역 육상양식장 적조 피해 현황을 조사한 결과, 경남 거제에서 강도다리 5,202마리, 넙치 23,909마리의 폐사가 나타났으며, 취수 중단 관리 후 아침환수 중 적조생물 유입으로 폐사한 것으로 추정되었다(표 12). 대부분의 적조 피해는 가두리양식장에서의 피해로 육상양식장의 피해는 미미하게 나타났다.

Table 12. Damage situation of red tide in Kyungsangnam Do and Ulsan area

지 역	품 종	피 해 량	비 고
경남 거제	강도다리	5,202마리	취수 중단 관리 후 아침 환수하는 중 적조생물 유입으로 폐사
	넙치	23,909마리	
울산 울주	넙치	1,081마리	-

나. 물리·화학적 수처리 기법에 따른 적조생물 사멸특성 분석

1) 해수 내 과산화수소 거동 및 적조사멸효과

과산화수소 주입에 따른 적조생물 사멸 특성을 평가하기 위하여 초기 적조생물 농도 333 cell/mL에서 과산화수소 농도는 0.1, 1.0 ppm에서 초기 10분 이내 과산화수소와 적조생물의 산화반응이 진행되는 것으로 나타났다(그림 26). 과산화수소 10 ppm에서도 초기 10분 이내 대부분의 산화반응이 진행되는 것으로 판단되며, 잔류 과산화수소 농도는 너무 낮아 검출한계 이하인 것으로 판단된다. 과산화수소 0.1, 1.0 ppm은 산화제의 농도가 낮아 적조제거율이 50% 이내로 관찰되었는데, 따라서 저농도 적조생물 농도에서의 실험결과로 판단할 때 과산화수소가 적조생물과 반응하여 산화반응에 의한 구제효과가 있는 것으로 판단되나, 고농도 적조생물 조건과 잔류 과산화수소에 대한 평가가 이루어져야 한다고 판단되었다.

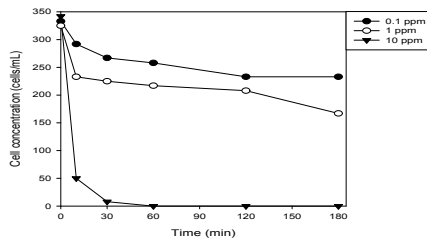


그림 26. Effect of H₂O₂ on cochlodinium. [Cell]₀ = 333 cell/mL; [H₂O₂]₀ = 0.1, 1, 10 mg/L; pH_i = 7.9; Reaction time = 180 min; pH_f = 7.63, 7.63, 7.58.

과산화수소에 의한 적조생물 사멸과 잔류 과산화수소의 거동을 관찰하기 위해 연속식 실험(Continuous)은 과산화수소 10 ppm은 주입하여 적조생물의 사멸특성을 관찰하였고, 회분식(Sequential injection)은 초기 2 ppm의 과산화수소를 주입한 후 1일 2ppm 씩 추가 주입 후 잔류 과산화수소를 관찰하였다(그림 27). 연속식 실험에서 과산화수소 10 ppm일 때 95%의 적조생물 사멸률을 나타내었으나, 증류수에 과산화수소를 주입한 경우 증류수내 유기물이 없어 산화반응이 발생되지 않고 지속적으로 잔류되는 특성을 나타내었다. 또한 실험기간 3일째 적조생물 100 cell/mL을 주입한 결과 주입된 적조생물 대비 과산화수소의 산화반응에 의해 약 2.3 mg/L가 감소되는 것으로 나타내었다. 회분식 실험의 경우 초기 2 mg/L의 과산화수소에 1일 마다 2 mg/L의 과산화수소를 추가 주입한 결과 과산화수소는 제거되거나 탈기되지 않고 지속적으로 누적되어 수중에 존재하는 것으로 나타났다.

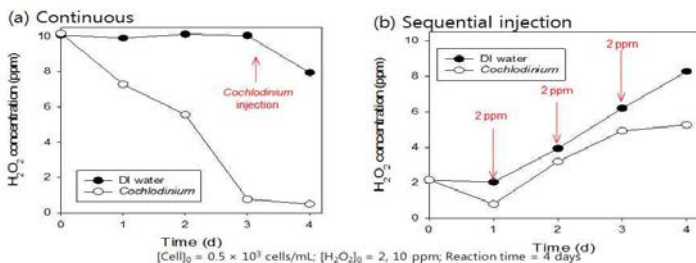


Fig. 27. Removal of *C. polykrikoides* and concentration of residual hydrogen peroxide.

그러나 육상양식장 환경에서는 어류의 산소공급을 위한 사육조 내 산기석을 통한 aeration을 하기 때문에 aeration에 의한 잔류 과산화수소의 거동을 관찰하였다. Aeration 조건에서 과산화수소의 농도는 1, 10, 50, 100 ppm으로 조절하여 24시간 동안 관찰한 결과, 과산화수소의 저농도에서 고농도까지 분해되거나 탈기되지 않고 반응조 내 잔류되는 것으로 나타났으며 (그림 28), 또한 오히려 시간에 따라 과산화수소가 증가되는 것으로 나타났는데, 이는 증발에 의한 영향으로 판단된다.

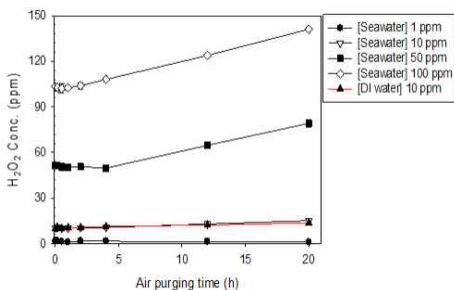


Fig. 28. Concentration change of hydrogen peroxide in seawater and deionized water.

2) 해수내 과산화수소 주입에 따른 부산물 생성 거동

양식장 현장조사에서 조사된 적조대응 과산화수소 사용에 따른 영향평가를 위해 해수내 과산화수소 사용에 따른 거동을 분석하였다. 해수내 존재하는 브롬과 과산화수소의 반응에 의한 브롬산화물 생성거동을 파악하기 위해 증류수에 $Br-50$ mg/L를 주입하고 해수와 증류수에서 과산화수소 및 bromate 생성을 분석하였는데, 해수 및 증류수 모두 각각의 과산화수소 농도에서 수중의 유기물과 일부 반응 후 24시간 이후에도 잔류되는 것으로 나타났다. 특히 Bromate는 H_2O_2 10 ppm에서 24시간 후 약 3 ppb 정도 생성되는 것으로 나타나 양식장내 적조 대응 물질로 과산화수소의 사용은 신중히 검토해야 할 것으로 판단된다. 본 실험에서 반응 부산물의 Bromate의 분석은 과산화수소 10 ppm일 경우만 분석하였으나, 과산화수소 농도가 증가될수록 Bromate의 생성량도 증가될 것으로 판단된다.

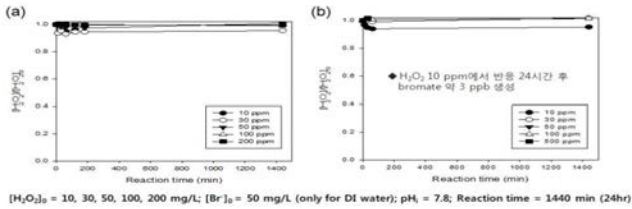


Fig. 29. Production of bromate in the presence of bromide ion.

3) 육상양식장 적조대응 시나리오에 따른 사육조 수질 모니터링

적조 발생시 육상양식장 관리요령(국립수산과학원, 2014)에 의하면, 적조 3단계에서 취수를 정지하고 먹이공급을 중지하며 산소공급장치(폭기, 액체산소 등)를 전면 가동하여 관리하도록 권고하고 있다. 따라서 본 실험에서는 적조발생시 육상양식장 단수조치에 따른 먹이 1/2 공급+공기, 공기, 공기+액체산소 주입에 따른 수질모니터링 및 양식생물 사멸특성을 관찰하였다. 사육 대상생물은 넙치이며, 각 수조(1 ton)에 50마리(12-15 cm)를 사육하였으며, 평균적으로 2.3 kg/ton의 사육밀도를 가지며 단수 조치 전 1주일간 정상적으로 사료를 공급하여 운영하였다. 또한 사료 1/2 절식 사육수조는 1일 60g의 사료를 공급하였다. 유수식 사육수조의 1일 물 사용량은 1일 약 34회전으로 3개의 수조 평균 물사용량은 약 34 ton/day 이었다. 3개의 사육수조의 단수조치 후 수온은 약 23°C 내외이었고, 염도는 33.5 ‰이었다. pH의 경우 사료 투입 수조에서 초기 pH가 7.8에서 4일 후 pH는 7.03으로 감소되는 것으로 나타났는데, 이는 운전기간 동안 투입되는 미설펀 사료 및 사멸된 어류의 부산물의 가수분해 및 일부 산발효가 진행되어 pH가 감소되었을 것으로 예상되었다. 그러나 사료를 주입하지 않은 사육조의 경우 평균적으로 pH 7.7 수준으로 유지되었다.

용존산소는 실험초기 5.7 mg/L이었고 액산투입 사육조의 경우 운전 종료시까지 20 mg/L 이상의 용존산소 농도를 유지하였다. 사료 투입 사육조의 경우 실험기간이 증가됨에 따라 용존산소의 농도는 감소하였고, 1일째 3.2 mg/L로 급격하게 감소하였는데, 이는 양식생물의 사료 섭취에 따른 대사활동에 의한 산소소모와 사육수조 내 급격한 미생물의 번식으로 용존산소의 농도가 급격하게 감소되었을 것으로 판단되었다.

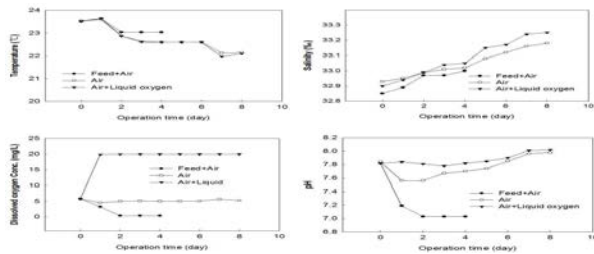


Fig. 30. Change of temperature, salinity, and dissolved oxygen in a holding condition of fish farm.

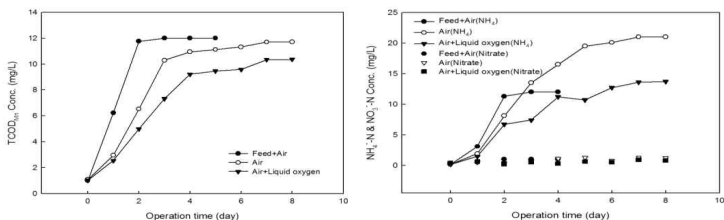


Fig. 31. Change of COD (chemical oxygen demand) and nitrogen in a holding condition of fish farm

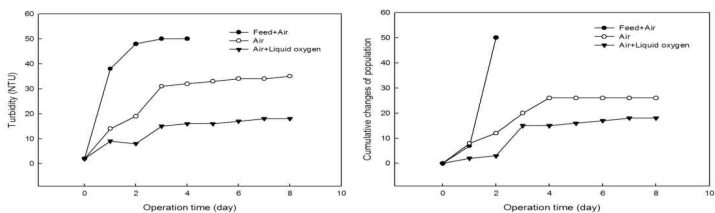


Fig. 32. Change of turbidity and total number of accumulated dead cells in a holding condition of fish farm.

적조 대 발생시 육상 양식장 단수상황에서 사료1/2+공기 주입 사육조의 경우 실험 2일째 양식생물이 100% 폐사되었다. 이때 수질변화를 살펴보면 TCOD 농도는 12 mg/L 까지 증가하였으며, 용존 SCOD는 10 mg/L이었음. 또한 탁도의 경우 50NTU 까지 증가되었는데 미ச்ச취 사료와 양식생물 배설물에 의해 현탁물질이 증가되었다.

1/2 사료주입+공기 사육조의 수질변동에서 유기물, 암모니아성 질소, 부유물질, 탁도가 실험 개시 2일 이내 급격하게 증가되었고, 용존산소의 경우 미생물 번식으로 인한 결핍이 발생되는 것이 관찰되었으며, 이 후 사육생물의 100% 사멸되는 결과를 초래하였다. 그러나 공기 주입 사육조의 경우 사료를 투입하지 않았기 때문에 유기물 및 탁도의 증가는 작았으나, 암모니아성 질소의 농도는 지속적으로 증가되는 것으로 관찰되었다. 그러나 암모니아성 질소의 농도가 20 mg/L까지 증가하여도 양식생물의 사멸율은 약 55% 수준으로 유지되는 것으로 나타났다.

공기+액체산소 주입 수육조의 경우 용존산소의 농도가 20 mg/L 이상으로 충분하였고, 액체산소에 의한 암모니아성 질소의 산화와 일부 유기물질이 산화되어 암모니아성 질소는 최종적으로 12 mg/L 정도였고, 유기물질의 경우 9 mg/L 정도를 유지하였다. 또한 사육조 탁도도 약 15 NTU 정도로 다른 사육조에 비해 낮게 관찰되었다.

결과적으로 적조에 의한 단수 조치시 공기와 액산의 동시 사용이 사육생물에 미치는 수질인자에 효과적이었다. 그러나 실험기간 8일 동안 질소 및 유기물이 사육조내에 축적되어 양식생물의 생존율이 약 65% 정도이었기 때문에 사육조의 물을 교환하지 않고는 양식생물의 생존을 담보할 수 없다. 따라서 적조발생시 양식생물의 안정성을 확보하기 위해서는 육상양식장 유입 수내 적조생물의 제거 기술 도입이 좀 더 효과적일 수 있다.

4) 적조생물 구제물질(황토, 분말황토, 활성탄)별 제거효과 분석

적조생물 500, 5,000 cell/mL(In vivo 3.41) 농도에서 구제물질(분말황토, 황토, 분말활성탄)에 따른 적조생물 사멸실험을 실시하였다. 분말황토는 63 μm 이하의 입자크기를 조절한 것으로서 황토의 수중 내 체류시간을 증가시켜 적조생물과의 접촉시간을 증대하여 제거효과를 극대화시키기 위해 도입되었다. 본 실험에서 구제물질 농도를 50, 100, 150, 200, 300, 400 mg/L 농도에서 급속교반 1 min, 완속교반 9 min, 침전 30 min 동안 반응 후 적조제거 효과를 분석하였다.

탁도(turbidity) 분석결과 분말황토 및 분말활성탄의 경우 미세입자가 수중에서 현탁되면서 오히려 탁도가 증가되는 것으로 나타났다. 이는 미세 콜로이드성 물질들이 표면전하가 (-)로 대전되면서 침전되지 않고 부유하는 것으로 판단되었다.

구제물질별 In-vivo 분석결과 적조생물 제거에 효과가 있는 것으로 나타났으나, 분말황토보다는 황토의 효과가 높은 것으로 판단된다. 이는 급속 및 완속교반에 의한 구제물질과 적조생물의 접촉시간이 동일하다고 가정할 때 침전효율에서 다양한 입자비율을 가지고 있는 황토의 침전성이 높은 것으로 판단된다. 분말활성탄이 경우 In-vivo 결과를 비교할 때 적조구제 효율이 가장 높게 나타났는데, 적조 발생시 위기상황에서 분말활성탄의 사용이 필요할 것으로 예상되지만, 분말활성탄의 입자가 너무 낮고, 적조생물과 같은 입자성 물질보다는 용존성 물질의 제거에 효과적인 것으로 판단된다.

