

**적조발생 조기경보 원격 레이저 형광 센서 개발(수산실
용화기술개발사업)**

Remote LIF sensor monitoring red tides

광주과학기술원 고등광기술연구소

농 립 수 산 식 품 부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “적조발생 조기경보 원격 레이저 형광 센서 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2012 년 5 월 31 일

주관연구기관명 : 광주과학기술원

주관연구책임자 : 강 훈 수

연 구 원 : 박 영 호

연 구 원 : 오 명 규

연 구 원 : 김 봉 준

협동연구기관명 : (주)동양화학

협동연구책임자 : 형 기 우

요 약 문

I. 제 목

적조발생 조기경보 원격 레이저 형광 센서 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 적조 다발 해역의 적조 발생을 조기에 감지할 수 있는 레이저 원격 모니터링 시스템 개발
 - 적조 생물의 클로로필 농도를 원격 측정하여 적조 발생 조기 경보
 - 해안 고정식, 휴대용, 선박 탑재 가능한 플랫폼
 - 적조발생 조기경보 원격센서의 상용화
- 지구온난화와 우리나라 연근해 부영양화로 인해 해마다 수십-백여 건이 넘는 적조가 발생하고 있음.
- 적조 발생의 조기 경보는 최대 수백억 원에 달하는 피해액의 감소와 효율적인 방재활동에 필수적임.
- 적조 미생물의 레이저 형광을 원격으로 측정하면 기존 육안 예찰에 비해 20배 높은 감도를 실현하게 되어 적조 발생 초기에 조기 경보 가능.
- 본 과제에서는 원격 레이저 형광법을 이용한 적조 조기 경보 센서를 개발하여 국내 수산업 발전에 기여하고자 함.

III. 연구개발 내용 및 범위

- 적조 생물 형광 감지용 레이저 원격측정 시스템 개발
 - 클로로필-a 농도 측정
 - 측정 감도 : 0.1 $\mu\text{g}/\ell$
 - 측정 거리 : 1 km 이내
 - 해수 라만 산란 밴드 동시 측정
 - 우리나라 적조 유발 생물 중에 대한 분광 특성 연구를 통한 최적 수신 채널 설정
- 정량화 및 장치 제어 기술 개발
 - 해수 라만 밴드를 이용한 정량화 및 baseline 처리 알고리즘 개발
 - 사용자 친화적 인터페이스 프로그램 개발
 - 원격모니터링 프로그램 및 통신모듈 개발
- Prototype 장비 개발 및 시범 측정
 - 해안 고정식, 선박 탑재 가능한 규모
 - 적조 다발 해역에서의 시범 측정 수행

- 조기경보 원격센서의 상용화
 - 원격센서 시제품 제작
 - 원격모니터링 시스템 제작
 - 양산화 시스템 확립

IV. 연구개발결과

- 적조 생물 형광 감지용 레이저 원격측청 세계 최고 수준 감도 시스템 개발
 - 클로로필-a 농도 측정
 - 측정 감도 : 0.1 $\mu\text{g}/\ell$ 미만의 높은 감도 획득(적조 경보의 1/20 수준)
 - 측정 거리 : 1 km 미만
 - 해수 라만 산란 밴드 동시 측정으로 적조 농도 산출 자동화 시스템 개발
- 정량화 및 장치 제어 기술 개발
 - 해수 라만 밴드를 이용한 정량화 알고리즘 및 장비 인터페이스 개발
 - 원격모니터링 프로그램 및 통신모듈 개발
- 원격 모니터링 장비 개발 및 시범 측정
 - 해안 고정식 시제품 개발 (진해만 일대 현장 설치 및 고감도 적조 관측 구현)
 - 적조 다발 해역에서의 시범 측정 수행
- 조기경보 원격센서의 상용화
 - 원격센서 시제품 제작 (시제품 동작 매뉴얼 작성)
 - 원격모니터링 시스템 제작

V. 연구성과 및 성과활용 계획

- 실용화/ 산업화 계획 (회사에서 활용할 계획/ 시장 판매처 등등)
- 시장진입을 위한 단계적 전략 수립
- 인증획득 계획
- 해외시장 진출 기반 마련
- 외부 네트워크 활용 방안
- 사업화 전략 추진

SUMMARY

I. Title

Remote LIF sensor monitoring red tides

II. Purpose and Necessariness of Research

- Developing remote laser sensor to observe red tide at earlier stage.
- Sea side immobile, portable and ship loadable platform.
- Commercializing red tide remote sensor
- Several tens or hundreds red tide occurred by eutrophication and global warming
- Red tide early warning system is necessary for effective disaster prevention.
- Remote LIF sensor has 20 times higher sensitivity than conventional naked eye monitoring.

III. Research substance and scope

- Laser remote sensor for red tide fluorescence
 - Chloolophyll concentration measurement
sensitivity : 0.1 ug/l
remote distance : less than 1 km
 - sea water Raman scattering measurement
 - optimized receiving channel selection for Korean red tides
- Quantization and device control
 - concentration signal quantization with sea water Raman band
 - interface program for general user
 - remote monitoring program and communication module
- Prototype device and field measurement
 - sea side immobile and ship loadable
 - field measurement in frequent red tide occurrence site
- Commercializing remote sensor
 - remote sensor trial manufactured good
 - remote monitoring system
 - mass production system

IV. Results of research and development

- World top class laser remote sensor for red tide fluorescence
 - Chlorophyll concentration measurement
sensitivity: 0.1 ug/l (1/20 red tide warning level)
remote distance : less than 1 km
 - sea water Raman scattering measurement
- Quantization and device control
 - concentration signal quantization with sea water Raman band
 - interface program for general user
 - remote monitoring program and communication module
- Prototype device and field measurement
 - sea side immobile (Chinhae bay field loading)
 - field measurement in frequent red tide occurrence site
- Commercializing remote sensor
 - remote sensor trial manufactured good (operation manual)
 - remote monitoring system
 - mass production system

V. Achievement and application plan

- commercialization plan (market and company)
- stepping plan for market entrance
- authentication plan
- global market entrance base preparation
- using external network
- commercialization strategy

CONTENTS

Chapter 1 Outline of research project

Chapter 2 Present condition of domestic and abroad technology

Chapter 3 Content and results of research project

Chapter 4 Contribution to related field and achievement

Chapter 5 Achievement and application plan

Chapter 6 Abroad scientific information collected during research process

Chapter 7 References

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요

- * 연구개발의 목적, 필요성 및 범위 등을 기술

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- * 국내·외 관련분야에 대한 기술개발현황과 연구결과가 국내·외 기술개발현황에서 차지하는 위치 등을 기술

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- * 이론적, 실험적 접근방법, 연구내용, 연구결과를 기술

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

- * 연도별 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술발전의 기여도 등을 기술

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

- * 실용화·산업화 계획(기술실시 등)
- * 교육·지도·홍보 등 기술 확산 계획 등
- * 특허, 품종, 논문 등 지식재산권 확보계획 등
- * 추가연구, 타 연구에 활용 계획 등
- * 연구기획사업 등 사업별 특성에 따라 목차는 변경 가능함

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

- * 보고서 작성 시 인용된 모든 참고문헌을 열거

제 1 장 연구개발과제의 개요

1절 연구 개발의 목표

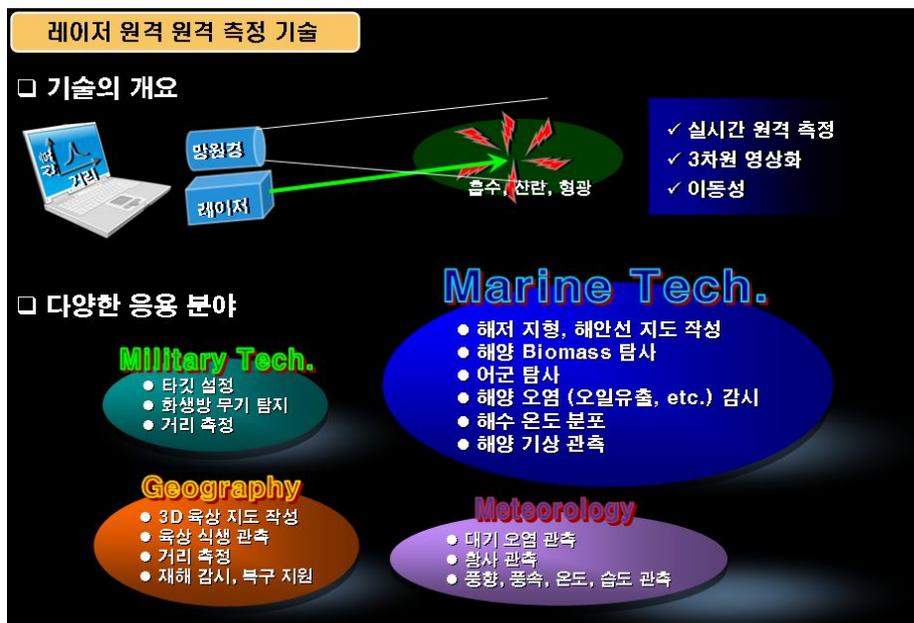
1. 적조 다발 해역의 적조 발생을 조기에 감지할 수 있는 레이저 원격 모니터링 시스템 개발

- 가. 적조 생물의 클로로필 농도를 원격 측정하여 적조 발생 조기 경보
- 나. 해안 고정식, 휴대용, 선박 탑재 가능한 플랫폼
- 다. 적조발생 조기경보 원격센서의 상용화
- 라. 지구온난화와 우리나라 연근해 부영양화로 인해 해마다 수십-백여 건이 넘는 적조가 발생하고 있음.
- 마. 적조 발생의 조기 경보는 최대 수백억 원에 달하는 피해액의 감소와 효율적인 방제 활동에 필수적임.
- 바. 적조 미생물의 레이저 형광을 원격으로 측정하면 기존 육안 예찰에 비해 20배 높은 감도를 실현하게 되어 적조 발생 초기에 조기 경보 가능.
- 사. 본 과제에서는 원격 레이저 형광법을 이용한 적조 조기 경보 센서를 개발하여 국내 수산업 발전에 기여하고자 함.

2절 연구 개발의 필요성

1. 연구개발의 과학기술, 사회경제적 중요성

가. 기술적 측면



(1) 레이저를 이용한 원격 측정 기술(Laser Remote Sensing)은 세계적으로 지리정보, 기상, 환경, 우주, 원자력, 군사 등 다양한 공공 및 산업 분야에서 상용화 수준으로 개발되어 활용되고 있음.

(가) 국내에서는 황사, 오존 측정 레이저 원격 측정 기술을 도입하여 현장에서 활용하고 있으며, 해안선 지도 작성 등 국토지리정보 분야에서 활용 가능성이 검토되고 있음.

(나) 기상, 환경 분야에서 국내 레이저 원격 측정 기술은 이미 선진국 수준의 연구개발 능력을 보유하고 있으나 실용화에 있어서는 아직 충분한 수준에 이르지 못하고 있음.

(2) 적조 다발 지역에 대한 조기 경보가 가능한 실시간 광대역 감시 기술 개발은 조기에 효율적인 방재활동을 가능하게 하여 피해액 감소에 기여할 것임.

(가) 현재 우리나라의 적조 감시 기술은 해상 육안 관측과 실험실에서 DNA 분석 기술에 기초하고 있음. 또한 인공위성을 이용한 적조 감시 및 연구가 활발하게 진행되고 있음

(나) 세계적으로는 적조 생물의 형광 신호를 측정하는 소자형 센서들이 개발되고 있으며, 비행기 또는 선박 탑재형 다파장 분광기를 이용한 적조 발생 해역에 대한 조사를 수행하고 있음.

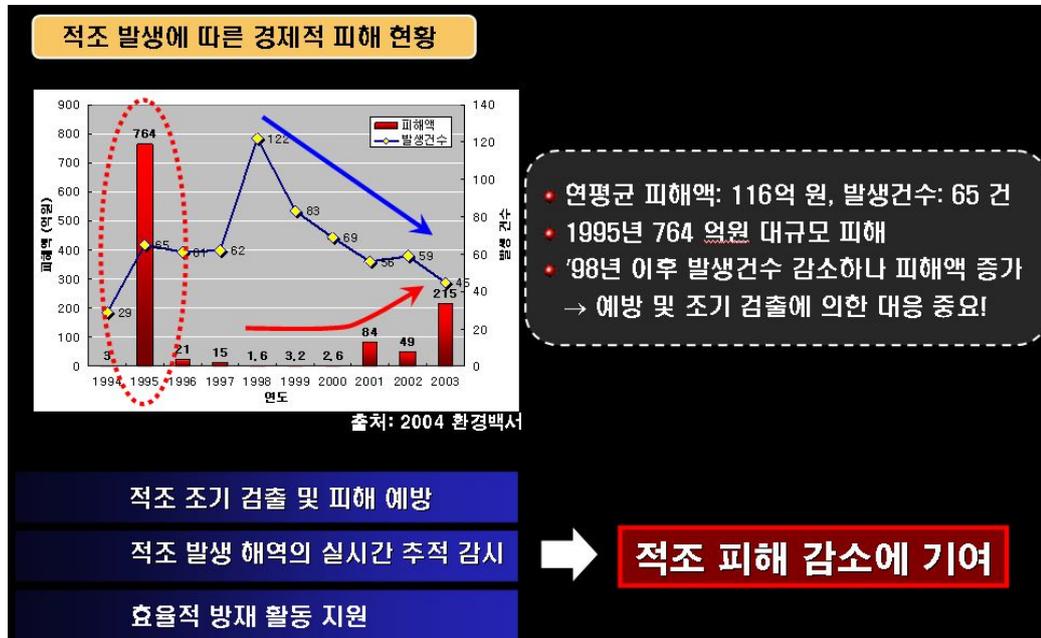
(다) 개인휴대, 선박탑재, 해안 고정식 등 다양한 플랫폼이 가능한 적조 생물의 원격 형광 측정 기술은 높은 감도, 야간 감시 가능, 실시간 조사, 광대역 스캔 방식 조사가 가능함.

[적조 감시 기술의 장단점 비교]

	레이저 원격 감시	위성 감시	형광 센서 (Point 측정)	실험실 분석	육안 감시
장점	-실시간 감시 -광대역 감시 -야간 감시 탁월 -고감도 -높은 공간 분해능 -다양한 플랫폼 가능	-초광대역 감시 -대규모 적조 때 이동 경로 추적 관측	-실시간 감시 -고감도 -가격 저렴	-고감도 정량 분석 -악성 유해 종판별 가능	-실시간 감시
단점	-대기 상태에 따른 측정 거리 제한 (레이저 광 산란)	-측정 시간 제한 (위성 주기) -야간 감시 불가, 대기 상태에 따른 측정 제한 (태양광에 의한 형광 측정)	-공간 분해능 없음 -해수에 의한 센서 부식, Biofouling, 거친 해양환경에서 충격 및 센서의 유실 위험 -데이터 송신 기기 별도 필요	-측정에서 결과까지 장시간 소요 -공간 분해능 없음	-무인 감시 불가
요약	-국지적으로 발생하는 적조의 실시간 감시 및 조기 경보 시스템에 적합	-수백 km 이상 영역의 광대역 적조 때의 관측에 적합	-양식장 내 수질 등 매우 국한된 해역의 정밀 모니터링에 적합	-정량적 분석 및 유·무해 종판별 등에 적합	-헬기 등을 이용한 광대역 예찰에 적합

나. 경제·산업적 측면

- (1) 국내에서는 매년 발생하여 수산업 현장에서 해마다 수억 - 수백억 원의 피해를 일으키고 있는 적조 예방에 대한 관심이 고조되고 있음.



[연간 적조 발생 건수 및 피해액]

- (가) 2010년까지의 『국가지리정보체계 기본계획』에 따르면, 적조의 감시 및 조기 경보체계 구축, 적조 발생 현상의 정밀한 이해를 목적으로 한 해양 탐사 기술의 필요성이 대두
- (나) 2006년 해양수산부가 발표한 『MT 발전을 위한 로드맵』에 따르면 상용화가 시급한 7대 “블루스타 과제”를 선정하였는데 이 가운데 “적조 제어 및 발생예측 시스템 개발”이 중요하게 다룸

- (2) 적조는 매년 특정해역에서 재발하는 특징이 있으며, 따라서 적조 다발해역에 대한 모니터링 및 조기 경보를 통한 효율적 방재 활동으로 피해액을 절감할 수 있을 것으로 사료됨.
- (3) 대규모 적조 피해는 수산업 피해뿐만 아니라 여름철에 집중되는 해양 관광, 레저 산업에도 피해가 막심함. 적조 조기 경보를 통해 청정한 바다를 유지하는 것은 관광, 레저 산업에도 기여할 것임.

다. 사회·문화적 측면(공공성 포함)

- (1) 적조 발생의 주된 원인은 지구 온난화에 의한 여름철 해수온도 상승과 연근해의 부영양화임. 적조 발생에 대한 과학적 감시 기술 개발은 경제적 효과뿐만 아니라 녹색 기술 선점을 통한 친환경 국가 이미지 제고에 기여할 것임.
- (2) 경제·산업적 측면뿐만 아니라 문화·관광 자원으로써 청정한 바다의 보전에 기여할 것임.

3절 연구 개발의 범위

1. 적조 생물 형광 감지용 레이저 원격측정 시스템 개발
 - 가. 클로로필-a 농도 측정
측정 감도 : 0.1 $\mu\text{g}/\ell$
측정 거리 : 1 km 이내
 - 나. 해수 라만 산란 밴드 동시 측정
 - 다. 우리나라 적조 유발 생물 종에 대한 분광 특성 연구를 통한 최적 수신 채널 설정

2. 정량화 및 장치 제어 기술 개발
 - 가. 해수 라만 밴드를 이용한 정량화 및 baseline 처리 알고리즘 개발
 - 나. 사용자 친화적 인터페이스 프로그램 개발
 - 다. 원격모니터링 프로그램 및 통신모듈 개발

3. Prototype 장비 개발 및 시범 측정
 - 가. 해안 고정식, 선박 탑재 가능한 규모
 - 나. 적조 다발 해역에서의 시범 측정 수행

4. 조기경보 원격센서의 상용화
 - 가. 원격센서 시제품 제작
 - 나. 원격모니터링 시스템 제작
 - 다. 양산화 시스템 확립

제 2 장 국내외 기술 개발 현황

1절 국내외 기술개발현황

1. 국내기술동향

가. 국내 적조 원격탐사분야 연구 개발 동향

- (1) 지구관측위성들은 가시 광 및 적외선 영역의 밴드를 감지하는 센서들을 장착하여 해수면에서 발생하는 다양한 파장의 빛을 감지함으로써 적조 탐색에 이용
- (2) 해양연구원을 중심으로 위성데이터를 이용한 적조의 원격 탐사 및 해수의 광학적 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있음.

나. 국내 레이저 원격 측정 기술개발 동향

- (1) 국내에서는 출연연과 대학 연구자들에 의해 주로 대기 환경 분야에 대한 연구 개발 및 현장에서의 측정이 활발하게 진행되고 있음.
- (2) 기상청에서는 오존, 황사 관측용 라이다를 운용하고 있음.
- (3) 최근 급격한 기후 변화 및 지구 온난화로 인해 국내에서도 기상·환경 분야를 중심으로 레이저 원격 측정 기술 개발의 중요성에 대한 인식이 증가하고 있음.
- (4) 해양 분야에서의 연구 개발 및 현장 적용 사례는 전무한 실정임.

2. 국외기술동향

가. 세계적으로 해양과학기술 분야에서 레이저 원격 측정 기술은 현장 적용을 목적으로 매우 활발하게 개발되고 있음

- (1) 해양 생태계 관리, 재해 예방 등을 목적으로 국가 주도하에 대학, 국가 연구소와 민간 기업이 공동으로 참여하는 방식으로 미국, 유럽, 중국, 일본을 중심으로 활발하게 개발 적용되고 있음

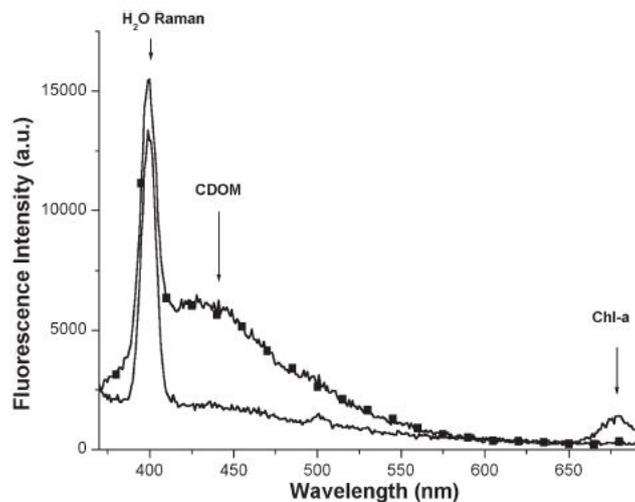
나. 미국(NASA), 이탈리아(ENEA, 국립에너지환경연구소)에서는 1990년대 말부터 레이저 유도 형광법과 레이저 원격 측정 기술을 결합하여 해양 식물성 플랑크톤의 농도와 분포를 측정하는 기술을 개발하여 극지 해양의 생태 연구와 미국 플로리다만의 적조 관리에 활용하고 있음.

다. 2007년 이탈리아 ENEA 연구자들을 중심으로 적조 농도의 원격 측정뿐만 아니라 원격 측정에 의한 종구분의 가능성이 제시되었음 [1].

다음 표는 이탈리아의 ELF (ENEA Laser Fluorosensor), 미국의 NASA의 LIF LIDAR 장비의 기술적 요소들을 비교한 것임. 레이저 광원은 10 Hz 반복률의 플래시 램프 펌핑 방식의 Nd:YAG 레이저를 사용함. Nd:YAG 레이저로부터 발생 가능한 532 nm, 355 nm를 이용하여 해수에 분포하는 bio, 유기 분자를 광학적으로 여기시키고, 이 때 발생하는 주요 형광 신호들을 수 ~ 수십 nm 선폭을 갖는 분광기와 PMT를 이용하여 선택적으로 관측하여 물의 라만 신호, 용존 유기물, 클로로필을 구분 측정하는 방식임. 해수면에서 발생한 신호는 반사형 망원경을 이용하여 원격 측정함.

레이저 형광 원격 측정을 통한 적조 감시 국외 기술 세부 비교

항목	기관	ELF	NASA
	소속 국가	이탈리아	미국
Transmitter	Laser	Nd:YAG	Nd:YAG
	Wavelength	355 nm	532, 355 nm
	Pulse energy	3 mJ	120 mJ, 60 mJ
	Pulse duration	10 ns	12 ns
	Repetition rate	10 Hz	10 Hz
Receiver	Telescope type	Cassegrain	Cassegrain
	Clear aperture	0.4 m	0.25 m
	Focal length	1.65 m	1 m
	Center wavelength	400, 450, 585, 680 nm	355, 402, 450, 532, 560, 590, 650, 685 nm
Bandwidth	5 nm FWHM	-, 7, 50, 7, 12, 17, 20, 25 nm	
Electronics	Detector	PMT	PMT
	Gate width	100 ns	-
	Dynamic range	15 bit	8 bit
	Bus	ISA-VME mixed	General-purpose interface
	Central processing unit	VME embedded 486	Pentium PC



현장에서 원격 측정된 측정된 해수의 LIF 스펙트럼 [2]

라. 기술의 개념은 이미 정립되어 있으며, 정립된 기술을 바탕으로 한 상용화 장비의 개발 단계에 있음.

마. 대기, 환경, 원자력, 지리 정보 등의 분야에서는 이미 상용화 장비들이 활발히 개발되고 있음. 급격한 기후 변화에 따른 해양환경 관리의 필요성 증대는 해양 분야에서도 이와 같은 레이저 원격 측정 장비의 상용화 동기로 작용할 것으로 전망됨.

2절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

1. 향후전망

가. 급속한 지구 온난화와 바다의 부영양화에 따른 적조 발생의 증가와 해양 생태계 관리 보전의 중요성이 증가함에 따라서 향후 해양과학기술 선진국들과 적조에 의한 수산업 피해가 큰 국가들(미국, 중국, 일본)을 중심으로 보다 실용적인 형태의 원격 적조 감시 기술 개발이 활발히 진행될 것으로 전망됨.

나. 해양 생태계 연구 방법론으로 활용되어 오던 레이저 원격 측정 기술은 최근에는 재난 지역의 사후 감시에도 활용되고 있으며, 향후 보다 간편하고 실용적인 형태의 기술로 개발된다면 수산업 현장과 해양 환경 관리 현장에서 활용될 수 있을 것으로 전망됨

2. 기술동향 분석 결론

가. 간편하고 다양한 플랫폼이 가능한 레이저 원격 측정 기술을 이용한 적조 조기 경보 시스템이 개발된다면 우리나라 적조 피해액 감소에 기여할 뿐만 아니라 급격한 기후 변화에 따른 자연 재해에 대응하는 기술 상품으로 새로운 시장을 창출할 것임.

(1) 세계적으로 레이저 원격 측정 기술은 다양한 분야에서 이미 상용화 수준에 이르렀음.

(2) 해양·수산 분야에서는 해양과학기술 선진국을 중심으로 국가적 차원의 해양 환경 관리 기술로 활용되고 있으나, 상용화에는 이르지 못하고 있음.

(3) 기술적인 어려움 보다는 적조 발생에 따른 수산업 피해 규모가 상용화 개발의 주요 동기로 작용하는 것으로 사료됨.

(4) 최근 세계적으로는 현장에서 간편하게 활용할 수 있는 다양한 레이저 원격 측정 장비들이 상용화되고 있어 해양·수산 분야에서의 상용화 기술개발이 가속화 될 것으로 전망됨.

3. 타 산업 및 국내외 연계·협력 가능성, 산업체 참여시기 및 방법

가. 본 과제에서 개발하고자 하는 기술은 해양·수산업뿐만 아니라 국내 광산업에도 기여할 수 있음.

나. 본 과제를 통해서 prototype 장비 개발 및 성능 평가가 완료되면 향후 해양·수산분야의 전문가들의 검토 및 평가를 통해서 산업체에 의한 실용화 개발이 가능한 것으로 사료됨.

4. 국내 연구개발 대신 외국기술도입에 대한 가능성 검토

가. 적조 발생 조기 경보를 목적으로 한 레이저 원격 측정 장비는 세계적으로 상용화 사례가 없어 외국 기술 도입이 불가함.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절 연구개발수행 방법

1. 이론적 방법

가. 기본 원리

□ 장비의 구성 및 원리

레이저를 흡수한 적조 플랑크톤 색소 (클로로필)의 형광 (680 nm) 측정
→ 농도 측정

□ 장점 (기존 기술 대비)

- 실시간 적조 감시
 - ✓ 현장의 적조 상황 실시간 전송 가능
- 다양한 탐제 방식 가능
 - ✓ 비행기 탐제형: 광대역 실시간 감시
 - ✓ 선박 탐제형: 사고 해역 집중 감시
 - ✓ 해안 고정형: 사고 다발 지역 상시 감시
- 비접촉식 원격 측정
 - ✓ 해수에 의한 부식, Fouling 없음.
- 고감도 측정: 클로로필 0.1 $\mu\text{g/l}$
 - ✓ 적조 조기 예보 및 방제를 통한 피해 최소화

[장치의 구성 및 원리(左), 기존기술 대비 장점(右)]

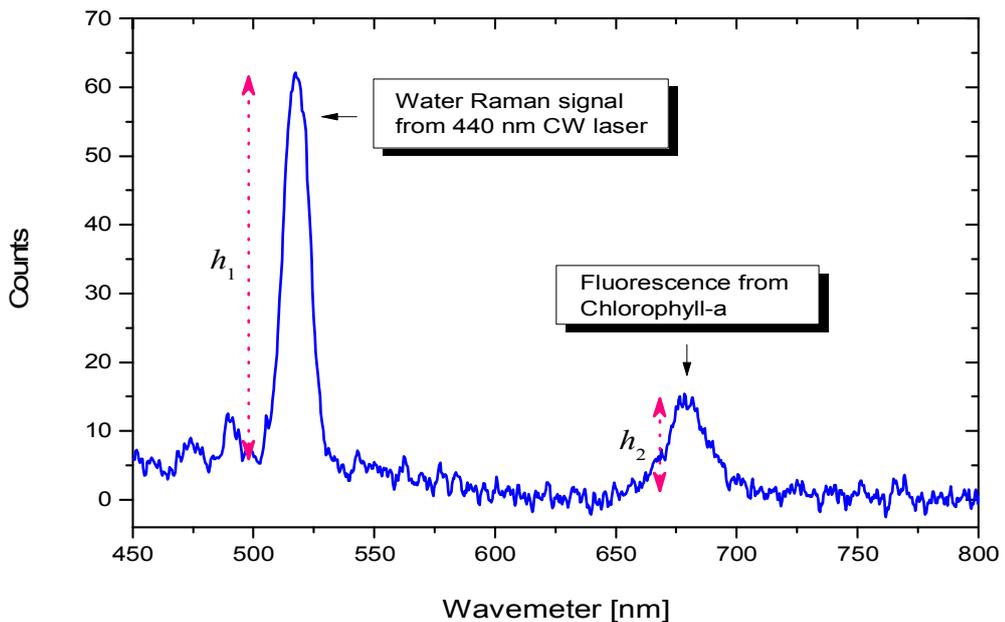


그림 1. 연속발진 레이저(440 nm)를 해수에 조사하여 얻어지는 분광 스펙트럼

그림 1은 해수에 440 nm 파장의 연속 발진 레이저를 조사하여 얻어지는 전형적인 분광 스펙트럼을 나타낸다. 라만 산란 신호의 위치는 518 nm에서 나타나며 클로로필-a 형광 신호는 680 nm에서 나타난다. 적조의 농도는 라만 신호와 클로로필 형광 신호의 크기 비로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = A \frac{h_2}{h_1} \quad (1)$$

여기서 h_1 은 분광기에 나타난 해수의 라만 신호 세기를 나타내고 h_2 는 클로로필-a 형광 신호의 세기를 나타낸다. A 는 실험적으로 결정되는 비례 상수로서 Akashiwo Sanguinea 적조 중의 경우 $A = 23.947[\text{cells/mL}]$ 이다. 배경 잡음이 포함된 분광 신호로부터 두 신호의 크기를 측정할 경우 식 (1)로부터 적조의 농도가 계산될 수 있다. 측정된 농도의 통계 불확도(statistical uncertainty)는 두 신호에 포함된 잡음으로부터 전파되며 각 신호 크기의 불확도로부터 아래와 같이 계산된다.

$$\sigma_n = \frac{A}{h_1^2} \sqrt{h_1^2 \sigma_2^2 + h_2^2 \sigma_1^2} \quad (2)$$

여기서 σ_1, σ_2 는 라만 신호 및 클로로필-a 형광 신호의 크기 불확도를 나타낸다. 식 (2)로부터 알 수 있듯이, 기준 신호가 되는 라만 신호의 크기가 작을수록 불확도는 커지며, 라만 신호 및 클로로필-a 형광 신호의 잡음이 각각 불확도에 기여한다.

