

유해적조 실시간 음향탐지 및 관측
네트워크 체계 구축 기술 개발

Development and systematic construction of the acoustic
system for real-time detection of the harmful algal bloom

2014. 12. 31

한 국 해 양 과 학 기 술 원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “유해적조 실시간 음향탐지 및 관측 네트워크 체계 구축 기술 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2014. 12. 31

총괄연구책임자 : 강 돈 혁

참 여 연 구 원 : 정승원, 이윤호, 강형구,
최희정, 노재훈, 조성호, 오선택, 정다금,
김미라, 윤영글, 정길아, 이유철, 김하나

보고서 초록

과제고유 번호	PE99216	해당단계 연구기간	2014.09 ~ 2014.12	단계 구분	1단계 / 1단계
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	미래해양생물자원 개발			
	세부과제명	유해적조 실시간 음향탐지 및 관측 네트워크 체계 구축 기술 개발			
연구책임자	강 돈 혁	해당단계 참여연구원수	총 : 14명 내부: 6명 외부: 8명	해당단계 연구비	정부: 200,000천원 기업: 천원 계 : 200,000천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 14명 내부: 6명 외부: 8명	총 연구비	정부: 200,000천원 기업: 천원 계 : 200,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양방위연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약 (연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	66
<ul style="list-style-type: none"> • 목표 : 유해적조 실시간 음향탐지 및 관측 네트워크 체계 구축 기술 개발 • 기 개발된 prototype 휴대용 시스템을 해상 가두리 운용형 prototype 시스템으로 성능 개량 <ul style="list-style-type: none"> - 부식 방지 재질 적용, 시스템 제어 및 상태 지시부 가시화, 전원 이원화 분리 - 환경 센서 포트 및 자료 통합 보드 (수온/염분/클로로필/광량 등) - CDMA, Wi-Fi 통신 감도 증가를 위한 외장/내장 안테나 탑재 - 디지털 음향 센서부 최적화 • 해상 가두리 운용형 prototype 시스템 제작 및 적조 시료를 이용한 성능 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 가두리 운용형 prototype 시스템으로 성능 개량을 반영하여 총 6 대의 prototype 시스템 제작 - 시스템 내부 구조는 단열 및 방염 재질 적용 및 내부 board의 저전력화 - 통영 MRC에서 성능 평가를 통해 수신 신호 양호 - Microcosm 조건에서의 적조 시료를 이용한 시험 평가에서 시스템 성능 양호 • 유해적조 실시간 관측 체계 구축 및 운용안 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 대상 해역은 적조 대량 피해 지역으로 지역 현안 해결 요구 해역인 통영 연안 선정 - 해류 흐름과 피해 양식장 위치를 고려하여 prototype 시스템 6기 적용 - Multiple 시스템 실시간 제어, 자료 전송망 및 가시화를 위해 연안 3개 지역에서 동시 운영 - 원격 제어, 자료 전송, 자료 가시화 평가 완료 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	유해 적조, 실시간 탐지, 음향 시스템, 관측 체계망			
	영 어	Harmful algal bloom, Real-time detection, Acoustic system, Measurement network			

요 약 문

I. 제 목

유해적조 실시간 음향탐지 및 관측 네트워크 체계 구축 기술 개발

II. 연구개발의 필요성 및 목표

1. 필요성

남해 연안에서 발생하는 유해적조는 매년 막대한 경제적 피해를 유발하고 있다. 최근 피해액은 1995년 764억, 2003년 215억, 2007년 115억, 2013년 247억 원에 이른다(방제 및 간접 비용 제외). 이러한 막대한 피해는 국가 해양 현안문제 해결을 위한 “사회적 기술” 개발의 필요성을 요구하고 있다. 현재 해양수산부에서는 적조 탐지 고비용 구조 개선을 위한 연구 개발을 계획 중에 있다. 또한 남해 연안 지역 사회에서는 현실적인 적조 탐지 체계 운영에 대한 요구가 증대하고 있다.

해양과기원의 기존 적조 연구는 생태계 이해 측면에 집중되어 왔다. 국가 사회적 지역 현안의 문제인 유해적조 탐지 기술 개발은 해양과기원의 사회적 책임성 실현 측면에서 매우 중요한 목표 가운데 하나이다. 또한 최근에 적조 및 유입생물 확산방지 기술 개발을 해양과기원 전략목표 가운데 하나로 결정하였다. 이러한 사회 현안의 해결을 위해 유해적조 실시간 탐지 시스템 실해역 적용 확대가 필요한 시점이다.

2. 목표

본 연구는 남해 연안의 유해적조를 실시간 탐지하는 prototype 시스템(해상 가두리 운용형)을 개발하고, 관측 네트워크 구축을 통한 적조 탐지 네트워크 구축안 제시를 목표로 하고 있다. 이를 위하여 기 개발된 prototype 시스템의 성능 개량 및 복수 시스템을 이용한 통영 연안 해역의 유해적조 탐지를 위한 네트워크 구축안을 제시하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구기간

2014년 9월 1일 ~ 2014년 12월 31일

2. 연구 개발의 내용

- Prototype 유해적조 음향탐지 시스템 성능 개량, 제작 및 성능 평가
 - o 기 개발된 prototype 유해적조 음향 탐지 시스템 성능 개량
 - o 유해적조 prototype 음향 시스템 제작 (해상 가두리 설치용)
 - o 적조 시료를 이용한 성능 평가
- 유해적조 실시간 관측 체계 운용안 구축 및 제시
 - o 유해적조 탐지 관측 체계망 제시 (대상 해역 : 통영)
 - o 유해적조 탐지 자료 전송망 구축
 - o 실시간 관측 체계망 구축 및 자료 가시화 제시

IV. 연구개발 결과

1. 가두리 운용형 Prototype 시스템으로 성능 개량

- 기 개발된 prototype 휴대용 시스템을 해상 가두리 운용형 prototype 시스템으로 성능 개량을 실시하였다. 세부 사항은 다음과 같다.
 - 장기간 운용을 위한 부식 방지 재질 적용
 - 외부에서 시스템 제어 및 상태를 파악할 수 있는 지시부 가시화
 - 운용성 편의를 위한 전원 이원화 분리 (배터리 및 육상 전원 방식)
 - 환경 센서 포트 및 자료 통합 보드 (수온/염분/클로로필/광량 등)
 - 원격 및 근거리 통신을 위한 CDMA, Wi-Fi 적용 및 통신 감도 증가를 위한 외장/내장 안테나 탑재
 - 디지털 음향 센서부의 경량화 및 부식 방지를 위한 최적화 구현

2. Prototype 시스템 제작 및 적조 시료를 이용한 성능 평가

- 가두리 운용형 prototype 시스템의 성능 개량을 반영하여 총 6 대의 prototype 시스템 시범 제작 완료
- 시스템 내부 구조는 단열 및 방염 재질 적용 및 내부 board의 저전력화 구현
- 통영 MRC에서 해상 시험 성능 평가를 통해 시스템의 상태 및 수신 신호 양호 검증
- Microcosm 조건에서의 적조 시료를 이용한 시험 평가에서 시스템 성능 양호

3. 유해적조 실시간 관측 체계 구축 및 운용안 제시

- 대상 해역은 적조 대량 피해 지역으로 지역 현안 해결 요구 해역인 통영 연

안 선정

- 해류 흐름과 피해 양식장 위치를 고려하여 prototype 시스템 6기 적용
- Multiple 시스템 실시간 제어, 자료 전송망 및 가시화를 위해 연안 3개 지역에서 동시 운영
- 원격 제어, 자료 전송, 자료 가시화 평가 완료

V. 연구개발 결과의 활용 계획

- (통영) 지역 현안 문제 해결을 위한 개발된 유해적조 시스템 시범 운영
- 적조 예보 시스템 구축에 실측 자료 제공에 따른 예보 정확도 증대
- 장비 국산화 개발에 따른 시스템 응용 다양화
- 원전의 해양생물 유입 감시망 구축에 활용

S U M M A R Y

I . Title

Development and systematic construction of the acoustic system for real-time detection of the harmful algal bloom (red-tide)

II . Necessities and Objectives of the Study

1. Necessities

Harmful algal bloom (hereinafter called red tide) that happened in coastal water of the South Sea, Korea in every year caused serious damages in economic aspect. Recently, the amount of damages was reached to 63 million US\$ at 1995, 18 million US\$ at 2003, 9 million US\$ at 2007, and 21 US\$ at 2013, respectively (except prevention and indirect cost). These massive damages need necessity of social technology development for solution of national oceanic pending issue. Recently, the Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) has several plans to conduct research programs of improving high-cost methods for rapidly red tide detection or early warning system. Furthermore, local communities adjoining to the coastal water are asking realistic system operation for rapidly red tide detection.

For a long time, Korea Institute of Ocean & Science Technology (KIOST) has been studying for understanding ecological aspect of red tide. The development of technology for rapidly red tide detection, that is social technology development for solution of national oceanic pending issue, is one of the objectives of the KIOST. For the reasons, the real-time red tide detection system in the coastal water for solution of social issue must operate expanded application.

2. Objectives

The purpose of this study was to develop prototype acoustic system for

applying fish farm, and to suggest network construction for red tide detection from measuring network. For the purpose, Performance improvements of the developed prototype portable system are performed and multiple systems were presented the network construction for harmful red tide detection of Tongyeong coastal waters.

III. Contents and scope of the study

1. Period of the study

September 1, 2014 ~ December 31. 2014

2. Contents

- Prototype harmful red tide acoustic detection systems performance improvement, production, and performance evaluation
 - Performance improvement of the developed prototype acoustic detection system harmful red tide
 - Production prototype systems (marine cage installation)
 - Performance Evaluation of a red tide samples
- Real-time observation of red tide detection system operating method proposed
 - Red tide detection system network observations suggest (target area: Tongyeong)
 - Built of red tide detection data transmission network
 - Real-time observation systems and data visualization proposed network construction

IV. Results

1. Performance improvements in marine cage-type Prototype System

The developed a prototype portable system was conducted performance improvements for marine cage-type prototype system. Details are as follows.

- Corrosion-resistant material applied for long-term operation
- Instruction control and visualization system that can manage the system condition
- Dual power supply for interoperability convenience (battery powered, and land)
- Environmental sensor port and Data Integration Board (temperature / salinity / chlorophyll / intensity, etc.)
- CDMA, Wi-Fi application for remote and local communication, External / Internal Antenna for growth communication sensitivity
- Optimized implementations for lightweight and corrosion-resistant of digital sound sensor unit

2. Prototype System Building and Performance Evaluation of red tide samples

- Making a total of six complete prototype marine cage-type system demonstration from performance improvements reflect a portable prototype system.
- Insulation and salt proof material is applied inside the system and low-power implementation of the internal board
- Sea trials evaluating performance in Tongyeong MRC. System status and verify the received signal good
- System Performance Evaluation of blooms well in the red tide sample at Microcosm conditions

3. Real-time tide observation system construction and operating methods proposed

- Massive red tide affected areas and needs solving local issues waters : Tongyeong coast
- Considering the currents flow and damage farm location, six complete prototype marine cage-type system were applied
- For real-time control, data transmission network and visualization of multiple system, co-operating conducted in three areas. Performance evaluation appears well.
- Complete remote control, data transmission, data visualization evaluation.

V. Utilization plan of the research results

- (Tongyeong) pilot program using the developing prototype system for solving local issues; rapidly red tide detection
- Increase forecast accuracy based on actual data provided to build the red tide forecast system
- System applications diversification through localization of equipment
- Application on the marine life entering detect network construction of nuclear power plants

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Background and Necessities of the study	1
Section 2 Objectives of the study	7
Chapter 2 Status of domestic and oversea technology	9
Section 1 Trends of study in Korea	9
Section 2 Trends of study in foreign countries	12
Chapter 3 Content and results of the study	14
Section 1 Design & mking of prototype red tide acoustic detection system and network (sea cage type)	15
Section 2 Performance evaluation of the (sea cage type) prototype red tide acoustic detection system	21
Section 3 Suggestion on the field operation of prototype red tide acoustic detection system	33
Chapter 4 Achievements and objectives and contributions to the related area	43
Section 1 Achievements of objectives	43
Section 2 Contributions	44
Section 3 Plan for application of the results of the study	45
References	46

목 차

List of Tables	xi
List of Figures	xii
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구개발 추진 배경 및 필요성	1
1. 추진 배경	1
2. 연구개발 필요성	5
제 2 절 연구개발 목표 및 내용	7
1. 연구개발의 목표	7
2. 연차별 연구개발의 세부목표 및 내용	7
3. 연구 추진계획 및 수행방법	8
제 2 장 국내외 기술개발현황	9
제 1 절 국내 기술개발 현황	9
제 2 절 해외 기술개발현황	12
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	14
제 1 절 유해적조 실시간 음향탐지 및 관측 네트워크 설계 및 제작	15
1. 기 개발된 휴대용 유해적조 음향 탐지 시스템 성능 개량	15
2. Prototype 가두리 운용형 유해적조 음향 시스템 제작	19
제 2 절 유해적조 실시간 음향탐지 시스템 성능 평가	21
1. 적조 음향탐지 시스템 성능 평가 조건	21
2. 실험실 조건에서의 성능 평가	22
3. 해상에서의 성능 평가	31
제 3 절 유해적조 실시간 관측 체계 운용안 제시 및 구축	33
1. 유해적조 탐지 관측 체계망 제시	33
2. Multiple 시스템 실시간 제어, 자료 전송망 및 가시화	36

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	43
제 1 절 연구개발목표 달성도	43
제 2 절 대외기여도	44
제 3 절 연구결과 활용 계획	45
참고 문헌	46

List of Tables

Table 1. Region and amount of red tide damages in Korea	3
Table 2. Research objectives	7
Table 3. Contents and methods of the study	14
Table 4. The acoustic system comparison of the buoy/cage installed type	19
Table 5. Cell concentration of measured samples in 1 L flask culture	23
Table 6. Goal achievement of the study period	43

List of Figures

Fig. 1. Schmatic diagram of red tide occurrence mechanism.	1
Fig. 2. Global distribution of reported Cochlodinium events showing the apparent expansion in blooms before (top panel) and after (bottom) 1990.	2
Fig. 3. Regional distribution of reported Cochlodinium events in Korea.	3
Fig. 4. Damages of aquacultured fish due to red tide.	4
Fig. 5. Vision and a strategic target of KIOST.	6
Fig. 6. Research organizations and roles.	8
Fig. 7. Red tide monitoring system of National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI).	9
Fig. 8. Towed-type acoustic red tide detection system (prototype) and field operation (KIOST, 2013).	10
Fig. 9. Buoy-type acoustic red tide detection system (prototype) and field operation (KIOST, 2013).	11
Fig. 10. System schematic of real-time red tide detection using acoustic system.	11
Fig. 11. SeaWiFS image of nLw555 (normalized water-leaving radiance at 555 nm) on July 9, 1999	12
Fig. 12. Program of Monitoring and Event Response for Harmful Algal Blooms.	13
Fig. 13. FlowCAM microorganism and particle images.	13
Fig. 14. Portable prototype acoustic system and digital sensor (KIOST, 2014)	15
Fig. 15. Block diagram of the prototype system.	16
Fig. 16. Example of internal circuit.	17
Fig. 17 Configuration of the prototype system type for sea cage operation.	17
Fig. 18. Internal and external structures of the digital acoustic processing assembly.	18
Fig. 19. system inside unit of insulation/flameproof motherboard	19
Fig. 20. Low power designed power, network and control unit	20

Fig. 21. 6 system configuration and field test	20
Fig. 22. Photographs of each cell culture in 1 L flask.	23
Fig. 23. Photographs of analysis of each cell concentration of HABs and natural phytoplankton community in 1 L culture flask	24
Fig. 24. Schematic diagram of an indoor microcosm (0.5 m radius, 0.51 m deep).	24
Fig. 25. Photographs of cultured cells of HABs and natural phytoplankton community in 100 L indoor microcosm.	25
Fig. 26. Photographs of analysis of each cell concentration of HABs and natural phytoplankton community in 100 L indoor microcosms using the acoustic system for real-time detection of the harmful algal blooms.	25
Fig. 27. Procedures of system performance under the condition of 1 liter cultured flask.	26
Fig. 28. Procedures of system performance under the condition of 100 liter microcosm.	26
Fig. 29. Reference sensitivity levels of 6 system's sensor.	27
Fig. 30. System performance evaluation results of the <i>C. polykrikoides</i> , major species of South sea.	28
Fig. 31. System performance evaluation results of the <i>C. marina</i>	29
Fig. 32. System performance evaluation results of the Natural phytoplankton community.	30
Fig. 33. System performance evaluation results of the <i>C. polykrikoides</i> , and <i>C. marina</i> under the microcosm condition.	31
Fig. 34. System performance evaluation results in Tongyoung MRC.	32
Fig. 35. Current flow and damage area from red tide in Tongyeong coastal.	33
Fig. 36. Overall configuration of aquaculture operation type system.	34
Fig. 37. Practical proposal of the red tide acoustic system in Tongyeong coastal.	35
Fig. 38. Remote control software program of red tide acoustic detection system.	36
Fig. 39. Location (Tongyeong) of field experiment for red tide acoustic detection system.	37

Fig. 40. The display of system remote control unit and information of red tide acoustic detection system	38
Fig. 41. The display of system control unit of red tide acoustic detection system.	39
Fig. 42. The information display of system status of red tide acoustic detection system.	39
Fig. 43. The display of data/information of red tide acoustic detection system.	40
Fig. 44. Visualization of red tide detection system based on the Google GIS map.	41

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발 추진 배경 및 필요성

1. 추진 배경

최근 기후 변화 및 해양 오염에 따른 다양한 환경 요인의 복합적 작용에 의해 해수 중의 광합성 식물플랑크톤의 이상 증식이 발생이 된다. 통상적으로 광합성 식물플랑크톤의 이상증식에 의해 표층 해수가 착색이 된 경우를 적조(harmful algal bloom, red tide) 라고 부른다 (Fig. 1).