고농도 적조생물에서의 jar-test 결과에서도 분말황토나 분말활성탄보다 황토의 제거효율이 높게 나타났다. 일반적으로 응집제(구제물질 등)의 응집메커니즘은 Double layer compression, Surface charge neutralization, Adsorption and interparticle bridging, Enmeshment on a precipitate의 단계를 거치는데, 적조생물과 구제물질의 화학적 응집 잠재량을 파악하기 위해서는 적조생물과 각 구제물질의 표면전하의 측정이 필요하다. 그럼에도 불구하고 jar-test 결과에서 황토의 응집·침전 효율이 가장 높게 나타난 것은 화학적 응집반응보다 물리적 응집반응에 의한 adsorption by electrical attraction force와 Interparticle bridging 효과로 볼 수 있다.

또한, 분말황토 및 분말활성탄의 경우 입자의 크기가 작아 급속교반 단계에서 적조생물과 접촉면적은 클 수 있으나 적조와 분말황토 및 분말활성탄이 (-) 전하이기 때문에 응결(Flocculation)이 이루어지지 않아 침전 가능한 floc으로 성장하지 못하기 때문에 침전분리 되지 않는 것으로 판단되었다.

상기의 실험 결과로 볼 때 육상양식장내에서 황토 사용으로 큰 효과를 기대하기에는 어려움이 있다. 그러나 일부 효과를 증대하기 위해서는 사육조 표면에 단순 살포보다는 황토입자와 적조생물의 적절한 혼합강도를 가지는 지점에 살포하는 것이 황토의 효과를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 황토와 분말황토의 pH에 따른 전하중화의 등전점(Zero charge point)은 분말황토의 경우 5.35, 황토는 4.48로 나타나 낮은 pH 조건에서 응집에 효과적일 것으로 예상된다.

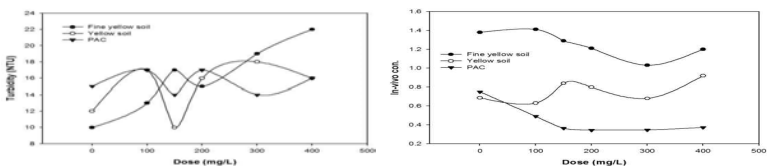


Fig. 33. Results of jar-test by disinfectants at 0.5×10^3 cells/mL.

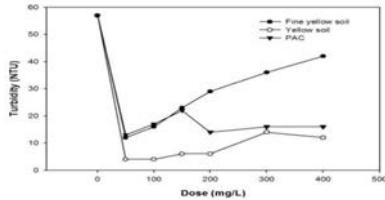


Fig. 34. Results of jar-test by disinfectants at 5.0×10^3 cells/mL.

Table 13. Zeta potential of *C. polykrikoides* and disinfectants

	<i>Cochlodinium</i>	Fine yellow soil	Yellow soil	PAC
Zeta potential(mV)	-11.3067	-0.615	-22.9	-0.564

다. 오존 및 고도산화기술을 활용한 적조생물 제어 특성 연구

1) 적조생물 오존 반응실험

본 연구에서 오존의 주입농도에 따른 코클로디니움의 사멸을 확인하였다. Viable cell은 오존 주입 접촉 후에도 활성성을 보이는 유영형을 의미하며, Total cell은 유영형과 정지형을 합한 결과를 나타낸 것이다. 따라서 초기 적조 개체수보다 감소된 Total cell의 개체수는 파열형으로 정의할 수 있는 데 이러한 개체들은 주로 세포팽창과 이에 따른 세포벽의 파괴 및 용해가 관찰된 개체였다.

코클로디니움 개체수에 따른 오존 주입농도를 0.5 ppm에서 5 ppm으로 변화시켜 실험한 결과이다. 코클로디니움의 유영형은 오존을 주입한 후 20초 내에 현저히 감소되어 대부분 정지형으로 변화되었고, 오존의 주입농도가 증가할수록 코클로디니움은 빠르게 파열됨을 확인할 수 있었다. 오존 주입농도 5 ppm에서는 모두 파열형 코클로디니움으로 전환되어 적조생물의 완전한 제어가 일어나는 것으로 판단된다.

코클로디니움과 오존이 반응하면서 사멸되는 일차반응에 의한 걸보기 속도상수(k)를 계산한 결과내었다. 코클로디니움의 개체수가 0.5×10^3 cells/mL 일 때는 오존에 의한 적조생물의 사멸이 빠르게 나타났지만, 개체수가 1.0×10^3 cells/mL 이상에서는 비슷한 속도로 사멸되었다. 이 결과는 일정 개체수(1.0×10^3 cells/mL) 이상의 코클로디니움의 번식 시 오존처리를 통한 코클로디니움의 사멸효과는 유사하며, 다만 적조생물의 완전한 파괴가 일어나는 비율이 개체수가 증가함에 따라 감소함을 보였다(그림 35).

2) RSM을 이용한 사멸효율 최적조건 도출

RSM(Response Surface Method)은 오존과 여러 인자들의 연관관계에 관한 데이터를 바탕으로 적조생물의 사멸 효율 최적조건을 도출할 수 있다. 본 연구에서는 pH, 온도와 오존의 주입농도를 변화시켜 오존산화에서 코클로디니움의 제거효율에 관한 데이터베이스를 구축하였다.

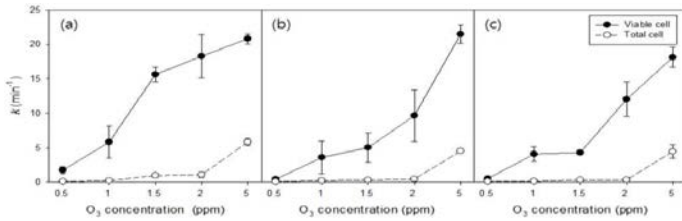
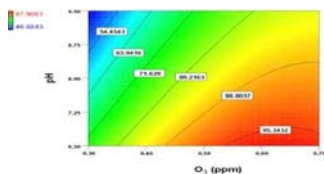


Fig. 35. Observed rate constants for inactivation of *C. polykrikoides* by ozonation.

((a) $[Cell]_0 = 0.5 \times 10^3$ cells/mL; (b) $[Cell]_0 = 1.0 \times 10^3$ cells/mL; (c) $[Cell]_0 = 2.0 \times 10^3$ cells/mL)
 $[Cell]_0 = 0.5 \times 10^3, 1.0 \times 10^3, 2.0 \times 10^3$ cells/mL; $[O_3]_0 = 0.5, 1, 1.5, 2, 5$ ppm; Reaction time = 600 sec)

그림 36는 적조 개체수가 1.0×10^3 cells/mL일 때 초기 pH와 오존 주입농도, 온도와 오존 주입농도 변화에 따른 코클로디니움 사멸효율을 viable cell과 total cell에 관하여 확인하였다. pH는 낮을수록 오존의 주입농도는 증가할수록 제거효율이 높게 나타났으며, 낮은 pH에서는 오존의 분해가 상대적으로 느린 반면에 pH가 증가됨에 따라 오존분해의 개시자로 작용하는 수산화이온(OH⁻)의 농도가 높아져 오존 분해를 촉진시키며 수산화라디칼의 발생이 증가되었다. 코클로디니움의 사멸효율이 낮은 pH에서 더 높게 나타난 것으로 보아, 코클로디니움의 사멸은 대부분 오존과의 직접반응에 의한 것으로 판단된다. 온도는 19, 24, 29℃로 변화시켜 오존의 농도에 따른 코클로디니움의 사멸효율 연구결과, 온도 19℃, 오존 주입농도 0.7 ppm일 때 유전형 코클로디니움의 제거효율은 90%로 가장 높았다. 이러한 결과는 온도가 증가할수록 오존의 분해가 빠르게 일어나 용존되는 오존의 양은 줄어들기 때문으로 판단된다. 따라서 코클로디니움은 낮은 pH, 낮은 온도에서 오존의 주입농도가 증가할수록 오존과의 직접반응이 증가하여 사멸효율이 향상되었다.

(a) Viable cell



(b) Total cell

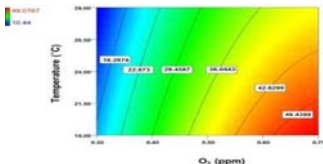
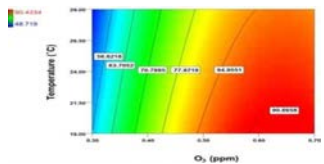
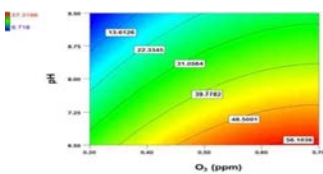


Fig. 36. Effects of pH, temperature and ozone dose on *C. polykrikoides* removal efficiency.
 ([Cell]₀ = 1.0×10^3 cells/mL; [O₃]₀ = 0.3, 0.5, 0.7 ppm; pH_i = 6.5, 8.0, 9.5; Temp.
 = 19, 24, 29°C; Reaction time = 600 sec)

라. 물리화학적 수처리 기법의 효과 분석 및 평가

1) 적조생물 사멸 실험

화학적 수처리 기법에 의한 적조생물 사멸실험에서 오존에 의한 적조생물의 사멸이 매우 빠르게 나타났고, 다음으로 과망간산염, 염소, 과산화수소 순으로 빠르게 일어났다. 적조생물의 완전한 파괴가 일어나는 비율은 코클로디니움의 밀도가 증가함에 따라 감소함을 보여주었다. 특히, 오존의 반응속도는 두 번째로 빠른 사멸속도를 보인 과망간산염보다 7배나 빠르게 나타났다. 이러한 결과는 오존이 적조생물의 즉각적인 제어를 위한 탁월한 처리방법이 될 수 있음을 보여주었다 (그림 37).

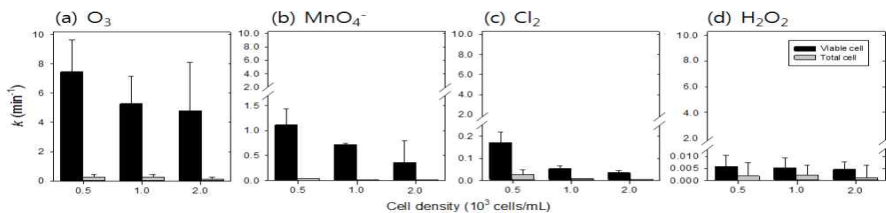


Fig. 37. Observed rate constants for inactivation of *C. polykrikoides* by various cell density.

((a) O₃, (b) MnO₄⁻, (c) Cl₂, (d) H₂O₂)

[Cell]₀=0.5×10³, 1.0×10³, 2.0×10³ cells/mL; [Oxidants]₀=1.0 ppm; pH_i=7.9;

Reaction time=10 min (a), 180 min (b, c, d)

2) 산화제 주입농도

산화제 주입농도에 따른 코클로디니움의 사멸효율과 사멸 속도상수는 산화제의 농도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 오존의 주입농도 1.0 ppm 이상에서는 10분 만에 약 99% 이상 사멸되었고, 과망간산염과 염소의 주입농도 1.0 ppm 이상 180분 이후에는 약 99% 이상

사멸되었다. 또한 과산화수소의 경우는 10.0 ppm에서 반응 180분 이후에 대부분의 적조생물 제거가 일어났다(그림 38).

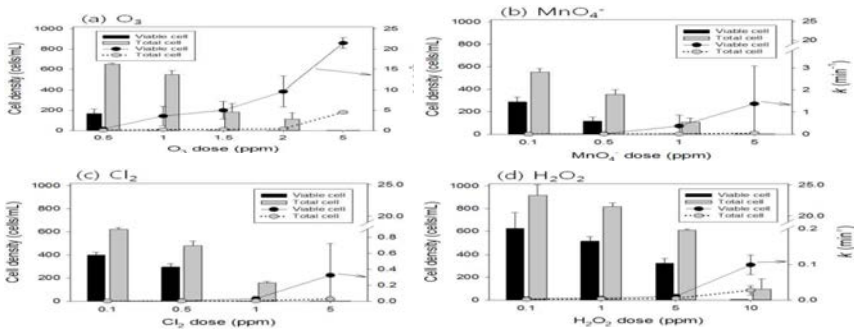


Fig. 38. Removal and observed rate constant for inactivation of *C. polykrikoides* by various oxidants.

((a) O_3 , (b) MnO_4^- , (c) Cl_2 , (d) H_2O_2)

$[Cell]_0 = 1.0 \times 10^3$ cells/mL; $[O_3]_0 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0$ ppm; $[MnO_4^-]_0 = [Cl_2]_0 = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ppm; $[H_2O_2]_0 = 0.1, 1.0, 5.0, 10.0$ ppm; $pH = 7.9$; Reaction time = 10 min (a), 180 min (b, c, d)

마. 물리화학적 수처리 기법의 적조생물 제거효율 검토

1) 적용산화제의 전환에 따른 총잔류산화제 생성

오존은 반응 10분 내에 모두 분해되어 잔류오존의 농도는 나타나지 않았다. 5.0 ppm 이하의 과망간산염은 반응 60분 내에 모두 분해되었고, 10.0 ppm 농도의 경우에만 180분 이후에도 약 20% 정도 잔류하였다. 과산화수소는 주입농도 5.0 ppm 이상인 경우에 반응 180분 이후 10~23%의 잔류된 과산화수소를 확인하였다(그림 39).

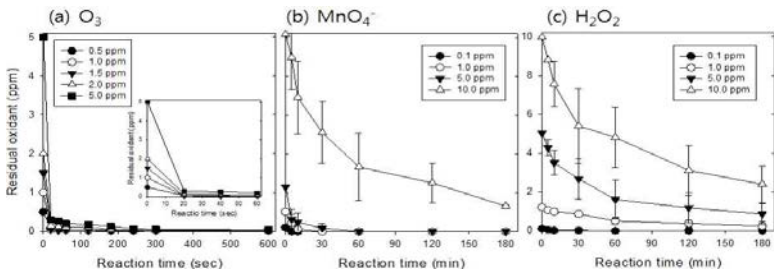


Fig. 39. Depletion of residual oxidant as a function of oxidant dose; initial cell density 1.0×10^3 cells/mL

((a) O_3 , (b) MnO_4^- , (c) H_2O_2)

$[Cell]_0 = 1.0 \times 10^3$ cells/mL; $[O_3]_0 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0$ ppm; $[MnO_4^-]_0 = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ppm;

$[H_2O_2]_0 = 0.1, 1.0, 5.0, 10.0$ ppm; $pH = 7.9$; Reaction time = 10 min (a), 180 min (b, c).

이러한 산화제들은 분해되면서 해수 중의 브롬이온과 반응하여 브로민(HOBr/OBr^-)을 생성하는데, 오존과 염소의 산화반응에 의한 HOBr 의 생성농도는 반응 5분 만에 각각 약 $10 \mu\text{M}$, $3 \mu\text{M}$ 생성되었고, 반응시간이 지남에 따라 감소하였으며, 과망간산염과 과산화수소에 의한 HOBr 은 거의 생성되지 않았다(그림 40).

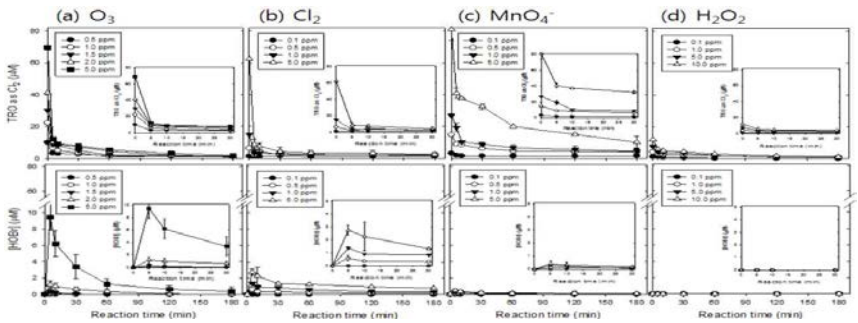


Fig. 40. Depletion of TRO and production of HOBr as a function of oxidant dose; initial cell density 1.0×10^3 cells/mL.

