

BS  
PE  
99  
60  
5-  
11  
95  
0-1

반폐쇄해역(곰소만) 생태계  
가치평가를 위한 대축척 연안생태지도  
제작

한국해양과학기술원

BSPE99605-11950-1

# 반폐쇄해역(곰소만) 생태계 가치 평가를 위한 대축척 연안생태지도 제작

Large-scale ecological mapping for ecosystem  
value assessment on embayment(Gomso-bay)

2018.12.31

한국해양과학기술원

# 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “반폐쇄해역(곰소만) 생태계 가치 평가를 위한 대축척 연안생태지도 제작에 관한 연구”과제의 (연차,최종)보고서로 제출합니다.

2018. 12 . 31

총괄연구책임자 : 유 주 형

참 여 연 구 원 : 구 본 주

“ : 이 윤 경

“ : 김 근 용

“ : 김 계 림

“ : 김 민 규

“ : 김 범 준

“ : 서 재 환

“ : 장 민 성

“ : 엄 진 아

“ : 황 득 재

“ : 신 지 선

“ : 정 영 석

“ : 신 지 현

“ : 조 혜 경

## 보고서 초록

과제고유 번호	PE99605	해당단계 연구기간	2016.08.01. ~ 2018.12.31.	단계 구분	
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	[미래바다보기]해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응			
	세부과제명	반폐쇄해역(곰소만) 생태계 가치 평가를 위한 대축척 연안생태지도 제작			
연구책임자	유 주 형	해당단계 참여연구원수	총 :       명 내부:       명 외부:       명	해당단계 연구비	정부:       천원 기업:       천원 계 :        천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 15 명 내부:  2 명 외부: 13 명	총 연구비	정부: 201,000 천원 기업:       천원 계 :        천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양위성센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	115
<p>본 연구는 반폐쇄해역의 생태계 가치평가를 위한 대축척의 연안생태지도를 작성함으로써 연안생태계 환경의 변화를 분석할 수 있는 기반을 확립하고자 수행되었다. 기존의 광학위성보다 고해상도, 고정밀도의 합성개구레이더 위성영상과 무인항공기 영상을 활용하여 연안 지형도를 제작하였고, 조류로 분포도를 제작하였다. 이를 토대로 경사도, 경사경향도, 조류로 밀도도, 거리도 등의 주제도를 제작하였다. 저서생물 생태지도를 제작하고 그 기술을 고도화하였으며, 약 70 %의 이상의 높은 정확도를 가지는 분포도 및 예측도를 생성하였다. 또한 갯벌의 다양한 환경변수가 고려된 에머지 가치평가를 통해 갯벌의 가치를 객관적인 지표로 표현하였다.</p> <p>본 연구를 통해 향후 반폐쇄해역을 포함한 연안환경의 변화를 모니터링하기 위한 기초자료를 제작하는 기반을 마련할 수 있었고, 나아가 정밀도가 높은 연안생태지도 작성을 통해 연안의 효율적인 관리 및 복원 방안의 수립 지원이 가능할 것으로 판단된다. 추후 국가기본주제도로 사용되기 위해 필요한 요구사항을 분석하고, 수요자 맞춤형 자료를 생산함으로써 연안역의 체계적인 관리 및 연안생태계에 대한 정확한 경제적 가치를 제공할 수 있을 것으로 보여진다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	반폐쇄해역, 곰소만, 생태가치평가, 원격탐사, 대축척, 연안생태지도			
	영 어	Semi-enclosed coastal area, Gomso-bay, Ecological evaluation, Remote-sensing, Large scale, Coastal ecological mapping			

# 요 약 문

## I. 제 목

- 반폐쇄해역(곰소만) 생태계 가치 평가를 위한 대축척 연안생태지도 제작

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 연구개발의 목적

1. 반폐쇄해역의 대축척 연안환경 기본도 제작기술과 생태환경 분석기술 고도화
2. 생태계서비스 가치 평가기술 고도화

- 연구개발의 필요성

1. 연안관리에 대한 과학적 관리 시스템 필요
2. 원격탐사 기술을 활용한 연안생태지도 개발 필요
3. 생태계서비스의 공간적 가치평가 필요

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 연구내용 및 범위

1. 연안환경 기본도 제작
  - (가) 연안지형도 제작
  - (나) 조류로 분포도 제작
  - (다) 주제도 제작

2. 저서생물 생태지도 분석 기술 고도화
  - (가) 연안환경-생물분포 기여도 분석 및 분석 기술 고도화
  - (나) 저서생물 생태지도 제작 및 제작 기술 고도화

