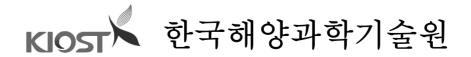
제주 양식산업 밀집 연안의 배출수에 의한 오염부하 저감 기술 개발

2019. 02. 27.



제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 "제주 양식산업 밀집 연안의 배출수에 의한 오염부하 저감 기술 개발" 과 제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 02. 27.

총괄연구책임자 : 손영백

참 여 연 구 원: 강도형, 오철홍, 이태희, 김미나, 박광섭

허성표, 양현성, 김태호, 현지연, 권순열

보고서 요약

보고서번호	I	3SPE99614-119	46-4	연구기간		18. 01. 01 ~ 2018. 12. 31
연구사업명			창의연구과제			
연구과제명	제주 양식산인	법 밀집 연안의	배출수에 의한 오	염부하 저김	· 기술	개발
연구책임자	손영백	참여 연구원수	총 : 11명 내부 : 3명 외부 : 8명	해당단계 연구비	정부: 기업: 계	천원
연구기관명 및 소속부서명		과학기술원 연구센터	참여기업명			
위탁연구	연구기관명:		연구책	임자 :		
	요	약		보고서면	수	128

본 연구는 제주 연안에 밀집되어 있는 육상양식장에서 주위 연안으로 배출되는 배출수의 오염 부하 저감을 통한 효율적 물관리를 위하여 제주도 육상양식장 밀집 지역을 선정하여 연 안으로 유입되는 배출수 거동 및 확산 범위를 평가하고, 해조류 배양을 통하여 주요 오염 인 자들에 대한 저감 연구를 수행하여, 침전·복합배양 시스템 내에서 실증 실험을 통하여 연안 으로 유입되는 배출수의 오염 부하를 저감할 수 있는 방안을 마련하는 것을 목적으로 하고 있다. 연구는 총 3차년으로 구성되어 있는데, 1차년은 양식장 배출수 현황 파악 및 해조류 정 화능력 측정이고, 2차년은 양식장 침전조 내 해양생물 복합배양 시스템 구축이고, 3차년은 친 환경 복합 배양 시스템을 통한 배출수 확산 범위 및 오염 저감 평가를 목적으로 하고 있으면 본 연구는 이 중에서 1차년 연구 결과를 보고서로 작성했다. 연구내용은 크게 두 가지로 요 약이 된다. 첫째, 제주 육상 양식장에서 배출되는 배출수의 영향에 대한 범위를 산정하고, 둘 째, 해조류 배양시스템 구축을 통한 오염인자 저감 기술을 개발하는 것이다. 양식장 배출수 영향 범위 산정을 위해서 기존의 관측망을 이용하여 관측된 자료 수집하고 분석하여 양식장 범위 밖의 해양환경을 분석한다. 그리고 양식장 밀집지역에서 배출되는 배출수의 이동 거리 및 범위 산정을 위해 양식장 배출수 해역에서 수괴 관측을 위해 CTD을 이용하여 매 시간마 다 수온 및 염분 특성을 관측하였고, 해수 샘플을 채집하여 영양염, 클로로필, 부유물질 등을 분석하였다. 고해상도 위성 및 표류부이 관측을 통하여 해류 이동을 파악했다. 배출수 확산 범위 산출은 수괴 특성을 분석한 자료와 영양염 분포 특성을 고려하여 영향 범위를 산정하였 다. 해조류 배양시스템 구축을 통한 오염인자 저감 기술 개발을 위해서 양식장 주변 해역에 서 해조류 분포를 조사하였고 양식장 주변에 분포하는 해조류를 실험실 수조 내에서 배양 실 험을 수행했다. 배양된 해조류는 영양염 흡수능 측정을 실시하여 해조류별 영양염 흡수능을 조사했다.

با دا دا	한글	제주 육상 양식장, 배출수, 연안오염저감
색인어	영어	Jeju land fish farm, Discharge Water, Reduction coastal pollution

요 약 문

I. 제 목

제주 양식산업 밀집 연안의 배출수에 의한 오염부하 저감 기술 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

- 1. 연구개발의 목적
 - 제주도 육상양식장 배출수의 연안해역 오염 부하 저감을 위한 생물학적 수리학적 기술 개발
- 2. 연구개발의 필요성
 - 제주도 육상 양식장 배출에 대한 지속적인 모니터링 연구 필요
 - 제주 육상 양식장 양식어류의 높은 폐사율은 양식업 종사자의 비용 부담뿐만 아니라 제주 지역의 사회적 비용 증가를 야기 시킴
 - 양식장 배출수로 인한 부영양화 등 연안오염은 연안의 녹조류 대번성 등을 야기할 수 있고, 이는 연안어업 피해 및 관광산업에도 영향을 줄 수도 있는 심각한 사안임
 - 양식장 배출수 처리 기술 개발로 연안오염 및 폐사율 저감 방안을 마련 연구는 지역의 현안문제를 해결하기 위해 필요함
 - 다중플랫폼을 이용하여 제주도 주변 해역을 모니터링하고 분석하는 환경분석기술 개발은 녹색성장관련 신산업 발전에 기여
 - 어장정보, 수산업 등 유관산업에 과학적 기초 자료 제공을 통한 발전에 기여

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

- 1. 연구기간
- 2018년 01월 01일 2018년 12월 31일
- 2. 연구개발의 내용
- 제주 육상 양식장 유입/배출수 분석
 - 대상 양식장 선정, 제주 육상 양식장 유입/배출수량 파악
 - 양식장 배출수 분석(수온, 염분, 영양염, 클로로필 등)
 - 양식장 배출수 거동 분석(물리/화학적 분석). 표류부이 추적

- 양식장 배출수 거동 파악
- 해조류 배양 및 영양염 흡수능력 분석
 - 해조류 배양시스템 구축
 - 양식장 주변 해역 분포종 배양
 - 해조류 영양염 흡수능력 분석
- 해조류 무기영양염 흡수율 분석
 - 배양 해조류 내 탄소, 질소 함량 분석
- 양식장 배출수 주변해역 미생물 다양성 분석
 - 양식장 주변해역 구간별 해수 채집
 - 메타게놈을 이용한 미생물 다양성 및 잠재적 어류 병원성 미생물 분석

Ⅳ. 연구개발 결과

- 연구해역은 제주도 서귀포시 표선읍에 위치한 육상 양식장을 선정하고 양식장 및 주변해역에 대해서 지속적인 모니터링을 실시하였다. 계절조사는 총 6회(3월, 4월, 6월, 7월, 8월, 9월)를 실시하였다. 연구해역의 조위 변화는 0cm에서 300cm까지 변화를 보였다. 조위 변화에 따른 해류 유동을 관측하기 위해 수행된 표류부위 추적 결과에서 해류는 조위 상승 시에는 북동방향에서 남서 방향으로 이동했다. 조위 하강 시에는 남서방향에서 북동 방향으로 이동을 보였다. 해류는 해안선에 평행하게 움직임을 보였고, 연안보다는 상대적으로 수심이 깊은 곳에서 강한 흐름을 나타냈다.
- 양식장 및 연안의 월별 염분 변화에서 양식장의 영향이 없는 지역은 3월에 34 psu 고염에서 8월에 28 psu까지 감소하였다. 그러나 연구 대상 양식장의 경우 3월에 28 psu에서 8월에 24 psu 까지 감소했다. 3월의 수온은 양식장이나 양식장 영향이 없는 해역에서 모두 16-18°C 일정한 변화를 보였지만, 8월의 경우 양식장과 양식장 배출수에서는 20-24°C 변화를 보였고, 양식장 영향이 없는 해역에서는 ~28°C를 나타냈다. 이런 결과는 양식장은 해수와 지하수를 혼합하여 사용하기 때문이다. 봄철에는 해수의 수온이 낮기 때문에 지하수 혼합이 비율이 낮고, 하계에는 수온이 상승하면서 해수보다 지하수 사용이 증가하기 때문이다.
- 양식장 및 연안의 월별 영양염 변화에서 양식장 영향이 없는 지역은 전 계절에서 상대적으로 낮게 나타났다. 반면에 양식장과 양식장 배출수에서는 질산염, 인산염, 규산염, 암모니아와 같은 모든 영양염 농도가 상대적으로 높고 나타났다. 특히 질 산염의 경우 양식장과 양식장 배출수에서는 하계에 상대적으로 증가되었다.
- 조사선을 이용한 CTD 관측 결과에서 양식장 배출수에서 유출된 저염/저온의 특성을 가지는 수괴가 연안역에서 관측되었다. 이런 수괴의 움직은 조석의 움직임과 유사하게 북동 및 남서 방향으로 분포를 나타냈다. 그리고 물성 조사시 채집된 영양염 분포에서도 동일하게 양식장 배출수 부근 해역에서 상대적으로 높은 농도를 보였고, 해수의 움직임과 유사하게 공간적으로 북동 및 남서 방향으로 분포를 나타냈다. 양식장 배출수는 수직으로 수심 5m 이내에 영향을 나타냈고, 이런 영향은 해

외역까지 영향을 나타내고 있다.

- 해조류 배양을 통한 영양염 흡수와 무기영양염류 흡수 실험에서 양식장 부근에 채 집된 해조류는 상대적으로 높은 영양염 흡수력을 가지는 것으로 조사되었다.
- 양식장 및 부근 해역를 대상으로 조사된 미생물 다양성 분석에서 양식장의 영향을 받는 해역에서는 질산염을 이용하는 미생물이 많았고, 양식장 영향을 받지 않는 외해역에서는 광합성을 이용하는 미생물이 많았다. 그리고 양식장 영향을 받는 해역에서는 6개의 넙치 병원성 미생물이 확인 되었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 다양한 유형의 자료에 대한 효율적 관리 및 공유 가능
- 부영양화 및 기후변화에 의한 해양생태계 변화 탐지 및 예보시스템 구축
- 광역적/국지적 규모의 해양환경변화 탐지 및 예보 기술 확보
- 기초 및 재해관련 연구에 빅데이타 분석 방법 및 시스템 활용
- 시간해상도 및 공간해상도 높은 정밀 분석이 필요한 연안 환경 모니터링 연구 활 용 연구 유도

SUMMARY

I. Title

Technical development to surplus nutrients load by discharge water in Jeju aquaculture industry

II. Necessities and Objectives of the study

- 1. Objectives of the study
 - O Development of biological and physical techniques for reducing contaminated load in coastal area of Jeju Island
- 2. Necessities of the study
 - The monitoring studies are continuously need for understanding the discharge of land farms in Jeju Island
 - The high mortality rate of Jeju land aquaculture and fish causes not only the cost burden of fishing but also the social cost increase of Jeju
 - Coastal pollution, such as eutrophication due to the discharge of fish farms, can cause algae blooms on the coast. This is a serious problem that could damage coastal fishing and affect tourism.
 - Research is needed to address pending issues in the region by developing technology to reduce coastal pollution and mortality
 - The multi-platforms give the chance the monitoring and analysis around Korea Peninsula
 - providing scientific data for red tide, fishery ground, and fishery industry

III. Research Scope

- 1. Period of the study
 - O January 1, 2018 December 31, 2018
- 2. Contents and scope of the study
 - The analysis of Jeju land aquaculture infllow/outflow
 - Select target fish farm, identify the amount of the land aquaculture inflow/outflow

- Analysis of the land aquaculture discharge water (temperature, salinity, nutrient, chlorophyll-a, etc)
- analysis of the movement of the land aquaculture discharge water (physical/chemical analysis), tracking drift buoy
- identify he movement of the land aquaculture discharge water
- The seaweed culture and the analysis of nutrient absorption for seaweed
 - the establishment of culture system for seaweeds
 - culture seaweed collected around fish farms
 - analysis seaweed nutrient absorption
- O The analysis of inorganic nutrient absorption for seaweed
 - analysis carbon and nitrogen content in cultured seaweed
- The analysis of microbial diversity in the seawater of the land fish farms
 - collect water samples around the land fish farms
 - Analysis of microbial diversity and potential fish pathogenic microorganisms using metagenomics

IV Results

- O The research areas were selected as land farms located in Pyoseon-eup, Seogwipo, Jeju Island, and continuously monitored land fish farms and the surrounding waters. A total of six seasonal surveys were conducted in March, April, June, July, August, and September. The change in tide levels in the study areas changed from 0 cm to 300 cm. In the results of the tracing of drifting buoy performed to observe the current flow due to the change in tide levels, the currents moved from northeast to southwest when the tide rose. During the descent of the tide, the movement was shown in the southwest to the northeast. The currents moved parallel to the coastline and showed strong currents in relatively deep waters rather than on the coast.
- In the areas with no effect on fish farms, monthly salinity changes in coastal waters decreased from 34 psu in March to 28 psu in August. However, in fish farms, salinity decreased from 28 psu in March to 24 psu in August. The water temperature in March changed by 16–18°C in all areas that had no effect on fish farms or fish farms, but in August, the water temperature varied by 20–24°C in fish farms, and ~28°C in areas that had no effect on fish farms. The result is that fish farms use a mixture of seawater and groundwater. This is because the water temperature of the ocean is low in spring, so the mix of

groundwater is low, and the use of groundwater increases in summer than in sea water.

- O Nutrient changes in fish farms and coastal waters showed relatively low levels of regions that do not have a farm impact during the entire season. On the other hand, fish farms and discharge waters showed a relatively high concentration of all nutrients such as nitrate, phosphate, silicate and ammonia. Especially nitrates were increased in fish farms and discharge waters.
- O In the CTD observations using the research vessel, discharge water with characteristics of lower salinity/temperature emitted from fish farms were observed in coastal areas. Similar to the movements of these water mass, the distribution was shown in the northeast and southwest directions. In the same way, the nutrient distribution collected during the hydrographic survey showed a relatively high concentration in the waters near the aquaculture discharge water, and, similarly to the movement of seawater, the distribution was spatially expressed in the northeast and southwest directions. The discharge water from land fish farms has been affected vertically within 5 m of the water column, and these effects have been affected even to deep water areas.
- O In experiments with nutrient absorption with cultured seaweeds, seaweed collected near fish farms were found to have a relatively high absorption of nutrient.
- O In the analysis of microbial diversity in land fish farms and nearby waters, there were many microorganisms that used nitrite in marine areas that were affected by fish farms, and many others that used photosynthesis in foreign seas that were not affected by fish farms. And six microorganisms were found in areas affected by fish farms.

V. Applications

- O Providing the reliable and useful management for various format data
- O Development the detection and early warning system of the ecosystem change from nutrification and climate change
- O Development the detection and early warning system of ocean environmental change in regional and local scale
- O Application to disaster prevention studies using big data analysis system
- O Developing the coastal monitoring techniques with the high temporal and spatial resolution

목 차

Su	mr	nar	iv	Ţ
목		え	vi	i
コ	림부	목치		ζ
제	1	장	연구개발의 개요	L
	제	1	절 연구개발의 목적 및 필요성]	L
	제	2	절 연구의 내용 및 범위	2
궯	2	자	국내·외 연구 현황(3
Δ¶			적 국내 연구 동향 ···································	
			절 국외 연구 동향 ···································	
			월 국저 윤 T · 등 왕 ·······························	
	세	3	필 면재까지의 연구개발 면왕····································	1
제	3	장	연구내용1()
	제	1	절 동중국해 고수온 현상1()
		1.	서론 ····································)
		2.	재료 및 방법11	l
		3.	결과	2
		4.	결론 ····································	2
	제	2	절 양식장 인근 연안 수괴의 물리적 특성26	3
		1.	서론 ····································	3
		2.	수괴의 물리적 특성 관측	3
		3.	결론 ····································	3
	제	3	절 양식장 인근 연안 수괴의 화학적 특성 ······64	1
			서론 ····································	
		2.	재료 및 방법65	5

		3.	결과67
		4.	결론
	제	4	절 생물을 활용한 양식장 배출수 오염물질 저감85
		1.	서론 ····································
		2.	재료 및 방법
		3.	결과
		4.	결론98
제	4	장	연구개발 목표달성도 및 대외기여도99
	제	1	절 연구개발 목표달성도99
	제	2	절 대외기여도101
제	5	장	참고문헌

그림 목차

그림 2-1-1. 국내 주요 양식종 생산량 및 제주 넙치 양식장 분포도	• 6
그림 3-1-1. 2003년부터 2017년까지 표층수온(°C)의 월 평균 분포 변화	13
그림 3-1-2. 2003년부터 2017년까지 기온(°C)의 월 평균 분포 변화 ···································	13
그림 3-1-3. 2003년부터 2017년까지 월 평균 표층수온과 기온의 차이(°C). 흑색 등고선	은
순열속의 분포를 의미함	14
그림 3-1-4. 2003년부터 2017년까지 월별 평균 표층수온(흑색) 및 기온(청색)	14
그림 3-1-5. 연 평균 8월 표층수온(bar)과 기온(실선) 이상값. 점선은 표층수온(흑색)	과
기온(적색) 이상값의 경향	15
그림. 3-1-6. 양의 표층수온 이상값을 나타내는 6개 연도의 평균 표층수온(a) 및 기온	0]
상값(b). (c)는 (a)와 (b)의 차이이며, 흑색 등고선은 순열속의 이상값을 나타냄·	16
그림. 3-1-7. 음의 표층수온 이상값을 나타내는 9개 연도의 평균 표층수온(a) 및 기온	0]
상값(b). (c)는 (a)와 (b)의 차이이며, 흑색 등고선은 순열속의 이상값을 나타냄·	16
그림 3-1-8. 양의 표층수온 이상값을 보이는 6년 간의 하계 8일별 평균 표층수온 및	フ]
온(좌측). 각 점선은 표층수온과 기온의 상승 경향을 나타내고, 우측은 해당 연	도
의 하계 8일별 열속항들의 평균	17
그림 3-1-9. 음의 표층수온 이상값을 보이는 9년 간의 하계 8일별 평균 표층수온 및	기
온(좌측). 각 점선은 표층수온과 기온의 상승 경향을 나타내고, 우측은 해당 연	도
의 하계 8일별 열속항들의 평균	17
그림 3-1-10. (위)2010년도 8월의 8일별 표층수온과 기온의 차이(ΔT)로, 흑색 등고선	은
순열속을 나타냄. 좌측부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28일	부
터 8일 동안의 평균 공간 분포. (하) 좌측 그래프는 2010년도 8월의 8일별 표층	수
온과 기온, 그리고 순열속의 평균값. 우측 그래프는 8일별 열속항들의 이상값의	평
균	20
그림 3-1-11. (위)2012년도 8월의 8일별 표층수온과 기온의 차이(ΔT)로, 흑색 등고선	은
순열속을 나타낸다. 좌측부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28	일
부터 8일 동안의 평균 공간 분포. (하)좌측 그래프는 2010년도 8월의 8일별 표층	수
온과 기온, 그리고 순열속의 평균값. 우측 그래프는 8일별 열속항들의 이상값의	평
균	20
그림 3-1-12. (위)2015년도 8월의 8일별 표층수온과 기온의 차이(ΔT)로, 흑색 등고선	은
순열속을 나타낸다. 좌측부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28	일
부터 8일 동안의 평균 공간 분포. (하)좌측 그래프는 2010년도 8월의 8일별 표층	수
온과 기온, 그리고 순열속의 평균값. 우측 그래프는 8일별 열속항들의 이상값의	평
ਰੋ	21
그림 3-1-13. (위)2016년도 8월의 8일별 표층수온과 기온의 차이(ΔT)로, 흑색 등고선	은
순열속을 나타낸다. 좌측부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28	일
부터 8일 동안의 평균 공간 분포. (하)좌측 그래프는 2010년도 8월의 8일별 표층	수

	온과 기온, 그리고 순열속의 평균값. 우측 그래프는 8일별 열속항들의 이상값의 평균 ···································
그 린	3-1-14. 표층수온 이상값의 공간분포와 태풍의 이동궤적. (a) 2010년 8월 12일부터
_ [19일까지 평균 표층수온 의 이상값과 태풍 DIANMU의 이동 궤적. (b) 2012년 8월
	4일부터 11일까지 평균 표층수온의 이상값과 태풍 DAMREY의 이동 궤적. (c)
	2012년 8월 28일부터 9월 4일까지 평균 표층수온의 이상값과 태풍 BOLAVEN의
	이동 궤적
그림	3-1-15. 상단의 공간분포는 MODIS로 관측한 8월의 8일별 평균 표층수온이며, 좌측
	부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28일부터 8일동안의 평균 공
	간 분포이다. 표층수온 공간분포의 흑색 등고선은 동일 기간 평균 잠열속이고, 하
	단의 공간분포는 Son et al.(2012)에서 제시된 방법으로 구현한 8일별 평균 표층염
	분의 분포이며, 표층수온 분포와 동일 기간 평균한 자료임 ···································
그림	3-2-1. 표선 양식장 배출구와 연안 및 정선 정점도
,	3-2-2. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 3월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으로
Д	표시하였다. 정선관측을 수행한 3월 28일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은 흑
	색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화(c) 29
그림	3-2-3. 3월 28일 양식장 배출수 및 양식장 배출수 인근 연안수의 수온(적색)과 염분
_	(청색)
그림	3-2-4. 3월 28일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분(하
	단)의 표층 분포31
그림	3-2-5. 3월 28일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분포·32
그림	3-2-6. 3월 28일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분포·33
그림	3-2-7. 3월 28일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안의 조위 변
	화34
그림	3-2-8. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 4월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으로
	표시하였다. 정선관측을 수행한 4월 20일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은 흑
	색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화(c)
그림	3-2-9. 4월 19일 양식장 배출수 및 양식장 배출수 인근 연안수의 수온(적색)과 염분
	(청색)36
그림	3-2-10. 4월 19일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분
	(하단)의 표층 분포37
그림	3-2-11. 4월 20일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분
	(하단)의 표층 분포
그림	3-2-12. 4월 20일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분포 39
그림	3-2-13. 4월 20일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분포 40
그림	3-2-14. 4월 19일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안의 조위
	변화41
그림	3-2-15. 4월 20일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안의 조위

	변화 ····································
그림	3-2-16. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 6월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으
	로 표시하였다. 정선관측을 수행한 6월 3일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은
	흑색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화(c)
그림	3-2-17. 6월 2일 양식장 배출수 및 양식장 배출수 인근 연안수의 수온(적색)과 염분
	(청색)44
그림	3-2-18. 6월 2일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분(염
	분)의 표층 분포45
그림	3-2-19. 6월 3일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분(하
	단)의 표층 분포46
그림	3-2-20. 6월 3일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분포·47
그림	3-2-21. 6월 3일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분포·48
그림	3-2-22. 6월 3일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안의 조위 변
	화·······49
그림	3-2-23. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 7월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으
	로 표시하였다. 정선관측을 수행한 7월 5일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은
	흑색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화(c)50
그림	3-2-24. 7월 4일 양식장 배출수 및 양식장 배출수 인근 연안수의 수온과 염분51
그림	3-2-25. 7월 4일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분(하
	단)의 표층 분포52
그림	3-2-26. 7월 5일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분(하
	단)의 표층 분포53
그림	3-2-27. 7월 5일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분포·54
그림	3-2-28. 7월 5일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분포·55
그림	3-2-29. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 8월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으
	로 표시하였다. 정선관측을 수행한 8월 4일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은
	흑색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화 (c) 56
그림	3-2-30. 8월 4일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분(하
	단)의 표층 분포57
그림	3-2-31. 8월 5일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분(하
	단)의 표층 분포58
그림	3-2-32. 8월 4일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분포·59
그림	3-2-33. 8월 4일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분포 · 60
그림	3-2-34. 8월 4일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안의 조위 변
	화61
그림	3-3-1. 표선 양식장 주변 연안 환경 정점 및 양식장, 배출수, 조간대 시료 채취 정
	점
그린	3-3-2, 표선 양식장 침전지 시료채취 정점(좌)과 배출수 시료채취 정점(우)의 모

	습6
그림	3-3-3. 표선 양식장 양식수, 배출수 및 주변 조간대의 월간 영양염 농도 분포 … 6
그림	3-3-4. 2018년 3월, 4월, 6월 및 7월 표선 양식장 양식수, 배출수 및 주변 조간대의
	입자성유기탄소 농도 분포69
그림	3-3-5. 2018년 3월, 4월, 6월 및 7월 표선 양식장 양식수, 배출수 및 주변 조간대의
	엽록소-a 농도 분포 69
그림	3-3-6. 2018년 3월, 4월, 6월 및 7월 표선 양식장 양식수, 배출수 및 주변 조간대의
	총부유물질(TSS) 농도 분포70
그림	3-3-7. 2018년 3월 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포7
그림	3-3-8. 2018년 3월 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포7
그림	3-3-9. 2018년 4월 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포75
그림	3-3-10. 2018년 4월 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포7
그림	3-3-11. 2018년 6월 오전 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포 7.
그림	3-3-12. 2018년 6월 오전 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포 … 7.
그림	3-3-13. 2018년 6월 오후 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포 … 7.
그림	3-3-14. 2018년 6월 오후 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포 … 7.
그림	3-3-15. 2018년 7월 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포70
그림	3-3-16. 2018년 7월 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포7
그림	3-3-17. 2018년 3월과 4월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 입자성유기탄소
	농도 분포78
그림	3-3-18. 2018년 6월 오전과 오후 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 입자성우
	기탄소 농도 분포
그림	3-3-19. 2018년 7월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 입자성유기탄소 농도
	분포79
그림	3-3-20. 2018년 3월과 4월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 엽록소-a 농도
	분포
그림	3-3-21. 2018년 6월 오전과 오후 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 엽록소-;
,	농도 분포
그림	3-3-22. 2018년 7월과 8월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 엽록소-a 농도
	분포
그림	3-3-23. 2018년 3월과 4월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 총부유물질 농
1	도 분포
그림	3-3-24. 2018년 6월 오전과 오후 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 총부유물
1	질 농도 분포 ···································
그림	3-3-25. 2018년 7월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 총부유물질 농도 분
J	
	3-4-1. 배양된 사용된 도박류, 패류 및 구멍갈파래류
그님	3-4-2. 해조류 배양 실험

그림 3-4-3. 미생물 다양성 분석을 위한 시료 채집 정점87
그림 3-4-4. 질소 고정 해양미생물 종 동정88
그림 3-4-5. 질산염 용액에 미생물 흡착 고정화 담체 첨가88
그림 3-4-6. 양식장 침전조와 배출수 주변 해조류 채집 위치88
그림 3-4-7. 1차 해조류 배양시간에 따른 질산염 변화89
그림 3-4-8. 1차 해조류 배양시간에 따른 인산염 변화89
그림 3-4-9. 2차 해조류 배양시간에 따른 질산염 변화90
그림 3-4-10. 2차 해조류 배양시간에 따른 인산염 변화90
그림 3-4-11. 3차 해조류 배양시간에 따른 질산염 변화91
그림 3-4-12. 3차 해조류 배양시간에 따른 인산염 변화91
그림 3-4-13. 1차 해조류 배양실험에서 해조류 내 탄소량 및 질소량 변화92
그림 3-4-14. 2차 해조류 배양실험에서 해조류 내 탄소량 및 질소량 변화92
그림 3-4-15. 3차 해조류 배양실험에서 해조류 내 탄소량 및 질소량 변화93
그림 3-4-16. 시료 채취지역에서 수집된 해수의 미생물 다양성 분석(Phylum 중심)‥94
그림 3-4-17. 양식장 침전조 내 미생물 다양성 분석(Phylum 중심)95
그림 3-4-18. 고정화 담체에 흡착된 미생물에 따른 질산염 저감 효과96
그림 3-4-19. 양식장 배출수가 나오는 곳의 바위96
그림 3-4-20. 양식장 침전조 내 해조류 및 저서생물97
그림 3-4-21. 양식장 배출수 1 주변의 해조류97
그림 3-4-22. 양식장 배출수 2 주변의 해조류98

제 1 장 연구개발의 개요

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

본 연구는 제주 연안에 밀집되어 있는 육상양식장에서 주위 연안으로 배출되는 배출수의 오염 부하 저감을 통한 효율적 물관리를 위하여 제주도 육상양식장 밀집 지역을 선정하여 연안으로 유입되는 배출수의 오염 부하를 저감할 수 있는 방안을 마련하는 것이 목적

2. 연구사업의 필요성

가. 과학적 측면의 필요성

- 양식장 배출수의 연안지역 이동거리 및 범위 분석
- 양식장 배출수가 연안에서 어떻게 이동되고 있는지를 분석함으로써 향후 양식 장 유입수 및 배출수 라인을 설정하고, 연안지역 범위별 오염도를 조사하여 향후 유 입수의 처리방안 제시 필요
- 제주 육상수조식 양식장은 연안해수를 유입하여 어류를 양식하는 특이한 방식을 사용하고 있지만, 타 지역의 양식에 비해 월등히 높은 폐사율을 보이고 있음
- 제주 양식장의 높은 폐사율 보이는 원인으로는 유입수 오염에 의한 것인지 인지하고 있지만, 판단하여야 하며, 또한 연안으로 방출되는 배출수의 오염 현황 및 연안 오염현황에 대한 정밀조사가 필요
- 양식장 유입/배출수 오염 현황을 파악하여 효과적인 오염저감 기술개발의 기 초자료로 활용

나. 경제·산업적 측면의 필요성

- 제주의 육상양식 산업은 제주에서 상당부분을 차지하는 주요 산업
- 제주 육상양식장수는 약 360 여 개소가 운영 중으로 국내 넙치 생산량의 53% 이상, 넙치 수출량의 95%를 차지하고 있어 지역 및 국가경제에 기여하고 있음
- 제주 양식장 양식어류의 높은 폐사율은 양식업 종사자의 비용 부담뿐만 아니라 제주 지역의 사회적 비용 증가를 야기 시킴
- 양식장 배출수로 인한 부영양화 등 연안오염은 연안의 녹조류 대번성 등을 야기할 수 있고, 이는 연안어업 피해 및 관광산업에도 영향을 줄 수도 있는 심각한 사안임
- 양식장 배출수 처리 기술 개발로 연안오염 및 폐사율 저감 방안을 마련 연구는 우리원의 바다되살리기 중과제 목적에 부합하고, 지역의 현안문제를 해결함으로서 우리원의 위상을 제고시킬 수 있음

다. 사회 · 문화적 측면의 필요성

- 양식장 배출수에 대한 효율적 관리 방안 제시와 관련 연구 지시
- 해수부 차관 제주센터 방문 시('17.07.18), 제주도 양식장 배출수에 의한 연안 환경오염 현황 및 오염 부하를 저감할 수 있는 방안 마련 지시
- 지시사항의 대안으로 양식장 주변 물관리 방안 및 저감 기술 개발 마련을 위한 방안을 제시하였고, 보고 사항에 대한 대응이 필요한 사안 임

제 2 절 연구의 내용 및 범위

1. 연구개발의 최종 목표

- 제주도 육상양식장 배출수에 의한 연안해역 오염 부하 저감을 위한 생물학적 및 수리학적 기술 개발
- 국내 연구는 오염 현황 파악과 양식장 내 물에 대한 살균, 소독제 등 고비용의 시설 개발에 목적을 있고, 이는 실제 양식업자나 주변 해역의 어민과 주민들에게 실지적 도움이 되지 않음
- 본 연구는 양식장이 육상에 설치되어 있는 제주도의 특수성을 고려하여 양식 장의 유입수와 배출수를 효율적으로 관리하고, 주위 연안에 오염을 저감할 수 있는 방안을 도출하기 위해 위와 같은 최종목표를 설정

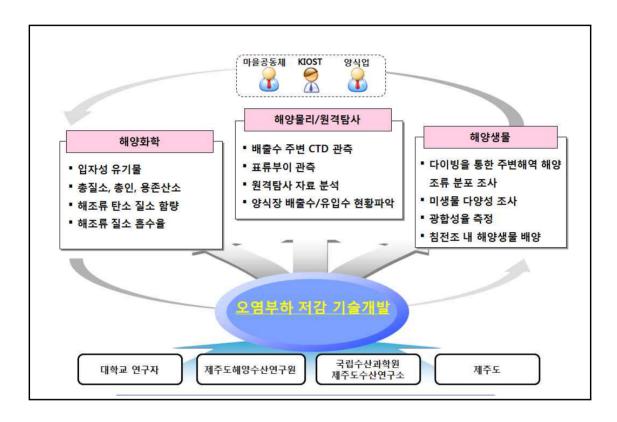
2. 연구개발 세부목표 및 내용

목표	연구개발내용 및 범위
양식장 유입/배출 수 분석	- 양식장 유입/배출수량 파악 - 양식장 배출수 거동 분석을 위한 주변해역 해양 기초 조사 - 양식장 배출수 내 영양염 및 유기물 분석 ※ 제주 육상 양식장 배출수에 대한 직접적 현황 파악 가능
실험실 내 해조류 배양 시스템 구축 및 오염인자 저감 연구	 양식장 주변 해조류 서식 조사 및 종 동정 실험실 내 해조류 배양 시스템 구축 해조류 배양 및 동위원소가 표지된 C, N, P의 흡수율 평가 대상 해조류의 광합성률 측정