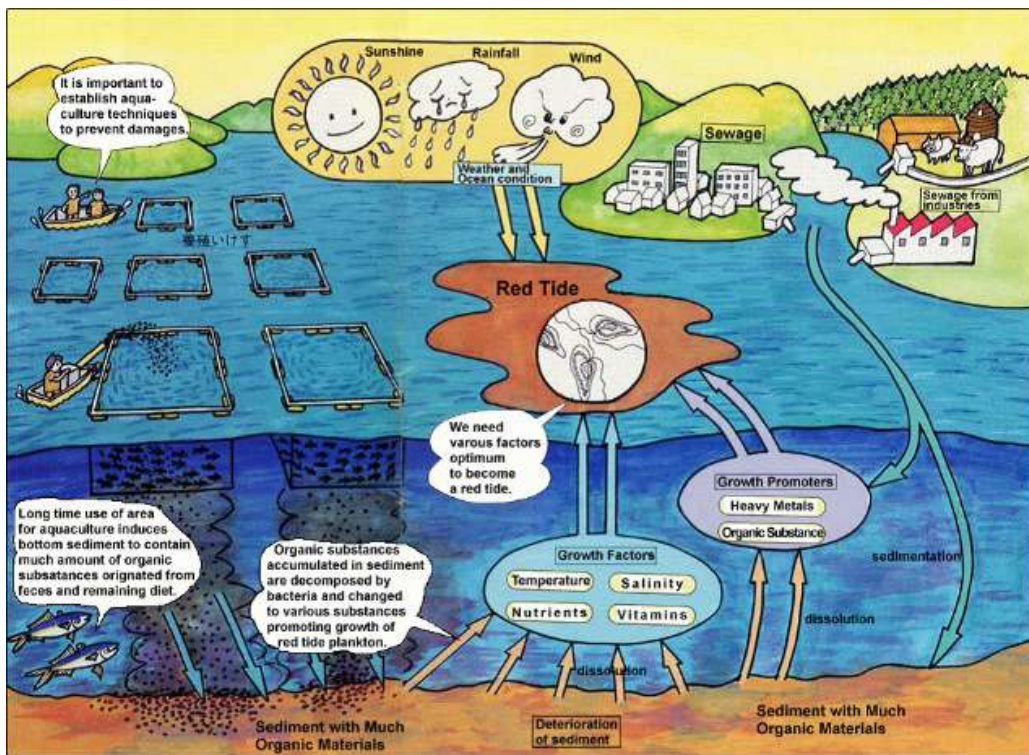


Fig. 1. Schematic diagram of red tide occurrence mechanism.

적조 발생은 우리나라 뿐만 아니라 미국, 멕시코, 캐나다, 뉴질랜드, 말레이시아 등 세계 도처에서 일어나며 빈도가 증가하는 추세이며, 최근에는 중동국가에서도 발생하고 있다 (Fig. 2). 국내의 경우 여름철 남해안에서 발생하는 적조는 전남 고흥, 여수 인근에서 주로 발생하며, 이후 남해군, 통영시, 거제도를 거쳐 확산하며 양식 어류에 막대한 피해를 유발하고 있다 (Fig. 3, Fig. 4). 적조에 의한 직접적인 피해액은 1995년 764억원, 2003년 215억원, 2007년 115억원, 2013년 247억원에 달하며, 적조

방제와 피해 복구 총 비용은 2013년도에만 약 600억원에 이르러 지역사회 뿐만 아니라 국가적으로도 큰 피해를 발생시키고 있다 (Table 1).

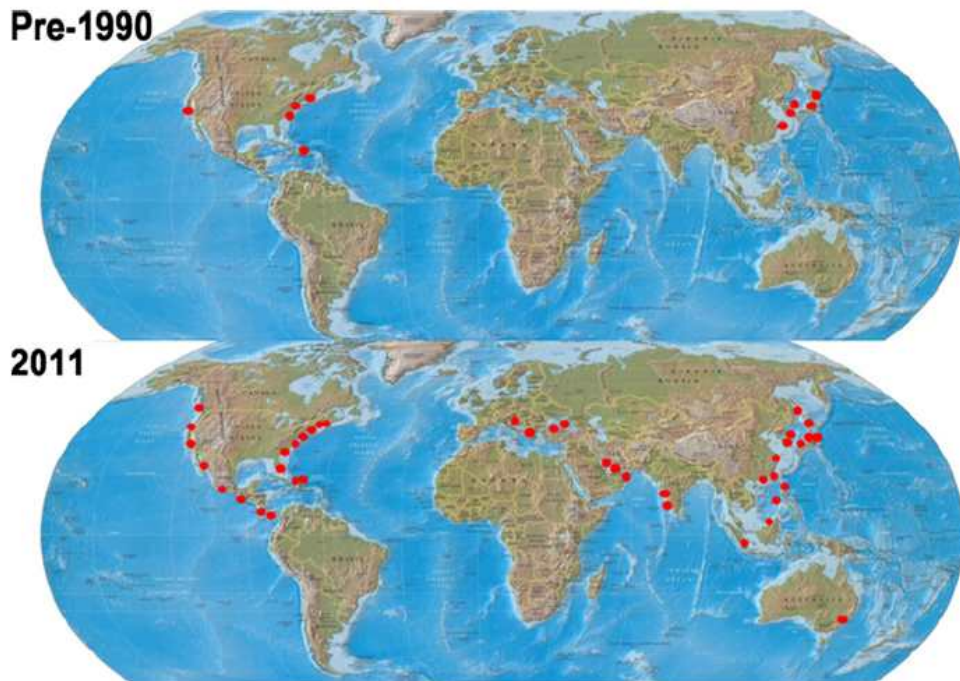


Fig. 2. Global distribution of reported *Cochlodinium* events showing the apparent expansion in blooms before (top panel) and after (bottom) 1990.

국내에서 적조 대응을 위한 기초 원천기술 개발 연구가 '00년~12년 약 225억원 규모로 진행되었으나 아직까지 미해결 상태에 있다. 2013년 적조 대발생 이후 정부는 관계부처 합동으로 '적조대응 중장기 종합대책'을 수립하고 5대 전략을 추진함: 예측·예보 기능 강화, 적조 R&D 강화, 양식어장 구조개선, 해양환경 관리강화, 적조 관련 제도 개선 등을 추진하고 있다.

효과적인 양식어류 피해 방지 대책으로 해수부는 '13년부터 '적조 발생해역 양식어류 긴급방류 지침'을 시행하고 있으나, 현장에서는 어류 방류 시점을 실시간으로 정확히 판단할 수 있는 과학적 기준이 필요하다.

Table 1. Region and amount of red tide damages in Korea

년도	피해 분야/지역	발생 건수	피해액 (억원)	년도	피해분야/지역	발생 건수	피해액 (억원)
1990	수산양식	51	14	1991	수산양식	40	4
1992	수산양식	25	194	1993	수산양식/남해 동부	38	84
1994	수산양식/거제 연안	29	5	1995	수산양식/모든 연안	65	764
1996	수산양식/경남,전남 연안	61	21	1997	수산양식/경남,전남, 경북	62	15
1998	수산양식/통영, 남해	122	1.6	1999	수산양식/통영부근, 포항	83	3.2
2000	수산양식/경남	69	2.6	2001	수산양식/경남,전남, 경북	56	84
2002	수산양식	59	49	2003	수산양식	45	215
2004	수산양식	65	1.2	2005	수산양식	39	10.6
2006	수산양식	28	0.7	2007	수산양식	33	115
2007	피해 없음			2008	피해 없음		
2009	피해 없음			2010	피해 없음		
2011	피해 없음			2012	수산양식/경남,전남	?	44
2013	수산양식/경남	74	247				



Fig. 3. Regional distribution of reported *Cochlodinium* events in Korea.



Fig. 4. Damages of aquacultured fish due to red tide.

그러나 남해안에서 적조 제어는 대상이 되는 해양생태계의 영역이 넓고 해수유동이 심하며 환경의 변화 또한 빠르게 진행되어 어려움이 많고 한정된 예산으로 적조에 효과적으로 대응하려면 적조 자체의 제어보다는 정확한 발생 예보와 확산 경로 예측, 양식어류 피해 최소화에 집중할 필요가 있다. 적조 대응 방법이 인력에 의존하는 정기적인 직접 채집·예찰 수준에서 인공위성, 무인항공기, 자동항행장비, 수중 음향센서 등을 활용한 실시간 감시·예보 체계로의 전환 필요하다.

적조의 발생에 대해 원인 생물의 크기를 포함한 군집 파악에 필요한 내용은 채수 과정을 통해 현미경 관찰로 수행이 되고 있으며 일반적인 실험실 과측을 통해서도 표층 해수의 착색 이전에 적조를 탐색하기 어려운 실정이다. 또한 현미경 관찰에서도 표본 채집 후의 유해/유독 적조원인 생물 변형 및 파괴 등으로 전문가에 의해서만 관찰이 가능하다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 적조 원인 생물에 대한 컴퓨터 탐색기법 개발 등의 시도가 있었으나 일반적인 사용에는 성공하지 못하고 있다. 최근에는 해양의 생물 자원량 관측 기법인 과학어탐의 원리를 이용하여 음향을 이용한 적조 탐지 기술 개발이 시도된 바 있다.

2. 연구개발 필요성

가. 기술적 측면

수중에서 음파를 이용하여 해양생물 개체군 변동을 현장에서 탐지할 수 있는 방법은 노르웨이, 일본, 미국 등 해양 선진국에서는 연안 생태계 구조 파악의 방법으로 활발히 사용 중에 있다. 최근 고주파수 적용을 통해 생태계 하위 생물 (동물플랑크톤, 유해 적조 등)로 적용 폭을 확장해 가고 있으며, 다양한 연구 결과를 통해 효용성을 입증하고 있다. 현재의 유해 적조 생물 예찰은 고비용·인력 중심 방법으로 이루어져, 조기 탐지 혹은 실시간 탐지에 많은 예산 및 인력이 투입되는 기술적 한계를 가지고 있다.

최근 해양수산부의 향후 R&D 사업에서 유해 적조의 실시간 탐지 및 전파를 위한 구축 체계 일환으로 MT-BT-IT-우주기술을 이용한 새로운 기술의 필요성이 제기되고 있다. 유해 적조 생물의 음향 탐지 가능성과 국내의 IT 기술 발달에 따라 실시간 적조 탐지를 위한 기반 기술은 갖추고 있으므로 적조 빈번 발생 해역에서의 탐지 체계 구축을 통한 유해적조 실시간 광역 혹은 집중 감시 체계 구축의 가능성이 높아지고 있다.

나. 경제·산업적 측면

우리나라 남해안에서 발생한 적조 피해는 1995년 764억, 2003년 215억, 2007년 115억, 2013년에는 247억 원의 피해를 주고 있으며 이러한 피해액은 직접적인 피해액이며 적조 방제 및 인력 비용까지 고려하면 피해액은 더 큰 양상을 보인다.

유해 적조의 발생 빈도가 증가함으로써 연안 생태계 및 수산물 생산을 위협하고 있으며, 특히, 수산업 등 사회 경제적 피해가 지속적으로 나타나고 있다. 따라서 연안 생물 가운데 국민 생활과 밀접한 유해 적조는 매년 수백억 원의 직간접적인 피해를 발생시키며 생태계 구조 변동에도 영향을 주고 있어 빠른 탐지 시스템의 개발과 현장 운용으로 피해의 최소화가 필요하다.

다. 사회·문화적 측면

유해적조 발생은 대국민 삶의 질 향상 측면에서 매년 물질적, 심리적 피해를 주고 있음. 또한 최근 활성화 되고 있는 수상 레저 스포츠 측면에서도 부정적인 영향을 주고 있다. 유해적조 발생 탐지를 위한 기존의 방법에 대한 국민들의 불만은 “해양과학을 통한 국민에 대한 기여” 측면에서 해양과학 기술의 신뢰 하락 및 연구소의 기능에 부정적인 역할을 하므로 실시간 탐지 기술 및 운용을 통한 적조 예보 체계 구축이 필요하다.

라. 연구소 고유기능 발전과의 연관성

본 과제는 수중음향 기술(MT)에 IT와 BT 기술을 접목한 다학제적 연구와 과학과 기술의 융합을 통해 시너지 효과를 창출하는 체계로 이루어져 있다. 유해적조 발생에 따른 대국민 피해 최소화 및 해양생태계 구조 변동 이해 등과 같은 국가 사회적 해양에서의 현안 문제 해결을 직접 다루고 있으므로 한국해양과학기술원의 국가적, 사회적 책임성(accountability)을 실현하는데 기여가 가능하다 (Fig. 5)



Fig. 5. Vision and a strategic target of KIOST.

제 2 절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발의 목표

본 연구는 유해적조를 대상으로 음향탐지 기법을 이용하여 실시간 관측하며 관측된 결과를 종합하기 위한 네트워크 구축을 위한 기술을 개발하는 것이 최종 목표이다.

- 유해적조 음향탐지 시스템 개발 및 시스템에 대한 현장 운용 기술 확립
- 유해적조 음향탐지 시스템의 관리 및 실시간 관측 체계에 대한 네트워크 구축

2. 연차별 연구개발 세부목표 및 내용

본 연구는 단년차(4개월 수행) 연구 개발로 수행되었으므로 연차별 연구개발 세부 목표 및 내용은 별도로 분리하지 않았다.

Table 2. Research objectives

성과 목표 / 세부 목표	연차별 연구목표 (핵심 스펙)
	(2014년)
1. 유해적조 음향탐지 시스템 성능 개량, 제작 및 성능 평가	
1-1. 기 개발된 유해적조 음향 탐지 시스템 성능 개량	- 휴대용 유해적조 음향 탐지 시스템 성능 개량 - Prototype 시스템 구조 최적화
1-2. 유해 적조 음향 시스템 제작 (해상 가두리 설치용)	- 유해적조 음향 시스템 제작 (예산 규모에 따라 제작) - 가두리 운용 기반 연구개발품 형태 시스템
1-3. 적조 시료를 이용한 성능 평가	- 실내 Microcosm 환경에서의 시스템 성능 평가 - 해상에서의 성능 평가
2. 유해적조 실시간 관측 체계 운용안 제시 및 구축	
2-1. 유해적조 탐지 관측 체계망 제시	- 적조 다발생 해역인 통영 연안에서의 탐지 체계망
2-2. 유해적조 탐지 Multiple 시스템 실시간 제어, 자료 전송망 및 가시화	- Multiple 시스템 실시간 제어 및 자료 전송망 - Multiple 시스템 원격 수신 자료 가시화

3. 연구 추진계획 및 수행방법

가. 기술개발 전략 및 추진체계

한국해양과학기술원 본원이 주관으로 수행하며, 업체는 적조 시스템 제작, 남해연 구소는 적조 시료의 분석 및 검증, 통영 MRC를 포함한 남해 지역에서 시스템 구축 및 운용을 통해 기술을 확보한다 (Fig. 6).