((a) O_3 , (b) Cl_2 , (c) MnO_4^- , (d) H_2O_2)

$[\text{Cell}]_0 = 1.0 \times 10^3$ cells/mL; $[\text{O}_3]_0 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0$ ppm; $[\text{Cl}_2]_0 = [\text{MnO}_4^-]_0 = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ppm;

$[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0.1, 1.0, 5.0, 10.0$ ppm; $\text{pH}_i = 7.9$; Reaction time = 180 min.

2) 산화제에 의한 반응부산물 (브롬산염)

오존과 염소의 주입농도가 0.5 ppm일 때 브롬산염의 생성량은 각각 0.75, 0.12 ppb로 나타났고, 특히 오존 주입농도 5.0 ppm일 때는 브롬산염이 약 278 ppb까지 높게 생성되었다. 과망간산염과 과산화수소에 의한 브롬산염은 생성되지 않았다. 따라서 최적 산화제의 주입농도는 브롬산염의 생성량을 최소화할 수 있는 조건에서 도출되어야 할 것으로 판단된다 (그림 41).

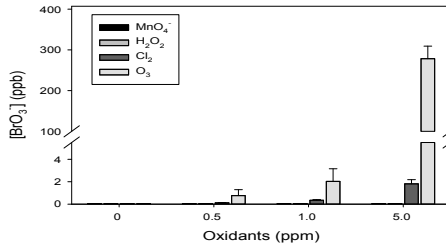


Fig. 41. Bromate formation by oxidative treatments.

$[Br^-]_0 = 65 \text{ ppm}$; $[O_3]_0 = [Cl_2]_0 = [H_2O_2]_0 = [MnO_4^-]_0 = 0.5, 1.0, 5.0 \text{ ppm}$; $pH = 7.9$; Reaction time = 180 min.

3) 산화제에 의한 어류독성평가

과망간산염에 의한 어류독성은 0.1 ppm 농도에서 영향이 없었고, 0.2 ppm일 때 72시간 이후 약 95% 생존했고, 특히 과망간산염 농도 0.5 ppm 에서는 노출 초기에 대부분의 어류가 폐사했다. 염소 0.5, 1.0 ppm 농도에서의 참돔치어의 생존율은 노출 후 약 95, 90%이었고, 1.5 ppm일 때는 산화제 노출 초기에 대부분 폐사하여 약 8.3% 생존하였다. 과산화수소는 노출된 시간이 지남에 따라 폐사한 개체수가 지속적으로 증가했고, 100 ppm의 과산화수소 농도일 때 참돔치어의 생존율은 노출 시간 72시간 이후 모두 폐사하였다 (그림 42).

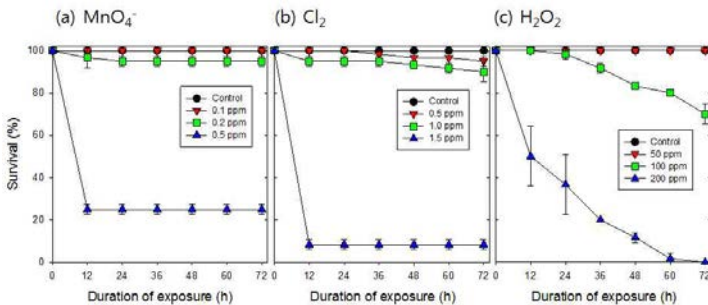


Fig. 42. Survival rate of juvenile red sea bream exposed to various oxidants for 72-h.

$[MnO_4^-]_0 = 0.1, 0.2, 0.5 \text{ ppm}$; $[Cl_2]_0 = 0.5, 1.0, 1.5 \text{ ppm}$; $[H_2O_2]_0 = 50, 100, 200 \text{ ppm}$; Reaction time = 72 h.

과망간산염과 염소, 과산화수소의 참돔치어의 72시간에 대한 LC_{50} 값은 각각 0.39, 1.32, 102.61 ppm으로 나왔다. 과망간산염은 1.0 ppm 이하에서도 독성이 높아 어류에 높은 영향을 미쳤고, 과산화수소는 다른 산화제에 비해 참돔치어에 대한 독성이 낮았다. 또한 각 산화제들

가 .

에 대한 참돔치어의 72시간의 LC₅₀ 값은 적조생물의 산화제 처리 시 잔류산화제의 농도보다 모두 높게 나타났다 (그림 43).

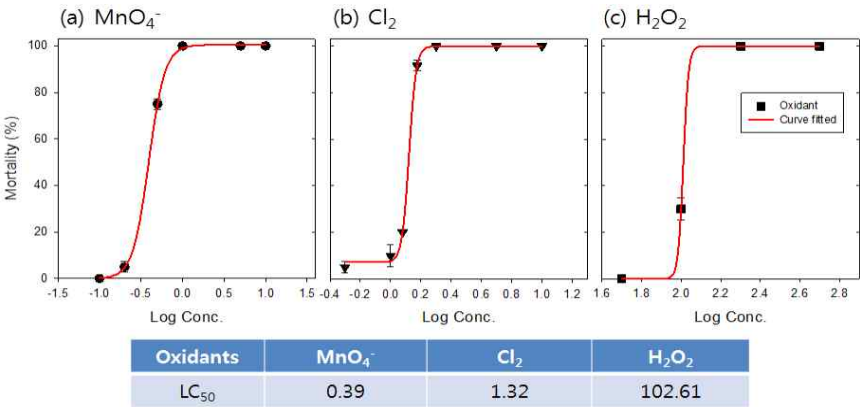
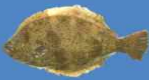




Fig. 43. LC₅₀ of juvenile red sea bream by various oxidants for 72-h.
[MnO4-]0 = 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 ppm; [Cl2]0 = 0.5, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 5.0, 10.0 ppm;
[H2O2]0 = 50, 100, 200, 500 ppm; Reaction time = 72 h.

바. 물리화학적 수처리 기법 적용에 의한 사육생물(넙치, 강도다리) 영향 평가

양식어류인 넙치, 강도다리, 참돔에 미치는 독성영향 평가는 염소, 과산화수소의 처리 시 어류에 대한 독성을 확인함으로써 양식어류(표 14)에 대한 안전한 산화제의 농도를 결정하였다. 적용 산화제의 노출 시간에 따른 어류 생존율 결과를 살펴보면, 염소를 적용한 경우에는 주로 산화제 노출 후 24시간 이내에 대부분 폐사하는 현상이 나타났다. 반면, 과산화수소는 노출된 시간이 지남에 따라 폐사한 개체수가 점차적으로 증가하는 경향을 보였다.

Table 14. LC₅₀ of juvenile fish by various oxidants for 72-h

어종	넙치	강도다리	참돔
<div>    </div>			
LC ₅₀ value			
Weight/Length	11.9 g/11.3 cm	4.3 g/1.58 cm	5.8 g/8.3 cm
Cl ₂	0.87	0.40	1.32
H ₂ O ₂	407.66	226.77	102.61

사. 양식생물 피해저감을 위한 수처리 기법을 도입한 운영방안 도출(현장 적용 시험)

1) 현장 적용 처리 인자 설정

본 연구에서는 적용되는 산화제(염소, 과산화수소)에 의한 어류독성은 최소화하면서 적조제어

효율을 극대화할 수 있는 최적 산화제 투입량 결정하였다. 그림 44는 염소와 과산화수소에 의한 코클로디니움 사멸효율과 넘치, 강도다리, 참돔 치어의 독성을 보여준다. 염소는 코클로디니움 개체수에 상관없이 적조 제거율이 100%로 나타나는 지점인 5.0 ppm조건에서 넘치, 강도다리, 참돔 치어가 모두 폐사되는 결과를 나타냈다. 반면, 과산화수소는 코클로디니움 제거율이 100%로 나타나는 지점인 10.0 ppm에서 넘치, 강도다리, 참돔 치어에 대한 독성은 전혀 나타나지 않았다. 또한, 넘치, 강도다리 치어의 경우에는 10.0ppm 과산화수소보다 10배 높은 농도인 100.0 ppm에서도 전혀 영향이 없었으며 모두 생존하였다. 염소보다 과산화수소가 현장적용에 더 적합하다는 연구결과는 LC₅₀값 이외에도 염소와 과산화수소에 의한 코클로디니움 사멸효율과 넘치, 강도다리, 참돔 치어 독성을 나타낸 그림 44를 통해서도 알 수 있다. 염소의 경우에는 적조생물의 사멸이 일어나는 지점과 어류독성이 나타나는 곳이 일치한다. 반면, 과산화수소의 경우에는 적조생물 사멸은 효과적으로 일어나지만 100 ppm 미만의 처리조건에서는 어류독성을 나타내지 않는 것으로 나타났다. 적조생물 사멸반응(3h) 후 잔류 과산화수소 및 총잔류산화제의 농도는 적조생물의 밀도가 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 × 10³ cells/mL로 증가함에 따라 잔류 과산화수소의 농도는 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 과산화수소와 적조생물의 직접반응에 의해 과산화수소의 분해가 이루어졌기 때문으로 판단된다. 특히, 적조경보수준(1.0×10³ cells/mL 이상)의 개체수에서는 과산화수소의 농도 10 ppm 주입 시에 잔류 과산화수소는 약 2 ppm 미만으로 매우 낮게 나타났다. 또한 과산화수소의 처리는 총잔류산화제와 브로메이트를 발생시키지 않아 현장적용에 적합하다.

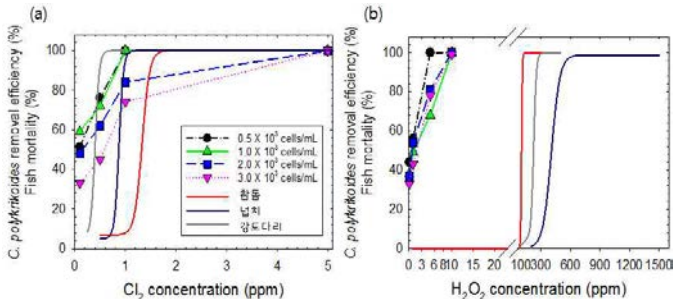


Fig. 44. *C. polykrikoides* removal and juvenile starry flounder acute toxicity by chlorine and hydrogen peroxide.

[$[Cl_2]_0 = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0 \text{ ppm}$; $[H_2O_2]_0 = 0.1, 1.0, 5.0, 10.0 \text{ ppm}$; Reaction time = 3 h.

2) 사육조 내 산화제 확산 특성 조사

현장적용을 위해 사육조 내 산화제를 주입하는 경우, 산화제 주입농도와 주입위치에 따른 확산특성이 상이할 수 있으므로 산화제 주입방법의 제시를 위한 최적조건을 도출이 중요하다. 본 연구에서는 사육조 내 산화제 확산에 미치는 영향인자 평가를 위하여 산화제 농도(저농도 H₂O₂ 10 ppm/고농도 H₂O₂ 100 ppm) 및 산화제 주입위치(1개 지점 혹은 여러 지점에 분산하여 주입하는 경우)에 따른 확산정도를 조사하였다. 먼저, 산화제의 농도가 고농도 주입되었을 때는 저농도 주입되었을 때보다 위와 아래의 농도차가 두드러지게 나타나면서 과산화수소가 전

반적으로 가라앉은 현상을 보였다(그림 45, 그림 46). 저농도가 주입된 경우에는 반응 3시간 후에는 전체적으로 위와 아래의 농도가 균일하게 확산되어 나타나는 것을 그림 46을 통해 알 수 있다. 고농도의 경우에는 위와 아래의 농도 차가 15배까지 나타나는 반면, 저농도의 경우에는 농도 차가 5배정도로 아래가 높게 나타났다. 이러한 결과는 고농도가 저농도에 비해 확산이 잘 일어나지 않음을 알 수 있어, 고농도의 과산화수소 주입 시에도 희석하여 주입하는 것이 필요하다.

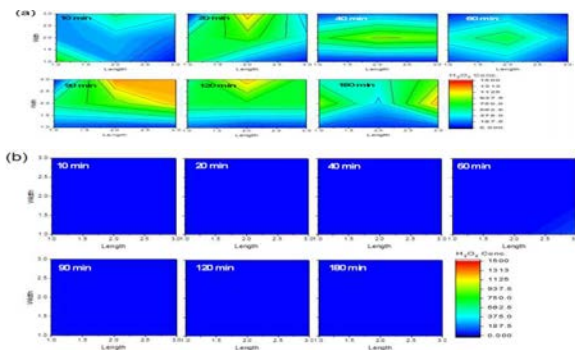


Fig. 45. Several point injection with high concentration of hydrogen peroxide.
([H₂O₂]₀ = 100 ppm; Reaction time = 180 min).

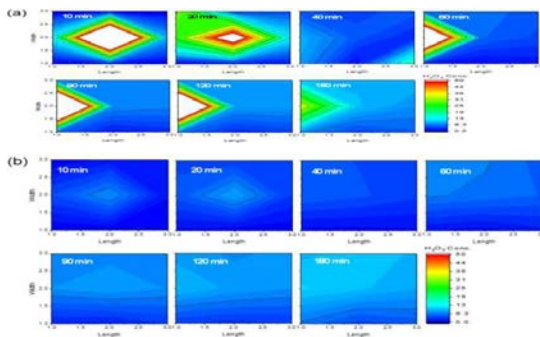


Fig. 46. Several point injection with low concentration of hydrogen peroxide.
([H₂O₂]₀ = 10 ppm; Reaction time = 180 min).

3) 육상양식장의 사육조 내 산화제 공정 도입

육상양식장 적조대응기술로 활용하기 위하여, 실험실 규모의 기초 선행 연구결과를 바탕으로 육상양식장의 사육조 내 과산화수소 공정을 도입하였다. 자세한 실험조건은 적조생물 1.5×10^3 cells/mL을 포함하는 해수에 넘치 치어 30마리를 넣고 저농도 과산화수소 분산 주입하는

것이다. 그리고 과산화수소 처리에 의한 적조생물의 사멸, 과산화수소 분해 및 어류독성을 관찰하였다.

과산화수소 처리에 의해 유영형 코클로디니움은 약 20분 만에 빠르게 감소하였으며, 적조생물의 세포막이 파괴되면서 완전히 파열되는 파열형 코클로디니움은 시간에 따라 점차적으로 증가하는 현상을 보였다(그림 47). 한편, 수중의 과산화수소는 적조생물과의 직접반응을 통해서서히 분해되고, 반응 4시간 후 초기농도의 약 60%만이 잔류하는 것으로 나타났다(그림 47). 이때 반응 후 잔류하는 과산화수소는 티오황산나트륨을 주입하여 모두 분해시켜 배출할 수 있다. 또한, 반응시간동안 과산화수소는 넘치 치어에 대해 전혀 독성을 나타내지 않았다. 이러한 결과는 저농도 과산화수소의 처리가 양식어류에는 독성을 나타내지 않으면서 적조생물을 효과적으로 제어할 수 있음을 보여준다.

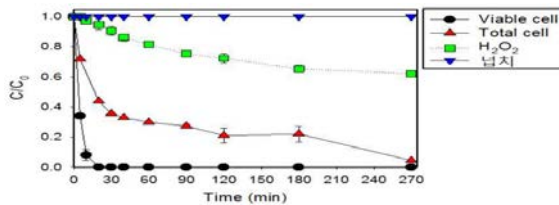


Fig. 47. *C. polykrikoides* removal and decomposition of hydrogen peroxide by several point injection with low concentration of hydrogen peroxide.