양식장 배출수 침	- 침전조 내 해양생물배양시스템 구축(해조류 부착판, 광 조절,
전조를 활용한 생	환경모니터링 장비 등)
태친화형 복합배	※ 제주도 육상양식장 밀집지역에서 양식장을 선정하여 실
양 시스템 제작	제 여과조에서 장비를 설치하여 실험 수행
침전·복합배양 시스템 내 해양생 물 배양 연구	 침전조 환경 내 배양이 적합한 어류, 해조류 선정 및 최적수용량 산정 양식장 배출수 수질(pH, COD, DO, TON, TP 항목조사) 최대 최소 범위 설정을 통한 오염 부하량의 이론적 정량화 침전조에 해양생물 투여 후 양식장 배출수 단계별/시기별수질 측정 침전조에 해양생물 투여 후 양식장 배출수 단계별/시기별유기물 농도 측정 침전조 내 해양생물의 시기별 성장 속도 측정 ※ 제주 육상 양식장 배출수에 대한 직접적 현황 파악 가능
양식장 배출수가 연안환경에 미치 는 영향 분석	 제주 육상 양식장 유입수 및 배출수 현황 파악 양식장 밀집 지역의 배출수 영향 구간 파악 및 시각화 잠수조사를 통한 배출수 주변 해역 연안 생물상 파악 ※ 양식장 밀집 해역과 대조군 해역의 연안 서식지 파악
양식장 배출수 연 안역 이동 거리 및 범위 분석	- 뜰개를 이용한 양식장 부근 연안 해류 추적 - 고해상도 위성 및 무인체계를 활용 제주 연안 와류 분포 및 해양환경 변화 분석 - 배출수 주변 해역 현장관측 수행 및 자료 분석 ※ 주요 양식장 밀집 해역 해류 분포 분석 ※ 양식장 배출수 연안 확산 범위 파악
	- 해양생물 복합배양시스템 추진 타당성 및 상세추진계획 수
부처 및 주요 사	립
업 대응과 국가연	- 정책동향 및 법/제도 분석
구개발 사업 개발	- 유사한 국내외 인프라 및 운영 실태 비교 조사
을 위해 기획보고	- 기술 동향 및 전망 분석
서 작성	- 연구개발 타당성 분석(정책, 경제, 기술적 타당성)
	- 연구개발 추진계획 로드맵 작성

3. 연구개발 추진체계

- 지속적인 현장관측 자료 수집을 통한 자료 신뢰도 향상 및 제주도내 유관기관과 협력하여 공동조사 또는 자료 교환
- 해조류의 무기영양염 흡수율 분석은 분석방법 및 결과 해석 등에 대해 제주대 전 문가의 자문을 받아 자료의 신뢰성 제고
- 복합 침전조 시범설치 양식장은 양식협회 및 지역 양식업자의 도움을 받아 설치, 우영



4. 연구개발 수행방법

- 양식장 유입/배출수량 파악을 위해 도청에서 출판하는 백서 자료를 참고하고, 시 범연구 양식장에서 유입/배출수량을 직접 측정
- 양식장 주변해역 기초조사는 제주센터에서 기보유한 고무보터를 활용하고, CTD 또는 YSI를 이용하여 수온, 염분 측정
- 주변해역 해류는 제주센터에서 수행한 선행연구 결과를 참고하고, 간단한 형태의 뜰개를 제작하여 해류 관측
- 배출수 영향 범위 산정은 계절별 수괴 관측자료, 영양염류 분포, 미생물 분포 등을 종합적으로 고려하여 계절별 영향 평가 및 범위 산정
- 배출수의 무기영양염은 제주센터에서 보유한 영양염자동분석기로 측정하고, 해조 류의 탄소, 질소 함량은 원소분석기를 활용하여 분석
- 실험실 내 배양시스템 구축을 통한 해조류 생산성 및 흡수율 변화 분석

- 양식장 침전조 활용 해양생물배양을 이용한 오염 저감 연구를 위해 제주시 구좌 하도리 지역의 양식장 사용을 양식장 대표와 사전 협의하여 허가 받음
- 1차년: 선정된 제주도 육상양식장에서 생물배양 이전의 배출수 이동 및 영향 평가 기술개발 과정으로 수괴 분석, 영양염류 및 미생물 분석을 종합하여 계절별 변화 분석
- 2-3차년은 1차년도 실험결과를 기반으로 선정된 제주도 육상양식장에서 생물배양을 통하여 육상양식장에서 배출되는 배출수 영향을 계절별 조사하고, 확산 범위 산정 및 생물배양을 통한 오염 저감율 산정
- 최정적으로 육상양식장 배출수 영향을 고려한 배출수 및 유입수 범위 산정과 해 양생물 복합배양시스템을 통한 오염 저감율 산정

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구 동향

1. 제주 육상양식 산업

- 제주는 해수의 짧은 연안 체류시간 및 양호한 수질상태 등으로 육상 양식업의 수 준이 전국 넙치양식의 53% 이상, 국내 전체 넙치 수출량의 95%를 차지하고 있어 지역 및 국가경제와 고용창출에 기여하고 있음
- 제주도는 대표 양식어종인 넙치를 글로벌브랜드로 육성하기 위해 2009년부터 넙치 클러스터사업단을 구성하여 엄격한 품질관리부터 '제주광어' 브랜드마케팅까지 체계 적인 관리를 수행하고 있음
- 그러나 최근 넙치 폐사율 57%에 이르고, 이는 전남북 넙치 양식장에 비해 1.5~2배 높은 수치임

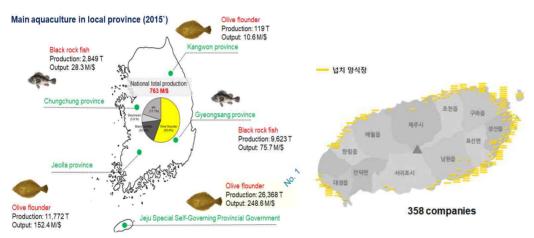


그림 2-1-1. 국내 주요 양식종 생산량 및 제주 넙치 양식장 분포도

2. 제주 연안환경오염 현황과 해양생태계 변화 연구

- 우리원에서는 양식장 배출수를 포함하여 하수처리장 방류수 및 해저지하수를 통한 영양염류, 유기물, 잔류항생제 등의 연안 유입량 모니터링 연구 수행
- 제주 연안환경오염이 기초생산성, 간극생물, 내성균 등 해양생태계 변화에 미치는 영향에 대한 연구 병행하여 수행

3. 양식장 유입수 관리를 위한 기술 개발 연구

- 국립수산과학원에서는 유입수의 수질 및 질변 영향 범위를 파악하고 있으며, 자외 선, 오존 및 전기분해 등의 소독 기술을 적용하여 양식장 폐사율 저감 효과를 분석
- 국립수산과학원의 연구와 달리 본 연구에서는 유입수의 처리가 아닌 근본적인 원 인을 제공하는 배출수에 대한 관리 방안 마련과 생물학적 기술로서 양식장 배출수 수질을 관리할 수 있는 기술개발에 목표를 두고 있음

4. 생태통합 양식기술

○ 생태통합 양식기술은 생태계의 먹이사슬을 활용하여 사료 섭취 품종인 어류 양식 장에서 발생하는 어류의 배설물과 질소, 인 등 영양염을 섭취하는 유용한 생물(패류, 해조류 등)을 주변에 함께 양식하는 기술로써 현재 국립수산과학원에서 가두리 양식 형태로 연구가 진행되고 있음

5. 바이오플락을 이용한 물 정화

○ 바이오플락 기술을 이용해 어류 배설물로 배출되는 암모니아 등의 오염물질을 유용 미생물을 이용해 분해시킴으로써 폐사율을 낮춤. 주로 육상에서 담수산 어류 양식에 적용되고 있으며 유수식 사양관리되고 있는 넙치 양식에는 적합하지 않음

6. 해조류의 물 정화

- 용해성 인이나 질소는 해조류에 있어 매우 유용한 성분으로 부영양화 해수는 해조 류의 생장을 촉진하는 능력이 있는 것으로 밝혀져 있음
- 해조류는 수중에서 유기물을 흡수하고 환경을 정화하는 등의 역할을 함
- 최근 연안의 부영양화 방지와 빈산소수괴의 형성을 해결하는 방안의 하나로 해조 류 재배가 주목받고 있음

7. 바이오플락 양식장 배출수를 활용한 도시농업용 비료개발

- 양식장에서 배출되는 슬러지와 배출수에는 식물의 생장에 필요한 여러 가지 무기 원소와 이온들이 풍부하여 식물의 재배에 이용되는 화학비료를 대체하기에 효율적
- 접근이 용이한 도시농업의 유기농 비료 대책으로써 활용하는 것이 적합
- 배출수내 재배작물 유해가능 요인에 대한 검토와 고농도의 Na 이온을 조절하는 방 안이 개발되어야 함

8. 염소, UV, 염소/UV 공정을 이용한 양식장 배출수 처리

- 국내 전체 어종 생산의 큰 비율을 차지하는 넙치양식에는 간혹 항생제가 투여되며, 양식장배출수에 존재하는 항생제에 대한 우려
- 항생제를 제거하기 위한 산화처리 공정에는 여러 가지가 있으나 대부분이 해수가 아닌 담수에서 적용
- 넙치 육상양식장 배출수의 염소/UV 결합공정은 양식장 배출수에 존재하는 주요 항 생제를 충분히 제거 가능

9. 제주연안 육상양식장 밀집지역 주변해역의 영양염 과잉요인에 대한 연구

- 연중 영양염의 분포는 염분과의 관련성 없이 배출구로부터 공급되는 물질에 의해 영양염의 농도가 조절되어, 연안에서 외해역으로 갈수록 농도구배가 감소하는 특징 이 나타남
- 용존무기질소의 경우 배출구와 인접한 해역에서는 부영양상태로 인에 비해 질소가 과잉

○ 유기물의 분포는 담수유입량이 증가하는 고수온기에 증가하는 경향을 보이고, 배출 구로부터 직선거리 약 300m 및 수심 10m이내 해역의 표·저층에서는 고영양염 농 도 분포가 지속되고 있어, 부영양화 과정에서 발생하는 문제를 직·간접적으로 받을 수 있는 가능성을 나타냄

제 2 절 국외 연구 동향

1. 육상양식장 부유물질 저감 연구

- 총부유물질, 총질소, 총인 및 BOD의 53%가 5 μm 이하의 입자에 포함되어 있어, 미국 Auburn대학교에서 육상양식장에서 5 μm 이하의 입자를 줄이기 위해 침전지에 서의 부유시간을 계산
- 부유입자의 부유시간이 약 8시간이면 대부분 침전된다고 보고되었지만, 2~4시간 정도만 침전지에서 가두어두면 부유입자의 75%~90%가 감소한다고 보고함
- 미국 North Carolina 주립대에서는 육상양식장 부유입자를 줄이기 위해 고정식 필 름필터 방식을 사용한 결과를 발표
- PVC 시트에 벌집모양 BioStrata media를 붙여 배출수를 통과시켰는데, 클로로필의 농도가 20~40%가 감소하였지만, 질소, 이, 부유물의 농도가 증가하는 경우도 있었음

2. 육상양식장 배출수 연구

- Arkanasas 대학교에서는 양식장 물을 재사용하여 배출수를 감소시키는 연구를 수 행
- 사용된 사육수에 동물플랑크톤을 제거하기 위해 Dylox 처리를 하였고, 필터를 통해 copepods를 최소화하여 재사용하는 연구를 수행함

3. 유동적인 모래바이오필터를 이용한 양식장 배출수의 유기물 탈질화 연구

- C:Ns 범위 내에서 질산염 제거를 정량화하고, 15분 및 18분의 유압 유지 시간에서 유동화된 모래 바이오 필터를 사용하여 바이오필터 박테리아 커뮤니티를 연구
- 저비용으로 육상 양식장 유출수의 질산질소의 효과적인 제거 가능

4. 맹그로브 식물의 성장과 항산화 반응에 대한 폴리 브롬화 디페닐에테르 (BDE)와 양식장 배출수의 복합 효과 연구

- 두 개의 맹그로브 종 중에서, Avicennia는 Kandelia BDE-209에 더 내성이 있음
- BDE-209에 대한 주된 방어 메커니즘은 과산화 분해효소 및 과산화수소, 양식장배 출수는 식물 생체량을 증가시키고 BDE-209 독성을 완화 항산화 효소에 대한 BDE 효과를 감소시키고 산화 스트레스를 감소
- 망그로브에서 BDE-209와 양식장배출수는 말론디알데히드와 적대적인 영향

5. 미세조류의 성장 매개체로서 새우양식장배출수(SFW) 재사용연구

- SFW는 미세조류의 성장 매개체로 사용가능
- 6개의 새로 분리된 균주가 SFW에서 재배됨
- SFW의 바이오매스와 지질생산량은 f/2배지에서 얻은 산출량과 유사함
- 고도불포화 지방산 합성에 관련된 탈착제는 SFW배지에서 억제 가능

제 3 절 현재까지의 연구개발 현황

1. 제주 연안환경오염 현황과 해양생태계 변화 연구

- 제주 양식장 주변 해역에서 영양염은 대체로 높은 농도로 분포하고 있는데, 연안에서 조금만 멀어지면 배출수의 영향이 없음
- 양식장 배출구 주변 해역에서 옥시테트라사이클린 항생제 내성균의 분포가 많았고, 배출구에서 멀어질수록 그 수가감소

2. 양식장 배출수의 오염물질 정화

- 기존의 양식장 물 정화와 관련된 연구는 유용미생물군을 어류와 같이 배양함으로 써 사료찌꺼기 및 배설물을 분해시켜 양양분화 시킬 수 있는 바이오플락 연구가 이미 양식장에서 쓰이고 있고, 다양한 해양생물을 복합 배양하여 환경정화 기능을 갖게 하는 생태통합 양식기술의 연구 진행
- 바이오플락을 이용한 양식의 경우 미생물이 물고기의 배설물을 섭취하면서 불어나고, 불어난 미생물을 다시 물고기가 섭취하기 때문에 일반적인 양식보다 사료량이 30% 감소되고, 배설물이 쌓이지 않아 물도 하루 0.5~1% 정도만 교환으로 온도를 유지할 수 있는 장점 보유, 그리고 성장이 빨라 생산량도 늘어나고 연중 출하가 가능하지만, 육상수조에서 담수산 종에 국한 있음
- 친환경 생태통합 양식기술은 어류, 패류, 해조류 등을 복합 배양하면서 생태계적으로 자연정화 능력을 갖게 하는 양식기술로 국립수산과학원에서 개발 했지만 이는 가두리 양식이 적합한 남해안에서 가능
- 제주의 넙치양식장은 유수식 사육방식을 채택하고 있으며 조류 흐름의 영향을 많이 받고 있어 가두리시설을 이용한 바이오플락 및 생태통합 양식기술은 적합하지 않음
- 기존의 거름망 및 침전조 만으로는 연안오염에 영향을 미치는 유기물 및 질소(N), 인(P)과 같은 영양염 등을 거르는데 한계가 있어 새로운 정화기술의 도입이 필요

제 3 장 연구 내용

제 1 절 제주 인근 및 동중국해의 고수온 현상

1. 서론

제주 인근 해역을 포함하는 동중국해는 대부분이 200m 이하의 대륙붕으로 구성된 북서태평양의 연근해이다. 특히 동중국해는 남쪽에서 유입되는 고온/고염의 쿠로시오 난류수(Kuroshio Warm Water)를 한반도 인근 황해 및 동해로 전달하는 과정에서 저위도의열 에너지를 고위도로 수송하는 통로의 역할과 그 과정에서 해양-대기의 열 교환을 포함한 다양한 상호작용이 활발히 발생하고 있다(Yeh and Kim, 2010). 그 이외에도 중국 연안으로부터 유입된 장강유출수(Changjiang River Discharge, CRD)는 동중국해의 해수와혼합되면서 장강희석수(Changjiang Diluted Water, CDW)를 형성한다. 특히 하계에 형성된 장강희석수는 계절풍에 의해 동쪽으로 이동하고, 제주를 포함한 남해안과 동해로 전파되면서 주변 해역의 해양 환경에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Lie et al., 2003).

동중국해에서 표층수온의 계절적 변화는 뚜렷하게 나타나고 있다. 동계 동중국해는 강한 북서계절풍에 의해 수직적/수평적 혼합이 활발히 발생하면서 전 수층이 9-16 °C 범위의 수온을 가지는 균일한 수괴 특성을 가지고 있다(Jang et al., 2007). 이와 대조적으로하계 동중국해의 상층은 태양 복사열에 의한 가열과 장강유출수에 의한 희석이 증가되어고온/저염화를 보여주지만, 저층은 황해 저층냉수의 영향으로 저온/고염화되면서 강한 성층을 형성하면서 두 개의 수괴로 분리되어 진다(Jang et al., 2007; Jang et al., 2007). 하계 동중국해의 표층수온은 25 °C 이상을 나타내고, 저층수온은 20 °C 이하로 계절적으로 복잡한 변화를 나타낸다(Jang et al., 2007; Park et al., 2011; Yoon et al., 2015).

이런 표층수온의 변화는 일반적으로 대기와의 열적 교환에 의한 상호작용에 의해 조절되고(Seong et al., 2010; Yeh and Kim, 2010), 이는 열속(Heat flux)의 변화에서도 나타난다. 동중국해의 열속은 표층수온의 계절적 변동과 유사하게 변화되어, 일반적으로 동계에는 해양에서 대기로, 하계에는 대기에서 해양으로 열속의 유입이 일어난다(Yang and Lee, 1996).

동중국해에서 표층수온의 변화를 이해하기 연안, 정점 및 정선 관측과 같은 다양한 형태의 조사들이 현재까지 지속적으로 수행되고 있다. 이를 통하여 해역별 표층수온 변화및 기후변화와의 관계를 이해할 수 있는 연구가 수행되기도 했다(Kim, 1996; Yang and Lee, 1996; Kang, 2000; Jang et al., 2007; Yoon et al., 2015). 그리고 최근에는 모델의정확도가 개선되고 다양한 위성들이 개발되고 그리고 이를 이용한 재분석 자료들이 제공되면서 장/단기 관점에서 동중국해의 수온 변화 및 해양환경 변화에 대한 연구들이 진행되고 있다(Min and Kim, 2006; Seong et al., 2010; Yeh and Kim, 2010; Kim et al., 2011; Son et al., 2012). 기존의 연구에서 동중국해는 전 세계에서 가장 급격한 수온 상승을 보이고 있는 지역해 중 하나로 분석했고(>2°C), 향후 미래에도 지속적으로 상승세를 나타낼 것으로 예측되고 있으며 현장관측, 위성 및 재분석 자료의 분석 결과에서도 동중국해는 지속적으로 수온이 상승한 것으로 나타나고 있다(Yeh and Kim, 2010; Kim et

al., 2011; Son et al., 2012). 동중국해에서 표층수온의 상승은 동계 표층수온의 상승으로 인하여 전체 수온이 상승되고 있는 것으로 제시되었다(Kang, 2000; Min and Kim, 2006). 그러나 이와 반대로 표층수온의 상승 효과는 하계 수온의 지속적인 상승으로 인하여 장기 수온 변화를 유도한 것으로 보고되고 있다(Seong et al., 2010). 이 외에도 Min et al.(2010)은 공간적으로 동중국해의 북부가 남부보다 빠른 수온의 상승을 나타내고 있는 것으로 제시하는 등 표층수온 변동에 있어서 공간적인 편차가 존재함을 언급하였다. 그리고 Kim et al.(2016)은 우리나라 인근 해역에서 나타나는 표층 수온과 순열속의 계절적 변동과 관련된 연구에서 동계는 쿠로시오 해류에 의한 열의 수평적 이류가, 하계는 연직적 이류인 표층 열속의 영향이 해양의 표층 순열속의 계절적 변화를 주도하는 것으로 보고했다.

기존의 연구에서 제시되었듯이 동중국해의 표층수온 변화는 단일 요인에 의한 것이 아닌 다양한 내/외부적 요인들에 의해서 복합적인 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 그러나 지금까지의 연구들은 동중국해 표층수온의 장기 변화 또는 동계 표층수온의 변화에 초점을 두고 있었다. 하계의 경우에는 단기적인 표층수온 변동 현상을 중심으로 다루고 있어 동중국해에서의 하계 표층수온의 장기 변화에 대한 연구가 미미하다. 본 연구에서는 2003년부터 2017년까지 하계 동중국해 표층수온 변화를 이해하기 위해 표층수온 변화와 연관된 기온과의 주요 인자와의(기온, 열속) 관계를 이용하여 분석하고 그 원인을 이해하기 위해 다양한 접근을 시도해 보았다.

2. 재료 및 방법

동중국해에서 표층수온의 장기변화를 관측하기 위해 2003년부터 2017년까지의 연구기간 동안 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)-Aqua의 8일 및 월평균으로 합성된 표층수온(Sea Surface Temperature) 자료를 사용하였다. 사용된 자료는 NASA Ocean Color Web(http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/)에서 Level 3 mapped(공간해상도 4 km) 된 전지구 자료를 이용하여 연구해역에 해당하는 자료를 추출하여 사용하였다.

기온(Air Temperature) 및 표층 열속 자료(Surface Heat Flux)는 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecast, 유럽중기예보센터)에서 제공하는 전지구자료를 이용하여 연구해역에 맞도록 추출하여 사용하였다(https://www.ecmwf.int/). 2003년부터 2017년까지의 기간 동안 공간해상도 0.125° X 0.125°의 자료를 일별 자료를 획득하였고, 이를 이용하여 8일과 월 평균 자료로 합성하여 사용하였다. 표층 열속 자료는 표층단파복사속(Surface Shortwave Heat Flux, Qs), 표층 현열속(Surface Sensible Heat Flux, Qh), 표층 잠열속(Surface Latent Heat Flux, Qe), 표층 장파복사속(Surface Longwave Heat Flux, Qb) 등 4가지로 구성되어 있으며 열속의 부호가 양이면 대기에서해양으로, 음이면 해양에서 대기로 유입되는 것을 의미한다. 순열속(Net Heat Flux, Qnet)은 상기된 4가지 열속의 합으로 이루어져 있으며, 이 중 하계에 가장 큰 변화폭을나타내는 잠열속이 하계 동중국해의 순열속 변동을 좌우한다(Kim, 1996). 하계 잠열속은 본 연구해역 중 동중국해 북부 해역에서 상대적으로 큰 변화를 나타내는데 이는 얕은 수심에 의해 바람의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 여겨지며, 쿠로시오 해류에 의해 비교

적 일정한 환경이 유지되는 일본 남부 해역에서 상대적으로 적은 잠열속의 변화가 나타 내는 것으로 보고되었다(Kim *et al.,* 1995). 본 연구에 평균하여 사용한 8일 자료는 표기된 날짜를 포함한 이후 8일간의 자료를 평균하여 사용하였다.

표층수온과 기온의 평균 계절변동을 알아보기 위해 연구기간 전체의 표층수온 및 기온을 평균하여 계산했다. 하계 표층수온의 변화는 전체 연구기간 동안의 표층수온의 평균값을 이용하여 각각의 이상값을 이용하였다. 계산된 하계 이상값은 양의 표층수온이상값을 가지는 연도와 음의 표층수온이상값을 가지는 연도의 자료로 분류하고 두 경우의 표층수온 변화를 분석했다. 그리고 다른 연도에 비해 상대적으로 표층수온의 변화가다른 연도를 계산하기 위해 표층수온과 기온의 차를 이용하여 편차를 계산하고 차이가크게 나타나는 연도를 선정했다. 선정된 연도의 표층수온의 변화를 이해하기 위해 기온및 해양환경자료 자료를 이용하여 선정된 연도에서 나타나는 특징을 분석하였다.

3. 결과

가. 동중국해 표층수온의 계절적 변화

- 2003년부터 2017년까지 MODIS-Aqua에서 관측된 표층수온 자료와 ECMWF에서 제공하는 기온자료를 사용함(그림 3-1-1, 3-1-2)
- 공간적으로 고온의 쿠로시오 해류의 영향을 받는 남동쪽 해역과 저온의 수괴가 분 포하는 북서쪽 해역으로 나눠짐. 반면 하계에는 전 해역에서 표층수온 상승으로 수 괴의 구별이 사라짐(그림 3-1-1)
- 기온의 변화는 표층수온의 계절변화와 유사하게 나타나지만, 쿠로시오 해류의 영향을 받는 해역에서는 표층수온의 변화보다 기온의 변화가 크게 나타남(그림 3-1-2)
- 계절적으로 표층수온과 기온의 차이(그림 3-1-3)는 12월부터 2월까지는 지속적으로 양의 경향을 보이면서 표층수온이 기온보다 높고, 순열속은 해양에서 대기로 유입되는 경향이 나타남
- \circ 표층수온과 기온의 차이가 클수록 순열속량도 같이 증가하게 됨 $(R^2>0.65)$
- 순열속의 분포는 표층수온과 기온의 차이와 유사하게 연구해역의 서쪽이 동쪽보다 상대적으로 높은 값을 나타냄
- 4월부터 8월까지는 표층수온이 기온보다 낮으며 표층수온과 기온이 가장 증가된 8 월은 동중국해의 중앙에서 차이가 사라짐
- 하계에는 동계에 비해 순열속의 크기가 작게 나타나며 8월의 경우 표층수온과 기 온의 차이와 유사하게 순열속의 크기도 감소함
- 표층수온의 평균 변화(그림 3-1-4)는 2월에 최저(13.41°C)를 나타내고, 8월에 최고 (28.12°C)를 나타냄. 반면 기온은 1월에 최저(7.14°C)를 나타내고, 최고 기온은 표층 수온과 마찬가지로 8월(27.65°C)에 나타냄
- 표층수온과 기온의 차이는 12월과 1월에 최대(7°C 이상)를 나타냄. 4월부터 8월까지의 표층수온의 변화량은 기온과 비슷한 변화량을 나타내지만, 9월부터 12월까지의 표층수온의 변화량은 기온보다 상대적으로 낮아짐

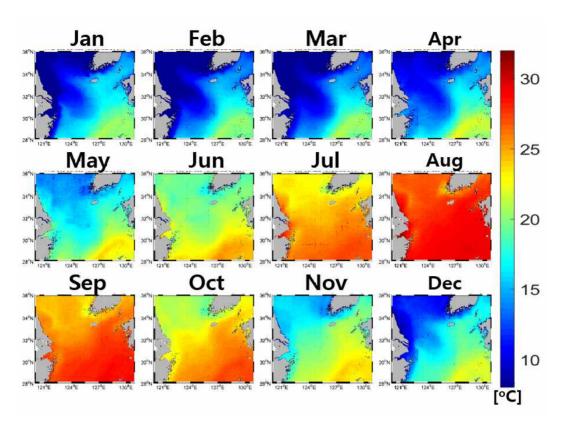


그림 3-1-1. 2003년부터 2017년까지 표층수온(°C)의 월 평균 분포 변화

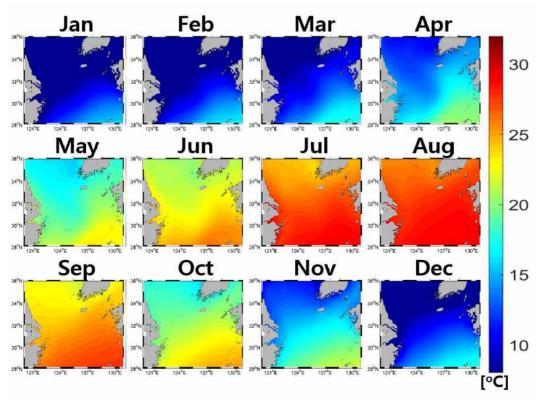


그림 3-1-2. 2003년부터 2017년까지 기온(°C)의 월 평균 분포 변화

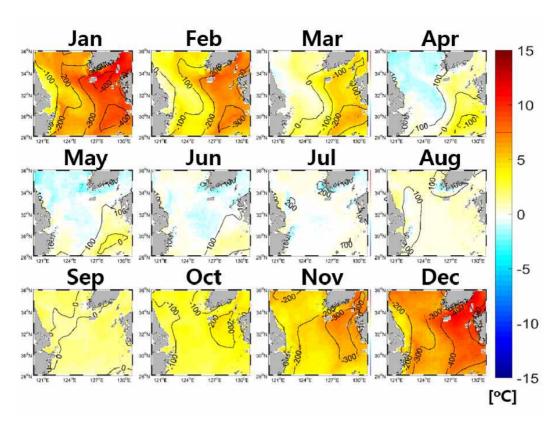


그림 3-1-3. 2003년부터 2017년까지 월 평균 표층수온과 기온의 차이(°C). 흑색 등고선은 순열속의 분포를 의미함

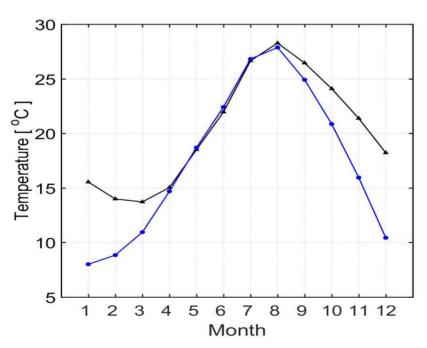


그림 3-1-4. 2003년부터 2017년까지 월별 평균 표층수온(흑색) 및 기온(청색)

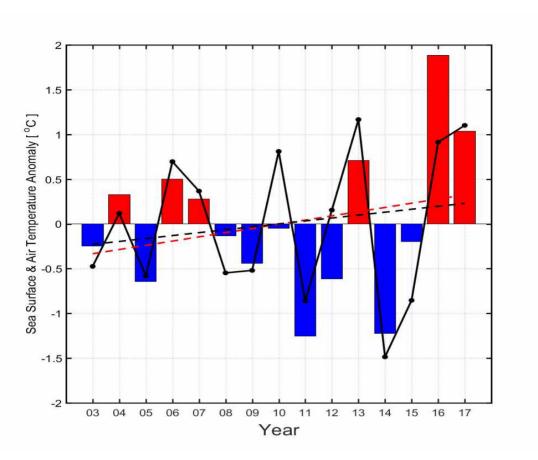


그림 3-1-5. 연 평균 8월 표층수온(bar)과 기온(실선) 이상값. 점선은 표층수온(흑색)과 기온(적색) 이상값의 경향

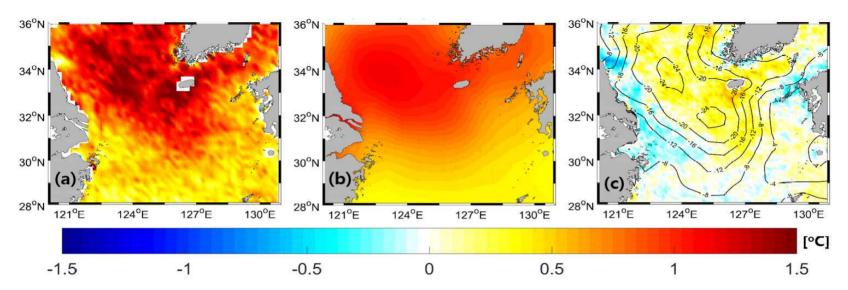


그림 3-1-6. 양의 표층수온 이상값을 나타내는 6개 연도의 평균 표층수온(a) 및 기온 이상값(b). (c)는 (a)와 (b)의 차이이며, 흑색 등고선은 순열속의 이상값을 나타냄

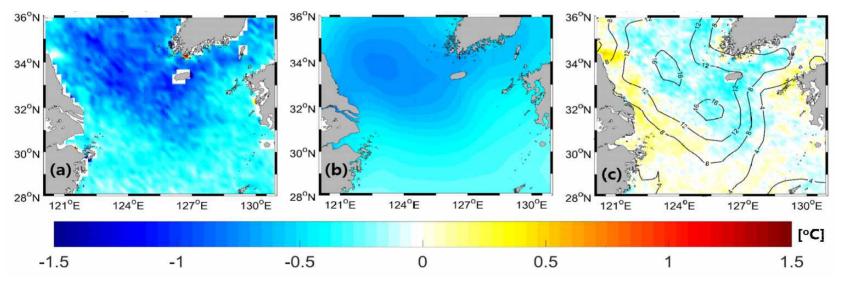


그림 3-1-7. 음의 표층수온 이상값을 나타내는 9개 연도의 평균 표층수온(a) 및 기온 이상값(b). (c)는 (a)와 (b)의 차이이며, 흑색 등고선은 순열속의 이상값을 나타냄