나. 라만 신호 크기 측정

해수 라만 신호는 사용된 레이저의 파장에 따라 그 위치가 달라지며 선모양은 아래 식으로 표현된 가우시안 형태를 따른다.

$$s = s_0 + h_1 \exp\left\{-2 \frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{w^2}\right\} \quad (3)$$

실험적으로 얻어진 라만 신호에 대해 가우시안 선맞춤(fitting)을 할 경우 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이때의 선맞춤 방법은 비선형 선맞춤(nonlinear curve fitting)으로써 매개변수 s_0, h_1, λ_c, w 의 최적 값을 찾기 위해 반복적으로 최적화를 수행한다. 이 과정은 반복 계산으로 인해 비교적 긴 계산 시간을 필요로 한다. 비선형 선맞춤에 의한 시간지연을 회피하는 방법은 일반화 선형 선맞춤(generalized linear fitting)을 이용하는 것이다. 일반화 선형 선맞춤 방법은 신호의 선폭(w)과 중심 위치(λ_c)가 매 선맞춤 수행시 변하지 않는 일정한 값인 경우에 적용할 수 있다. 라만 신호의 선폭과 중심 파장의 위치는 레이저 파장과 분광기 슬릿의 크기가 정해지면 변하지 않는 값을 갖게 되므로 일반화 선형 선맞춤을 적용할 수 있다.

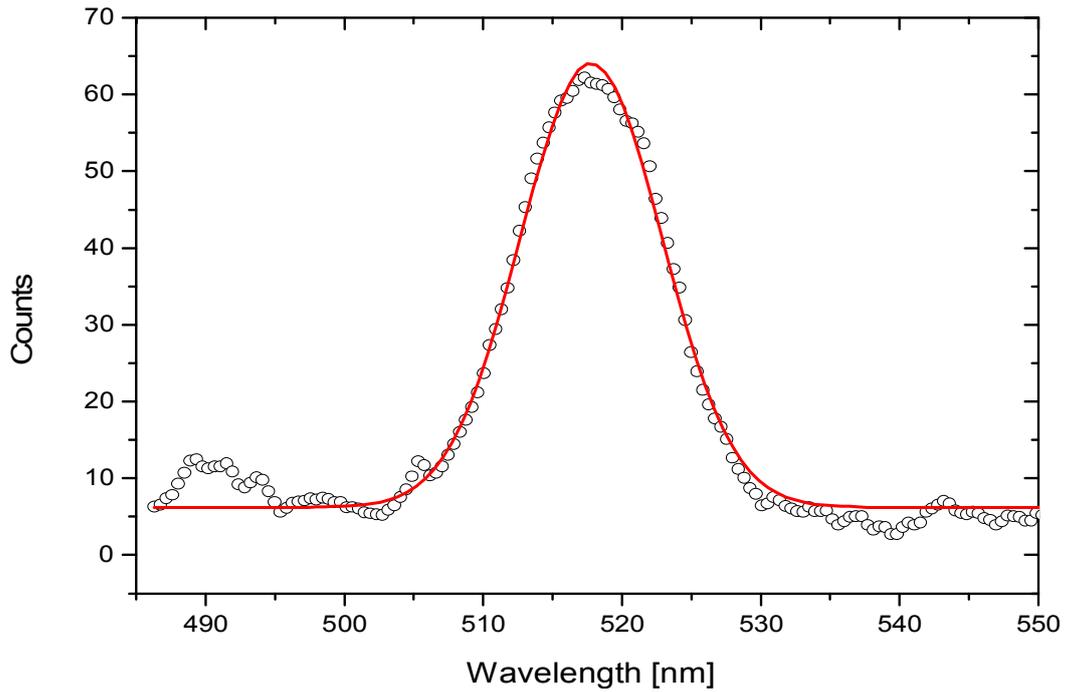


그림 2. 해수 라만 신호 및 가우시안 선맞춤 : 열린 동그라미-실험 데이터, 실선-가우시안 선맞춤

아래 식은 일반화 선형 선맞춤을 위한 수학적 모델을 나타낸다.

$$s = p_0 + p_1\lambda + p_2\lambda^2 + p_3\lambda^3 + h_1 \exp\left\{-2\frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{w^2}\right\} \quad (4)$$

식 (4)의 우변 첫 4개의 항은 스펙트럼의 넓은 영역에 걸쳐져 있는 배경 신호를 맞춤하기 위한 것이고 마지막 항은 중심위치와 선폭이 알려진 가우스 분포의 높이를 맞춤하기 위한 것이다. 실험적으로 해수 라만 신호를 획득한 경우 식 (4)로부터 다음과 같은 행렬식을 세울 수 있다.

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ \vdots \\ s_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 & \lambda_1^3 & G(\lambda_1) \\ 1 & \lambda_2 & \lambda_2^2 & \lambda_2^3 & G(\lambda_2) \\ 1 & \lambda_3 & \lambda_3^2 & \lambda_3^3 & G(\lambda_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \lambda_n & \lambda_n^2 & \lambda_n^3 & G(\lambda_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ h_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서 좌변 $\mathbf{S} \equiv (s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)^T$ 는 파장 값 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ 에 대하여 측정된 분광 신호 세기를 나타내고,

$$G(\lambda) = \exp\{-2(\lambda - \lambda_c)^2/w^2\} \quad (6)$$

는 가우시안 선모양을 나타낸다. 미정 변수들을 모아 열벡터 $\mathbf{P} \equiv (p_0, p_1, p_2, p_3, h_1)^T$ 를 구성하고, 선형변환 커널을 \mathbf{A} 로 정의하면, 식 (5)는

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}\mathbf{P} \quad (7)$$

형태로 간략화 된다. 식 (7)은 과잉 결정된(over-determined) 선형 연립방정식 문제로서 그 일관하는 최소자승법에 의한 해로써 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{P} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{S} \quad (8)$$

계산 속도 향상을 위해 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 의 역행렬을 직접적으로 구하지는 않으며 LU-decomposition 방법으로 \mathbf{P} 를 계산하도록 프로그램된다. 일단 해가 구해지면 측정 데이터와 선맞춤된 데이터와의 차이값의 제곱 평균을 계산할 수 있으며 이 양이 통계 불확도(statistical uncertainty) 값이 된다.

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(s_i - \sum_j A_{ij} P_j \right)^2 \quad (9)$$

식 (9)는 차후 식 (2)의 농도 측정 불확도 계산을 위해 사용된다.

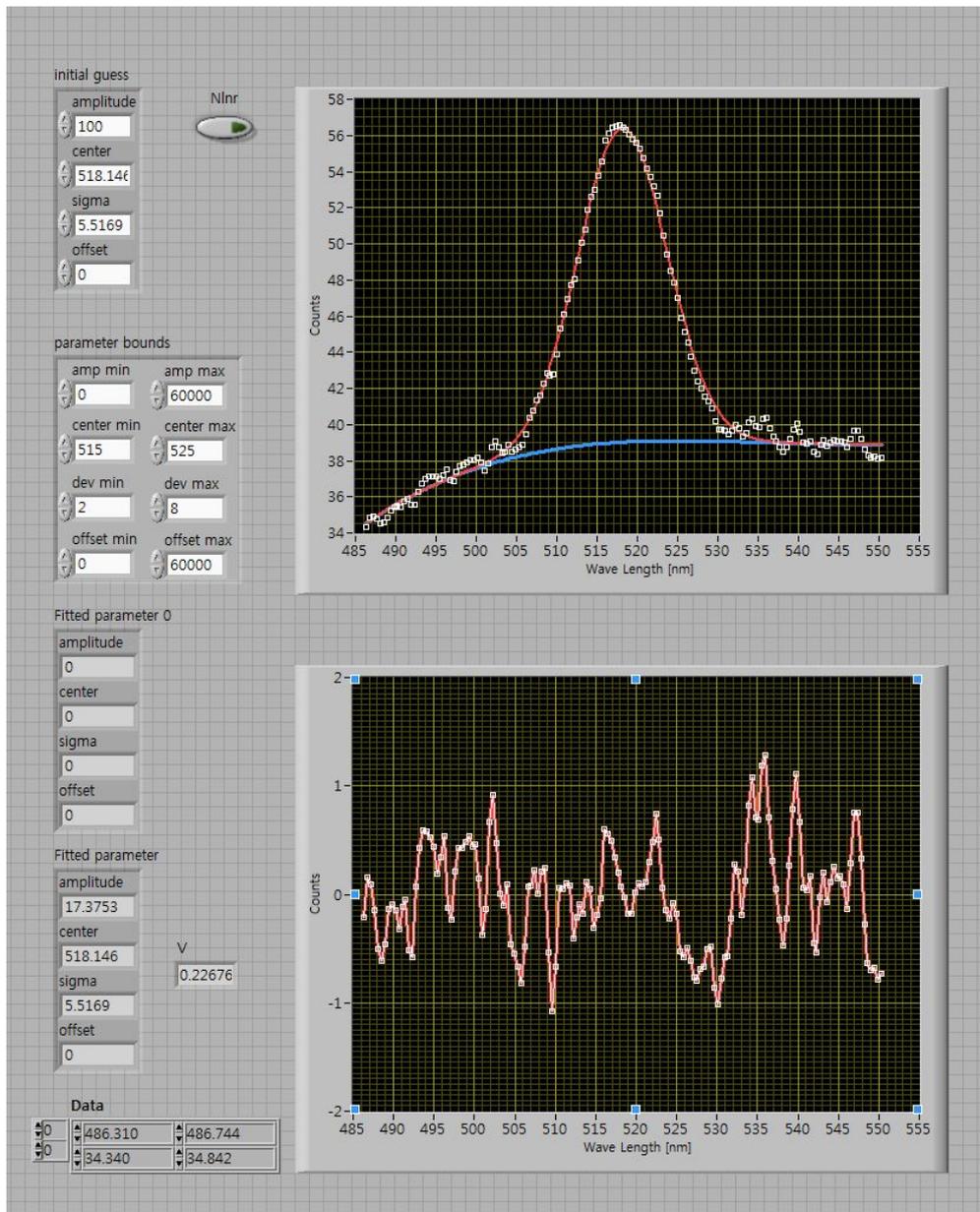


그림 3. 라만 신호 측정 및 가우시안 선맞춤을 수행하는 Labview 프로그램

그림 3은 이상의 논의를 구체화한 Labview 프로그램의 front panel을 나타낸다. 두 가지 선맞춤 방법 즉, 비선형 선맞춤과 일반화 선형 선맞춤 기능을 모두 포함하여 선택할 수 있도록 하였다. 비선형 선맞춤 방식은 광원이 바뀌거나 분광기가 교체되었을 때 최초 1회 실행하여 정확한 선폭과 중심 파장의 위치를 측정하는 용도로 사용된다. 정제화된 측정에 있어서는 일반화 선형 선맞춤 방법을 사용함으로써 매우 빠른 속도로 신호처리가 가능하다. 라만 산란 신호의 크기를 측정하기 위한 파장 범위는 486 ~ 550 nm 영역이며 2048개의 스펙트럼 데이터 중 151개의 데이터 포인트가 선맞춤 계산을 위해 사용된다. 그림 3의 상단 플롯은 측정된 스펙트럼 (열린 네모), 라만 신호 선맞춤 (가는 실선), 그리고 배경 신호 선맞춤 (굵은 실선)을 나타내며 하단 플롯은 선맞춤 결과와 실제 측정 데이터 사이의 편차를 표시한 것이다. 편차 값들의 제곱평균의 제곱근이 라만 신호 크기 측정의 통계 불확도(σ_1)가 된다.

다. 클로로필-a 형광 신호의 크기 측정

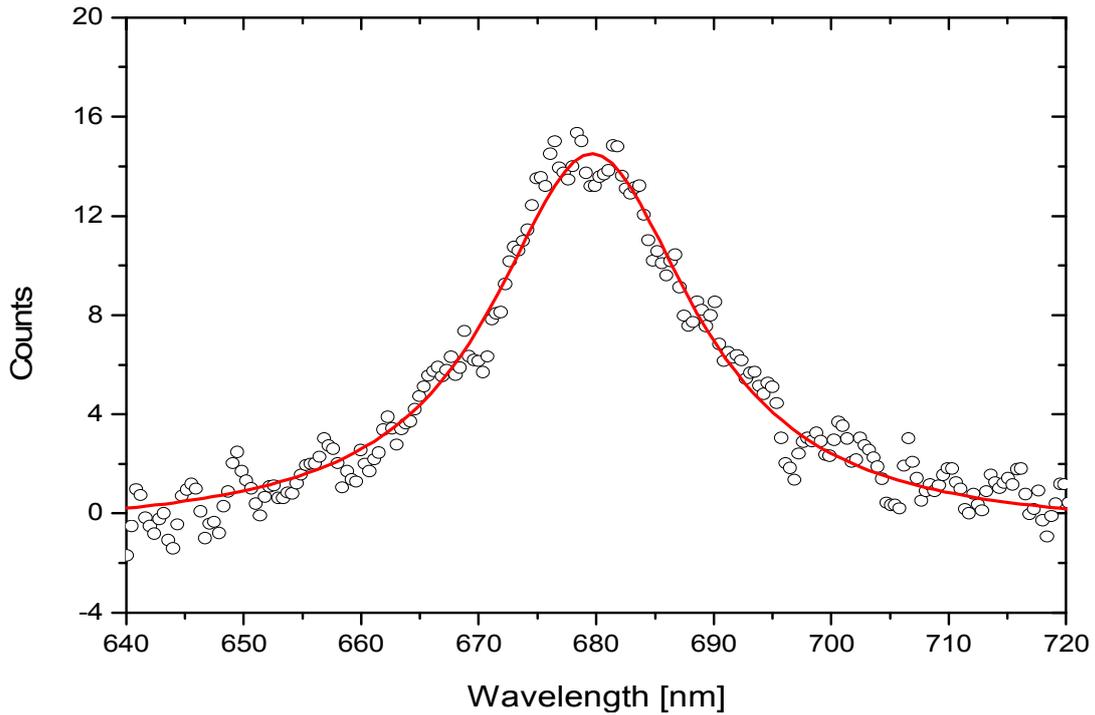


그림 4. 클로로필-a 형광 신호 및 로렌치안 선맞춤 : 열린 동그라미-실험 데이터, 실선-로렌치안 선맞춤

클로로필-a 형광 신호는 680 nm를 중심파장으로 하여 22 nm 선폭의 로렌치안(Lorentzian) 함수로 나타난다. 신호의 크기가 1인 로렌치안 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathcal{L}(\lambda) \equiv \frac{w^2}{w^2 + 4(\lambda - \lambda_c)^2} \quad (10)$$

여기서 w 는 로렌치안 선폭을, λ_c 는 중심 파장을 나타낸다. 그림 4는 해수로부터 실험적으로 얻어진 클로로필-a 형광 신호에 대해 로렌치안 선맞춤(fitting)을 한 경우이다. 형광 신호의 선 모양은 가우시안 형태의 라만 산란 신호와 달리 로렌치안 분포를 하는데, 그 이유는 자발 방출 과정에 의한 분광 신호이기 때문이다.

클로로필-a 형광 신호에 대해서도 비선형 선맞춤(nonlinear curve fitting)이나 일반화 선형 선맞춤(generalized linear fitting)을 적용할 수 있도록 계산 프로그램을 제작하였다. 라만 산란 신호의 계산에 사용된 논의는 $G(\lambda)$ 대신 $\mathcal{L}(\lambda)$ 를 사용할 경우 클로로필-a 형광신호에 대해서도 동일하게 적용된다. 아래 식은 적조 형광 신호의 일반화 선형 선맞춤을 위한 수학적 모델을 나타낸다.

$$s = p_0 + p_1\lambda + p_2\lambda^2 + p_3\lambda^3 + h_2 \mathcal{L}(\lambda) \quad (11)$$

식 (11)의 우변 첫 4개의 항은 스펙트럼의 넓은 영역에 걸쳐져 있는 배경 신호를 맞춤하기 위

한 것이고 마지막 항은 중심위치와 선폭이 알려진 로렌치안 분포의 높이를 맞추기 위한 것이다. 실험적으로 적조 형광 신호를 획득한 경우 식 (11)으로부터 다음과 같은 행렬식을 세울 수 있다.

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ \vdots \\ s_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 & \lambda_1^3 & \mathcal{L}(\lambda_1) \\ 1 & \lambda_2 & \lambda_2^2 & \lambda_2^3 & \mathcal{L}(\lambda_2) \\ 1 & \lambda_3 & \lambda_3^2 & \lambda_3^3 & \mathcal{L}(\lambda_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \lambda_n & \lambda_n^2 & \lambda_n^3 & \mathcal{L}(\lambda_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ h_2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

여기서 좌변 $\mathbf{S} \equiv (s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)^T$ 는 파장 값 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ 에 대하여 측정된 분광 신호를 나타내낸다. 매개변수들을 모아 열벡터 $\mathbf{P} \equiv (p_0, p_1, p_2, p_3, h_2)^T$ 를 구성하고, 선형변환 커널을 $\mathbf{\Gamma}$ 로 정의하면, 식 (12)는

$$\mathbf{S} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{P} \quad (13)$$

형태로 간략화 된다. 식 (13)은 과잉 결정된(over-determined) 선형 연립방정식 문제로서 그 일반해를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{P} = (\mathbf{\Gamma}^T \mathbf{\Gamma})^{-1} \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{S} \quad (14)$$

계산 속도 향상을 위해 LU-decomposition 방법으로 \mathbf{P} 를 계산하도록 프로그램하였다. 해가 구해지면 측정 데이터와 선맞춤된 데이터와의 차이값의 제곱 평균을 계산할 수 있으며 이 양이 통계 불확도(statistical uncertainty) 값이 된다.

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(s_i - \sum_j \Gamma_{ij} P_j \right)^2 \quad (15)$$

식 (9)와 식 (15)는 식 (2)의 농도 측정 불확도 계산에 직접적으로 사용된다.

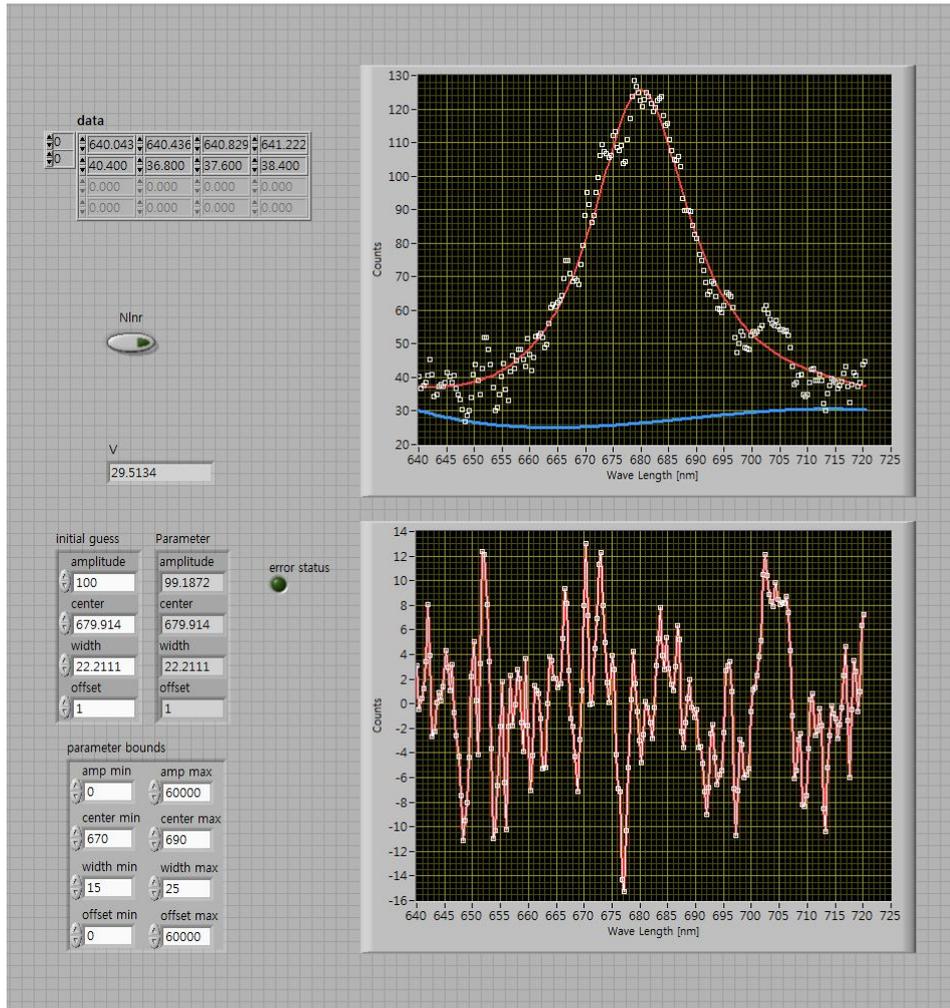


그림 5. 적조 신호(클로로필-a 형광) 측정 및 로렌치안 선맞춤을 수행하는 Labview 프로그램

그림 5는 클로로필-a 형광 신호 측정을 위한 Labview 프로그램의 front panel을 나타낸다. 비선형 선맞춤과 일반화 선형 선맞춤 기능을 모두 포함하여 선택할 수 있도록 하였다. 적조 신호를 측정하기 위한 파장 범위는 640 ~ 720 nm 영역이며 2048개의 스펙트럼 데이터 중 212개의 데이터 포인트가 선맞춤 계산을 위해 사용된다. 그림 5의 상단 플롯은 측정된 스펙트럼(열린 네모), 적조 신호 선맞춤(가는 실선), 그리고 배경 신호 선맞춤(굵은 실선)을 나타내며 하단 플롯은 선맞춤 결과와 실제 측정 데이터 사이의 편차를 표시한 것이다. 편차 값들의 제곱 평균의 제곱근이 적조 신호 크기 측정의 통계 불확도(σ_2)가 된다.

라. 적조 농도 및 불확도 표시

선맞춤(lineshape fitting)을 통해 해수 라만 신호의 크기 h_1 과 적조 신호(클로로필-a 형광 신호)의 크기 h_2 를 계산할 수 있으며 동시에 각 신호 크기의 불확도 값들인 σ_1 , σ_2 도 도출된다. 따라서 측정 및 계산에 의해 얻어진 이들 파라미터들을 식 (1)과 식 (2)에 대입함으로써 매 측정시 얻어지는 적조의 농도 및 불확도가 산출된다.

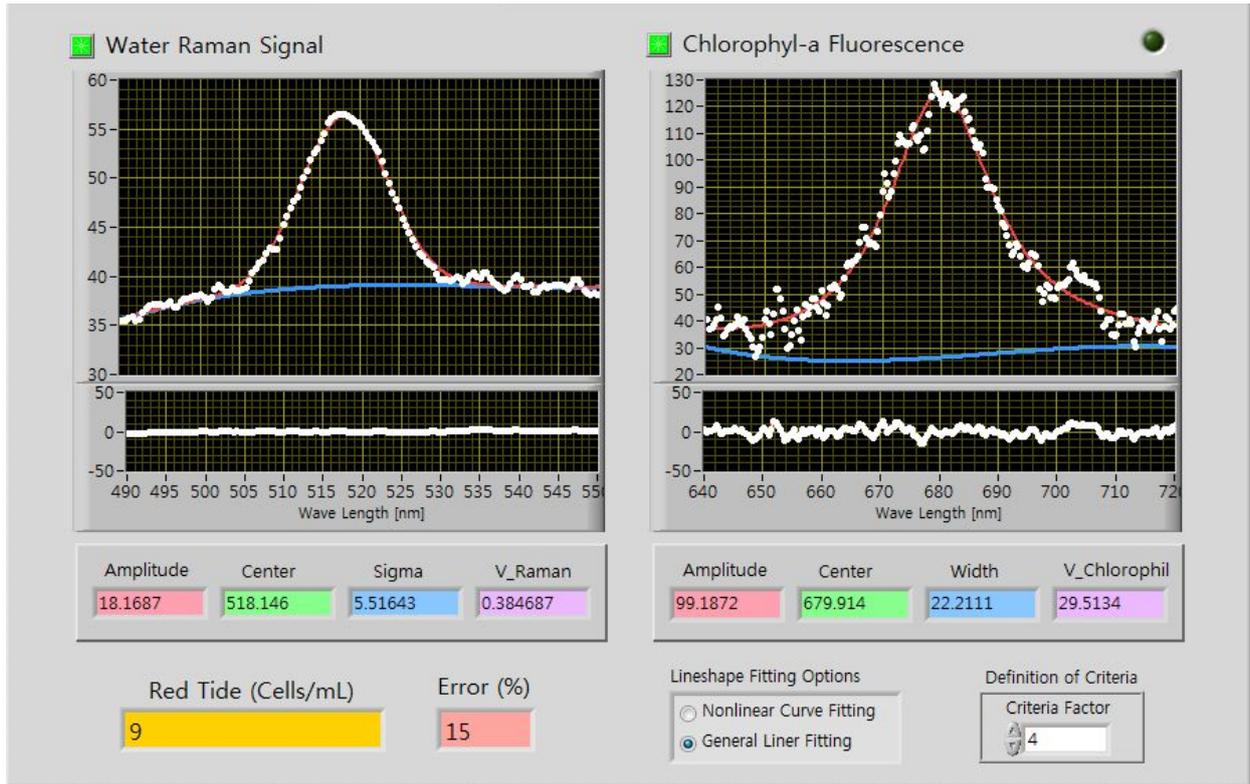


그림 6. 적조 농도 및 불확도 산출 과정을 표시하는 Labview 프로그램의 front panel

그림 6은 적조 농도 및 불확도 산출 과정을 표시하는 Labview 프로그램의 front panel을 나타낸다. 두 개의 플롯 윈도우를 통해 선맞춤 계산이 제대로 작동하였는지 실시간으로 확인할 수 있으며 측정 잡음의 수준을 직관적으로 가늠할 수 있도록 하였다. 매 측정시 적조의 농도가 표시되며 불확도는 상대 불확도로써 다음식

$$\text{Relative Uncertainty} \equiv \frac{\sigma_n}{n} \times 100 [\%] \quad (16)$$

으로 계산된 양이 표시된다. 선맞춤 하는 방식을 비선형 방식과 선형 방식 중 택할 수 있도록 하여 최초 장비 설치 후 해수 라만 산란 신호의 중심 위치와 선폭을 측정할 수 있도록 했다. 원거리 측정시 해수 라만 신호의 크기가 미약해 지는 경우 불확도가 매우 커지게 되면 적조 농도는 의미 있는 값을 갖지 않게 된다. 예를 들어 라만 신호의 크기 h_1 이 그 편차 값 σ_1 에 견줄 만한 크기이거나 작아지는 경우가 그에 해당한다. 따라서 아래 부등식

$$h_1 < c\sigma_1 \quad (17)$$

을 만족하는 경우 농도는 무의미하다고 간주하여 0으로 표시하고 불확도는 ∞ 로 기록되도록 하였다. 식 (17)에서 c 는 criteria factor이다.