($[Cell]_0 = 1.5 \times 10^3$ cells/mL; $[H_2O_2]_0 = 20$ ppm; No. of tested fishes = 30; Reaction time = 4 h).

아. 양식생물 피해저감을 위한 수처리 기법 운영 매뉴얼 작성

육상수조식 양식장 적조대응 수처리 기법

적조예방 및 발생시 수처리 요령

- 적조 제거 수처리 물질 : 과산화수소 (35% 사용판매용)
- 수처리 물질 농도 : 과산화수소 0.1~10 ppm
- 수처리 물질 투입량(시간) : 0.2~20mL/분, 1~3시간 지속사멸 후 환수
- 수처리 물질 투입방법 : 수조 전체에 골고루 살포

적조발생단계	대응요령	제초제	효능 및 효과	투입 및 용량	수처리 지속시간
적조초기 발생단계 해조밀도: 100 개체/mL (수중적조발생)	① 먹이공급 중단 ② 산소공급장치 추가관리 가동 ③ 과산화수소 투입 ④ 사육수 교환조심 필요함	과산화수소 30%	적조생물 64~100% 사멸	0.2~10 mL/분 (0.1~5 ppm)	1~3시간
적조중기 발생단계 해조밀도: 1,000 개체/mL (수중적조발생)	① 먹이공급 중단 ② 산소공급장치 추가관리 가동 ③ 환수중단 후 과산화수소 투입	과산화수소 30%	적조생물 60~100% 사멸	10~20 mL/분 (5~10 ppm)	1~3시간
적조중후기 발생 (수중적조발생)	- 먹이공급 및 사육수 항상 관리	-	-	-	-

환수배출기준
환수

● #5 배출수의 과산화수소농도(0.2ppm 이하) 저산배출
가장자리에서 배출수(1분용 3~30mL/분) 40~60초(10 ppm)
를 투입하여 잔류 과산화수소 제거 후 배출

국립수산과학원

Fig. 48. Water treatment guideline for inland fish farm.

그림 48은 육상수조식양식장의 적조대응 수처리 기법 매뉴얼이다. 이 매뉴얼은 적조제거 수처리물질로 과산화수소 농도 0.1~10 ppm을 이용하여 수조 내 유입한 적조를 제거하는 방법을 제시하였으며, 이 매뉴얼은 적조발생시 육상수조식양식장 관리를 위하여 어업인들에게 배포하여 현장에 적용하도록 할 계획이다.

3. 가두리양식장 맞춤형 적조대응 연구

가. 적조대비 가두리 양식장 적지조사 및 선정

그림 49는 2014년 경남지역 적조대비 가두리이동을 위한 적지를 검토한 결과이다. 검토된 적지는 통영지역의 오비도해역, 산양읍 미남리, 한산해역 등이었으며, 거제지역은 준덕면 술역리, 동부면 가배해역이었다. 통영지역의 적지조건은 수심 15~30m이고 조류소통이 원활하여 적조의 영향은 다소 적지만, 태풍영향이 우려되고 여름철 남동-남서풍, 태풍피해 가능성 상존하고 있는 특징이 있다. 거제지역은 수심 15~20m이고 적조피해 적고, 조류소통 원활하여 적조피해 가능성은 다소 낮으나, 태풍영향을 직접 받고, 주변어장이 밀집해 있고, 여름철 남동-남서풍, 대규모 적조발생시 피해가능성이 상존해 있는 단점이 있었다.

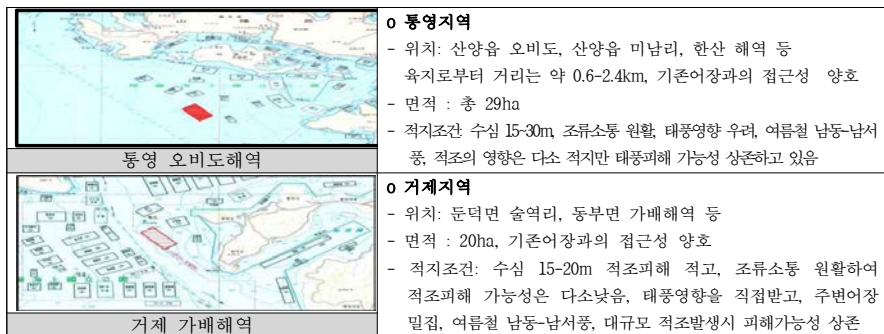


Fig. 49. Investigation of optimal locations of floating aquaculture farms for evacuation in Kyungnam area.

그림 50은 2015년 통영해역 적조대비 가두리 대피장소를 찾기 위해 적지를 조사한 결과이다. 통영지역 양식장 적조대비 대피장지정을 위한 후보지 3곳을 탐색하였다. 통영시 산양읍 신전리와 한산면 두덕리 대월도를 연결하는 북부해역으로 수심 15~17 m의 평탄한 해저지형으로 적조영향이 다소 적은해역으로서 항로와 주변에 굴, 멍게 양식장이 산재되어 있으며, 태풍의 영향을 직접적으로 받는 해역으로서 최종 적지선정시에 신중한 검토가 필요할 것으로 보인다. 두 번째로 통영시 산양읍 연화리 소장두도와 주변해역으로서 수심이 25~35 m로서 동서가 개방되어 있어 조류소통이 양호지역으로서 적조피해는 적은 곳이지만 연안 가두리양식장과 원거리에 위치하고 있는 단점이 있는 것으로 나타났다.



Fig. 50. Investigation of optimal locations of floating aquaculture farms for evacuation in Tongyoung area.

나. 가두리 양식장 적조피해특성 분석

10년간 남해안 가두리양식장을 중심으로 적조피해 특성을 분석한 결과(표 15), 적조에 의한 양식생물 대량폐사는 2003년에 약 13,088천마리(215억원), 2007년에 9,571천마리(114억원), 2013년에 28,180천마리(247억원)로서 가장 피해가 컸으며, 금년에는 2,421천마리(37.3억원)으로 나타났다. 특히 전체 폐사량의 약 90% 이상이 남해안 가두리양식장에 집중되었다.

Table 15. Damage situation of cultured animal by red tide (2003-2015)

구 분	' 03	' 04	' 05	' 06	' 07	' 12	' 13	' 14	' 15
기 간	8~10월	8~9월	7~8월	8~10월	7~9월	7~10월	7~8월	7~9월	8~9월
해 역	전남, 경남	전남, 경남	전남, 경남	전남, 경남	전남, 경북	전남, 경남, 충남	전남~경북	전남~경북	전남~경북
품종	어류 전복	어류	어류 전복	어류	어류 전복	어류 전복	어류 전복	어류 전복	어류 전복
가구수	293	11	62	2	251	-	272	90	85
피해현황 (천마리)	13,088	219	1,638	702	9,570	5,675	25,068	5,644	2,421
피해금액 (억원)	215	1.2	10.6	0.7	115	44	217	74.1	37.3

* 2015년 피해액은 전남지역 전복 피해 미반영

남해안 가두리양식장 적조피해는 육지로부터 인접한 지역으로 수심이 10m 이내의 반 폐쇄성 만내에 위치한 어장에서 집중적인 피해를 보여주었다. 특히, 통영 28가구, 남해 19가구, 거제 9가구 등 경남지역의 피해가 많은 것으로 조사되었다. 이러한 지역의 특성은 조류소통이 원활하지 않고, 반폐쇄성 만을 형성하고 있으며, 수심이 낮아 많은 피해가 발생하고 있는 것으로 파악된다. 양식품종별 폐사상황을 살펴보면 돔류가 약 28.8%로 가장 폐사량이 높았으며, 조피볼락(22.4%), 넙치(19.0%) 순으로 나타났다(그림 51).

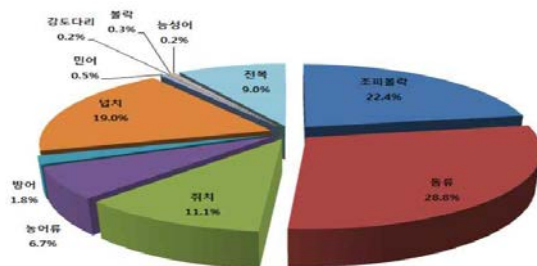


Fig. 51. Damage situation of kind cultured animal by red tide in 2015.

다. 적조대비 가두리 시스템 설계 및 현장 적용

주변해역 수심이 약 15 m이상인 가두리양식장에서는 적조대비하여 가두리 수층을 조절하는 방안을 고려하여 3가지 형태의 가두리를 설계하였다 (그림 52). 내파성 사각가두리(5, 10 m)와 원형(지름 15 m)으로 구분하여 평상시는 그물깊이가 10-20 m로 유지하다가 적조발생시 수심 15-30 m로 침하시켜 적조에 대비하는 형태이다.

통영시 산양읍 시험어장과 육지도 연구교습어장에서 실증실험을 실시한 결과 15-30일간 침하시켜 사각가두리와 원형가두리에서 실험생물(참돔, 방어, 조피볼락)의 폐사는 거의 발생하지 않았고, 시설물의 변형이나 안전성에도 문제가 발생하지 않았다.

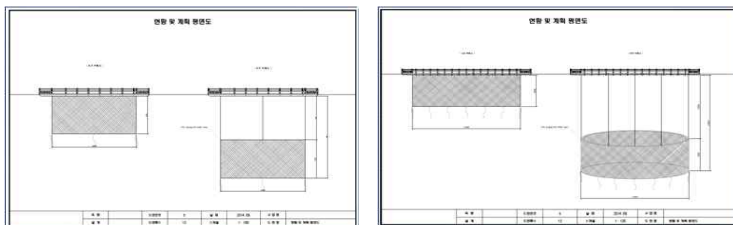


Fig. 52. Design and field application of floating aquaculture system for evacuation.

라. 가두리 형태별 양식어류 행동특성

적조생물 유입에 따른 어류행동 특성 파악하기 위해 전자태그 (G6+, Cefas)를 이용하여 조사한 결과, 시험어장에 고밀도 적조가 유입되지 않아 어류의 행동 특성은 확인되지 않았다. 다만 참돔의 경우 낮에는 비교적 깊은 수심대에 밤에는 비교적 낮은 수심대에서 유영하는 것을 확인할 수 있었다 (그림 53).

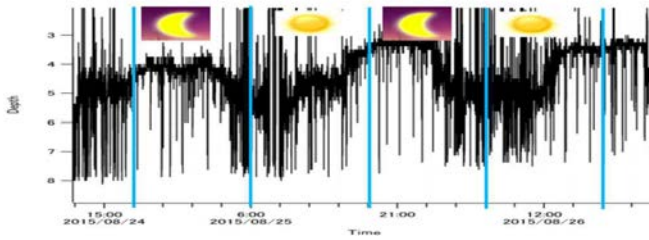


Fig. 53. Depth of water for swimming of red sea bream.

마. 가두리 양식장 주변해역 하계 해양환경 특성 분석

1) 대피어장 및 적조해역 영양염류 비교분석

영양염류는 2015년 7월 10일부터 9월 17일까지 남해~통영~거제에서 대피어장 및 적조해역의 영양염류량을 조사한 결과, NH_4N 농도의 경우 대피어장은 $0.017 \sim 0.039 \text{ mg/L}$ 로 평균 $0.024 \text{ mg/L} (\pm 0.006)$ 이었다. 적조해역의 경우 NH_4N 농도가 $0.005 \sim 0.014 \text{ mg/L}$ 로 평균 $0.007 \text{ mg/L} (\pm 0.004)$ 이었으며 대피어장 보다 약 3배 정도 낮게 나타났다 (그림 54). NO_3N 농도의 경우도 대피어장은 $0.010 \sim 0.036 \text{ mg/L}$ 로 평균 $0.023 \text{ mg/L} (\pm 0.008)$ 이었다. 적조해역의 경우 NO_3N 농도가 $0.008 \sim 0.013 \text{ mg/L}$ 로 평균 $0.012 \text{ mg/L} (\pm 0.005)$ 이었으며 대피어장 보다 약 2배 정도 낮게 나타났다. PO_4P 농도의 경우도 대피어장은 $0.008 \sim 0.015 \text{ mg/L}$ 로 평균 $0.012 \text{ mg/L} (\pm 0.002)$ 이었음. 적조해역의 경우 PO_4P 농도가 $0.001 \sim 0.005 \text{ mg/L}$ 로 평균 $0.002 \text{ mg/L} (\pm 0.001)$ 이었으며 대피어장 보다 약 6배 정도 낮았다.

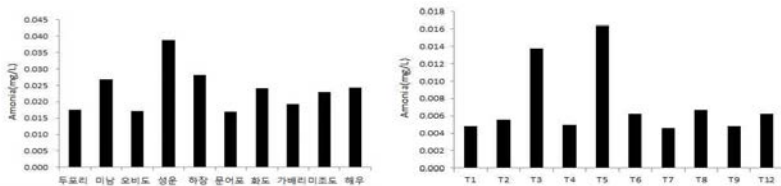


Fig. 54. NH_4N concentration of fish farms for evacuation (left) and red tide bloomed seawater (right).

2) 대피어장 및 적조해역 수온, 염분, DO 및 pH 비교분석

대피어장의 수온 및 염분은 $21.50 \sim 24.81^\circ\text{C}$ 및 $31.74 \sim 32.47$ 이었으며, 수온평균 $23.65^\circ\text{C} (\pm 1.37)$ 및 염분평균 $32.18 (\pm 0.25)$ 이었다. 적조해역의 경우 수온 $21.61 \sim 24.95^\circ\text{C}$ 및 염분 $31.75 \sim 32.34$ 이었으며 수온평균 $24.14^\circ\text{C} (\pm 1.36)$ 및 염분평균 $32.11 (\pm 0.24)$ 이었다. 대피어장의 DO 및 pH는 DO $6.20 \sim 7.59 \text{ mg/L}$ 및 pH $7.97 \sim 8.21$ 이었으며 DO 평균 $6.77 (\pm 0.53)$ 및 pH 평균 $8.06 (\pm 0.09)$ 이었다. 적조해역의 경우 DO $7.54 \sim 8.62^\circ\text{C}$ 및 pH $8.07 \sim 8.17$ 이었으며, DO 평균 $8.08 (\pm 0.37)$ 및 pH 평균 $8.10 (\pm 0.04)$ 으로 대피어장 보다 높은 용존산소량을 보였다 (그림 55).

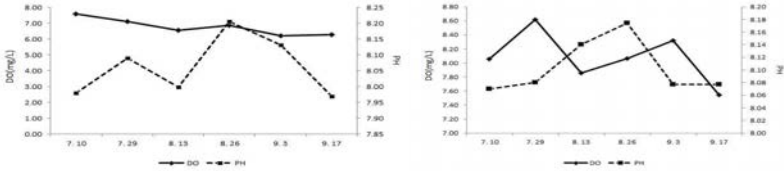


Fig. 55. DO and pH of fish farms for evacuation (left) and red tide bloomed seawater (right).

3) 대피어장 및 적조해역 식물플랑크톤 비교분석

식물플랑크톤 조사 결과, 대피어장의 코클로디니움 밀도는 0~0.02 cells/mL였으며 평균 0.003 cells/mL (± 0.003)이었다. 적조해역의 코클로디니움 밀도는 0~800 cells/mL였으며 평균 45.3 cells/mL (± 54.1)으로 나타났다 (그림 56).

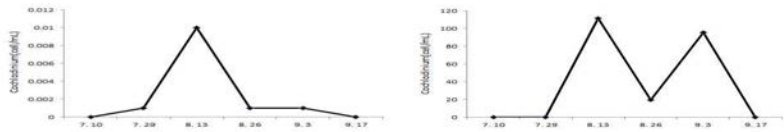


Fig. 56. Seasonal mean density of *C. polykrikoides* in fish for evacuation (left) and red tide bloomed seawater (right).