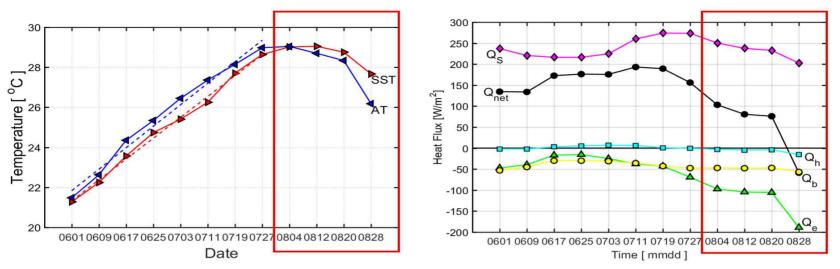


그림 3-1-8. 양의 표층수온 이상값을 보이는 6년 간의 하계 8일별 평균 표층수온 및 기온(좌측). 각 점선은 표층수온과 기온의 상승 경향을 나타내고, 우측은 해당 연도의 하계 8일별 열속항들의 평균

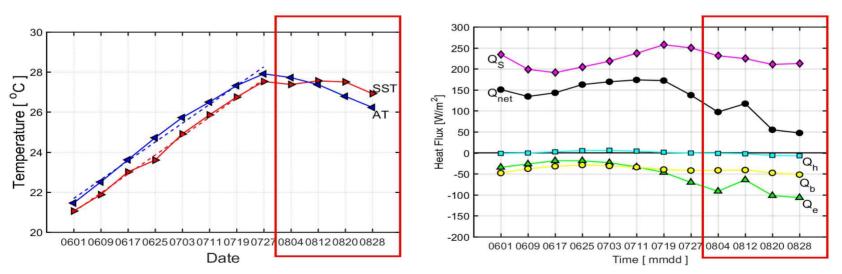


그림 3-1-9. 음의 표층수온 이상값을 보이는 9년 간의 하계 8일별 평균 표층수온 및 기온(좌측). 각 점선은 표층수온과 기온의 상승 경향을 나타내고, 우측은 해당 연도의 하계 8일별 열속항들의 평균

나. 하계 동중국해 표층수온의 이상 변동

- 연구기간 동안 표층수온과 기온 이상값의 차이에 대한 표준편차를 계산하고 (0.49°C) 이를 기준으로 8월 표층수온의 변화가 기온의 변화와 일반적이지 않은 경향을 나타내는 연도를 구분함
- 표층수온이 기온보다 낮은 연도(2010년과 2012년)와, 표층수온이 기온보다 높은 연도(2015년과 2016)의 경우를 뽑아내어 이 4가지 경우에 대해 표층수온과 기온의 차이의 분포 및 평균값의 변화와 순열속과의 관계를 분석함(그림 3-1-5)
- 2010년 8월(그림 3-1-5a)의 경우 기온은 지속적으로 표층수온보다 높은 온도를 유지하고 있고 8월 12일에 가장 높은 온도를 기록한 뒤 감소함
- 2010년 8월의 표층수온은 기온과 마찬가지로 지속적으로 증가하고 있지만 기온보다 늦은 8월 20일에 최대를 보이고 감소함
- 2010년 8월의 순열속의 경우 8월 12일에 200 W/m² 이상으로 크게 상승한 경우를 제외하고는 100 W/m² 전후의 값을 보이며 평균적으로 대기에서 해양으로 유입되는 양상을 나타냄
- 2010년 8월의 열속 이상값의 변동에서 순열속이 증가한 8월 12일의 경우 잠열속이 감소하고 단파복사속이 증가하는 양상을 보임
- 2010년 8월의 표층수온과 기온의 차이(△T)의 공간적 분포를 살펴보면, 쿠로시오 해류의 영향을 받는 일본 서부 및 동중국해 북부 해역에서 표층수온이 기온보다 지속적으로 낮아져 있으며 8월 12일 표층수온과 기온의 차이가 크게 나타나는 중국 연안 해역에서 순열속이 대기에서 해양으로 강하게 유입되는 양상이 나타남
- 2012년 8월(그림 3-1-5b)의 경우 표층수온은 기온과 유사한 경향을 보이지만, 8월 20일에 기온이 감소할 때 표층수온은 상승되어 나타남
- 2012년 8월의 순열속은 지속적으로 대기에서 해양으로 유입되는 양상을 나타냄
- 2012년 8월의 열속 항의 이상값에서 기온이 표층수온보다 상대적으로 높게 나타나는 8월 4일과 28일에 음의 잠열속 이상값과 0에 가까운 단파복사 이상값에 의해 순열속 이상값이 양의 경향을 보임
- 2012년 8월의 표층수온과 기온의 차이(△T)의 공간적 분포를 살펴보면, 연구해역의 북부에서 기온이 표층수온보다 높게 나타나며, 순열속 또한 연구해역 북부에서에서 대기에서 해양으로 강하게 유입되는 양상이 나타남
- 2015년 8월(그림 3-1-5c)의 경우 표층수온은 기온과 유사한 경향을 보이지만, 표층 수온보다는 기온이 더 큰 폭으로 감소하여 표층수온이 기온보다 더 높은 값을 나타 냄
- 2015년 8월의 순열속은 표층수온 및 기온과 유사하게 감소하는 경향을 나타내면서 대기에서 해양으로 유입되는 경향을 나타냄
- 2015년 8월의 열속항의 이상값에서는 단파복사속과 잠열속의 이상값은 각각 12일 과 20일을 제외하고 지속적으로 음의 경향을 보이며 순열속은 20일 제외하고 계속 양의 경향을 나타냄
- 2015년 8월의 표층수온과 기온의 차이(ΔT)의 공간적 분포를 살펴보면, 8월 4일을 제외하고 표층수온이 기온보다 더 높은 분포를 보이고 있으며 이는 황해 남부 해역과 일본 서쪽 및 동중국해 북부 해역을 비롯한 연구해역의 남부에서 잘 나타남. 반면 8월 4일에 중국 연안에서 우리나라 서남쪽 연안까지 표층수온보다 기온이 더 높

- 은 해역에서 높은 순열속을 나타내고 있으며, 이후 표층수온이 기온보다 높은 값을 나타내는 해역에서는 순열속과 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않음
- 2016년 8월(그림 3-1-5c)의 경우 표층수온과 기온은 모두 크게 상승하였으며 표층 수온이 기온보다 더 상승되어 나타남
- 2016년 8월의 순열속은 점진적으로 대기에서 해양으로 유입되는 경향을 나타내지만, 전체적으로 감소하여 8월 20일에는 값이 거의 0에 가깝게 감소되고 8월 28일의 경우에는 순열속의 유입 경향이 바뀌어 해양에서 대기로 유입됨(300 W/m² 이상)
- 2016년 8월의 열속항 이상값의 변동에서 단파복사속과 잠열속 이상값이 지속적인 양의 경향을 나타내고 있으며, 특히 8월 28일은 잠열속의 이상값이 증가되고, 순열속의 이상값은 상대적으로 낮아짐
- 2016년 8월의 표층수온과 기온의 차이(△T)의 공간적 분포를 살펴보면, 8월 4일에는 연안 해역과 동중국해 북부 해역에서 기온이 표층수온보다 높은 분포를 나타냈지만, 이후에는 황해 남부 해역과 우리나라 남해를 비롯한 동중국해 북부 해역에서 표층수온이 기온보다 높은 양상이 나타남. 순열속은 8월 20일에 제주 남쪽 해역을 기준으로 북쪽은 해양에서 대기로 유입되는 경향을 보이고, 남쪽은 대기에서 해양으로 유입되는 경향을 나타냄. 8월 28일에는 전 해역에 해양에서 대기로 유입되는 순열속이 분포하며 이 중 제주 동남쪽 해역에서 가장 큰 순열속 유입이 발생함

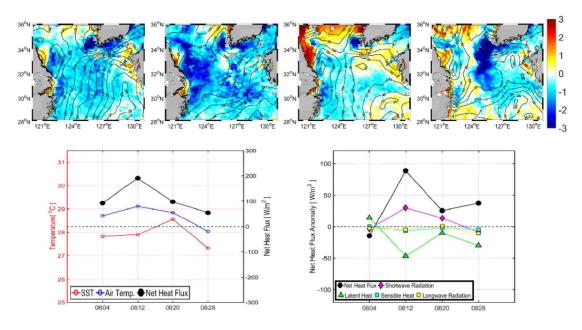


그림 3-1-10. (위)2010년도 8월의 8일별 표층수온과 기온의 차이(ΔT)로, 흑색 등고선은 순열속을 나타냄. 좌측부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28일부 터 8일 동안의 평균 공간 분포. (하) 좌측 그래프는 2010년도 8월의 8일별 표층수 온과 기온, 그리고 순열속의 평균값. 우측 그래프는 8일별 열속항들의 이상값의 평 균

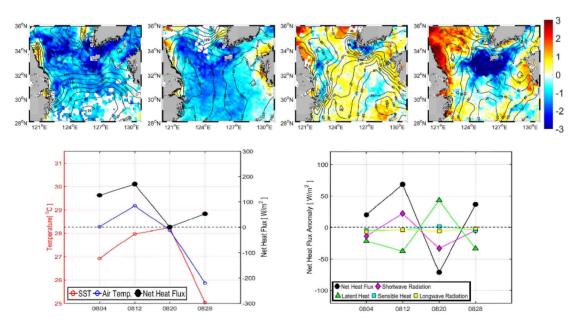


그림 3-1-11. (위)2012년도 8월의 8일별 표층수온과 기온의 차이(ΔT)로, 흑색 등고선은 순열속을 나타냄. 좌측부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28일부 터 8일 동안의 평균 공간 분포. (하)좌측 그래프는 2010년도 8월의 8일별 표층수온 과 기온, 그리고 순열속의 평균값. 우측 그래프는 8일별 열속항들의 이상값의 평균

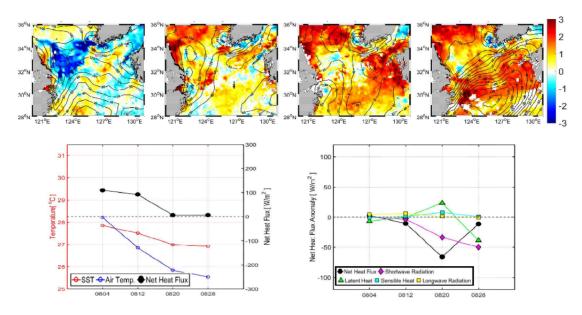


그림 3-1-12. (위)2015년도 8월의 8일별 표층수온과 기온의 차이(ΔT)로, 흑색 등고선은 순열속을 나타냄. 좌측부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28일부터 8일 동안의 평균 공간 분포. (하)좌측 그래프는 2010년도 8월의 8일별 표층수온과 기온, 그리고 순열속의 평균값. 우측 그래프는 8일별 열속항들의 이상값의 평균

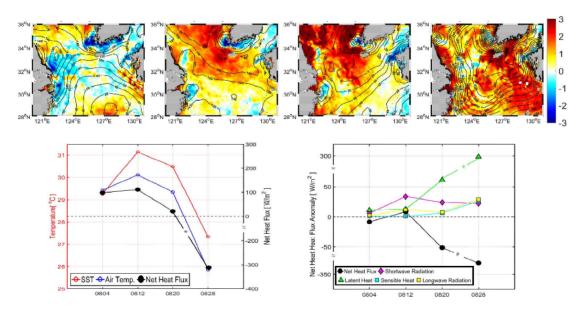


그림 3-1-13. (위)2016년도 8월의 8일별 표층수온과 기온의 차이(ΔT)로, 흑색 등고선은 순열속을 나타냄. 좌측부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28일부 터 8일 동안의 평균 공간 분포. (하)좌측 그래프는 2010년도 8월의 8일별 표층수 온과 기온, 그리고 순열속의 평균값. 우측 그래프는 8일별 열속항들의 이상값의 평균

4. 결론

제주도를 포함하는 동중국해에서 표층수온의 계절 및 하계 변화를 이해하기 위해 2003년부터 2017년까지 위성 및 모델 자료를 활용하여 동중국해 표층수온 변화 양상과 관련된 주요 요인들과의 관계를 분석하였다. 일반적으로 표층수온은 쿠로시오 해류의 영향을 강하게 받는 일본 서남쪽 해역에서 황해 남부로 이르기까지 연구해역의 북서에서 남동방향으로 감소하는 경향을 나타내고 있다(그림 3-1-1). 이것은 동중국해 동부 및 일본 서남부 해역에서 큰 영향을 미치는 고온/고염의 난류인 쿠로시오 해류 또는 지류의 해류와 황해 북부 보하이만에서 형성된 냉수괴에 의해 수온전선이 형성되기 때문이다 (Yang $et\ al.$, 1998; Heo and Choi, 2004). 표층수온의 변화에 영향을 줄 수 있는 기온의 변화는 표층수온의 계절 및 공간적 변화와 유사하게 변동되어진다($R^2>0.9$).

동중국해에서 동계의 표층수온은 기온보다 더 높은 온도를 나타내고 순열속과 좋은 상관관계를 보인다($R^2>0.8$). 반면에 하계의 표층수온과 기온의 차이는 순열속과 상대적으로 낮은 상관관계($R^2<0.35$)를 나타낸다. 이것은 전 연구해역에서 기온 상승으로 인해 표층수온과 기온의 차이가 줄어들고, 열속은 하계 동중국해에 나타나는 외부 요인(운량의증가, 바람의 감소 등)에 의해 크기가 감소하는 것으로 나타났다(Kim $et\ al.$, 1995; Kim, 1996; Ahn $et\ al.$, 1997a, 1997b).

서론에서 언급하였듯이 연구해역인 동중국해는 지속적인 수온 상승이 일어나고 있는 해역 중 하나이다(Yeh and Kim, 2010; Kim et al., 2011; Son et al., 2012). 본 연구에서는 하계 동중국해의 시/공간적 변화를 이해하기 위해서 표층수온과 기온이 최대가 되는 8월을 대상으로 분석을 실시하였다. 표층수온의 변화는 양의 표층수온 이상값을 나타내는 연도보다 음의 표층수온 이상값을 나타내는 연도가 상대적으로 많지만 전체적으로 표층수온과 기온은 증가하는 경향을 나타내고 있다(그림 3-1-5). 이것은 기존의 연구에서 제시했던 연평균 및 계절적 변화와 유사한 증가 경향을 나타냈다(Kim et al., 2011; Son et al., 2012). 그리고 동중국해의 표층수온 변동의 특징 중에 앞에서 언급한 것처럼 최근 높은 수온을 기록하고 있다. 그리고 전체 연구기간 중에서 전반부 8년보다 후반부 7년 동안의 표층수온과 기온의 극값이 증가하는 것으로 조사되었다. 이것은 추후 연구가 필요하겠지만 동중국해에서 표층수온의 변화 진폭이 과거에 비해서 커지고 있는 것으로 사료된다.

동중국해에서 8월의 표층수온 변화를 이해하기 위해 양과 음의 이상값을 가지는 시기를 분류하고 비교해 본 결과 공통적으로 황해 남부 및 제주 서부 해역 등 연구해역의 남부보다는 북부에서 표층수온과 기온의 변화가 크게 나타났다(그림 3-1-6). 이는 앞서 언급한 쿠로시오 해류의 영향이라고 볼 수 있다. Min et al.(2010)의 연구에서는 동중국해를 포함한 한반도 인근 해역에서 고위도보다 저위도에서 표층수온의 연진폭값이 작고, 이는 저위도의 열을 고위도로 수송하는 쿠로시오 해류에 의해 연구해역의 남부가 북부에 비해비교적 안정적인 수괴를 형성하고 있는 것으로 보고되었다. 이는 기온의 이상값 변동에도나타나는 현상으로 Shin et al.(2001)의 연구에서 동중국해의 수온의 변화는 대기에 의한국지적인 가열/냉각에 의한 것이고 해양의 변화는 대기가 주도하고 있음을 제시했다.

위와 같이 두 경우로 나뉘어진 연도들의 평균 표층수온 및 기온에서 공통적으로 나타나는 특징이 있는 반면 두 그룹에서 차이를 나타내는 부분도 존재한다. 그림 3-1-6(c)와(f)에서 양의 표층수온 이상값을 가지는 시기는 공간적으로 표층수온이 상대적으로 기온보다 높게 나타나고 순열속의 이상값이 음의 값을 나타내지만 음의 표층수온 이상값을

가지는 시기는 표층수온과 기온의 관계 및 순열속의 이상값이 반대로 나타난다. 그리고 평균적으로 표층수온과 기온, 열속의 변동폭 및 온도의 상승 시기를 볼 때 양의 표층수온 이상값이 나타나는 시기에 대기-해양 간의 열속 교환이 더욱 활발하게 나타난다.

본 연구기간이 수온상승이나 하강의 효과를 분석하기에는 상대적으로 짧은 연구기간 이지만, 연구 기간 내에서 동중국해 8월 표층수온의 변화는 증가하는 경향을 나타내고, 이것은 기온의 변화와 높은 상관을 나타냈다. 그리고 8월 표층수온 변화는 양과 음의 표층수온 이상값을 나타내는 해에서 서로 다른 특징을 가지는 것으로 조사되었다. 그러나 일반적인 표층수온의 변화와 다른 특징을 가지는 연도는 4개의 해로 조사되었다. 2010년 과 2012년 8월의 표층수온은 기온보다 상대적으로 감소된 경향을 나타내고, 2015년과 2016년 8월의 표층수온은 기온보다 상대적으로 증가되어 나타났다(그림 3-1-2).

2010년 8월 표층수온의 특징은 음의 이상값을 가지는 시기이지만 표층수온 이상값은 평균에 가까운 값을 가진다. 그러나 기온의 경향은 평균적인 경향을 따른다고 한다면 기온도 감소되어 나타나야 하지만 기온은 증가되어 나타났다(그림 3-1-5). 순열속은 지속적으로 감소하는 경향을 보이지만 8월 12일에 급격히 증가되어 나타나고 열속 항의 변동에서 같은 기간에 잠열속의 감소가 일어나 순열속이 크게 증가했다. 일반적으로 태풍은 하계 표층수온의 감소와 관련된 요인 중 하나로 제시되고 있다. 태풍은 해상을 통과하면서 Ekman pumping으로 강제적 난류 혼합이 발생하여 표층에서 냉각 효과를 발생시킨다. 한반도 인근 해역에서 태풍에 의한 표층 고온수의 냉각 효과는 모델 및 위성추적부이 등을 이용해 연구되어 입증된 바 있다(Hong et al., 2004; Lee et al., 2006, 2008). 2010년 태풍 DIANMU는 8월 9일부터 11일 동안 연구해역을 남북으로 관통하였다. 태풍 이동 후표층수온 자료에서(8월 12일) 태풍의 이동경로인 대한해협 및 일본 서남부 해역에서 -1.5°C 이상의 표층수온이 하강 효과되어 나타났다(그림 3-1-6a).

2012년 8월의 표층수온 변화(그림 3-1-5b)는 2010년 8월의 경우와 유사하게 음의 이상값을 가지는 시기이지만, 기온은 상대적으로 증가되어 나타났다. 표층수온과 기온은 역전 현상이 발생하지 않고 기온이 지속적으로 표층수온보다 높은 온도를 나타낸다. 순열속은 지속적으로 양의 값을 나타내며 대기에서 해양으로 유입되는 양상을 보였고, 잠열속의 감소에 따른 순열속의 증가가 나타난다. 2012년 하계 동중국해의 표층수온과 기온의 변동역시 태풍에 의한 영향으로 조사되었다. 태풍 DAMREY와 BOLAVEN은 2012년 8월 2일과 28일에 동중국해를 통과했다. 태풍 DAMREY가 지나간 직후인 8월 4일의 표층수온은약 -1.2°C, 태풍 BOLAVEN이 지나간 8월 28일에는 -2°C 이상의 이상값 변화가 나타났다(그림 3-1-6b, c).

2015년 8월의 표층수온 변화는 음의 경향을 보이지만 기온 이상값이 더 큰 음의 경향을 나타난다(그림 3-1-5c). 음의 이상값을 가지는 시기의 표층수온과 기온 변화와 비교하면(그림 3-1-4b), 2015년 8월의 경우는 표층수온과 기온의 감소는 평균값과 거의 유사하게 나타나고 표층수온과 기온의 역전 역시 동일한 시기에 나타난다. 그러나 표층수온의감소는 음의 표층수온 이상값을 가진 연도의 평균적인 경우와 비교하여 감소가 약하게나타나면서 기온과 차이를 크게 만든 것으로 보인다. 2015년 8월에 기온이 역전되고 난이후의 순열속 또한 급하게 감소하는 양상을 나타났다. 연구해역에서 하계 기온이 감소되는 원인들에 대한 많은 연구들이 있었다. 그 중에서 Shi and Zhu(1996)은 100년 이상의장기 자료를 통해 동아시아 하계 몬순 지수와 동아시아 기온이 양의 상관관계를 가지고하계 강수 지역의 위치의 변화와 연관이 있다고 주장했다. Yu et al.(2004)의 연구는 동중

국해를 포함하는 동아시아의 대류권 내 냉각 경향과 동아시아 하계 몬순의 약화가 높은 상관관계를 보인다고 언급하였다. Kim et al.(2005)는 한반도를 포함한 동아시아 지역은 상흥 기압골의 지속적인 영향을 받으며 오호츠크해 고기압의 확장이 우리나라 인근 등지에 많은 한기를 공급하여 기온을 하강시킬 수 있다고 기술했다. Won et al.(2017)은 오호츠크해 고기압의 약화로 인해 우리나라 하계 기온의 상승이 유도되는 기작을 제시하였다. 실제로 2015년의 경우 동아시아 하계 몬순 지수는 음의 경향을 나타내고 있으며 오호츠크 해 고기압 또한 확장하였다. 동아시아 하계 몬순 및 오호츠크해 고기압 등의 영향으로 2015년 하계 동중국해의 기온이 감소하였지만 2015년에 나타난 하계 기온 감소에 따른 표층수온의 반응은 평균적인 것보다는 느리게 나타난 이유에 대해서는 추후 연구가 더 필요하다.

2016년 8월의 표층수온 변화는(그림 3-1-5d) 표층수온 이상값이 양의 경향을 나타내고 있지만 두 온도의 상승폭이 비교적 더 크며 표층수온이 기온보다 더 큰 폭으로 상승되어 나타난다. 순열속의 경우 대기에서 해양으로 유입되는 경향이 나타나지만 8월 20일부터 감소하기 시작하며 28일에 경향이 변화하여 해양에서 대기로 크게 유입이 일어났다. 그림 3-1-7에서 나타나는 표층수온과 잠열속의 관계에서 고수온이 나타나는 해역에서는 해양에서 대기로 유입되는 잠열속이 매우 크게 나타난다. 2016년 하계 동중국해에서 발생한 이례적인 고온 현상은 기온의 상승에 따른 표층수온의 상승과 더불어 2016년 하계의 장강희석수 또한 영향을 미쳤을 것으로 예상된다(그림 3-1-7). 장강유출수에 의해 형성된장강희석수는 동쪽으로 전파되며 연구해역 표층에서 성층이 강화되고 이로 인하여 표층과 저층의 혼합이 약해지면서 수온의 상승을 유발한 것으로 제시되었다(Moon et al. 2003, submitted; Lie et al., 2003). Park et al.(2011, 2012)은 모델을 통해 동중국해로 유입되는 장강유출수의 분포 정도가 동중국해의 표층수온 상승에 영향을 미치는 결과를 제시하였다.

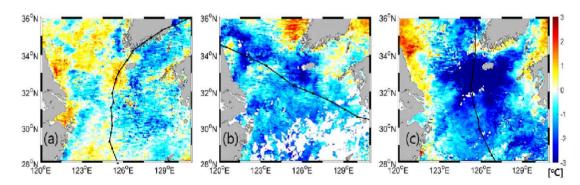


그림 3-1-14. 표층수온 이상값의 공간분포와 태풍의 이동궤적. (a) 2010년 8월 12일부터 19일까지 평균 표층수온 이상값과 태풍 DIANMU의 이동 궤적. (b) 2012년 8월 4일부터 11일까지 평균 표층수온 이상값과 태풍 DAMREY의 이동 궤적. (c) 2012년 8월 28일부터 9월 4일까지 평균 표층수온 이상값과 태풍 BOLAVEN의 이동 궤적

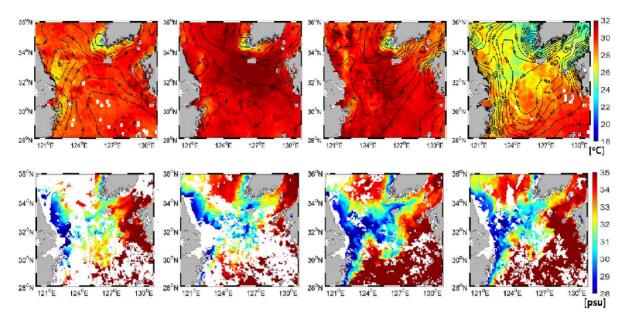


그림 3-1-15. 상단의 공간분포는 MODIS로 관측한 8월의 8일별 평균 표층수온이며, 좌측부터 8월 4일부터, 8월 12일부터, 8월 20일부터, 8월 28일부터 8일동안의 평균 공간 분포이다. 표층수온 공간분포의 흑색 등고선은 동일 기간 평균 잠열속이고, 하단의 공간분포는 Son et al.(2012)에서 제시된 방법으로 구현한 8일별평균 표층염분의 분포이며, 표층수온 분포와 동일 기간 평균한 자료임

제 2 절 양식장 인근 연안 수괴의 물리적 특성

1. 서론

제주의 바다는 예로부터 제주의 거주민의 삶의 터전으로서, 연안어장의 오염은 곧바로생계에 영향을 미치게 되는데, 이러한 문제가 계속 되고 있는 시점에서 양식장의 밀집화에 의한 배출수의 영향은 간과할 수 없는 실정이다. 특히 양식장 배출수에 기인한 오염물질은 저층에 누적되어 빈산소 수괴 형성 및 부영양화를 일으켜 연안역의 수질 및 서식환경의 변화로 수산피해를 가중시킬 수 있고(Takeuchi, 1999; Herbeck et al., 2013) 주요오염원으로 제기되는 양식장의 사료 찌꺼기는 침전 및 여과 없이 그대로 바다로 흘러들고 있어 이미 많은 연안어장이 사료 찌꺼기로 인해 오염되어 바다사막이 갈수록 확산되고 있으므로 연안해역을 효과적으로 관리하기 위해서는 현재 연안 해역 수질의 현 상태및 시공간 변화를 이해하는 것이 필요하다.

제주 해역은 부력재를 이용한 외해에서의 가두리 양식이 육상 양식에 비해 매우 적은데 이는 제주가 반폐쇄적 내만과 달리 사면이 바다와 접하는 섬 지형이고, 적조나 태풍에 의한 손실 및 파손이 빈번하게 나타나는 단점이 있기 때문이다. 해상에 고정된 상태로 유지되기 때문에 임의적인 이동이 불가능하므로 적조 및 태풍 등의 자연재해에 고스란히 노출되기 때문에 그 피해를 막을 수 없어 육상 양식장이 많이 건축되었다. 내만 지형에 비해 육지기원 오염 물질의 연안 체류시간이 비교적 짧으며 이로 인해 수질 상태가 양호하다는 자연 환경적 장점으로 인해 육상 양식업은 최근까지도 지속적인 성장을 거듭해왔다. 하지만 육상 양식장의 성장은 지역 내 경제발전에 기여하는 반면 육상 양식장의 배출수는 양식장 건설과정에서 발생하는 침전부유물의 재부유와 더불어 제주 주변 연안의수질오염 및 해양생태계 문제를 야기하고 마을어장을 운영하는 공동체와 육상 양식장 운영자 간에 마찰을 빚는 원인이기도 하다. 최근 제주 연안의 마을어장은 주변 환경 변화에의해 갯녹음 확산, 해조류 군락 감소, 패류 생산량의 감소 등 어장의 생산력이 크게 감소되고 있다(JDI, 2008).

연안해역은 외해수의 유입, 강우 및 하천유입과 같은 자연적인 현상과 인위적인 활동에 의해 육상에서 공급되는 오염물질이 혼재되는 곳이다. 일반적으로 제주도 연안 해역은 다른 지역과는 다르게 서로 다른 수괴의 영향으로 인해 해수교환이 원활하고, 이로 인해 다양한 생물이 서식하는 것으로 알려져 있다(Jeju National University, 2009). 하지만 생물이 다양했던 연안의 마을어장은 현재 주변 환경의 변화로 다양성이 감소되고 있으며, 양식장의 운영에 있어서도 취수 시 사육 수조의 수질 문제가 의심되어 효율적인 취수와 배수 관리가 요구된다. 뿐만 아니라 배출구와 인접한 해역의 저층에서는 양식장에서 사용되는 사료 및 어분 등으로 추정되는 부유물이 침적되고 있어 영양염 용출과 같은 2차 요인의 문제가 제기된다(Murakami, 1998; Pitta et al., 2005). 실제로 육상 양식장으로부터 배출되는 수산용수의 확산이 연안해역 영양염의 농도를 증가시키고 있음이 연구자들에 의해 보고된 바 있다(Aure and Stigebrandt, 1990; Raczynska et al., 2012; Herbeck et al., 2013). 그러나 제주지역의 경우는 기존의 양식장 배출수와 관련된 연구의 대부분은 선박의 접근성이 어려워 배출수만을 채수하거나, 배출수와의 거리가 다소 멀어지는 경우가 많아 수질 특성에 대해 이해하기 어려운 점이 있었다(Cho et al., 2002; Jeju National University, 2002; Jeju National University, 2009; Kim et al., 2009). 또한 배출수로 인한

영양염 농도 등의 수질 변화가 예상되지만 이로 인해 나타나는 수질 특성에 관한 연구는 전무한 상황이다. 따라서 인위적인 배출행위로 인한 환경변화를 파악하기 위해서는 배출 구로부터 변화되는 수질 특성에 대한 전반적인 연구가 필요한 실정이다.

연안 해역의 생물학적 오염은 생활하수, 축산업이나 양식수 산업으로부터 배출되는 동 물의 분변, 기타 산업시설 등의 다양한 요인에 의해 발생한다(Hill et al., 2006; Lee et al., 2010; Park et al., 2013; Roh et al., 2018). 연안 해역의 오염원과 오염에 대한 영향 을 이미 파악하고 있다면 그 근원을 집중적으로 관리할 수 있을 것으로 여겨진다(Lee et al., 2008), 그러나 아직까지 연안 오염의 주요인에 대한 연구는 미미한 실정이다(Yoon, 2017; Roh et al., 2018). 특히 우리나라의 바닷가에 인접한 수산양식장으로부터 배출된 유출수가 연안 해수의 오염에 미치는 영향에 관한 연구는 비교적 최근에 발표된 것을 제 외하면 매우 제한적이다(Koh et al., 2013; Park et al., 2013; Roh et al., 2018). Koh et al. (2013)는 2010-2011년에 격월로 제주 연안의 육상양식장 인근 해역 4곳(애월, 행원, 표 선, 일과)에서 채취된 해수의 식물 플랑크톤과 영양염의 변화를 모니터링하여 2개 지역 (표선, 일과)은 양식장 배출수가 인근 연안해역의 부영양화에 영향을 줄 수 있다고 주장 하였다. 하지만 이 연구에서는 주변의 다른 여러 오염원에 대한 검토가 전혀 이루어지지 않아 수질 오염에 대한 양식장 유출수의 직접적인 영향을 판단하는 근거로는 부적절한 것으로 여겨진다. Roh et al.(2018)은 2016년 제주 지역의 양식장 밀집도와 오염지표세균 과의 상관관계를 분석하였으나 두 지표간의 연관성은 낮은 것으로 나타나 조사한 양식장 의 유출수 가 인근 해역의 오염에는 큰 영향을 미치지는 않는다고 하였다. 하지만 수산생 물 양식장이 연안 해역에 미치는 영향에 대한 보다 정확한 평가를 위해서는 국내 주요 양식장 밀집지역에 대해 정기적인 조사와 연구가 필요한 것으로 보인다.

본 연구에서는 제주도 남동쪽 표선 지역에 위치한 육상 양식장의 배출수가 인근 연안 해역에 미치는 영향을 파악하기 위하여 육상 양식장의 배출수가 위치한 해역을 중심으로 한 연안 양식장 주변 연안에서 양식장 배출수 및 연안수의 수온·염분 관측과 직접 채수를 통한 성분 분석 및 정선 관측을 수행하였다. 또한 수괴의 움직임에 따라 이동하는 해류부이를 제작하여 양식장 인근 해역에서의 해류를 관측하였다. 특히 물리해양학적 요소로 중요한 수온 및 염분에 의한 연안 수괴 조성을 수평적/연직적으로 구성하여 양식장 배출수가 유입되는 연안의 수괴의 변화를 중점적으로 분석하고자 하였다.