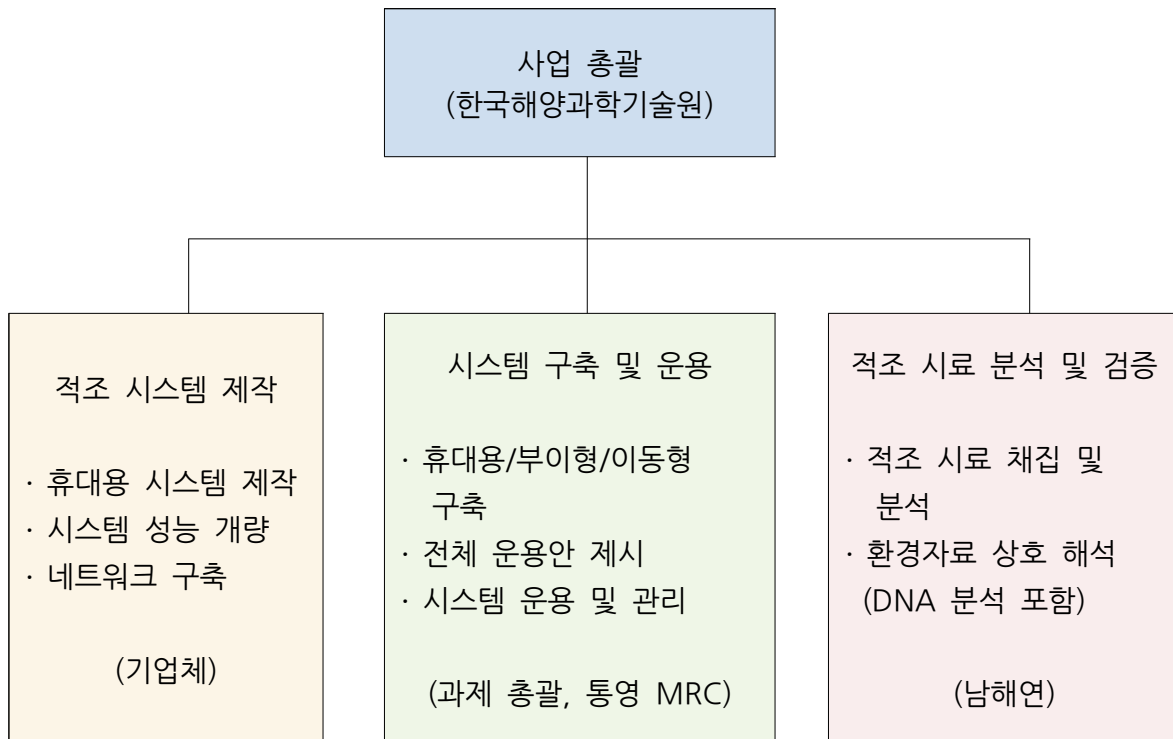


Fig. 6. Research organizations and roles.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

국립수산과학원은 조사 선박을 이용한 채수 및 목시 관측, 예찰 요원의 목시 관측을 통한 인력 중심의 적조 모니터링 기술 적용중이며 한국해양과학기술원, 국립수산과학원 등에서 위성 자료를 이용하여 광역탐지에 적용하고 있으며, 최근 해양 자료 기반의 모델링을 통해 간접적으로 적조 발생을 예측하려는 연구가 진행 중이다 (Fig. 7).

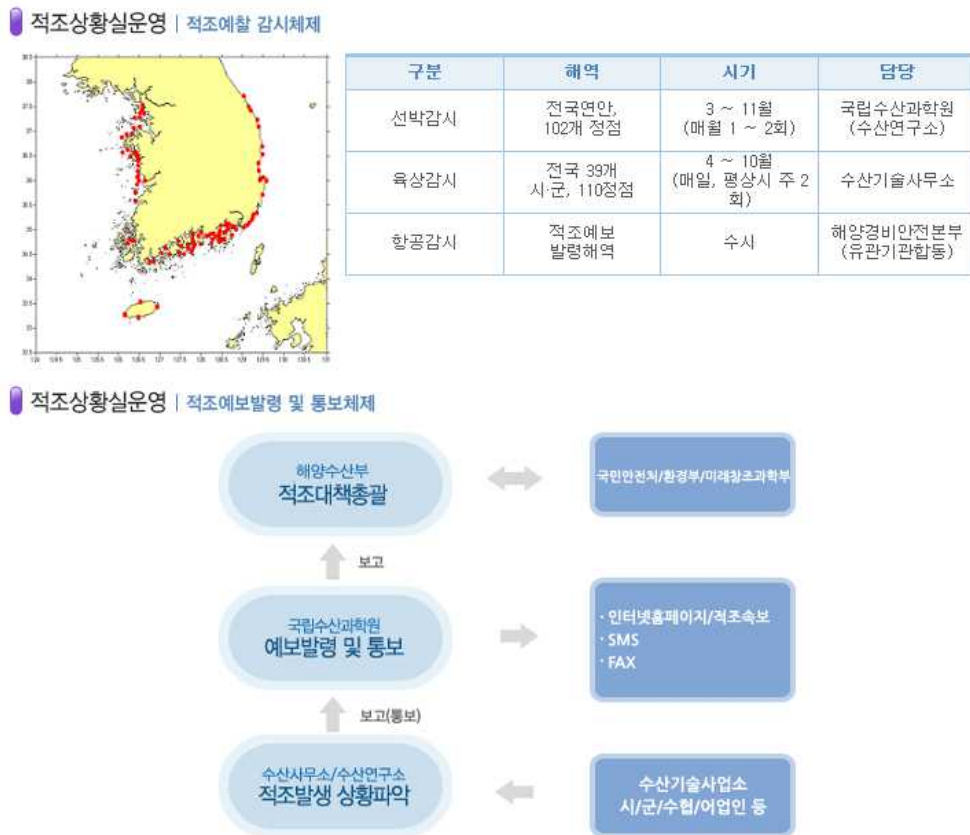


Fig. 7. Red tide monitoring system of National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI).

한국해양과학기술원에서 수행한 “유비쿼터스 해양 유용/유해생물 관리기술 개발” 연구를 통해 유해적조 음향 탐지를 위한 개체에 대한 음향 특성 파악 및 시스템 개발을 시작하여 2012년에는 소형 선박 예인형 prototype 시스템을 개발하여 하계 시

기에 통영 연안에서 실증 실험을 실시하여 적조 탐지 효과를 규명하였다(Fig. 8)

또한 2013년에는 시스템의 장기간 운용을 위하여 시스템 성능 개선을 통한 부이형 prototype 시스템을 개발하여 한국해양과학기술원 통영 해상 시험장 (통영 MRC) 인근 해역에서 하계 시기 적조 탐지를 위해 장기간 운용을 하였다. 약 2개월에 걸친 장기 운용 결과 경남 통영 인근 해역에서 적조 음향 시스템을 운영하여 적조발생 및 변동 특성을 실시간으로 규명하였다. (국립수산과학원의 예찰 결과보다 최대 6일 정도 사전 탐지). 이러한 효용성은 어민들에게 적조 피해를 대비할 수 있는 실시간 탐지 체계 구축의 가능성을 보여주었다 (Fig. 9).

한국해양과학기술원에서 기 개발된 음향 시스템은 순수 연구 개발품 형태의 prototype 시스템으로 해양 운용을 통하여 효율성을 제시하였다. 국내 개발된 시스템이므로 성능 개선 및 적조탐지 체계구축에 다양하게 적용할 수 있으나 기 개발된 시스템은 연구 개발품으로 상용화를 위해서는 시스템의 소형화 및 단순화 과정이 수반되어야 하며 또한 시장성을 위하여 제작 단가 측면을 고려해야 한다. 이 부분은 산업체의 역할로 기술 이전을 통한 최적화가 필요하다.

유해적조 발생 특성상 지역적 편차가 크며, 해류에 따라 이동하기에 효율적인 적조 탐지를 위해서는 복수의 탐지 시스템을 적용하는 것이 필요하다. 이들 복수 시스템의 중앙 관제 및 자료 통합 기술도 필요한 상황이다 (Fig. 10). Fig. 10은 이동형 혹은 부이 고정형 기반의 음향탐지 시스템을 이용하여 남해 연안에 운용 가능한 적조 탐지 체계의 예이다.

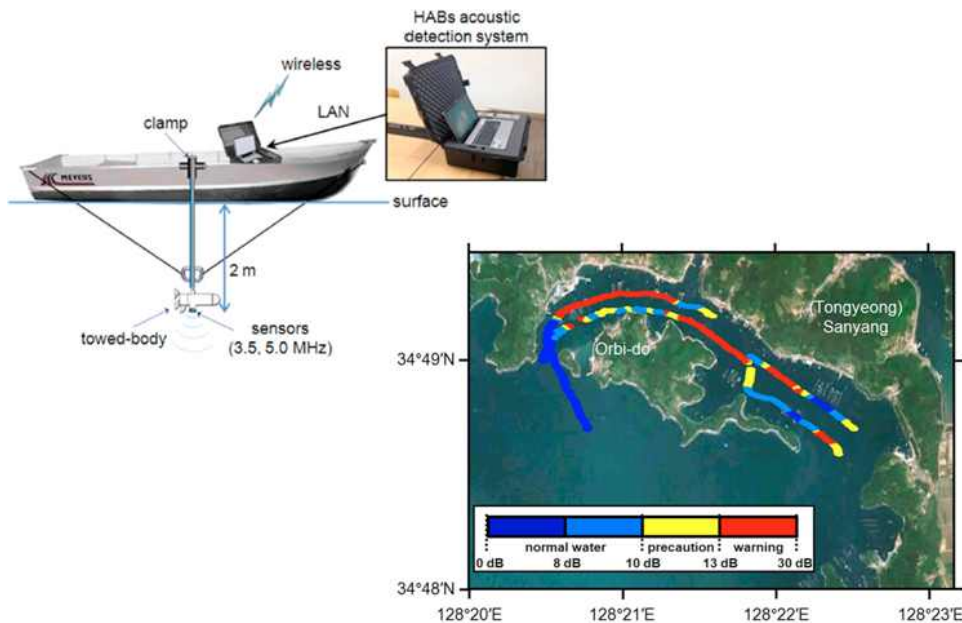


Fig. 8. Towed-type acoustic red tide detection system (prototype) and field operation (KIOST, 2013).

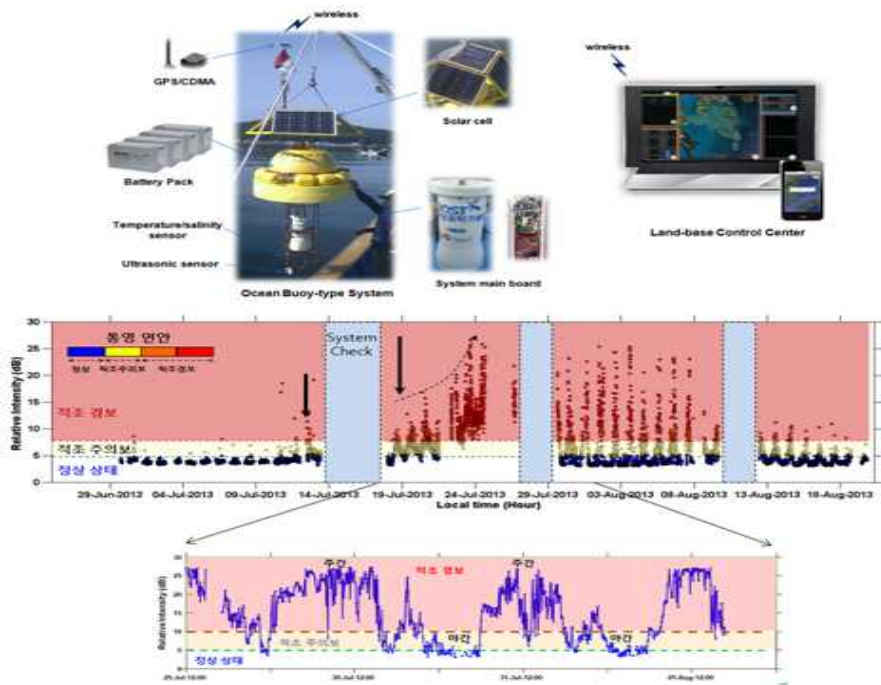


Fig. 9. Buoy-type acoustic red tide detection system (prototype) and field operation (KIOST, 2013).



Fig. 10. System schematic of real-time red tide detection using acoustic system.

제 2 절 국외 기술개발 현황

유럽은 EU 공동의 유해적조 모니터링 및 Mapping 사업을 추진함으로써 정기적인 감시 및 조기 경보 시스템을 운영하고 있으며 (Fig. 11) 미국, 유럽 등 수산 선진국에서는 GIS를 활용한 유해생물 조기경보·예측 시스템이 구축되어 있으며, 이를 통해 피해를 최소화하고자 하고 있다.

미국 NOAA에서는 Monitoring and Event Response for Harmful Algal Blooms (MERHAB) 연구 프로그램을 통해 Portable Optical Sensing System for Environmental samples (POSSE)을 연구 중이며 광역 예보를 위해 Harmful Algal Bloom Operational Forecast System (HAB-OFS) 운영 중에 있다 (Fig. 12). 현장에서의 식물플랑크톤 탐지를 위해 light scattering와 fluorescence를 측정하는 FlowCAM이 개발되었으나 biofouling 문제로 현장 운용에 제한이 있다 (Fig. 13). 해양에서 장기적으로 안정적인 조건 하에서 유해적조 탐지를 위한 상용품 수준의 개별 시스템은 없는 상황이고 이에 대한 기술 개발이 진행되고 있는 상태이다.

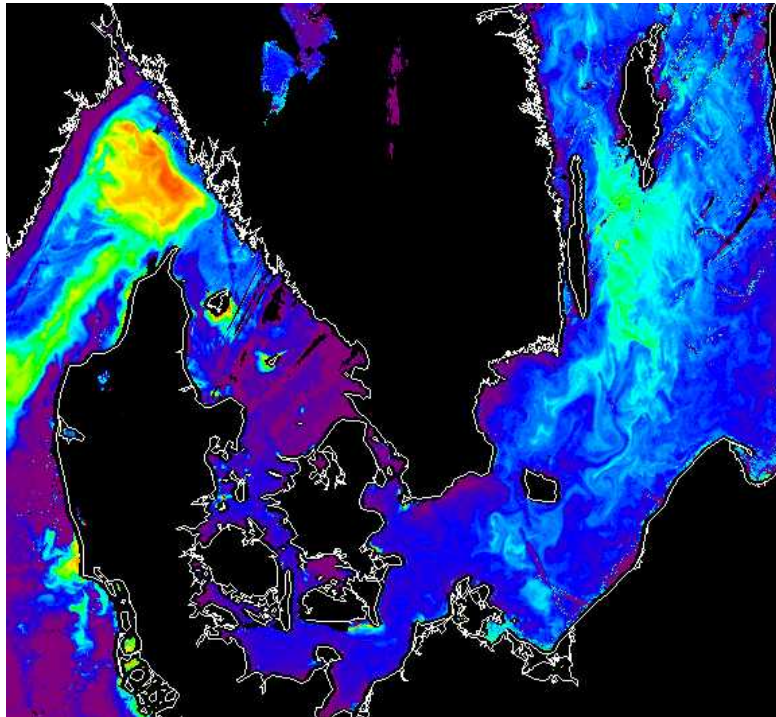


Fig. 11. SeaWiFS image of nLw555 (normalized water-leaving radiance at 555 nm) on July 9, 1999

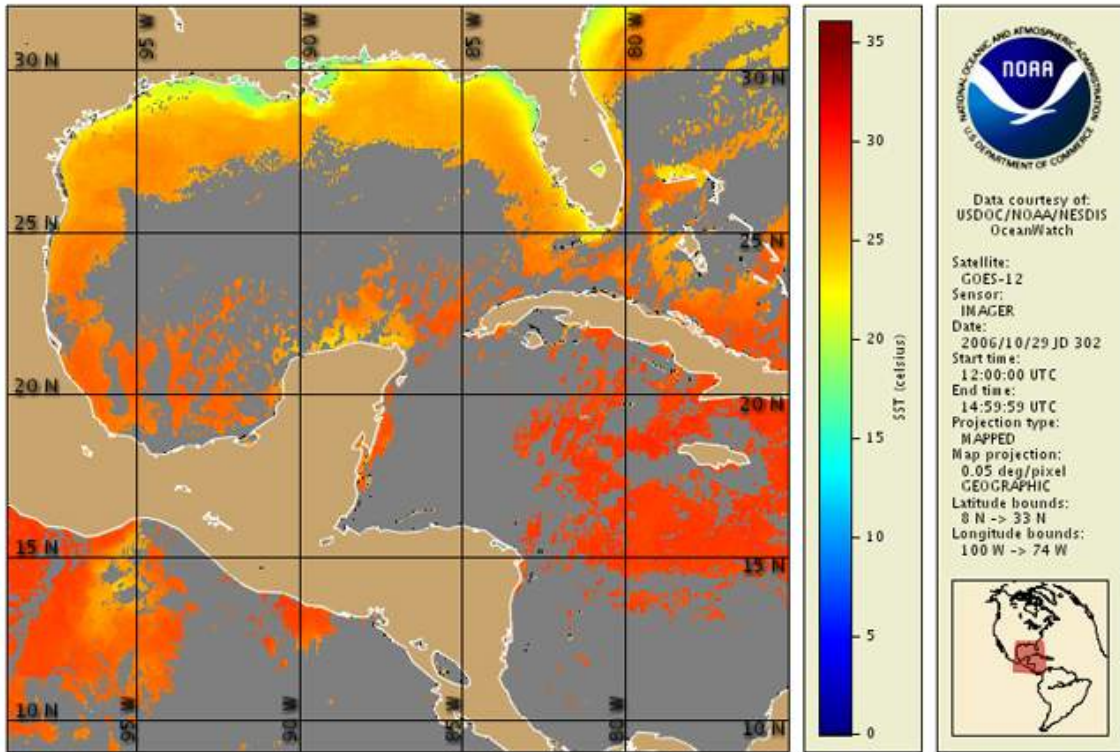


Fig. 12. Program of Monitoring and Event Response for Harmful Algal Blooms.