2. 현장 실험 방법

가. 시제품 현장 설치

- (1) 해양 현장에서 시제품 동작 시연을 위해 통영 해안가 건물에서 실험 실시
- (2) 일시 : 2012년 3월 29일
- (3) 장소: 경남 통영시 산양읍 풍화리 642-11
- (4) 해발고도: 27m



그림 7. 적조 관측 장소(상) 및 관측점에서 본 해안가 전경(하)



그림 8. 적조 관측을 위해 설치된 시제품

나. 시제품 현장 테스트 결과

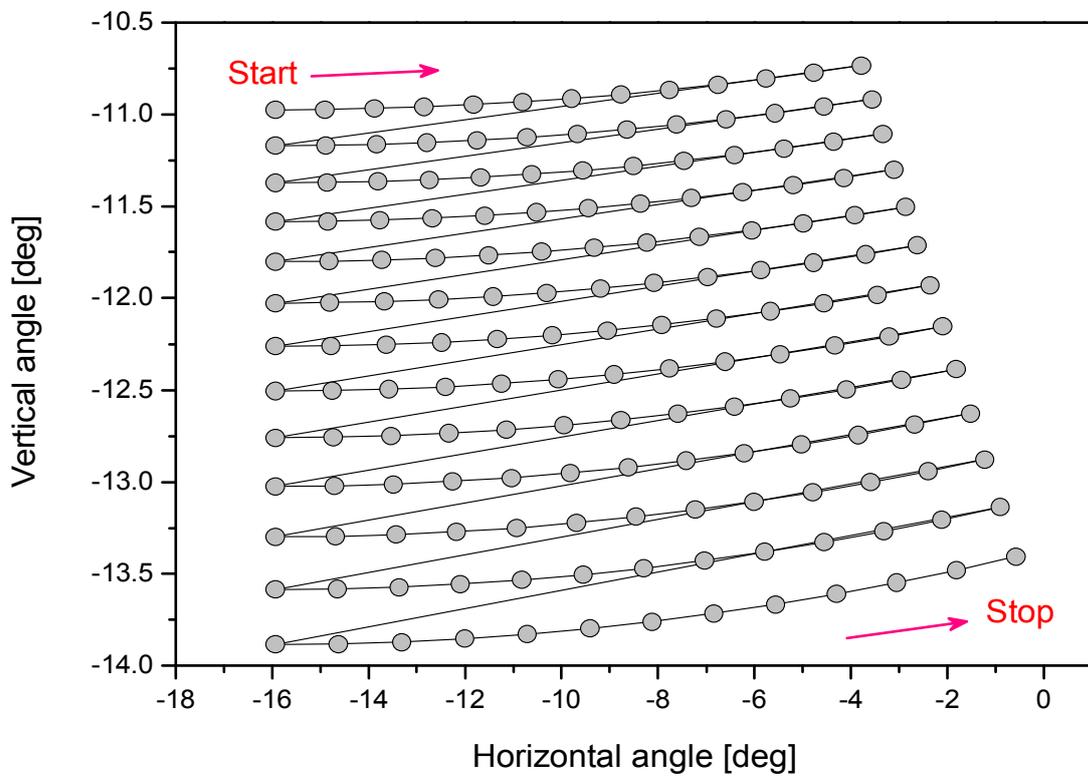


그림 9. 100 m 전방 해수면의 30 m × 30 m 영역의 레이저 조사 위치 좌표

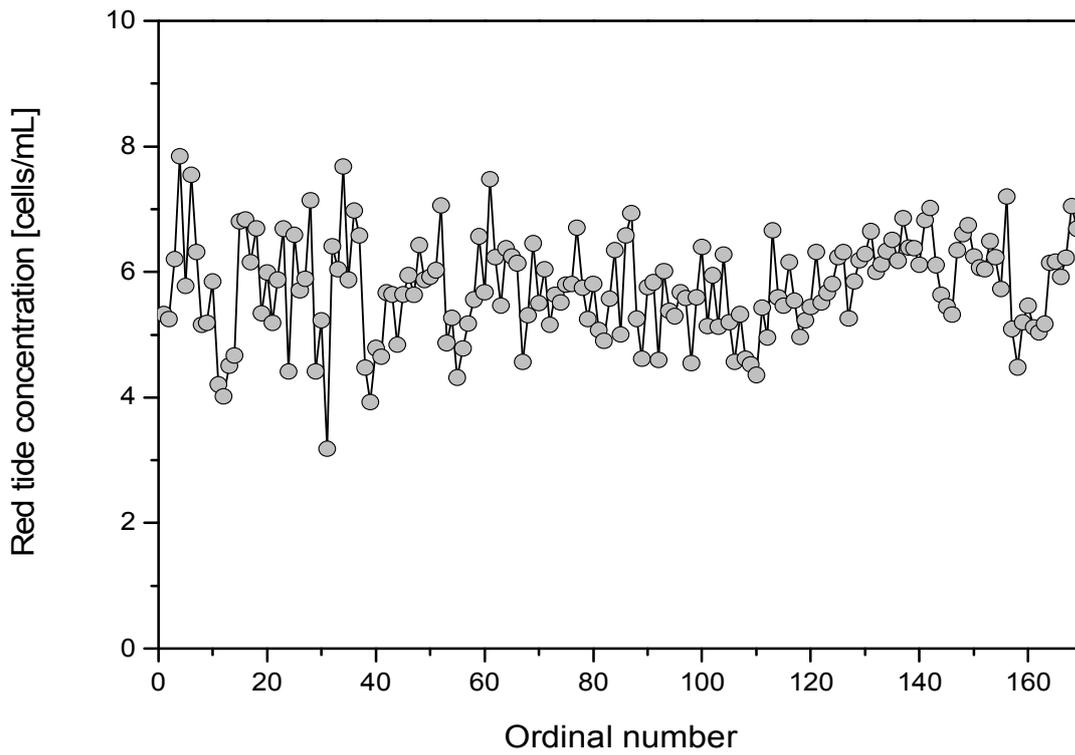


그림 10. 스캐닝 순서에 따른 각 위치에서의 적조 농도

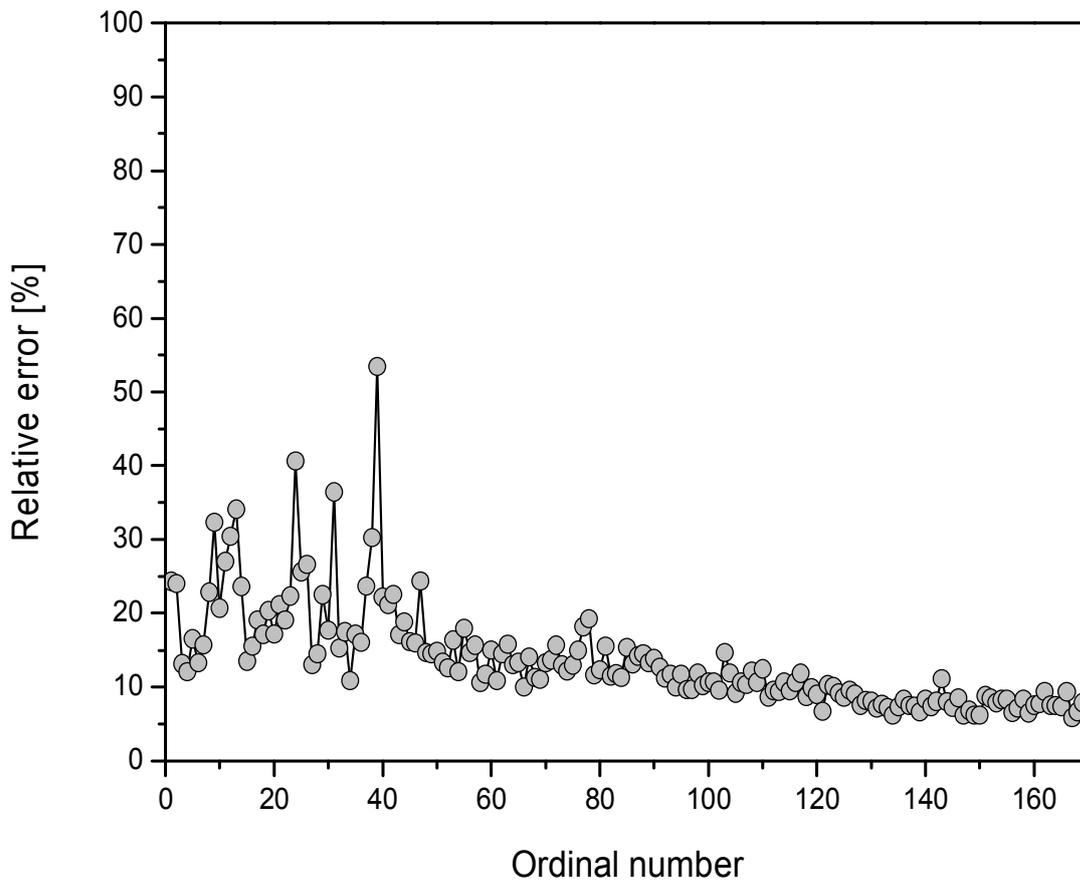


그림 11. 스캐닝 순서에 따른 각 위치에서의 적조 농도 불확도

그림 9는 해수면의 특정 영역을 스캔 방식으로 각 점마다의 적조 농도를 측정하기 위한 망원경의 각도 좌표 값들을 나타낸다. 측정 점의 해발 고도가 주어질 경우 임의의 직사각형 구역을 설정하여 원하는 메쉬 포인트로 각 위치의 적조 농도를 자동으로 측정할 수 있도록 하였다. 그림 9의 각도 좌표는 망원경의 수평 방향과 수직 방향의 각도를 나타낸다. 해수면 상의 직사각형 영역은 해수면 보다 위쪽에 놓여진 망원경의 각도 좌표로 변환될 경우 왜곡된 사각형 형태로 나타난다. 그림의 영역은 100 m 전방의 30 m × 30 m 영역을 12×12의 영역으로 나누어 각 메쉬 포인트가 적조 측정 지점이 되도록 한 예이다. 스캐닝 순서에 따른 각 위치에서의 적조 농도를 그림 10에 표시하였다. 스캔 영역 전체에 걸쳐 적조 농도는 평균 약 6 cells/mL로 나타났다. 그림 11은 각 위치에서의 농도 측정 불확도를 나타낸다. 원거리에서 근거리로 올수록 불확도가 감소함을 확인할 수 있으며 한 지점당 측정 시간을 30초로 할 경우 평균적으로 약 14%의 불확도 값을 나타냈다. 1W 출력을 가지는 청색 레이저 다이오드를 칩 상에서 어레이 구조로 배열할 경우 광원의 출력을 증강할 수 있으며 더 높은 감도가 요구되는 곳에 이용될 수 있을 것으로 예상된다. 이상의 현장 테스트로부터 고가의 Nd:YAG 레이저 대신 소형 청색 레이저 다이오드를 사용한 시제품이 적절한 성능을 나타내고 망원경 작동 및 적조 농도 계산 프로그램이 정상 작동함을 확인하였다.

2절 연차별 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 1년차

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
1차 연도 (2009)	레이저 송수신 광학계 설계 및 제작	-레이저 송수신 광학계 설계 및 제작	95%	-적조생물, 해수 시료의 광특성 조사 결과를 바탕으로 한 최적의 레이저 광원 및 수신 채널 밴드 설정
		-레이저 송수신 채널 설정	95 %	-레이저 광원 출력, 파장 설정 -텔레스코프 구경 및 광 검출기 선정 -레이저 송수신이 가능한 분광학계 설계
	적조생물, 해수 시료 수집 및 광특성 조사	-적조생물 시료 수집	95 %	-국립수산과학원, 군산대학교 등 적조생물 종 배양 및 연구 목적 시료 제공 기관 의뢰 -유/무해성 적조생물 시료 수집
		-광흡수, 형광 스펙트럼 조사	95 %	-광흡수, 형광 스펙트럼 조사를 바탕으로 최적의 레이저 광원 파장 및 수신 채널의 밴드 설정 -레이저 송수신 광학계 설계에 반영 -광흡수, 형광 스펙트럼 조사
	적조생물 형광 원격 측정 및 감도 구현	-적조생물 형광 원격 측정 감도 구현	95 %	-실험실 측정
				-실험실 평가를 통한 감도 최적화

가. 연구범위 및 연구수행 방법

연구범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
레이저 송수신 광학계 설계 및 제작	<ul style="list-style-type: none"> -355, 532 nm의 중심 파장을 갖는 Nd-YAG 펄스 레이저를 적조 샘플에 조사하여 반응되어 나오는 가시광 영역의 형광을 검출할 수 있는 분광 시스템을 구성함 -20 cm 구경의 카세그레인 방식 텔레스코프를 사용하여 원거리 목표점에서의 산란광을 수집하고 분광기에 전송할 수 있는 시스템 구성함 -Nd-YAG 레이저와 망원경의 광축을 일치시켜 망원경이 바라보는 점에서 항상 형광이 발생할 수 있도록 함 	<ul style="list-style-type: none"> 레이저 송수신 광학계 설계 및 제작 (1 km 원격 측정 성능) -레이저 원격 측정 방법을 통해 point 측정 방식의 소자형 센서로 불가능한 광대역 스캔 방식의 적조 예찰 실현 -적조 다발 해역의 고정식, 휴대용, 선박 탑재 가능한 규모의 장비 개발을 통한 다양한 방식의 적조 예찰 가능
적조생물, 해수 시료 수집 및 광특성 조사	<ul style="list-style-type: none"> -해양 적조 생물은 식물성 플랑크톤의 일종으로, 광합성을 위해서 가지고 있는 색소(클로로필-a)는 UV-Vis 영역의 빛을 흡수하면 680 nm의 붉은색 형광을 방출함 -UV-Vis 영역의 레이저에 의해 유도되는 적조 생물의 680 nm 형광을 원격 측정함으로써 적조 감시가 가능함. -이를 위해서 대기·환경 분야에서 사용되고 있는 레이저 원격측정 광학계와 나노초 Nd:YAG 펄스 레이저를 광원으로 도입 	<ul style="list-style-type: none"> -적조 생물의 정량적 측정을 위해서는 농도의 기준이 될 수 있는 신호가 필요함. -물에 의한 빛의 라만 산란 밴드는 약 3200 cm^{-1} 이동된 영역에서 나타남 (355 nm 파장의 빛을 물에 쬐일 경우 400 nm에서 라만 산란 밴드 관측). -해수의 라만 산란광 세기는 해수내 용존 물질들의 농도 측정에 기준 신호로 사용될 수 있음. -본 과제에서는 해수의 라만 산란광에 대한 적조생물의 형광세기 비를 이용하여 농도 정량화를 수행하고자 함 (400 nm 채널의 수신 광세기에 대한 680 nm 채널의 수신 광세기 비).
적조생물 형광 원격 측정 및 감도 구현	<ul style="list-style-type: none"> -적조 감시 원격 센서 광학계 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 적조생물 형광 원격 측정 감도 구현 -실험실 측정 -실험실 평가를 통한 감도 최적화

나. 세부연구수행 결과

□ 적조발생 조기경보 레이저 형광센서의 원격모니터링 기술확립

- 본연구개발 과제에서는 레이저를 이용한 적조발생 조기경보 장치의 전문관리 프로그램을 개발하여 DATABASE를 구축하고 이를 통한 데이터관리 및 원격통신장치(RTU)를 이용한 레이저 형광센서의 원격감시, 제어, 계측, 통계분석 및 레포팅 업무를 수행하고 네트워크 통신망을 통해 실시간으로 모니터링 할 수 있는 원격 무인 모니터링 시스템을 개발

- 상세 개발내역

- ① 해역의 적조발생 예찰과 제반관리 시설 현황등을 분석하고 DATA를 보고서화하는D/B 프로그램과 레이저 형광센서에 대한 원격모니터링 및 제어가 가능한 관리 프로그램 개발
- ② 적조발생 조기경보 레이저 형광센서의 원격감시 및 제어장치를 국산화하여 상기 프로그램과 연동하여 작동이 가능토록하고 시설물과 제어기기에서 수집된 DATA를 원격으로 전송할 수 있는 통신모듈개발

◎ 광원 및 분광 광학계 구성

- 355, 532 nm의 중심 파장을 갖는 Nd-YAG 펄스 레이저를 적조 샘플에 조사하여 반응되어 나오는 가시광 영역의 형광을 검출할 수 있는 분광 시스템을 구성함

- ① 레이저 광원 - Quantel社 Brilliant b, 중심파장: 1064 · 532 · 355 nm,
반복률: 10 Hz, 출력: 1 ~ 350 mJ/pulse, 펄스폭: 8 ns
- ② 분광기 : 동우옵트론 DMS00i, 1200&150/mm grating, Resolution-0.045 nm

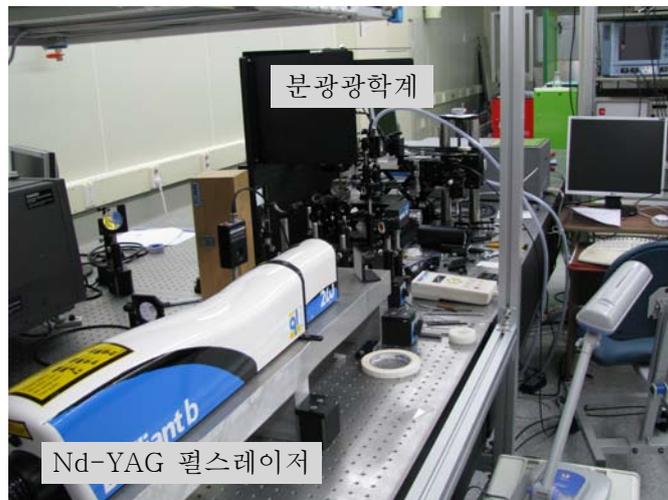


그림 1. Nd-YAG 펄스 레이저 및 분광 광학계

◎ 레이저 펄스 및 분광기 동작 시간 배열

- 레이저의 플래쉬 램프와 Q-스위칭 시간차를 이용하여 레이저 출력을 조정할 경우 0.05 ~ 3.4 W로 조절 가능
- 레이저와 ICCD 동작 사이의 시간 간격은 목표점의 거리(1 km 이하)에 따라 10 μ s 이하에서 조절
- ICCD 게이트 개방 시간은 적조 형광의 지속 시간에 따라 100 μ s 이하에서 조절

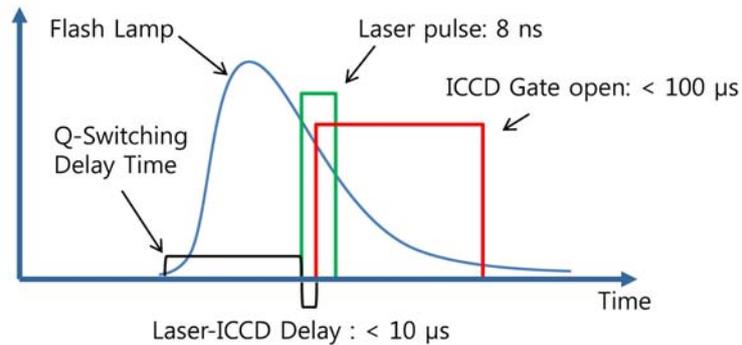


그림 2. 최적의 분광 신호 수신을 위한 동작시간 배열

◎ 레이저 송수신 광학계 제작

- 20 cm 구경의 카세그레인 방식 망원경을 사용하여 원거리 목표점에서의 산란광을 수집하고 분광기에 전송할 수 있는 시스템 구성함
- Nd-YAG 레이저와 망원경의 광축을 일치시켜 망원경이 바라보는 점에서 항상 형광이 발생할 수 있도록 함

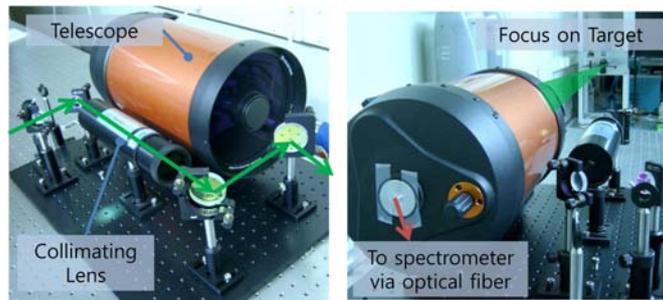


그림 3. 망원경을 이용한 레이저 송수신 광학계

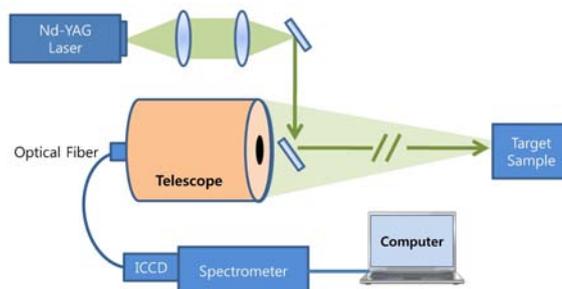


그림 4. 원격 측정 장치 구성의 개략도

□ 적조생물 시료 수집 및 배양

- 적조미생물 시료수집

당해연도 연구과제에서 적조미생물에 의해 발생하는 클로로필-a 형광분석기술을 확립하기 위하여 다양한 종의 적조미생물을 수집하였다. 적조미생물 수집은 본 연구의 검출 목표 미생물인 *Cochlodinium polykrikoides*와 비교대상 미생물인 *prymnessium parvum*, *chattonella subsalsa*, KCHD, *Heterosigma akashiwo*와 같은 미생물을 수집하였다. 그리고 이러한 미생물은 적조원인해역인 전남 고흥군, 전남 여수시, 경남 통영, 경남 거제도 등지에서 수집하였다.

- 적조미생물 동정

본 과제에서는 수집된 미생물의 정확한 종속명을 구분하기 위하여 미생물 동정을 실시하였다. 미생물의 동정을 위하여 표준해수배지를 제조하여 수집한 미생물을 배양한 후, 각각의 미생물의 성장주기, 미생물의 형태, 크기 등을 다양하게 조사한 후 미생물의 정확한 종속명을 규명하였다.

◎ 적조생물 배양 및 분석기술 확립

- 국내외 다양한 종의 유/무해성 적조생물 배양기술 확립

1. *Cochlodinium polykrikoides*의 특성

- *Cochlodinium polykrikoides*는 유독성 와편모조류로써 남해안 일대에서 적조를 발생하며 다량의 클로로필을 생산하는 미생물임
- 최적수온은 20~25 °C이며 최적염도는 27-33 PSU
- *Cochlodinium polykrikoides*의 성장률은 1일 2분열로 성장(성장률: 2^{nday})
- *Cochlodinium polykrikoides*의 외형적 색깔은 황갈색을 띠며 광학적 특징으로 400nm 대역에서 흡광도가 증가함
- 정상적인 *Cochlodinium polykrikoides*의 형태는 3~4개의 Chain 형태를 가지고 있음

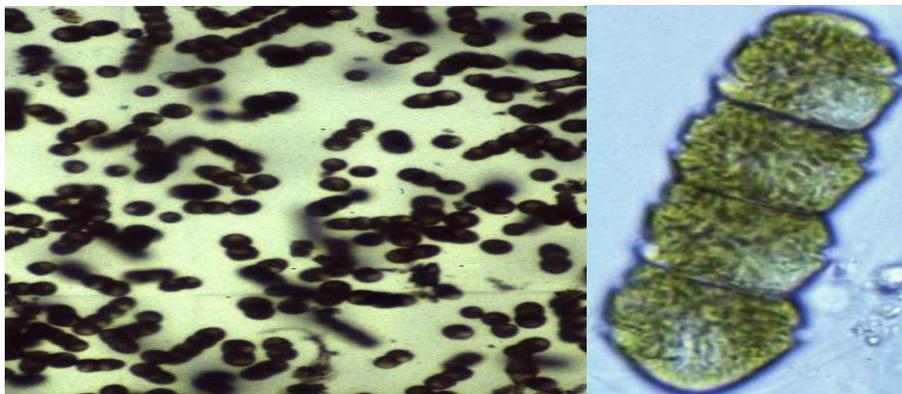


그림 5. 정상적인 *Cochlodinium polykrikoides* 형태

2. 배양실험

다양하고 충분한 미생물 시료를 확보하기 위하여 수집한 미생물을 f/2 배지를 이용하여 약 2주간 배양을 실시

- 배양배지: f/2 media
- 배양배지 성분조성

A	NaNO ₃	37.5 g/0.5 L	1mL/L
B	NaH ₂ PO ₄	2.5 g/0.5 L	1mL/L
C(EDTA용액)	Na ₂ ·EDTA	2.18 g/0.5 L	1mL/L
	FeCl ₃ ·6H ₂ O	1.57 g/0.5 L	
D(CE-M)	MnCl ₂ ·6H ₂ O	0.09 g/0.5 L	1mL/L
	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.005 g/0.5 L	
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.005 g/0.5 L	
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.011 g/0.5 L	
	Na ₂ MoO ₄ ·7H ₂ O	0.003 g/0.5 L	
E	B12	0.25 mg/0.5 L	1mL/L
	Biotin	0.25 mg/0.5 L	
	Thiamine·HCl	0.05 g/0.5 L	
F(규조류에 적용)	Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	15 g/0.5 L	1mL/L

- 배지제조 방법

- 1) *Cochlodinium polykrikoides*, *prymnessium parvum*, *chattonella subsalsa*, *KCHD*, *Heterosigma akashiwo*와 같은 적조미생물의 안정적인 배양을 위하여 위의 성분조성에 따라 A-E까지 제조한 후 멸균하여 혼합(f/2 media)
- 2) 제조한 f/2 media는 보관중의 변질을 방지하기 위하여 냉동상태를 유지하면서 보관하고 미생물 배양시 하루 전 해동하여 사용
- 3) f/2 배지성분 중 98%이상을 차지하는 해수는 가압필터를 이용하여 해수내 이물질을 제거하여 정제한 후 121 °C에서 멸균
- 4) 멸균된 해수 1L에 위에서 제조한 f/2 배지 20 ml을 첨가함으로써 적조미생물 배양배지 제조



그림 6. 적조 미생물 배양배지

· 적조 미생물 배양기술

- 1) 적조미생물은 대장균이나 바실러스같은 일반 미생물에 비해 배양기간이 길며 성장속도도 매우 느림
- 2) 안정적인 미생물의 배양을 위하여 Easy plask(Nunc)을 이용하여 위에서 제조한 배양액 1L에 5% *Cochlodinium polykrikoides*의 종균을 접종한 후 23 °C의 정치배양조에서 형광등을 조사하면서 4주동안 배양
- 3) 적조미생물을 배양할 경우 원활한 미생물의 광합성을 위하여 일정량의 빛이 필요하기 때문에 배양기간동안 형광등 조사를 하면서 배양
- 4) 빠른 시간내 배양을 원할 경우 10% *Cochlodinium polykrikoides*을 접종한 후 23 °C의 정치배양조에서 형광등을 조사하면서 약 2주간 배양



그림 7. 적조 미생물 배양과정



그림 8. 적조미생물 정치배양기

- 비교종으로 사용된 *Prymnessium parvum*, *chattonella subsalsa*, *KCHD*, *Heterosigma akashiwo* 등의 미생물도 위와 같은 방법으로 미생물 배양

◎ 클로로필-a의 형광분석을 위한 적조미생물 시료 제조

- 본 연구의 검출목적 물질인 클로로필-a의 형광분석을 하기 위해서는 다양한 미생물의 샘플시료와 이에 따른 샘플내 정확한 미생물의 농도나 밀도의 측정이 필요
- 이에 본 연구에서는 배양 종료된 적조미생물을 Hemocytometer과 광학현미경을 이용하여 샘플 내 적조미생물의 정확한 밀도를 산출

□ 형광 신호 측정을 위한 실험실용 소형 펌프 광원 제작

- 중심 파장이 397 nm이고, 출력 7 mW인 반도체 레이저 CW 광원을 제작함
- 실험실 내에서 적조 생물의 형광 스펙트럼 측정을 위하여 사용함

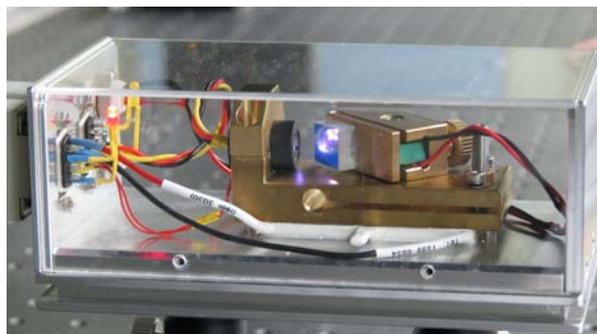


그림 9. 실험실용 소형 CW 펌프 광원

□ 적조 분광 스펙트럼 측정을 위한 실험 셋업

- 레이저 소스(397 nm)에서 나온 빛은 적조 시료를 통과하면서 산란광의 구성 파장에 변화가 생김.
- 시료에서 산란된 빛을 렌즈로 집속하여 광섬유를 통해 분광기(spectrometer)로 전송
- 회절격자가 포함된 분광기 측정단에 고성능 ICCD(Intensified charge-coupled device)로 증폭된 신호를 측정함
- 컴퓨터를 이용하여 빛의 파장별 성분을 분석하여 적조 시료에 대해 분석

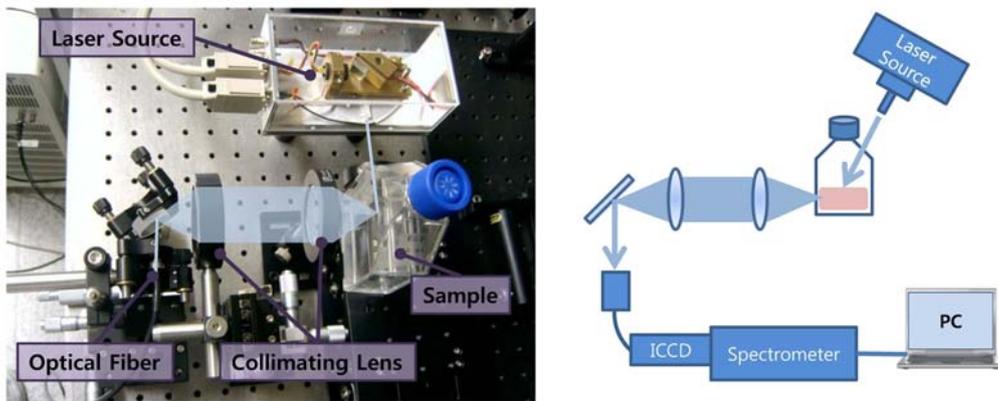


그림 10. 397 nm 반도체 레이저 광원을 이용한 적조 분광 실험 셋업

□ 증류수 및 해수의 라만 산란 측정

1. 증류수의 분광 스펙트럼

- 배경신호에 의한 효과를 제거하기 위해 레이저를 조사하여 얻은 분광 신호에서 레이저를 끈 후 얻은 분광 신호를 제함
- 라만 피크는 460 nm에서 관측되며 이는 3400 cm^{-1} 의 OH 진동에 의한 흡수 밴드에 해당함

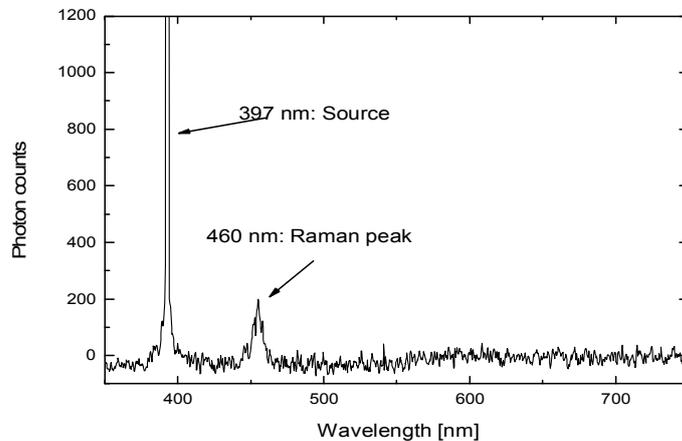


그림 11. 증류수에 397 nm 레이저를 조사하여 얻은 분광신호

2. 적조가 포함되지 않은 해수의 분광 스펙트럼

- 통영에서 채취한 깨끗한 바닷물에 397 nm CW 광원을 조사하여 분광 스펙트럼 측정

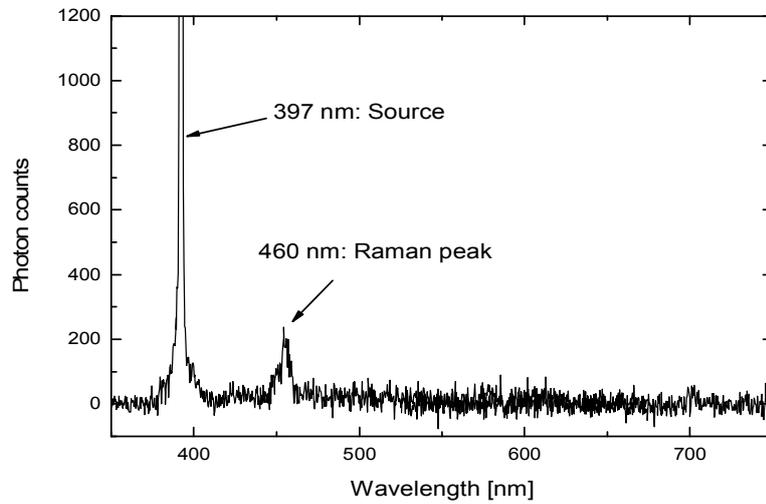


그림 12. 해수의 라만 분광 스펙트럼

- 증류수와 해수의 라만 신호는 거의 일치하고 있는데 이는 Bartlett* 등의 연구 결과와 동일한 것으로써 해수에 녹아있는 염분 이온이 가시광 영역에서 라만 신호에 거의 영향을 주지 않음을 의미

*J. S. Bartlett, K. J. Voss, S. Sathyendranath, and A. Vodacek, "Raman scattering by pure and seawater", Applied Optics 37(15), p3324, 1998.