2. 수괴의 물리적 특성 관측

- 표선 세화항 인근 해역으로 유출되는 양식장 배출수에 의한 연안 수괴의 변화를 분석하기 위하여 2018년 3월부터 8월까지 표선 육상양식장 인근 해역에서 그림 3-1-1에 표시된 정점에 따라 월별 관측을 수행함
- 연안 정점 중 PSE01-03은 양식장 배출수가 유출되는 곳으로, 직접 배출수를 채수 함
- PSC01-04는 양식장 배출수가 유출되는 지역에 가까이 있되 양식장 배출수의 영향이 비교적 적은 지역으로, PSE에서 채수한 배출수와의 비교를 통해 양식장 배출수가 연안에 미치는 영향을 파악하기 위하여 채수함
- in port로 표기된 표선항 내 연안정점은 양식장배출수의 영향을 받지 않는 해역에 서의 해수 특성을 파악하기 위하여 채수함

○ 정선 정점인 PS01-09는 양식장 배출수가 연안으로 유입되어 전파되는 해역으로, 양식장배출수가 인근 해역에 전파되는 양상을 관측함

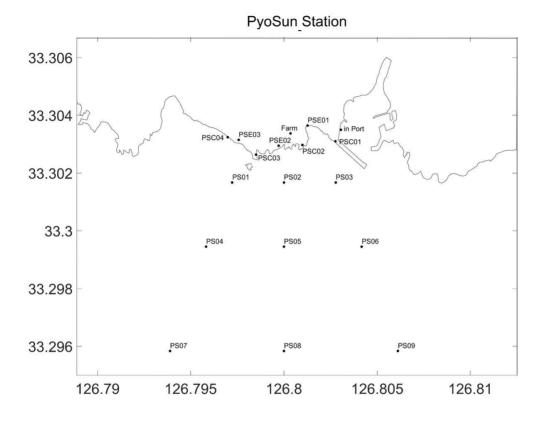


그림 3-2-1. 표선 양식장 배출구와 연안 및 정선 정점도

- 3월의 관측을 수행한 시기는 3월의 조위 변화를 나타낸 그림 3-2-2a에서 회색으로 표시된 28일임
- 당시 조위는 간만의 차이가 가장 적은 조금을 지나 간만이 증가하는 기간임
- 국립해양조사원에서 제공되는 조위 관측 자료 중 표선에서 측정되는 자료가 없어 서귀포(적색)와 성산포(청색)에서 관측되는 조위 자료의 평균을 사용함(그림 3-2-2b)
- 정선 관측을 수행한 시각은 만조에서 간조로 넘어가는, 조위가 하강하고 있는 시각 (그림 3-2-2c).

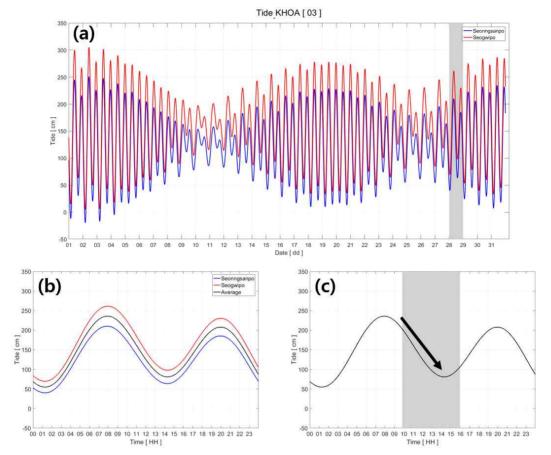


그림 3-2-2. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 3월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으로 표시하였다. 정선관측을 수행한 3월 28일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은 흑색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화(c).

- 3월 28일 PSE와 PSC 등의 연안역에서 채수를 수행하여 해당 정점에서 수온과 염 분을 관측(그림 3-2-3)
- 양식장 배출수에 가장 영향을 받지 않는, 기준이 되는 연안수의 수온과 염분을 알 기 위해 표선항 내에서 수온, 염분을 관측한 결과 수온은 17.3 °C, 염분은 34.6 psu 가 관측됨
- 양식장 배출수가 일정 시간 침전을 거친 후 배출되도록 하는 침전지에서의 수온과 염분을 관측한 결과, 수온은 16.8 °C, 염분은 27.8 psu가 관측됨
- 3월 연안 관측에서 양식장 배출수가 유출되는 PSE01에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 16.6 °C, 염분은 31.8 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 유출되는 PSE02에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 16.2 °C, 염분은 28.8 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 유출되는 PSE03에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 15.7 °C, 염분은 33.9 psu가 관측됨
- 인근 연안역인 PSC01에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 16.1 °C, 염분은 34.1 psu이 관측됨

- 인근 연안역인 PSC02에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 16.1 °C, 염분은 34.3 psu이 관측됨
- 인근 연안역인 PSC03에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 17.1 °C, 염분은 34.4 psu이 관측됨
- 인근 연안역인 PSC04에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 16.4 °C, 염분은 34.3 psu이 관측됨

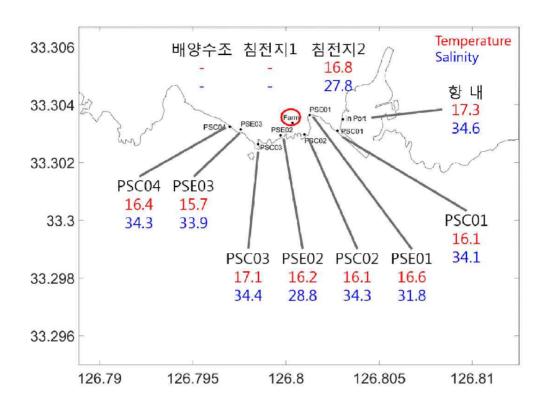


그림 3-2-3. 3월 28일 양식장 배출수 및 양식장 배출수 인근 연안수의 수온(적색)과 염분(청색)

- 3월 정선관측에서 CTD를 통해 수행된 수온 염분의 시간별 표층분포(그림 3-2-4)에서 9시 50분의 표층수온은 PS02, 03, 06의 정점들이 15.5~15.6 °C의 수온을 나타내며 나머지 정점이 나타내는 15~15.2 °C의 수온에 비해 비교적 높은 수온을 나타냄
- 9시 50분의 표층염분은 표층수온과 상반되는 양상을 나타내는데, PS02, 03, 06의 정점들이 34 psu 이하의 염분을 보이며 외해에 위치한 대부분의 정점이 34.3~34.6 psu의 염분을 나타냄
- 12시 30분의 표층수온은 연안에 가까운 PS01, 02, 03의 정점들에서 16~16.5 °C의 수온을 보이며 외해에 위치한 나머지 정점이 나타내는 15.2~15.6 °C의 수온에 비해 높은 수온을 나타냄
- 12시 30분의 표층염분은 표층수온과 상반되는 양상을 나타내는데, 연안에 가까운 PS01, 02, 03의 정점들이 34 psu 이하의 염분을 보이며 외해에 위치한 나머지 정점

- 이 나타내는 34.3~34.6 psu의 염분에 비해 낮은 염분을 나타냄
- 15시 10분의 표층수온은 연안에 가까운 PS01, 02, 03의 정점들에서 16~16.5 °C의 수온을 보이며 외해에 위치한 나머지 정점이 나타내는 15.5~15.8 °C의 수온에 비해 높은 수온을 나타냄
- 15시 10분의 표층염분은 표층수온과 상반되는 양상을 나타내는데, 연안에 가까운 PS01, 02, 03의 정점들이 34 psu 이하의 염분을 보이며 외해에 위치한 나머지 정점이 나타내는 34.2~34.5 psu의 염분에 비해 낮은 염분을 나타냄

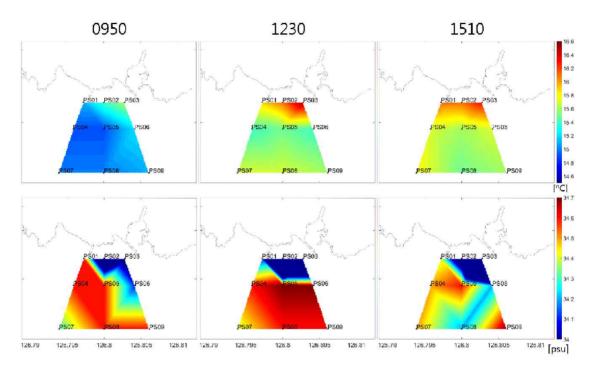


그림 3-2-4. 3월 28일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분 (하단)의 표층 분포

- 3월 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 수온의 시간별 수 직분포(그림 3-2-5)에서 9시 50분의 수온 수직분포는 대부분이 15 °C 이하의 수온을 나타내고 있으며, 연안 인근의 PS02, 03에서 15.5 °C 이상의 수온이 나타남
- 12시 30분의 수온 수직분포는 대부분의 정점라인에서 표층 3m 이내에서 15.4 °C 이상의 수온 상승이 일어났으며 연안에 가까울수록 수온이 높음
- 15시 10분의 수온 수직분포에서는 표층 5m 이상의 깊이에서 15.5 °C 이상의 수온 이 나타나며 연안에 가까울수록 수온이 높음

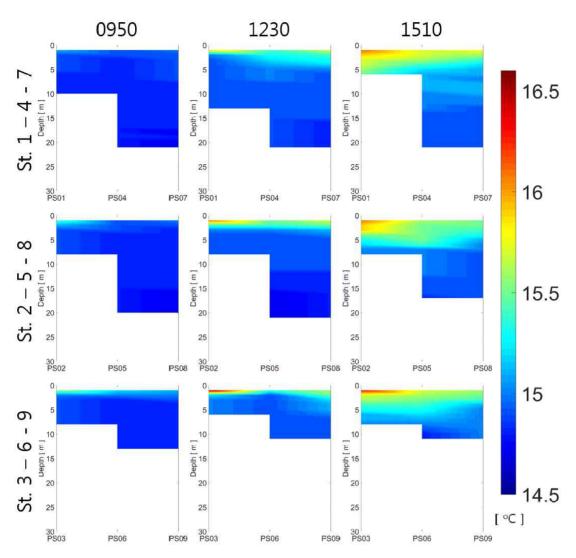


그림 3-2-5. 3월 28일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분포

- 3월 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 염분의 시간별 수 직분포(그림 3-2-6)에서 9시 50분의 염분 수직분포는 대부분이 34.5 psu 이상의 염분을 나타내고 있으며, PS02, 03, 06에서 34.1 psu 이하의 염분이 나타남
- 12시 30분의 염분 수직분포는 대부분의 정점라인에서 표층 3m 이상의 수심에서 34.7 psu 이상의 염분 상승이 일어났으며 연안에 가까울수록 염분이 낮음
- 15시 10분의 염분 수직분포에서는 표층 5m 정도의 깊이에서 34.5 psu 이하의 염분 분포가 나타나며 연안에 가까울수록 염분이 낮음

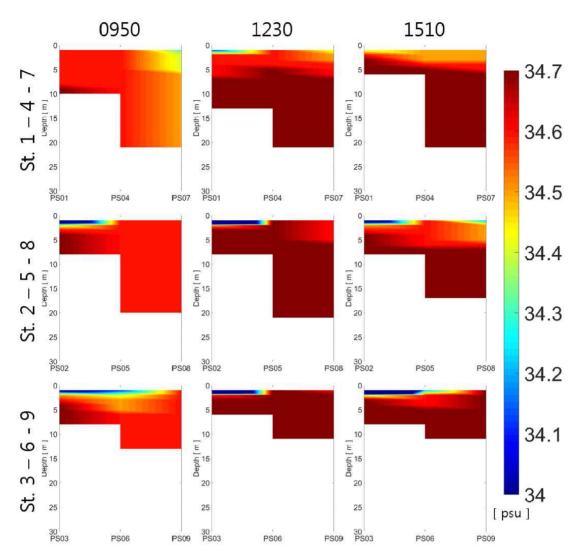


그림 3-2-6. 3월 28일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분포

- 그림 3-2-6-1은 정선관측을 수행하는 동안 해류에 의해 움직이는 부이를 통해 획득한 해류의 움직임을 나타낸 그림으로, 부이의 투하 시작은 삼각형으로, 부이의 수 거 위치는 네모로 표시함
- 해류부이는 12시 26분에 투하하여 16시 07분에 수거함
- 조위가 감소하며 다시 상승하는 동안 지속적으로 동쪽으로 이동한다.
- 해류부이는 해안선에 가까울수록 해안선과 유사한 이동궤적을 그리며 이동하며 이 동속도 또한 빨라짐

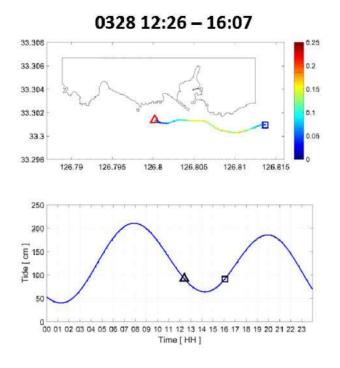


그림 3-2-7. 3월 28일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안의 조위 변화

- 4월의 관측을 수행한 시기는 4월의 조위 변화를 나타낸 그림 3-2-7a에서 회색으로 표시된 19일과 20일임
- 당시 조위는 간만의 차이가 가장 큰 사리를 지나 간만이 줄어드는 기간임
- 서귀포(적색)와 성산포(청색)에서 관측되는 조위 자료의 평균을 사용함(그림 3-2-7b)
- 정선 관측을 수행한 시각은 간조에서 만조로 넘어가는, 조위가 상승하고 있는 시각 임(그림 3-2-7c)

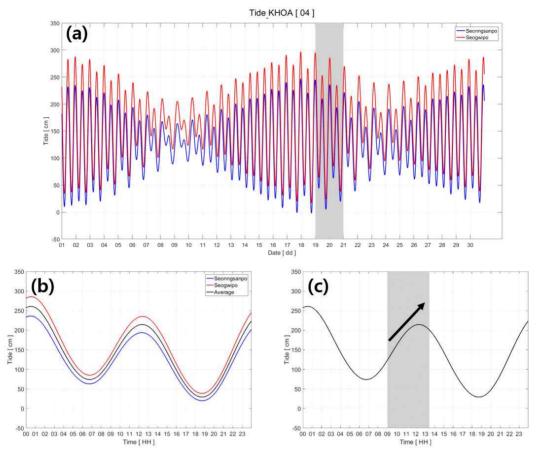


그림 3-2-8. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 4월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으로 표시하였다. 정선관측을 수행한 4월 20일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은 흑색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화(c).

- 4월 19일 PSE와 PSC 등의 연안역에서 채수를 수행하여 해당 정점에서 측정된 수 온과 염분을 그림 3-2-8에 표시함
- 양식장 배출수에 가장 영향을 받지 않는 표선항 내에서 수온 염분을 관측한 결과 수온은 19.7 °C, 염분은 34.8 psu가 관측됨
- 양식장에서 사용되는 양식용수의 수질특성을 파악하기 위해 배양수조 내의 사육수 의 수온과 염분을 관측한 결과, 수온은 16.8 °C, 염분은 27.8 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 일정 시간 침전을 거친 후 배출되도록 하는 침전지에서의 수온과 염분을 관측한 결과, 침전지1에서의 수온은 16.8 °C, 염분은 28.3 psu 이며, 침전지2에 서의 수온은 16.9 °C, 염분은 28.4 psu 임
- 4월 연안 관측에서 양식장 배출수가 유출되는 PSE01에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 17.7 °C, 염분은 32.1 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 유출되는 PSE02에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 16.5 °C, 염분은 29.2 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 유출되는 PSE03에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 16.5 °C, 염분은 34.0 psu가 관측됨

- 인근 연안역인 PSC01에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 17.2 °C, 염분은 34.2 psu이 관측됨
- 인근 연안역인 PSC02에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 17.0 °C, 염분은 34.6 psu이 관측됨
- 인근 연안역인 PSC03에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 17.0 °C, 염분은 34.6 psu이 관측됨
- 인근 연안역인 PSC04에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 16.8 °C, 염분은 34.0 psu이 관측됨

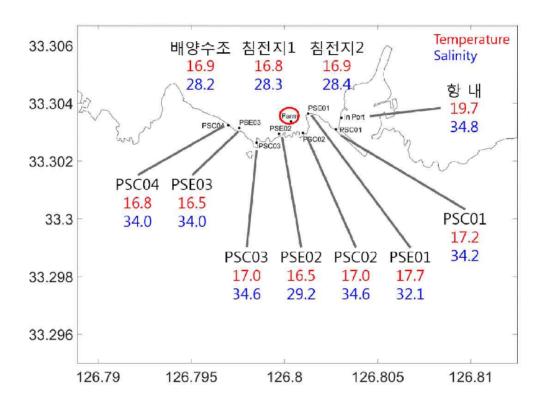


그림 3-2-9. 4월 19일 양식장 배출수 및 양식장 배출수 인근 연안수의 수온(적색)과 염분(청색)

- 4월 19일 정선관측에서 CTD를 통해 수행된 수온 염분의 시간별 표층분포(그림 3-2-9)에서 9시 50분의 표층수온은 PS01, 05, 09의 정점들이 15.8 °C 이하의 수온을 나타내며 나머지 정점이 나타내는 16 °C 이상의 수온을 나타냄
- 9시 50분의 표층염분의 분포가 표층수온과는 약간의 차이를 나타내는데, 외해의 PS07, 08, 09의 정점들은 34.5 psu 이상, PS03, 04에서 34.3 psu 정도의 염분을 보임

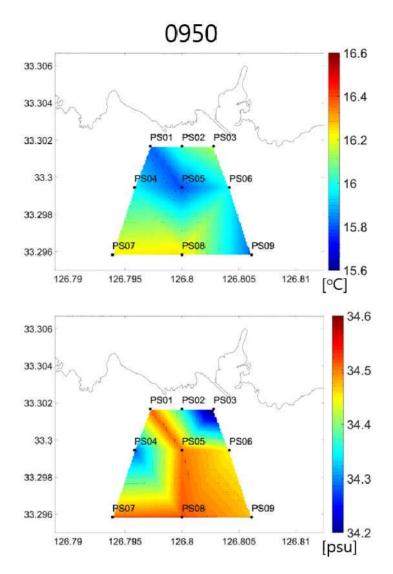


그림 3-2-10. 4월 19일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염 분(하단)의 표층 분포

- 4월 20일 정선관측에서 CTD를 통해 수행된 수온 염분의 시간별 표층분포(그림 3-2-10)에서 9시의 표층수온은 대부분의 정점들이 15.6 °C 이하의 수온을 나타냄
- 9시의 표층염분은 표층수온과 유사하게 대부분의 정점들이 34.5 psu 이상의 염분을 나타냄
- 10시의 표층수온은 정선해역 서쪽의 PS01, 04, 07과 연안에 가까운 PS02에서 16 °C 정도의 수온을 보이며 외해에 위치한 나머지 정점이 나타내는 15.6 °C 이하의 수 온에 비해 높은 수온을 나타냄
- 10시의 표층염분은 표층수온과 상반되는 양상을 나타내는데, PS02, 03, 04에서 34.4 psu 이하의 염분이 나타나고 나머지 정점에서는 34.5 psu 이상의 염분을 나타냄
- 11시 15분의 표층수온은 연안에 가깝고 연구해역의 서쪽인 정점(PS01)에서 16.3 °C 이상의 수온이 나타나며 외해에 가깝고 연구해역의 동쪽인 정점(PS09)에서 15.6 °C

이하의 수온이 나타남

- 11시 15분의 표층염분은 표층수온과 상반되는 양상을 나타내는데, 연안에 가깝고 연구해역의 서쪽인 정점(PS01)에서 34.3 psu 이하의 염분이 나타나며 외해에 가깝고 연구해역의 동쪽인 정점(PS09)에서 34.5 psu 정도의 염분이 나타남
- 12시 30분의 표층수온은 외해의 정점에서는 16 °C 이하의 수온이 분포하며 그 외 의 정점에서는 16.4 °C 이상의 수온이 나타남
- 12시 30분의 표층염분은 표층수온과 상반되게 외해의 정점들에서는 34.5 psu 이상 의 염분이 분포하며 연안에서는 34.2~34.3 psu의 염분값이 나타남

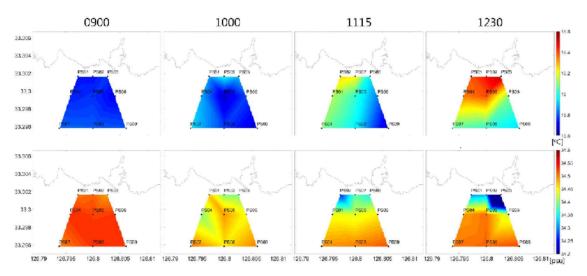


그림 3-2-11. 4월 20일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염 분(하단)의 표층 분포

- 4월 20일 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 수온의 시간 별 수직분포(그림 3-2-11)에서 9시의 수온 수직분포는 대부분이 15.6 °C 이하의 수온 을 나타냄
- 10시의 수온 수직분포는 서쪽 정점라인(St. 1-4-7)과 연안에서 표층 3m 이내에서 15.8 °C 이상의 수온이 분포함
- 11시 15분의 수온 수직분포에서는 연안에 가까울수록 수온이 높은 양상을 보였으며(16.2°C 이상) 표층 3m 이내의 깊이에서 16°C 이상의 수온이 분포함
- 12시 30분의 수온 수직분포는 정선관측 중앙 정점(PS02, 05, 08)에까지 16.4 °C 이 상의 수온이 표층에 분포하며 표층 5m 이내의 수심에서 대부분의 수온이 16.1 °C 이 상을 나타냄

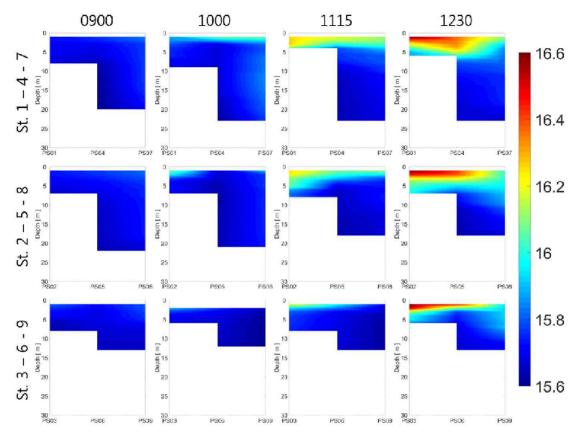


그림 3-2-12. 4월 20일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분 포

- 4월 20일 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 염분의 시간 별 수직분포(그림 3-2-12)에서 9시의 염분 수직분포는 대부분이 34.5 psu 이상의 염분을 나타냄
- 10시의 염분 수직분포는 연안에서 34.4 psu 이하의 염분이 분포하고 중앙정점인 PS04에서 34.3 psu 이하의 염분이 표층 2m 이내의 수심에서 관측됨
- 11시 15분의 염분 수직분포에서는 연안에 가까울수록 염분이 낮아지며(34.35 psu 이하) 연안에서 표층 5m 이내의 수심까지 염분 변화가 나타남
- 12시 30분의 염분 수직분포는 연안에서는 34.3 psu 이하의 염분이 표층 3m 이내의 수심에 분포하며 PS06의 중앙 정점에서는 34.2 psu 이하의 염분이 관측됨

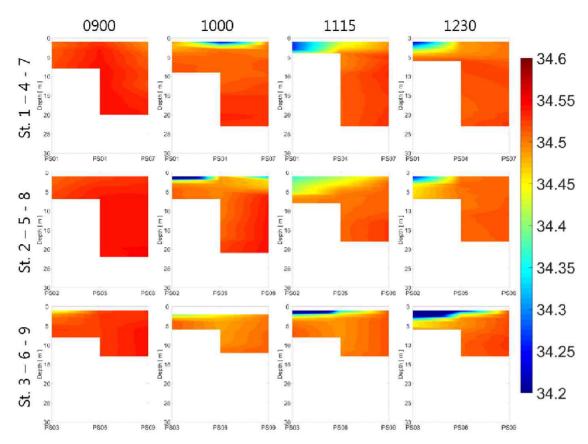


그림 3-2-13. 4월 20일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분 포

- 4월 19일 정선관측을 수행하는 동안 해류에 의해 움직이는 부이를 통해 획득한 해류의 움직임(그림 3-2-12-1)에서 부이의 투하 시작은 삼각형으로, 부이의 수거 위치는 네모로 표시하였다.
- 해류 부이는 13시 24분에 투하하여 14시 20분에 수거함
- 조위가 감소하는 동안 해류부이는 방파제를 따라 동쪽을 향해 0.1 m/s 의 속도로 이동하였는데, 방파제 끝에서 0.2 m/s 이상의 매우 빠른 속도로 동쪽을 향해 움직임

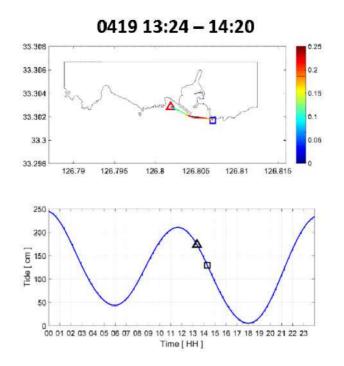


그림 3-2-14. 4월 19일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안의 조 위 변화

- 4월 20일 해류에 의해 움직이는 부이를 통해 획득한 해류의 움직임(그림 3-2-12-2)에서 부이의 투하 시작은 삼각형으로, 부이의 수거 위치는 네모로 표시하였다.
- 해류 부이의 투하는 총 3번 수행되었다.
- 첫 번째 해류부이의 투하는 08시 51분에 시작하여 11시 02분에 부이를 수거하였으며, 조위가 상승하는 2시간 11분 동안 해류부이는 동쪽에서 서쪽으로 이동하였으며 평균 0.15 m/s 이상의 이동속도를 나타냄
- 두 번째 해류부이는 11시 14분부터 11시 50분, 36분 동안 이동하였다. 만조에 가까워진 조위에서 해류부이는 평균 이동속도 0.1 m/s 이상으로 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 모습을 나타냄
- 세 번째 해류부이는 조위가 감소하는 동안 동쪽으로 이동하였다. 투하 초반 0.1 m/s 정도의 이동속도를 보이던 해류 부이는 해안선에 가까워질수록 빨라지며 동쪽으로 0.25 m/s 이상의 속도로 이동함

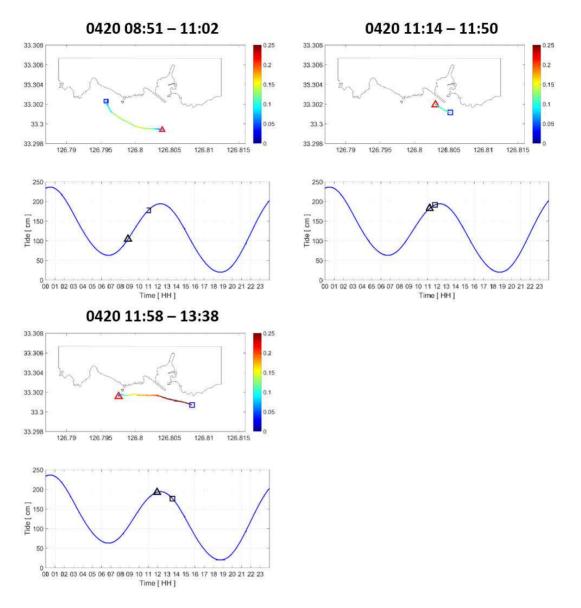


그림 3-2-15. 4월 20일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안의 조 위 변화

- 6월의 관측을 수행한 시기는 6월의 조위 변화를 나타낸 그림 3-2-13a에서 회색으로 표시된 2일과 3일임
- 당시 조위는 간만의 차이가 가장 적은 조금에 가까운 간만이 최소에 가까운 기간 임
- 서귀포(적색)와 성산포(청색)에서 관측되는 6월 3일 조위 자료의 평균을 사용함(그 림 3-2-13b)
- 6월 정선 관측을 수행한 시각은 만조를 중심으로 조위가 상승하다 하강하고 있는 시각임(그림 3-2-13c)

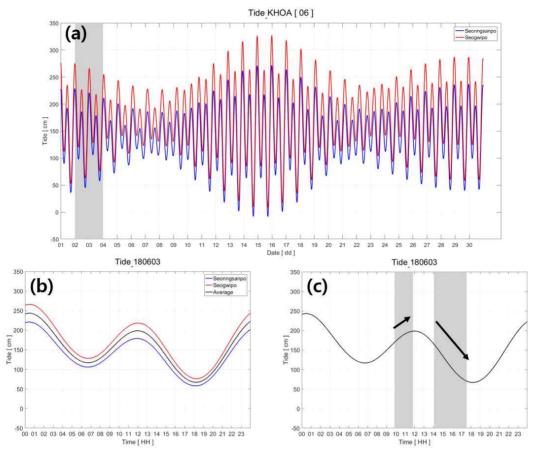


그림 3-2-16. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 6월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으로 표시하였다. 정선관측을 수행한 6월 3일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은 흑색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화(c).