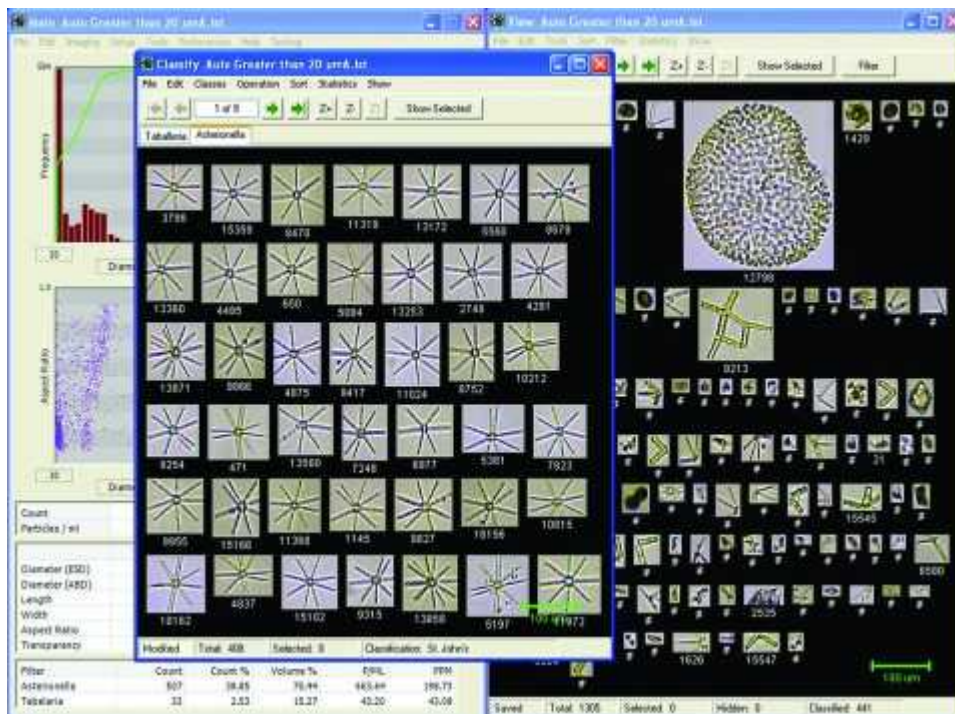


Fig. 13. FlowCAM microorganism and particle images.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

연구사업의 내용은 크게 두 부분으로 ① 해상 가두리에서 운용 가능한 rpototype 시스템 성능 개선, 제작, 시험평가 ② 실시간 관측 체계 운용안 제시이다. 세부 수행 방법을 Table 3에 기술하였다.

Table 3. Contents and methods of the study

연구/사업의 수행내용	구체적인 수행방법 (이론적·실험적 접근방법명 등)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 유해적조 음향탐지 시스템 성능 개량, 제작 및 성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 휴대용 유해적조 음향 탐지 시스템 성능 개량 <ul style="list-style-type: none"> - 가두리형 운용을 위한 재질 및 구조 변경 - 환경 센서 장착 모듈 추가 - 운용 전원부 이원화 (배터리, 태양열 전지) - 네트워크 기능 향상 및 시스템 구조 최적화 등 ○ 유해적조 음향 시스템 제작 <ul style="list-style-type: none"> - 예산 규모에 따라 제작 대수 조절 - 가두리 운용 기반 연구개발품 형태 시스템 ○ Microcosm 환경에서의 시스템 성능 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 적조 발생종의 밀도에 따라 시스템 성능 평가 ○ 해상에서의 시스템 성능 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 통영 MRC 인근해역에서 현장 평가
<ul style="list-style-type: none"> ○ 유해적조 실시간 관측 체계 운용안 제시 및 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 적조 다발생 해역인 통영 연안에서의 탐지 체계망 <ul style="list-style-type: none"> - 통영 연안 적조 발생 특성 파악 - 적조 탐지를 위한 해역 설정 및 체계망 구축 제시 ○ Multiple 시스템 실시간 제어, 자료 전송망 및 가시화 <ul style="list-style-type: none"> - 통영 MRC 인근 해역에서 multiple 시스템 실시간 제어 및 자료 전송 - 통영 MRC 인근 해역에서 multiple 시스템 실시간 자료 원격 전송 및 자료 가시화 프로그램 구성

제 1 절 유해적조 실시간 음향탐지 및 관측 네트워크 설계 및 제작

1. 기 개발된 휴대용 유해적조 음향 탐지 시스템 성능 개량

적조 탐지의 효율성 증가를 위하여 2014년 상반기에 휴대용 형태로 prototype 시스템을 제작하였으며, 수중 센서의 경우 기존의 아날로그 방식에서 수중 센서부에서 A/D를 바로 실시하여 음향 자료를 전송하는 digital 센서 방식으로 변환하였다 (Fig. 14). 이러한 디지털 센서 방식은 음향 센서의 가장 문제점인 noise 제거 및 자료 전송 거리를 증가시켜 시스템 성능을 향상시켰다.



Fig. 14. Portable prototype acoustic system and digital sensor (KIOST, 2014)

유해적조는 남해안에서 생태계에 영향을 주지만 가장 치명적인 피해는 양식업을 하는 해상 가두리이다. 휴대용 prototype은 연구자 운용 기반으로 어민을 비롯한 어민에게는 사용의 어려움, 전원, 부식 등 현장에서 사용하기 적합하지 않은 형태이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하고 실제 양식장 주변에 설치하여 장기간 운용 가능한 해상 가두리형으로 prototype 시스템 성능 개량을 실시하였다.

Fig. 15는 prototype 시스템의 블록 다이어그램이며 Fig. 16은 내부 회로도의 일부를 보여주고 있다. 상반기에 개발한 이동형 유해적조 음향 탐지 시스템을 해상 가두리 설치용으로 설계 변경을 반영하여 성능을 개량하였다 (Fig. 17).

성능 개량 부분은 다음과 같다.

- 가두리 구조물 혹은 소형 구조물에 고정시켜 안정되게 운용하기 위해 외형 기

구부를 Case 형태로 변경

- Case는 장기간 운용을 대비하여 해수 및 공기에 강한 부식 방지 재질을 적용
- 시스템의 제어 상태를 점검할 수 있도록 시스템의 전면부에 indicator를 적용
- 시스템 본체 후면부에는 전원 및 음향센서부 연동을 위해 외부 연결단자 구성
- 수온, 염분, 클로로필 센서, 광량 센서 연동을 위해 CTD 및 AUX 포트 추가
- 시스템의 모듈화를 위해 환경자료 저장 및 전송 모듈을 본체 시스템의 내부에 보드 구현

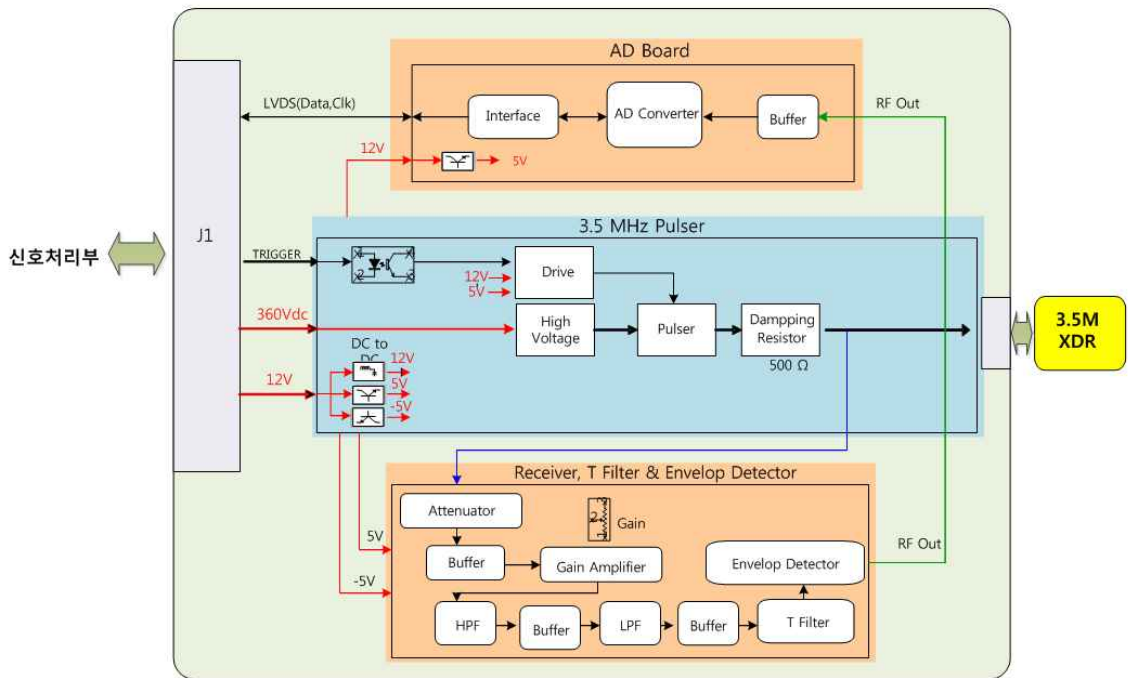


Fig. 15. Block diagram of the prototype system.

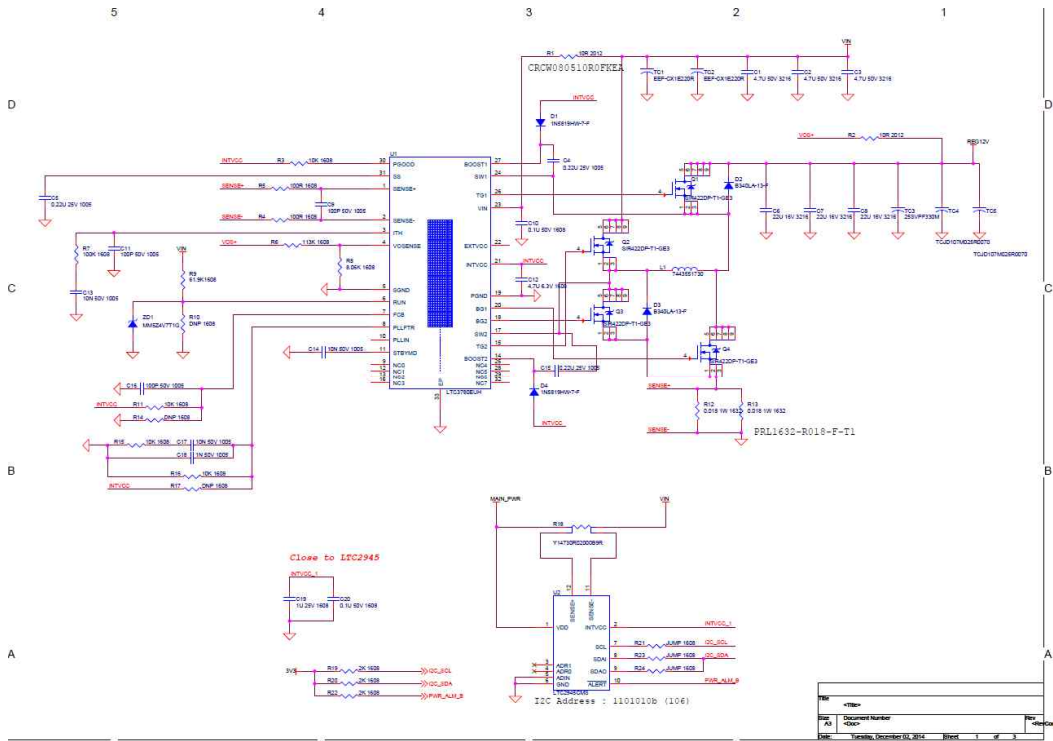


Fig. 16. Example of internal circuit.



Fig. 17 Configuration of the prototype system type for sea cage operation.

외부와의 무선 네트워킹을 위해 다음과 같은 기능을 구현하여 네트워크 안정성을 확보하였다. 우선 해상의 데이터 전송망 불안정 요소를 해소하기 위하여 내장형/외장형 네트워크 안테나를 이중화하였으며 본체 전면판의 Indicator lamp에 네트워크 상태 알림 기능을 구현하였다. 이러한 기능 구현을 통해 원거리 원격 제어 및 현장 제어가 가능하며 근거리에서 제어 및 자료 전송은 Wi-Fi 기법 적용하였다. Wi-Fi 기법의 적용으로 스마트폰에도 시스템의 정보를 제공할 수 있다.

디지털 음향 센서부는 장기간 수중에서의 운용에 따른 부식을 방지 및 경량화를 위해 기존의 SUS 재질에서 아세탈 재질로 외부 기구부를 변경하였다. 디지털 음향 센서 내부의 음향 처리보드는 전원 노이즈 제거를 위해 단일 보드로 설계하였다. 처리 보드는 부식 방지를 위해 방염처리 하였다 (Fig. 18). 또한 해수에 의한 센서부의 물리적 오염을 제거하기 위해 음향 센서부의 브러쉬 형태로 주기적으로 센서면에 달라붙은 부착생물을 제거하는 와이퍼를 설치하였다.

Table 4에 부이형 prototype 시스템과 휴대용/가두리용 prototype 시스템의 차이점을 구분하였다.

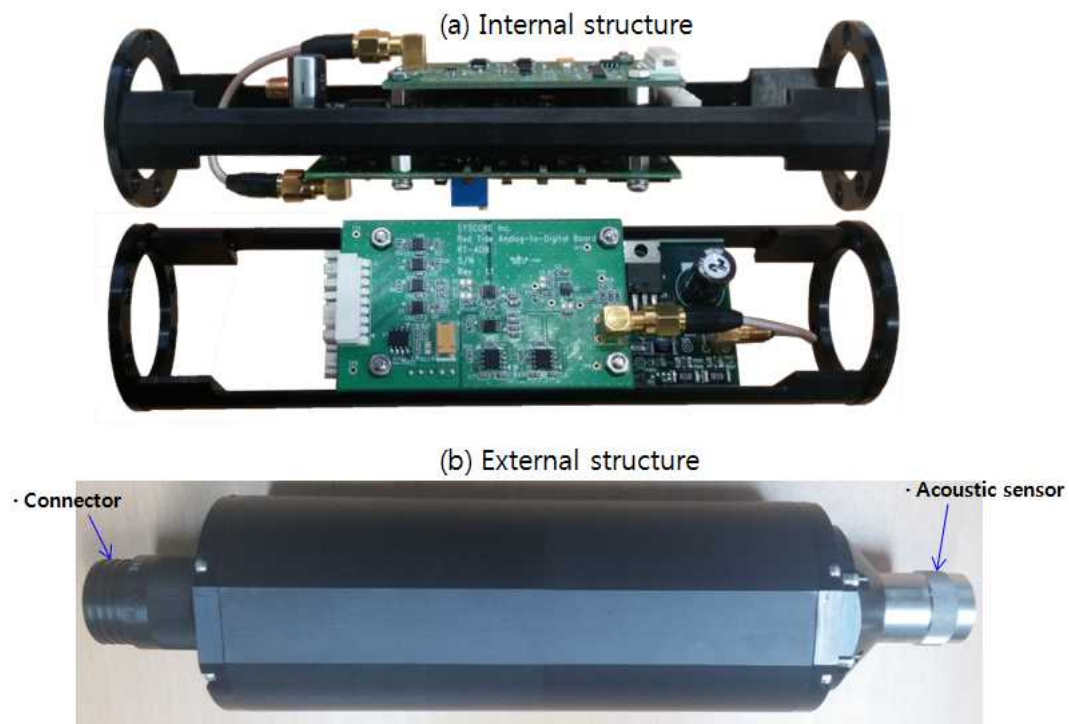


Fig. 18. Internal and external structures of the digital acoustic processing assembly.

Table 4. The acoustic system comparison of the buoy/cage installed type

항 목	부이 운용형 시스템 (2013년)	가두리 운용형 시스템 (2014년)
전원 공급	태양열 집열판	태양열 / 육상 전원 혼용
원거리 통신	원거리 : CDMA	원거리 : CDMA
근거리 통신	근거리 : LAN	근거리 : Wi-Fi
안테나	외부 안테나	내장형/외장형 안테나
위치 정보	GPS	GPS
음향 센서 제어	아날로그 센서 방식	디지털 센서 방식
부가 센서 port	수온, 염분	수온, 염분, 클로로필, 광도
운용 형태	해상 부이 설치 운용	휴대용 및 가두리 설치 운용

2. 유해적조 음향 시스템 제작

기존의 이동형의 물리적, 전기적 문제를 개선하기 위해 가두리 운용형에는 시스템 내부는 단열, 및 방염 재질로 구조 개선 (Fig. 19) 하였다. 또한 전원부, 네트워크부, 제어부의 전력 소모를 최소화한 저전력화를 (Fig. 20) 적용하였다.