### 3. 반폐쇄해역의 생태계서비스 가치평가

(가) 에머지 평가의 공간범위 설정

(나) 에머지 평가 목록 선정

(다) 에머지 평가

## IV. 연구개발결과

### 1. 연안환경 기본도 제작

(가) 연안지형도 제작

- 기존의 광학위성 기반이 아닌 SAR 위성인 TanDEM-X를 이용하여 높은 정확도와 공간해상도를 가지는 연안지형도 제작함

- 회전익 무인항공기와 고정익 무인항공기를 이용하여 갯벌 일부 지역의 연안지형도를 완성함

(나) 조류로 분포도 제작

- TanDEM-X 자료를 기반으로 조류로의 폭과 깊이를 함께 분석 가능한 기법을 적용함

- 조류로의 위치를 정확하게 파악하지 못하는 문제를 해결하기 위해 영상의 경사도와 경사경향도를 이용하여 실제 조류로의 위치를 파악, 새로운 조류로 분포도를 완성함

(다) 주제도 제작

- 연안지형도를 바탕으로 경사도, 경사경향도를 제작하였고, 조류로 분포도를 바탕으로 조류로 밀도도, 거리도를 제작하였음

- 표층퇴적물 현장관측 자료를 이용하여 퇴적물 분포에 기반한 연안표층퇴적도를 제작함

### 2. 저서생물 생태지도 분석 기술 고도화

(가) 연안환경-생물분포 기여도 분석 및 분석 기술 고도화

- 대형저서동물의 출현은 퇴적상과 지형고도와 큰 상관성을 보였으며, 모래 함유량이 가장 높은 상관성을 보임

(나) 저서생물 생태지도 제작 및 제작 기술 고도화

(1) 대형저서동물 출현확률 분석

- 벼들갯지렁이류 (*Heteromastus filiformis*), 칠게 (*Macrophthalmus japonicus*), 길게 (*Macrophthalmus dilatatus*) 등 10종을 대상으로 하여 산출된 대형저서동물 출현확률은 약 74%의 높은 정확도를 나타냄

(2) 저서생물분포 예측도 제작

- 엽낭계의 경우에는 노출시간이 짧으며 모래함유율이 높은 서식환경에서 주로 출현하였으며, 썩의 경우에는 노출시간이 긴 하부갯벌에서 높은 출현확률을 보임 길게의 경우에는 중부조간대에 넓게 분포하였으며 모래함유율이

높은 서식환경에서 출현확률이 높게 나타남 저서생물분포 예측도의 평균 정확도는 약 77.4%로 나타남

(3) 저서동물 공간정보 가시화 가능성 파악

- MATLAB 프로그램의 경계검출을 이용한 서식굴 입구 검출 결과 농계 서식굴의 경우 총 17개의 서식굴 중 14개의 서식굴을 검출하였고, 3개의 입구를 검출하지 못했으며 약 82%의 검출율을 나타냄
- 칠계의 경우 서식굴 입구를 전혀 검출하지 못하는 것으로 나타남. 이는 칠계 서식굴의 경우 잔존수가 많아 검출율이 낮은 것으로 판단됨

3. 반폐쇄해역의 생태계 서비스 가치평가

(가) 에머지 평가의 공간범위 설정

- 인공위성 영상을 이용해 산출된 곰소만 갯벌의 면적은 약 63.06 km<sup>2</sup> 로 나타남

(나) 에머지 평가 목록 선정

- 에머지 평가 대상 자연자본 목록 : 일조, 바람, 강수, 파도, 조석, 대형저서동물 자원량, 미세조류 자원량, 퇴적상에 따른 미세조류 자원량
- 에머지 평가 대상 생태계서비스 항목 : 수산물 공급, 탈질에 의한 영양염류제거, 갯벌 생물의 생물교란에 의한 유기물 제거, 과학연구가치, 어촌체험마을

(다) 에머지 평가

- 곰소만 자연자본의 총 에머지 가치는 약 424억 이며 이 중 조석에너지의 가치가 가장 높게 나타났으며 파도 에너지의 가치가 가장 낮게 나타남
- 곰소만 생태계서비스의 총 에머지 가치는 약 1,577억 이며, 이 중 수산물 공급 가치가 가장 높았고 미세조류 자원량의 가치가 가장 낮게 나타남
- 곰소만 생태계의 에머지 가치는 약 2,009억원이며, 이는 현재까지 에머지 평가법으로 평가된 지역중에 가장 높은 가치로 나타남

V. 연구개발결과의 활용계획

1. 기술적 측면

- 기존의 인공위성 원격탐사 자료에 비해 월등한 해상도와 정밀도를 가지는 연안 지형도 생성 기술을 개발함
- 국내 최초로 반폐쇄해역(곰소만)에 대한 갯벌 저서생물생태지도와 에머지 가치평가를 완료함
- 초고해상도의 무인항공기 영상과 AI 기반 이미지 분석 기술을 융합한 정밀한 저서생물 생태지도 제작의 가능성을 확인함