대피어장의 식물플랑크톤 종조성은 *Chartoceros* spp., *Leptocylindrus* spp., *Thalassiosira* spp., *Skeletonema costatum* 등의 규조류가 우점하였고, 적조해역의 종조성은 *C. polykrikoides*, *P. hartmannii*, *Gymnodinium* sp., *Ceratium* spp. 등의 편모조류가 주로 우점 출현하였다 (표 16).

Table 16. Dominant species of phytoplankton in evacuation and red tide bloomed seawater area

날짜	코클로디니움 출현량(cells/mL)		우점 식물플랑크톤	
	대피어장	적조해역	대피어장	적조해역
7.10	0	0.002~0.03 (0.02 \pm 0.01)	<i>Chaetoceros</i> spp. <i>Leptocylindrus</i> spp. <i>Thalassiosira</i> spp.	<i>Chaetoceros</i> spp. <i>Thalassiosira</i> spp. <i>Ceratium</i> spp.
7.29	0.001~0.002 (0.0015 \pm 0.0005)	0.001~1.0 (0.12 \pm 0.30)	<i>Chaetoceros</i> spp. <i>Leptocylindrus</i> spp. <i>Stephanophyxis</i> spp.	<i>Chaetoceros</i> spp.
8.13	0.01~0.02 (0.084 \pm 0.05)	2~800 (111.5 \pm 278.6)	<i>Chaetoceros</i> spp. <i>Gonyaulax</i> spp. <i>Thalassiosira</i> spp.	<i>C. polykrikoides</i> <i>Chaetoceros</i> spp. <i>Alexandrium</i> spp.
8.26	0.001~0.015 (0.008 \pm 0.005)	1.1~64 (19.67 \pm 29.68)	<i>Chaetoceros</i> spp. <i>Pseudo-nitzschia</i> spp. <i>Asterionella glacialis</i>	<i>C. polykrikoides</i> <i>P. hartmannii</i> <i>Gymnodinium</i> sp.
9.3	0.001~0.012 (0.002 \pm 0.004)	0.5~450 (95.75 \pm 145.4)	<i>Chaetoceros</i> spp. <i>Skeletonema costatum</i> <i>Asterionella glacialis</i>	<i>C. polykrikoides</i> <i>Chaetoceros</i> spp.
9.17	0	0	<i>Chaetoceros</i> spp. <i>Skeletonema costatum</i> <i>Thalassiosira</i> spp.	<i>Chaetoceros</i> spp. <i>Thalassiosira</i> spp. <i>Leptocylindrus</i> spp.

바. 가두리양식장 적조피해 대응 연구

1) 적조 출현 시 절식과 섭식이 참돔과 조피볼락에 미치는 영향(2015. 9. 1 10.20)

가) 성장 변화

참돔은 실험 종료 시 절식구 1002.3±81.7 g에 비해 섭식구 체중이 1148.0±106.3 g으로 높게 나타났으나 조피볼락은 고수온기 사료 섭식량이 감소하여 절식구와 섭식구의 전장과 체중 모두 차이를 나타내지 않았다.

나) 혈액성상 변화

참돔 섭식구 혈중 알부민(ALB)은 적조생물 출현 시 (400~1200 cells/mL) 1.5±0.05 g/dL로 높은 수치를 나타냈고, AST, ALT는 각각 45.6±7.72, 15.5±3.09 U/L로 가장 높은 수치를 나타내 적조출현에 의한 섭식구의 간 지능 저하로 판단된다. 요소질소 (BUN) 또한 5.8±0.3 mg/dL으로 가장 높게 나타나 아가미의 이상에 영향을 미친것으로 예상된다 (그림 57). 조피볼락은 고수온기 사료 섭식량이 감소하여 절식구와 섭식구에 의한 혈액성상은 유의한 차이를 나타내지 않았다.

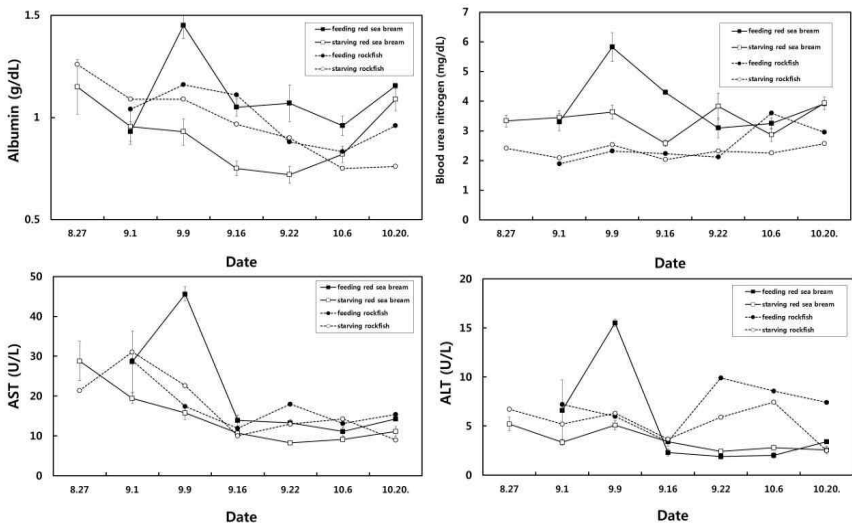


Fig. 57. Change of blood composition of red sea bream and rockfish with starvation and feeding.

2) 어종별 적조 노출에 따른 생리적 반응

가) 생존율

적조 노출 시 가두리 참돔, 조피볼락, 농어의 어종별 생존율을 조사한 결과, 시험사육 기간 동안 생존율은 농어가 90.4 %로 가장 낮았고, 참돔과 조피볼락은 각각 98.5, 99.6 %로 나타났다.

나) 혈액성상 변화

적조 출현 시 어종별(참돔, 조피볼락, 농어) 혈액성상 변화를 조사한 결과, 글루코스는 참돔

가 .

56.4~121.3 mg/dL, 조피볼락 4.2~51.9 mg/dL 그리고 농어 120.4~200.1 mg/dL로 나타나 각각 다른 분포를 보였다(그림 58). 그러나 혈액성상을 통한 어종별 폐사원인을 파악하기 위한 헤모글로빈, 총단백질 등 이외의 분석항목들은 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다.

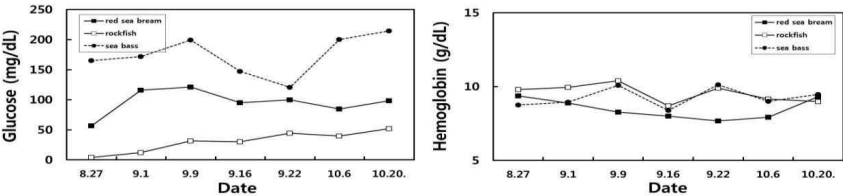


Fig. 58. Change of blood composition in red sea bream, rockfish and sea bass.

3) 고수온기 양식어종별 치어 및 성어기 절식기간에 따른 생리적 변화 분석

가) 생존율 및 성장

치어 및 성어의 생존율은 각각 96%, 95% 이상으로 포식구와 절식구 간의 유의한 차이는 나타나지 않았다 (표 17).

Table 17. Growth of rockfish and red sea bream with starvation during high temperature period

Item		Rockfish				Red sea bream			
		Juvenile		Adult		Juvenile		Adult	
		Fed	Starved	Fed	Starved	Fed	Starved	Fed	Starved
TL (mm)	Initial	114.9±9.2	114.9±9.2	204.4±11.7	204.4±11.7	72.6±3.2	72.6±3.2	204.8±17.3	204.8±17.3
	Final	132.9±11.3	120.5±9.2	223.6±11.6	207.6±14.5	91.2±8.6	75.5±3.9	225.0±17.3	206.0±20.5
BW (g)	Initial	27.7±5.1	27.7±5.1	156.9±21.4	156.9±21.4	7.0±0.9	7.0±0.9	147.5±33.4	147.5±33.4
	Final	34.8±8.7	25.4±5.6	177.2±26.0	131.3±21.2	11.6±2.7	5.2±1.2	201.1±50.0	129.5±40.8
GRL (%)		15.7±4.1	4.9±5.1	9.4±0.1	1.6±1.9	25.6±10.9	4.0±1.0	9.9±2.9	0.6±4.4
GRW (%)		25.5±16.3	-8.4±12.2	12.9±0.7	-16.3±2.8	65.0±32.2	-26.0±8.1	36.3±6.4	-12.2±7.4
Specific growth rate (%)		0.2±0.1	-0.1±0.1	0.6±0.0	-0.8±0.1	0.1±0.1	-0.1±0.0	1.7±0.3	-0.6±0.3
Condition factor		1.5±0.0	1.5±0.1	1.6±0.0	1.5±0.0	1.5±0.1	1.2±0.2	1.8±0.1	1.5±0.1
Feed intake		1.52±0.0		2.6±0.1		1.4±0.1		3.3±0.1	
Specific feeding rate (%)		71.1±4.1		46.5±1.3		73.2±1.7		57.8±1.4	
Feed conversion rate (%)		0.5±0.2		1.4±0.1		0.3±0.1		3.3±0.6	

*Abbreviation; TL; Total length; BW; Body weight; GRL; Growth rate for total length; GRW; Growth rate for body weight.

나) 간 중량지수

고수온기 조피볼락 치어 간중량 지수의 경우, 포식구는 2.2±0.25%로 1.16배 증가, 절식구는 1.4±0.94%로 0.74배 감소하였다. 참돔 치어의 경우, 실험 시작 시에 비해 포식구는 2.2±0.15%로 유의적인 차이를 보이지 않았으며, 절식구는 1.6±0.21%로 0.76배 감소하였다. 조피볼락 성어 간중량 지수의 경우, 포식구는 2.3±0.18%로 미약하게 증가하였고, 절식구는 1.5±0.16%로 0.71배 감소하였다. 참돔 성어의 경우, 실험 시작시에 비해 포식구는 2.4±0.27%로 미약하게 증가하였고, 절식구는 1.6±0.15%로 0.72배 감소하였다.

다) 혈액성상

조피볼락 치어 포식구의 RBC 수치는 유의차가 크지 않았으며, 절식구의 경우는 초기 RBC 수치에 비해 32일째 3.7×10^6 cell/uL로 1.9배 높은 수치로 나타났으며, 참돔 치어 포식구 및 절식구의 RBC 수치의 경우, 32일째까지 단계적으로 증가하는 경향을 보였다(그림 59). 조피볼락 치어 포식구의 HGB 수치는 유의차가 크지 않았으며, 절식구의 경우 초기에 비해 2배가량 높은 수치로 나타났으며, 참돔 치어 포식구의 경우, 초기에 비해 점진적으로 상승하여 32일째 6.6 g/dL로 1.8배 높은 수치를 보였고, 절식구 또한 4~32일째까지 초기보다 4.7~6.6 g/dL로 높은 수치를 보였다. 조피볼락 성어 포식구의 glucose 수치는 32일째 44.8 mg/dL로 나타나며 초기 수치와 유의한 차이를 보이지 않았으며, 절식구는 초기 수치에 비해 전체적으로 낮았으며, 참돔 성어 포식구의 glucose 수치는 4일째 133.1 mg/dL로 높게 나타났고, 32일째 86.6 mg/dL의 수치를 보였고, 절식구는 초기 수치에서 단계적으로 낮아진 경향을 나타냈다.

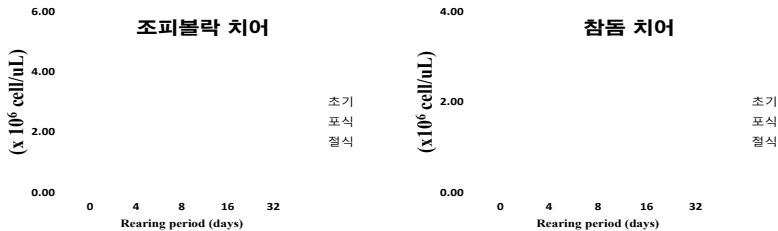


Fig. 59. RBC levels of juvenile rockfish and red sea bream during high temperature period.

4) 포식 및 절식에 따른 양식어종의 적조 시 생존율 분석

조피볼락 성어 및 치어의 포식구와 절식구는 폐사개체가 발생하지 않아 생존율은 100%로 나타났다으며, 참돔 포식구 성어 및 치어는 3400~3500 cells/mL 농도의 *Choclodinium polykrikoides*에 의한 폐사가 3~4시간 안에 빠르게 일어나는 것을 확인하였고, 절식구 성어 및 치어는 70~80%의 높은 생존율을 보였다(그림 60)



Fig. 60. Survival rate of experimental animal with feeding and starvation.

5) 적조미발생시 가두리 양식어장 모니터링 및 양식생물 절식효과

가) 질병조사 (2016. 7~2016.9)

가두리 양식생물 사육관리 방안을 마련하기 위해 적조시기 월별(7, 8, 9월), 지역 어종별(참돔, 조피볼락) 경남 소재 가두리 양식생물 질병을 조사하였다. 참돔과 조피볼락의 세균성 질병의 조사 결과(표 18), 참돔(8월, 남해 미조)과 조피볼락(9월, 통영 연화도)에서 신장과 비장에서 *Vibrio* sp.가 소량 검출되었다(참돔 3마리 중 1마리, 조피볼락 4마리 중 2마리). 바이러스성 질병 검사를 위하여 RSIV1과 RSIV4 primer를 사용하여 PCR을 수행한 결과, 모든 시료에서 RSIV가 검출되지 않았다(표 18, 그림 61).

Table 18. Monthly investigation of fish disease during red tide bloomed seawater

조사 일시	어종 /체장(cm)	위치	수온 (℃)	염분 (psu)	세균	바이러스 ^a	기생충
7월	참돔 30.3±0.4	통영 용호리	20.5±0.9	33.0±0.1	불검출 (0/2)	불검출	아가미흡충(2/2) (<i>Bivagina tai</i>)
7월	조피볼락 19.9±1.6	통영 용호리	20.5±0.9	33.0±0.1	불검출 (0/3)	불검출	아가미흡충(2/3) (<i>Microcotyle sebastis</i>)
8월	참돔 38.2±0.6	남해 미조	26.5±2.0	32.6±0.1	<i>Vibrio</i> sp. (1/3)	불검출	아가미흡충(2/3) (<i>Bivagina tai</i>)
9월	조피볼락 22.4±1.4	통영 연화도	25.4±0.1	31.6±0.1	<i>Vibrio</i> sp. (2/4)	불검출	아가미흡충(3/4) (<i>Microcotyle sebastis</i>)

^a; RSIV1과 RSIV4 primer를 사용한 바이러스 검사 결과, Red seabream iridovirus(RSIV)

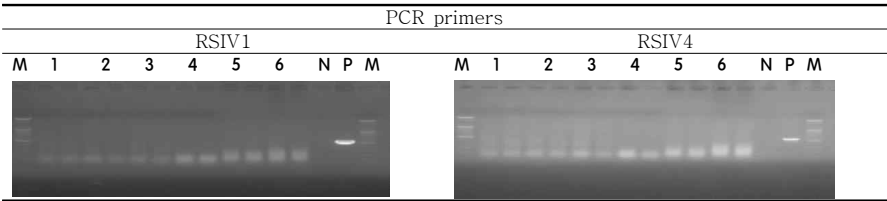


Fig. 61. Virus(RSIV1과 RSIV4) analysis of red sea bream(August) and rockfish(September) 3~6; Rockfish, M; molecular marker, N; negative control, P; positive control.

기생충성 질병의 조사를 위하여 모든 어류의 체표와 아가미를 현미경으로 검경 한 결과, 조피볼락과 참돔에서는 아가미흡충이 감염되어있었고, 감염율은 비교적 높았지만 어류 개체당 감염하고 있는 기생충의 수는 매우 적어(개체당 10마리 이내) 폐사에 영향을 미칠만한 농도는

아니었다(그림 62).