Fig. 19. system inside unit of insulation/flameproof motherboard

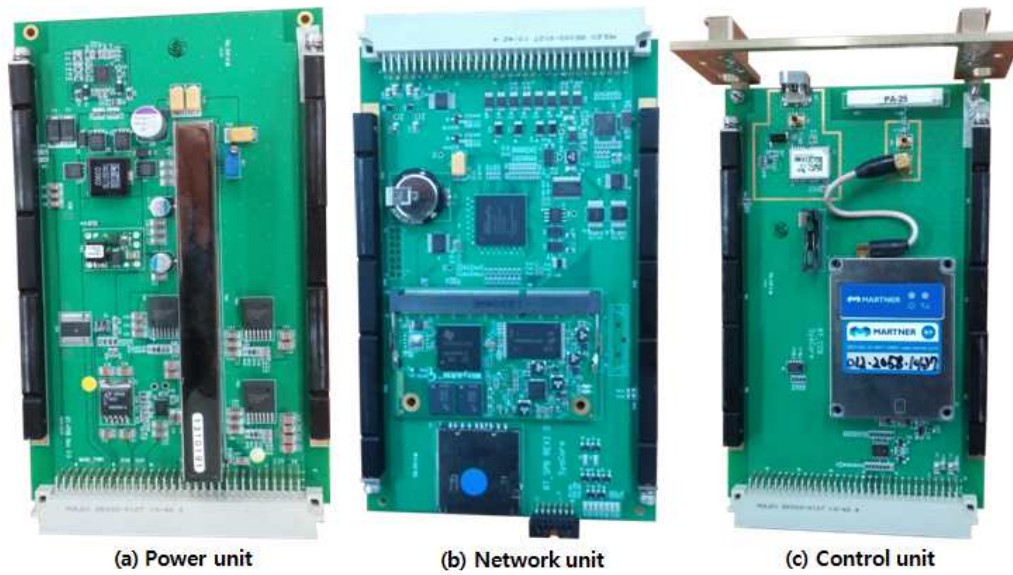


Fig. 20. Low power designed power, network and control unit

연구비 예산을 고려하여 총 6기의 시스템을 제작 완료하였다 (Fig. 21). 제작된 시스템은 통영 MRC 해역에서 해수 수질, 시스템 기본 성능 평가 등을 수행하였으며 정상 작동을 확인하였다.

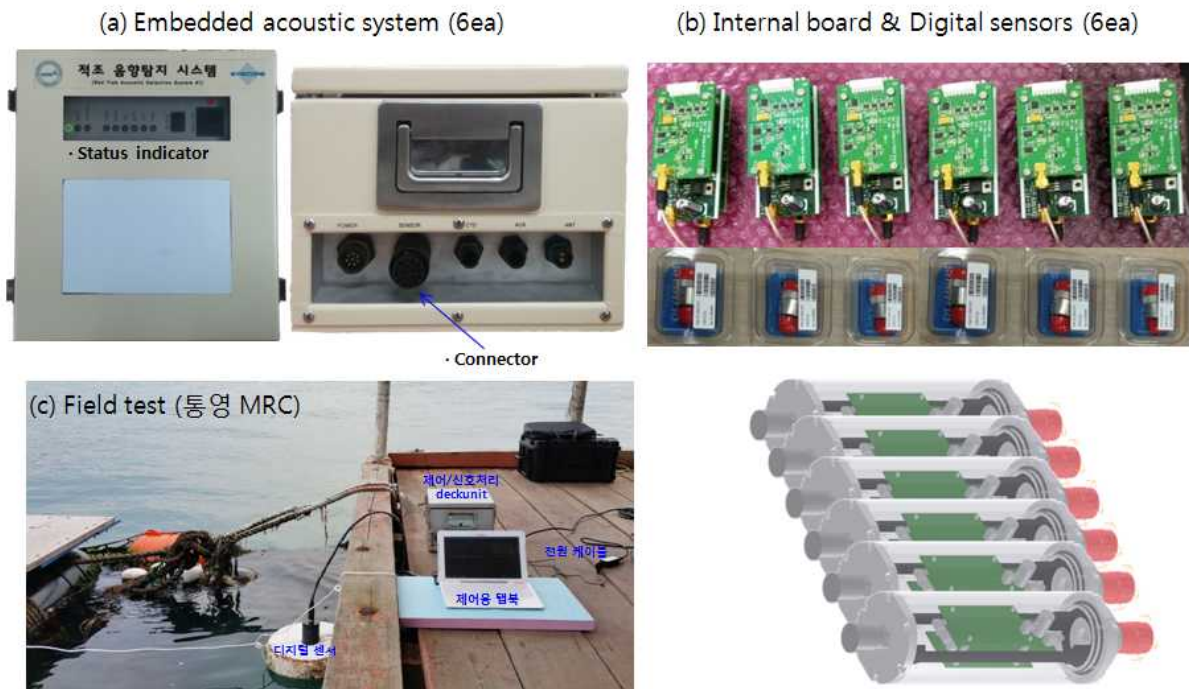


Fig. 21. 6 system configuration and field test

제 2 절 유해적조 실시간 음향탐지 시스템 성능 평가

1. 적조 음향탐지 시스템 성능 평가 조건

폐쇄 생태계 (enclosed Experimental Ecosystem)는 자연 생태계와 유사하게 만든 생태계로 실험 목적에 맞도록 특정 요인을 조절하고 그 이외의 요인은 자연 상태로 유지하여, 특정 요인에 의한 생태계를 변화를 파악할 수 있으며, 실험실에서 결과보다 자연에 가까운 환경 조건에서 실험을 할 수 있으므로 신뢰성 및 자연 생태계를 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다.

폐쇄 생태계를 이용하여 실험하면 해양 생태계처럼 규모가 크고 개방되어 있는 경우에는 자연 상태의 실험이 실질적으로 불가능하므로, 폐쇄 생태계의 활용은 더욱 가치가 있다. 또한 같은 종류의 실험을 반복적으로 하거나, 또는 일시에 여러 개의 폐쇄 생태계를 이용하여 실험하면 신뢰성 높은 결과를 도출할 수 있다(김, 2001).

폐쇄 생태계는 그 크기에 따라 1 m³ 이하의 소형 폐쇄생태계 (microcosm), 1 m³ - 1,000m³ 의 중형 폐쇄 생태계 (mesocosm), 1,000 m³ 이상의 대형 폐쇄 생태계 (macrocosm)로 구분된다. 소형 폐쇄 생태계는 주로 플라스크 및 수조 등 실험실에서 수행되며, 중형 폐쇄 생태계는 실외에서 연구 특성에 맞게 수행되고 있고, 대형 폐쇄 생태계는 작은 연못이나 호수처럼 자연 생태계 그 자체를 실험대상으로 하고 있다 (Grice and Reeve, 1982).

이러한 폐쇄 생태계를 이용하여 국외 뿐만 아니라 국내에서도 물리적, 생지화학적 현상 이해뿐만 아니라 독성실험 및 환경오염에 대한 생태계의 반응 실험 등 응용분야에서도 활용도가 높다.

따라서, 본 연구에서는 음향 시스템 성능 평가를 위하여 실험실 조건에서의 성능 평가 및 해상 시험 평가를 분리하여 실시하였다. 해상시험 평가는 과제 시작 시기가 적조가 소멸된 이후이므로 적조 조건에서는 성능 평가가 불가능하여 무적조 조건에서의 해상 시험을 실시하였다.

적조종을 대상으로 한 시험 평가는 해양 환경과 유사한 폐쇄 생태계에서 실험시스템 구축하여 적조 예찰 음향 시스템을 가지고 실내에서 시스템 신호를 분석하였다. 시험 평가 조건은 1 L 배양 시료 및 100 L 소형 폐쇄 생태계에서 *Cochlodinium polykrikoides*, *Chattonella marina*, natural phytoplankton community 및 대조구로 filtered seawater를 활용하였다.

2. 실험실 조건에서의 성능 평가

실험 중의 선정은 우리나라에서 빈번히 적조를 야기하는 무각와편모조류 (unarmored dinoflagellate) *Cochlodinium polykrikoides* Margalef, 폐쇄성 만에서 적조를 간헐적으로 야기하는 침편모조 (raphidophyceae) *Chattonella marina* (Subrahmanyhan) Hara & Chihara, 적조 생물이 포함되지 않은 natural phytoplankton community 및 대조구로 식물플랑크톤이 포함되지 않은 filtered seawater로 구성하였다.

실험 중의 배양을 위하여, 선정된 적조 발생종 *C. polykrikoides* 및 *C. marina*는 통영 (34° 46' 29.31" N, 128° 23' 24.17" E) 에서 채수된 시료 내에서 capillary method를 통하여 단일체를 분리하였다. 이렇게 분리된 식물플랑크톤은 32-34 psu의 f/2 배지를 채운 96 well plate에 각 well에 옮겨 준 후 20°C의 수온, 80 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광도, 12:12시간 명:암 주기의 조건에서 배양하였다. 이때 f/2 배지는 규소원 (silica source)을 제외시켰다 (Guillard, 1975).

단일 분리 및 세포분열이 성공적으로 이루어진 영양세포들은 순차적으로 48 well, 6 well plate에 옮겨 배양 부피를 증가시켰다. 배양 부피를 증가시킨 식물플랑크톤은 최종적으로 1.5 L Erlenmeyer flask에 최종농도 1 L에 f/2 배지와 배양된 *C. polykrikoides*와 *C. marina*를 각각 넣고 최종 배양 세포 농도를 902 cells mL⁻¹ 및 905 cells mL⁻¹까지 배양하였다. Natural phytoplankton community는 장목만 (34° 59' 37.48" N, 128° 40' 27.53" E)에서 채집하였다.

채집된 식물플랑크톤 군집은 먼저 현미경을 검경하여 *C. polykrikoides* 및 *C. marina* 두 종이 출현하지 않는 것을 파악한 후 최종농도를 1,095 cells mL⁻¹로 맞춘 후 공시재료로 사용하였다. 대조구로 사용된 여과해수 (filtered seawater)는 1차로 멸균하여 해수내 존재하는 미소생물을 사멸시켰다. 멸균된 해수는 0.22 μm 의 여과장치 (filtration unit, Nalgene, USA)를 사용하여 여과 해수를 제조하였다.

배양 및 채집된 시료는 음향 시스템의 측정 후 단계별 희석을 통하여 공시 재료로 만들었다 (Table 5 and Fig. 22). 이렇게 만들어진 공시 재료는 음향 탐지 시스템 분석에 사용되었다 (Fig. 23)

Table 5. Cell concentration of measured samples in 1 L flask culture

Standard density (cells mL ⁻¹)	100	300	500	1,000
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	160	295	515	902
<i>Chattonella marina</i>	113	310	455	905
Natural phytoplankton	145	240	810	1,095
Filtered seawater	None			

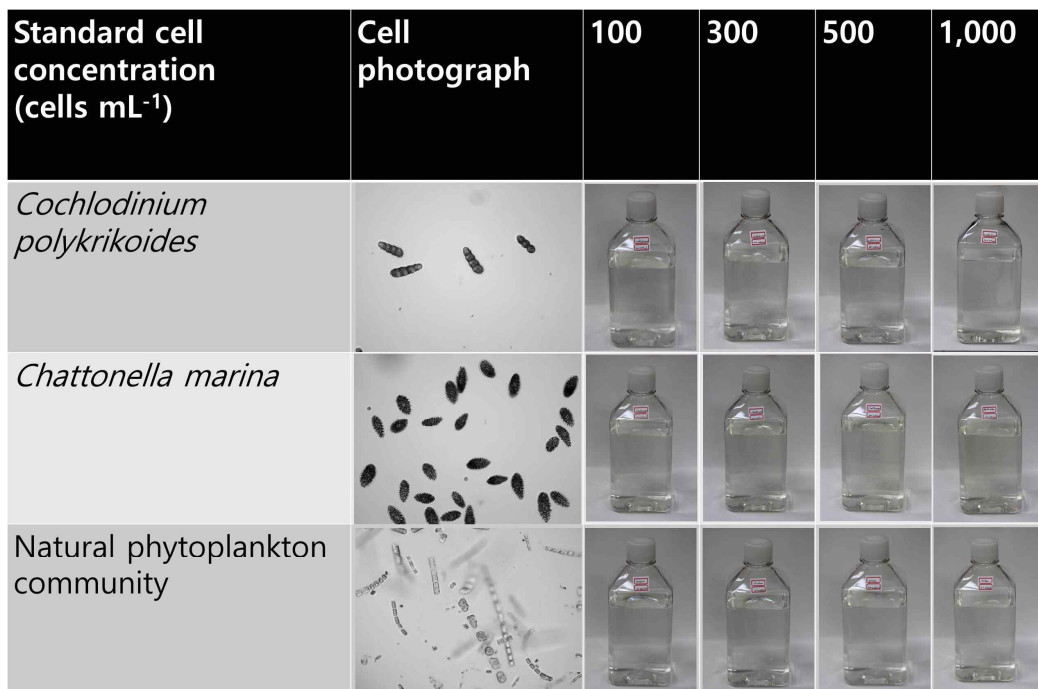


Fig. 22. Photographs of each cell culture in 1 L flask.

Indoor type의 microcosm은 높이 50 cm, 직경 50 cm 아크릴 재질 (두께: 1cm) 원통으로 총 해수 부피가 100 L를 포함할 수 있도록 제작하였다 (Fig. 24). 100 L Indoor microcosm에서 배양될 식물플랑크톤은 1 L flask 실험에서 선정된 종과 동일한 무각와편모조류 (unarmored dinoflagellate) *Cochlodinium polykrikoides* Margalef, 침편모조 (raphidophyceae) *Chattonella marina* (Subrahmanyhan) Hara & Chihara, 적조 생물이 포함되지 않은 natural phytoplankton community 및 대조 구로 식물플랑크톤이 포함되지 않은 filtered seawater로 구성하였다.



Fig. 23. Photographs of analysis of each cell concentration of HABs and natural phytoplankton community in 1 L culture flask using the acoustic system for real-time detection of the harmful algal blooms.

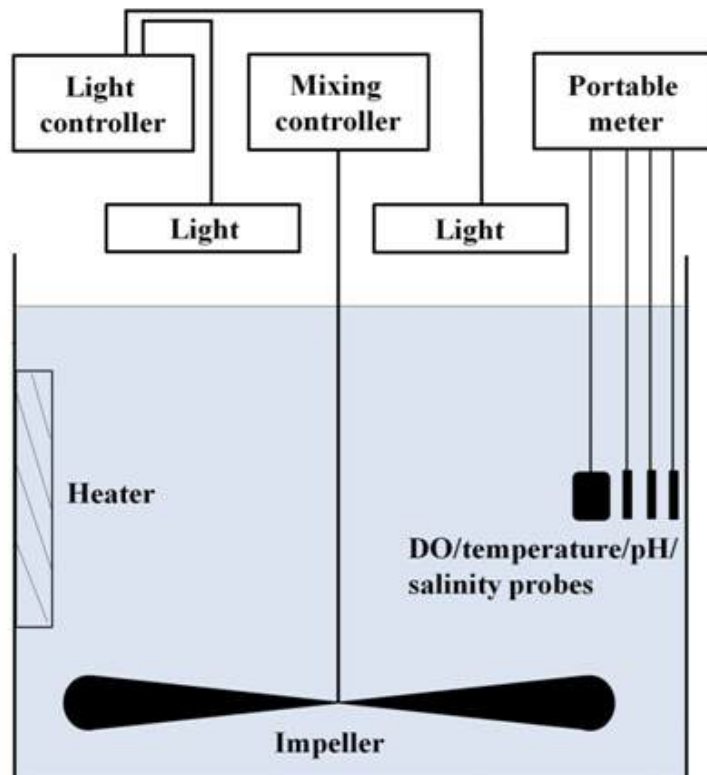


Fig. 24. Schematic diagram of an indoor microcosm (0.5 m radius, 0.51 m deep).

실험 조건 중 광도는 $50 \mu\text{mol photons m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 (10:14, light:dark cycle), 수온은 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 유지하였으며, 수체의 균일한 혼합을 위한 Automatic circulation system을 제작하여 30 rpm으로 수체를 혼합하였다. 이렇게 4개의 100 L microcosm에서 배양된 종의 최종 농도는 *C. polykrikoides*가 $270 \text{ cells mL}^{-1}$, *C.marina*가 $2,610 \text{ cells mL}^{-1}$, natural phytoplankton community가 $1,685 \text{ cells mL}^{-1}$ 이며, 대조구로 filtered seawater를 준비하였다 (Fig. 25). 이렇게 100 L microcosm에서 배양된 각각의 식물 플랑크톤은 음향 탐지 시스템 분석에 사용되었다 (Fig. 26).

Fig. 27과 Fig. 28에 실험실 조건에서의 전체 실험 절차를 요약하였다.

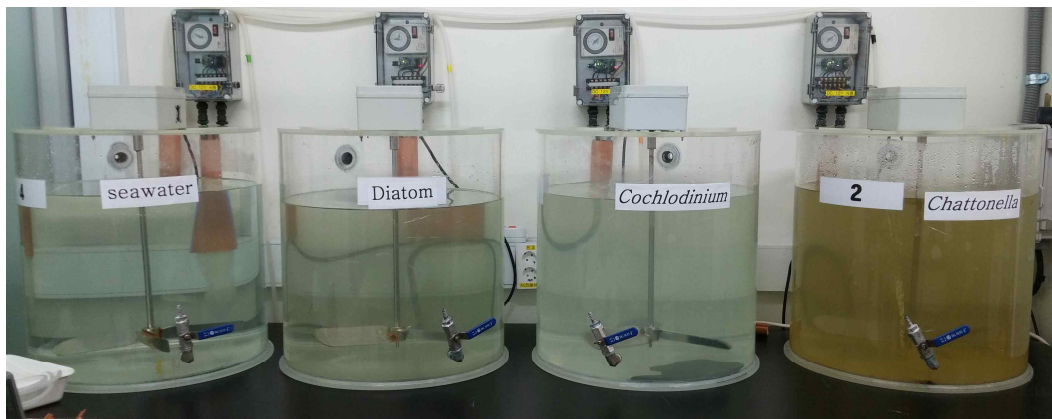


Fig. 25. Photographs of cultured cells of HABs and natural phytoplankton community in 100 L indoor microcosm.