- 라만 신호는 레이저와 순수한 해수와의 상호 작용에 의한 것으로 적조 생물에 의한 다양한 분광 신호 분석의 기준 신호로 이용 가능함

□ 적조 생물 5종에 대한 분광 스펙트럼 측정

1. Cochlodinium polykrikoides

- 육안상의 특징 : 옅은 황색



그림 13. Cochlodinium polykrikoides(567 cell/mL)

- 클로로필-a에 의한 형광 신호가 매우 미약함
- 중심 파장 470 nm 부근에서 넓은 대역(~100 nm)의 형광 신호를 나타냄

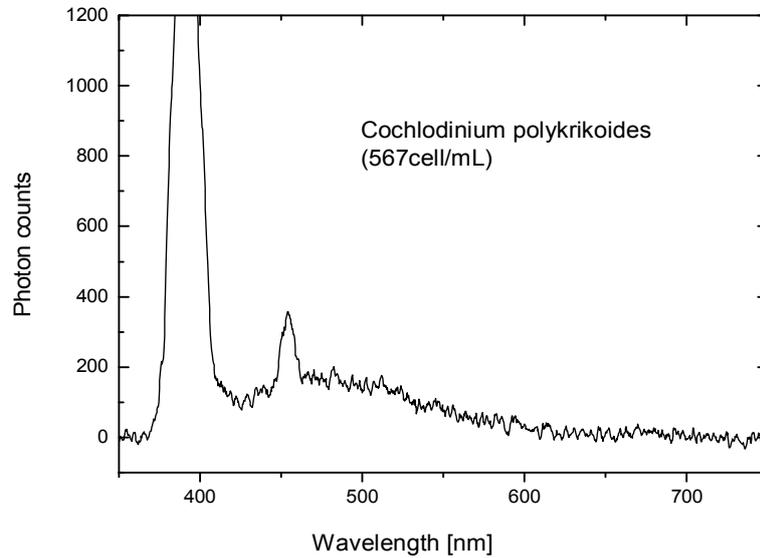


그림 14. 적조 Cochlodinium polykrikoides에 대한 형광 스펙트럼

2. Prymnessium parvum

- 육안상의 특징 : 황록색



그림 15. Prymnessium parvum(9620 cell/mL)

- 중심 파장 470 nm 부근에서 넓은 대역(~100 nm)의 형광 신호 및 680 nm의 클로로필-a에 의한 형광 신호를 나타냄
- 680 nm 형광이 470 nm 형광의 약 2배

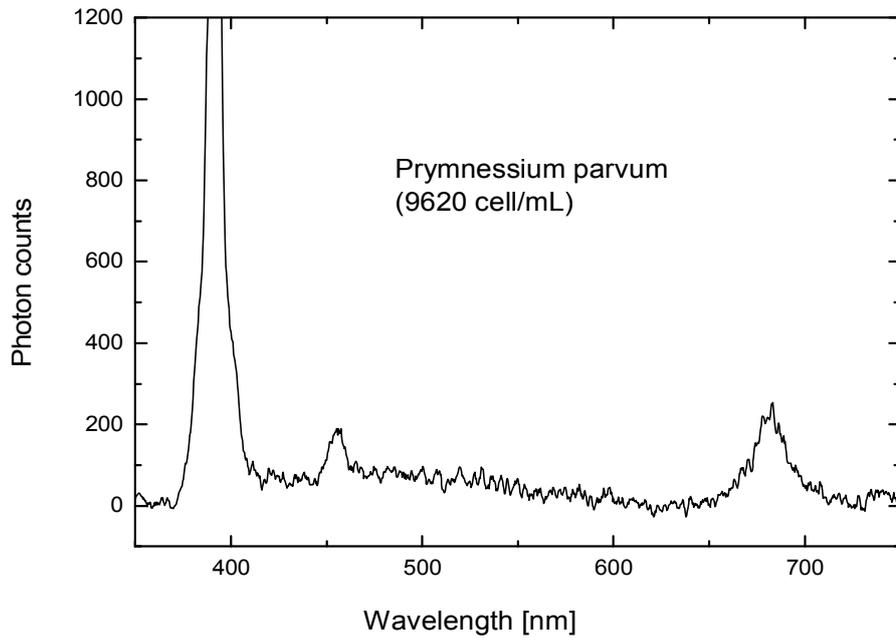


그림 16. Prymnessium parvum에 대한 형광 스펙트럼

3. Chattonella subsalsa

- 육안상의 특징 : 옅은 황색

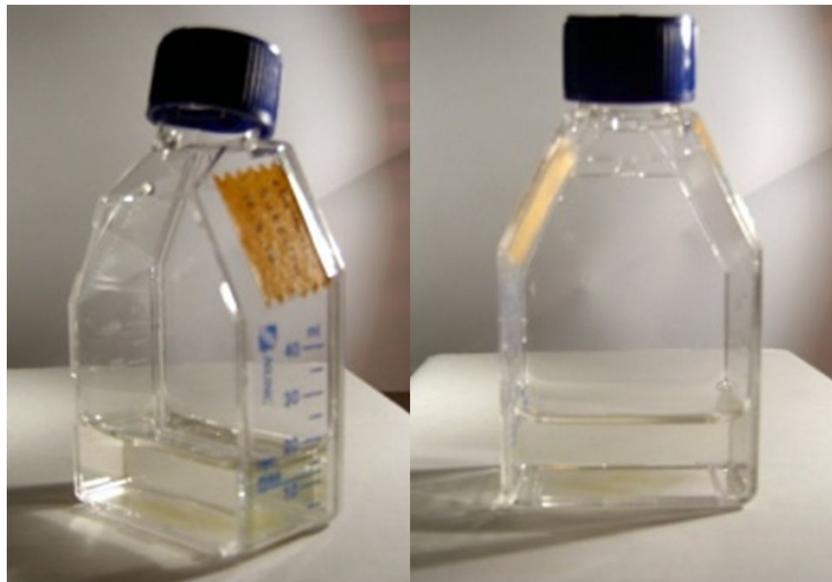


그림 17. Chattonella subsalsa(293 cell/mL)

- 중심 파장 470 nm 부근에서 넓은 대역(~100 nm)의 형광 신호 및 680 nm의 클로로필-a에 의한 형광 신호를 나타냄
- 680 nm 형광이 470 nm 형광의 약 3배

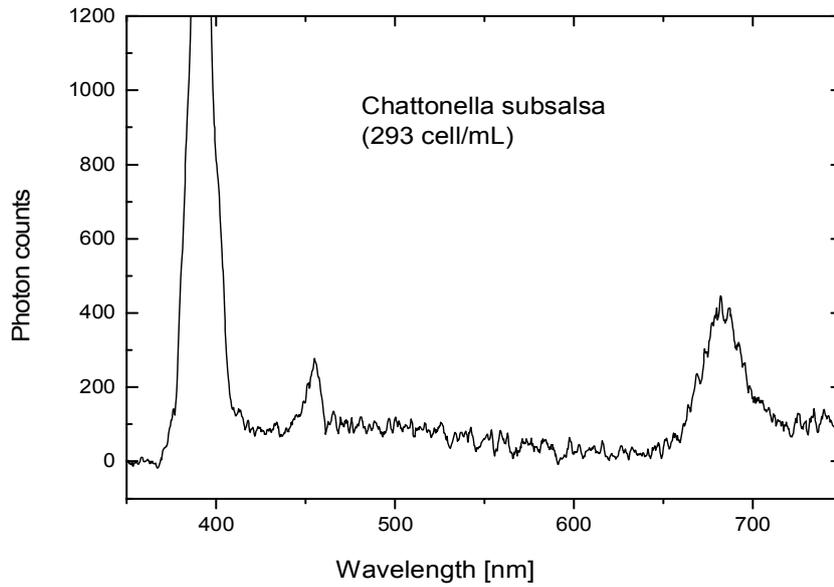


그림 18. Chattonella subsalsa에 대한 형광 스펙트럼

4. KCHD

- 육안상의 특징 : 옅은 황색



그림 19. KCHD(240 cell/mL)

- 중심 파장 470 nm 부근에서 넓은 대역(~100 nm)의 형광 신호 및 680 nm의 클로로필-a에 의한 형광 신호를 나타냄
- 680 nm 형광과 470 nm 형광의 세기가 비슷한 수준임

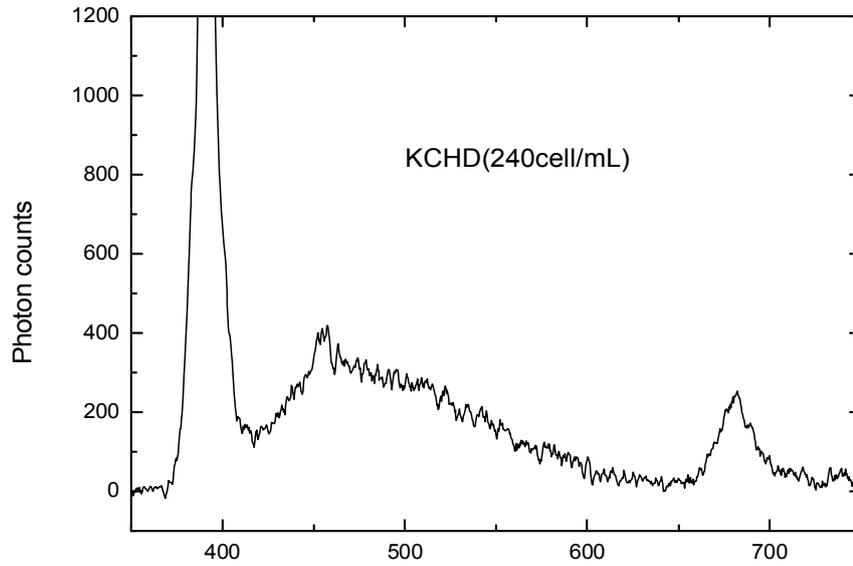


그림 20. KCHD에 대한 형광 스펙트럼

5. Heterosigma akashiwo

- 육안상의 특징: 황갈색



그림 21. Heterosigma akashiwo(1033 cell/mL)

- 중심 파장 470 nm 부근에서 넓은 대역(~100 nm)의 형광 신호 및 680 nm의 클로로필-a에 의한 형광 신호를 나타냄
- 680 nm 형광이 470 nm 형광 세기의 절반 수준임

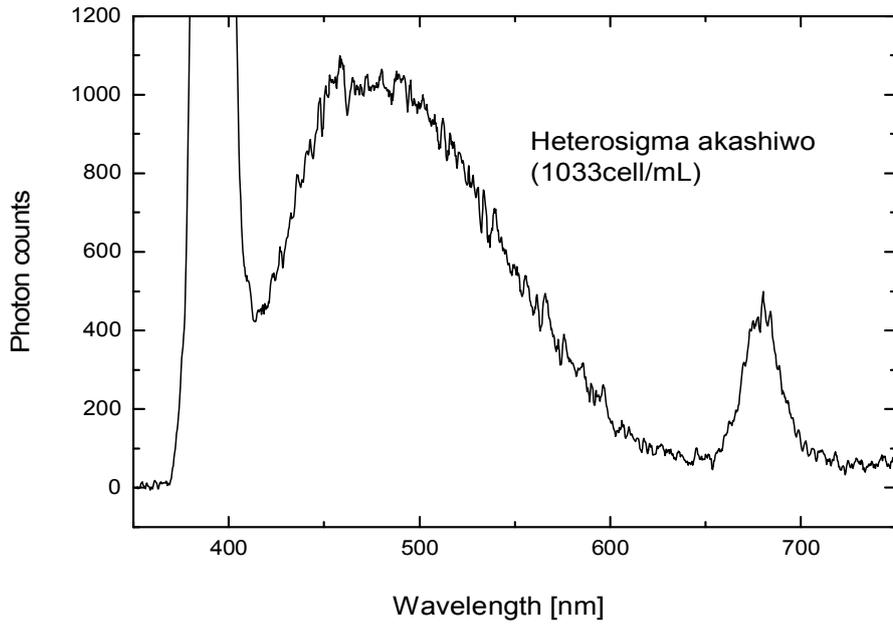


그림 22. Heterosigma akashiwo에 대한 형광 스펙트럼

□ 해수 라만 신호를 이용한 정량화 검증

- 배양된 *Chattonella Subsalta* 샘플을 깨끗한 해수로 희석하여 적조 미생물의 농도에 따른 분광스펙트럼을 측정함

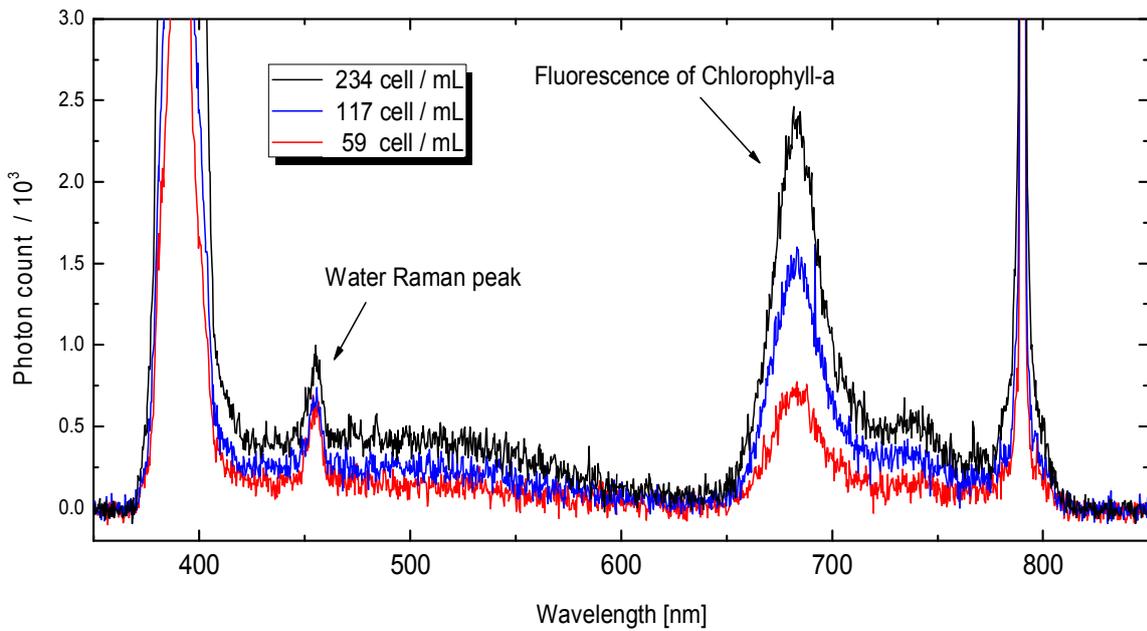


그림 23. 적조 미생물 농도에 따른 분광 신호 변화

- 라만 신호의 크기는 거의 변하지 않는 반면 적조 미생물의 대사 물질인 클로로필-a의 형광 신호 크기는 농도에 비례하여 줄어듦
- 광원과 동일한 파장의 산란광은 해수에 포함된 미립자 등에 의해 그 세기가 변화하지만 라만 신호의 크기는 레이저와 순수한 물과의 상호작용 양을 나타내므로 라만 신호(460 nm)에 대한 클로로필-a 형광 신호(680 nm) 크기로서 미생물의 농도가 정확히 측정될 수 있음

□ 적조 생물 5종의 분광 스펙트럼 측정에 따른 종합적 논의

- 본 실험을 통하여 측정한 5종의 적조 샘플에 대한 분광 스펙트럼은 각 종의 독특한 분광학적 스펙트럼 분포를 보여주고 있음
- 470 nm 부근의 넓은 선폭을 가지는 형광과 클로로필-a에 의한 680 nm 형광은 적조 종에 따라 그 상대적 크기가 다르게 나타남
- 350~750 nm의 스펙트럼 영역을 볼 수 있는 고감도의 분광기를 이용하여 산란광을 수집하고 라만 피크의 크기 및 전체 스펙트럼의 분포를 측정함으로써 적조의 종류 및 그 입자수 밀도의 측정이 가능함을 확인함

2. 2년차

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
2차 연도 (2010)	해수 라만 산란 신호 측정	-최적 채널 설정 및 측정	95%	-적조 종별 형광 최적화 수신 채널 -해수 라만 신호 채널 -적조 형광 필터링 채널
		-해수 라만 산란광 세기에 대한 적조생물 형광 세기의 상대적 비율 산출	95 %	-라만 신호 대비 적조 형광 신호비에 따른 적조 농도 산출 알고리즘 개발
		-원격측정 현장 적용 실험	80 %	-진해만 현장 실험 수행 -원격으로 적조 형광 신호 획득 실험 -신호처리 알고리즘 개발
	적조 형광 농도 정량화 모델 정립	-종별 분광 스펙트럼의 농도에 따른 변화 측정 실험	90 %	-해수 라만 신호 대비 적조 농도 정량화 알고리즘 개발
		-해수 적조 형광 신호 Baseline 보정	95 %	-적조 형광 신호 처리 알고리즘 개발 -12개 채널 데이터로부터 최소 자승법을 이용하여 배경 신호 보정
	장치 구동 및 사용자 인터페이스 프로그램 개발	-레이저, 광검출, 데이터 획득 전자 장비 동기화 구동	80 %	-적조예찰 시스템의 구동과 측정을 제어하고 멀티채널을 이용하여 다른 센서 시스템을 최대 8개까지 연동가능한 컨트롤러 개발
		-장치 및 결과 산출 인터페이스	80 %	-자가인식 레포팅 할 수 있는 컨트롤러 시스템 운용의 효율성 증대
		-원격모니터링 프로그램 및 통신모듈개발	80 %	-양방향 송수신 제어 프로그램 WEMS 프로그램 개발

가. 연구범위 및 연구수행 방법

연구범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
해수 라만 산란 신호 측정	-진해만 현장 실험 수행	-현장 실험을 통해 거리 측정 및 해수 분광 신호 측정 -해수 라만 신호 획득
적조 형광 농도 정량화 모델 정립	-최적 채널 설정 -종별 기준 신호 획득 -농도 산출 알고리즘 개발	-라만 신호 채널, 적조 클로로필-a 신호 채널, 종 구별 채널 설정함 -12 채널에 대해 각 종별 기준 신호 계산 -역변환 문제로 전환하여 최소 자승법으로 각 종별 농도를 산출하는 알고리즘을 수립
장치 구동 및 사용자 인터페이스 프로그램 개발	-레이저, 광검출, 데이터 획득 전자 장비 동기화 구동 -장치 및 결과 산출 인터페이스 -원격모니터링 프로그램 및 통신모듈개발	-RS-485C 방식을 이용하여 무선 송수신 장치를 통하여 적조예찰 시스템의 원격감시, 제어, 계측, 통계분석 및 reporting을 수행 -Demand Controller에 설치되어 있는 운영 프로그램으로 인터넷 통신방식을 이용하여 원격 모니 터링 및 제어가 가능한 프로그 램 개발

나. 세부연구수행 결과

□ 실험 셋업 구성

- 해양 현장에서 실험하기 위한 실험 셋업을 아래와 같이 구성하여 실험실에서 예비 실험 수행
 - 광원: Nd-YAG 레이저 (Quantel Brilliant b, 355, 532 nm, rep-10 Hz, pulse-width 8 ns)
 - 산란광 수집 광학계: 카세그레인 망원경 (구경 20 cm)

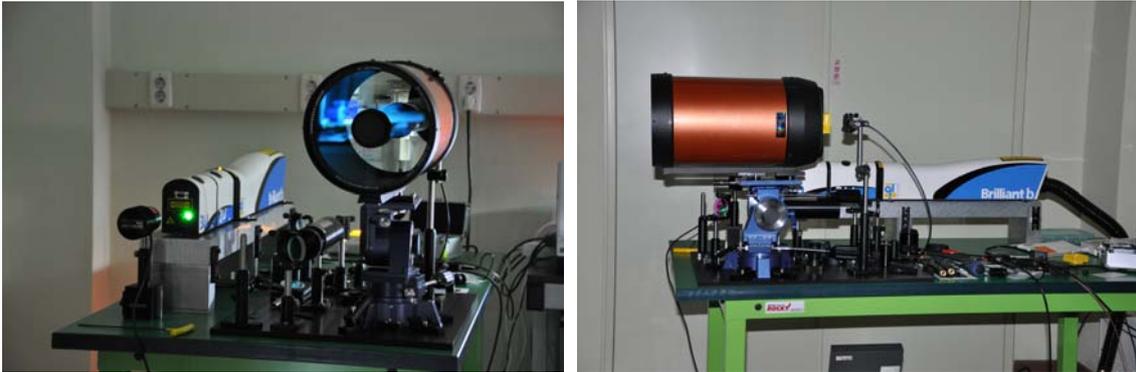


그림 1. 적조 관측용 광원 및 산란광 수집 광학계

- 분광기: 동우 옵트론 DMS00i, 1200, 150 gr/mm, res 0.05 nm
- ICCD: Andor iStar, 1024*256 pixel
- 고속 오실로 스코프: LeCroy 104MXi, 1 GHz

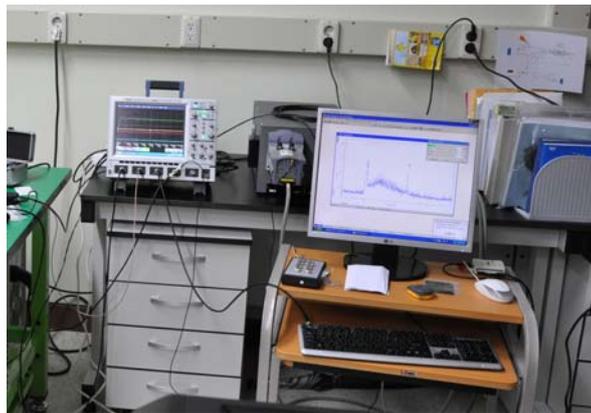


그림 2. 분광기, 고속 오실로스코프 및 제어용 컴퓨터

- Nd-YAG 레이저에 3ω 모듈을 설치하여 355 nm UV 레이저 광원 구성함
- 카세그레인 망원경의 eye piece 부분에 광학 필터 (400 nm long pass filter) 설치
- 산란광이 모아지는 초점 부분에 광파이버 설치
- 파이버를 통해 전송된 산란광을 분광기를 통해 분석
- 레이저 펄스 출력 조절 및 ICCD 게이트 조절을 통해 동기화 및 분광 신호 수집

□ Nd-YAG레이저 3차 조화파 (355 nm) 특성 조사

- 3차 조화파 발생 모듈 설치 후 3 ω 광원 (355 nm)의 Q-switch delay에 따른 출력 특성 측정
 - Flash lamp(FL), Q-switch(QS) 간 지연 시간에 따른 광펄스의 펄스폭 변화를 측정 (그림 3)
 - FL-QS delay가 커질수록 광 펄스의 폭이 최대 5배 정도 커짐
 - FL-QS delay에 따라 QS 트리거 신호와 광펄스 사이의 지연 값이 변화함
 - 그림 3의 데이터를 이용하여 FL-QS delay에 따른 거리 오차를 보정함

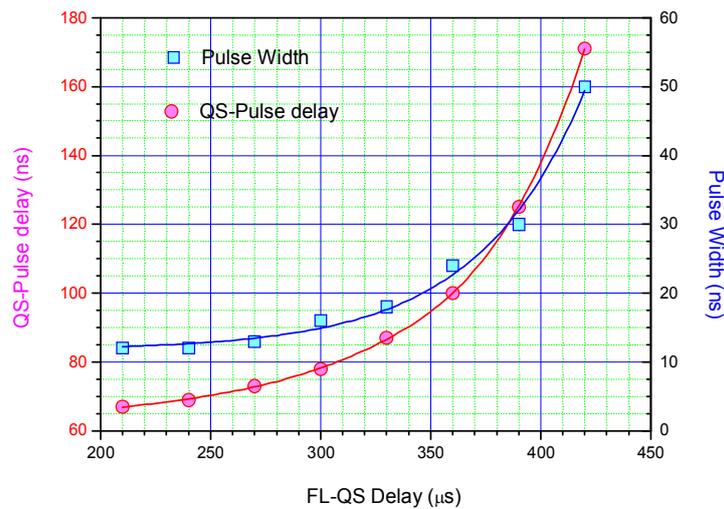


그림 3. FL-QS 지연 시간에 따른 레이저 광 펄스 폭의 변화

- Flash lamp, Q-switch 간 지연 시간에 따른 3차 조화파 출력 변화 (그림 4) 측정
- Flash lamp 점화 후 210 ns에서 Q-switch가 작동할 경우 최대 출력 발진
- Flash lamp, Q-switch 간 지연 시간이 커질수록 레이저 출력이 감소
- 그림 4를 이용하여 3 ω 레이저의 출력을 조절함

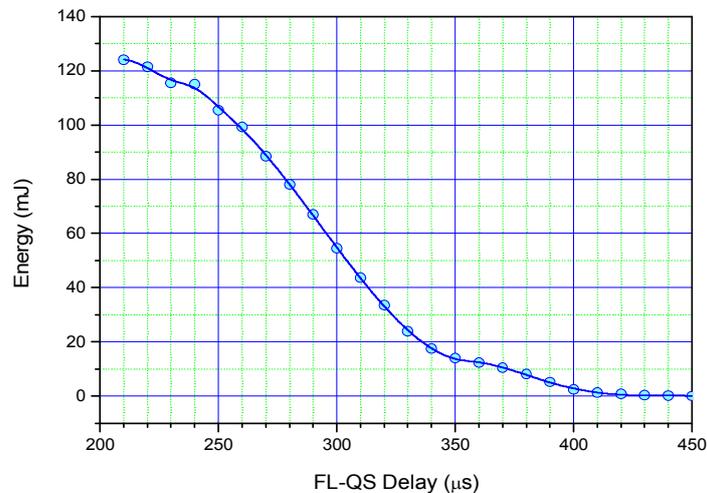


그림 4. FL-QS 지연 시간에 따른 3 ω 레이저의 출력 변화

□ 해수 라만 신호 측정을 위한 예비 실험

- Nd-YAG 레이저의 2차 조화파(532 nm)를 이용한 수도물의 라만 산란광 분광 신호 검출
 - 2차 조화파의 경우 녹색을 띠고 있어 육안으로 확인하면서 광을 정렬할 수 있다는 장점이 있으나 물의 라만 신호의 위치가 650 nm로서 적조 생물의 형광 파장인 680nm와 근접하여 Nd-YAG 레이저의 3차 조화파를 이용하기로 함

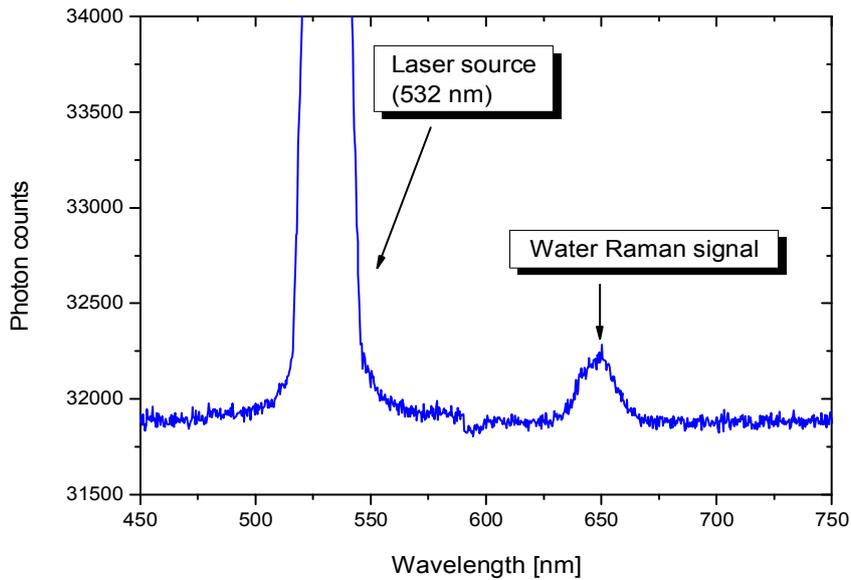


그림 5. 532nm 광원에 의한 수도물의 라만 분광 신호

- 실험실에 수조(100 × 25 × 50 cm)를 설치하여 355 nm(UV) 레이저광의 수도물에 대한 라만 산란 신호 측정
 - 355 nm(UV)에 대한 해수의 라만 산란 파장은 402 nm(청색)로 계산되며 아래 그림과 같이 밝은 청색 형광이 발생함을 육안으로 확인
 - 라만 신호 검출을 위한 ICCD 게이트 및 측정 조건 최적화 수행



그림 6. 라만 산란 관측용 수조에서 UV광원에 의한 라만 산란광(청색) 관측

□ 최적 채널 설정

● 적조 미생물 5종의 분광 스펙트럼 특성을 잘 반영할 수 있는 수신 채널(총 12 채널) 설정함

- 해수 라만 신호 채널 : 394~407 nm (분광선폭 13 nm)
 - 355 nm UV 광원을 사용하므로 402 nm를 중심으로 하는 라만 신호 발생
 - 라만 신호 선폭의 2배수 값을 채널로 설정함
- 적조 필터링 채널 : 670~690 nm (분광선폭 20 nm)
 - 클로로필-a의 형광 신호가 680 nm에서 발생
 - 710 nm 위치에 UV 광원(355 nm)의 2차 회절광이 검출되므로 이를 최대한 억제하기 위해 적조 형광의 반치폭을 채널로 설정함
- 적조 종 구별 채널 : 410~610 nm (분광선폭 20 nm인 10개 채널)
 - 400~600 nm 구간은 적조 미생물 종별 독특한 분광 스펙트럼의 선모양을 가지므로 이를 반영하기 위해 20 nm 간격의 10개 채널을 설정함
 - 종 구별은 적조 채널의 강도와 종구별 채널의 선모양 및 상대적 강도에 의해 이루어짐
 - 적조 농도는 라만 신호에 대한 적조 신호의 상대적 강도로부터 도출됨

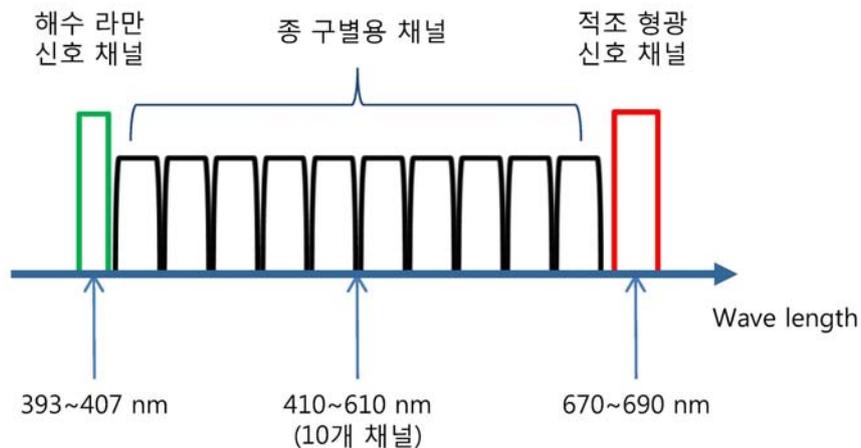


그림 7. 최적 채널 구성도

- 각 채널의 측정 값은 해수 분광 스펙트럼의 각 구간별 정적분에 의한 평균 값으로 할당함
- 이상의 채널 신호를 수식화할 경우 미지수 6개(적조 5종 + DC 배경 신호), 방정식 12개인 over-determined linear system의 문제가 되어 최소 자승법으로 해를 구함
- 해수 라만 신호와 적조 형광(클로로필-a) 신호는 해당 채널에만 기여하나 종구별 신호는 모든 채널 신호에 기여하므로 종을 특징짓는 신호는 12개 각 채널에 대한 12개의 실수 값으로 정의됨
- 클로로필-a의 총 농도는 라만 신호 크기가 계산되면 적조 형광 채널로부터 곧바로 측정됨

□ 라만 산란에 대한 적조 5종의 상대적 형광 비율 도출

- 적조 미생물 5종 형광에 대해 12개의 채널 별 신호 강도를 다음과 같이 측정 (라만 신호로 normalize 함, 미생물 1000 cell/mL에 대한 기준 신호)