Fig. 62. Dactylogyrus disease (*Bivagina tai*) attached on the gill of red sea bream.

나) 혈액학적 조사

하계 적조시기의 가두리 양식생물의 사육관리 방안을 제시하기 위해 월별(7, 8, 9월), 어종별(참돔, 조피볼락) 혈액 내 알부민(albumin), AST, ALT, 글루코스, 암모니아 및 총콜레스테롤 변화를 분석하였다. 글루코스는 8월 참돔에서 101.7 ± 20.6 으로 다른 실험구에 비해 높게 나타났으며, 이는 8월 고수온으로 인한 스트레스에서 기인한 것으로 예상된다. 또한 8월 참돔의 총콜레스테롤 수치가 가장 낮은 것도 고수온으로 인한 간 기능 장애나 사료의 섭취량 부족, 흡수장애로 판단된다(그림 63).

다) SOD활성 조사

SOD (superoxide dismutase)는 활성산소를 제거하는 항산화효소로서 산화스트레스에 대한 지표로 이용되며, 월별 가두리 양식어류의 SOD활성을 조사한 결과 7월과 8월 참돔은 각각 $22.9, 23.0 \pm 1.0$ U/mL, 7월과 9월의 조피볼락은 각각 $25.7 \pm 3.1, 28.5 \pm 3.5$ U/mL로 나타나 체내 활성산소의 영향은 미약한 것으로 나타났다(그림 64).

결론적으로 적조대비 가두리양식 현장 조사결과 남해안 소재 가두리양식어장의 사육어류관리는 적조대비 고수온기 먹이 미공급, 밀도조절 등 적조대응 사육관리매뉴얼을 준수하고 있는 것으로 판단된다.

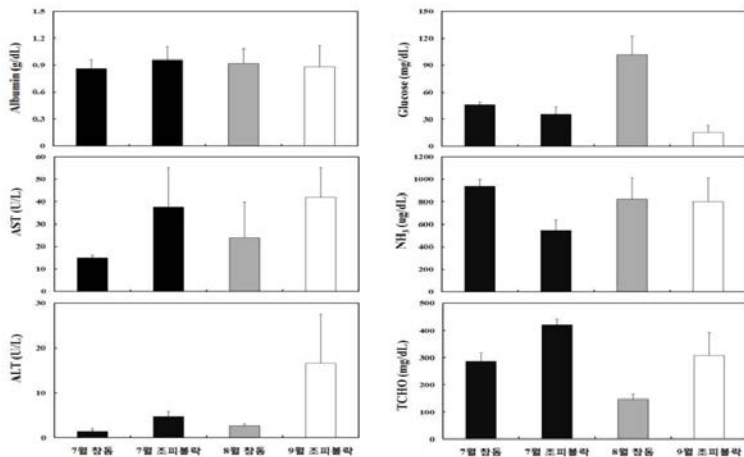


Fig. 63. Change of blood composition of cultured animal in floating net cage.

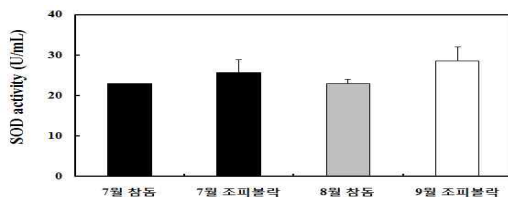


Fig. 64. SOD activity of cultured animal in floating net cage.

6) 적조대비 가두리 양식생물 절식 및 비절식 효율성 비교 및 절식 후 회복도 분석

가) 참돔, 넙치 및 전복의 섭식과 절식에 따른 성장과 회복도

하계 적조시기의 적조 지속기간을 고려하여 8주간의 절식 후 4주간의 섭식을 통한 성장과 회복도를 조사한 결과, 참돔의 섭식구는 실험개시 시 983.9 ± 31.4 g에서 1039.6 ± 32.4 g으로 5.7%의 체중 증가를 보인 반면 절식구는 0.1%의 체중 감소를 나타냈다. 하지만 절식구의 회복 4주간 체중 증가는 16%로 섭식구의 8.7%보다 높게 나타나 보상섭식의 영향을 받은 것으로 사료된다. 섭식구의 체장은 지속적으로 증가하였고 절식구는 절식기간 감소 후 사료공급 이후 증가하였다(그림 65).

넙치는 실험 종료시 섭식구 32.3%, 절식구 24.6%의 체중 증가를 보였다. 하지만 회복 4주간 체중증가는 섭식구 23.5%에 비해 절식구 37.9%로 높게 나타났다. 체장은 종료 시 유의한 차이가 없었다(그림 65).

절식 8주 동안 전복의 체중은 93.7g에서 88.6g으로 5.4% 감소하였으며, 회복 2주 후에는 차츰

증가하기 시작하여 절식 후 3.6% 증가하였다(그림 66).

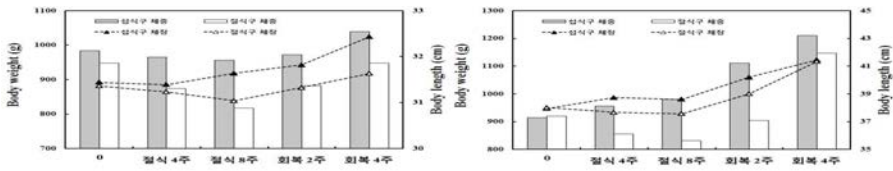


Fig. 65. Growth of red sea bream(left) and flounder(right) with feeding and starvation.

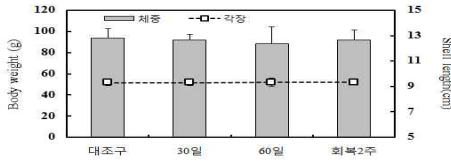


Fig. 66. Growth of abalone with feeding and starvation.

나) 산소소비 변화

4주간 절식시킨 참돔과 넙치의 산소소비 경향은 먹이공급 유무에 따라 차이를 나타냈으며, 참돔 섭식구와 절식구는 각각 262.4~331.4, 138.8~308.3 mg O₂/kg/hr의 범위를 나타내어 절식그룹의 산소소비는 섭식그룹에 비해 7~47%의 감소를 나타내었다. 넙치는 산소소비는 섭식구와 절식구에서 각각 96.9~237.0, 17.2~110.6 mg O₂/kg/hr의 범위를 보였으며, 섭식그룹에 비해 53~82% 감소를 보여 절식에 따라 대사량 감소를 나타내었다(그림 67). 참돔과 넙치의 섭식 직후 산소소비는 표준대사와 비교하여 참돔 42.8%, 넙치 121.9%로 높게 나타나 먹이공급이 산소소비의 대사활성에 영향을 나타냈다(그림 68).

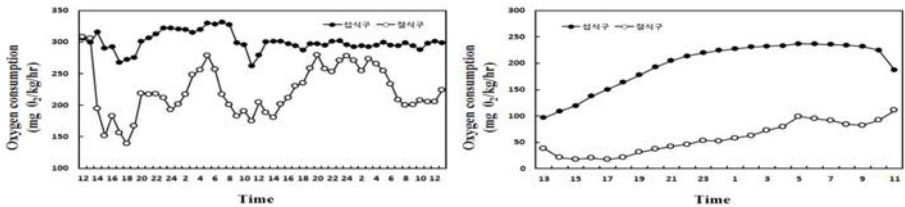


Fig. 67. Pattern of oxygen consumption in red sea bream(left) and flounder(right).

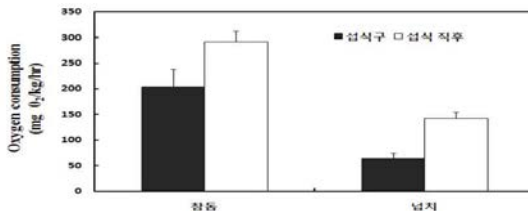


Fig. 68. Comparison of oxygen consumption between feeding and after feeding immediately.

다) 혈액학적 조사

참돔의 섭식구와 절식 후 사료 공급을 통한 혈액성상의 변화를 비교하기 위해 혈액내 알부민(albumin), AST, ALT, 글루코스, 암모니아 및 총콜레스테롤을 분석하였다. 참돔의 혈중 알부민은 절식시기에 영양결핍으로 인해 다소 감소경향을 보였으나 회복시기에 증가하여 영양상태에 따른 변화를 나타냈다. 그러나 AST, ALT, 글루코스 등 다른 혈액성분 지표는 섭식과 절식에 따라 변화는 나타내었으나 실험기간동안 유의한 차이는 나타나지 않았다(그림 69). 넙치의 경우에도 혈중 알부민은 절식시기에 영양결핍으로 감소하고, 회복시기에 증가하여 영양상태에 따른 변화를 나타내었으며, 혈액성상의 변화는 참돔과 유사한 경향을 보였다(그림 70). 전복의 절식과 회복에 따른 혈액학적 변화를 분석한 결과(그림 71) 글루코스가 절식에 따라 감소하였으며 회복 후 증가하는 경향을 보였다. 이는 절식 후 먹이공급에 따른 에너지증가인 것으로 여겨진다. 암모니아질소는 절식 4주째까지 유의한 변화를 보이지 않았으나 절식 8주째 유의한 증가를 보여 절식의 지속에 따라 체내 대사에너지로서 단백질이 이용된 것으로 여겨지며 회복 후 당대사로 변화하면서 암모니아질소가 감소한 것으로 여겨진다.

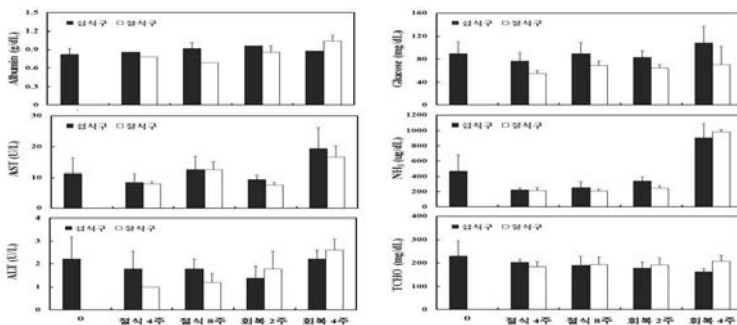


Fig. 69. Change of blood composition of red sea bream with starvation and recovery.

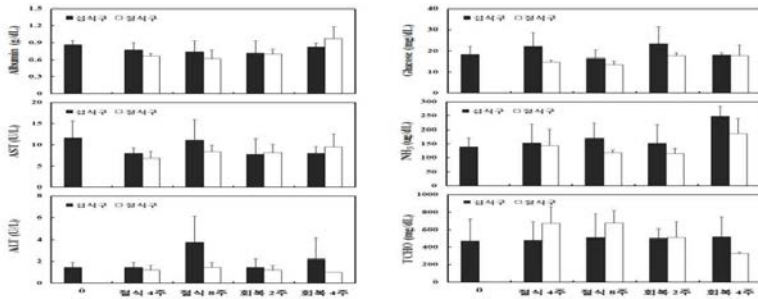


Fig. 70. Change of blood composition of flounder with starvation and recovery.

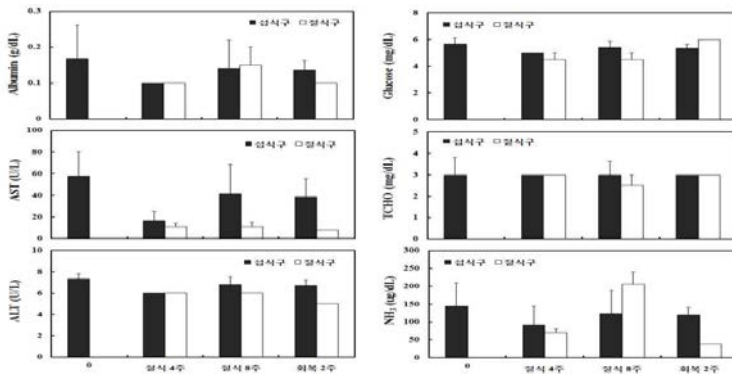


Fig. 71. Change of blood composition of abalone with starvation and recovery.

라) SOD활성 조사

참돔과 넙치의 항산화효소반응은 섭식구와 절식구의 실험구간별 유의한 차이를 나타내지 않았다(그림 72).

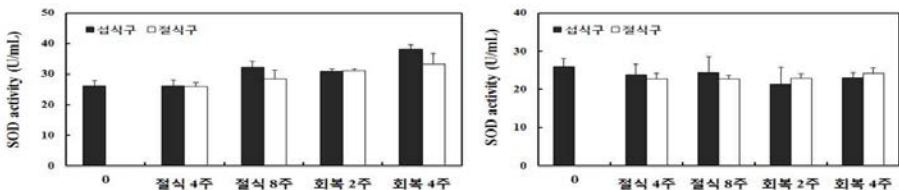


Fig. 72. SOD activity of red sea bream(left) and flounder(right) with starvation and recovery.

마) 조직학적 조사

그림 73는 양식생물의 섭식 및 절식 후 회복에 따른 간의 조직병리학적 변화를 나타낸 것이다. 넙치 성어의 절식기간별 간의 병리조직학적 분석 결과 절식 4주째에 간세포 비대, 간세포 핵 응축, 간체장 효소원과립 감소 등이 관찰되었으며, 절식 8주째에는 간세포 비대, 효소원 과립 감소 및 간체장의 괴사현상이 관찰되었으나 절식 후 먹이공급에 따라 2주 째 간체장 선세포가 회복되고 간체장내 효소원과립이 증가하고 먹이공급 4주 째에는 간세포가 대부분 회복하였다.

참돔의 경우에는 절식 4주째에 간세포 비대 및 공포화, 간세포핵 응축, 흑색대식세포(별표)가 출현하고 간체장 효소원과립 감소가 관찰되었다. 절식 8주째에는 간세포핵 응축, 흑색대식세포 출현, 간체장 선세포 괴사(별표), 간조직 내 점상출혈, 간체장 괴사 등이 관찰되었으나 절식 후 먹이공급 2주 째에 간체장내 효소원과립 증가하고 간세포가 차츰 회복하기 시작하였으며, 절식 후 먹이공급 4주 째에는 간세포의 대부분이 회복되는 것으로 관찰되었다.

전복 간체장의 조직병리학적 변화 결과 절식 4주째 호염기성과립세포가 감소(별표)하였으며, 절식 8주째에는 호염기성과립세포 괴사(별표)가 관찰되었다. 그러나 절식 후 먹이공급 2주 째부터 호염기성 세포 증가하고, 먹이공급 4주 째 호염기성세포 및 호염기성과립 증가가 관찰되어 절식에 따른 회복이 빠르게 진행되고 있는 것으로 판단된다

결론적으로 적조대비 가두리 양식어장 관리를 위해 적조발생시기 먹이 공급 중단을 권유하고 있다. 이에 대한 타당한 자료를 확보하기 위해 넙치, 참돔 및 전복을 대상으로 8주 절식 후 회복가능성에 대하여 성장, 혈액학적, 조직학적 변화 및 산소소비 특징을 분석한 결과 절식기간 동안 체중감소 및 간의 조직병변이 나타나기는 하였으나 먹이 재공급 2주 후부터 회복되기 시작하여 4주째에는 완전히 회복되는 것으로 나타났다. 따라서 적조발생시기 먹이공급중단은 일정기간동안 사육어류의 생리특성에 특이한 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

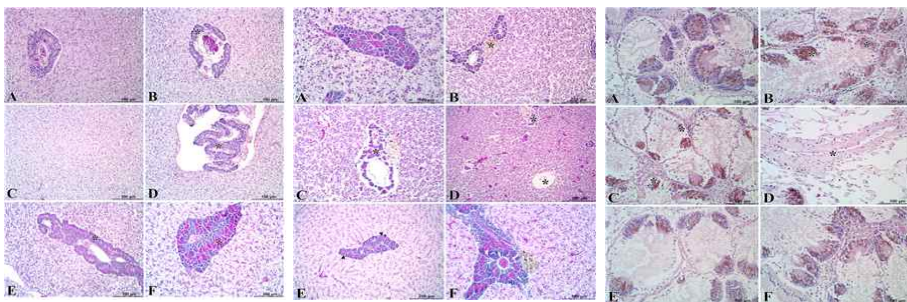


Fig. 73. Histopathological changes of liver of cultured animal with recovery period. (left: flounder, middle: red sea bream, right: abalone). A: beginning. B: starvation 4 week. C, D: starvation 8 week. E: recovery 2 week. F: recovery 4 week.