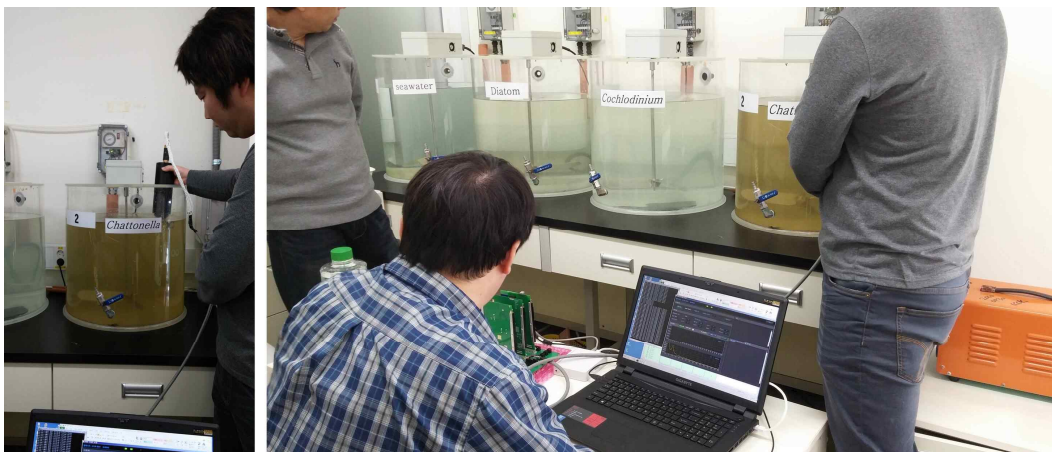


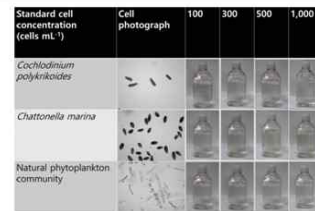
Fig. 26. Photographs of analysis of each cell concentration of HABs and natural phytoplankton community in 100 L indoor microcosms using the acoustic system for real-time detection of the harmful algal blooms.

Analysis of the acoustic system in 1 L flask

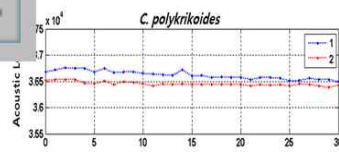
Selection of phytoplankton species



Cell culture of selected HABs in 1 L flask



Analysis of HABs cell concentrations using the acoustic system



Detected results of HABs cell concentrations using the acoustic system

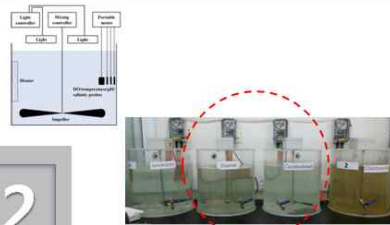
Fig. 27. Procedures of system performance under the condition of 1 liter cultured flask.

Analysis of the acoustic system in 100 L indoor microcosm

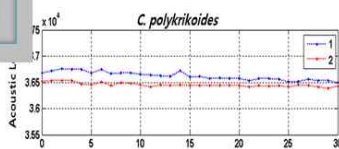
Selection of phytoplankton species



Cell culture of selected HABs in microcosm



Analysis of HABs cell concentrations using the acoustic system



Detected results of HABs cell concentrations using the acoustic system

Fig. 28. Procedures of system performance under the condition of 100 liter microcosm.

음향 탐지 센서의 수신 감도(receiving sensitivity) 특성에 따른 시스템 calibration 을 위해 센서 감도 특성 차이에 따른 기준 레벨 (Reference level) 측정하였다 (Fig. 29). 기준 레벨을 이용한 감도 측정은 수중에 탐지되는 표적이 없는 증류소 조건에서 실시하였다.

각 센서에 대해 총 30 회 수행하여 센서 감도 차이에 따른 시스템 기준 레벨(무단 위, 음향 수신값을 16 비트로 전환한 값)의 평균값을 설정하였다. 총 6기의 시스템에 적용되는 센서의 감도는 각각 다르게 측정되었다. 센서 2번의 수신 감도는 34,600으로 전체 센서 가운데 가장 낮은 감도를 가지고 있었으며, 센서 3번의 감도는 35,100으로 가장 높은 감도를 나타내고 있다. 전체적으로 센서 감도는 34,600 ~ 35,100 범위로 약 500 범위내에서 분포하고 있었다. 기준 레벨값은 실험역에서 적용시 각 시스템의 기준값 설정을 위한 off-set 값으로 적용하였다.

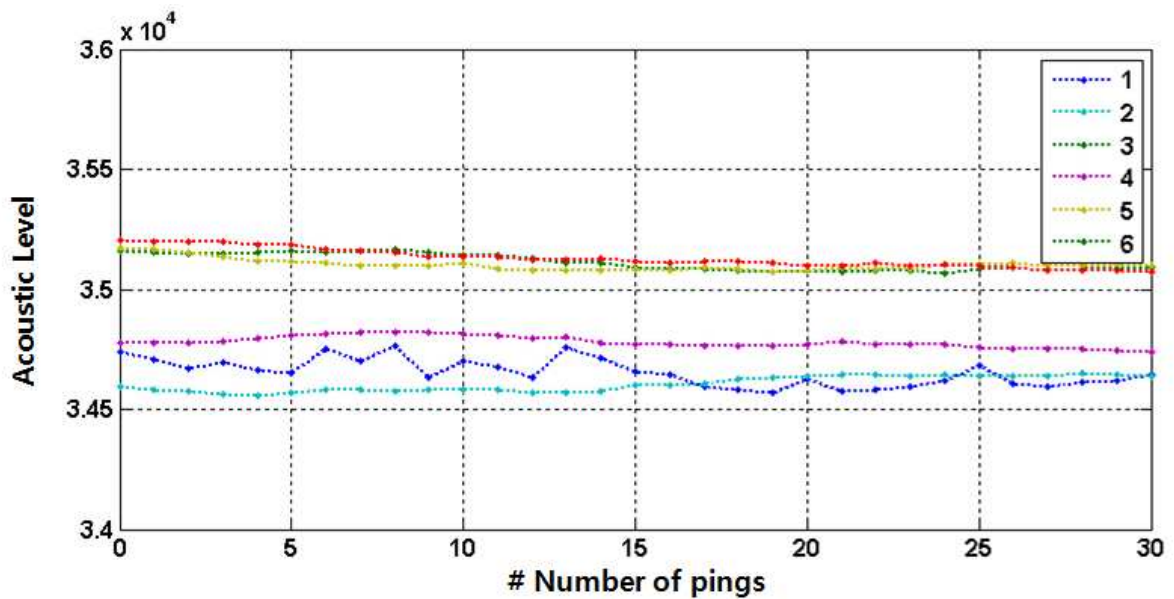


Fig. 29. Reference sensitivity levels of 6 system's sensor.

제작된 6대의 적조 음향탐지 시스템 성능 평가를 위해 적조 시료 배양 microcosm을 구성하여 제작하였다. 적조종 개체수는 100, 300, 500, 1,000 cells/ml로 총 4 단계로 구분하여 적용하였다 (Fig. 22). 이를 위하여 해양 환경과 유사한 폐쇄 생태계 (microcosm, 100 liter)를 실험실에 구축하였다. 대상종은 적조 발생종으로 *Cochlodinium polykrikoides*, *Chattonella marina*, 2종을 선택하였으며, 무적조 조건의 natural phytoplankton community와 대조구로 filtered seawater 사용하였다. 1 liter 시료 및 100 liter 대용량 시료를 이용하여 개발된 시스템의 수신 신호 분석을 통한 시스템 성능 평가를 수행 하였다 (Fig. 27, Fig. 28)

실험실에서 배양한 적조 시료를 이용하여 시스템의 성능을 평가하였다. 이를 위해 제작된 6대의 적조 음향탐지 시스템을 대상으로 적조 시료 배양 시스템을 활용하였다. 음향 수신신호 준위는 개체수 그룹당 900 ping에 대한 평균값을 적용하였다.

1 liter 플라스크 조건에 적조 시료를 넣고 시스템 성능을 평가한 결과, *Cochlodinium polykrikoides* 종에 대한 음향 반사 특성은 500 cell/ml을 제외하고 전체적으로 개체수 증가에 따라 수신 신호가 증가하여 상관성을 보여주고 있으며 음향 레벨은 35,000 ~ 36,200 범위로 나타났다 (Fig. 30). 실험 결과에서 500 cell/ml에서 상대적으로 낮은 음향 수신 레벨은 cell의 상태 및 군집 형태의 차이 혹은 관측 당시 시스템 수신 감도 차이에 의한 요인으로 판단된다.

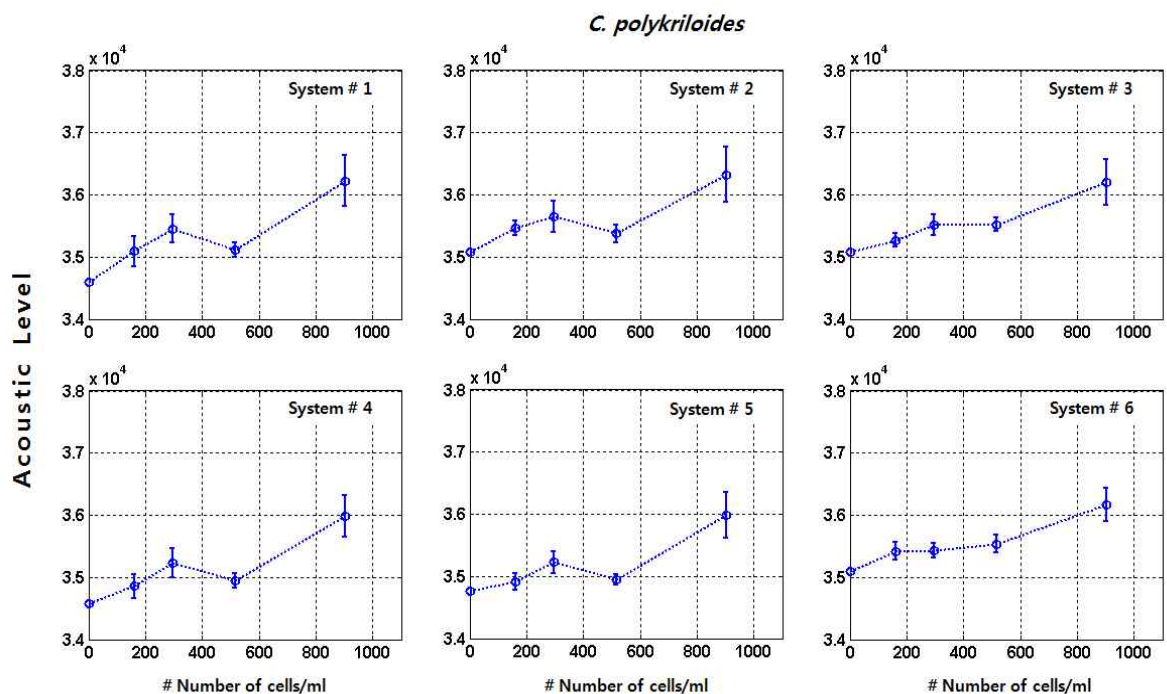


Fig. 30. System performance evaluation results of the *C. polykrikoides*, major species of South sea.

Chattonella marina 종은 개체수 증가에 따라 음향 반사가 강하게 수신되어 높은 상관성을 보여주고 있으며 음향 레벨은 35,100 ~ 37,800의 범위로 나타났다 (Fig. 31). 또한 동일 개체수 조건에서 *Cochlodinium polykrikoides*에 비해 *Chattonella marina*의 음향 반사 특성이 강하게 나타나고 있다.

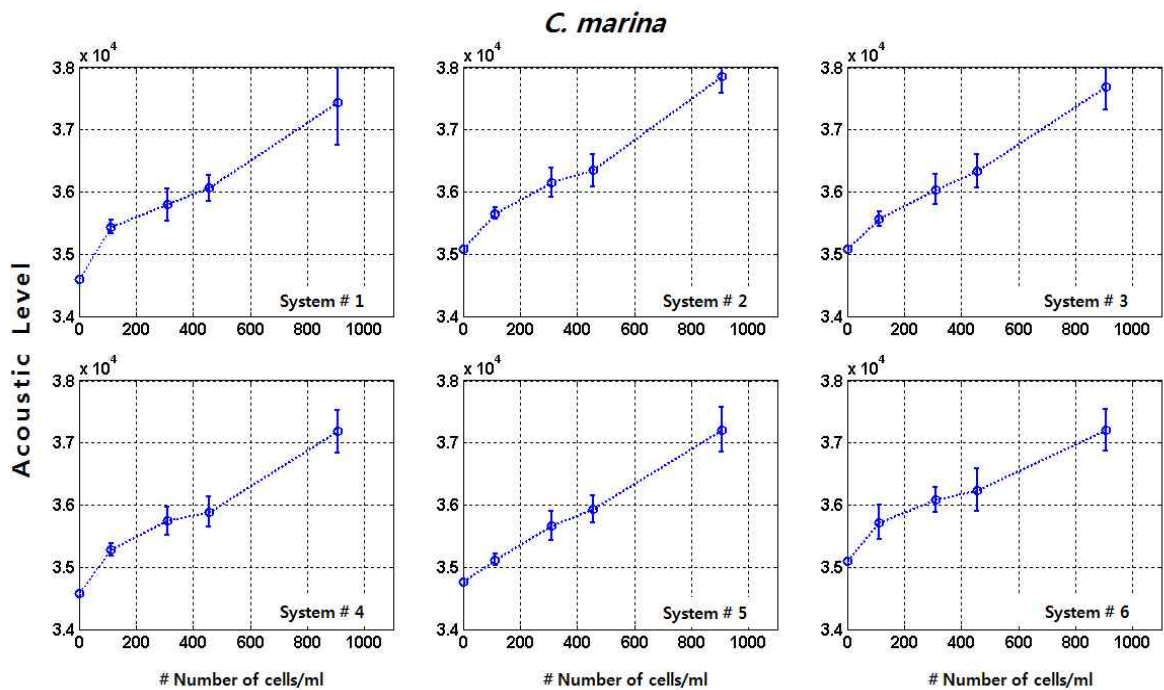


Fig. 31. System performance evaluation results of the *C. marina*.

Natural phytoplankton community 중도 *C. marina*와 유사하게 개체수 증가에 따라 수신 신호가 증가하는 높은 상관성을 보여주고 있으며 음향 레벨은 35,200 ~ 37,050 범위를 보여주고 있다 (Fig. 32).

한편, 대용량 조건에서 *Cochlodinium polykrikoides*와 *Chattonella marina*를 측정된 결과 음향 수신 신호는 일정한 값을 유지하여 신호의 안정성을 보여주고 있으며, 대조구에 비해 높은 음향 레벨을 보여 시스템 안정성을 나타내고 있다 (Fig. 33). *Cochlodinium polykrikoides*와 *Chattonella marina*의 수신 신호 차이는 대용량 조건에서 colony를 형성하는 차이로 판단된다.

실험실 조건에서 실시한 음향 시스템 평가 결과 *Cochlodinium polykrikoides*와 *Chattonella marina* 2종 모두 개체수 증가에 따른 수신 신호의 증가를 보여 시스템 성능이 양호함을 보여주고 있으며, 또한 대용량 조건에서도 안정된 수신 신호 특성을 보여 시스템 안정성이 있음을 나타내고 있다.

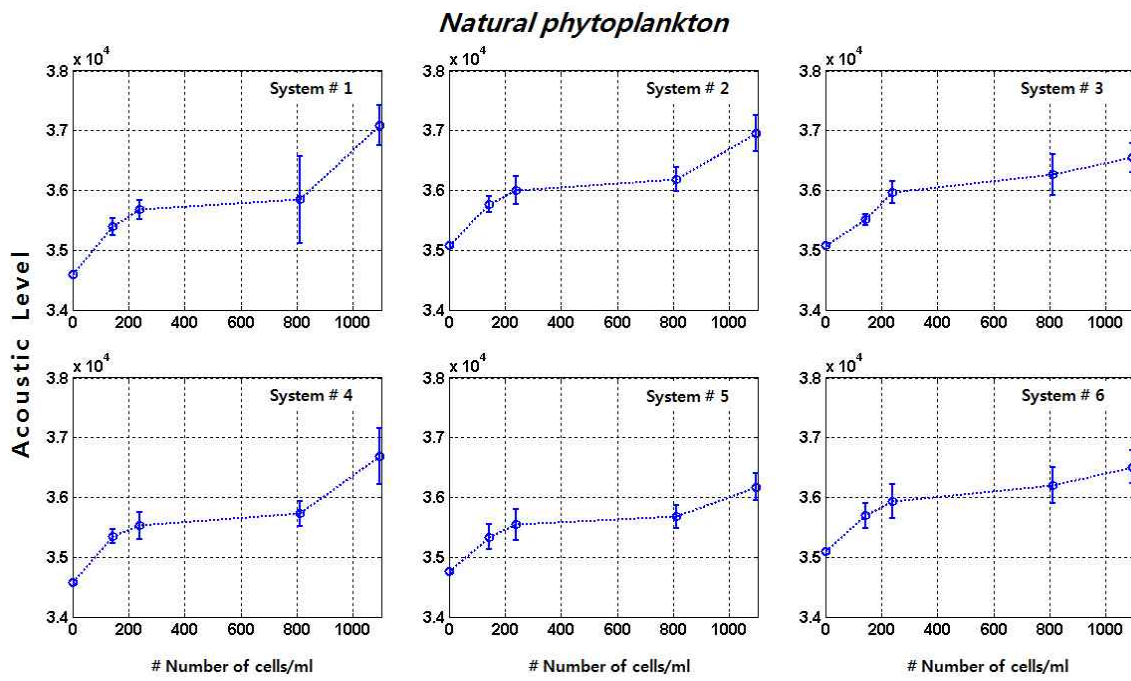


Fig. 32. System performance evaluation results of the Natural phytoplankton community.