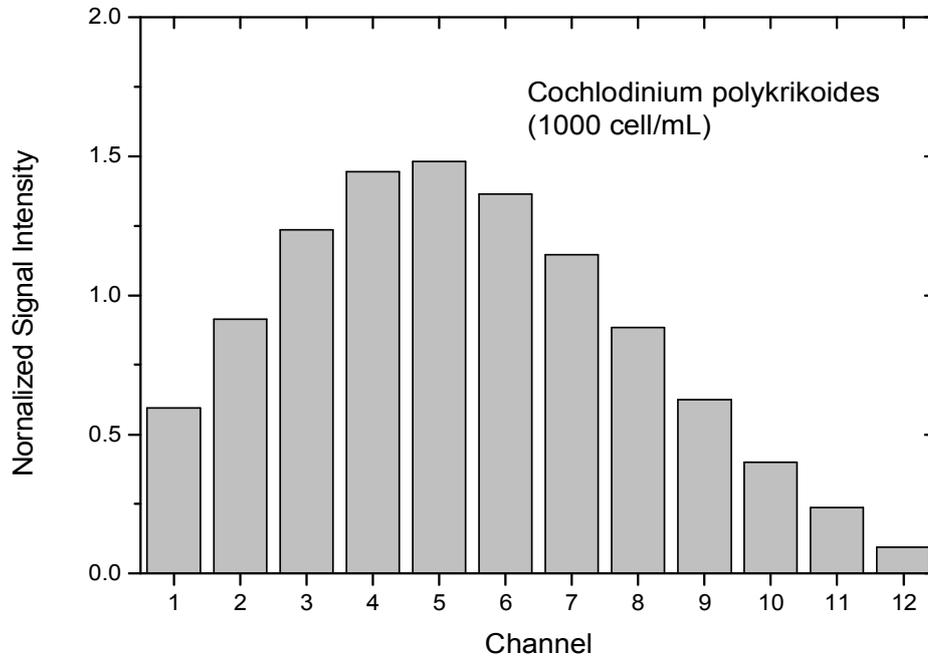


그림 8. 적조 미생물 *Cochlodinium polykrikoides*의 기준 신호

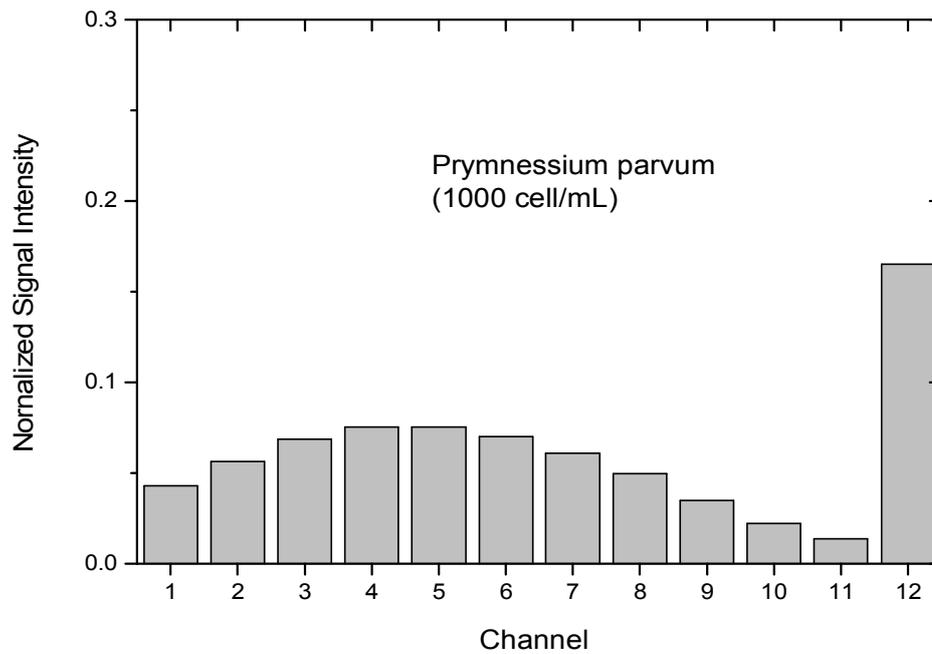


그림 9. 적조 미생물 *Prymnessium parvum*의 기준 신호

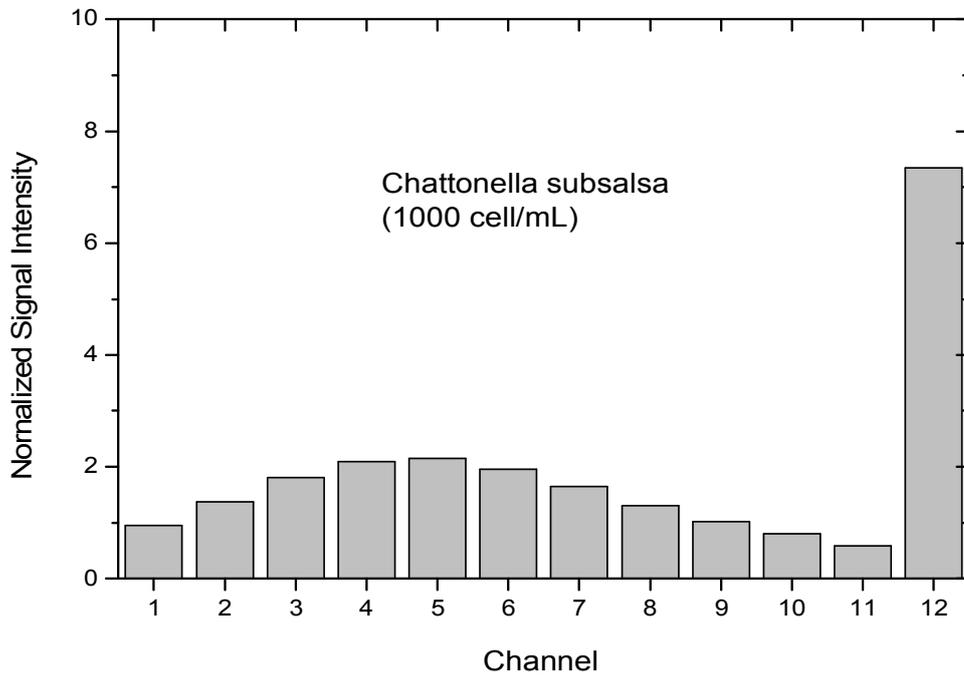


그림 10. 적조 미생물 *Chattonella subsalsa*의 기준 신호

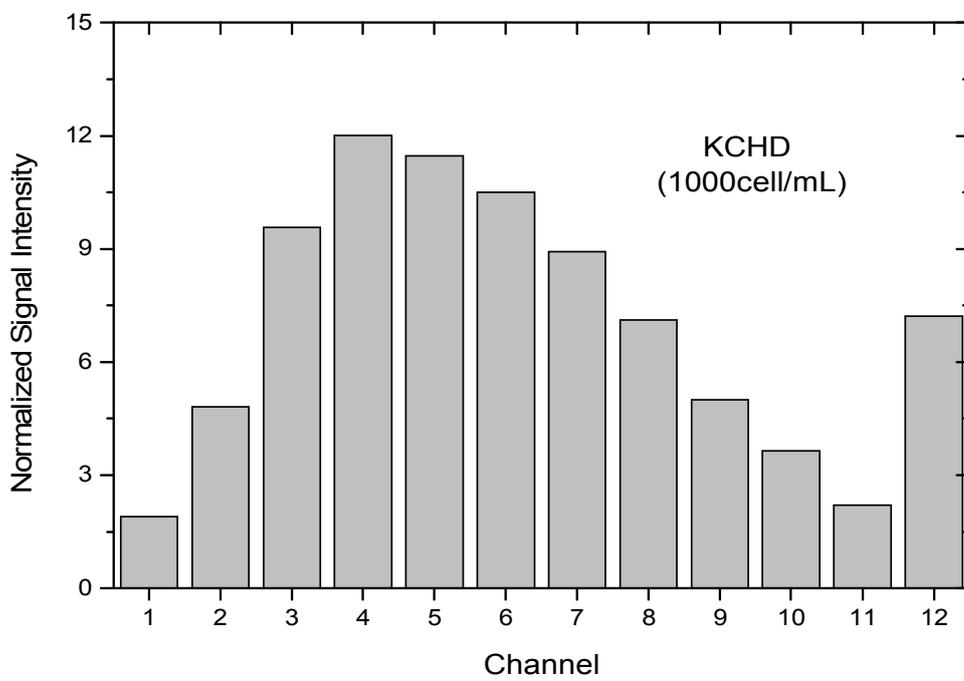


그림 11. 적조 미생물 KCHD의 기준 신호

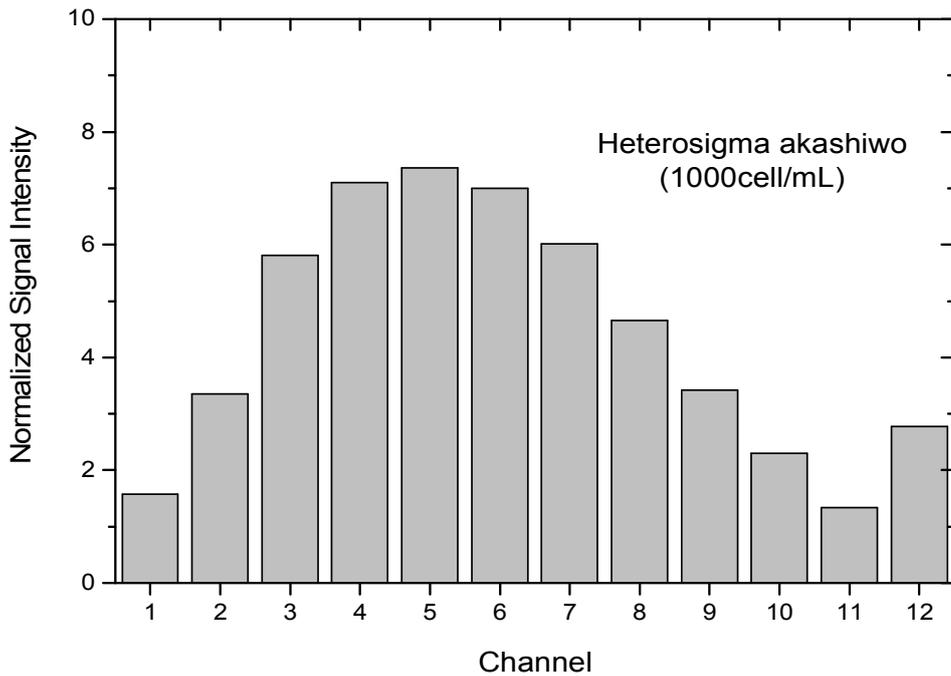


그림 12. 적조 미생물 Heterosigma akashiwo의 기준 신호

□ 종별 적조 농도 계산 알고리즘

- 해수 분광 스펙트럼으로부터 12개의 채널 값을 측정하여 다음과 같은 열 벡터를 구성

$$\mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_{12})^T \quad (1)$$

여기서 s_i 는 각 채널별 신호 세기를 나타냄

5가지 적조 미생물의 채널별 기준 신호를 열벡터로 나타낼 수 있는데 이를 각각

$\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \mathbf{u}_4, \mathbf{u}_5$ 라 하고, 배경 신호를 위해 $\mathbf{u}_6 = (1, 1, \dots, 1)^T$ 를 정의하면

$$\mathbf{S} = a_1\mathbf{u}_1 + a_2\mathbf{u}_2 + \dots + a_6\mathbf{u}_6 \quad (2)$$

이고, a_1, a_2, \dots, a_5 는 각 종별 적조 농도를 나타내고 a_6 는 배경 신호 세기를 나타냄

열벡터 \mathbf{u}_i 를 모아 다음과 같은 행렬을 만들면

$$\mathbf{U} \equiv (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_6) \quad (3)$$

이로부터 다음 행렬 방정식을 구성할 수 있음

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{A}, \quad \mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_6)^T \quad (4)$$

여기서 \mathbf{U} 는 5종의 적조 미생물 기준 신호로부터 생성되는 12×6 행렬이며, 열벡터 \mathbf{A} 는 미지수로서 각 성분이 5종의 적조 농도 및 배경 신호 세기를 나타냄

최소 자승법에 의한 식 (4)의 해는 다음과 같이 주어짐

$$\mathbf{A} = (\mathbf{U}^T\mathbf{U})^{-1}\mathbf{U}^T\mathbf{S} \quad (5)$$

이상의 일련의 과정이 컴퓨터를 통한 신호 수집 단계로부터 농도 결과 값을 도출하는 마지막 단계까지 자동적으로 이루어지도록 프로그램 작업 중

□ 원격 측정 현장 적용 실험

- 해양 현장에서 실험하기 위해 진해만에 위치한 아래 지도상의 해안가 건물 3층에서 실험 실시
 - 일시: 2010년 12월 13일 ~ 17일
 - 장소: 경상남도 창원시 마산 합포구 구산면

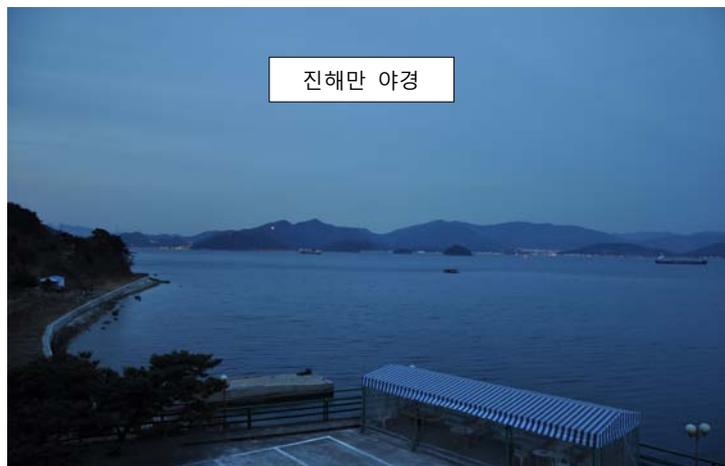
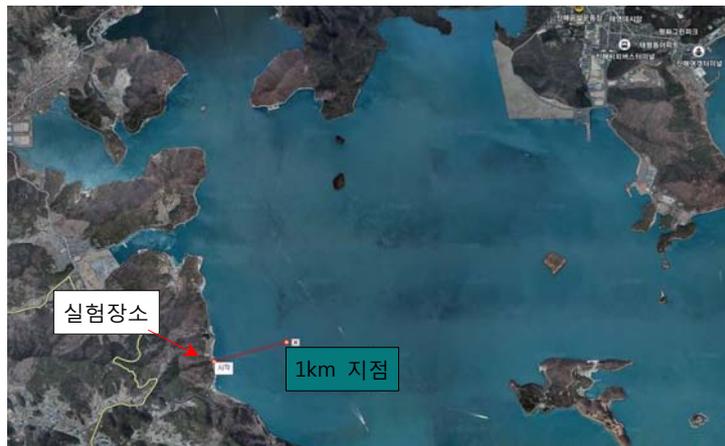


그림 13. 진해만 해안가 건물 3층에 관측 장비 설치

● 현장 실험 일정

- 2010. 12. 13. 트럭을 이용하여 실험 장비(Nd-YAG 레이저, 망원경, 광수집 광학계, 스펙트로미터, 컴퓨터) 현장 이동
- 2010. 12. 14. 실험장비 설치 및 광학계 정렬, 장비 이상무 확인, 거리 측정 및 라만분광 예비 실험
- 2010. 12. 15. 녹색광(532 nm)을 이용한 야간 실험
- 2010. 12. 16. UV광(355 nm)을 이용한 주간 실험
- 2010. 12. 17. 실험 장비 패킹 및 철수

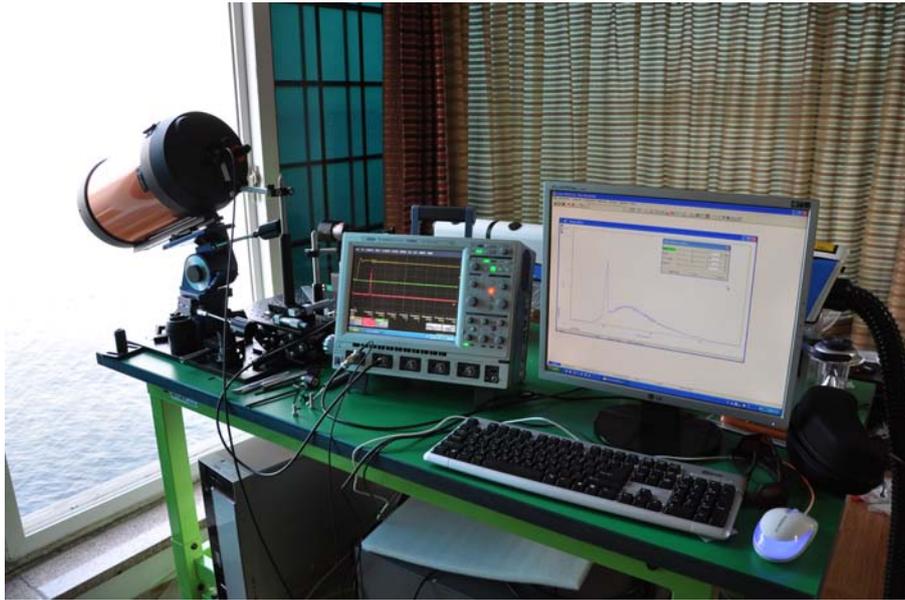


그림 14. 해안가 건물 3층에 설치된 적조 관측 시스템 (주간 실험 장면)



그림 15. 녹색 광원을 이용한 야간 실험

□ 현장 실험 주요 결과

● 레이저 산란광을 이용한 거리 측정

- 그림 16과 같이 해수면에 레이저 빔을 조사한 후 카세그레인 망원경을 이용해 산란광을 수집
- 고속 포토 다이오드로 산란 신호를 검출하여 펄스 왕복 시간으로부터 측정 지점까지의 거리 측정



그림 16. 해수면에 녹색 레이저 조사

- 레이저 광의 펄스 폭이 7 ns 이므로 2 m 이상의 떨어진 관측점에 대해 거리 측정 가능
- 470 m 떨어진 수면에 레이저를 조사하여 그림 17과 같은 신호를 얻었으며 거리 역제곱에 비례해서 신호가 작아짐을 감안 할 때 1km 정도의 원거리에서도 충분한 S/N비를 가지는 신호를 얻을 것으로 예상

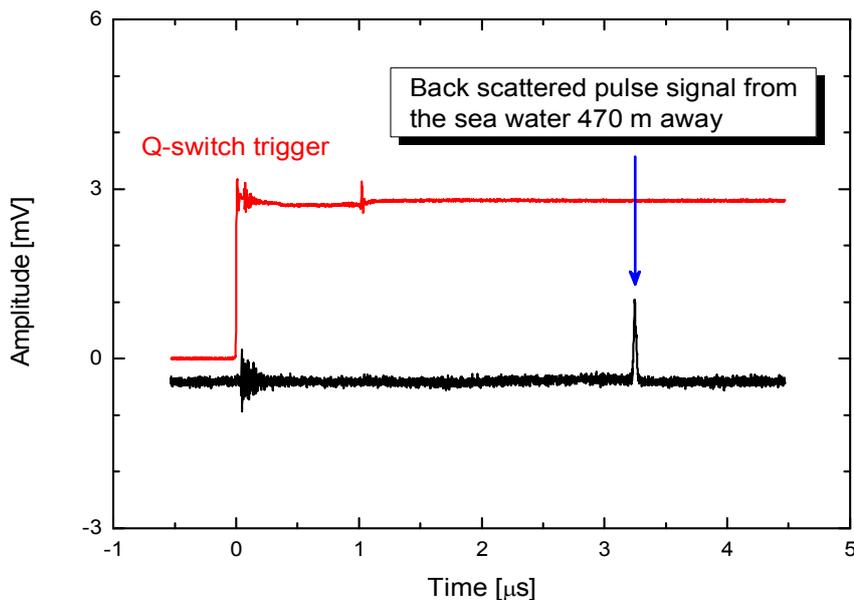


그림 17. 산란 광펄스 검출

● 해수 라만 신호 측정

- 60 m 전방의 해수면에 355 nm 레이저를 조사하여 그림 18와 같은 해수 분광 신호 얻음
- 402 nm 위치에 라만 신호가 관측됨 (야간 측정)
- ICCD 동작시 digital delay generator(DGG)를 사용하지 않아 높은 레벨의 배경 신호가 수신됨

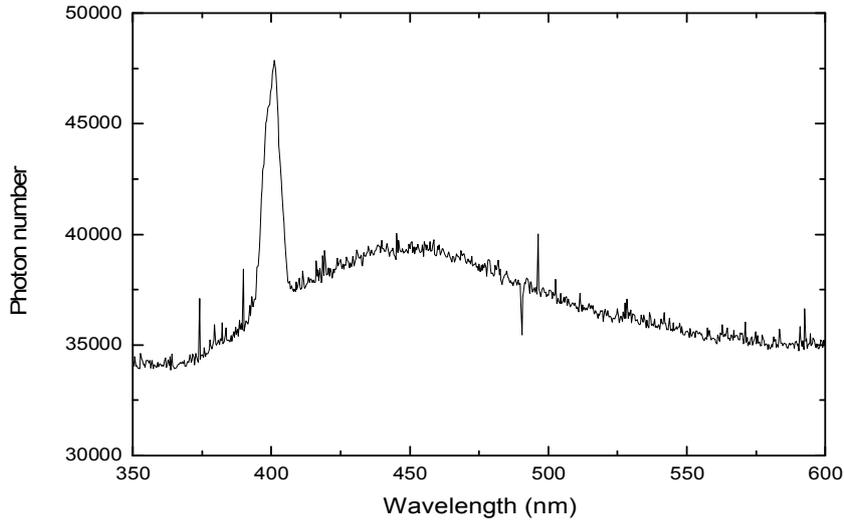


그림 18. 해수 라만 신호 측정 (DGG off)

- 주간에 74 m 전방의 해수면에 355 nm 레이저를 조사하여 그림 19과 같은 해수 분광 신호 얻음
- DGG를 사용함으로써 태양광에 의한 배경 신호 억제
- 라만 신호의 S/N 비는 약 30 정도로 관측되며 MCP Gain, Gate Time 및 수집 광학계 개선으로 S/N 비는 향상될 것으로 예상

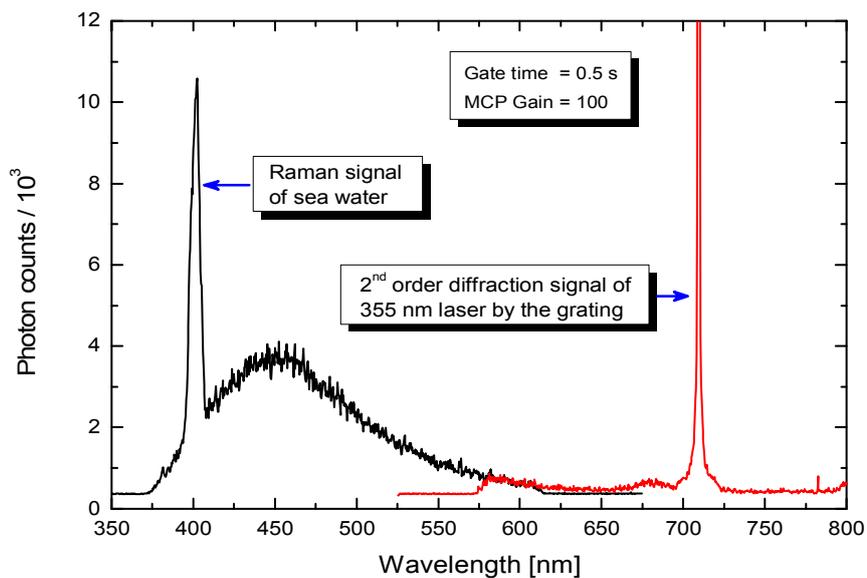


그림 19. 주간에 측정된 해수 라만 신호 (DGG on)

□ 추가 현장 실험 계획

- 연구 수행 추진 일정상 적조가 발생하지 않는 12월에 현장 실험을 수행하였음
 - 앞 절의 현장 실험 결과 데이터에는 적조에 의한 신호가 나타나지 않았음
 - 레이저 조사 위치를 바꿀 때마다 광학계 정렬을 다시 해야 하는 불편과 어려움이 있었음
 - 관측점이 원거리가 될수록 신호가 작아지고 망원경 정렬이 어려워 아래 그림과 같은 시스템의 도입이 반드시 필요함
- 레이저-망원경 광축 일치 시스템 구성
 - 아래 그림 20와 같이 레이저 빔과 망원경의 광축을 일치 시켜 망원경이 바라보는 곳에 레이저가 항상 조사될 수 있는 시스템을 제작 중임
 - 라이다(Lidar) 시스템과는 달리 망원경이 위-아래-좌-우로 움직여 레이저 빔과 시야를 동시 조절함
 - 웜기어를 이용하여 망원경의 각도 미세 조절 가능
 - 본 시스템이 구축되는 대로 추가 현장 실험을 실시할 예정임 (5월 중 예상)

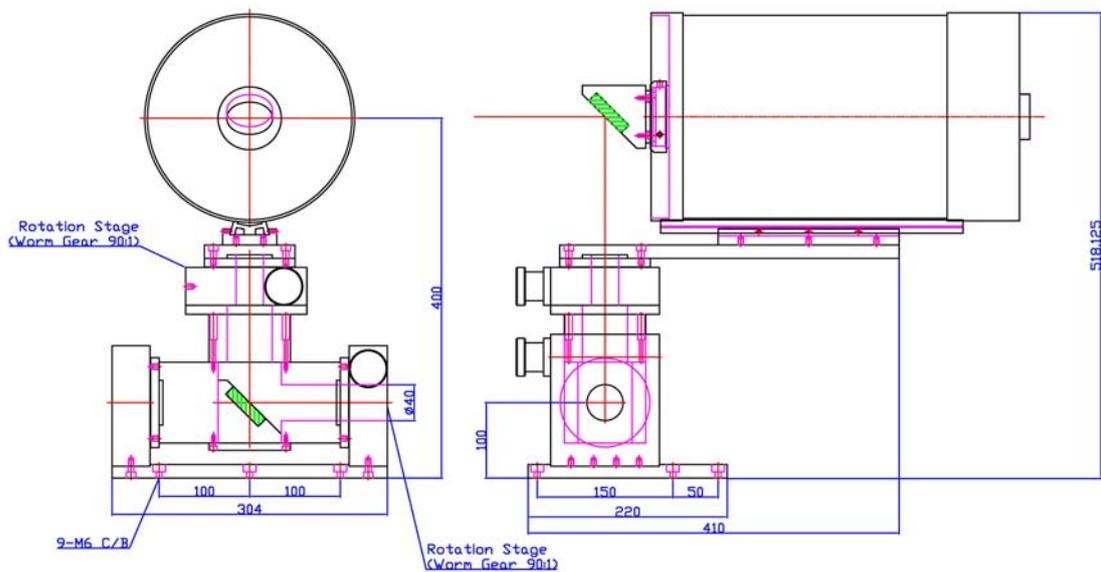


그림 20. 레이저-망원경 광축 일치 시스템

- 레이저-망원경 광축 일치 시스템을 이용한 추가 현장 실험 계획
 - 거리에 따른 라만 신호의 신호대 잡음비 측정
 - 망원경 각도 조절에 의한 거리 값과 레이저 펄스 왕복 시간 측정에 의한 거리 값의 상호 보완 데이터 확보
 - 해수면의 관측 영역에 대해 mesh point를 설정하여 해수 라만 신호 및 적조 분광 신호 측정
 - 2차원 적조 농도 차트 플롯 프로그램 개발

- 개발된 분석 알고리즘에 의해 산출된 R값은 미생물의 종에 따라 다르게 산출됨
- 위의 분석알고리즘 유효성 검증에서 평균 0.9의 상당히 높은 상관관계를 보임
- 3차년도에 시행할 예정인 field test에서 획득될 데이터를 기초로 분석알고리즘의 최적화 과정 필요
- 본 연구에서 산출된 알고리즘을 토대로 해수에서 검출된 형광신호 데이터에 의해 적조발생 가능성을 분석하는 프로그램 개발

● 콘트롤러 시스템 개발

- 개발된 레이저 광원을 이용한 적조예찰 시스템의 구동과 측정을 제어하고 멀티채널을 이용하여 다른 센서 시스템을 최대 8개까지 연동가능한 콘트롤러 개발
- 적조 예찰시스템의 고장시, 고장 부분과 원인을 자가인식하여 레포팅 할 수 있는 기능을 콘트롤러에 탑재하여 시스템 운용의 효율성 증대

● 형광데이터 무선 송수신 장치 개발

- 형광데이터를 전송회선에 공급하고 데이터 전송회선으로부터 데이터 신호를 수신할 수 있는 장치 개발
- 해수의 적조미생물에 의한 형광신호를 디지털 신호로 전환하여 무선망을 이용하여 원격지의 관측소로 보낼 수 있는 인터페이스 개발
- 양방향 송수신 제어 프로그램인 WEMS 프로그램 개발



형광데이터 무선 송수신 장치

● 원격모니터링 시스템 개발

- 적조 예찰 시스템은 해안에 설치하거나 선박에 탑재하는 형식으로 개발될 예정이기 때문에 적조 예찰시스템에서 검출된 형광신호나 미생물의 농도에 대한 데이터를 원격지에서 수신하여 관리할 수 있는 원격모니터링 시스템 개발이 필수

- RS-485C 방식을 이용하여 무선 송수신 장치를 통하여 적조예찰 시스템의 원격감시, 제어, 계측, 통계분석 및 reporting을 수행을 수행하고 시스템의 효율적인 관리를 위하여 시스템간 Network 통신망을 통한 데이터 통신과 경보사항을 운영자에게 알리는 원격 실시간 모니터링 시스템 개발
- Demand Controller에 설치되어 있는 운영 프로그램으로 인터넷 통신방식을 이용하여 원격 모니터링 및 제어가 가능한 프로그램 개발



원격모니터링 시스템

3. 3년차

시제품 개발과 현장 측정이 주요 연구내용인데 다음은 개발한 시제품의 매뉴얼과 사양을 소개한다.

원격 적조 센서 구성 모듈

광원부

▪ LD (Laser Diode)

- 구성 목적 :
 - 원거리에서 적조 생물의 형광 신호와 적조 생물 정량화를 위한 물의 라만 신호를 검출하기 위해서는 대상 물질들(적조, 물)을 여기(excitation)시킬 수 있는 광원의 사용이 필수적이다.
 - 원격 적조 센서의 소형화, 경량화, 현장 적응성, 사용자 편의성 등을 고려하여 광원으로 고효율 Laser Diode를 사용한다.