- 6월 2일 PSE와 PSC 등의 연안역에서 채수를 수행하여 해당 정점에서 측정된 수 온과 염분(그림 3-2-14.) 중 양식장 배출수에 가장 영향을 받지 않는 표선항 내에서 수온 염분을 관측한 결과 수온은 24.8 °C, 염분은 34.5 psu가 관측됨
- 양식장에서 사용되는 양식용수의 수질특성을 파악하기 위해 배양수조 내의 사육수의 수온과 염분을 관측한 결과, 수온은 20.4 °C, 염분은 28.4 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 일정 시간 침전을 거친 후 배출되도록 하는 침전지에서의 수온과 염분을 관측한 결과, 침전지1에서의 수온은 18.2 °C, 염분은 28.1 psu 이며, 침전지2에 서의 수온은 18.5 °C, 염분은 28.2 psu 임
- 6월 연안 관측에서 양식장 배출수가 유출되는 PSE01에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 18.9 °C, 염분은 31.7 psu가 관측됨
- \circ 양식장 배출수가 유출되는 PSE02에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 18.5 °C, 염분은 28.2 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 유출되는 PSE03에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 19.3 °C, 염분은 33.0 psu가 관측됨
- 인근 연안역인 PSC01에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 20.4 °C, 염분은

33.4 psu이 관측됨

- 인근 연안역인 PSC02에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 20.7 °C, 염분은 33.6 psu이 관측됨
- 인근 연안역인 PSC03에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 20.5 °C, 염분은 33.8 psu이 관측됨
- 인근 연안역인 PSC04에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 21.2 °C, 염분은 33.5 psu이 관측됨

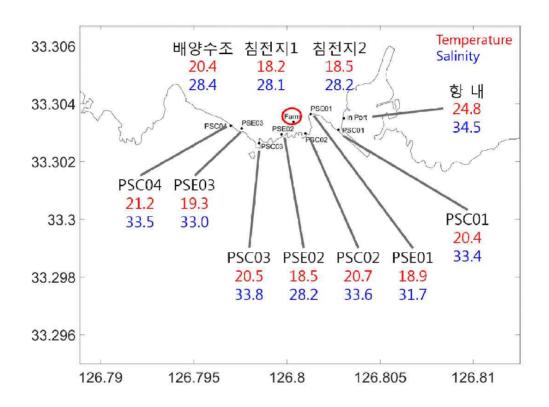


그림 3-2-17. 6월 2일 양식장 배출수 및 양식장 배출수 인근 연안수의 수온(적색)과 염분(청색)

- 6월 2일 정선관측에서 CTD를 통해 수행된 수온 염분의 시간별 표층분포(그림 3-2-15)에서 9시 50분의 표층수온은 PS01을 제외한 연안과 서쪽의 정점들이 20.1 °C 이상의 수온을 나타내고, 나머지 정점이 나타내는 19.5~19.7 °C의 수온을 나타냄
- 9시 50분의 표층염분은 표층수온과 유사한 양상을 나타내는데, 연안과 서쪽 정점들은 33.5 psu 이상의 염분을 나타내고, 나머지 정점들은 33.4 psu 정도의 염분을 나타낸다. PS01의 경우 33.2 이하의 비교적 낮은 염분을 나타냄
- 16시의 표층수온은 중앙의 PS04, 05의 정점에서 비교적 낮은 수온(19.6 °C 이하)과 PS02, 03과 PS07에서 비교적 높은 수온(20.1 °C 이상)이 대조되어 나타남
- 16시의 표층염분은 표층수온과 상반되는 경향을 나타내었으며 중앙의 PS04, 05의

정점에서 비교적 높은 염분(33.6 psu 이상)과 PS02, 03(33.2 psu 이하) 및 PS07(33.4 psu 이하)의 비교적 낮은 염분이 분포함

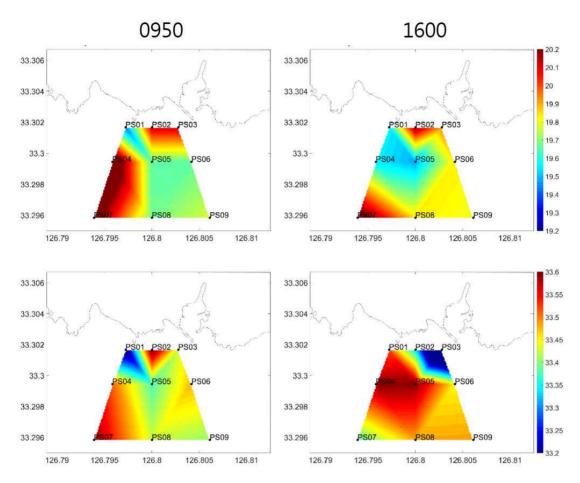


그림 3-2-18. 6월 2일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분 (염분)의 표층 분포

- 6월 3일 정선관측에서 CTD를 통해 수행된 수온 염분의 시간별 표층분포(그림 3-2-16)에서 9시 50분의 표층수온은 연안의 정점에서 19.6~19.8 °C 이하의 수온이 분 포해있으며, 외해의 정점에서는 20.3~20.5 °C의 수온을 나타냄
- 9시 50분의 표층염분은 표층수온과 유사한 양상을 보이며, 외해 정점에서의 염분 (33.4 psu 이상)이 연안 정점에서의 염분(33.2~33.3 psu 이상)보다 높은 경향을 보임
- 10시 50분의 표층수온은 연안의 정점에서 19.8.0~20.0 °C 이하의 수온이 분포해있으며, 외해의 정점에서는 20.0~20.2 °C의 수온을 나타낸다. 표층수온이 가장 높은 PS04에서는 20.5 °C를 나타냄
- 10시 50분의 표충염분은 표충수온과 유사한 양상을 보이며, 외해 정점에서의 염분 (33.5 psu 이상)이 연안 정점에서의 염분(33.3 psu 이하)보다 높은 경향을 보임
- 14시의 표층수온은 연안과 중간의 정점에서는 19.5~20 °C, 외해의 정점에서는 20.5~21 °C의 수온이 분포하며 연안과 외해의 수온 분포가 뚜렷이 대비되는 양상을

나타냄

- 14시의 표층염분은 외해 정점에서의 염분(33.4 psu 이상)이 연안 정점에서의 염분 (33.2 psu 이하)보다 높은 경향을 보임
- 15시의 표층수온은 PS03에서 나타나는 19.5 °C 의 비교적 낮은 수온을 제외하면 대부분의 표층수온이 20.0~20.4 °C의 분포를 나타냄
- 15시의 표층염분은 외해 정점에서의 염분(33.4 psu 이상)이 연안 정점에서의 염분 (33.3 psu 이하)보다 높은 양상을 나타냄
- 16시의 표층수온은 PS01에서 나타나는 20.5 °C 의 비교적 높은 수온을 제외하면 대부분의 표층수온이 20.0~20.2 °C의 분포를 나타냄
- 16시의 표층염분은 33.1 psu 이하의 비교적 낮은 염분이 관측된 PS03을 제외한 대부분의 정점에서 33.3~33.4 psu의 분포를 보임
- 17시의 표층수온은 동쪽 중앙 정점인 PS06에서 나타나는 20.0 °C 이하의 비교적 낮은 수온에서 서쪽으로 갈수록 높은 수온을 보이는 양상을 나타내며, 외해 서쪽 정점인 PS07에서 20.5 °C 이상의 수온을 나타냄
- 17시의 표층염분은 표층수온과 상반되는 양상을 보이는데 동쪽 중앙 정점인 PS06에서 나타나는 33.5 psu 이상의 비교적 높은 염분에서 서쪽으로 갈수록 낮은 염분을 보이는 경향을 보이며, 외해 서쪽 정점인 PS07에서 33.0 psu 이하의 염분을 나타냄

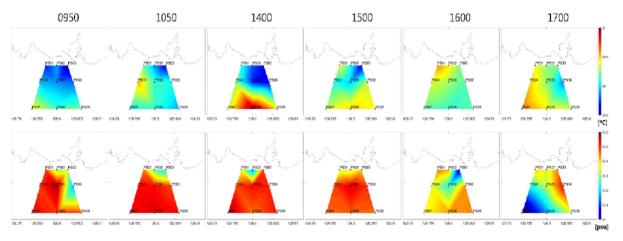


그림 3-2-19. 6월 3일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분 (하단)의 표층 분포

- 6월 3일 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 수온의 시간별수직분포(그림 3-2-17)에서 10시의 수온 수직분포는 표층에서 20 °C 이상의 수온과 표층 10m 이상의 수심에서 19 °C 이하의 수온 분포를 나타냄
- 10시의 표층부터 10m 수심까지 비교적 완만한 수온 변화가 나타나며 연안보다 외해에서 더 깊은 수심까지 고온이 분포함
- 11시의 수온 수직분포에서 표층에서 대부분이 20 °C 이상의 수온을 나타내며 St.1-4-7에서는 수심 15m 이상으로 완만한 수온 변화를 나타냄

- 14시의 수온 수직분포에서 20 °C 이상의 수온을 나타내는 표층수가 3m 이내로 줄 어들었으며, 수심에 따른 수온 변화 또한 수심 5m 이내의 범위에서 급격하게 일어남 15시의 수온 수직분포에서 연안보다 외해에서 고온이 더욱 깊은 수심에 분포하는 양상을 보이며 연안에서는 수심 5m 이내, 외해에서는 수심 10m 정도까지 20 °C 의수온이 관측됨
- 16시의 수온 수직분포에서 수심 10m 이내의 대부분의 수괴에서 20 °C 이상의 표층 수온을 나타내며 외해보다 연안에서 더욱 깊은 수심까지 고온이 분포하는 양상을 보임
- 17시의 수온 수직분포에서 수심 3m 이내의 범위에서 20 $^{\circ}$ C 이상의 수온이 나타나 며 외해에서 더 깊은 곳까지 수온의 변화가 나타남

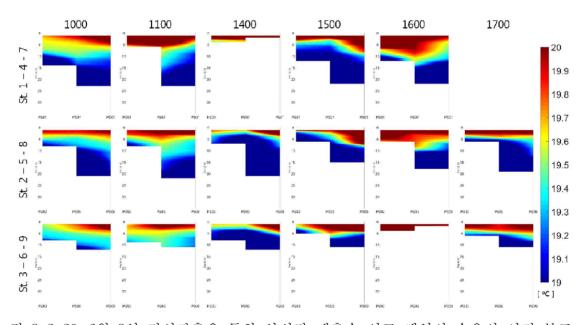


그림 3-2-20. 6월 3일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분포

- 6월 3일 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 염분의 시간별수직분포(그림 3-2-18)에서 10시의 염분 수직분포는 33.6 psu 이상의 염분이 대부분의 수층에서 관측되며 표층에 비교적 저염분의 수괴가 위치함
- 가장 낮은 염분은 나타내는 St. 3-6-9에서는 중간 정점인 PS06까지 33.2 psu 이하의 염분이 관측됨
- 수심 10m까지 염분의 변화가 나타나며 PS05에서는 8-9m 사이에 비교적 저염분의 수괴가 존재하며, 염분의 변화는 외해보다는 연안에 가까운 정점에서 더 많이 나타남 11시의 염분 수직분포는 PS03에서 가장 큰 변화를 나타나며 33.2 psu 이하의 염분이 15m 이상의 수심까지 영향을 미치고 있으며, 염분의 변화는 외해보다는 연안에 가까운 정점에서 더 많이 나타남
- 14시의 염분 수직분포는 PS02의 표층에서 33.2 psu 이하의 수괴가 나타나며 수심 에 따른 염분의 변화가 매우 적은 것으로 나타남

- 15시의 염분 수직분포는 연안(수심 5m 이내)보다는 외해(수심 10m 이내)의 정점에서 더 깊은 수심까지 염분의 변화가 일어나지만 염분의 변화폭은 연안(33.4 psu 이하)에서 더 크게 나타나는 것으로 나타남
- 16시의 염분 수직분포는 수심 5m 이내에서 염분 변화가 나타나며 수심에 따른 염분 변화는 연안(33.4 psu 이상)보다 외해(33.2 psu 이하)에서 더 크게 일어나는 경향을 보임

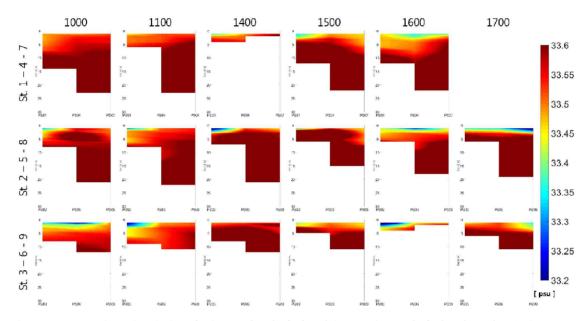


그림 3-2-21. 6월 3일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분포

- 6월 3일 해류에 의해 움직이는 부이를 통해 획득한 해류의 움직임(그림 3-2-18-1) 에서 부이의 투하 시작은 삼각형으로, 부이의 수거 위치는 네모로 표시함
- 해류 부이의 투하는 총 3번 수행됨
- 첫 번째 해류부이의 투하는 09시 49분에 시작하여 11시 44분에 부이를 수거하였으며, 조위가 거의 만조에 머무르는 동안 해류부이는 0.05 m/s 이하의 이동속도로 이동하며 큰 움직임을 나타내지 않음
- 두 번째 해류부이는 만조에서 조위가 하강하는 동안 평균 0.1 m/s의 이동속도로 동쪽에서 서쪽으로 이동하며 해안선을 타고 외해 쪽으로 빠져나가는 이동궤적을 나타냄
- 세 번째 해류부이는 조위가 하강하는 동안 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 궤적을 나타내며, 해안선을 따라 움직이는 해류부이는 방파제를 따라 움직이는 구간을 제외하면 평균 0.15 m/s 이상의 이동속도를 나타내며 이동함

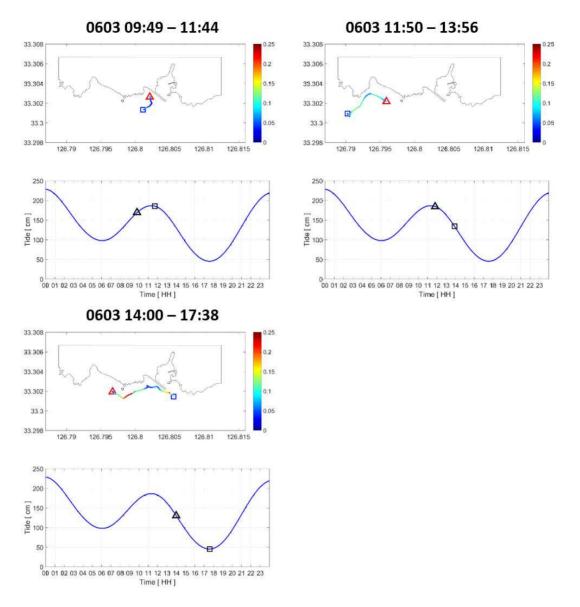


그림 3-2-22. 6월 3일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안의 조위 변화

- 7월의 관측을 수행한 시기는 7월의 조위 변화를 나타낸 그림 3-2-19a에서 회색으로 표시된 4일과 5일임
- 당시 조위는 간만의 차이가 가장 적은 조금에 가까운 간만이 최소에 가까운 기간 임
- 서귀포(적색)와 성산포(청색)에서 관측되는 7월 5일 조위 자료의 평균을 사용함(그 림 3-2-19b)
- 7월 정선 관측을 수행한 시각은 만조를 중심으로 조위가 하강하고 있는 시각임(그 림 3-2-19c)

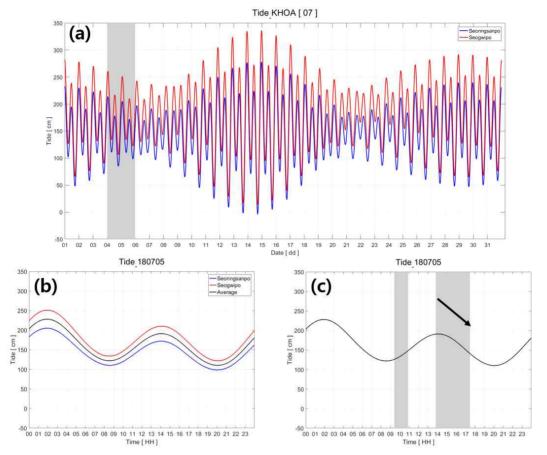


그림 3-2-23. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 7월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으로 표시하였다. 정선관측을 수행한 7월 5일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은 흑색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화(c).

- 7월 4일 PSE와 PSC 등의 연안역에서 채수를 수행하여 해당 정점에서 측정된 수 온과 염분(그림 3-2-20)에서 양식장 배출수에 가장 영향을 받지 않는 표선항 내에서 수온 염분을 관측한 결과 수온은 24.8 °C, 염분은 32.7 psu가 관측됨
- 양식장에서 사용되는 양식용수의 수질특성을 파악하기 위해 배양수조 내의 사육수 의 수온과 염분을 관측한 결과, 수온은 18.9 °C, 염분은 24.3 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 일정 시간 침전을 거친 후 배출되도록 하는 침전지에서의 수온과 염분을 관측한 결과, 침전지1에서의 수온은 19.2 °C, 염분은 24.9 psu 이며, 침전지2에 서의 수온은 18.9 °C, 염분은 24.5 psu 임
- 6월 연안 관측에서 양식장 배출수가 유출되는 PSE01에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 20.1 °C, 염분은 27.3 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 유출되는 PSE02에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 20.3 °C, 염분은 26.7 psu가 관측됨
- 양식장 배출수가 유출되는 PSE03에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 22.2 °C, 염분은 31.5 psu가 관측됨
- 인근 연안역인 PSC01에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 23.5 °C, 염분은

32.5 psu이 관측됨

- 인근 연안역인 PSC02에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 23.8 °C, 염분은 32.5 psu이 관측됨
- 인근 연안역인 PSC03에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 23.8 °C, 염분은 32.7 psu이 관측됨
- 인근 연안역인 PSC04에서 수질 특성을 관측하였을 때, 수온은 23.3 °C, 염분은 32.5 psu이 관측됨

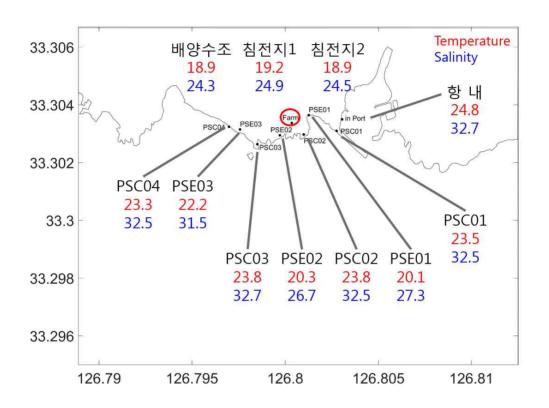


그림 3-2-24. 7월 4일 양식장 배출수 및 양식장 배출수 인근 연안수의 수온과 염분

- 7월 4일 정선관측에서 CTD를 통해 수행된 수온 염분의 시간별 표층분포(그림 3-2-21)에서 13시 50분의 표층수온은 연안과 외해에서 23.1 °C 이하의 표층수온이 나타나지만 중간 정점에서는 23.7 °C 이상의 수온이 나타남
- PS09에서는 독특하게 23.8 °C 이상의 수온이 나타남
- 13시 50분의 표층염분은 정선 정점 중 중앙과 북서쪽에 이르는 PS01, 02, 04, 05에 서 32.4 psu 이하의 염분이 분포하며 가장 높은 염분은 PS07에서 32.7 psu 이상이 나타남

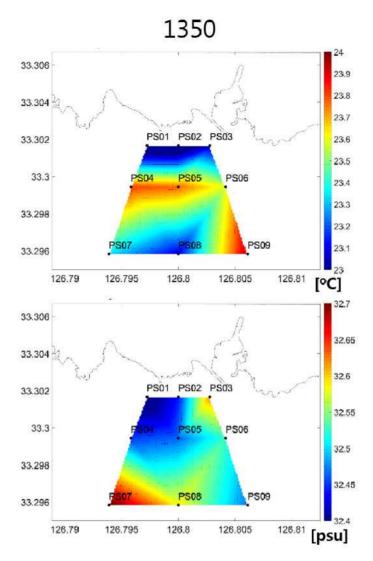


그림 3-2-25. 7월 4일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분 (하단)의 표층 분포

- 7월 5일 정선관측에서 CTD를 통해 수행된 수온 염분의 시간별 표층분포(그림 3-2-22)에서 09시 30분의 표층수온은 연안에서 22 °C 이하의 수온이 분포하며 PS07에서 연안 정점과 유사한 수온을 제외하면 상대적으로 외해의 표층수온이 더 높은 경향을 나타냄
- 09시 30분의 표층염분은 연안이 외해보다 상대적으로 낮은 값을 나타내는 표층수 온과 유사한 경향을 나타내었으나 PS07에서의 염분은 32.5 psu 이상으로 더 높은 값 을 나타내며 표층수온과 상반되는 경향을 나타냄
- 10시 30분의 경우 관측 자료가 부족하지만 PS08과 PS03-06-09의 정점 라인의 비교에서 표층수온과 표층염분이 상반되는 경향을 나타냄
- 14시의 표층수온은 연안 정점인 PS03에서 비교적 가장 낮은 수온(22.3 °C 이하)이 나타나며 외해로 갈수록 수온이 상승하는 경향이 나타남(23.0 °C 이상)

- 14시의 표층염분 또한 유사하게 PS03에서 가장 낮은 염분(32.1 psu 이하)이 나타났으나 동쪽 중앙의 PS06에서 표층염분이 상대적으로 가장 높음(32.4 psu 이상)
- 15시의 표층수온에서 연안 정점인 PS03에서 가장 낮은 수온(22.6 °C 이하)이 관측 되었으며 PS07로 갈수록 수온이 상승하는 경향을 나타냄(23.1 °C 이상)
- 15시의 표층염분은 PS03 또한 낮은 염분을 나타내지만 두드러지는 수준은 아니며 대부분의 정점에서 32.35~32.4 psu의 염분을 나타냄
- 16시의 표층수온은 연안 정점인 PS03에서 비교적 가장 낮은 수온(22.5 °C 이하)이 나타나며 외해로 갈수록 수온이 상승하는 경향이 나타남(23.2 °C 이상)
- 16시의 표층염분 또한 유사하게 PS03에서 가장 낮은 염분(32.2 psu 이하)이 나타나지만 서쪽 연안 정점인 PS01에서 표층염분이 상대적으로 가장 높았으며(33.4 psu 이상), 중앙 및 외해의 정점에서도 동쪽에서 서쪽으로 갈수록 염분이 높아지는 경향이나타났으나 연안에서의 구배가 가장 뚜렷함
- 17시의 표층수온은 연안에서 22.7 이하의 표층수온이 분포하여 외해로 갈수록 표층 수온이 상승하는 양상을 나타냄
- 17시의 표층염분의 경우 전 정점에 뚜렷한 경향은 나타나지 않으며 32.3~32.35 psu 의 범위의 염분값이 분포함

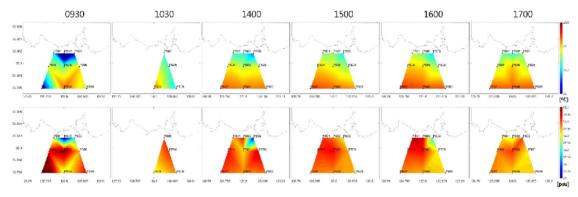


그림 3-2-26. 7월 5일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분 (하단)의 표층 분포

- 7월 5일 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 수온의 시간별 수직분포(그림 3-2-23)에서 09시 30분의 수온 수직분포에서 대부분의 정점 중 10m 이상의 수심에서 19 °C 이하의 수괴가 관측되었으며 22.5 °C 이상의 표층수온이 관측되었다.
- 09시 30분의 수온 수직분포에서 St.2-5-8은 연안보다는 외해에서 더 깊은 수심까지 비교적 높은 수온이 관측되었으나 나머지 정점선에서는 중간 정점에서 가장 깊은 수심까지 표층수온과 유사한 수온이 관측됨
- 14시의 수온 수직분포에서 수심 15m 이내의 수괴가 22.5 °C 이상의 수온을 나타내고 있으며 표층에서는 외해 정점에서 23.5 °C 이상의 수온이 관측됨
- 14시의 수온 수직분포 중 20m 이상의 수심에서 21 °C 이하의 수온이 관측되며 외

해 정점보다 중간 정점에서 수온 변화가 더 잘 나타남

- 15시의 수온 수직분포에서 수심 15m 이내의 대부분의 수괴가 22.5 °C 이상의 수온 을 나타내고 있으며 표층에서는 외해 정점에서 23.5 °C 이상의 수온이 관측됨
- 15시의 수온 수직분포 중 20m 이상의 수심에서 21 $^{\circ}$ C 이하의 수온이 관측되며 14 시와는 반대로 중간 정점보다 외해 정점에서 수온 변화가 더 잘 나타남
- 16시의 수온 수직분포에서는 수심 10m 이내의 수괴가 22.5 °C 이상의 수온을 나타 내고 있으며 표층에서는 외해 정점에서 23.5 °C 이상의 수온이 관측됨.
- 16시의 수온 수직분포 중 20m 이상의 수심에서 20.5 °C 이하의 수온이 관측되며 외해 정점보다 중간 정점에서 수온 변화가 더 잘 나타남
- 17시의 수온 수직분포에서는 수심 10m 이내의 수괴가 22.5 °C 이상의 수온을 나타 내고 있으며 표층에서는 외해 정점에서 23.5 °C 이상의 수온이 관측됨.
- 17시의 수온 수직분포 중 20m 이상의 수심에서 20 °C 이하의 수온이 관측되며 외 해 정점보다 중간 정점에서 수온 변화가 더 잘 나타남

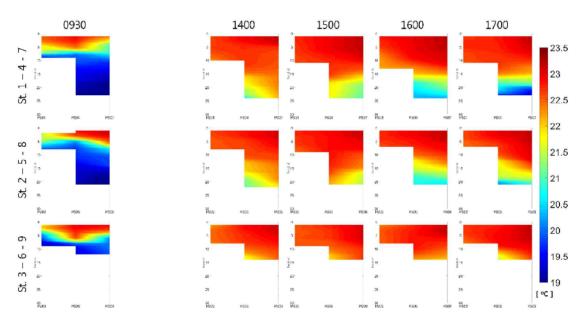


그림 3-2-27. 7월 5일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분포

- 7월 5일 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 염분의 시간별수직분포(그림 3-2-24)에서 09시 30분의 염분 수직분포에서 대부분의 정점 중 수심 10m 이상에서 33 psu 이상의 수괴가 관측됨
- 표층염분은 32.2 psu 이하이며 PS03은 32 psu 이하의 염분이 관측되었으면 대체적으로 외해보다 연안의 표층염분이 더 낮음
- 14시의 염분 수직분포에서 수심 15m 이내의 수괴가 32.5 psu 이하의 염분을 나타 냄
- 14시의 염분 수직분포 중 수심 20m 이상의 깊이에서 32.7 psu 이상의 염분이 관측되었으며, 외해 정점보다 중간 정점에서 수온 변화가 더 잘 나타남

- 15시의 염분 수직분포에서 수심 15m 이내의 대부분의 수괴가 32.5 psu 이하의 염 분을 나타냄
- 15시의 염분 수직분포 중 수심 20m 이상의 깊이에서 32.7 psu 이상의 염분이 관측되었으며, 중간 정점보다 외해 정점에서 수온 변화가 더 잘 나타남
- 16시의 염분 수직분포에서 수심 15m 이내의 수괴가 32.5 psu 이하의 염분을 나타 냄
- 16시의 염분 수직분포 중 수심 20m 이상의 깊이에서 32.7 psu 이상의 염분이 관측되었으며, 외해 정점보다 중간 정점에서 수온 변화가 더 잘 나타남
- 17시의 염분 수직분포에서 수심 10m 이내의 수괴가 32.5 psu 이하의 염분을 나타 냄
- 17시의 염분 수직분포 중 수심 20m 이상의 깊이에서 33.0 psu 이상의 염분이 관측되었으며, 외해 정점보다 중간 정점에서 수온 변화가 더 잘 나타남

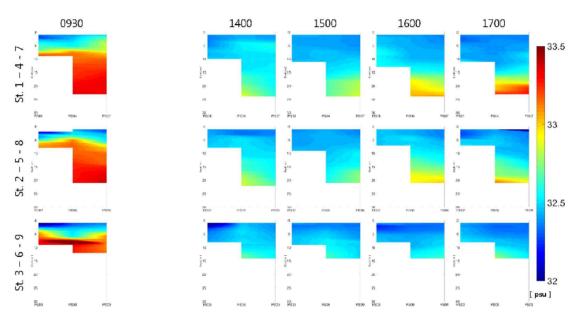


그림 3-2-28. 7월 5일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분포

- 8월의 관측을 수행한 시기는 8월의 조위 변화를 나타낸 그림 3-2-25a에서 회색으로 표시된 4일과 5일임
- 당시 조위는 간만의 차이가 가장 적은 조금에 가까운 간만이 최소에 가까운 기간 임
- 서귀포(적색)와 성산포(청색)에서 관측되는 8월 4일 조위 자료의 평균을 사용함(그 림 3-2-25b)
- 8월 정선 관측을 수행한 시각은 만조를 중심으로 조위가 하강하고 있는 시각임(그림 3-2-25c)

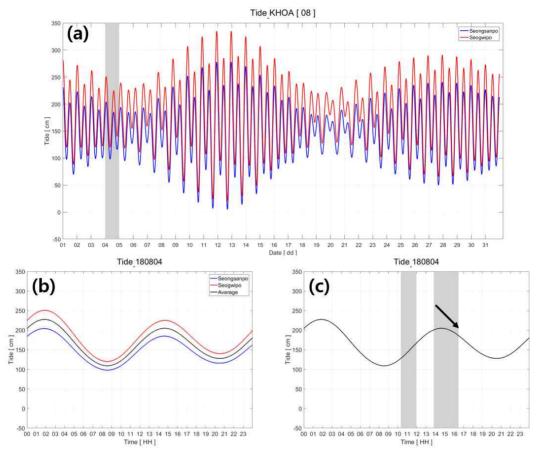


그림 3-2-29. 성산포(청색)와 서귀포(적색)의 8월 조위(a). 정선관측을 한 기간을 회색으로 표시하였다. 정선관측을 수행한 8월 4일의 시간별 조위(b). 두 조위의 평균은 흑색으로 나타내었다. 정선관측을 수행한 시간 동안의 조위 변화(c).

- 8월 4일 정선관측에서 CTD를 통해 수행된 수온 염분의 시간별 표층분포(그림 3-2-26)에서 10시 30분의 표층수온은 PS02, 05에서 27 °C 이하의 수온이 관측되었으며 27.8 °C 이하의 표층수온이 PS09로 갈수록 점차 상승하는 양상을 나타냄
- 10시 30분의 표층염분은 대부분 31.5~32 psu 의 범위의 염분값이 관측되었으나 연 안의 PS01, 02와 중간의 PS06에서는 31.2 psu 이하의 비교적 낮은 염분값이 관측됨
- 11시 30분의 표층수온은 동쪽이 높고 서쪽이 낮은 수온을 나타났으며 외해의 PS09에서 28.4°C 이상, PS07에서 27.4°C 이하로 대비되는 양상을 보임
- 11시 30분의 표층염분은 31 psu 이하의 PS02를 제외한 대부분의 정점에서 31.8~32 psu의 염분값 분포를 나타냄
- 14시의 표층수온은 11시 30분과 유사하게 동쪽이 높고 서쪽이 낮은 경향을 보였으며 27.5 °C 이하의 PS02와 PS07의 수온과 28.5 °C 이상의 PS09의 수온이 대비되는 양상을 나타냄
- 14시의 표층염분 또한 11시 30분과 유사하게 30.5 psu 이하의 PS02를 제외한 대부 분의 정점에서 31.5~32 psu의 염분값 분포를 나타냄
- 15시의 표층수온 또한 14시와 유사한 경향을 보이는데, 27.8 °C 이하의 PS01과

PS07의 수온과 28.3 °C 이상의 PS09의 수온이 대비되는 양상을 나타냄

- 15시의 표층염분 또한 14시와 유사하게 31 psu 이하의 PS02를 제외한 대부분의 정점에서 31.9~32.2 psu의 염분값 분포를 나타냄
- 16시의 표층수온은 연안의 동쪽 정점인 PS03에서 27 °C 이하의 수온이 관측되었으며 서쪽 외해 방향으로 비교적 높은 표층수온이 분포하는 양상을 보였음. 다만 PS03 과 대척점에 있는 SP07은 27.6 °C 정도의 표층수온을 나타냄
- 16시의 표층염분은 표층수온과 유사하게 PS03에서 PS05에 이르는 구간동안 31 psu 이하의 비교적 낮은 염분값이 관측되었으며 그 외의 정점에서는 32 psu 이상의 염분값이 관측됨

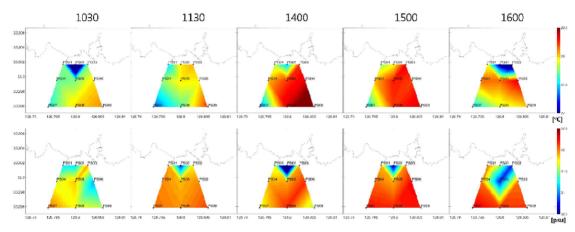


그림 3-2-30. 8월 4일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분 (하단)의 표층 분포

- 8월 5일 정선관측에서 CTD를 통해 수행된 수온 염분의 시간별 표층분포(그림 3-2-27)에서 13시 50분의 표층수온은 서쪽이 낮고 동쪽이 높은 경향이 나타남
- PS01, 02에서는 25.5 °C 이하의 비교적 낮은 온도가 관측되었으며 표층수온이 가장 높은 PS06의 경우 26.7 °C 이상이 관측됨
- 13시 50분의 표층염분은 연안이 낮고 외해가 높은 경향을 보였는데 표층염분이 가장 낮은 PS02의 경우 31 psu 이하였으며, 외해 중 PS08, 09는 32.6 psu 이상의 염분이 관측됨

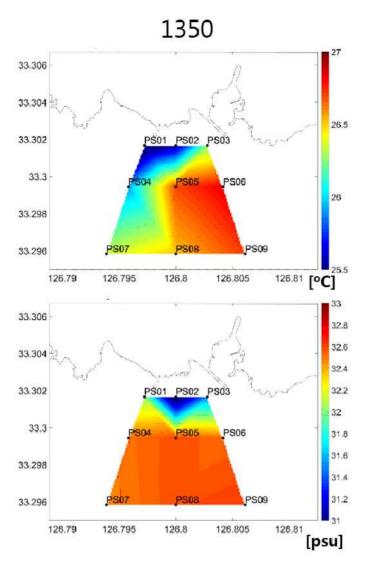


그림 3-2-31. 8월 5일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온(상단)과 염분 (하단)의 표층 분포

- 8월 4일 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 수온의 시간별수직분포(그림 3-2-28)에서 수온 수직분포에서 수심 10m 이상의 깊이에서 21.5 °C 이하의 수온이 분포하고 있으며 표층에서부터 수심 10m 이하의 깊이에 26.5 °C 이상의 수온이 분포하며 대체적으로 연안에서 외해까지 평탄한 성층을 이루고 있음
- 11시 20분의 수온 수직분포에서도 큰 변화는 없으나 St.2-5-8의 정점선 중 외해에 해당하는 PS08에서 수심 15m 이상의 깊이까지 27 °C 이상의 수온이 관측되었다.
- St. 3-6-9의 정점선에서도 외해 정점인 PS09에서 성층화가 약화된 모습이 나타남
- 13시 50분의 수온 수직분포에서 표층의 수온이 28.2 °C 이상의 수온을 나타내며 St. 1-4-7에서 수심 10~15m까지 수온 23~25 °C의 수온이 나타나는 등 성층화가 약화되는 강향을 나타냄
- 14시 50분의 수온 수직분포에서 점차 성층화가 강화되고 21 °C 이하의 수괴가 점