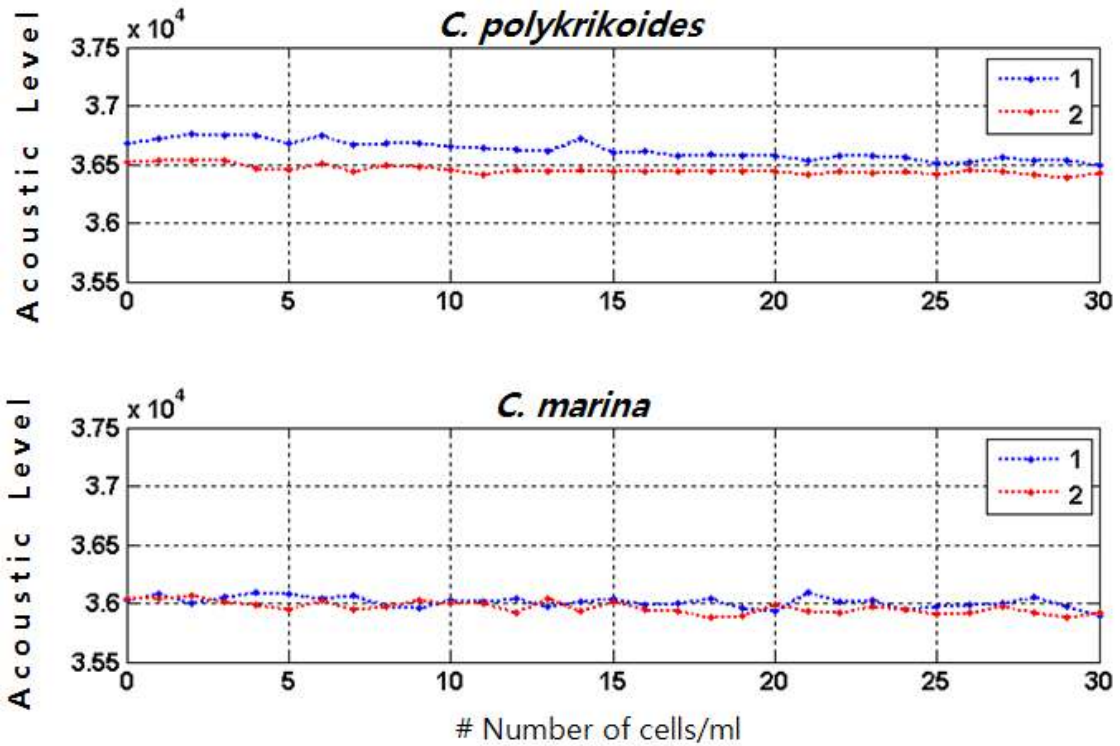


Fig. 33. System performance evaluation results of the *C. polykrikoides*, and *C. marina* under the microcosm condition.

3. 해상에서의 성능 평가

해상에서의 시스템 성능 평가를 위해 제작한 가두리 운용형 시스템의 해상 시험은 통영 MRC 현장에서 실시하였다. 시스템 측정을 위한 디지털 센서는 표층에 설치하였으며 수신 자료는 근거리 무선통신인 Wi-Fi 기반의 탭북을 이용하였다. 과제 개시 시점이 2014년 9월 이후이므로 해상에서 적조가 소멸된 시기였으므로 현장 실험은 무적조 조건에서 실시하였다.

음향 관측은 매 5초 간격으로 실시하였으며 실험은 약 100분 동안 실시하였다. 실험에서 현장 성능 평가 결과 수신 신호는 평균 35,800으로 거의 일정하게 측정되어 시스템 안정성을 보여주고 있었다 (Fig. 34).

이러한 값의 분포는 통영 MRC 해역에서의 현장 reference level으로 대표할 수 있다. 2013, 2014년 하계 적조 발생 시기에 측정한 결과에서 무적조 조건을 나타내는 현장 reference level 값을 기준으로 적조 발생시에는 reference level 값 보다 높은 음향 수신값을 보임을 알 수 있다. 따라서 시스템 평가에서 가장 중요한 요소인 안정성 측면에서 개발된 시스템은 적조 탐지가 가능함을 보여주고 있다.

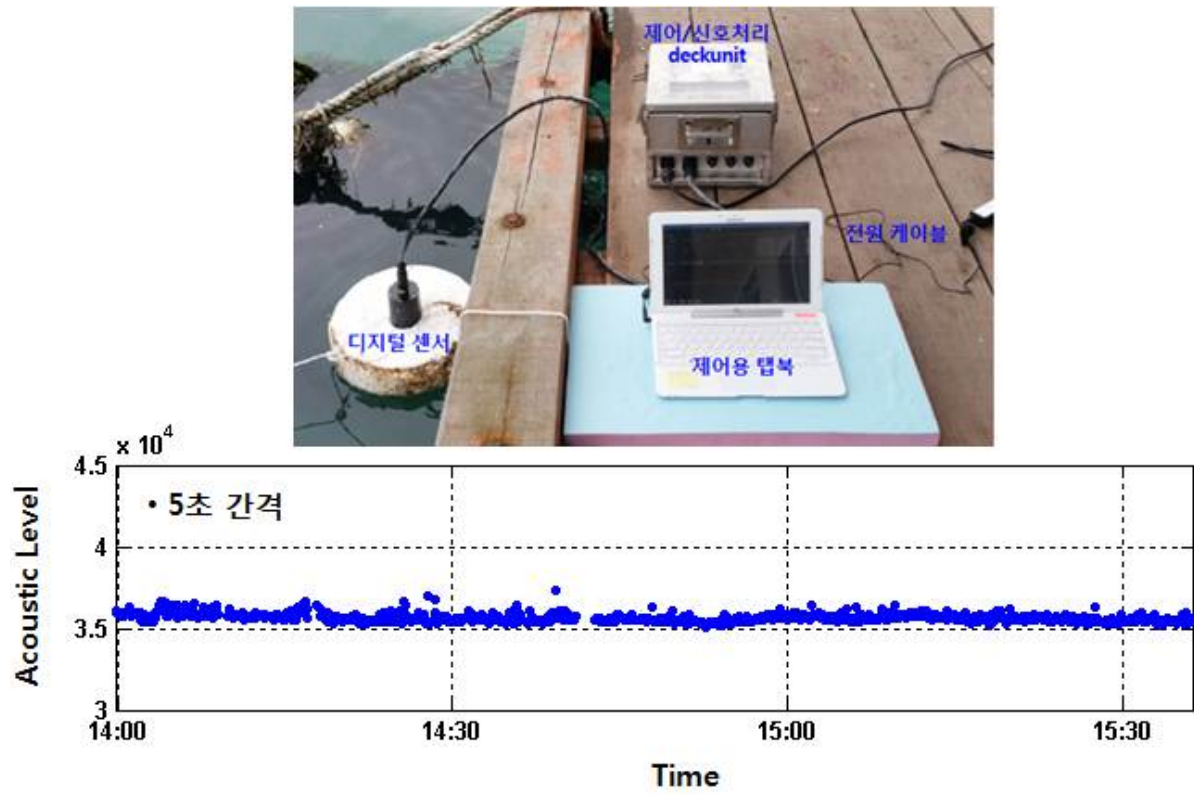


Fig. 34. System performance evaluation results in Tongyoung MRC.

제 3 절 유해적조 실시간 관측 체계 운용안 제시 및 구축

1. 유해적조 탐지 관측 체계망 제시

적조 다발생 해역에 대한 탐지 체계망 설치 요구에 따라 통영 연안에서 유해적조 탐지 관측 체계를 제시하였다. 통영 연안은 총 88개의 가두리 양식장이 밀집되어 있는 대표적인 남해안 양식어업 해역이며 2013년, 2014년 적조 발생으로 인해 172억, 12억의 양식장 어류 피해를 입어 대표적인 유해생물 재난 발생 해역이다. 가두리 양식장 어민들의 요구는 적조 유입시 어류 피해를 최소화하기 위해 해당 양식장 근처에서의 빠른 예보 체계를 필요로 하고 있다.

통영 해역의 적조 다발생 해역의 적조는 북서쪽에서 유입되는 썰물 시기에 대부분 피해를 유발하고 있다. 또한 남해군 미조리, 통영시 사랑면에서 유입되는 해류를 따라 이동하는 적조 생물은 산양읍 연안에서 밀집되며 적조 피해를 유발하고 있다 (Fig. 35). 따라서 통영 해역통영 연안의 적조를 조기에 탐지하기 위해서는 적조 탐지를 위한 체계망 구축은 유입 지점을 중심으로 운영하는 것이 필요하다.



Fig. 35. Current flow and damage area from red tide in Tongyeong coastal.

통영 해역의 적조 음향탐지 시스템 체계 설치에 대해 부이형은 유지 관리 및 설치 운영 비용 측면 때문에 상대적으로 단점이 있고, 선박형의 경우 24시간 실시간 모니터링이 불가능하고 상시 인력 및 비용 측면에서 효율성이 낮다. 따라서 통영 연안

에 위치한 많은 양식장 시설을 이용하여 양식장 근처 혹은 양식장 한쪽 부분에 설치하여 운영하는 것이 합리적으로 판단된다 (Fig. 36). 그러나 외해쪽 혹은 집중 감시 시기 혹은 이동성 파악을 위해서는 부이형 및 선박을 이용한 탐지 체계 운용도 합리적인 장점이 있다.

본 연구에서 개발된 양식장 운용형 시스템을 적용하면, 상대적으로 저비용으로 기존의 양식장 시설을 활용할 수 있으며 또한 어민이 직접 공유할 수 있는 정보체계가 운용이 되므로 시스템 구축에 장점이 있다. 적조 발생 모니터링 시스템은 원격 제어 및 송수신이 가능하므로 KIOST와 통영시 시청 상황실에 연동이 가능하며, 일부 체계는 인접 어촌계에 모니터를 설치하여 어민들이 실시간으로 상황을 모니터링 하는 구조도 설치 가능하다.

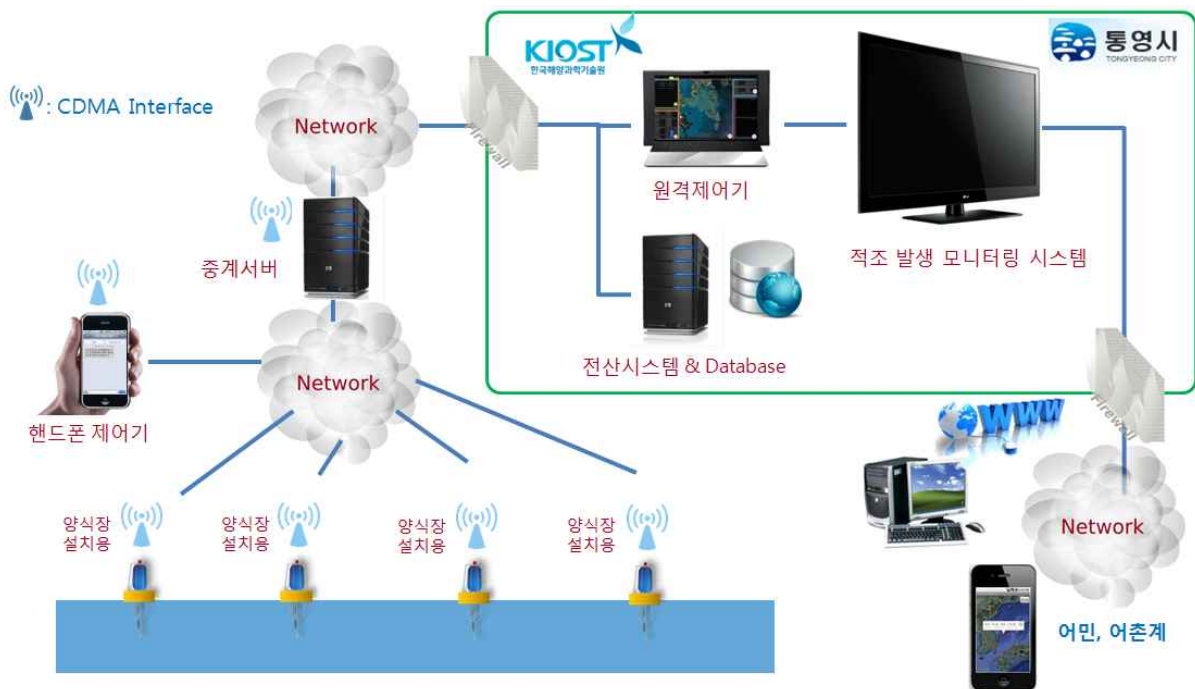


Fig. 36. Overall configuration of aquaculture operation type system.

개발된 가두리 운용형 시스템을 사용한다면 현재 prototype으로 제작한 총 6대의 시스템 운용이 가능하다. 통영시 산양읍 일대의 양식장 분포, 해류 분포도, 피해 지역을 고려한다면 탐지 시스템은 초기 적조 생물이 유입되는 지역 위주로 운영하는 것이 합리적이다.

이러한 점을 고려한다면 통영시 산양읍 풍화리-학림도를 잇는 북서-남동 방향으로 설치하여 썰물 때 유입되는 적조를 탐지하는 시범 운용 체계 구축을 고려할 수 있다 (Fig. 37). 이러한 배치 형태는 주변 가두리를 최대한 이용하는 제안 가운데 하나로, 만일 부이 혹은 선박형 형태를 동시에 운용한다면 좀 더 넓은 해역을 탐지

권역으로 확대할 수 있다. 2013년 운용한 선박형 장비의 경우 약 5-6노트의 속도로 측정된 조건에서도 양호한 탐지 성능을 보이고 있어 복합적인 운용을 고려하면 관역 탐지에도 활용 가능할 것으로 판단된다.



Fig. 37. Practical proposal of the red tide acoustic system in Tongyeong coastal.

2. Multiple 시스템 실시간 제어, 자료 전송망 및 가시화

본 연구를 통해 가두리 운용형 prototype 시스템 개발과 동시에 시스템 제어 프로그램을 동시에 개발하였다. 개발의 주요 목적은 단일 시스템이 아닌 복수의 시스템을 육상 제어국에서 동시에 운용해야 적지 탐지 효과를 극대화 할 수 있으며, 특히 시스템 관리의 효율성을 위해서는 시스템 관제가 필수적이기 때문이다.

Multiple 음향탐지 시스템의 실시간 제어 및 자료 전송망 구축을 위해 해상에서 운용 가능한 시스템과의 연동 프로그램은 Fig. 38과 같이 지도상에 시스템 위치, 정보를 동시에 표출하는 형식으로 구현되었다.

Multiple 시스템은 다수의 시스템 원격 제어, 실시간 자료 저장 기능, 유해적조 음향탐지 시스템 설치 위치 확인 가능(Google 지도 연동 및 위경도 좌표), 다수의 시스템에 대한 음향 신호, 환경 정보(수온, 염분 등), 동시 시각화 기능을 보유하고 있다. 본 소프트웨어는 해상 시스템과 CDMA 기반으로 연결되어 있으며, 육상 서버를 통해 지영 육상 기지국 이외에 온라인 상의 다른 곳으로 정보를 동시에 제공할 수 있다.