구분	규격
Central Wavelength	445 nm
Optical Power	1W

▪ Laser focusing module

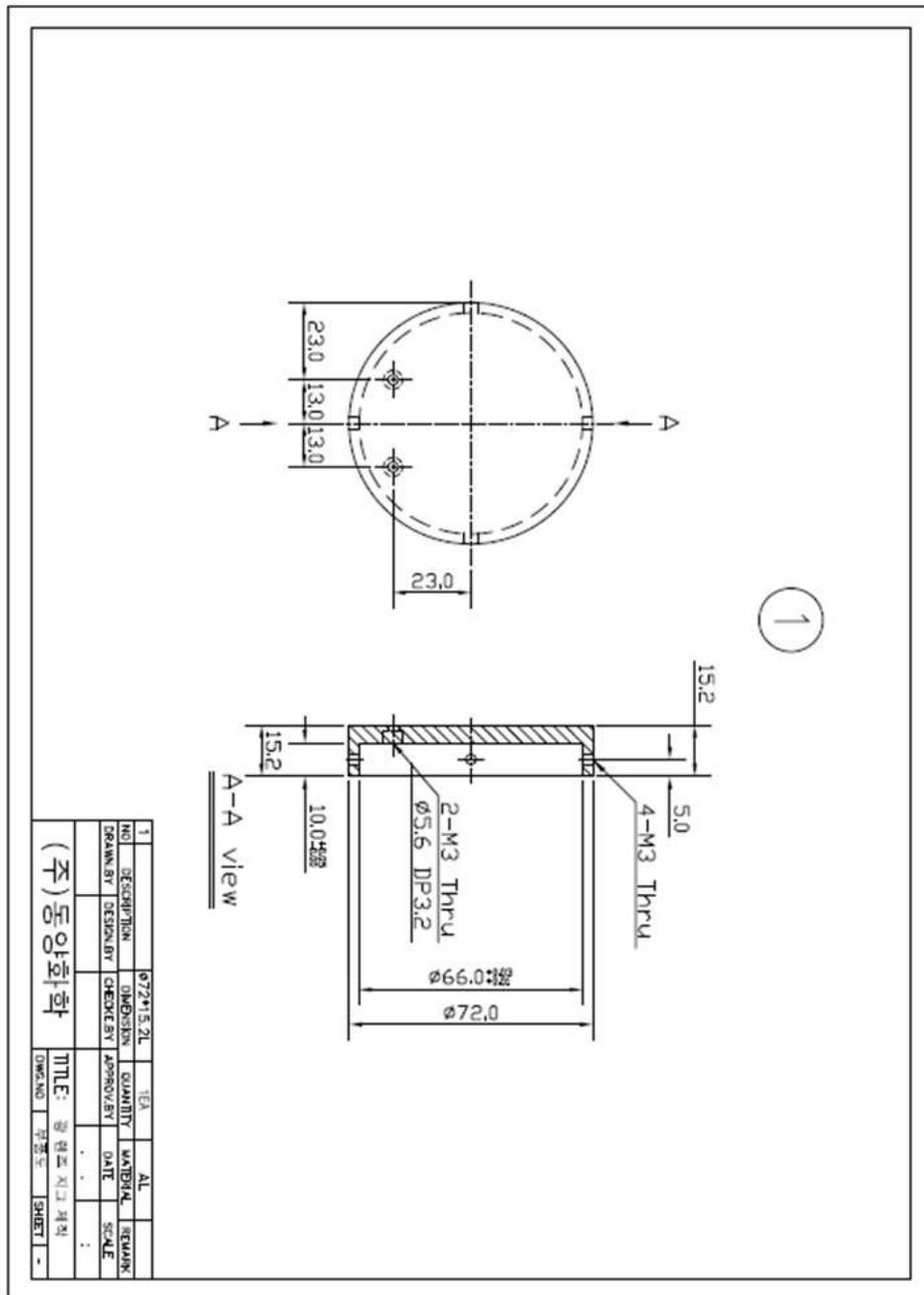
- 구성 목적 : 원거리에서 측정지점의 적조 생물의 형광신호와 물의 라만 신호를 검출하기 위해서는 측정 지점에 고효율의 레이저가 조사(irradiation)되어야 한다. 이를 위해서는 레이저 다이오드 광원의 빔 퍼짐(beam divergence) 현상을 방지할 수 있는 광학계를 활용한 beam shaping이 가능한 소형 광학 모듈을 개발 하였다.



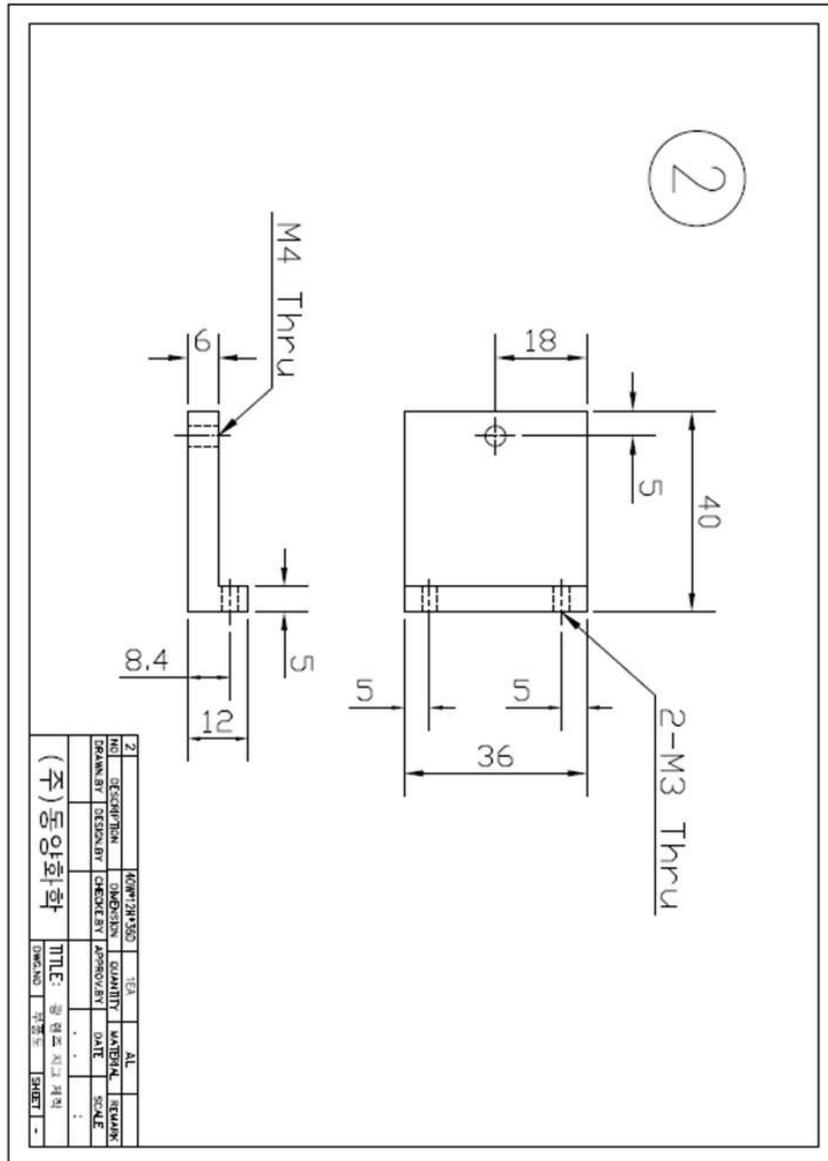
▪ **Laser Diode beam steering and mounting module**

- 구성 목적 : 원거리에서 레이저 다이오드에 의해 여기된 측정 지점의 물의 라만 신호와 적조 생물에 의한 형광 신호를 정밀하게 측정하기 위해서는 광원인 LD와 원격 광 검출 장치(Telescope)와의 광 정렬(Optical alignment)가 우선되어야 한다. 그러므로, LD 탑재 마운트와 탑재된 LD빔을 미세 조향(steering)할 수 있는 광학계 모듈을 설계 제작 하였다. 이 광학 모듈은 원거리 광신호 검출 장치(Telescope)의 중앙부에 장착된다.

- Laser Diode mount 설계도



(a)



(b)

- 제작된 Laser Diode mount 사진



(a) 측면사진



(b) 상부사진

- Laser focusing module과 beam steering 장치가 결합된 사진



(a) 측면 사진



(b) 상부 사진

- LD focusing module, beam steering 장치, LD mount가 결합된 사진



(a) 정면 사진



(b) 측면 사진

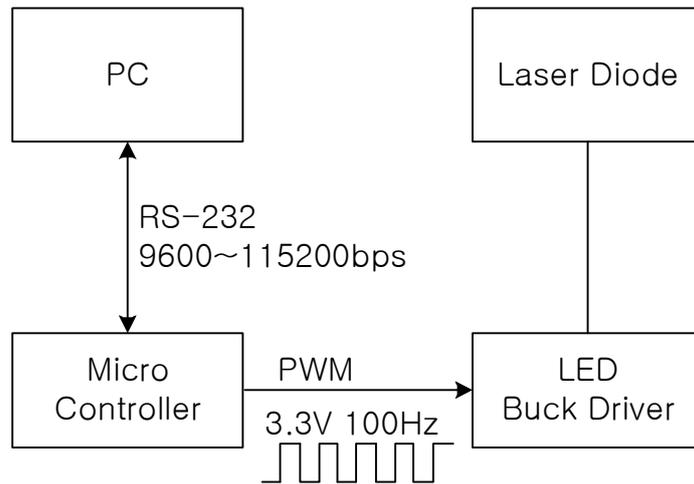
▪ LD 드라이버 (Laser Diode Driver)

- 구성 목적 :
 - 물의 라만 신호, 적조 형광 신호를 원거리에서 측정할 수 있는 민감도와 정밀도 확보를 위해서는 수면과 측정 주변 환경에서 원격 광 측정 장치로 들어오는 자연광 및 인공광에 의한 잡음 측정 광신호의 제거를 통한 신뢰성/재현성 확보가 필수적이며, 이를 위해 LD 광원의 On/Off를 할 수 있는 modulation 기능 구현이 가능한 LD 드라이버 개발이 필요하다.
 - 고감도 고신뢰성 측정 데이터를 취득하기 위해서는 LD 공급 전류 제어를 통한 광원의 세기, 작동시간 제어, PC를 이용한 제어가 가능한 LD 드라이버의 개발이 필요하다.
 - Laser Diode의 작동 제어를 위해 PC(Personal Computer)의 시리얼 통신을 사용함.
 - 데이터 전송 속도는 115200, 57600, 36400, 19200, 14400, 9600 bps 등 가변적이며, 명령 전송에 의한 시간 지연 최소화를 위해 전송 속도가 높을 것을 사용하는 것이 유리함.
 - Laser Diode의 최소 On/Off 제어 시간은 1 μ sec, 최소 전송지연시간은 69.4 μ sec 임.
 - 제어 방식은 가변 저항의 변화를 이용한 수동식 방식과 PWM 신호의 듀티비 변동에 의

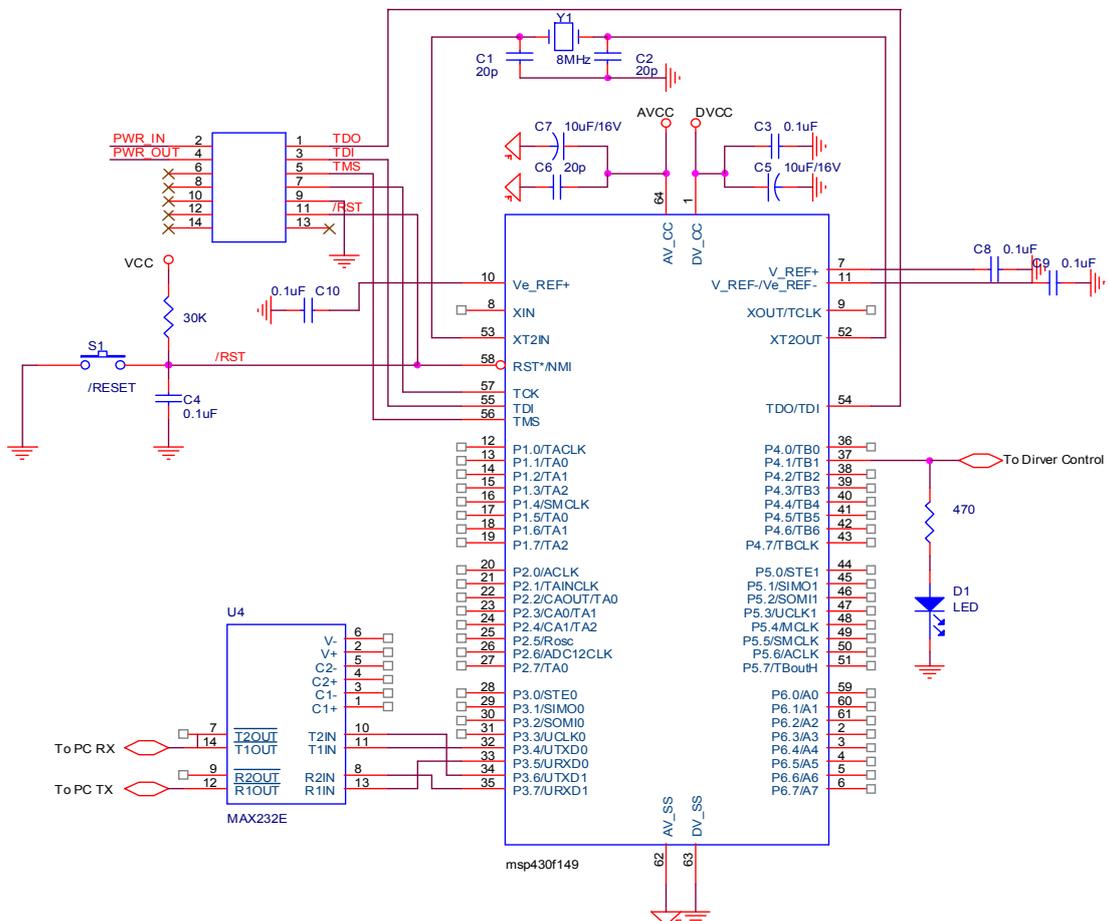
한 자동식 방식을 사용 가능함.

- 최대 1200 mA 정전류 구동방식의 DC Buck 타입의 LED 드라이버의 전류 제어를 위한 PWM 방식의 제어신호는 micro controller 가 생성함.

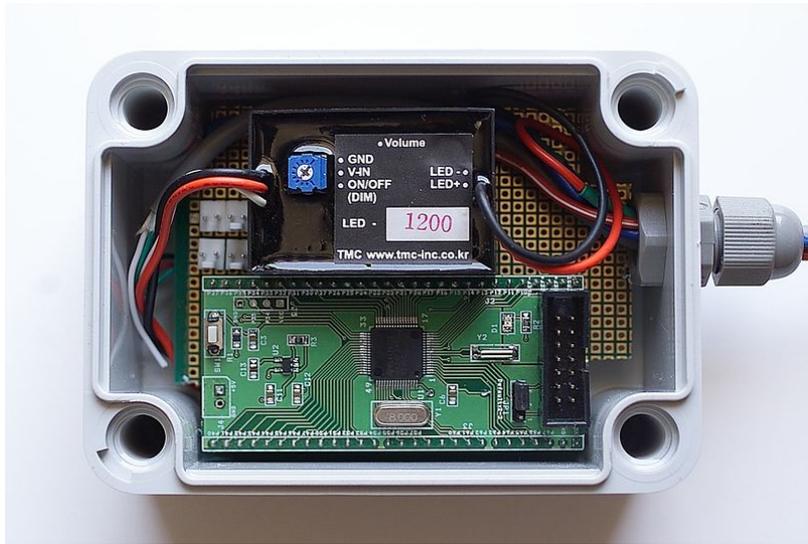
• LD Driver 블록도



• LD Driver 회로도



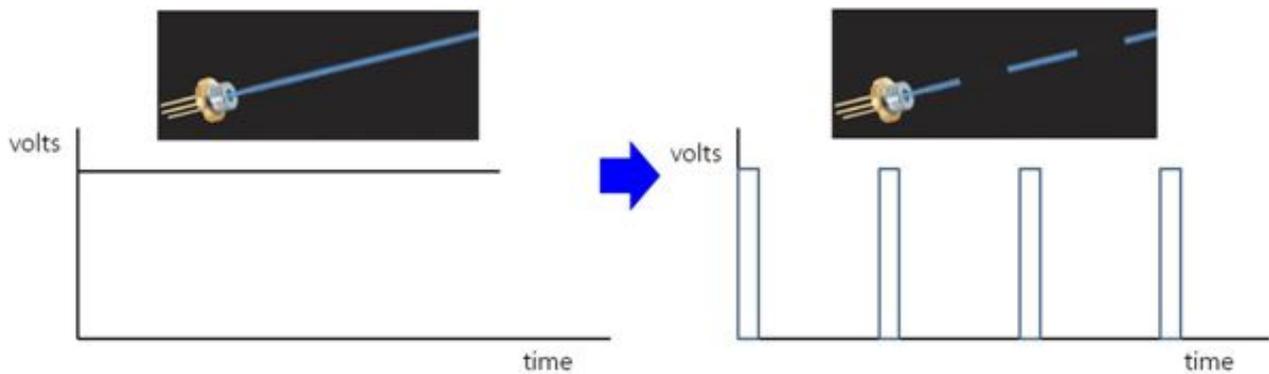
- LD Driver 시제품 사진



- LD Driver 사양

구분	규격
데이터 전송 속도(bps)	115200, 57600, 38400, 19200, 14400, 9600
최소 전송 지연 시간 (μsec)	69.4
공급전류 (PWM 방식/ 가변저항방식)	0 ~ 1200 mA
On/Off Period (sec)	$1 \times 10^{-6} \sim 1,000$

- CW(Continuous Wave) LD에 개발한 LD 드라이버를 이용하여 modulation 기능을 구현한 예시도



▪ 원격 광 검출장치(Telescope)

- 구성 목적 : 고출력 레이저에 의해 유도된 물의 라만 신호와 적조 형광 신호를 원거리에서 검출하기 위해 상기한 신호들을 집광할 수 있는 장치가 필수적이므로 대구경 망원경(Telescope)을 사용한다.

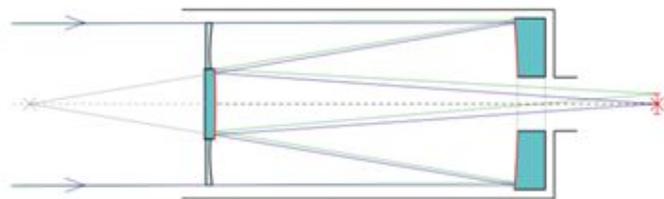


(a) 측면 사진

(b) 정면 사진

(c) 후면 사진

- 원격 광 검출장치의 집광원리



Light path in a Schmidt-Cassegrain

- 제품사양

구분	규격
Optical design	8"(203mm) Schmidt-Cassegrain
Focal Length	2032 mm F/10
Optical Coatings	StarBright XLT
Optical Tube	Aluminum, metallic orange
Dovetail	Quick release tube clamp
Highest Useful Magnification	480x
Limiting Stellar Magnitude	14
Resolution: Rayleigh (arc sec)	.68 arc seconds
Dawes Limit(arc sec)	.57 arc seconds
Light Gathering Power	843x unaided eye
Field of View (degrees)	.63°
Linear FOV (ft@1000 yds)	33 ft
Optical Tube Length	17 inches
Telescope Weight	24 lbs

■ 원격 광 검출 장치 자동 구동을 위한 마운트

- 구성 목적 : 자동으로 원격 측정 지역을 측정하기 위해서는 원격 광 검출 장치(Telescope)와 LD 광원이 결합된 측정 센서 부를 마운트할 수 있고 3차원으로 구동할 수 있는 정밀한 기계적 장치가 필요하다.



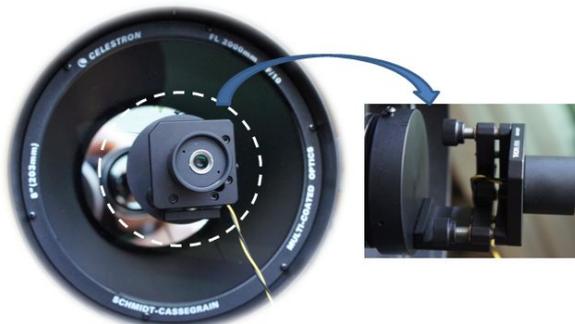
자동화 마운트 사진

■ 원격 광 검출 장치가 자동화 마운트에 탑재된 사진



■ 광원(LD) 과 원격 광 검출기가 결합된 사진

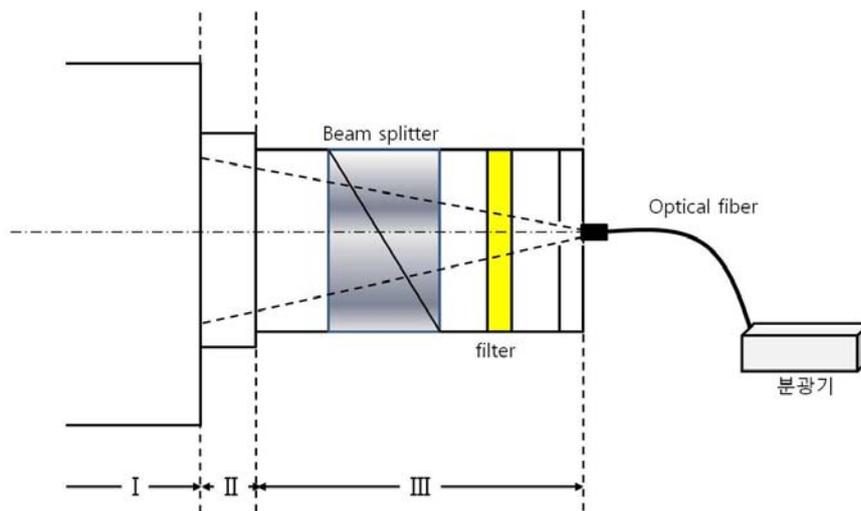
- 원격 적조 측정의 사용자 편의성을 도모하기 위해 측정이 용이하도록 광원(LD)을 원격 광 검출기(Telescope)의 중앙에 장착한다. 이 때, LD focusing module, beam steering 장치, 원격 광 검출기의 중앙에 설치 가능하게 설계 제작된 LD mount module 들이 결합된 광학 구성계가 원격 광 검출기 중앙부에 장착된다.



■ 원격 광 검출 장치(Telescope)와 소형 분광기와의 광결합 장치

- 구성 목적
 - 원거리에서 발생한 미세한 광 신호를 원격 광 검출 장치를 이용하여 집광한 신호를 광파이버(Optical fiber)를 통해 분광기로 전달하기 위하여 광손실(Optical loss)을 최소화 할 수 있는 광결합기의 설계와 제작이 필요하다.
 - 또한, 측정 대상 광신호의 파장 영역을 분광기에서 확보하기 위한 광학 필터, 측정 지점의 집광 정도를 확인하기 위한 프리즘, eyepiece, 연결된 광파이버의 미세 위치 조절 장치로 구성되어 있다.
 - 광결합 장치는 원격 광 검출 장치의(Telescope)의 후면부에 커넥터를 이용하여 결합된다.

• 광결합 장치의 개략도



I: 원격 검출 장치 (Telescope) II: 커넥터(connector) III: 광결합기

• 광결합 장치 사진

1) 커넥터와 프리즘이 결합된 사진



(a) 상부 사진



(b) 측면 사진

2) Long-pass filter



Cut-on wavelength : 450 nm

3) 결합된 광 파이버의 미세 위치 조절 장치



a) 미세 위치 조절 장치



b) 광 파이버가 연결된 미세 위치 조절 장치

4) Eyepiece

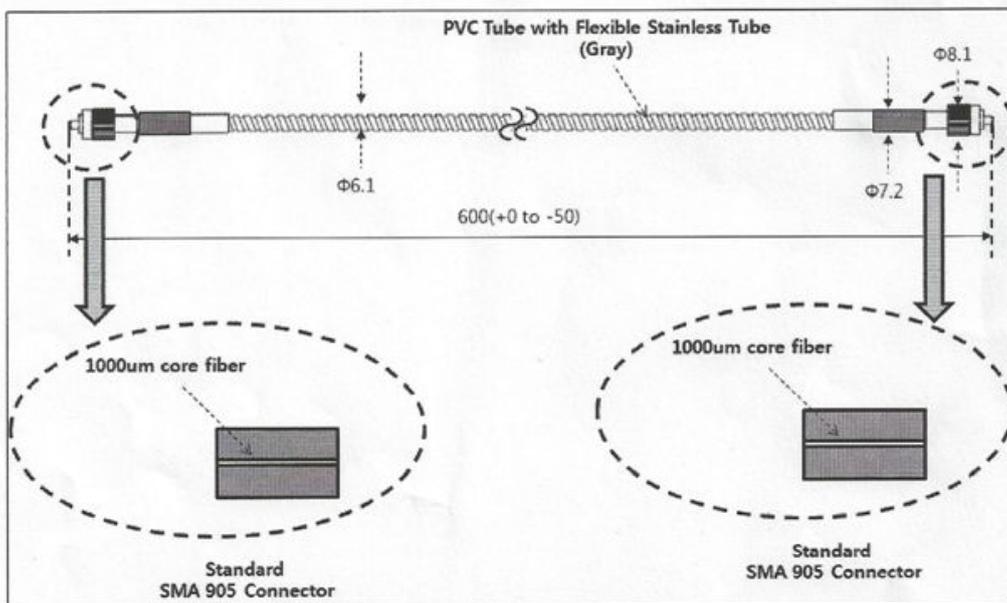


5) 제작된 광결합 장치



▪ 광파이버(Optical fiber) (1000 μm core fiber용 Single SMA Cord)

- 구성 목적 : 원격 광 결합 장치에서 집광된 미세 측정 광 신호를 광 결합기를 통해 분광기로 손실없이 전송하기 위해 코어 크기가 1000 μm인 특수 제작한 광파이버를 사용한다.



• 광학적 사양

구분	규격
적용파장	200 ~ 1,000 nm
개구수(NA; Numerical Aperture)	0.22
적용 광섬유	1000 μm core Fiber

• 기구적 사양

구분		규격
전체 길이		600 mm
Jacket	재질	PVC Tube within Flexible Stainless Tube
	Label 색상	Green
	외경/색상	PVC Jacket
적용 커넥터		Both side Standard SMA 905 Connector (Φ 9.1 mm Coupling Nut)

■ 분광분석기 (Spectrotometer)

- 미세 광신호 검출을 위해 입력 구경(Entrance aperture)이 큰 형광 검출 목적용 분광 분석기를 이용한다.
- 분광분석기는 다색화 장치를 이용하여 자외선부터 가시광선 영역의 전 파장의 데이터를 빠르게 얻을 수 있을 뿐만 아니라 각 파장에서 다른 양상을 보이는 다성분을 동시에 측정하여 정량 할 수 있다.
- 기계적인 장치를 사용하지 않아 기기의 구조가 단순화 되어 있으므로, 파장의 재현성이 뛰어나다.
- 분광 분석기에서 사용되는 채널 검출기인 CCD(Charge Coupled Device; 전하결합소자)는 작은 전하량을 전류로 변환하는데 효과적이고 감도가 뛰어나나 광자(Photon)에 대해 Saturation charge가 작으므로 일정 량 이상의 광자를 받으면 빛의 세기가 포화되어 낮은 검출 한계 특성을 갖는다. 따라서, 라만(Raman)이나 발광(Luminescence)과 같은 낮은 검출 한계를 요구하는 분광계에 이상적인 검출기이다.



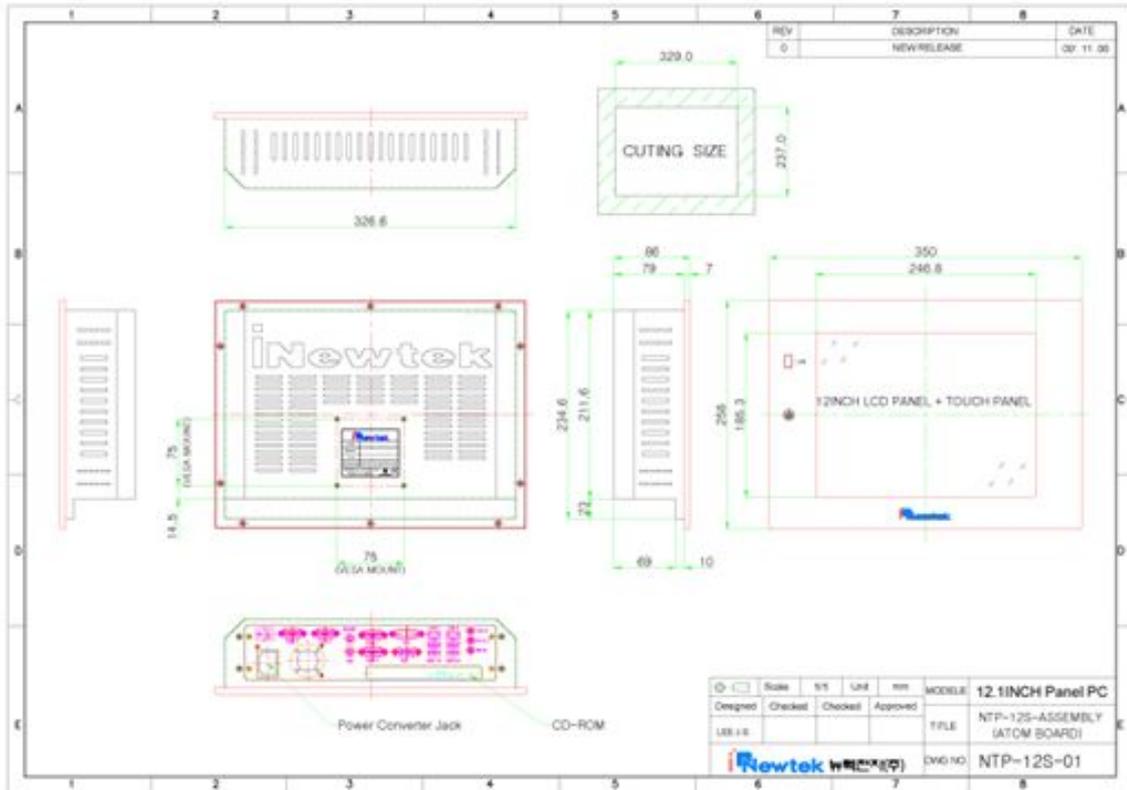
구분	규격
Wavelength range	200 ~ 850 nm
Optical resolution	~ 5.0 nm
Integration time	6ms to 60sec
Detector	Sony CCD array, 2048 pixels
Optical bench design	Czerny-Turner
Entrance aperture	200 μ m in width
Grating	600 lines/mm (Blazed at 400 nm)
Operating systems	Windows 2000/XP, Windows 7

▪ PC

- 구성 목적
 - LD 광원의 제어
 - 분광 신호 분석 자동화
 - 원격 광 측정 장치(Telescope) 마운트 구동 제어
 - 측정 지역 자동 스캔



12" Slim type Touch Screen Panel PC



- System

구분	규격
CPU	Supports Intel socket P Core™ 2 Duo/ Core™ Duo/ Core™ 2 Solo/ Core™ Solo CPU with 65nm process technology
FSB	533/800 MHz
BIOS	AMI 16 Mb SPI BIOS
System Chipset	Intel GME 965 / ICH8-M
I/O Chip	Winbond W83627DHG-A
System Memory	Two 200-pin SODIMM sockets up to 4GB Dual Channel DDR2 533/667 SDRAM
SSD	One CompactFlash Type I/II socket
Watchdog Timer	Reset: 1sec.~255 min, and 1 sec. or 1min./step
H/W Status Monitor	Monitoring CPU temperature, voltage, and fan status with auto throttling control
TPM	TPM (Infineon SLB 9635 TCG 1.2)
S3	S3 Support
SmartFan Control	Yes

- I/O

구분	규격
MIO	1×EIDE, 3×SATA, 1×K/B, 1×Mouse 4×RS232 (COM1~4 with Power Output)
USB	5×USB 2.0

- Display

구분	규격
Chipset	Intel GME965 integrated Graphics Media Accelerator X3100
Display Memory	Intel DVMT 4.0 supports up to 384 MB shared video memory
Resolution	1024 × 768
Dual Display	CRT+LVDS, of CRT+DVI-D
LVDS	Dual-channel 18/24-bit LVDS
DVI	Chrontel CH7307C DVI transmitter up to 165M pixels/second

- Ethernet

구분	규격
LAN 1	Realtek RTL8111B Gigabit Ethernet
LAN 2	Realtek RTL8111B Gigabit Ethernet

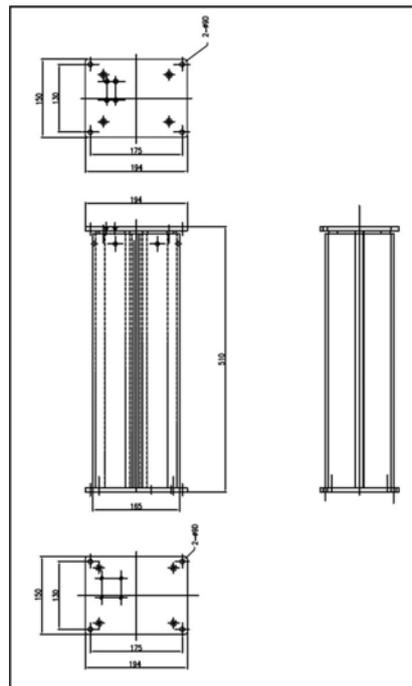
- 광원/ 광검출 장치 리프트용 파워 실린더

- 구성목적 : 측정 장치의 높이 조절이 가능하도록 하여 현장 측정 적응성 향상을 위해 설계 제작된 전기 리프트

- 제품사진



• 도면



• 사양

구분	규격
동정격 하중	100N ~ 6000N (10kgf~600kgf)
최대정격 하중	100N ~ 6000N (10kgf~600kgf)
정정격 하중	100N ~ 6000N (10kgf~600kgf)
행정거리	100 ~ 500 mm
속도	6 ~ 50 mm/s
작동시간	10% (2분 연속 작동시 18분 휴식)

Installation

▪ 시제품 조립 순서

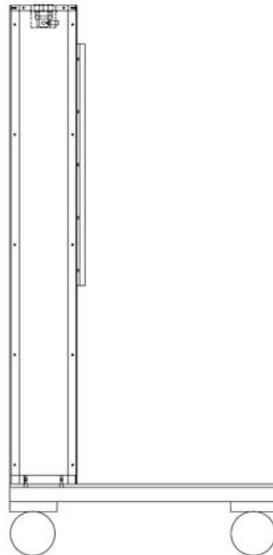
1) 시제품 하단부 지지대



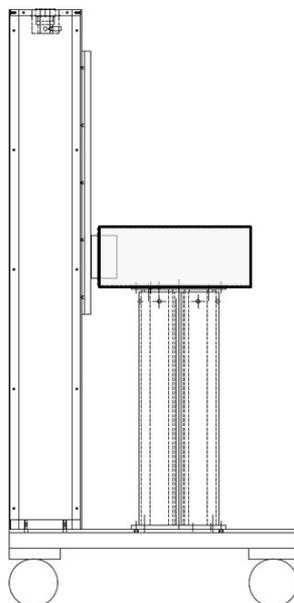
2) 시제품의 이동성을 용이하게 하기 위해 시제품 하단부 지지대에 바퀴를 장착한다.