차 수심 10m 까지 상승함

○ 15시 50분의 수온 수직분포에서 27 °C 이상의 표층수온을 나타내는 수괴는 더욱 얇아지며 연안보다 외해에서 수온의 하강이 일어나는 양상을 보임

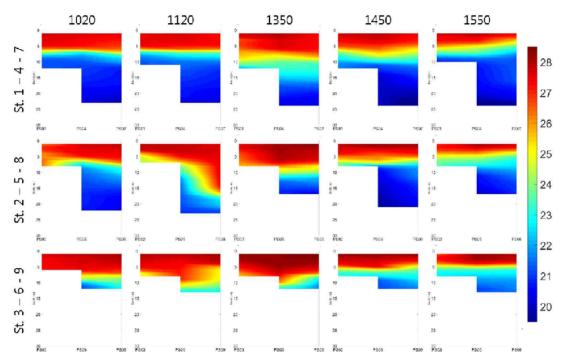


그림 3-2-32. 8월 4일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 수온의 연직 분포

- 8월 4일 정선관측에서 CTD를 통한 연안선에 수직 방향인 정점선별 염분의 시간별수직분포(그림 3-2-29)에서 10시 20분의 염분 수직분포는 수심 10m 이상의 깊이에서 33 psu 이상의 수괴가 분포함
- St. 1-4-7에서는 수심 5~10m에 34 psu 이상의 비교적 높은 염분의 수괴가 관측됨
- 표층에서는 31 psu 이하의 수괴가 관측되었으며 강한 성층화로 인해 대부분 정점 이 평탄한 염분분포를 나타냄
- 11시 20분의 염분 수직분포에서 ST. 1-4-7의 PS04에서 수심 3m 이내에 33.5 psu 이상의 고염분이 관측됨
- ST. 2-5-8의 SP08에서는 표층의 비교적 저염분의 수괴가 수심 15m 이상 유입되었으며, 일부 성층화의 약화로 인해 32.5~33 psu의 수괴가 수심 10~15m의 깊이에서 관측됨
- 13시 50분의 염분 수직분포에서 외해보다 연안에서 비교적 낮은 염분의 수괴가 관측되며 대부분의 정점선에서 약화된 성층화로 인해 32.5~33 psu의 수괴가 10~15m에 다수 분포해있음
- 14시 50분의 염분 수직분포에서 33.3 psu 이상의 수괴가 10m 수심 이상에 분포하고 있으며 점차 성층화가 강화되어 염분의 구배가 심화됨.
- St. 1-4-7에서는 외해보다 연안의 염분 수직분포에서 더 많은 변화가 나타남

- 15시 50분의 염분 수직분포에서 St. 1-4-7을 제외한 동쪽 정점선에서는 성층화가 약화되며 외해보다 연안의 염분 수직분포에서 더 많은 변화가 나타남.
- St. 1-4-7에서는 외해의 염분 수직분포가 매우 단순해지며 33.5 psu 이상의 수괴가 수심 5m 이내의 깊이에서 관측됨

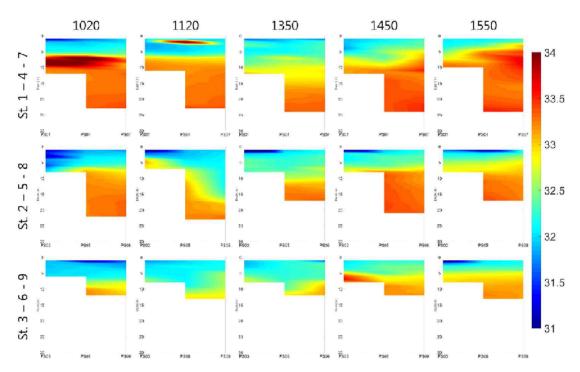


그림 3-2-33. 8월 4일 정선관측을 통한 양식장 배출수 인근 해역의 염분의 연직 분포

- 8월 4일 해류에 의해 움직이는 부이를 통해 획득한 해류의 움직임(그림 3-2-29-1) 에서 부이의 투하 시작은 삼각형으로, 부이의 수거 위치는 네모로 표시하였다.
- 해류 부이의 투하는 총 4번 수행됨
- 첫 번째 해류부이의 투하는 조위가 상승하는 시간에 투하한 해류부이는 연안에 가장 가까이 접근했을 경우를 제외하고 평균속도 0.1 m/s 정도로 동에서 서로 움직임
- 두 번째와 네 번째 해류부이는 1시간 남짓 짧은 기간 동안 이동하여 큰 움직임을 알아볼 수 없었음
- 해안선에 비교적 멀리 떨어진 세 번째 해류부이의 경우 동에서 서로 움직이는 이 동궤적을 나타냄

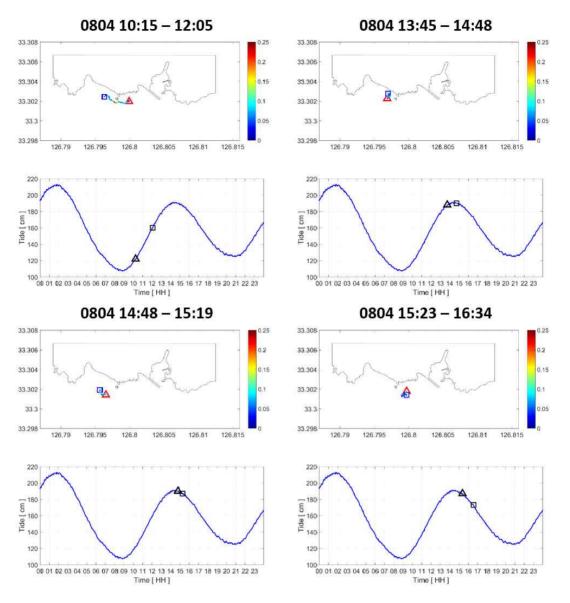


그림 3-2-34. 8월 4일 연구해역에 투하한 부이의 이동궤적 및 해당 시간 동안 의 조위 변화.

3. 결론

육상 양식장에서 연안으로 유출되는 양식장배출수가 인근 해역에 미치는 영향을 알아보기 위해 2018년 3월부터 8월까지 연안 채수 및 정선 관측을 수행하여 양식장배출수가 유출되는 인근 연안수괴의 물리적 특성에 대해 분석하였다.

양식장 수조 내의 사육수 및 침전지를 거치는 배출수에서 관측한 수온의 시간에 따른 변화는 항구에서 관측한 것에 비해 비교적 변화폭이 적게 나타난다. 물고기를 사육하기 위해 일정한 조건을 맞춰주어야 하는 양식장의 사육수는 연구 기간 동안 2 °C 정도의 상승을 보였으나 항구의 연안수는 7 °C 이상의 온도 상승을 나타냈다.

이와 같이 인근 연안으로 유출되는 양식장배출수는 외부 요인에 지속적인 영향을 받는 연안의 수괴와는 두드러지는 차이를 나타내며, 이 차이는 연안의 수괴와의 관계에서 시간에 따라 다른 경향을 초래한다. 연구 초반의 관측에서 큰 차이를 나타내지 않거나 비교적 높은 수온을 보이는 양식장배출수가 연구기간 후반으로 갈수록 외해의 해수보다 비교적 더 낮은 수온을 나타내게 된다. 유출되기 전 양식장배출수의 수온과 항구의 연안수 수온을 비교하였을 때, 초봄인 3월 관측의 경우 약 0.5 °C 정도가 차이났지만 7월 관측에서는 5 °C 이상의 차이를 나타냈다. 양식장배출수의 염분은 시간에 따른 변화 양상이 수온보다는 두드러지지 않으나 외부의 해수보다 일정하게 낮은 염분을 나타낸다. 항구에서 관측한 염분에 비해 수조 내의 사육수에서 관측한 염분은 6~7 psu 정도 더 낮은 염분값을 나타냈으며, 이는 배출 이후에 인근 연안 해역에서 표층에 저염분 수괴를 형성하게 된다.

3월 관측의 경우 침전지에서 관측된 사육수는 항구 내에서 관측한 해수보다 더 낮은 수온과 염분을 나타냈다. 연안 정점인 PSE와 PSC의 관측자료를 비교하였을 때, 정점의 위치에 따라 경향은 다르지만 양식장배출수가 유출되는 해역과 연안 정점의 수온은 확연한 차이가 나타난다. 정선관측의 경우 표층의 수평적 분포에서 외해의 해수보다 연안의 양식장배출수의 영향을 받은 연안수가고온저염의 양상을 보인다. 각 정점의 수직적 분포에서도 고온저염의 수괴가 저온고염의 수괴 위로 얇게 위치하고 있으며, 수온 및 염분이 연안에 가까울수록 변화폭이 크고 수온과 염분 편차의분포가 거의 유사하여 연안에서 유입되는 양식장배출수에 의해 연안 수괴의 수직적 물성이 변화함을 알 수 있다. 시간에 따른 조위의 변화와 해류부이를 통한 해수의 움직임에서 조위가 감소하는시간 동안 해수는 서에서 동으로 이동하였다.

4월 관측의 경우 연안 관측에서 양식장배출수의 영향을 받는 해역인 PSE에서의 수온은 PSC에서의 수온보다 약 0.3 °C, 염분은 2 psu 이상의 차이를 나타낸다. 정선관측에서는 고온의연안수가 동쪽보다 서쪽 정점선에서 우세한 경향이 나타나며 전파되는 수평적, 수직적 범위가 더욱 넓게 나타난다. 이는 조위의 변화와 해류부이에 의한 실험에서 정선관측을 수행한 조사해역의 해류가 동에서 서로 움직이기 때문임을 확인하였다.

6월 관측에서는 연안 관측에서 하계의 해수온 상승에 의해 양식장배출수가 연안수보다 확연히 낮은 수온을 나타낸다. 정선관측 또한 저온의 연안수와 고온의 외해수가 대립하는 양상을 나타낸 며 연안수의 저염분 또한 외해수의 고염분과 확연히 성층화되는 경향을 나타낸다. 다만 조위가 감소하는 동안 해류부이의 움직임이 일관된 경향을 보이지 않았는데 이는 해류가 조위의 변화 뿐만 아니라 연안선 및 해저지형 등 다른 요인에 의해 변화될 수 있음을 암시하였다.

7월 관측에서도 연안의 양식장배출수는 연안수보다 확연히 낮은 수온 및 염분을 나타내며 정선 관측에서도 저온 저염의 경향이 뚜렷이 나타난다. 7월 정선관측에서 특기할 점은 수직적 수온 염분의 분포에서 얇게 성층화를 이루고 있던 표층의 고온 저염수가 시간이 지남에 따라 깊은 수심에 까지 영향을 미치는 등 수괴의 물성 자체가 바뀐 것처럼 관측되었다. 연속적으로 관측된 결과가 아니어서 전후 인과관계를 평가하기 어려우나 내부파 등에 의한 수괴 전체의 변동으로 사료된다.

8월 관측 또한 정선관측에서 지속적으로 연안에서 유입되는 양식장배출수가 저온 저염의 경향을 나타내며 전체적으로 고온 고염의 외해수와 대조적인 양상을 보인다. 연안에서 기원하는 저온 저염의 양식장배출수가 외해로 전파되며 수온의 수직적 분포에서 외해보다 연안에서의 수온이 약간 더 낮은 양상이 나타난다. 수온과 염분의 수평적 분포를 확인해봤을 때 동에서 서로 전파되는 양상이 나타나며 조위의 상승 및 해류부이의 이동을 통해 관측된다.

제 3 절 양식장 인근 연안 수괴의 화학적 특성

1. 서론

제주에서는 제조업이 거의 없기 때문에 양식업이 감귤 다음의 주요 산업으로 정착되었다. 제주의 양식업은 대부분 육상수조식 양식법을 사용하고 있다. 육상에서 양식을 하는 기술은 날씨나 해황 변동의 영향을 직접 받지 않는다는 장점이 있어 1970년대 후반부터 보급되기 시작하였다(Lee et al, 2002). 육상수조식 양식 산업이 지역경제의 성장과 수산업의 발전에 기여하는 바가 큰 것이 사실이지만, 양식장 배출수에의한 연안 환경오염문제 또한 중요한 문제로 대두되고 있는 실정이다. 일반적인 육상양식시설은 넓은 부지와 다량의 해수를 이용한 사육방식이기 때문에 유지 및 관리차원에서 비경제적이며, 배출수는 그 수량이 막대하고, 오염물질 배출농도의 변화폭이대단히 크다는 점 등의 제한요인들에 의하여 기존의 통상적인 물리·화학적, 생물학적인 폐수처리공법의 도입이 거의 불가능한 특성을 가지고 있다(Huh and Kang, 1995; Yun et al, 1999).

양식장에서 발생하는 오염물의 가장 큰 특징은 고형물질과 암모니아와 같은 용존물질이 모두 포함되어 있다는 것이다. 이러한 폐쇄적 양식장은 비교적 좁은 사육조에서 많은 어류를 수용하므로 어류의 활동에 의한 수질 등 환경요소의 변화를 가져오기쉽고, 또 양식 어류의 밀도가 높아짐에 따라 노폐물의 축적이 심각한 문제점으로 대두되고 있다. 사육수조 내에서는 어류의 대사 배설물이나 먹고 남은 찌꺼기 등이 여러 가지 현탁 물질로 부유하고 있으며, 이들 고형물질이 분해되는 과정에서 생성되는 암모니아는 수중생물에 대하여 강한 독성을 야기해 큰 문제점으로 부각되고 있다(Lee and Bu, 2001; Yun et al., 1999).

최근의 양식산업은 과도한 물 사용과 오염원 배출에 의한 연안 환경에 부정적인 영향을 미치는 것으로 평가되고 있다(Park et al., 2014). 이에 정부는 수산물 양식시설에 대해 수산물 양식시설 배출수 수질기준 설정 및 관리지침(Ministry of Environment, 2003)을 제정하여 실질적인 오염원 관리가 가능하도록 유도하였다. 그러나 양식장 배출수 오염물질 중 입자상으로 존재하는 고형물질인 유기물과 부유물질만을 관리하고 있고, 정부 및 지자체의 실질적인 관리감독이 어려워 양식시설의 배출수 관리에 실효성을 거두기 어렵다. 또한 질소 등 영양염류의 관리지침이 없어 연안해역의 부영양화를 가속시켜 수계의 이용성을 저하시키고 있다. 양식장 배출수의 생물학적 영양염의 관리는 질산화와 탈질화를 통해 이루어지며, 효율적인 질산화 및 탈질반응을 유도하기 위한 여러 연구들이 진행되었다(Patiquin and Knowles, 1972; Smith and Duff, 1988; Masser et al., 1999; Chen et al., 2006; Park et al., 2003; Park et al., 2014). 그러나 기존의 공법으로는 그 한계가 드러났으며, 새로운 고도 공정법이 개발되는 추세이지만 경제적 부담으로 그 사용이 제한되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 양식장으로 인한 연안오염을 저감하기 위하여 배출수로 인한 환경 오염 저해요인들을 파악하고, 그러한 저해요인들을 효과적으로 저감하기 위한 방법을 찾고자 하였다. 일반적으로 널리 알려진 영양염과 유기물의 오염부하를 분석하고, 연 안으로 유입되어 연안환경에 미치는 영향을 파악하려고 하였다. 이러한 연구를 통하 여 연안환경오염에 가장 큰 부하를 주는 물질을 선정하고, 그 물질을 배출수에서 효 과적으로 제거를 한다면 양식산업으로부터 연안환경을 지킬 수 있는 새로운 방법론을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

가. 연구지역

제주 남동부 지역에 위치하고 있는 표선 지역에는 많은 수의 육상양식장이 위치하고 있는데, 본 연구지역에는 육상양식장 6곳이 운영 중으로 넙치양식이 주를 이루고 있다. 양식장 앞 연안 해역은 외해에 직접 연결되어 있어서 해수의 교환이 활발하고, 조석에 따른 조류가 연안을 따라 흐르고 있다. 연안 환경정점의 수심은 가장 깊은 바깥쪽이 30 m 내외이고, 해안 가까운 정점은 5 m로 매우 얕은 수심을 보이고 있다. 해안에서 가장 먼 정점의 거리는 약 600 m이고, 해안 가까운 정점은 100 m 이내에 인접하여 있다(그림 3-3-1).

육상양식장 양식수와 배출수, 배출구 주변의 수화학 상태를 파악하기 위하여 양식장 내 수조 한 곳과, 배출수 침전지 두 곳에서 시료를 채취하였고, 해안 가까이 배출수가 나오는 곳 3지점에서 시료를 채취하였다(그림 3-3-2). 침전지에는 유기퇴적물들이 두껍게 퇴적되어 있었고, 배출수가 강하게 흐르는 곳은 모래질의 퇴적물로 덮혀 있었다. 양식장 배출수는 만조 시 물에 잠기는 해안 낮은 곳에서 배출되는 곳도 있었고, 그 보다 높은 곳에 위치하기도 하였다. 그리고 배출수가 나오는 주변 4개의 조간대 정점과 배출수의 영향이 적을 것으로 판단되는 인접한 항 내 1개 지점에서 시료를 채취하였다.

나. 시료채취 분석방법

육상양식장 주변 연안 환경정점 9개 지점에서 매월, 표층과 저층에서 니스킨 채수기를 이용하여 해수를 약 4 L 채수하였고, 양식장 내, 양식장 침전지 및 조간대 정점에서도 매월 각 정점마다 약 4 L를 채수하였다. 채수 후 곧바로 영양염, 입자성유기탄소(POC), 총부유물질(TSS), 엽록소-a(chlorophyll-a) 분석을 위하여 여과를 하였다. 영양염 시료는 채수 후 곧바로 GFF 여과지(45 μ m, Φ 45 mm)를 이용하여 약 50 ml를 여과하였고, 분석 시까지 초저온냉동고에서 냉동보관 하였다. 입자성유기탄소

(POC) 함량은 해수 500 ml를 GFF 여과지(45 μ m, Φ 25 mm)를 이용하여 여과하였다. 여과지는 60 ℃에서 24시간 건조 후 염산 이 들어있는 데시케이터에 48시간 보관하여 무기물을 제거하였다. 무기물 제거 후 다시 건조하여 분석 시까지 데시케이터에 보관하였다. 엽록소-a 농도는 해수 500 ml를 여과하여 여과지는 분석시까지 초저온냉동고에 보관하였다. 총부유물질 농도는 해수 500 ml를 여과 후 냉동보관 하였다. 이후 실험실에서 무게를 측정하기 위하여 60 ℃에서 24시간 건조한 후 무게를 측정하였다.

영양염은 영양염자동분석기(QuAAtro, SEAL Analytical)를 이용하여 질산염+아질산염, 인산염, 암모니아, 규산염, 아질산염의 농도를 각각 측정하였다. 영양염 분석은 각 시료에 대해서 3번씩 측정하여 분석의 정확도를 높였다. 입자성유기탄소 함량 분석은 여과지를 산 처리하여 무기물을 제거한 후 건조시키고, 이 여과지를 주석(Tin)컵에 넣어 자동원소분석기(FLASH 2100, Thermo Fisher Scientific K.K.)를 이용하여분석하였다. 엽록소-a 농도는 90% 아세톤 10 메로 24시간 추출한 후에 TD-700 fluorometer(excitation filter 436 nm, emission filter 680 nm)를 이용하여 측정하였다. 총부유물질 농도는 건조한 여과지의 무게를 측정 후 여과지 무게를 제하여 계산하였다.

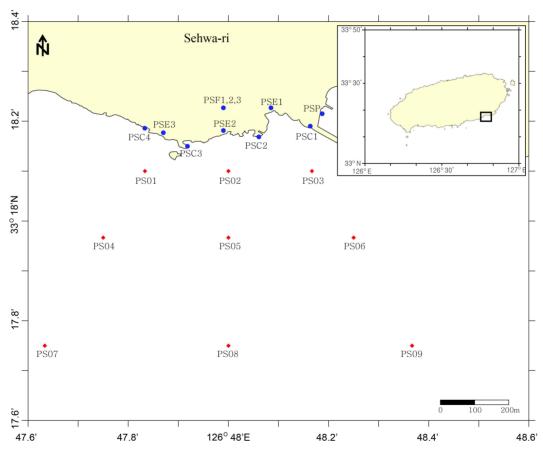


그림 3-3-1. 표선 양식장 주변 연안 환경 정점 및 양식장, 배출수, 조간대 시료 채취 정점



그림 3-3-2. 표선 양식장 침전지 시료채취 정점(좌)과 배출수 시료채취 정점(우)의 모습

3. 결과

가. 양식장 배출수와 조간대 해역의 화학적 특성

(1) 영양염

표선의 양식장 내, 침전지(PSF01~PSF03) 및 배출수(PSE01~PSE03)에서의 영양염 농도는 유사한 농도를 보이고 있다. 그러나 조간대에서는 연안해역에 비해서는 높지만 배출수에 비해 아주 낮은 농도를 보이고 있다. 질산염은 7월과 10월에 높은 농도를 보이는데, 7월의 높은 농도는 양식장 양식수의 수온 조절을 위해 인위적으로 지하수의 혼합비율이 높아진 결과로 판단된다. 규산염의 농도가 7월에 가장 높게 나타나는 것이 이를 잘 반영하고 있다(그림 3-3-3). 반면 조간대 정점(PSC01~PSC04)에서의 영양염은 양식장 배출수에 비해 그 농도는 매우 낮으나 배출수의 분포양상과는 유사한 경향을 보이고 있다. 배출수가 연안으로 유입되면 급격하게 희석되지만, 여전히 배출수에 의한 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

양식장 배출수 정점인 PSE02 정점의 영양염 농도와 PSE02와 연결된 양식장 내양식수의 농도가 거의 유사하게 나타나고 있어서 양식장에서 배출되어 연안으로 유입될 때까지 영양염의 농도 변화는 거의 나타나지 않았다. 이곳의 양식장에는 침전지의규모가 너무 작아 배출수의 체류시간이 너무 짧기 때문에 배출수의 영양염이 탈질소화 반응 등의 분해가 거의 일어나지 않았다. 질산염과 규산염은 시기에 따른 농도 변화가 심한데 비해 인산염은 시기에 따른 차이가 크지 않았다. 또한 조간대의 인산염농도가 일반 연안 해역에 비해 2배 이상의 높은 농도를 보이고 있었다. 규산염은 지하수의 혼합비율에 따라 그 차이가 확연하게 보이는데, 수온이 높은 시기에 지하수의혼합비율이 높아지기 때문에 규산염 농도가 높게 나타나는 특징을 잘 보여주었다. 반면 질소계 영양염류는 양식어류의 성장과 출하 등에 가장 영향을 많이 받는 것으로판단된다.

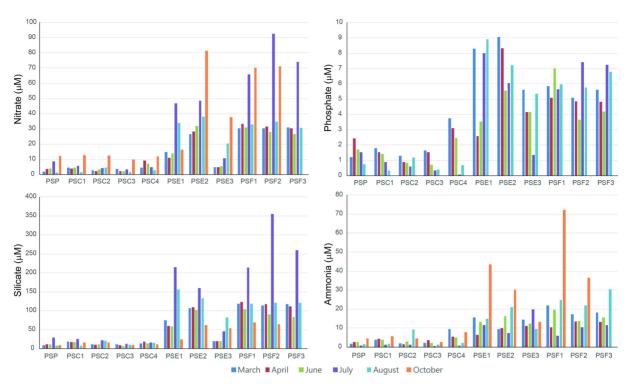


그림 3-3-3. 표선 양식장 양식수, 배출수 및 주변 조간대의 월간 영양염 농도 분포

(2) 입자성 유기탄소

양식장 배출수의 입자성유기탄소(POC) 농도는 질소계 영양염과 마찬가지로 양식 어류의 성장과 어류의 출하 등과 밀접한 관련이 있는 것으로 조사되었는데, 표선 양 식장에서도 그런 경향을 볼 수 있다. 양식장 내의 POC 농도는 봄철에 높아지다 양식 어류의 출하가 가장 많은 여름에 가장 낮게 나타나고 있다(그림 3-3-4). 양식수조 내 양식어류의 개체수에 따라 사료 급이량 및 어분의 양이 달라지기 때문인 것으로 판단 된다.

조간대의 POC 농도는 배출수에 비해 낮은 농도를 보이고 있으나, 연안 해역에 비해 상대적으로 높은 농도를 보이고 있다. 그러나 이 조간대의 POC 농도는 배출수의 영향을 받았을 것으로 추정하지만 그 영향은 크지 않을 것이라 판단된다. 배출수와 거리가 먼 항내 정점 (PSP)의 POC 농도와 조간대의 농도가 비슷하거나 낮게 나타나고, 배출수가 배출되는 지점에 위치한 조간대에서의 POC 농도 변화 경향이 다르게 나타나고 있어서, 조간대는 연안해역의 생산성 및 해수의 유동에 의한 영향을 더 많이 받고 있는 것으로 판단된다. 양식장 내 사육수조와 침전지에서의 POC 농도는 영양염과 달리 큰 차이를 보이고 있다. 사육수조 내에서 상대적으로 침전지보다 농도가 높고, 침전지에서도 흐름이 강한 곳보다 흐름이 약한 곳에서 농도가 상대적으로 높게 나타났다.

(3) 엽록소-a

양식장 배출수의 엽록소-a 농도는 조간대 해역의 농도보다 상대적으로 낮게 나타 났다. 양식장 사육수로 사용되었던 배출수의 엽록소-a 농도가 낮은 것은 장시간 빛이 차단된 사육수조에 갇혀 있다가 배출되었기 때문이다. 조간대의 엽록소-a 농도는 연안 해역의 농도변화 양상과 유사한 경향을 보였다. 봄철 대번성이 나타나는 4월에 가장 높은 농도를 보이는데, 양식장 사육수에서도 그 영향을 받는 것으로 나타났다(그림 3-3-5). 봄촐에는 연안해수의 수온이 낮기 때문에 양식 수온에 적합하여 지하수의 혼합비율이 작아지고 연안 해수의 비율이 상대적으로 높아서 연안수의 영향을 받지만, 수온이 올라가는 하계에는 지하수의 비율이 증가하여 엽록소-a의 농도가 감소하는 것으로 판단된다.

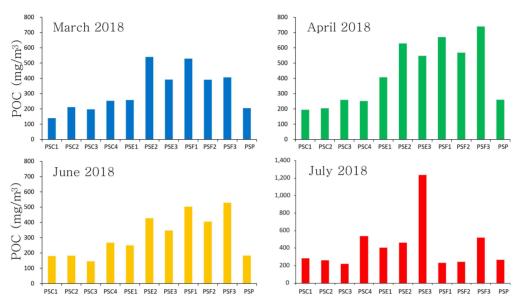


그림 3-3-4. 2018년 3월, 4월, 6월 및 7월 표선 양식장 양식수, 배출수 및 주변 조간대의 입자성유기탄소 농도 분포

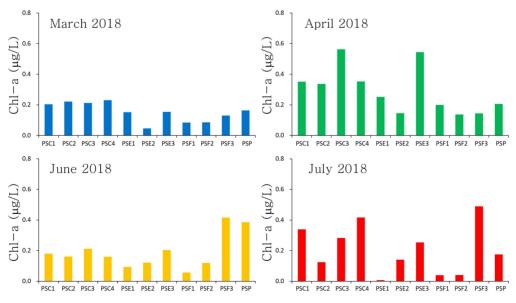


그림 3-3-5. 2018년 3월, 4월, 6월 및 7월 표선 양식장 양식수, 배출수 및 주변 조간대의 엽록소-a 농도 분포

(4) 총부유물질

양식장 사육수의 총부유물질(TSS) 농도는 사육수조에서 침전조보다 상대적으로 높고, 배출수에서는 많이 낮아진 채 배출되고 있었다. 조간대의 TSS 농도는 봄철 대 번성이 잇는 시기에 높았고, 7월에 가장 높게 나타났다(그림 3-3-6). 7월의 높은 TSS 농도는 생물 생산에 의한 것이라기보다는 주변 육상으로부터 퇴적물 유입과 재부유에 의한 것이라고 판단된다. 7월 조간대의 POC 농도가 낮았고, 엽록소-a 농도도 낮아생산성이 높은 시기라고 판단하기는 어렵다. 배출수의 TSS 농도는 양식장 사육수와 침전지의 시료보다 낮게 나타나는 것은 침전지에서 입자의 침전이 있었기 때문으로 판단된다. 7월 TSS 농도는 조간대보다 양식장 사육수에서 농도가 낮은데, 지하수의 혼합 비율이 높아진 원인도 있을 것이라 추정된다.

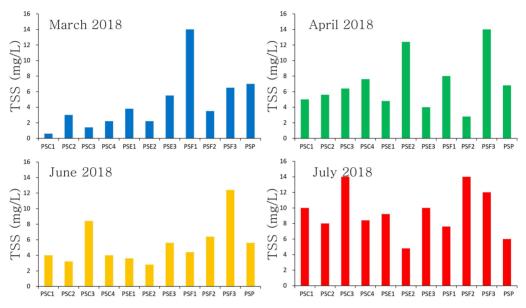


그림 3-3-6. 2018년 3월, 4월, 6월 및 7월 표선 양식장 양식수, 배출수 및 주변 조간대의 총부유물질(TSS) 농도 분포

나. 양식장 주변 연안 해역의 화학적 특성

(1) 영양염 분포 특성

2018년 3월 연안 표층 해역에서의 영양염 분포 양상은 모드 비슷한 양상을 보이고 있었다. 양식장 배출구 주변에서 높은 농도를 보이고 조류를 따라 확산되어가는 듯한 양상을 보이고 있다. 그러나 외해로는 약 300m 이내에서 그 영향이 보이지 않았다(그림 3-3-7). 그러나 저층은 표층과는 완전히 다른 양상을 보이고 있었다. 배출수의 영향이 보이지 않았고, 외해에서 영양염의 농도가 높게 나타났다(그림 3-3-8). 양식장 배출수는 상하로 혼합되지 않은 채 표층에 부유하여 조류를 타고 이동하는 것으로 판단된다.

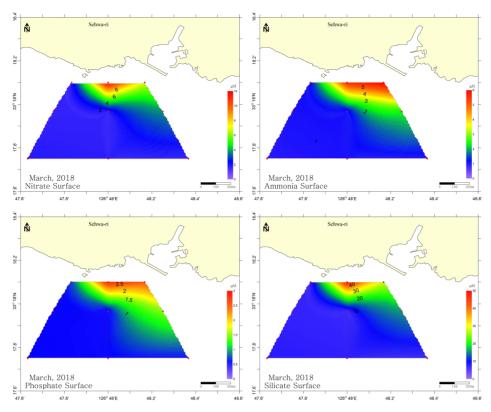


그림 3-3-7. 2018년 3월 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포

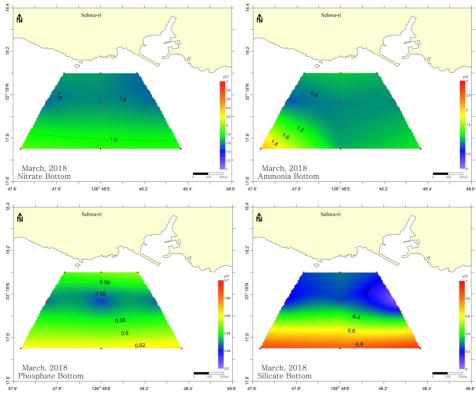


그림 3-3-8. 2018년 3월 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포

2018년 4월 연안 표층 해역에서의 영양염 분포도 3월과 비슷한 양상을 보이고 있다. 양식장 배출수가 나오는 정점 PSE02 주변 정점 PSC02에서 모든 영양염 들이 가장 높은 농도를 보이고 있고, 주변의 연안 해수와 빠르게 혼합되는 양상을 보이고 있다(그림 3-3-9). 저층의 영양염 분포는 3월과는 다른 경향을 보이고 있다. 질산염은 서쪽이 농도가 높고 동쪽이 낮은 분포를 보이고 있는 반면 암모니아는 동쪽에서 더높은 농도를 보이고 있다. 인산염은 해안 가까운 정점에서 상대적으로 높은 농도를 보이고 있고, 규산염은 서쪽에서 농도가 높은 분포를 보이고 있다(그림 3-3-10). 질산염과 인산염의 농도는 3월에 비해 상대적으로 낮은 농도를 보이는데, 이는 4월에 발생한 대번성에 의해 영양염이 소모된 것이라 판단된다.