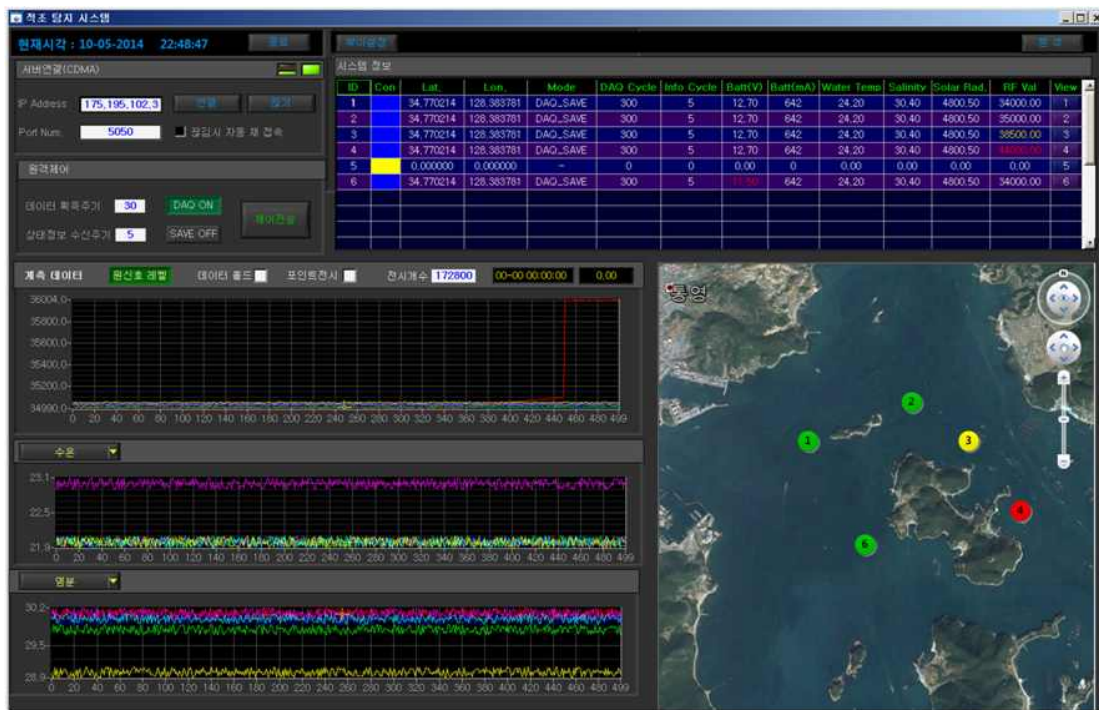


Fig. 38. Remote control S/W program of red tide acoustic detection system.

Multiple 시스템 원격 제어 및 자료 전송 시스템 시험 평가를 위해 가두리 설치용 시스템 현장 동시 관측 실시하였다. 대상 해역은 통영 연안지역 3개 정점에 가두리

설치용 시스템 설치하여 운용하였다 (Fig. 39). 총 6대의 시스템 가운데 시범적으로 3대를 이용하여 동시에 현장 운용을 실시하였다.

접근성을 고려하여 세부 위치는 ① 통영 MRC, ② 연명 포구 선착장, ③ 풍화리 선착장으로 선정하였다. 적조 음향탐지 제어 프로그램 성능 평가를 위해 약 100분 간 30초 간격으로 자료를 수집하여 운용하였다.



Fig. 39. Location of field experiment for red tide acoustic detection system.

Multiple 시스템 자료 가시화는 가두리 설치용 시스템 자료 기반으로 원격제어 및 가시화 프로그램을 통한 시스템 정보 획득하였다 (Fig. 40).



Fig. 40. The display of system remote control unit and information of red tide acoustic detection system

시스템 제어부 가시화 항목은 다음과 같다.

- 데이터 획득 주기
- 시스템 상태 정보
- 수신주기 시간 변경 기능
- 네트워크 접속 상태 등이다 (Fig. 41).

시스템 상태 정보 가시화 항목은 다음과 같다.

- 수온, 염분 등 적조 발생 해역의 환경 정보
- 시스템 상태 정보 (내부 온도/습도, 전압, 전류 등)
- 설치 위치 위/경도 등 시스템 위치 정보 표시 (Fig. 42).

데이터 정보 가시화 항목은 다음과 같다.

- Multiple 시스템 음향 신호
- 환경 자료 표시 (Fig. 43).

시스템 설치 위치 가시화 항목은 다음과 같다.

- 시스템 설치 위치를 구글 맵과 연동하여 운용 (Fig. 44).

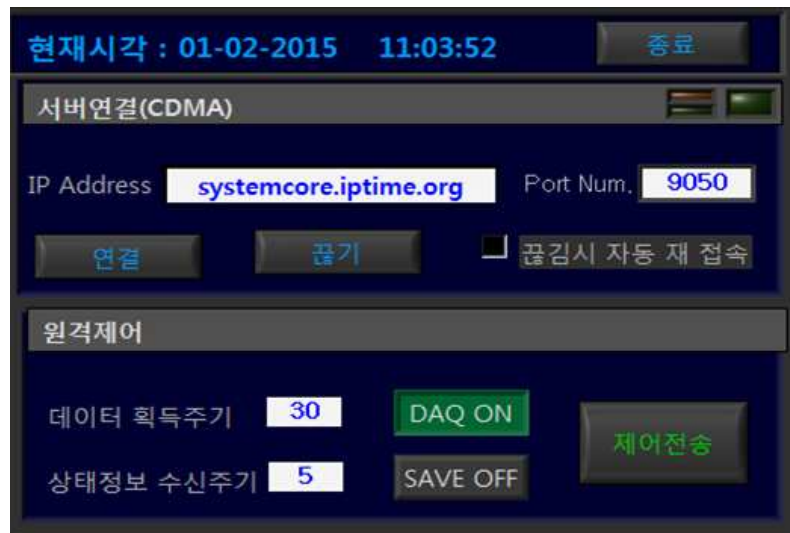


Fig. 41. The display of system control unit of red tide acoustic detection system.

데이터 저장 시작		데이터 저장 중지		재생		12-30-2014 12:27:52 (100.0)		분석				
시스템 정보												
ID	수신횟수	위도	경도	운용모드	RF Val	수온(°C)	문도(°C)	습도(%)	전압(V)	전류(mA)	염분도(%)	일사량
1	0,205	34.769798	128.383240	DAQ	35955.25	0.00	18.70	18.95	11.38	899	0.00	0.00
2	0,200	34.778046	128.395844	DAQ	36183.49	0.00	24.58	11.16	12.43	784	0.00	0.00
3	0,205	34.817848	128.370529	DAQ	36920.41	0.00	21.99	12.60	11.40	851	0.00	0.00

Fig. 42. The display of system status of red tide acoustic detection system.



Fig. 43. The display of data/information of red tide acoustic detection system.



Fig. 44. Visualization of red tide detection system based on the Google map.

Multiple 시스템 원격 제어 및 자료 전송 시스템 시험 평가 결과, 시범적으로 운용한 3기의 시스템 모두 현장에서 정상적으로 평가되었다. 도시 지역과 달리 해상 지역에서는 CDMA 자료 전송망의 안정성이 상대적으로 취약하지만 시범 운용안 통영 연안 해역에서는 자료의 끊김 현상이 나타나지 않고 정상적으로 작동하였다.

본 연구에서 제시한 복수의 prototype 시스템을 이용한 적조 원격탐지 시스템은 안정적인 값을 제시하고 있으며, 원격 제어 및 자료 전송망도 안정적으로 운용되었다.

연구 개발품을 적용한 부분이라 시스템 사양에서 기능 조정 및 시범적인 운용 계획안이 필요하다. 특히, 어민들이 직접적으로 적조 현상을 가두리 환경에서 이용할 수 있게 시스템을 구축하려면 ① 운용 시스템의 단순화, ② 운용의 안정성, ③ 자료 가시화의 단순화, ③ 시스템 가격의 적절성, ④ 복수 시스템 기반의 자료 융합이 수

반되어야 할 것이다. 또한 육상 기지국에서 자료를 통합 관리할 수 있는 관제 센터 구축 및 운용이 필요하다.

이러한 부분은 연구 개발(국가 R&D)을 통한 장비 활용 단계를 벗어나 저가용 시스템 개발 및 운용을 위한 상용화 단계에서 접근할 부분으로 판단된다. 특히, 적조 다발생 해역 혹은 피해 다발 해역의 지방자치단체에서 국가를 상대로 적조 탐지를 위한 체계 구축을 위한 예산 요청이 필요한 부분이다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

본 연구는 유해적조를 대상으로 음향탐지 기법을 이용하여 실시간 관측하며 관측된 결과를 종합하기 위한 네트워크 구축을 위한 기술을 개발하는 것을 목적으로 한다. 총 연구기간 목표달성도는 Table 6과 같다.

Table 6. Goal achievement of the study period

총 연구기간내 년차별 연구내용 대비 달성율(%)					
년차	연구성과	진척율		성취도 (정상, 부진)	특기사항 (우수성 및 부진사유)
		년차별 계획대비	총연구 기간대비		
2014	- 기 개발된 유해적조 음향 탐지 시스템 성능 개량 (해상 가두리 설치용)	100	100	정상	과제 시작이 적조 소멸 이후에 진행 되었으므로 적조 발생 조건에서 해상 성능 평가는 불가능
	- 유해적조 음향 시스템 제작 (해상 가두리 설치용)	100	100		
	- 적조 시료를 이용한 성능 평가	95	95		
	- 유해적조 탐지 관측 체계망 제시	100	100		
	- 유해적조 탐지 Multiple 시스템 실시간 제어, 자료 전송망 및 가시화	100	100		

제 2 절 대외기여도

1. 기술적 측면

- 연속적, 실시간 유해적조 음향탐지 시스템 운용을 통한 연안 유해생물 실시간 관측 네트워크 구축에 적용
- 국내 개발 기술임으로 다양한 적조 발생 해역에 설치 운용 시스템 확장이 가능하므로 유해적조 탐지를 위한 체계 구축에 활용
- 저가형 시스템 개발을 위한 원천 기술 확보
- 원격 자료 전송 및 제어가 가능하므로 복수의 모니터링 센터 운영에 적용
- 유사 기술을 원자력발전소 취수구 생물 탐지에 운용하여 해안에 설치된 국가기 간산업 설의 생물재해 예방에 운용 가능

2. 경제 산업적 측면

- 음향자료 전송 네트워크 운영을 통한 실시간 대국민 정보서비스 실현
- 실시간 적조 탐지 자료 전파를 통한 어민들의 적조 대처 시간 확보 및 정보 제공에 따른 적조 피해 절감
- 재해유발 생물 발생에 대한 실시간 서비스는 전문가 및 일반인이 경제 손실을 최소화하는 방안을 강구하는 데 활용할 수 있음
- 음향탐지 시스템 수입에 따른 비용 절감 및 음향 시스템 응용 적용에 따른 시스템 국산화 및 상용화
- 적조생물 음향 탐지를 위한 시스템 설계를 기반으로 해파리 등 다른 해양 유해생물에 대한 탐지 시스템 설계 및 확장에 적용 가능
- 유해생물 현장 정보 관리기술 개발로 실시간 정보 유통의 기반 마련

제 3 절 연구결과 활용 계획

- 적조 다발생 해역으로 매년 막대한 피해를 입는 통영 해역에 유해적조 실시간 탐지 체계 시범 구축에 활용
- 운용성 편이를 위해 양식장 운용형 시스템을 적용하여 시스템 구축 가능
- 지역 현안 문제 해결을 위한 한국해양과학기술원의 국가 및 사회 기여 측면에서 해양수산 분야에 적용 가능
- 적조 예보 시스템 구축을 위한 연구 사업에서 실시간 적조 탐지 자료 및 환경 자료 제공으로 예보 정확도 증진에 활용
- 적조탐지를 위해 개발된 전자보드와 센서 접합 장치는 외국 제품에 전적으로 의존하던 음향탐지 장비의 국산화에 활용
- 적조생물 음향 탐지를 위한 시스템 설계를 기반으로 해파리 등 다른 해양 유해 생물에 대한 탐지 시스템 설계 및 확장에 적용 가능

참고 문헌

- 강돈혁, 임선호, 이형빈, 도재원, 이윤호, 최지용. 2013. 초음파를 이용한 유해적조의 실시간 음향탐지 시스템 개발 및 평가. *Ocean and Polar Research*, 35: 15-26.
- 국립수산과학원 (2007) 적조 예보 및 발령기준. http://portal.nfrdi.re.kr/redtide/webpage/operation/operation_04.jsp Accessed 21 September 2012.
- 김용훈, 김성현, 박혁, 최준호, 이호진, 최승운, 최재연, 서승원 (2004) 초고주파 라디오 미터 센서를 이용한 적조 관측실험. In: 2004년도 GIS/RS 공동 춘계학술대회 논문집, 2004년 10월, pp 449-454.
- 김병찬, 허민, 임재홍 (2007) 무선 센서 네트워크를 이용한 적조 모니터링 시스템의 설계 및 구현. *한국항해항만학회지* 31(3):263-269
- 김용서. 2001. 해양생태계 연구를 위한 폐쇄생태계의 활용. *환경생물*. 19:183-194.
- 김영태, 정용훈, 채윤주, 이충원, 김소영, 최강원, 양재삼. 2006. 메조코즘을 이용한 갯벌의 담수화과정 중 수질 변화. *한국해양학회지*. 11: 49-67.
- 김학균 (2005) 해양적조. 다솜출판사, 서울, 467 p
- 서필수, 이상준, 김윤, 이정호, 김학균, 이제동 (1998) 적조 와편모조류, *Cochlodinium polykrikoides*의 순수분리 및 성장. *J Korean Fish Soc* 31: 71-76.
- 양재삼, 정용훈. 2011. 해양과학에서 mesocosm의 적용 사례 연구: 연성저질환경연구를 위한 도구. *한국해양학회지*. 14: 93-106.
- 윤양호 (2001) 바다의 반란 적조. 집문당, 서울, 242 p.
- 윤홍주, 김형석 (2005) 한국 연안의 적조형성과 기상 요인간의 상관성에 대한 통계학적 해석 및 위성에 의한 적조 모니터링. *한국어업기술학회지* 41: 279-284.
- 이문옥 (2011) 한국 남해 중부 해역의 장기수질변화와 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생의 특징. *한국해양환경공학회지* 14: 19-31.
- 임월애, 이영식, 박종규 (2009) 2008년 남해동부해역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생 특성. *한국해양학회지 「바다」* 14: 155-162.
- 정상옥, 안경호 (2011) 우리나라 연안의 코클로디니움 적조발생 변동 연구. In: 2011년도 한국환경생태학회 학술대회논문집, 2011년 4월, pp 57-58.
- Ahn YH, Shanmugam P, Chang KI, Moon JH, Ryu JH. 2005. Spatial and temporal aspects of phytoplankton blooms in complex ecosystems off the Korean Coast from satellite ocean color observations. *Ocean Sci J* 40: 67-78.

- Angls S, Jordi A, Garcés E, Mas M, Basterretxea G. 2008. High-resolution spatio-temporal distribution of a coastal phytoplankton bloom using laser in situ scattering and transmissometry (LISST). *Harmful Algae* 7: 808-816.
- Bok TH, Paeng DG, Kim E, Na J, Kang D. 2010. Ultrasound backscattered power from *Cochlodinium polykrikoides*, the main red tide species in the Southern Sea of Korea. *J Plankton Res* 32: 503-514.
- Carvalho GA, Minnetta PJ, Fleming LE, Banzona VF, Baringera W. 2010. Satellite remote sensing of harmful algal blooms: A new multi-algorithm method for detecting the Florida Red Tide (*Karenia brevis*). *Harmful algae* 9: 440-448
- Crawford GB, Farmer DM. 1987. On the spatial distribution of ocean bubbles. *J Geophys Res* 92: 8231-8243
- Downing A, Thorne PD, Vincent CE. 1995. Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer. *J Acoust Soc Am* 97: 1614-1620
- Grice G.M., Reeve M.R. 1982. Introduction and description of experimental ecosystems. pp. 1-9. In marine mesocosms. Biological and chemical research in experimental ecosystem (Grice GD and MR Reeve eds.) New York. Springer-Verlag.
- Guillard RRL. 1975. Culture of Marine Invertebrate Animals. Plenum Press, New York, 338 p.
- Guillard R.R.L. 1975. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates, in: W.L. Smith, M.H. Chaney (Eds.), Culture of Marine Invertebrate Animals, Plenum, New York, pp. 29-60.
- Jung S.W., Kang Y-H., Katano T., Kim B-H., Cho S-Y., Lee L.H., Kim Y-O., Han M-S. 2010. Testing additions of *Pseudomonas fluorescens* HYK0210-SK09 to mitigate blooms of the diatom *Stephanodiscus hantzschii* in small- and large-scale mesocosms, *J. Appl. Phycol.* 22: 409-419.
- Jung S.W., Kang Y-H., Baek S.H., Lim D., Han M-S. 2013. Biological control of *Stephanodiscus hantzschii* (Bacillariophyceae) blooms in a field mesocosm by the immobilized algicidal bacterium *Pseudomonas fluorescens* HYK0210-SK09, *J. Appl. Phycol.* 25: 41-50.
- Kim E, Lee H, Na J, Choi JW, Kang D (2010) 5-MHz acoustic-backscatter measurements of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in Korean coastal waters. *ICES J Mar Sci* 67: 1759-1765.

- Kudela RM, Gobler CJ. 2011. Harmful dinoflagellate blooms caused by *Cochlodinium* sp.: Global expansion and ecological strategies facilitating bloom formation. Harmful algae 14:71-86.
- Kudela, R.M., Gobler, C.J., 2012. Harmful dinoflagellate blooms caused by *Cochlodinium* sp.: global expansion and ecological strategies facilitating bloom formation. Harmful Algae 14, 71 - 86.
- Ma Y, Varadan VV, Varadan VK (1987) Acoustic response of sedimentary particles in the near field of high-frequency transducers. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control 34:3-7.
- Medwin H, Clay CS (1998) Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic Press, Boston, 712 p.
- NFRDI (2010) 국립수산과학원 적조정보시스템. <http://portal.nfrdi.re.kr/redtide/> Accessed 16 October 2012.
- PANAMETRICS-NDT (2012) Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing. <http://olympusNDT.com> Accessed 13 Oct 2012.

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.