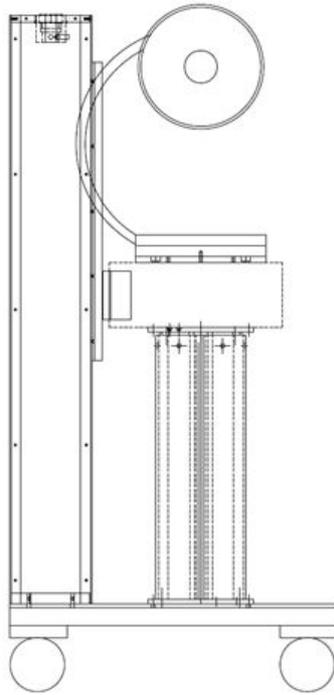
3) 측면 지지대를 조립한다. 여기에서 측면 지지대에는 원격 적조 센서와 컴퓨터와의 원격 제어를 가능하게 하는 통신 케이블들이 측면 지지대 내부에 들어간다.



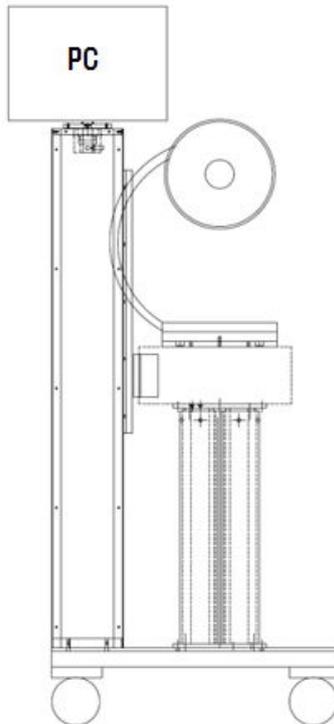
4) 원격 광 측정 장치들이 탑재 될 전동식 리프트와 원격 광 측정 장치인 Telescope 마운트의 지지대 역할과 내부에 LD 드라이버, 소형 분광기가 장착될 case가 전동식 리프트 위에 조립 된다.



5) 원격 광 측정 장치(Telescope)와 마운트가 조립된다. 조립 후 LD 광원, 광파이버 결합기가 원격 광 측정 장치에 결합되며, 광 파이버를 이용해 파이버 결합기와 분광기가 연결된다.



6) 원격 센서를 제어할 컴퓨터 부착과 무선 데이터 송출기가 부착된다.



▪ 현장 설치된 원격 적조 센서



작동방법

- 구성목적 : PC를 활용하여 원격 적조 센서의 구동, 측정, 분석을 자동화 하는 프로그램을 구현한다.

▪ Measurement automation program

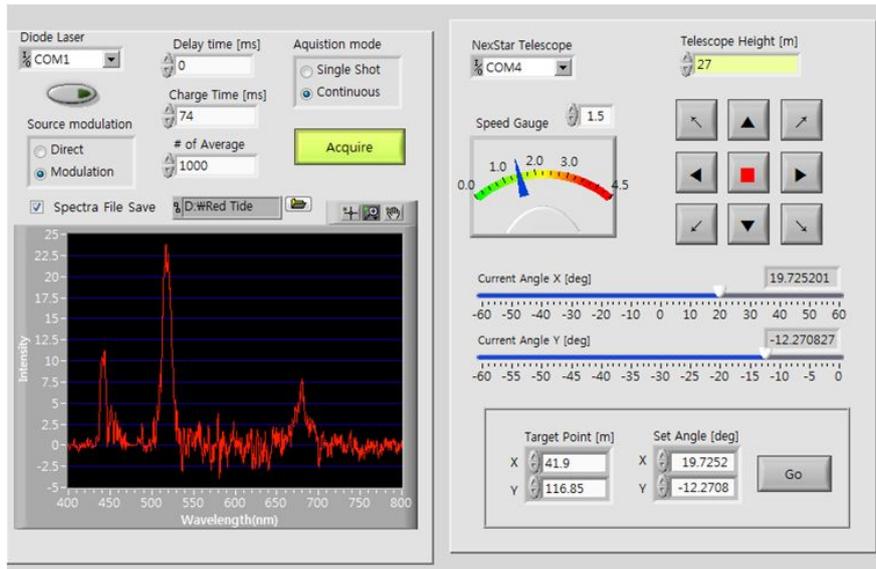
원격 적조 측정 센서 자동화 프로그램은 세 개의 main page으로 구성되어 있다

1. Spectrometer & Telescope
2. Measurements
3. Scan Control

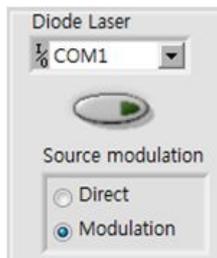
▪ Spectrometer & Telescope page

개요 : Spectrometer & Telescope page는 LD 광원 제어, 분광기 데이터 취득 제어 및 Display, Telescope 구동 제어 및 측정 위치 수치화를 포함하고 있다.

• Spectrometer & Telescope page 화면구성



1) LD 광원 제어부



- Diode Laser : PC의 serial port에 LD Driver가 연결된 port를 설정한다.

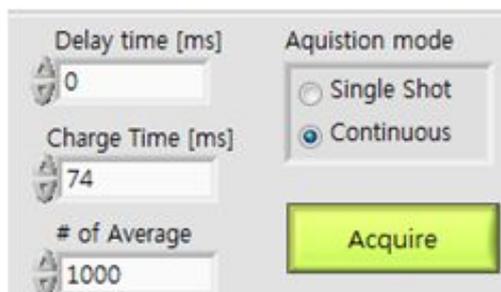
- Source modulation

LD 광원의 동작 방식을 선택한다.

Direct : 선택시 CW(Continuous Wave) LD 광원 동작 상태가 됨.

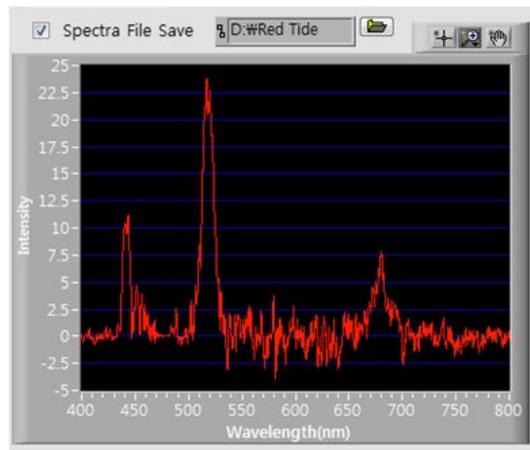
Modulation : 선택시 LD 광원은 On/Off 신호를 LD 드라이버로부터 받아 광원이 점멸 동작 상태가 됨

2) 분광기 데이터 취득 제어 (Spectrometer measurement condition)



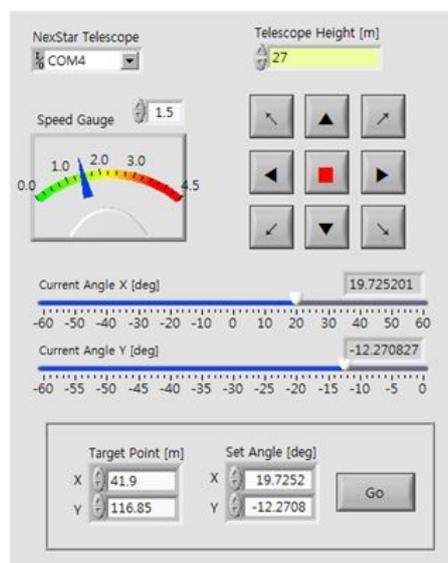
- Delay time (ms) : 레이저 on/off 제어 이후 분광기 측정 시작 사이의 지연 시간 설정
- Charge time (ms) : 분광기가 측정 광 신호를 받아 들이는 시간을 설정,
- Acquisition mode : 광 신호 데이터를 받는 모드
 - ① Single Shot : Charge time 동안 1회 측정 광 신호 데이터 취득 모드
 - ② Continuous : 반복적으로 광 신호 데이터를 취득하는 모드
- # of Average : 설정된 Charge time 동안 데이터를 취득하는 횟수를 설정하는 값으로서 설정된 횟수만큼 데이터를 취득하여 평균한다.

3) 측정 데이터 디스플레이

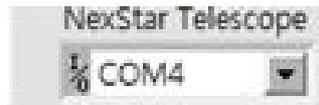


- Spectral File Save: 의 경우 측정된 데이터가 해당 경로에 저장된다.
- 측정된 데이터가 디스플레이 되며 관심 영역의 확대 축소가 가능하다.

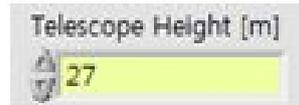
3) 원격 광 측정 장치(Telescope) 동작 제어부



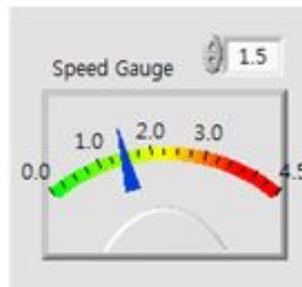
3-1) PC의 serial port에 Telescope의 전동식 마운트가 연결되는 port를 설정한다.



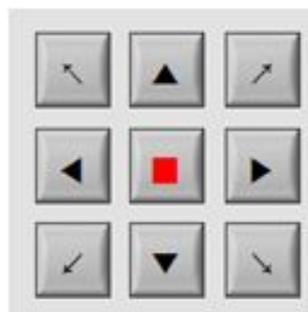
3-2) 측정 지역 자동 측정 구간을 설정하기 위해 필요로 하는 원격 센서 장치가 설치된 지점의 고도를 입력한다.



3-3) PC로 제어되는 전동식 마운트의 구동 속도를 설정하는 속도 게이지. 마우스와 키보드를 이용하여 속도 값을 설정할 수 있다.



3-4) 전동식 마운트의 구동 방향을 마우스를 이용하여 수동으로 제어한다. 구동 방향은 상, 하, 좌, 우, 대각선 방향으로 구동된다. 중앙에 위치한 버튼을 누르면 동작이 정지된다.



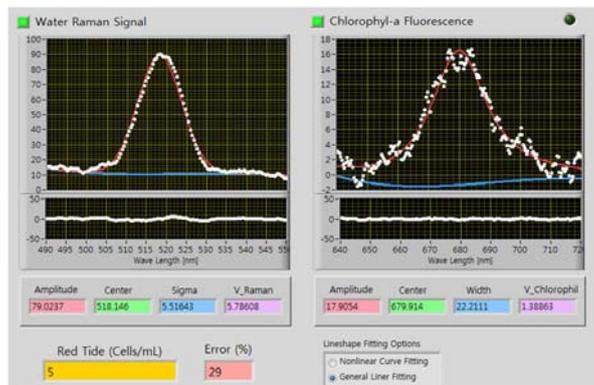
3-5) 전동식 마운트 구동 시 망원경이 설치된 위치 즉 "Telescope Height (m)"를 입력하면 망원경의 수평각과 수직각을 이용하여 측정 목표점의 위치가 계산된다. "Current Angle X (deg)", "Current Angle Y (deg)는 수평 방향 및 수직 방향의 망원경 각도이다. 각도 값을 입력하면 측정 목표점의 좌표가 계산되고 반대로 측정 목표점의 좌표를 입력하면 망원경의 각도가 자동으로 계산된다. 측정하고자 하는 지점의 좌표를 입력하고 Go 버튼을 누르면 망원경은 자동으로 측정 위치를 targeting 한다.



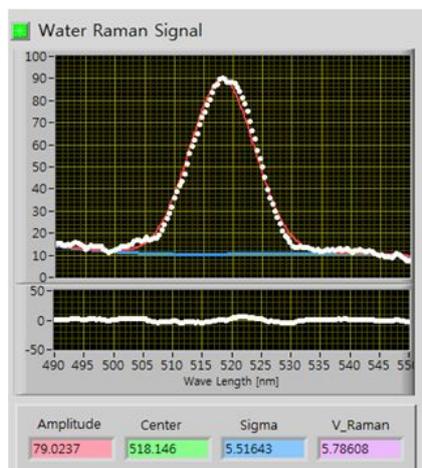
▪ **Measurements page**

개요 : Measurements page는 원격 적조 센서의 분광기에서 검출된 측정 광신호인 물의 라만 신호와 Chlorophyll 형광 신호의 디스플레이와 신호들의 분광학적 정보, 측정 신호의 baseline 보정, 측정 신호 fitting 등을 이용한 정량 분석 알고리즘을 통해 적조 농도를 산출한다.

- Measurements page의 화면구성



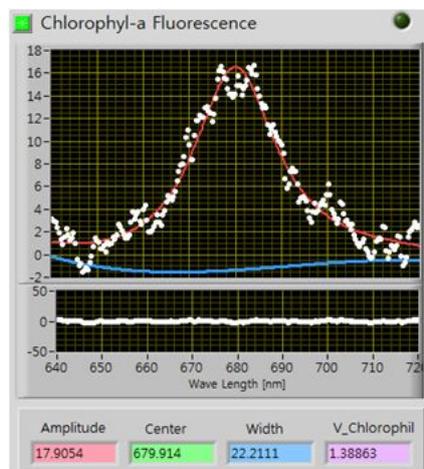
- 1) 측정 지점의 해수의 라만 신호 분석



측정 지점의 해수의 라만 신호가 측정되는 파장 영역에서의 신호 세기가 디스플레이 된다. X축은 nanometer 단위로 표시되는 파장을 나타내며, Y축은 라만 신호의 세기를 나타낸다. 화면에는 white dot, red line, blue line이 표현되며, white dot은 실험 측정치, blue line은 측정신호의 baseline 보정, red line은 shape fitting을 나타낸다.

“Amplitude” 는 측정 신호 세기 값, “Center” 는 fitting 된 신호의 중심 파장 값, “Sigma”는 가우시안 함수의 표준편차 값, “V_Raman” 은 실험치와 피팅 값의 편차의 제곱 평균 즉, 분산 값을 나타낸다.

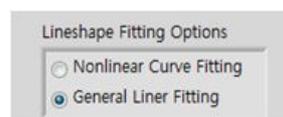
2) 측정 지점의 해수의 라만 신호 분석



측정 지점의 적조 생물에 의한 형광 신호가 측정되는 파장 영역에서의 신호 세기가 디스플레이 된다. X축은 nanometer 단위로 표시되는 파장을 나타내며, Y축은 형광 신호의 세기를 나타낸다. 화면에는 white dot, red line, blue line이 표현되며, white dot은 실험 측정치, blue line은 측정신호의 baseline 보정, red line은 shape fitting을 나타낸다.

“Amplitude” 는 측정 신호 세기 값, “Center”는 fitting 된 신호의 중심 파장 값, “Width”는 fitting 된 신호의 반치폭(Full width at Half Maximum), “V_Chlorophyll” 은 측정치와 피팅 값의 편차 제곱의 평균 즉 분산 값을 나타낸다.

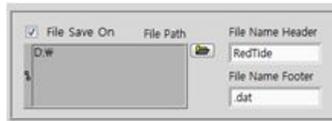
3) 측정 신호 fitting 방식을 설정



측정 신호의 fitting 방식으로 “Nonlinear Curve Fitting”와 “General Linear Fitting” 방식을 선택 할 수 있으며, 선택 방식에 따라 측정 현장 특성에 적합하도록 분석 측정 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

- “Start Scan” 버튼을 누르면 좌표화된 지점들을 순서대로 targeting 하면서 적조 농도 측정을 시작한다.
- “Run Regularly“ 가 체크되어 있는 경우 입력된 time interval 값을 주기로 스캔 측정을 반복한다.

4) 측정 지점 적조 농도의 저장



- “File Save On” 이 체크되어 있는 경우 [측정 시각], [측정 지점의 망원경 좌표 값], [농도], 그리고 [불확도] 값이 지정된 경로에 저장된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1절 연구개발결과의 활용방안

가. 활용분야 및 방안

- (1) 적조 다발 해역의 해안 고정식 상시 감시 시스템 (조기 경보)
- (2) 선박에 탑재하여 적조 방재 지원 및 재해 지역 사후 관리
- (3) 이동식(휴대용) 장비로 개발될 경우 양식장 주변 등 영어 현장의 환경 관리에 활용

나. 기업화 방안

- (1) 적정 수준의 원격 측정 거리와 조기 경보 기능이 검증될 경우 다양한 플랫폼으로 개발하여 민간, 지자체 의뢰에 의한 해양 환경 조사 등에 서비스
- (2) 개발된 기술은 적조 다발 국가 등에 상품화하여 수출 가능
- (3) 국내 광산업 관련 기업, 해양 관련 기업에 기술이전 가능

다. 추가 연구

- (1) 초소형 레이저 광원 기술 등과 결합할 경우 개인 휴대 센서로 개발
- (2) 적조의 유·무해 종구분 기능 탑재를 위한 추가 연구
- (3) 수질 및 대기환경 측정 장비로써 다양한 용도의 현장센서 개발

※ 적조예보 관련 기관 활용 방안

- 국내 적조 발생 예찰 및 예보 발령, 통보는 국립수산과학원 적조 상황실(국립수산과학원 수산연구소, 사산사무소, 해양경찰청 등 유관기관 합동)에서 담당하고 있음.
- 선박, 육상, 항공 감시를 통해서 수행되고 있으며 육안 및 시료 채취를 통한 실험실 분석 방법을 통해서 종과 개체 수 정보를 제공하고 있음.
- 본 과제에서 개발하고자 하는 기술은 실시간 정량 모니터링은 물론 높은 감도를 통해 조기 예보를 가능하게 하므로 적조예보 관련 기관에서 선박, 육상, 항공 감시에 사용하여 적조 피해를 획기적으로 줄일 수 있음.
- 적조예보 관련 기관에서 활용할 수 있도록 개발하고자 하는 장비는 선박 및 항공 탑재, 육상에서 고정식으로 사용이 가능하도록 안정화된 소형화 장비임. 다양한 플랫폼이 가능하도록
 - ① 소형 레이저 광원 채택
 - ② 최적의 수신밴드 설정으로 광학계 부피를 최소화하고자 함. 또한 원격 데이터 통신 기능을 추가하여 적조예보 관련 기관의 시스템에 실시간 모니터링 결과를 전송할 수 있도록 하고자 함.

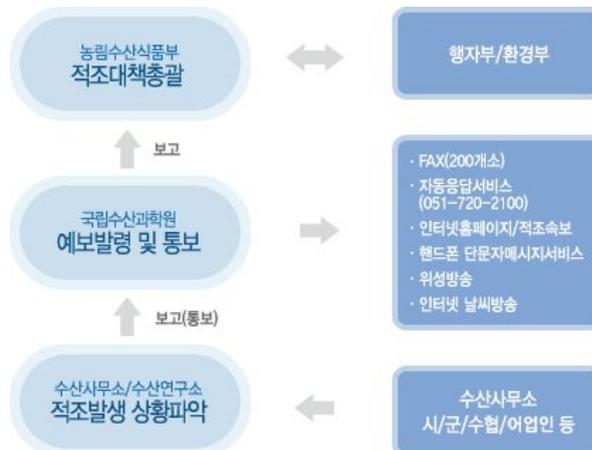
적조예찰 및 감시 체제 (출처: 국립수산과학원 적조상황실)

구분	해역	시기	담당
선박감시	전국연안, 77개 정점 이상	3 ~ 11월 (매월 1 ~ 2회)	국립수산과학원 (수산연구소)
육상감시	전국 39개 시·군 110 정점	4 ~ 10월 (매일, 평상시 주 2회)	수산사무소
항공감시	적조예보 발령해역	수시	해양경찰청 (유관기관합동)

적조예보 및 발령 기준 (출처: 국립수산과학원 적조상황실)

종류	규모	적조생물밀도
적조 주의보	반경 2~5 km 수역에 걸쳐 발생하고 어업피해가 우려될 때	편조류: 종의 세포크기와 특성에 따라 결정 Chattonella sp. 50 이상 Cochlodinium polykrikoides 300 이상 Karenia mikimotoi 1000 이상 Gyrodinium sp. 500 이상 기타 편조류 30000 이상 규조류: 50000 이상 혼합형: 편조류가 50% 이상일 때 40000 이상
적조 경보	반경 5 km 이상 수역에서 발생하여 상당한 어업피해가 예상될 때	편조류: 종의 세포크기와 특성에 따라 결정 Chattonella sp. 100 이상 Cochlodinium polykrikoides 1000 이상 Karenia mikimotoi 3000 이상 Gyrodinium sp. 2000 이상 기타 편조류 50000 이상 규조류: 100000 이상 혼합형: 편조류가 50% 이상일 때 80000 이상
적조 해제	적조가 소멸되어 어업피해 위험이 없고 수질이 정상상태로 회복되었을 때	

[적조 예보 발령 및 통보 체제 (출처: 국립수산과학원 적조상황실)]



2절 기대성과

1. 기술적 측면

가. 우리나라 해양과학기술 첨단화에 기여

- (1) 해양과학기술은 바다의 자연현상에 대한 원리 규명뿐만 아니라 바다를 활용하고 보전하는데 필요한 기술을 개발하는 융합과학기술임.
- (2) 본 과제에서 개발하고자하는 기술은 광기술과 해양과학 융합의 시발점으로 우리나라 해양과학기술을 첨단화하고 폭을 넓히는데 기여할 것임.



[다양한 해양 조사 감시 방법]

- (3) 해양환경의 감시는 다양한 접근 방법 및 기술을 종합적으로 활용하여야 함. 레이저 원격측정을 통한 적조 감시는 위성을 이용한 초광대역 감시와 소자형 센서를 이용한 point 측정의 간극을 메움으로써 보다 효과적인 EEZ 관리에 기여할 것임.

2. 경제·산업적 측면

- (1) 미국 상무성 자료에 따르면 전세계 해양 환경 조사 장비 관련 시장은 1조 8천억원 규모이며 매년 급격한 성장세를 보이고 있음.
- (2) 현재 간편한 적조 감시용 레이저원격측정 장비는 전세계적으로 상용화 개발이 되어 있지 않음. 본 과제에서 세계 최초의 상용화 장비를 개발하고자 함. 이를 통해서 관련 기술 및 시장 선점 효과가 막대할 것으로 사료됨.



[해양 환경 조사 장비 시장 규모]

3. 사회·문화적 측면

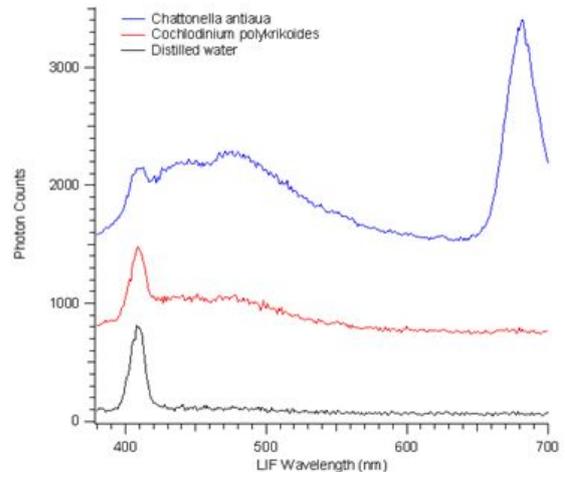
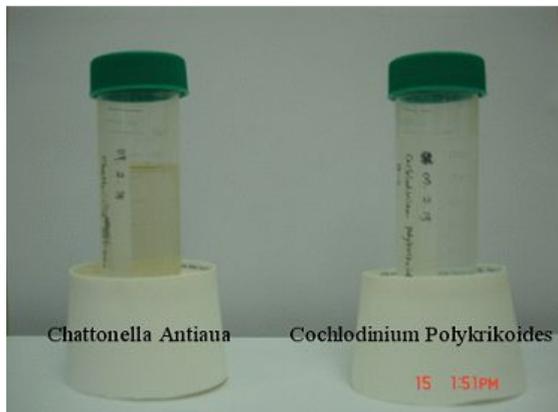
- (1) 청정한 바다는 경제·산업적 측면에서만 아니라 사회·문화적 측면에서도 막대한 자원의 보고임.
- (2) 여름철 적조 피해 예방은 관련 수산업뿐만 아니라 관광, 레저 산업의 활성화에도 기여하여 국민 복지 증진에 이바지 할 것임.
- (3) 급격한 기후변화와 지구온난화에 따른 수온상승, 집중호우 등은 바다의 부영양화를 가속화하여 향후 적조 피해는 우리나라뿐만 아니라 중국 및 동남아 국가에서도 빈발할 것으로 전망됨. 국내기술로 세계 최초로 레이저 원격 측정을 통한 적조의 조기 경보 기술을 상용화 한다면 녹색 기술 선도 국가로서 국가 이미지 제고에 기여할 것임.

3절 관련 후속연구개발의 전망

1. 초소형 레이저광원을 이용한 개인휴대용 적조 감시 센서 개발

- (1) 측정 감도의 손실없이 초소형 레이저 광원을 탑재할 경우 매우 간편한 소형 적조 감시 센서로 개발 가능.
- (2) 적조발생 감지뿐만 아니라 형광 스펙트럼의 실시간 분석을 통한 유·무해 종판별이 가능한 센서로 개발

- (3) 현재 DNA 분석을 통해서 종판별을 하고 있으나 적조생물 중에 따른 광 스펙트럼 차이를 실시간 측정 비교하여 종판별이 가능할 경우 기술적 혁신을 가져올 수 있음.