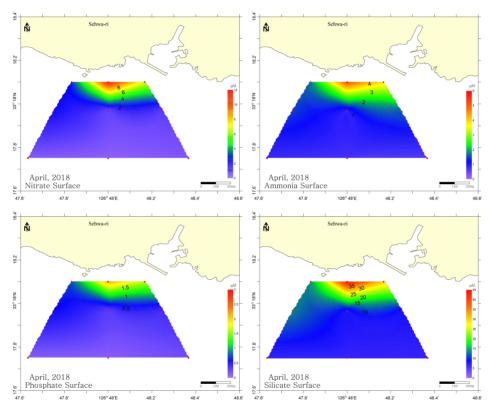


그림 3-3-9. 2018년 4월 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포

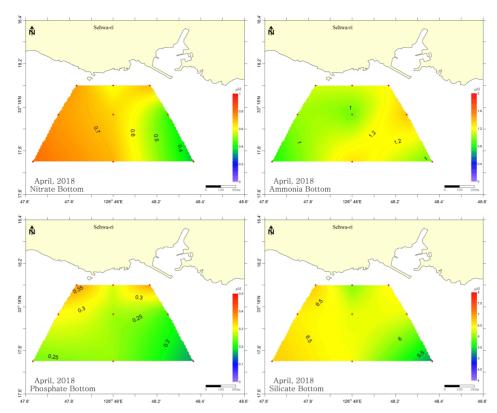


그림 3-3-10. 2018년 4월 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포

2018년 6월에는 오전과 오후에 각각 연안 해역의 영양염 분포 양상을 살펴보았다. 오전에 표층 해역에서는 PSC03 정점에서 가장 높은 농도를 보이고 있고, PSC01 정점에서도 높은 농도를 보이고 있다. 연안에서 조금만 멀어지면 외해수에 희석되어전체적으로 낮은 농도를 보이고 있다(그림 3-3-11). 오전 저층에서 질산염은 왜해쪽에서 농도가 높고 연안으로 갈수록 농도가 낮아지는 경향을 보이고 있고, 암모니아는 배출수 정점 가까운 곳에서 높은 농도를 보이고 있다. 저층에서 인산염은 거의 고갈된 형태를 보이고 있고, 규산염은 배출수 가까운 정점에서 높은 농도 분포를 보이고 있다(그림 3-3-12).

오후 표층 해역의 영양염 분포는 오전과 큰 차이를 보이지 않았다. 배출수 가까운 정점에서 높은 농도를 보이고 있는데, PSC01 정점에서 농도가 낮게 나타났다(그림 3-3-13). 이는 조류의 흐름이 서쪽에서 동쪽으로 흐르는 조류의 흐름에 따라 양식장에서 유입된 배출수가 이동한 것으로 판단된다. 저층에서는 오전과 확연하게 다른 양상을 보이고 있다. 질산염은 외해쪽에서 높은 농도를 보이고 연안으로 갈수록 낮아지는 양상을 보이고 있다. 암모니아와 인산염은 해역 전체에서 균질하게 낮은 농도를 보이고 있고, 규산염은 외해와 배출수가 나오는 연안 쪽에서 높은 농도를 보이고 있다(그림 3-3-14). 그러나 규산염의 농도는 연안 해역 전반적으로 큰 농도차이를 보이지 않았다.

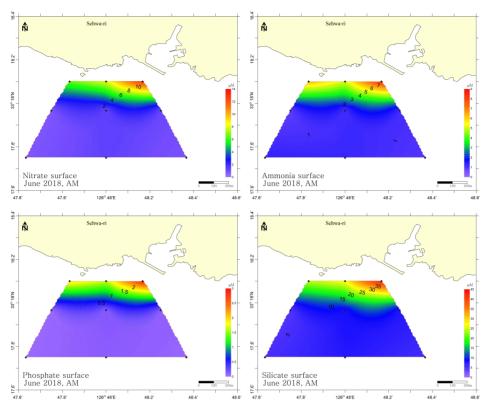


그림 3-3-11. 2018년 6월 오전 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포

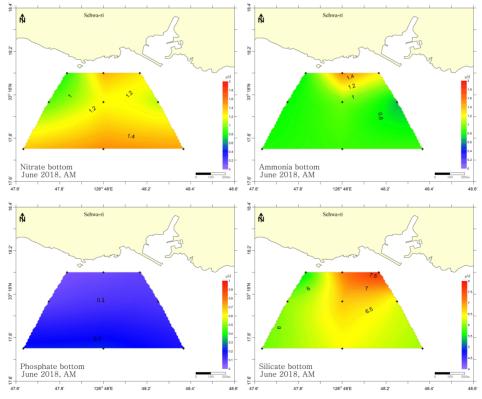


그림 3-3-12. 2018년 6월 오전 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포

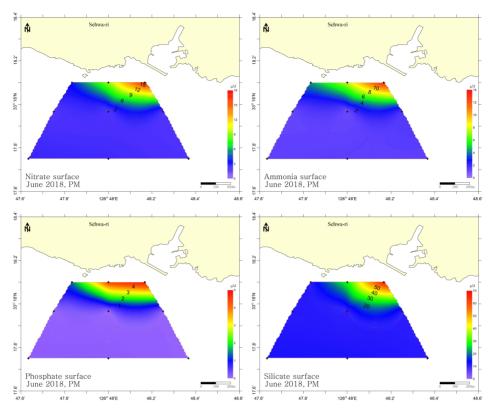


그림 3-3-13. 2018년 6월 오후 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포

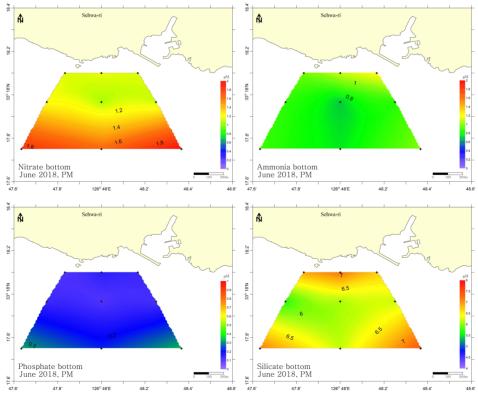


그림 3-3-14. 2018년 6월 오후 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포

2018년 7월 연안 표층 해역의 영양염 농도 분포는 PSC02 정점에서 높은 농도를 보이고 있다. 양식장 배출수의 영향을 받는 PSC02 정점 주위를 제외하면 거의 모든 해역에서 빈영양 상태를 보이고 있다(그림 3-3-15). 7월에는 다른 시기와 달리 저층도 표층과 유사한 영양염 농도 분포 양상을 보이고 있다. 연안 쪽에서 높은 농도를 보이고 외해쪽에서는 균질한 농도 분포 양상을 보이고 있다. 그러나 표층과 달리 농도가 가장 높게 나타나는 곳은 PSC03 정점 주변이었다(그림 3-3-16). 이것은 유입된 양식장 배출수가 오른쪽으로 이동하면서 침강한 것으로 판단된다.

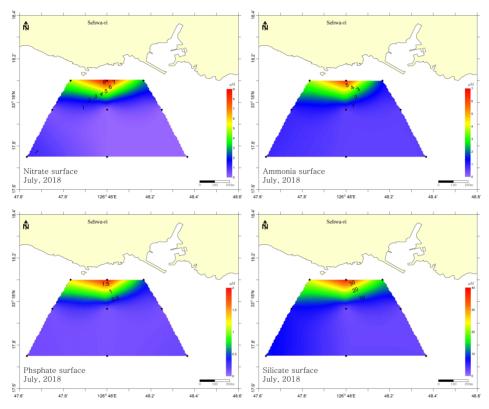


그림 3-3-15. 2018년 7월 제주 표선 연안 해역 표층에서의 영양염 농도 분포

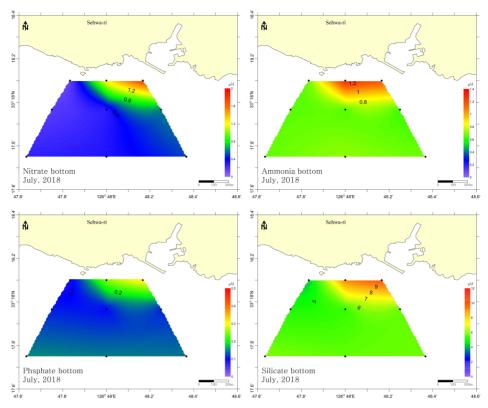


그림 3-3-16. 2018년 7월 제주 표선 연안 해역 저층에서의 영양염 농도 분포

(2) 입자성유기탄소 분포 특성

2018년 3월 연안 해역 표층에서 POC의 농도분포는 외해가 높고 연안으로 갈수록 낮아지는 양상을 보이지만, PSC03 정점에서는 높은 농도를 보이고 있다. 반면 저층에서는 외해쪽에서 연ㅇ나으로 갈수록 POC의 농도가 낮아지는 양상을 보이고 있다. 4월에는 연안 해역의 표층과 저층 모두 높은 POC 농도를 보이고 있다. 표층에서는 모든 정점에서 270 mg·m³ 이상으로 균질한 농도를 보이고 있고, 저층에서도 균질한 농도를 보이지만 PSC02 정점에서만 상대적으로 낮은 농도를 보이고 있다(그림 3-3-17). 그러나 PSC02의 정점에서도 250 mg·m³ 이상으로 다른 시기에 비해서는 높은 POC 농도이다. 4월 봄철 플랑크톤 대번성에 의해 연안 해역 전반적으로 POC 농도가 높아진 반면, 양식장 배출수는 봄철 대번성과는 무관하므로 상대적으로 낮은 POC 농도를 보인 것으로 판단된다.

2018년 6월 오전 연안 해역 표층에서 POC 농도는 PSC01과 PSC03 정점에서 높은 농도를 보이고 있고, 왜해 쪽에서는 균질하게 낮은 농도를 보이고 있다. 저층에서는 PSC02 정점에서 가장 높은 농도를 보이고 있고, 동쪽으로 연안을 따라 확산되는 양상을 보이고 있다. 오후에는 오전과 조금 다른 양상을 보이는데, 표층에서는 PSC02 정점에서 가장 높은 농도를 보이고 있다. 저층에서는 서쪽의 정점에서 높은 농도를 보이고 동쪽에서는 낮은 농도를 보이고 있다(그림 3-3-18).

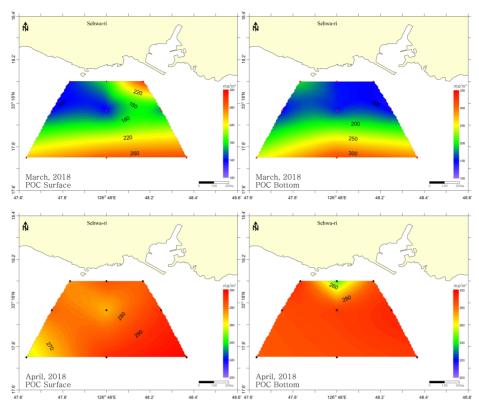


그림 3-3-17. 2018년 3월과 4월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 입자성유기탄소 농도 분포

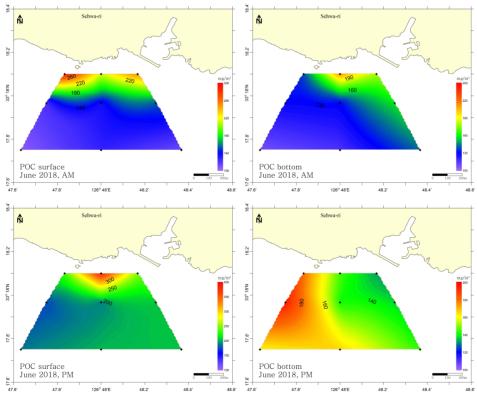


그림 3-3-18. 2018년 6월 오전과 오후 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 입자성유기탄소 농도 분포

2018년 7월 연안 해역 표층에서는 서쪽이 동쪽보다 상대적으로 높은 POC 농도를 보이고 있으나, 전체적으로 220 mg·m³ 이하로 낮은 농도를 보이고 있다. 반면 저층에서는 PSC02 정점을 제외하면 200 mg·m³ 내외로 균질한 POC 농도분포 양상을 보이지만, PSC02 정점에서는 약 700 mg·m³로 매우 높은 농도를 보이고 있다(그림 3-3-19).

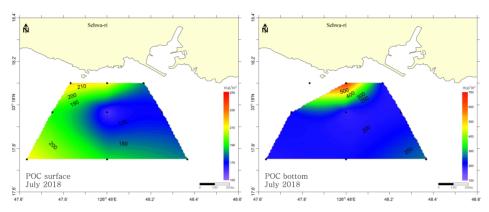


그림 3-3-19. 2018년 7월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 입자성유기탄소 농도 분포

(3) 엽록소-a 분포 특성

2018년 3월 연안 해역 표층과 저층에서의 엽록소-a 농도는 전 해역에서 낮은 농도 분포를 보이고 있다. 연안 해역의 서쪽보다는 동쪽에서 상대적으로 농도가 높았지만 전체적으로 낮은 농도를 보이고 있다. 4월에는 엽록소-a의 농도가 급격하게 높아졌는데, 외해쪽이 높고 연안으로 갈수록 낮아지는 분포 양상을 보이고 있다(그림 3-3-20). 4얼에 제주 주변해역에서 발생한 식물플랑크톤 대번성에 의해 엽록소-a의 농도가 급격하게 높아진 것으로 보인다.

2018년 6월에는 표층과 저층에서 엽록소-a의 농도가 다시 낮아졌다. 오전에 표층에서는 서쪽보다는 동쪽이 상대적으로 높았고, 저층에서는 외해쪽이 연안쪽보다 상대적으로 농도가 높은 분포 양상을 보이고 있다. 오후에는 오전과는 다른 양상을 보이는데, 오전에 비해 표층과 저층에서 엽록소-a의 농도가 상대적으로 높아졌다. 표층에서는 동쪽이 서쪽 해역보다 농도가 높게 나타났고, 저층에서는 해역의 가운데 정점들에서 상대적으로 높은 농도를 보이고 있다(그림 3-3-21).

2018년 7월 표층과 저층에서 엽록소-a의 농도는 연안 해역 전체적으로 낮으면서 균질한 농도를 보이고 있다. 8월에는 7월과는 다른 분포 양상을 보이는데, 표층과 저층에서 엽록소-a의 농도가 높아졌다. 표층에서는 서쪽의 외해역에서 높은 농도를 보이고 동쪽 외해역에서는 낮은 농도를 보인 반면 저층에서는 서쪽의 연안 가까운 해역에서 상대적으로 높은 농도분포를 보이고 있다(그림 3-3-22).

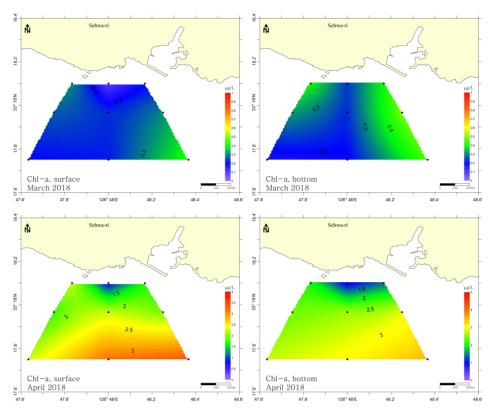


그림 3-3-20. 2018년 3월과 4월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 엽록소-a 농도 분포

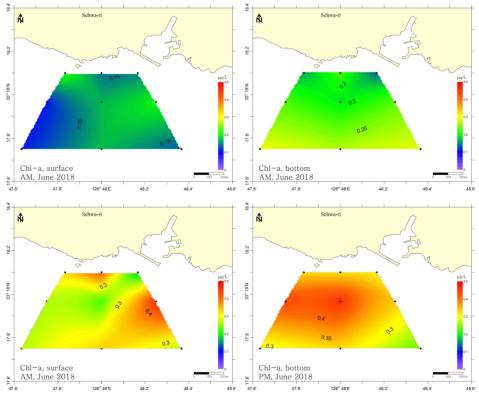


그림 3-3-21. 2018년 6월 오전과 오후 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 엽록소-a 농도 분포

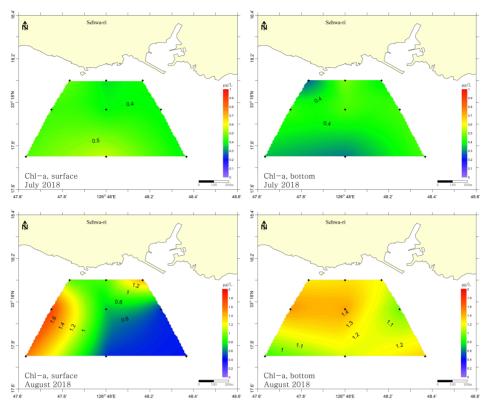


그림 3-3-22. 2018년 7월과 8월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 엽록소-a 농도 분포

(4) 총부유물질 분포 특성

2018년 3월과 4월 연안 표층에서 총부유물질 농도는 서쪽 외해 정점에서 높고, 동쪽 연안 정점에서 낮은 농도를 보이고 있다. 저층에서는 표층과는 다른 분포 양상을 보이고 있는데, 서쪽의 중간 정점과 동쪽의 연안 정점들에서 상대적으로 높은 TSS 농도 분포를 보이고 있다. 저층의 TSS 농도가 표층 농도보다 상대적으로 높게 나타났다. 4월에는 표층과 저층에서 모두 가운데 정점에서 TSS의 농도가 높게 나타나는 양상을 보이고 있다. 4월의 TSS 농도는 3월보다 상대적으로 높았다(그림 3-3-23). 4월에 전체적으로 TSS 농도가 높아진 이유는 식물플랑크톤 대번성에 의해유기물이 많아진 것이라 판단된다.

2018년 6월 TSS 농도는 오전과 오후가 다른 분포 양상을 보이고 있다. 오전 표층에서는 서쪽의 가운데 정점에서 높은 농도를 보이고 있으나, 오후에는 중앙의 가운데 정점에서 높은 농도를 보이고 있다. 이는 조류의 흐름이 서에서 동으로 흐르기 때문에 서쪽의 TSS가 동쪽으로 이동한 것으로 판단된다. 오전 저층에서는 서쪽 외해정점에서 높은 농도를 보이지만, 오후에는 가운데 정점에서 높은 TSS 농도를 보이고 있다(그림 3-3-24). 오후에 중앙의 가운데 정점에서 TSS 농도가 높아진 것은 서쪽 표층의 물이 이동하면서 부유물질이 침강한 영향으로 판단된다. 양식장 배출수는 부유물질의 농도가 높아질 때가 있는데, 이 부유물질들은 수괴의 움직임과 달리 해역의중앙 부근에 집결하는 양상을 보였다.

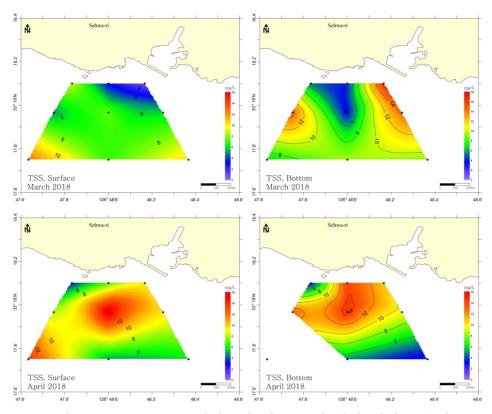


그림 3-3-23. 2018년 3월과 4월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 총부유물질 농도 분포

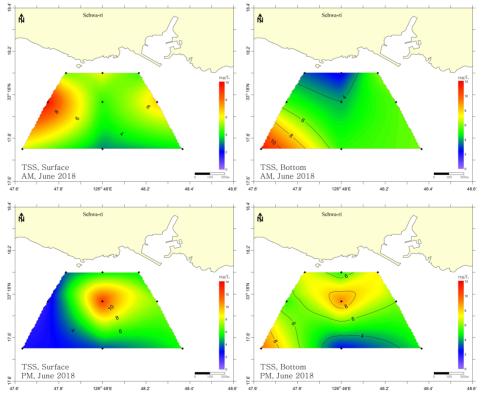


그림 3-3-24. 2018년 6월 오전과 오후 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 총부유물질 농도 분포

2018년 7월 표층의 TSS 농도는 연안의 PSC02 정점에서 매우 높은 농도를 보이고 있다. 저층에서는 표층의 분포양상에서 외해쪽으로 부유물질이 확산되는 듯한 양상을 보이고 있다(그림 3-3-25). 7월 조간대에서도 매우 높은 부유물질 농도를 보이고 있는데, 양식장 배출수의 영향이라고 보기는 어렵다. 배출수의 농도보다 오히려 더높은 부유물질 농도를 보이고 있는 것으로 보아 부유물질의 집적이 일어난 것으로 추정할 수 있다. 그러나 단기적, 일회성 관측으로는 명확하게 분포 특성을 파악하기 어렵다.

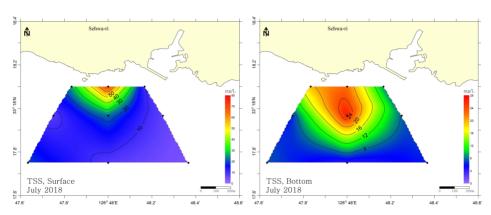


그림 3-3-25. 2018년 7월 제주 표선 연안 해역 표층과 저층에서의 총부유물질 농도 분포

4. 결론

2018년에 표선 양식장 배출수와 배출수가 유입되는 그 주변 연안해역에서 영양염, 입자성유기탄소, 엽록소-a 및 총부유물질 농도 분포 특성을 분석하였다. 영양염분포와 입자성유기탄소는 양식장 배출수에 연안 해역 유입에 의한 영향을 보이지만, 엽록소-a와 총부유물질 분포는 양식장 배출수 유입에 의한 영향이 특징적으로 보이지 않았다.

양식장 배출수의 영양염 농도는 연안 해수에 비해 월등하게 높았고, 총유기탄소 농도도 1.5배 이상 높았다. 그러나 엽록소-a 농도나 부유물질 농도는 비슷하거나 오히려 낮게 나타났다. 고농도 영양염이 함유된 양식장 배출수가 연안으로 유입되면 조간대와 배출수 유입지점과 가까운 곳에서는 일부 영향을 주지만 그 영향범위는 매우 협소하였다. 배출수가 연안으로 유입되면 연안 해수와 빠르게 희석되어 확산되는 범위가 좁게 나타났다. 그러나 부유물질은 용해된 형태의 물질과 달리 표층에 부유하여한 지점으로 집적되는 경우가 가끔 발생하는데, 이는 육안으로 충분히 관측될 만큼 그 농도가 높은 경우도 발생한다.

3월부터 9월까지 양식장 주변 연안과 배출수를 조사하였지만 조사가 월 일회성에 그쳤고, 연구지역의 조석 상태에 따라 연안 해역의 화학적 환경이 큰 차이를 보이고 있어서, 양식장 주변 연안 해역의 상태를 정밀하게 진단하는 데에는 무리가 있었다. 그러나 양식장 배출수의 영양염 농도가 일반 연안 해역에 비해 수 배 이상 높기 때문에 연안의 생태계에 영향을 미칠 가능성은 농후하다. 향후 좀 더 장기적이고, 짧은 관측 주기를 가진 지속적인 연구가 필요하고, 생태계 모델을 이용한 장기적인 생태계 영향을 살펴 볼 필요가 있다. 생태계 영향을 정확하게 진단하여야지만 양식장 배출수의 오염물질 저감의 방향을 올바르게 설계할 수 잇을 것이다.

제 4 절 생물을 활용한 양식장 배출수 오염물질 저감

1. 서론

제주는 양식업이 주요 산업으로 제주 경제에 중요한 위치를 차지하지만 육상양식 장의 심각한 문제점들은 다양하게 드러나고 있다. 양식장 배출수에 의해 해양오염이 발생할 수 있고, 양식 생물의 질병을 다루기 위해 사용한 의약품, 항생제 및 기타 화 학물질의 오남용 문제가 발생할 수 있다. 사료를 양식 어류가 다 섭취하지 못하면 미 섭취사료가 연안으로 유입되어 자연의 어업자원에 악영향을 미칠 수도 있다. 육상양 식장에 공급하는 해저지하수를 과도하게 사용할 수도 있고, 양식장 어류의 질병이 자 연계의 생물로 전이될 위험도 있다. 양식장을 탈출한 비자연적 발생 생물이 자연계로 유입되어 종다양성에 네거티브 영향을 미칠 수도 있고, 양식장 주변 단체와의 마찰을 빚기도 한다.

육상양식장에 의해 야기될 수많은 문제점들이 있지만, 연안생태계 환경에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 것이 배출수에 의한 부영양화와 유기물 오염 등이다. 본 연구에서 양식장 배출수의 높은 영양염 농도를 측정하였고, 배출수가 유입되는 지점에서 높은 영양염 분포를 보인다는 것을 확인하였다. 그래서 본 연구에서는 배출수의 영양염을 저감하고자 생물을 활용하여 배출수 영양염 저감 가능성을 실험하였다. 영양염 흡수율이 높은 해조류와 미생물을 이용한 영양염 저감 실험을 진행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 해조류 영양염 흡수 실험

(1) 해조류 채집 및 순치

해조류 배양실험을 총 3회에 걸쳐 실시하였다. 해조류의 배양을 위해 양식장 주변 해역에 서식하는 해조류를 채집하였고, 배양실험 전까지 용암해수, 인공해수 및 여과한 외해수에 순치하였다. 실험을 위해 채집한 해조류 종으로는 도박류, 패류 및 구멍갈파래류가 있다(그림 3-4-1).



그림 3-4-1. 배양된 사용된 도박류, 패류 및 구멍갈파래류

(2) 해조류 배양 실험

순치한 해조를 일정사이즈로 잘게 나누어 약 10g을 배양기에 넣고, 배양수를 약 1 L 채운 후 질산염과 인산염을 각 농도별로 주입하였다. 각 농도마다 3개의 배양기를 운영하여 분석의 정확도를 높였다. 이후 1시간 또는 2시간 간격으로 배양기에서 시료 10 ml를 채취하여 여과하여 냉동보관 하였다. 배양기에는 공기를 주입하였고, 주입된 공기에 의해 배양기 내 해조류와 물은 순환을 하게하였다(그림 3-4-2). 실험시작 전과 종료 후 해조류를 채집하여 동결건조기를 이용하여 건조 후 분쇄하여 원소 분석기를 이용하여 해조류 내 찬소 및 질소량을 측정하였다.



그림 3-4-2. 해조류 배양 실험

나. 미생물 영양염 분해 실험

(1) 미생물 시료 채집

양식장 배출수가 지나가는 침전지 및 배출수가 유입되는 연안 주변 해역에서 미

생물 다양성 분석을 위하여 총 9개의 샘플링 지역을 선정하여 해수 및 퇴적물을 채집하였다(그림 3-4-3). OL1은 양식장 내 사육수이고, OL2는 양식장 침전조 내 배출수며, OL3은 연안으로 유입되는 배출수이다. OL4~OL9은 배출구로부터 200m 간격으로 설정되었다. 해수의 경우 각각 4 L를 0.2 μ m 멤버레인 여과지를 이용하여 여과시킨 후, 여과지를 동결보존 시켰으며, 침전지 내 퇴적물은 50 ml 원심분리관에 채집후 동결보존 하였다.

(2) 해양미생물을 이용한 배출수 정화 가능성 평가

정화능에 활용 가능한 해양미생물을 확보하기 위하여 국내 연안으로부터 질소 고정 해양미생물을 분리하였으며, 16S ribosomal RNA 서열을 이용하여 그 종을 확인하였다(그림 3-4-4). 분리된 질소고정 해양미생물 중 Paracoccus oceanense S795와 Pseudomonas stutzeri S1374를 marine broth에 배양 후 고정화 담체를 각각의 배양균주에 투여하여 1일간 30℃, 20rpm에서 흡착시켰다. 실험 그룹은 Paracoccus oceanense S795와 Pseudomonas stutzeri S1374를 각각 단독으로 사용했을 때와 이물을 혼합 사용하였을 때로 나누어 진행하였다(그림 3-4-5). 각각의 균주가 흡착된고정화 담체를 50uM의 nitrate가 들어있는 용액에 넣은 후 시간대 별로 감소하는 nitrate의 양을 Nitrite/Nitrate assay kit을 이용해 진단하였다.



그림 3-4-3. 미생물 다양성 분석을 위한 시료 채집 정점

Strains	Similar species	Similarities (%)
S795	Paracoccus oceanense JLT1679(T)	100
S1130	Paracoccus zeaxanthinifaciens ATCC 21588(T)	100
S1374	Pseudomonas stutzeri ATCC 17588(T)	99.93
S1376	Pseudomonas nitritireducens WZBFD3-5A2(T)	99.79
S1377	Pseudomonas otitidis MCC10330(T)	99.86
CH2	Bacillus subtilis	100

그림 3-4-4. 질소 고정 해양미생물 종 동정



그림 3-4-5. 질산염 용액에 미생물 흡착 고정화 담체 첨가

다. 양식장 주변 해조류 조사

표선에 위치한 대상 양식장 침전조 내 1 곳과, 대상 양식장 배출수가 배출되는 주변 및 타양식장 배출구 주변의 해조류를 채집하여 분석하였다(그림 3-4-6).



그림 3-4-6. 양식장 침전조와 배출수 주변 해조류 채집 위치

3. 결과

가. 해조류 영양염 저감 실험

(1) 영양염 변화

도박류를 이용한 해조류 배양 1차 실험에서는 질산염과 인산염의 감소가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 질산염표준 용액을 첨가하지 않은 배양기보다 표준용액을 5 ml 첨가한 영양염 농도가 가장 높은 배양기에서 농도가 오히려 증가하는 결과가 나왔다 (그림 3-4-7). 인산염은 배양초기에 증가하다 6시간이 지난 후에 감소하는 양상을 보이고 있다(그림 3-4-8). 1차 배양 실험은 해조류 순치를 용암해수에 하였고, 배양수로 용암해수를 사용하였는데, 용암해수의 높은 영양염 농도로 인해 순치 효과가 나타나지 않았고, 이로 인해 배양에 사용된 해조류 들은 이미 높은 영양염 환경에 있었기때문에 영양염 흡수능이 감소되어 있었을 것으로 판단된다.

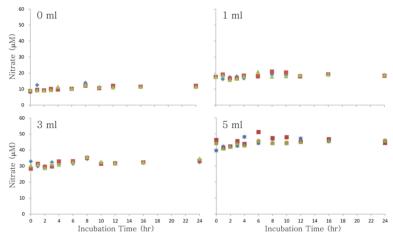


그림 3-4-7. 1차 해조류 배양시간에 따른 질산염 변화

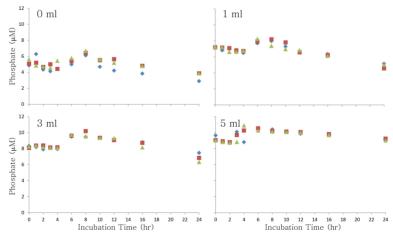


그림 3-4-8. 1차 해조류 배양시간에 따른 인산염 변화

2차 실험에서는 도박류를 인공해수에 순치한 후, 인공해수로 배양실험을 하였다. 2차 배양실험에서 질산염은 모든 농도에서 시간에 따라 조금 증가하는 경향을 보였다 (그림 3-4-9). 인산염도 변화가 거의 없거나 조금 증가하는 경향을 보였다(그림 3-4-10). 2차 배양 실험에서 실험에 사용된 해조류는 영양염이 거의 없는 인공해수에 2일 동안 순치되어 죽은 개체가 많았던 것으로 판단된다. 적갈색이었던 도박류의 해 조류가 순치 후 밝은 갈색으로 변한 것을 관찰할 수 있었는데, 순치 후 배양에 사용 된 해조류가 일부 죽었을 가능성이 크다.

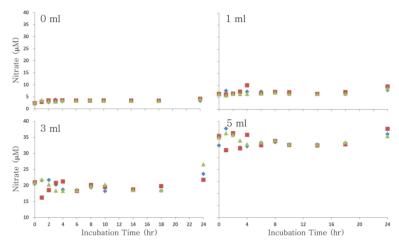


그림 3-4-9. 2차 해조류 배양시간에 따른 질산염 변화

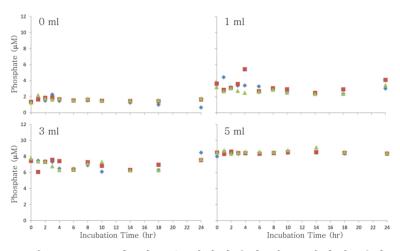


그림 3-4-10. 2차 해조류 배양시간에 따른 인산염 변화

3차 실험에서는 구멍갈파래류를 여과한 외해수에 순치 후 배양실험을 하였다. 질산염은 낮은 농도에서는 농도 변화가 거의 나타나지 않거나 조금 증가하는 경향을 보였지만 높은 농도에서는 질산염 감소가 뚜렷하게 나타났다(그림 3-4-11). 해조류 배양에 있어서 가장 적합한 질산염의 농도는 60~100 μM 범위이다(Harrison and Hurd, 2001). 그러나 인산염 농도는 배양 초기부터 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다 (그림 3-4-12). 인산염의 증가 농도는 자연계 또는 일반 해양에서 잘 볼 수 없는 농

도범위까지 높아졌다. 인산염의 증가 원인에 대해서는 아직 명확하게 밝혀진 바는 없으며, 영양염 분석의 오류 때문인지, 실제로 농도가 높아진 것인지에 대해 추후 추가연구가 필요하다.