사. 양식어장 맞춤형 적조대응 매뉴얼 작성

가두리양식장 및 육상양식장 적조대응 매뉴얼은 2014년부터 2016년까지 매년 발간 (그림 74)

하여, 어류양식장과 전복양식장의 적조발생 단계별 대응요령 및 조치사항을 제시하였다. 그리고 적조 발생 전 양식관리요령 (사료공급, 질병관리 등), 적조 직전 준비사항 (임시대피지 확인, 긴급방류 신청, 액화산소 준비 등), 적조 발생 후 대처요령 (신속한 피해신고 및 폐사체 처리법 등)을 적조 발생단계에 따른 양식장 관리요령 전파하였다. 또한 적조대응 매뉴얼 배포와 함께 어업인 현장 교육을 통한 능동적 대응으로 적조의 의한 피해 최소화에 기여하였다. 적조 발생 전 5월말에 적조대응 매뉴얼 900부를 발간하고, 포스터 400부(육상수조식 양식장 200부, 해상가두리 양식장 200부)를 제작하여 경남권역 전체 (통영시, 거제시, 남해군 중심)를 순회하면서 현장 방문 기술설명회를 개최하였다.



Fig. 74. Publication of manual for red tide control and support of field technology.

4. 적조피해저감 경제성 분석

가. 적조 피해 저감 방안별 경제성 분석

경제성 분석은 편익 대비 비용의 비율인 편익비용비율(BCR)을 통하여 산정하였다. 각 방안별로 발생하는 편익과 비용을 산정하고, 편익을 비용으로 나누어 추정하였으며, 편익비용비율이 1이 넘으면 해당사업은 경제성이 있는 것으로 판단된다(표 19).

Table 19. Economic analysis with different plan for decrease of the damages of red tide

방안	1ha당편익(B)	1ha당 비용(C)	편익비용비율(B/C)
해상어류가두리 황토살포 방안	429,217천 원	22,915천 원	18.73
황토살포 적조 방제효과 경제성 분석	324,462천 원	22,915천 원	14.16
해상어류가두리 수층조절 방안	429,217천 원	2,861천 원	150.02
해상어류가두리 임시이동 방안	177,053천 원	2,900천 원	61.05

해상어류가두리 황토살포 방안의 경제성 분석 결과, 단위면적당(1.0ha) 총비용 22,915천원, 저감 편익 429,217천원으로 비용편익비율(BCR)이 18.73으로 나타나 황토 살포를 통한 적조 저감 방안은 경제성이 있는 것으로 판단된다. 해상어류가두리 적조 방제효과의 경제성 분석 결과, 적조에 효과적으로 대응하여 적조 피해를 보지 않은 해상어류가두리 어가의 방제 효과로서 BCR이 14.16로 나타나 황토살포의 방제효과가 있는 것으로 추정된다. 해상 양식가두리 수층 조절 방안의 비용편익비율(BCR)은 150.02로 매우 높게 나타났으나 해당 방식을 이용하는 어업인의 수가 적고, 이에 대한 어업인의 이해도도 낮아 향후 추가적인 실험 및 조사가 필요할 것으로 판단된다. 아울러 적조 발생 시 어장을 임시로 이동하는 가두리 임시 이동 방안의 비용편익비율(BCR)은 61.05로 높게 나타났으나 가까운 곳에 이동적지가 있는 어가가 제한적이어서 본 방안을 확대하는 데에는 한계가 있다

나. 적조 피해 유무에 따른 어장별 효율성 분석

자료포락분석(DEA)과 순위합검정 결과, 적조 피해어가와 미피해어가 간에는 생산 및 경영 효율성에 있어 통계적으로 유의한 효율성 차이가 존재하는 것으로 나타났다(표 20). 즉 피해어가의 경우 미피해어가에 비해 순수기술효율성이 69% 수준으로 약 30% 정도나 낮게 나타나 적조 피해의 유무가 개별 어가의 생산 및 경영 효율성에 상당한 영향을 미치고 있는 것으로 추정된다.

Table 20. Assessment of effectiveness with different aquaculture farm

	효율성 평균
피해어가 평균	0.6610
미피해어가 평균	0.9621
피해어가와 미피해어가의 효율성 차이 (순위합 검정)	0.3011 (p-value: 0.0085)

5. 적조생물 실내 대량배양 연구 및 전기자극 적조 생물 구제 시스템 개발

가. 적조생물 실내 대량배양 연구 및 기초조건 구명

적조생물을 실내에서 대량배양하기 위하여 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides*의 순수 배양 종주 2개 확보(통영, 부산)하였으며, 적조생물의 대량배양체 확보 성공(최종 배양밀도 5,000 cell/mL×500L)하였다. 적조생물 배양체 분양 실적은 국립수산물과학원 수산해양정보과의 광과장 특성실험(40L, 5,000 cell/mL), 적조 구제물질연구(60L, 5,000 cell/mL)에 실시하였다. 적조생물 성장률 측정 결과 수온 22℃, 염분 32, 광량 100 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 배지 f/2 medium, 초기농도 1,000 cells/mL이었으며, 최대성장률은 접종 4일 이후 지수성장기 확인, 최대 성장률 0.43 div./day이었다. 적조생물 대량배양 관련 연구 결과, 평균공기 주입 배양식 최대 수확밀도 약 30~40% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 500 L 수조 배양 시 표층에 고밀도 패치 유지되나, 전 수층에 고농도 배양이 어려웠는데, 표층에 최대 20,000 cells/mL 집적, 전 수층에 5,000 cells/mL 유지 상태로 형성되는 것으로 나타났다. 300 L 수조에서 전체적으로 10,000 cells/mL 정도 배양이 되었

으나 대규모 수조에서 안정적배양을 위한 조건구명 필요하며, 옥외 배양 시 2,000 cells/mL 밀도 이후 타 nano flagellate로 인해 오염 천이되고, 옥외배양보다 실내 배양으로 증량하는 것이 적합한 것으로 나타났다.

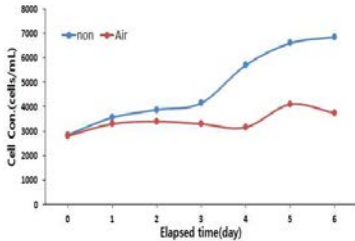


Fig. 75. Cell concentration with injection of sterilized air.



Fig. 76. Mass culture of *Cochlodinium polykrikoides*.

적조생물 대량배양을 위한 기초조건을 구명하기 위하여 적조생물 대량배양 광도를 75 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 맞춘 후, 5개 온도 조건(10, 15, 20, 25, 30°C)과 6개 염분 조건(10, 15, 20, 25, 30, 35 psu)에서 초기 배양 농도 500 cells/mL의 코클로디니움으로 실험을 수행하였다. 코클로디니움은 25°C, 30 psu에서 0.3 d-1의 최고 성장률을 보였다. 10°C에서는 코클로디니움을 처음 접종한 직후부터 개체수가 급격히 감소하였고 10일 이상 지난 다음에는 거의 일정하게 유지되었다. 10 psu에서 가장 급격하게 감소하였으며(-0.3 d-1), 염분이 증가하면서 감소하는 속도가 조금씩 완만하고, 염분이 낮을수록 성장률에 더 악영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 15°C에서는 염분에 상관없이 거의 일정한 성장률을 보였으며, 10, 15 psu에서는 접종 후 성장이 지체되기도 하였으나 안정을 찾은 후 곧 성장을 시작하였다. 30 psu에서 -0.12 d-1로 가장 안정적인 성장을 보였다. 20°C에서는 전반적으로 높은 성장률을 보였는데, 접종 후 성장 지체 현상도 거의 나타나지 않았고 가장 안정적인 성장률을 보였고, 성장 속도는 25, 30 psu에서 0.29 d-1로 가장 높았다. 25°C에서도 성장 지체 현상 없이 접종 후 바로 성장하였으며, 30 psu에서 가장 높은 성장률을 보였다. 10 psu에서 성장율이 가장 낮았으며 염분이 증가할수록 증가하다가 30 psu에서 0.3 d-1로 최대 성장률을 보였으며, 30 psu보다 높은 염분에서는 다시 성장률이 감소하였다. 30°C에서는 10°C와 마찬가지로 코클로디니움 접종 직후 약 10일 가량 개체수가 급격히 감소하였는데, 10일 이후 안정을 찾은 후에는 개체수가 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 초기 감소율은 10 psu에서 가장 컸으며, 염분이 증가할수록 감소율이 완만해져 30 psu에서 감소율이 가장 완만하였다.

전반적으로 성장률은 20-25°C, 30 psu에서 가장 높았고, 염분보다 온도에 따른 변화가 더 뚜렷하였으며, 25°C보다 높거나 15°C보다 낮으면 성장이 잘 이루어지지 않거나 급격히 감소하였다. 염분 스트레스도 존재하였으며 30 psu를 중심으로 이보다 낮아지거나 높아지면 성장률이 감소하였다. 열대 해역의 해수 환경이 25°C 이상, 30 psu 이상임을 고려해 볼 때, 본 연구팀이 보유하고 있는 코클로디니움은 열대해역에서 정상적으로 성장하지 못할 것으로 판단되며, 이는

국내 연안의 코클로디니움 일부에서 제기되고 있는 열대해역 기원설과 달리 국내 연안에 자체적으로 성장하였을 가능성을 시사하고 있다.

따라서 코클로디니움 성장률은 코클로디니움 종주의 채집 장소에 따라 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 본 실험 결과와 달리 일부 종주는 15, 20 psu의 매우 낮은 염분에서 최대성장율을 보였고 이는 반복된 실험에서도 되풀이 되어 나타났다. 결국 종주에 따라 생태 특성에 뚜렷한 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 21. Maxmum growth rate of *Cochlodinium polykrikoides* with salinity and temperature

PSU	온도(℃)				
	10	15	20	25	30
10	-0.3	0.11	0.16	0.02	0.11
15	-0.21	0.09	0.2	0.1	0.11
20	-0.15	0.11	0.18	0.2	0.08
25	-0.13	0.09	0.29	0.23	0.05
30	-0.13	0.12	0.29	0.31	0.09
35	-0.13	0.12	0.18	0.18	0.07

나. 적조생물 대량배양 조건 탐색 및 대량배양 기술 확립

1) 영양염 농도별 최적성장조건 규명

질소 영양염 농도별 최적성장조건 실험 결과, 성장에 있어 질소 농도에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(그림 77).

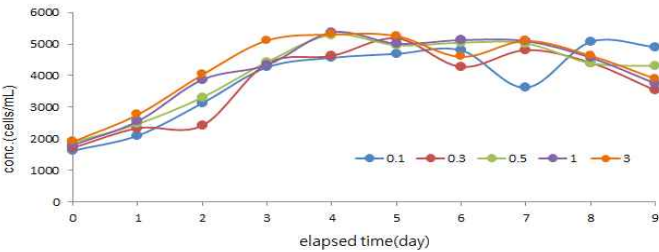


Fig. 77. Growth of *Cochlodinium polykrikoides* with different nitrogen nutrient levels.

인 영양염 또한 농도별 성장 효율의 차이를 나타내지 않았다(그림 78).

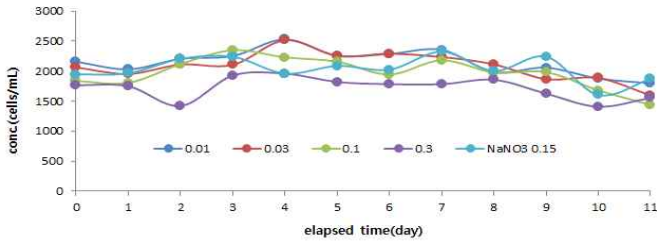


Fig. 78. Growth of *Cochlodinium polykrikoides* with different phosphorus nutrient levels.

적조생물의 최적 성장조건을 규명하기 위하여 교반조건이 적조생물의 성장에 영향을 미친다는 것을 찾았으며, 최적 교반조건을 찾기위하여 에어버블을 조사하였다. 에어버블 60 bubbles 공급 시 최대세포량 8,000 cells/mL까지 나타났으며, 다른 조건 대비 2~8배 최대밀도 향상 효과를 확인하였다(그림 79).

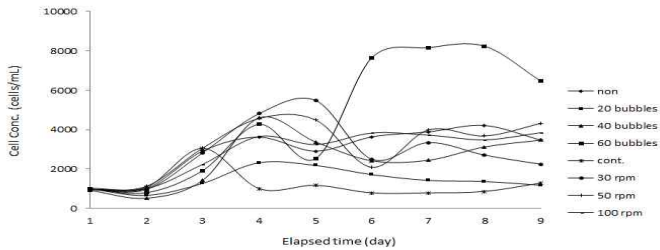


Fig. 79. Growth pattern with supply of air bubble.

에어버블 직경에 따른 성장 패턴 확인 결과, 1 mm의 작은 직경 시 성장이 저해되고 체인 파괴가 유도되었지만, 10 mm의 큰 직경 조건에서는 고밀도 성장이 유도되었다 (그림 80).

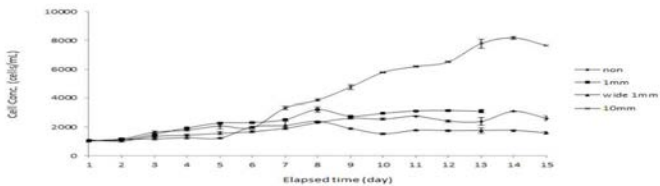


Fig. 80. Growth pattern with diameter of air bubble.

2) 적조생물 대량배양 시스템

적조생물의 최적 성장 조건 결과를 토대로 적조생물의 대량 배양체 적조생물 농도 5,000 cells/mL을 기준으로 500 L 배양체를 확보하고, 세계 최초 대량배양체 확보 보도자료 기재하였다 (TV 뉴스포함 26건 보도).

적조생물 대량배양 시스템 구축을 위하여 물리·화학적, 생물학적 배양 조건을 조사하였다. 성장 우수 코클로디니움 배양주 선별을 위해 확보한 6개의 배양주 중 남해연구소 배양주의 성장이 가장 우수하여 대량배양주로 선정하였다. 배양조건은 f/2배지, 수온 24~25℃, 염분 32, pH 8.0, 광도 100 $\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (형광등연속)이었으며, 배양주는 동해 1개(YD), 통영 2개(남해연, 통영-2), 거제 1개(DP), 남해 1개(MJ), 여수 1개(DS)였다. 물리·화학적, 생물학적 대량배양 조건 탐색을 위해 물리적 조건으로 일반 사각배양용기에 비하여 내부의 배양액에 원환이 상하층 순환되도록 개발한 원형플라스크에서 배양주의 성장이 약 1.6배 우수하였다(특허출원 중). 같은 광량(100 $\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 연속)조건에서 12개의 다양한 광원에 대한 성장검토결과 메탈할라이드 등에서 최고성장을 보여 주었다. 또한 미세전기자극 및 자기장자극(100~2,000가우스, 5개 구간)은 뚜렷한 성장촉진 효과를 보여주지 않았다(그림 81~83).