[적조생물 샤토넬라와 코클로디니움의 형광 스펙트럼 비교]

- (4) 레이저 광 및 형광기술을 이용한 다양한 센서 개발
- (가) 수질 및 대기환경 오염 감지 센서
 - (나) 미생물 공정 모니터링 센서로써 식품 및 화학공정 관련 센서개발

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

1절 연구개발 성과 및 성과 활용 계획

1. 시장진입을 위한 단계적 전략 수립

가. 1단계 전략 (특허 출원 및 등록)

본 연구과제의 핵심기술 보호와 국내시장 선점을 위해 레이저 기반 적조감시 및 모니터링 시스템을 특허 출원하고 등록할 계획

나. 2단계 전략 (인증획득 계획)

- (1) (주)동양화학은 기 개발 제품(수질 내 탁도 / 미생물 / 미립자 동시 검출 시스템)에 대한 신기술 인증 사례를 토대로 하여 본 연구과제에서 개발한 레이저 기반 적조 감시 및 모니터링 시스템의 상업화에 따른 안정적인 시장 진입과 판매 실적을 위해 환경부 또는 지식경제부에서 신기술(NET) 및 신제품(NEP) 인증을 받을 계획임.
- (2) 상용화 제품 개발 후, 국제 품질 보증 시스템의 세계화에 부응하고 기업 전반에 대한 총체적인 품질 향상을 통하여 경쟁력 우위 확보 및 고객 만족과 아울러 기업의 장기적인 성장 · 발전을 추구하기 위하여 ISO 9000 인증을 받을 계획임.
- (3) 상용화 제품에 대한 신뢰성 확보와 공공기관의 우선 구매 유도를 통하여 매출 성장과 기업 이미지 재고를 위해 개발 제품의 성능 인증 획득 계획
- (4) 본 연구과제의 상용화 제품의 주요 수요처인 공공기관(수자원공사, 국토관리청, 해양관리공단 등)의 수의 계약 및 제 3자 단가 계약을 통한 기업 매출 신장을 위해 조달청 우수제품 인증 계획

다. 3단계 전략 (해외시장 진출 기반 마련)

- (1) 해외시장에서 (주)동양화학의 기술 보호와 향후 중국 시장 진출의 초석을 마련하기 위한 PCT 출원과 중국 시장 진출을 위해 필수적인 국가지식산업권국(SIPO)의 특허 출원 및 등록 계획
- (2) 해외 시장 중 가장 큰 시장으로 추정되는 중국 시장에 진출하기 위한 CCC 인증 획득 계획
※ China Compulsory Certification: 중국내에서 생산 및 유통되는 제품에 대해 품질 인증을 받도록 하는 제도로 중국질량인증중심국(中國質量認證中心國, CQC)에서 인증 발급]

2. 외부 네트워크 활용 방안

가. 상용화 제품 개발 추진

- (1) 상용화 과정에서 시제품의 성능 테스트 및 개선을 수행하기 위해 적조 전문 연구인력이 필요하므로 국립수산물품질관리원 등을 적극 활용하여 적조 미생물 배양 및 동정 기술을 자문할 계획
- (2) 레이저 기반 원격 적조 감시 및 모니터링 시스템의 핵심 부품인 PCB 기판 등의 생산은 광주에 위치한 한국광기술원 시험 생산동을 활용하여 생산할 계획

나. 사업화 전략 추진

- (1) 사업화 과정에서 빈번하게 발생하는 특허 분쟁 및 소송에 대비하기 위하여 청명 국제 특허 사무소와 GO 국제 특허 법률 사무소의 대표 변리사를 통한 법률 자문, 기술 보호에 대한 조언 및 교육 의뢰
- (2) 상용화 제품에 대한 시장 조사 및 산업 동향과 잠재 수요 고객에 대한 니즈 조사를 전문 리서치 기관인 리서치 앤 아이에 의뢰하여 고객 만족도가 높은 독창적인 제품을 개발하고, 소비자 만족도를 조사하여 향후 제품에 대한 개선점을 도출할 계획
- (3) (주)동양화학은 엔코어 경영 컨설팅의 옥경림 대표위원에게 사업화에 대한 전반적인 지도를 받을 계획임.
- (4) 시장, 환경 및 고객만족도 분석을 통한 전략 수립
 - (가) 고객 만족 지향 마케팅 전략 개발
 - (나) 시장 세분화 및 제품 차별화 전략 수립
 - (다) 효율적인 제품 기획 및 신제품 개발 프로세스 구축
- (5) 산업분석, 정책평가 및 분석을 통한 경영전략 지원
 - (가) 중장기 전략 및 사업계획 수립
 - (나) 신규 사업 계획 수립 및 사업성 검토

3. 개발 분야 인력 충원

가. 광학 분석 및 센서 개발을 갖춘 전담연구원 채용(2인, 석사이상)

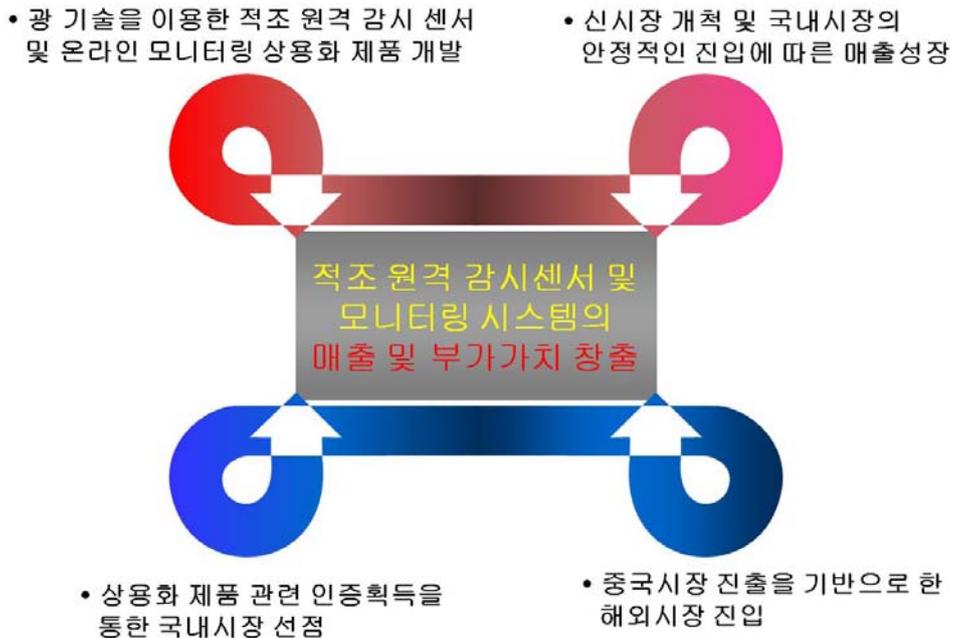
나. 센서 모니터링 개발 기술을 갖춘 전담 연구원 채용(1인, 학사이상)

다. 연구 개발 수행 유경험자 (1인, 박사이상 책임급)

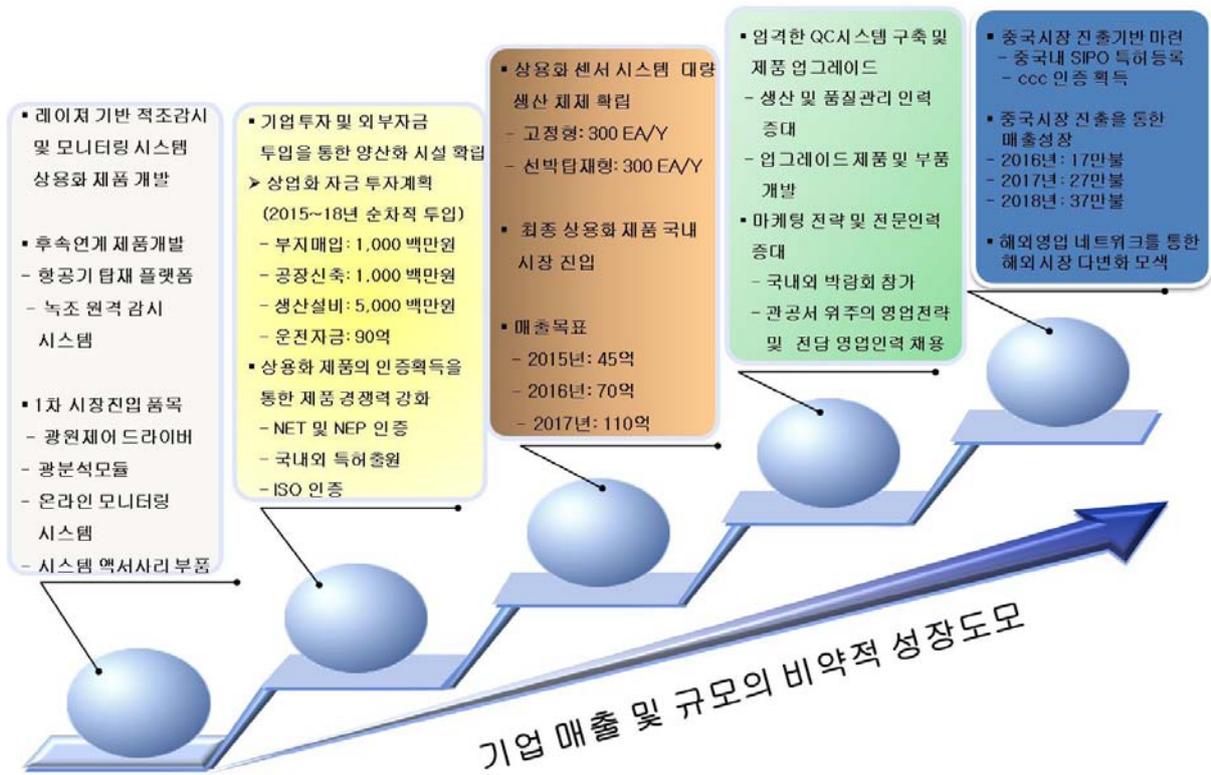
4. 마케팅 계획

구분	추진계획
국내외 박람회 참가	시제품 개발과 양산화 체계 구축 시점에 국내외 박람회와 전시회 등에 참가하여 당사 제품의 기술적 우월성과 진보성을 홍보
기업 영업력을 통한 제품 판매 및 홍보	기확보된 당사의 광계측 및 모니터링 분야의 영업력을 바탕으로 정부기관, 공기업, 민간기업등에 제품을 판매
제품 홍보물 제작	제품의 전자 카달로그 및 인터넷 홈페이지를 통한 제품 홍보
국내시장 판매 강화	각종 인증 및 지원 정책을 활용하여 수자원 공사/ 지역자치 단체 등의 정부기관과 수의 계약 및 우선 구매 계약을 체결하여 제품의 판로 확보
국책연구소 및 대학을 대상으로 제품 홍보	제품의 직접적인 판매 및 홍보외에 수질환경 관련 학회에 참석하여 홍보를 통한 기술력 검증
해외 진출	주요 수출국으로 예상되는 중국 시장 진출을 위하여 중국내 수질 환경관련 학회 및 박람회에 참가하여 제품 홍보
	중국 진출을 위해 계획한 특허 및 인증을 통해 중국 환경 관리청 및 중국환경보호산업협회 등 국가기관에 제품 홍보 및 판매계획

5. 사업화 계획

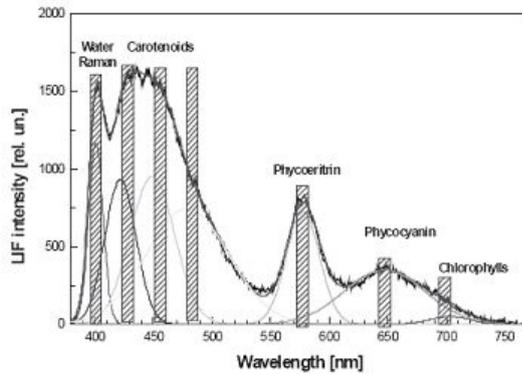


6. 사업화 추진 기본 전략



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

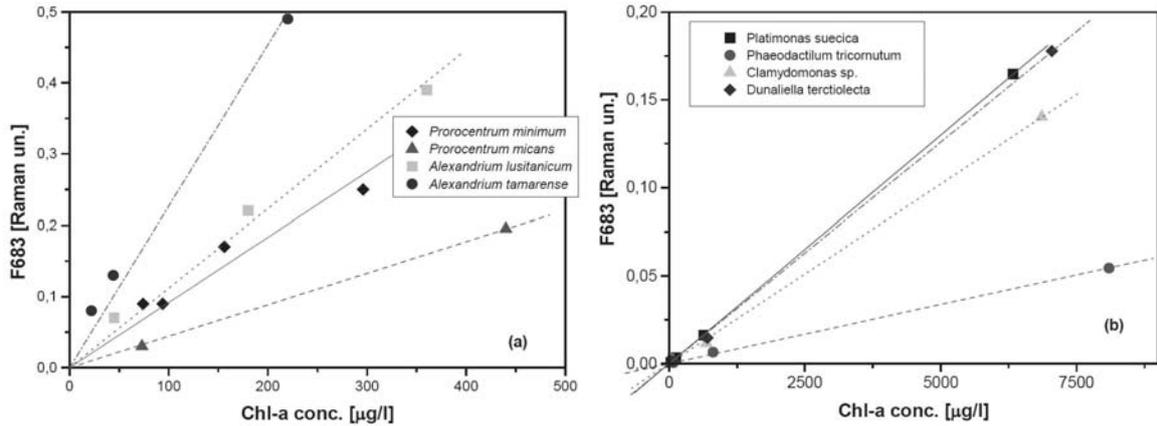
1. 우리나라 적조 유발 생물 종에 대한 분광 특성 연구를 통한 수신 채널 설정
 - 가. 적조는 종에 따라 클로로필을 비롯하여 포함하고 있는 색소의 종류와 양이 다르나, 장비 개발에 앞서 적조 종에 따른 형광 특성 연구를 통해 최적 수신 채널 설정
2. 해수 라만 산란 밴드 동시 측정 및 정량화 기술 개발
 - 가. 355 nm 파장의 레이저를 해수에 조사하면 ~ 405 nm에서 라만 산란 현상이 발생함. 형광, 라만 등 광학적 방법을 통해서 해수내에 다양한 물질들의 농도를 측정하고자 할 때, 해수의 라만 산란 밴드는 매우 좋은 농도 정량화 기준(reference)으로 활용할 수 있음.



[해수 라만 산란 밴드와 적조 생물의 색소에 의한 형광 스펙트럼 [1]]

- 나. 현장 적조 생물을 레이저유도 형광법으로 정량 측정하기 위해서는 생물 종에 따른 cell 당 chlorophyll-a 색소의 양에 대한 정보가 필요함. 다음 표는 현장 적조 생물의 종류별 정량을 위한 cell당 chlorophyll-a 색소의 양을 보여줌

Algae	Cells conc. [cell/ml]	Chl-a [$\mu\text{g/l}$]	Chl-a [$\mu\text{g/cell}$]
Dianoflagellates			
Prorocentrum minimum	6×10^4	296	4.9×10^{-6}
Prorocentrum micans	3×10^4	440	1.5×10^{-5}
Alexandrium lusitanicum	5×10^4	360	7.2×10^{-6}
Alexandrium tamarense	3×10^4	220	7.3×10^{-6}
Chlorophyceae & Bacillariophyceae			
Platimonas suecica	84×10^4	6333	7.5×10^{-6}
Dunaliella tertiolecta	72×10^4	7044	9.8×10^{-6}
Clamdomonas sp.	70×10^4	6860	9.8×10^{-6}
Pheodactylum tricornutum	82×10^4	8110	9.9×10^{-6}
Nitzschia closterium	$< 10^4$	2757	$> 2.8 \times 10^{-4}$
Nitzschia delicatissima	60×10^4	3530	5.9×10^{-6}
Fragilaria sp.	$< 10^4$	4524	$> 4.5 \times 10^{-4}$



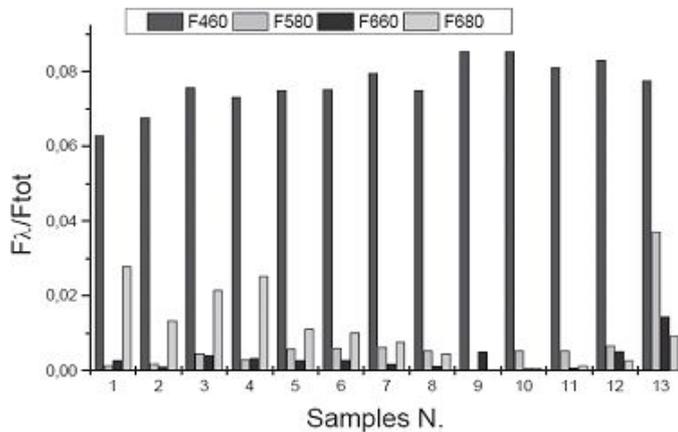
위의 종류별 정량 자료를 이용한 정량화 곡선 산출 예 [1].

3. 적조의 실시간 원격 종구분 기술 개발

가. 적조 생물 종에 따른 색소 형광 밴드의 상대적 세기 차이를 이용한 종 구분 기술 개발

(1) 종에 따라 Carotenoid(460 nm), Phycoeritrin(580 nm), Phycocyanin(660 nm), Chlorophyll(680 nm) 형광 밴드의 상대적 세기가 달라짐. 종에 따른 형광 특성은 다음과 같음.

- (가) Dinophyceae (아래 그래프의 No.1~4) : 680nm 형광이 강함.
- (나) Chlorophyceae (아래 그래프의 No.5~7) : 580nm, 680nm 형광이 비슷한 세기로 강함.
- (다) Bacillaroiphyceae (아래 그래프의 No.8~11) : 460nm 형광이 강하고, 상대적으로 580 · 660 · 680 nm 형광은 약함.
- (라) Cyanobacteria (아래 그래프의 No.12~13) : 580nm 형광이 660 · 680nm 형광보다 강함.



[적조 생물 종에 따른 형광 밴드의 상대적 세기 [1]]

나. 적조 생물 분류를 위한 기준 마련

(1) 효율적 적조 발생의 조기 예보 및 예방을 위해서는 적조 생물 분류를 위한 기준 마련이 요구됨.

레이저 유도 형광 측정 기술을 활용하여 이와 같은 목표를 달성하기 위한 적조생물 분류 기준은 ① 적조 생물의 광학적 특성 ② 유·무해성 2가지로 사료됨.

다음 표는 우리나라의 적조 생물 종의 광학적 특성을 요약한 것임.

또한, 우리나라에서 매년 적조 피해를 일으키는 대표적인 유해 적조 생물은 *chattonella globosa*, *chattonella antiqua*, *cochlodinium polykrikoides* 3종으로 알려져 있음.

적조 생물의 종별 광학적 특성(자료: 해양연구소)

Species	광학적 특징		
	외형적 색깔	흡광도 스펙트럼 특징 파장대	역산란 스펙트럼
Diophyceae(와편모조)			
<i>Alexandrium catenella</i>	Yellowish brown	-	장파장 쪽으로 감소
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	"	400nm 흡수 증가	평탄-감소
<i>Gymnodinium catenatum</i>	"	400nm 흡수 증가	파장감소, 굴곡
<i>Gymnodinium sanguineum</i>	"	400nm 흡수 증가	파장감소
<i>Gyrodinium sp.</i>	"	-	파장 크게 감소
<i>Gyrodinium aureolum</i>	"	575, 625nm	파장감소, 굴곡
<i>Gyrodinium impudicum</i>	Brown	400nm 흡수 증가	파장감소
<i>Heterocapsa triquetra</i>	Yellowish brown	460nm, 500nm	550nm hump
<i>Katodinium rotundatum</i>	"	-	
<i>Prorocentrum minimum*</i>	"	460-470nm, 490nm	550nm hump
<i>Prorocentrum micans</i>	Brown	525nm	550nm hump
<i>Prorocentrum dentatum</i>	Yellowish brown	525nm	
<i>Prorocentrum triestium*</i>	"	470, 490, 525nm	파장감소, 굴곡 550nm hump
<i>Serippsiella trochoidea*</i>	Red	450-550nm	파장감소, 굴곡 550nm hump
Raphidopeaceae(침편모조)			
<i>Chattonella sp.</i>	Golden brown	-	장파장 쪽으로 감소
Chlorophyceae(녹조)			
<i>Chlamydomonas sp.*</i>	Green	450-500nm, 650nm	550nm hump
<i>Chlorella ellipsoidea *</i>	"	450-500nm	550nm hump
<i>Chlorella schroeteri *</i>	"	450-500nm, 650nm	550nm hump
Euglophyceae(유글레나조)			
<i>Eurptiella gymnastica</i>	Green	450-500nm, 650nm	파장감소
Haptophyceae(착편모조)			
<i>Isocrysis galbana*</i>	Brown	440-460nm, 490nm, 635nm	550nm hump
Bacillariophyceae(규조류)			
<i>Coscinodiscus sp.</i>	Yellowish brown	400nm 흡수 증가	파장감소
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	"	480-490nm, 630nm	550nm 약 hump

* : 흡광 스펙트럼 모양의 특징이 타종과 분명하게 구별되는 종

제 7 장 참고문헌

- [1] Palucci, Optical and Morphological Characterization of Selected Phytoplanktonic Communities, Applications for Remote Sensing, NATO Science Series II; Mathematics, Physics and Chemistry, v238, 165-192, Springer, Netherlands, 2007)
- [2] R. Barbini et al., Int. J. Remote Sensing, 24, 3191-3024 (2003)

최종보고서의 수정, 보완 사항 (보완사항: 향후 적용될 녹조측정시스템에 적용될 개발기술의 구체적인 내용을 추가할 것.)

1. 연구개발의 필요성

1970년대 산업화 이후 배출 오염원의 증가로 인하여 국내의 많은 호수와 하천들이 오염되었고 조류의 대량발생 등의 부영양화현상도 빈번히 발생하여 큰 사회 문제가 되고 있다. 최근 상수원으로 이용되는 몇몇 호수에서의 남조류의 대량 발생으로 인하여 이취미 문제, 독소 문제 등의 정수상의 문제가 발생하고 있는 실정이다.



그림 1. 하천에서 빈번히 발생하는 녹조현상

녹조 현상은 하천과 호소 등에서 수온이 상승하고 물의 흐름이 완만해지면서 수중의 녹조 또는 남조류가 대량으로 증식하여 수체가 녹색 또는 남색을 띠는 현상으로 녹조 발생시 다음과 같은 악영향이 발생할 수 있다.

- 가. 시각적 영향 : 착색 또는 스컴 형성, 죽은 물고기 등으로 인한 시각적인 불쾌감 유발 및 레크리에이션활동의 저해
- 나. 공중위생상의 문제점 : 남조류 독소에 의한 인체 및 가축에의 건강상의 손상, 이취미 발생으로 인한 불쾌감 유발
- 다. 생태학적인 영향 : 생태계 파괴로 인한 토종 동물의 사멸 또는 서식처 이동, 개체군변화, 먹이 손실
- 라. 경제적인 손실 : 레크리에이션 활동 및 여행의 저해로 인한 지역 경제적 손실, 농업용수, 산업용수 부족으로 인한 경제적 손실
- 마. 동물건강에 미치는 영향 : 조류 독소에 의한 가축이나 야생동물의 폐사, 대량 증식으로 인한 조류의 분해동안 수중 용존산소 감소로 인한 물고기 및 수중생물의 폐사
- 바. 상수원에 미치는 영향 : 남조류 독소 발생, 이취미 생성, 상수처리과정중 여과지 폐쇄, 응집 침전저해, 과다염소처리로 인한 THM 생성

위와 같이 수계에 많은 악영향을 미치는 조류는 탄소동화작용을 하는 단순한 단세포, 다세포성 미생물로서 남조류, 녹조류, 규조류 등으로 구분되어진다. 남조류는 부영양화된 수역에서 우점

하는 조류로 질소 고정능을 가지며, 불리한 환경에서 내구성이 강한 휴면포자를 형성하여 건디다가 환경이 좋아지면 발아하여 재증식하며, 높은 수온과 pH에 대한 적응성이 강하기 때문에 여름철 대량 증식이 일어날 수 있다. 그리고 녹조류는 계절적으로는 늦봄부터 초가을에 걸쳐 증식하며 상수도 시설에서는 침전지나 완속여과지의 여과막을 형성하며 급격히 증식하면 물에 냄새를 나게 하며 여과지를 폐쇄시키는 경우가 있다. 규조류는 클로로필-a와 b 외에 규조소, 크산토펴 등의 색소를 포함하고 해수로부터 담수, 토양속 등 도처에 생식하고 부유성·부착성인 것이 있으며 부유성인 것은 호소 등에서 초봄에 대증식을 일으켜 정수처리에 영향을 준다. 과다할 경우 응집·침전을 방해하고, 여과지를 막히게 한다.

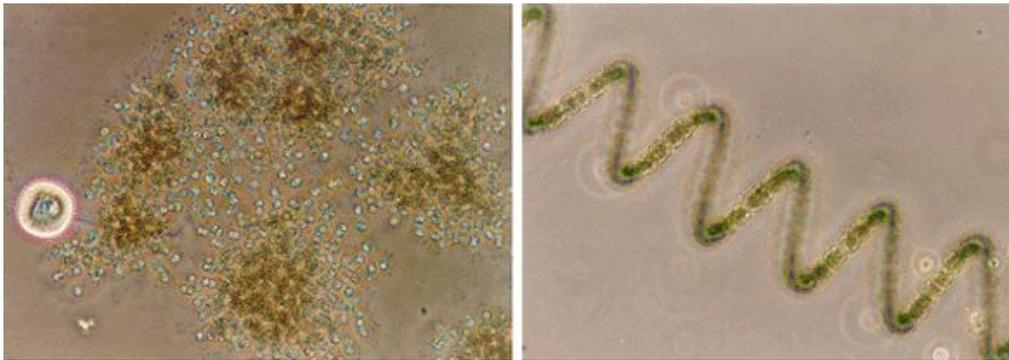


그림 2. 남조류(좌 : *Microcystis aeruginosa*, 우 : *Anabaena spiroides*)



그림 3. 녹조류 미생물(*closterium algae*)

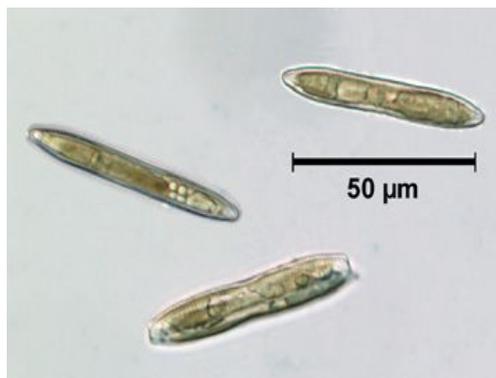


그림 4. 규조류 미생물(*synedra algae*)

국내외 녹조발생 현황 및 사례를 살펴보면 1970년대 이후 국내 전역의 하천이나 호수에서 광범위하게 발생하고 있는 실정이다. 특히 수온이 상승하는 늦봄에서 여름까지 집중적으로 발생하고 있으며 *Synedra*, *Asterionella* 등 일부 규조류에 의해 수온이 낮은 겨울에도 빈번히 발생하고 있다. 예를 들어 경상북도에 소재한 영천댐에서는 05년 연중 86일, 06년도 100일, 07년도에는 연간 139일 동안 녹조경보가 발생하였다. 또한 충청북도 대청댐, 용담댐 등에서도 연간 60일 이상 녹조경보가 발령된 것으로 보고되고 있다. 더욱이 남조류 중 *microcystis*는 대량 번식하여 녹조현상을 발생시키며 이와 동시에 독성물질인 microcystin을 생산하는데 이러한 유독물질은 고등생물에 치명적인 영향을 준다. 국내에서는 아직 남조류 독성물질에 의한 동물이나 인간의 피해가 보고되지는 않지만 국외에서는 빈번히 발생하고 있다. 일본에서는 *microcystis*의 세포가 분해될 때 수체내 용존산소를 소비하여 어류가 폐사한 예가 수와호와 카수미가우라호에서 발견되었으며 남아프리카공화국의 Vaal댐 인근에서는 microcystin에 의해 소가 대량 폐사하였으며 미국 오클라호마에서는 소 4두, 돼지 18두, 거위 17마리가 폐사하였다. 동물 뿐만 아니라 인체의 피해사례도 국외에서 빈번히 보고되어 있다. 영국 Staffordshire에서는 저수지에서 수영을 하여 *microcystis*와 접촉한 2명이 폐렴증상을 나타냈으며 호주 남부의 Alexandrina 호수와 Meadows 호수에서는 성인 5명과 어린이 3명이 microcystin에 감염되어 피부발진, 염증성 충혈등의 증상을 호소하였다.

▷ 연도별 조류경보 발령현황(출처: 수자원공사, 다목적 댐 녹조 발생 사례)

구 분	댐 명	'04년	'05년	'06년	'07년	'08년
조류경보 발령일수 (일)	대청댐	14	67	78	14	15
	주암댐	15	-	-	18	-
	영천댐	40	86	100	139	37
	용담댐	-	80	39	-	-
	남강댐	-	17	-	-	15
	안계댐	-	53	43	-	-
	계	69	303	260	171	67

최근에는 4대강 유역 개발로 인해 하천 수심이 깊어짐에 따라 유속이 느려지고 보건설로 습지와 모래톱의 유실과 보건설로 인해 물의 체류시간이 증가함에 따라 녹조발생 빈도가 공사 이전 대비 11배 이상 증가하였다(부스엔 뉴스, 2012. 03. 26 보도자료). 또한 발생장소도 한강의 이포보, 강천보, 금강의 금남보, 부여보 및 낙동강의 구비보, 칠곡보 등 6개보 그리고 지역인근 영산강의 죽산보와 승천보까지 4대강 전역에 걸쳐 발생하고 있다.



그림5. 4대 강개발 유역 녹조발생 현황

2. 연구개발 기술동향

가. 녹조감시 기술관련

- (1) 초기 녹조감시 방법은 조사관이 녹조발생지역에 나가 육안으로 관찰하거나 채수하여 광학현미경으로 녹조발생 유무를 판단하는 방법을 사용하나 이러한 방식은 정량분석이 불가능하고 상시 모니터링이 불가능하다는 단점이 있음
- (2) 최근에는 수중에 존재하는 클로로필-a에서 발생하는 형광량을 측정하여 수중 조류의 존재를 정량적으로 측정하는 방식을 사용하고 있으나 이러한 방식은 녹조발생 지역에서 측정대상 시료를 별도로 채수하여 측정하므로 실시간 온라인 모니터링(real-time on-line monitoring)이 불가능
- (3) 한국생명공학연구원에서는 수중에서 녹조를 일으키는 남조류를 미생물의 특정 DNA 염기 서열을 이용하여 미생물의 독성물질 분해 또는 저항성 유전자의 활성화 정도를 측정함으로써 오염여부 판단하는 기술개발

나. 레이저 원격측정 기술관련

- (1) 레이저 원격 측정 기술은 주로 국외에서 해양생태계 관리, 재해예방 등을 목적으로 국가 주도하에 대학, 국가 연구소와 민간기업이 공동으로 참여하는 방식으로 미국, EU, 중국, 일본을 중심으로 활발하게 개발 및 적용되고 있음
- (2) 미국(NASA), 이탈리아(ENEA, 국립에너지환경연구소)에서는 1990년대 말부터 레이저

유도형광법과 레이저 원격 측정 기술을 결합하여 해양식물성 플라크톤의 농도와 분포를 측정하는 기술을 개발하여 극지 해양의 생태연구와 미국 플로리다 연안의 환경 감시에 활용하고 있음

(3) 국내에서는 출연연과 대학연구자들에 의해 주로 대기 환경 분야에 대한 연구개발 및 현장에서의 측정이 활발하게 진행되고 있음

(4) 기상청에서는 오존, 황사관측용 라이다를 운용하고 있음

(5) 최근 급격한 기후 변화 및 지구온난화로 인해 국내에서도 기상 및 대기환경 분야를 중심으로 레이저 원격 측정 기술 개발의 중요성에 대한 인식이 증가하고 있음

3. 개발예정 기술 적용분야

가. 본 연구과제에서의 상용화 제품은 호소나 댐의 광대역 녹조 발생 모니터링에 사용하거나 제진 시스템을 개발함으로써 선박에 탑재하여 이동형 녹조 감시 및 모니터링 시스템으로 적용가능

나. 녹조 감시 및 모니터링 시스템은 녹조뿐만 아니라 클로로필-a 형광측정 방식을 사용하기 때문에 담수의 적조 감시 및 모니터링 시스템으로 활용가능

다. 상용화 제품을 이용하여 측정한 녹조 정량 분석 데이터는 국내의 호수나 강유역의 부영양화 연구에 활용가능

라. 본 연구 상용화 제품의 원격 모니터링 기술은 수질측정 데이터의 원격 전송 분야에 적용 가능

마. 향후 추가 연구를 통하여 해수의 적조 감시 및 모니터링 시스템으로 활용 가능

주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 수산실용화기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 수산실용화기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.