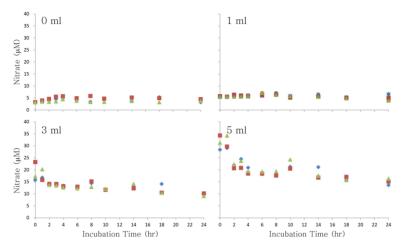


그림 3-4-11. 3차 해조류 배양시간에 따른 질산염 변화

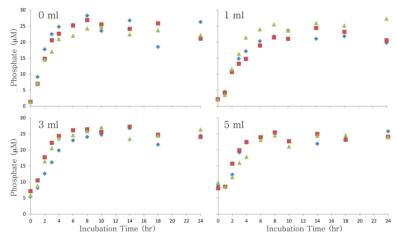


그림 3-4-12. 3차 해조류 배양시간에 따른 인산염 변화

(2) 해조류 내 탄소 및 질소량 변화

해조류 순치 전, 순치 후 배양 전 및 배양 후 각각 배양실험에 사용된 해조류 부시료를 채취하여 해조 내 탄소함량 및 질소함량의 변화를 측정하였다. 1차 실험에서는 해조류 내 탄소 및 질소 함량이 모두 감소하였다(그림 3-4-13). 이는 배양 중 해조류가 죽어 해조류의 분해가 진행되었다고 판단된다. 2차 배양에서는 순치 후 탄소및 질소 함량이 급격하게 감소하는 양상을 보였다(그림 3-4-14). 순치 중 해조류가대부분 죽은 것으로 판단된다. 3차 배양실험에서는 질소량과 탄소량이 조금 증가하였다. 질소 함량은 낮은 농도에서는 감소하였지만 높은 농도에서는 증가하였다. 탄소 함량은 낮은 농도에서 증가하는 경우도 있었다(그림 3-4-15).

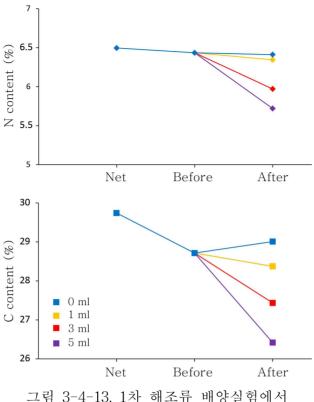


그림 3-4-13. 1차 해조류 배양실험에서 해조류 내 탄소량 및 질소량 변화

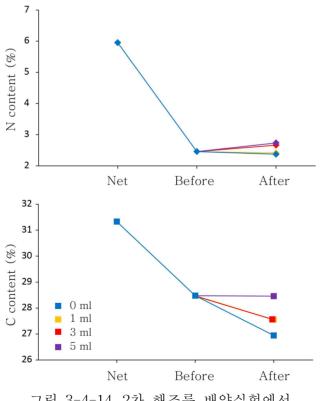


그림 3-4-14. 2차 해조류 배양실험에서 해조류 내 탄소량 및 질소량 변화

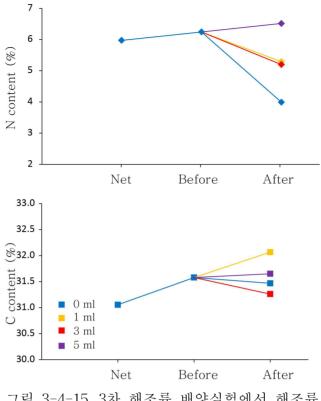


그림 3-4-15. 3차 해조류 배양실험에서 해조류 내 탄소량 및 질소량 변화

해조류 배양에 있어서 가장 적합한 질산염의 농도는 $60\sim100~\mu\mathrm{M}$ 범위이다 (Harrison and Hurd, 2001). 본 배양실험에 사용된 질산염의 농도는 모두 $60~\mu\mathrm{M}$ 이하였다. 그래서 해조류의 질산염 흡수능을 정확하게 검증할 수 없었을 것이라 판단된다. 또한 해조류 배양에 가장 적합한 유속은 $2\sim6~\mathrm{cm\cdot sec^{-1}}$ 이다. 본 배양실험에서는 공기를 주입하여 그 힘으로 순환을 시켰는데, 가끔 순환이 멈추어 있을 때도 있었고, 정확한 유속을 측정하기도 힘들었다. 추후 방법론적으로 더욱 개선된 배양실험이 필요하고, 해조종과 배양수의 선택 등에 있어서도 좀 더 연구가 필요하다.

나. 미생물을 활용한 오염정화 가능성

(1) 양식장 주변 미생물 다양성 분석

OL1~OL9 지역의 미생물 다양성을 확인한 결과 모든 샘플에서 Proteobacteria 그룹이 우세하였으며 양식장 내부에서 연안으로 배출되는 단계(OL1~OL3) 에서는 Verrucomicrobia 그룹이 특이적으로 관찰되었고, 해수와 희석되는 단계에서는 광합성세균 Cyanobacteria 그룹이 높은 비율로 관찰되었다(그림 3-4-16). Verrucomicrobia 그룹은 대부분 육상에서 발견되었지만 극히 일부가 해양에서 발견되었음. OL1~3에서 특이적으로 많이 나오는 이유로 Verrucomicrobia 그룹에 속하는 균주 중 Rubritalea

속의 균주들이 94% 이상(OL1: 95.3%, OL2: 94.1%, OL3: 96.2%)을 차지하였고 이들속의 균주들은 질산염(Nitrate)을 아질산염(Nitrite)으로 전환시킬 수 있는 능력을 가지고 있어 양식장 내에서 많이 발생되는 질산염을 이용할 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

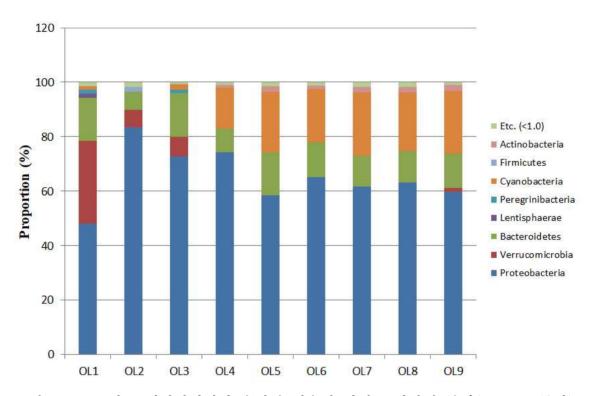


그림 3-4-16. 시료 채취지역에서 수집된 해수의 미생물 다양성 분석(Phylum 중심)

미생물 다양성 분석 결과를 이용하여 넙치에 질병을 일으킬 수 있는 세균을 종수준에서 확인하였다. 넙치에 세균성 질병을 일으키는 원인균으로는 Vibrio anguillarum (비브리오병), Vibrio ichthyoenteri (장관백탁증), Edwardsiella tarda (에드워드병), Lactococcus garvieae (연쇄구균증), Streptococcus iniae (연쇄구균증), Flexibacter maritimus (활주세균증)이 보고되어져 있음. OL2에서는 0.0065%로 연쇄구균증을 일으키는 Lactococcus garvieae가 전단되었으며 OL3에서는 Lactococcus garvieae 0.0058%와 더불어 장관백탁증을 일으키는 Vibrio ichthyoenteri가 0.0087%의 비율로 존재하는 것을 확인하였으며 이들이 환경 조건에 의해 대량 증식 시 향 후 넙치 양식장에 피해를 줄 수 있는 요인으로 작용할 수 있음. 배출수가 연안 해수와 혼합되는 지점(OL4~9)에서는 넙치 질병균이 확인되지 않음. 결과로 봤을 때 양식장에서 질병균이 있어라도 연안해수와 혼합되면서 질병균은 사라지는 것으로 보여지지만 실제 질병이 일어난 양식장을 대상으로 질병균의 수가 많았을 때 연안으로의 유동성을 같이 조사해볼 필요가 있다.

양식장 침전조 내 퇴적물 샘플(OL10)에서는 Proteobacteria 그룹과 Bacteroidetes 그룹이 비슷한 비율로 높게 나타났고 미생물 다양성이 해수 샘플에 비해 높게 나타났다(그림 3-4-17).

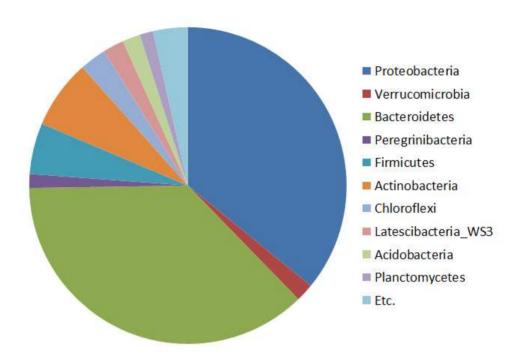


그림 3-4-17. 양식장 침전조 내 미생물 다양성 분석(Phylum 중심)

(2) 해양 미생뭉 활용한 배출수 정화 가능성 평가

미생물이 흡착된 고정화담체를 nitrate 용액에 투여 후 20시간이 되어서 nitrate 함량이 저감되는 것을 확인할 수 있었다. Paracoccus oceanense S795를 투여한 그룹 이 Pseudomonas stutzeri S1374를 투여한 그룹보다 더 높은 저감 능력을 보여주었으며 혼합 사용 하였을 때 더 효과적인 것으로 확인되었다(그림 3-4-18).

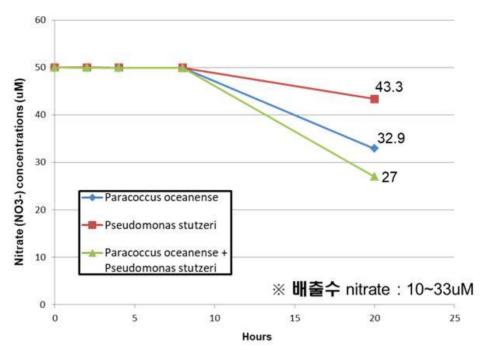


그림 3-4-18. 고정화 담체에 흡착된 미생물에 따른 질산염 저감 효과

다. 양식장 배출수 주변 해조류

양식장에서 나오는 배출수 주변에는 다른 연안지역에 비해 해조류가 뚜렷이 관찰되었다(그림 3-4-19 ~ 그림 3-4-22). 이는 배출수에 많이 함유되어 있는 무기영양염 (N, P등)의 영향으로 판단된다.



그림 3-4-19. 양식장 배출수가 나오는 곳의 바위

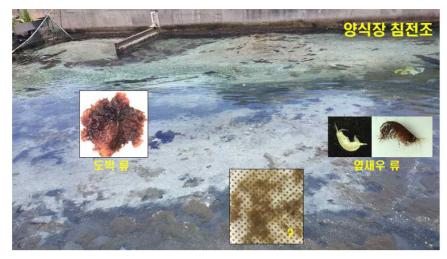


그림 3-4-20. 양식장 침전조 내 해조류 및 저서생물



그림 3-4-21. 양식장 배출수 1 주변의 해조류



그림 3-4-22. 양식장 배출수 2 주변의 해조류

4. 결론

해조류와 미생물을 활용하여 배출수의 영양염 저감 가능성을 실험하였다. 그 결과로 해조류와 미생물의 영양염 저감 능력을 파악하였다. 해조류를 활용한 영양염 저감 실험에서 미숙한 실험으로 정확한 결과를 도출할 수는 없었지만, 일부 배양실험에서 해조류의 영양염 흡수 능력을 확인할 수 있었다. 해조류 배양에 가장 적합한 질산염 농도가 $60\sim100~\mu{\rm M}$ 범위인데, 제주 지역의 대부분 양식장 배출수의 질산염 농도는 이 범위에 포함된다. 그래서 해조류를 이용한 질산염 저감은 매우 실현 가능성이 높을 것이다. 일부 미생물에 의한 질산염 저감도 실험으로 확인되었다. 많은 종의 미생물 실험을 하지 못하여 가장 효율적인 미생물 종을 특정할 수는 없으나, 이러한 실험을 통해서 효과적으로 영양염 저감 기능을 가진 미생물을 발굴할 수 있을 것이다.

해조류를 침전지 등에 양식하여 배출수의 영양염 저감을 위해서는 여러 가지 산 적한 연구과제가 많이 남아있다. 배양에 사용될 해조류의 종과 해조류의 경제성, 해조 류 배양장의 규모 및 배양장의 구조 등에 대한 후속 연구가 필요하다. 그리고 영양염 저감에 효율적인 미생물 발굴, 미생물 배양 방법 등에 대한 연구도 후속되어야 한다

제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)									
	연차별 달성내용								
구분	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	계획대비 연구실적 달성율(B) (%)				
1차 도	1. 양식장 유입/배출 수 분석	1-1. 대상 양식장 선정 1-2. 양식장 유입/배출수량 파악 1-3. 양식장 거동 분석을 위한 주변해역기초 해양조사 1-4. 양식장 사용수수질 분석 1-5. 표류부이 추적 1-6. 다중위성 활용연안역 변화 관측	0.4	- 제주시 표선면 하모니 수산 선정 - 하모니 수산 사육수 면 적 2,200평, 수량 약 2.5-5만톤/일 - 6회 현장조사 수행 - 연회 현장조사 수행 - 양식장 내/외부 해수 샘 플 채집 후 영양염, 클 로로필, 부유물질, POC 등 분석 - 조사선을 이용한 현장관 즉시 제작된 표류부이를 이용하여 조석 변화에따 른 해류이동 분석 - 위성자료를 이용하여 제 주해역에 대한 전반적인 클로로필 변화 분석 - 연안 프론트 형성 분석 - 연안 프론트 형성 분석 - 영식장 주변해역 연안정 점 선정하여 구간별 해 수 채집 후 미생물 분석 - 총 9개 정점에 대해서 분석 수행 - 분석 결과 중 총 6개의 납치 병원성 미생물 추 출 - 외해에서는 병원균이 확 인되지 않음	100				
	2. 양식장 배출수 주 변해역 미생물 다양 성 분석		0.3		100				
		3-1. 양식장 주변해역 해조류 분포 조사	0.1	- 양식장 주변 해조류 채 집	100				

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)								
	연차별 달성내용							
구분	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	계획대비 연구실적 달성율(B) (%)			
	4. 해조류 배양 및 영양염 흡수 능력	3-2. 해조류의 종 동 정 4-1. 해조류 배양시스 템 구축 4-2. 양식장 주변해역 해조류 분포 조사 4-3. 해조류의 영양염		- 연구해역 이외에도 제주 도 한동 주변 해조류 채 집 - 전문가 및 문헌을 통하 여 해조류 종 확인 - 1리터 규모의 해조류 배 양시스템 제작 완료 - 현장조사 및 드론을 통 하여 양식장 해역 해조 류 분포 조사 수행 - 사진 및 동영상 촬영 - 동위원소 표지 대신에 전통적인 영양염 흡수 실험 수행	100			
	분석	흡수능 분석 4-4. 최적 영양염 저 감 능력을 가진 해조 류 선별		 해조류 순치 후 영양염 투입하여 시간별 변화를 조사하여 흡수능 분석 제주도 양식장 주변 고 영양염에 서식하는 해조 류종 파악 기존 연구결과 자료를 제공받아 해조류의 흡수 율 자료 분석 				
	5. 해조류 배양시스 템에서 해조류의 무 기영양염 흡수율 분 석	5-1. 배양 해조류 내 탄소, 질소 함량 분석	0.1	- 배양 전/후 해조류 탄소 및 질소 함량 분석 - 양식장 주변에서 서식하 는 해조류 종은 상대적 으로 높 것으로 파악 - 기존 연구결과 자료를 제공받아 해조류의 흡수 율 자료 분석	100			
		5-2. 배양 해조류의 질산염 흡수율 분석	1.0	- 기존 연구결과 자료를 제공받아 해조류의 흡수 율 자료 분석	460			
	계				100			

제 2 절 대외기여도

1. 기술적 측면

- 친환경 넙치 양식 기술 개발
- 부영양화가 심각한 국가어항, 양식장 주변해역 및 연안 해역에 해조류를 이용한 수질정화 기술 적용 가능
 - 해양생물들을 이용해 배출수의 오염을 제거할 수 있는 친환경 양식시스템 개발
 - 해양생물을 활용한 정화 기술의 유수식 육상 양식시설에 처음 도입
 - 기존 양식시설의 시설물을 그대로 이용함으로써 새로운 시설비 투자 최소화
- 다양한 유형의 자료에 대한 효율적 관리 및 공유 가능
- 부영양화 및 기후변화에 의한 해양생태계 변화 탐지 및 예보시스템 구축
- 시간해상도 및 공간해상도가 높은 정밀 분석이 필요한 연안 환경 모니터링 연구 활용 연구 유도
- 접근이 어려운 지역 및 해역 자료 제공으로 영토 관리 및 국가간 분쟁시 기초 자료 활용
- 기후변화에 따른 해양생태계 변화를 예측하여 대응관리 근거 제공
- 정부의 기후변화 대응방안 및 정책 수립에 필요한 과학적 자료 제공
- 해양생태계 및 해양환경 효율적 관리 방안 도출
- 양식업, 연안수산업 및 해양건축·토목 등 관련 산업의 육성 및 기술 발전

2. 경제·사회적 측면

- 생태계 및 수산자원 관리 효율성 증대
- 새로운 해양환경의 창출로 환경보전 및 환경 인프라의 건전화를 도모하여, 연안 환경 개선과 국민의 해양환경에 대한 인식 제고
- 바다의 종합적인 이용·관리로 효율적인 자원관리 및 수산물의 지속적인 생산을 통한 어업인 소득 향상과 국내 미래 식량자원 확보
- 지역현안 문제 해결을 통한 국가정부 신뢰도 향상
- 연안 개발 및 해저관광자원 발굴을 위한 공간정보 자료로 이용
- 양식장 배출수 오염저감 기술을 제주 육상양식장에 적용하여 연안 환경 개선 및 양식어류 폐사율 저감에 기여
- 친환경 오염물질 저감 기술은 육상양식장 외에도 오염된 연안해역, 어항 등의 환경 개선 기술 개발에 활용 가능
- 양식장 내 추가시설 증축 없이 친환경적으로 오염을 저감시킬 수 있는 대책 제시
- 연안환경 개선 방안에 대한 연구결과를 제시함으로써 정책 제안

제 5 장 참고문헌

- Ahn, J.-B., J.-H. Ryu, E.-H. Cho, and J.-Y. Park, 1997. A study of correlations between air-temperature and precipitation of Korea and SST around Korean Peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 33(2): 327–336 (in Korean with English abstract).
- Ahn, J.-B., J.-H. Ryu, and Y.-H. Yoon, 1997. Comparative Analysis and estimates of heat fluxes over the ocean around Korean Peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 33(4): 725–736 (in Korean with English abstract).
- Aure, J. and A. Stigebrandt, 1990. Quantitative estimates of the eutrophication effects of fish farming on fjords. *Aquaculture*, 90: 135–156.
- Chen S., J. Ling, J. P. Blancheton, 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacutural Engineering*, 34: 179–197.
- Cho, K. D., C. I. Lee, D. S. Kim and Y. J. Yang, 2002. Oceanographic environment characteristics in waters adjacent to fish farm on land. *Journal of the Environmental Sciences*, 11(4): 297–308.
- Harrison, P. J., and C. L. Hurd, 2001. Nutrient physiology of swaweeds: Application of concepts to aquaculture. *Cahiers de Biologie Marine*, 42: 71-82.
- Heo, M. Y. and Y. C. Choi, 2004. Formation and characteristics of ocean fronts at the East China Sea in southwestern sea area from Jeju Island, summer. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 7(2): 64–69 (in Korean with English abstract).
- Herbeck, S. H., D. Unger, W. Ying and T. C. Jennerjahn, 2013. Effluent, nutrient and organic matter export from shrimp and fish ponds causing eutrophication in coastal and back-reef waters of NE Hainan, tropical China. *Continental Shelf Research*, 57: 92-104.
- Hill, D., W. Owens and P. Tchounwou, 2006. The impact of rainfall on fecal coliform bacteria in Bayou Dorcheat (North Louisiana). *International Journal of Environmental Research Public Health*, 3: 114–117.
- Hong, C.-H., 2017. The Effect of typhoons on red tide. Korean Journal of Fisheries

- and Aquatic Sciences, 50(2): 222-226.
- Hong, C.-H. and I.-S. Sohn, 2004. Sea surface cooling in the East Sea with the passage of typhoons. *Journal of Korean Fisheries Society*, 37(2): 137–147 (in Korean with English abstract).
- Huh, M, and B. R. Kang, 1995. Treatment of inland aquaculture effluent by biofilm filteration process(II). *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 17: 964–965.
- Hyun, Y.-S., Y.-M. Cha, K. Kang, and D.-H. Shin, 2015. 태풍발생 전후 단계에 따른 잠열속 변화 연구. *Proceedings of the Autumn Meeting of KMS*, 524-525.
- Jang, L.-H., S.-W. Kim, W.J. Go, K. Yamada, and Y.S. Suh, 2007a. 동중국해 북부해역 수온, 염분의 분포 변동 특성. *Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference*, 16(1): 331-335.
- Jang, S.-T., J.H. Lee, and C.S. Hong, 2007b. Mixing of sea waters in the northern part of East China Sea in summer. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 12(4): 390–399 (in Korean with English abstract).
- Jee, J.-B., J.-S. Min, M. Jang, and J.-G. Park, 2017. A Study on Improvement of High Resolution Regional NWP by Applying Ocean Mixed Layer Model. *Atmosphere Korean Meteorological Society*, 27(3): 317–329 (in Korean with English abstract).
- Jeju Development Institute(JDI), 2008. Study on the Solving Conflicts between Fishing Village Community and Residents in using Community Fishing Ground. *Synthesis Report*, 1–135.
- Jeju National University, 2002. Management of Inland Seawater aquaculture effluent water and optimum treatment method. *Synthesis Report*, 1–237.
- Jeju National University, 2009. Investigation of trophic environment at Jeju coast areas. *Synthesis Report*, 1-48.
- Jeong, Y. Y., I.-J. Moon, and S.-H. Kim, 2013. A study on upper ocean response to Typhoon Ewiniar(0603) and its impact, *Atmosphere Korean Meteological Society*, 23(2): 205–220 (in Korean with English abstract).
- Kang, Y. Q., 2000. Warming trend of coastal waters of Korea during recent 60 years(1936–1995). *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 3(3–4):

- 173-179.
- Kim, K.-O., C.-K. Park, and J.-B. Ahn, 2005. Characteristics of atmospheric circulation over East Asia and unusual climate of korea in summer 2003. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 41(4): 519–532 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., C.-H. Kim, and H.-R. Shin, 2016. Analysis of sea surface temperature simulation in the Northwestern Pacific and the East Asian Marginal Seas using HadGEM2-AO. *Ocean and Polar Research*, 38(2): 89-102.
- Kim, M. C., T. W. Jang, Y. J. Han, J. S. Kim, R. Harikrishnan, D. C. Oh, K. Y. Kim and M. S. Heo, 2009. Physico-Chemical Characteristics of Aquacultural Discharging Water in Jeju Island. *Journal of Life Science*, 19(7): 943–948.
- Kim, M.-K. and I.-S. Kang, 1995. Diagnostic Modeling of Wind Stress, Sensible, and Latent Heat Flux on the Sea Surface around the Korean Peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 31(1): 1–13 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-J., S.-H. Woo, B.-M. Kim, and S.-D. Hur, 2011. Trends in sea surface temperature(SST) change near the Korean Peninsula for the past 130 years. *Ocean and Polar Research*, 33(3): 281–290 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., 1996. Estimate of heat flux in the East China Sea. *Journal of Korean Fisheries Society*, 29(1): 84-91 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S. and B.-H. Kwon, 2003. Variations of heat fluxes over the East China Sea and the southern part of East Sea based on the buoy data. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 39(3): 337–345 (in English with Korean abstract).
- Koh, H. J., S. E. Park, H. K. Cha, D. S. Chang and J. H. Koo, 2013. Coastal eutrophication caused by effluent from aquaculture ponds in Jeju. *Journal of Korean Society Marine Environment & Safety*, 19: 315–326.
- Lee, D., H. J. Kwon, S.-H. Won, and S. K. Park, 2006. Typhoon simulation with a parameterized sea surface cooling. *Atmosphere*, 16(2): 97-110.
- Lee, D. I., K. H. Eom, G. Y. Kim, S. J. Hong, W. C. Lee and J. H. Jang, 2008. Effective Coastal Water Quality Management and Marine Environmental Impact Assessment. *Journal of Korean Society Marine Environment & Safety*, 14: 29–37.
- Lee, S., H.-J. Lie, C.-H. Cho, K.-M. Song, and J.-H. Lee, 2008. Thermal structure of

- the East China Sea upper layer observed by a satellite tracked drifter experiment. *Ocean and Polar Research*, 30(3): 361–372 (in Korean with English abstract).
- Lee, T. S., E. G. Oh, H. D. Yu, K. S. Ha, H. S. Yu, H. S. Byun and J. H. Kim, 2010. Impact of rainfall events on the bacteriological water quality of the shellfish growing area in Korea. *Korean Journal of Fish Aquatic Science*, 43: 406–414.
- Lee, Y. D., C. Y. Kim, M. P. Kang. 2002. A study on the water quality characteristics of aquacultural effluents by electrolysis. *Journal of KTSWT*, 10: 41–49.
- Lee, Y. D. and C. S. Bu, 2001. The removal characteristics of organic matters and ammonia in the aquacultural effluents by electrolysis. *Journal of KTSWT*, 9: 35–43.
- Lie, H.-J., C.-H. Cho, J.-H. Lee, and S. Lee, 2003. Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 108(C3), doi: 10.1029/2001JC001194.
- Masser, M. P., and J. Rackocy, T. M. Losordo, 1999. Recirculating aquaculture tank production system: management of recirculating system. *Southern Regional Aquaculture Center*, 452: 1–12.
- Min, H. S. and C.-H. Kim, 2006. Interannual variability and long-term trend of coastal sea surface temperature in Korea. *Ocean and Polar Research*, 28(4): 415–423 (in Korean with English abstract).
- Min, S. H., D. H. Kim, and H. J. Yoon, 2010. Temporal and spatial analysis of SST in the Northeast Asian seas using NOAA/AVHRR data. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 14(12): 2818–2826 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment, 2003. Establishment of effluent management guideline for aquaculture facility.
- Moon, J.-H., T. Kim, Y. B. Son, J.-S. Hong, and J.-H. Lee, submitted. Substantial low-salinity water contributing to sea surface warming in the summer of 2016. *Progressive Oceanography.*
- Murakami, K., Y. Hosokawa and S. Talano, 1998. Monitoring on bottom sediment quality improvement by sand capping in Mikawa bay. *Bullutin of Coastal Oceanography*, 36: 83–89.

- Park, K., J. Y. Park, M. R. Jo, H. S. Yu, H. J. Lee, J. H. Kim, E. G. Oh, S. B. Shin, Y. K. Kim and T. S. Lee, 2013. Antimicrobial resistance in Escherichia coli isolated from the shellfish farms in the southern coast of Korea. *Korean Journal of Fish Aquatic Science*, 46: 528–533.
- Park, N. B., H. Y. Lee, S. M. Kim, J. S. Lee, 2014. Nitrification and Denitrification of land-based fish farm wastewater using an anaerobic-aerobic upflow biological aerated filter. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 47: 622–629.
- Park, T., C. J. Jang, J. H. Jungclaus, H. Haak, W. Park, and I. S. Oh, 2011. Effects of the Changjiang river discharge on sea surface warming in the Yellow and East China Seas in Summer. *Continental Shelf Research*, 31: 15–22.
- Park, S. M., H. B. Jun, S. P. Hong, and J. C. Kwon, 2003. Small sewage treatment system with an anaerobic-anoxic-aerobic combined biofilter. *Water Science & Technology*, 48: 213–220.
- Patriquin, D. G. and R. Knowles. 1972. Nitrogen fixation in the rhizosphere of marine angiosperms. *Marine Biology*, 16: 49–58
- Pitta, P., E. T. Apostolaki, M. Giannoulaki and I. Karakassis, 2005. Mesoscale changes in the water column in response to fish farming zones in three coastal areas in the Eastern Mediterranean Sea. Estuarine. *Coastal and Shelf Science*, 65: 501–512.
- Raczynska, M., S. Machula, A. Choinski and L. Sobkowiak, 2012. Influence of the fish pond aquaculture effluent discharge on abiotic environmental factors of selected rivers in Northwest Poland. *Acta Ecologica Sinica*, 32: 160–164.
- Roh, H. J., Y. J. Lim, A. Kim, N. E. Kim, Y. J. Kim, N. B. Park, J. Y. Hwang, M. G. Kwon and D. H. Kim, 2018. Distribution of indicator bacteria in seawater off the coast of Jeju Island. *Korean Journal of Fish Aquatic Science*, 51: 450–455.
- Seong, K.-T., J.D. Hwang, I.-S. Han, W.J. Go, Y.S. Suh, and J.Y. Lee, 2010. Characteristic for long-term trends of temperature in the Korean waters. *Journal of Korean Society of Marine Environment & Safety*, 16(4): 353–360 (in Korean with English abstract).
- Shay, L. K., P. G. Black, A. J. Mariano, J. D. Hawkins, and R. L. Elsberry, 1992. Upper ocean response to Hurricane Gilbert. *Journal of Geophysical Research*, 97, 20227–20248.

- Shi, N. and Q. Zhu, 1996, An abrupt change in the intensity of the East Asian Summer Monsoon Index and its relationship with temperature and precipitation over East China. *International Journal of Climatology*, 16: 757–764.
- Shin, H.-R., S.-C. Hwang, and C.-H. Kwak, 2001. Seasonal distribution of oceanic conditions and water mass in the Korea Strait and the East China Sea: Correction of atmosphere cooling effect. *Journal of the Korean earth science society*, 22(1): 47-64.
- Smith, R. L. and J. H. Duff, 1988. Denitrification in a sand and gravel aquifer. Applied and Environmental Microbiology, 54: 1071–1078.
- Son, Y. B., J. H. Ryu, J. H. Noh, S. J. Ju, and S.-H. Kim, 2012. Climatological variability of satellite-derived sea surface temperature and chlorophyll in the South Sea of Korea and East China Sea. *Ocean and Polar Research*, 34(2): 201–218 (in Korean with English abstract).
- Son, Y. B., W. D. Gardner, M. J. Richardson, J. Ishizaka, J.-H. Ryu, S.-H. Kim, and S. H. Lee, 2012. Tracing offshore low-salinity plumes in the Northern Gulf of Mexico during the summer season by use of multispectral remote-sensing data. *Journal of Oceanography*, 68(5): 743–760.
- Takeuchi, T., 1999. Possibility of water quality improvement works for environmental conservation in water areas. *Bulletin of Coastal Oceanography*, 36: 508–513.
- Won, Y.J., S.-W. Yeh, B.Y. Yim, and H.-K. Kim, 2017, Relationship between Korean monthly temperature during summer and Eurasian snow cover during spring. *Atmosphere Korean Meteorological Society*, 27(1): 55–65 (in Korean with English abstract).
- Yang, S.-K. and B.-G. Lee, 1996. The Characteristics of seasonal variations of sea surface hear flux in northern Cheju Island. *Bulletin of Marine and Environment Research Institute*, 20: 41–46 (in Korean with English abstract).
- Yeh, S.-W. and C.-H. Kim, 2010. Recent warming in the Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation. *Continental Shelf Research*, 30: 1428-1434.
- Yun, C. J., C. D. Heo, S. W. Kim, I. S. Kim, S. C. Park, 1999. Ammonia removal of aquacultural water by electrochemical method. *Journal of KTSWT*, 21: 1171–1177.

- Yoon, S. C., S. H. Youn, J. D. Whang, Y. S. Suh, and Y. Y. Yoon, 2015. Long-term variation in ocean environmental conditions of the northern East China Sea. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 18(3): 189–206 (in Korean with English abstract).
- Yoon, Y. H., 2017. Marine Bio-environmental Characteristics with the Distributions of Dinoflagellate Cyst Assemblages in the Ulsan Coastal Waters (UCW). *Korean Journal of Environmental Biology*, 35: 361–372.
- Yu, R., B. Wang, and T. Zhou, 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia. *Geophysical Research Letters*, 31: L22212, doi:10.1029/2004GL021270.

주 의

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