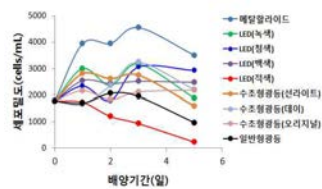
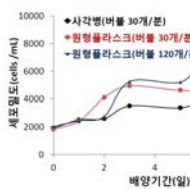
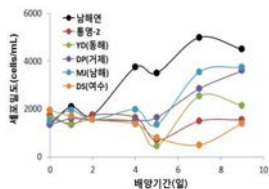


Fig. 81. Growth with culture origin. Fig. 82. Growth with culture tank. Fig. 83. Growth with kind of light.

화학적 조건으로 배지농도 검토결과 최고밀도는 f/2배지에서 11,000 cells/mL, f/8에서는 7,000 cells/mL이었으며, 고밀도 배양에는 f/2배지가 필요하다. 셀레늄 (0.5~5 μM)은 미첨가 대비 약 117~130% 밀도가 증가하였으며 (그림 84), 체인 (4체인) 형성비율도 102~137% 높았다. 시스테인의 14종 아미노산 첨가결과 성장에 뚜렷한 촉진효과를 보여주지 않았으며, 페닐알라닌은 저해효과를 보여주었다.

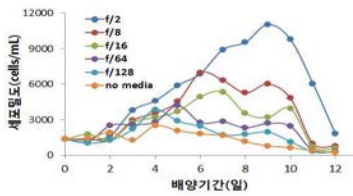
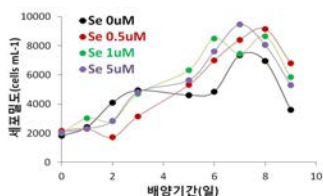


Fig. 84. Growth with additive concentration Fig. 85. Growth with concentration of culture medium of selenium.

생물적 조건으로 남해서부해역에서 해수 및 퇴적물에서 분리 군주 185개를 첨가하여 성장조 사결과 뚜렷한 효과 없었다. 물리·화학적 조건을 종합하여 1L배양용기에서 11,000~13,000

cells/mL 배양주를 확보하였다(그림 85).

적조생물 대량 배양체 확보 및 안정적 배양시스템 구축을 위해 500리터 대량배양 수조 및 20리터 소형수조에 코클로디니움 5,000 cells/mL 이상을 확보하였으며(그림 86), 적조생물 배양체 분양은 14회, 395리터를 조선대, 전남대, 성균관대, 인천과학고, 기후변화연구과, 남동해연 등을 대상으로 분양하였다.



Fig. 86. 500L mass culture(left) and 20L small size culture(right).

다. 전기자극 적조생물 구제 시스템 개발 및 해양환경 변화 구명

전기자극에 의한 코클로디니움 구제 메커니즘 연구를 위해 교류전류 주입시 양극사이에 전계된 전기장에 의해 그림 87과 같이 코클로디니움이 제거 되는 것을 현미경으로 직접 확인하였다

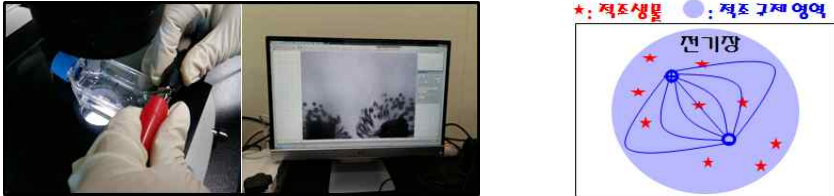


Fig. 87. Microscopic photograph of *Cochlodinium polykrikoides* with alternating current(left), Diagram for control of red tide algae by alternating current(right).

코클로디니움 구제를 위한 최적 전기조건 탐색결과 전기자극에 따른 환경변화를 측정한 결과(표 22) 10분 자극시 대조구 대비 환경변화의 차이는 보이지 않았다. 최적 극간 간격을 알아보기 위해 극간간격에 따른 전류량 전극조건탐색을 수행하였고(그림 88), 처리조건은 60Hz, 3초간 아르곤용접봉(지름 1.6, 2.0, 3.2mm)을 여과해수에 8cm 깊이로 고정하여 측정하였고, 5cm 간격 이후부터 전류량의 감소폭이 줄어드는 경향을 보였다.

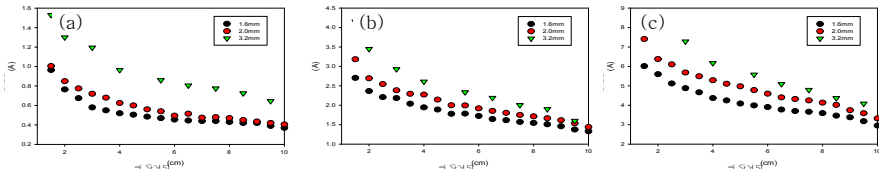


Fig. 88. Current amount change with distance between electrodes ; (a) 5V, (b) 12V, (c) 24V.

Table 22. Changes of temperature, salinity, DO and pH with electrostimulation

		수온(℃)		염분		DO(mg/L)		pH	
		평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
대조구	대조구1	16.4	0.0	33.4	0.0	7.1	0.0	8.00	0.03
	대조구2	16.4	0.0	33.2	0.0	7.1	0.0	8.07	0.02
	대조구3	16.8	0.0	33.4	0.0	6.9	0.0	8.17	0.03
1V (0.1A 이하)	1분	16.6	0.0	33.4	0.0	7.1	0.1	8.16	0.02
	5분	16.8	0.0	33.4	0.0	6.9	0.0	8.17	0.02
	10분	17.4	0.0	33.4	0.0	6.8	0.0	8.17	0.02
2V (0.2-0.3A)	1분	17.1	0.0	33.4	0.0	6.9	0.0	8.09	0.02
	5분	17.0	0.0	33.2	0.0	6.8	0.0	8.01	0.02
	10분	17.0	0.0	33.4	0.0	6.9	0.0	8.00	0.02
5V (0.7-1.1A)	1분	16.9	0.0	33.4	0.0	7.1	0.0	8.00	0.02
	5분	16.7	0.0	33.4	0.0	7.0	0.0	8.01	0.01
	10분	16.7	0.0	33.4	0.0	7.0	0.0	8.03	0.00
10V (2.4-2.8A)	1분	16.7	0.0	33.3	0.0	7.0	0.0	8.04	0.00
	5분	17.2	0.0	33.2	0.0	6.9	0.0	8.00	0.00
	10분	17.7	0.0	33.2	0.0	6.9	0.0	7.97	0.00
12V (3.0-3.5A)	1분	16.6	0.0	32.7	0.1	7.1	0.0	7.92	0.01
	5분	17.3	0.0	33.1	0.0	7.0	0.0	7.92	0.00
	10분	18.6	0.0	32.7	0.0	6.9	0.0	7.91	0.01

전극별 구제효과의 조사는 7개 전극(구리, 은, 알루미늄, 금도금, 스테인레스, 철, 텅스텐)을 이용하였고, 구리와 은이 다른 전극에 비해 높은 효율을 나타내었다(그림 89).

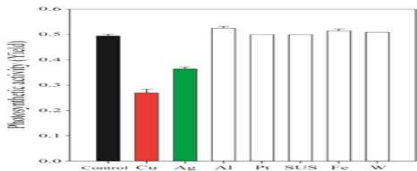


Fig. 89. Difference of control efficiency with 7 electrode(copper, silver, aluminum, gilding, stainless, steel, tungsten).

최적 전기자극 조건을 찾기 위해 2가지 종류의 교류전압(지속자극, 순간자극)으로 구제효율실험을 수행하였고, 순간자극이 90%이상의 높은 효율을 나타내었다(그림 90). 전기자극에 의한 동물플랑크톤 및 어류 영향조사에서 동물플랑크톤(알테미아)는 5%에 영향, 어류(돌돔, 감성돔

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

- 본 연구는 적조생물에 의한 양식생물 폐사 메커니즘 구명을 구명하고, 육상 및 가두리 양식장 적조대응 매뉴얼을 발간 보급하여 적조생물에 의한 양식 생물의 적조피해 저감을 통해 수산피해 최소화하는데 목적이 있다.
- 연구기간동안 주요 양식생물인 참돔, 조피볼락, 방어, 취치, 농어 및 전복을 대상으로 적조생물에 의한 폐사기작과 폐사를 일으키는 적조생물의 밀도 등을 구명하였으며, 육상양식장과 가두리양식장의 적조대응 관리방안 등의 연구 결과를 근거로 매뉴얼을 작성 발간하여 어업인 교육을 매년 실시하여 유해 적조예방을 위한 신속한 대응으로 양식생물 피해 최소화에 기여하였다.
- 또한 적조 미발생시를 대비하여 적조생물인 *Cochlodinium polykrikoides*의 대량배양기술을 확립하여 적조관련 연구에 많은 기여를 하였다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 경제·산업적 측면에서
 - 적조생물에 의한 양식어류 피해 최소화를 통한 안정적 수산물 생산 기여
 - 유해 적조에 의한 양식생물 폐사방지로 연간 약 100억원의 예산절감 효과로 양식산업 안정화 및 어가소득 증대 기여
 - 폐사 유발 적조생물 농도 규명을 통해 적조재해에 대한 대비가 가능하다
- 수산정책 개발적 측면에서
 - 적조피해 저감기술 개발로 국가 및 지자체 정책자료 및 양식재해보험 기초자료로 활용할 수 있으며
 - 적조 재해에 대한 집중적인 예방 대책 수립에 활용 할 수 있다.

제 6 장 참고문헌

- Bader H., and J. Hoigné. 1982. Determination of ozone in water by the indigo method: A submitted standard method. *Ozone: Science and Engineering*, 4(4), pp. 169-176.
- Cho, M., H.M. Chung, J.Y. Yoon. 2002. Effect of pH and importance of ozone initiated radical reactions in inactivating *Bacillus subtilis* spore. *Ozone: Science and Engineering*, 24, 145-150.
- Eisenberg G., 1943. Colorimetric determination of hydrogen peroxide. *Industrial and Engineering Chemistry Analytical Edition*, 15, 327-328.
- Guillard R.R.L. 1975. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. *Culture of Marine Invertebrate Animals*, 29-60.
- Guillard R.R.L., and J.H. Ryther. 1962. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana hustedt*, and *Detonula confervacea*(cleve) *gran*. *Canada Journal of Microbiology* 8(2), 229-239.
- Honjo, T., N. Imada, Y. Anraku, D.I. Kim, M. Muramatsu and Y. Oshima. Removal of harmful red tide plankton by ozone treatment. *Harmful Algae.*, 525-527.
- Hoigné J., and H. Bader. 1994. Characterization of water quality criteria for ozonation processes. Part2: lifetime of added ozone. *Ozone: Science and Engineering*, 16(2), 121-134.
- Kim, C.S., S.G. Lee, C.K. Lee, H.H. Kim and J. Jung. 1999. Reactive oxygen species as causative agents in the ichthyotoxicity of the red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. *Journal of Plankton Research*, 21(11), 2105-2115.
- National Fisheries Research & Development Institute(NFRDI), 2004. Monitoring, management and mitigation of red tide. Annual report of NFRDI on red tide of Korea, Busan, Korea
- Pan G., J. Chen, D.M. Anderson. 2011. Modified local sands for the mitigation of harmful algal blooms. *Harmful Algae*, 10, 381-387.
- Park J.Y., H.J. Jeong, Y.D. Yoo, E.Y. Yoon. 2013b. Mixotrophic dinoflagellate red tides in Korean waters: Distribution and ecophysiology. *Harmful Algae*, 30, 28-40.
- Park, T.G., W.A. Lim, Y.T. Park, C.K. Lee and H.J. Jeong. 2013. Economic impact, management and mitigation of red tides in Korea. *Harmful Algae*, 30, 131-143.
- Schneider, K.R., R.H. Pierce and G.E. Rodrick. 2003. The degradation of *Karenia brevis* toxins utilizing ozonated seawater. *Harmful Algae*, 2, 101-107.
- Sengco, M.R., A. Li, K. Tugend, D. Kulis, D.M. Anderson. 2001. Removal of red- and brown-tide cell using clay flocculation laboratory culture experiments with *Gymnodinium breve* and *Aureococcus anophagefferens*. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 41-53.
- Sun X.X. K.N. Han, J.K. Choi, E.K. Kim. 2004. Screening of surfactants for harmful algal blooms

mitigation. Marine Pollution Bulletin, 48, 937-945

Wu, Z., H. Shen, B. Ondruschka, Y. Zhang, W. Wang and D.H. Bremner. 2012. Removal of blue-green algae using the hybrid method of hydrodynamic cavitation and ozonation. Journal of Hazardous Materials., 235-236, 152-158

국립수산과학원 적조정보시스템(<http://portal.nfrdi.re.kr/redtide>)

녹색경남(<http://green.gsnd.net>)

강민수, 김성철, 우승희, 이동근. 고정화된 광촉매를 이용한 수중 조류의 증식억제에 관한 연구. 대한환경공학회 추계학술발표논문집 1999, pp.233-234

강성재, 임성일, 이병현. 미세스크린과 오존을 이용한 적조생물 제거. 한국수처리기술연구회 2001, 9(4), pp. 11-17

강재신, 강성호, 이윤호, 심정희, 이상훈. 중과 자외선에 노출된 남극 규조 *Chaetoceros neogracile*와 *Stellarima microtrias*의 성장과 질산염 흡수량의 변화. 한국조류학회 2003, 18(1), pp. 13-20

김동윤, 박태주, 임정아, 윤정효, 김영탁. 오존화에 의한 microcystin-LR 분해특성. 대한환경공학회 1999, 21(4), pp. 711-718

김신웅, 이우미, 신유진, 안운주. 자외선에 노출된 광반응성 나노물질 생태독성 연구. 대한환경공학회 2012, 34(1), pp. 63-71

김영웅, 손희종, 유명호, 김영희, 정종문, 김철. 회전 광촉매반응기를 이용한 조류부산물 제거특성에 관한 연구. 한국물환경학회 2001, 17(2), pp. 215-227

김은호, 성낙창, 최용락. 조류의 오존산화에 관한 연구. 한국생명과학회지 1999, 9(5), pp. 590-595

김은호, 성낙창, 최용락. 조류 부산물중 2-MIB의 제거에 관한 기초연구. 동아대학교농업생명자원연구 1999, 8, pp. 37-43

김진한. 수중 생물에 대한 과산화수소의 독성 평가. 한국관리학회 2008, 14(4), pp. 189-195

박세진, 차일권, 윤태일. 정수처리공정에서 조류유래 유기물질의 제거. 대한환경공학회 2005, 27(4), pp. 377-384

박영미, 권오창, 박정원, 정규영, 이종은, 서을원. 저출력 초음파가 *Microcystis* sp.(Cyanobacteria)에 미치는 영향. 한국환경생물학회 2013, 31(2), pp. 113-120

박현진, 김영화, 이재화. 자외선 조사에 의해 유도된 미세조류 *Arthrospira platensis* 변이주의 특성. 한국공업화학회. 2012, 23(5), pp. 496-500

심주현, 서형준, 권병대. 초음파에 의한 2중 수조에서의 조류제거효율에 관한 연구. 대한환경공학회 2006, 28(12), pp. 1310-1315

한태준. 자외선이 해조류에 미치는 영향에 관한 고찰. 한국환경생물학회 1999, 17(1), pp. 1-9

통계청: <http://kosis.kr/>, 2015.