2. 경제/산업적 측면

- 실제 토지현황을 반영한 연안개발 계획 수립이 가능함

- 에머지 가치 결과를 통해 갯벌 기능의 정확한 가치를 제공할 수 있으며, 객관적인 연안생태계 변화자료를 제공하여 연안생태계의 변화가 지역경제에 미치는 영향을 파악할 수 있음

### 3. 사회적 측면

- 갯벌의 가치에 대해 객관적인 지수를 도입함으로써 향후 갯벌관리 정책 결정에 도움이 될 수 있음
- 반폐쇄해역의 생물자원을 관리하는데 효율적인 관리방안을 제시할 수 있음

# S U M M A R Y

## I. Title

- Large-scale ecological mapping for ecosystem value assessment on embayment(Gomso-bay)

## II. Objectives and Necessities of the Study

### ○ Objectives of the Study

1. Development for large-scale ecological mapping production and ecological environment analysis techniques
2. Development for evaluation on ecosystem service value

### ○ Necessities of the Study

1. Development for large-scale ecological mapping production and ecological environment analysis techniques
2. Development for evaluation on ecosystem service value

## III. Contents and Scopes of the Study

### ○ Contents and Scopes of the Study

#### 1. Coastal environment mapping

- (a) Digital elevation model(DEM) mapping
- (b) Tidal channel distribution mapping
- (c) Thematic mapping

#### 2. Development for analysis technique on ecological map of macroinvertebrate

- (a) Development for contribution analysis and analysis technique between coastal environment and macroinvertebrate distribution
- (b) Development for production of macroinvertebrate ecological map and production technique



### 3. Evaluation for ecosystem service value of embayment

- (a) Spatial set up for emergy evaluation
- (b) Selection for emergy evaluation list
- (c) Emergy evaluation

## IV. Results

### 1. Coastal environment mapping

#### (a) DEM mapping

- SAR(TanDEM-X) based DEM which has higher resolution and accuracy is developed.
- Both rotary-wing and fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle is used to make DEM of Gomso tidal flat.

#### (b) Tidal channel distribution mapping

- TanDEM-X based tidal channel distribution map is created. The map can analyze width and depth of tidal channel.
- However, the map has a problem that location of tidal channel is unaccurate. So, new tidal channel distribution map that has accurate location is created.

#### (c) Thematic mapping

- Aspect, slope, tidal channel density and tidal channel distance map are created from DEM and tidal channel distribution map.
- Surface sedimentary facial map is created from in-situ measurement data.

### 2. Development for analysis technique on ecological map of macroinvertebrate

#### (a) Development for contribution analysis and analysis technique between coastal environment and macroinvertebrate distribution

- Appearance of macroinvertebrate was highly correlated with sedimentary facies and elevation and sand composition showed highest correlation with that.

#### (b) Development for production of macroinvertebrate ecological map and production technique

##### (1) Appearance probability of macroinvertebrate analysis

- Appearance probability of macroinvertebrate showed about 74% accuracy using ten macroinvertebrate species including *Heteromastus filiformis*,

*Macrophthalmus japonicus*, and *Macrophthalmus dilatatus*.

- (2) Production on prediction diagram of macroinvertebrate distribution
  - *Scopimera globosa* appeared in low exposure duration and high sand composition environments.
  - *Upogebia major* showed high appearance probability in lower tidal flat with high exposure duration.
  - *Macrophthalmus dilatatus* was widely distributed in middle tidal flat with high sand composition environments.
  - Mean accuracy of macroinvertebrate prediction diagram was about 77.4%.
- (3) Evaluation for visualization possibility of spatial information on macroinvertebrate
  - Fourteen burrow entrance of *Uca arcuata* out of seventeen were detected using edge detection of MATLAB with detection ratio of 82%.
  - Burrow entrance of *Macrophthalmus japonicus* were not detected using edge detection of MATLAB mainly due to remnant water.

### 3. Evaluation for ecosystem service value of embayment

- (a) Spatial set up for emergy evaluation
  - Estimated area of Gomso tidal flat was 63.06 km<sup>2</sup> based on the satellite image.
- (b) Selection for emergy evaluation list
  - Natural capital list for emergy evaluation : sunlight, wind, rainfall, wave, tide, macroinvertebrate, microalgae.
  - Ecosystem service list for emergy evaluation : marine product supply, nutrient removal by denitrification, organic matter removal by bioturbation of macroinvertebrate, scientific research, fishing village.
- (c) Emergy evaluation
  - Overall emergy value of natural capital in Gomso Bay was 42.4 billion won and emergy value of tide energy was highest whereas that of wave energy was lowest among natural capitals.
  - Overall emergy value of ecosystem service in Gomso Bay was 157.7 billion won and emergy value of marine product supply was highest whereas that of microalgae was lowest among ecosystem services.
  - Overall emergy value of Gomso Bay was 200.9 billion won and it is highest value compared with other area.

## V. Suggestion for application

### 1. Technical part

- Higher resolution and accurate DEM than existing satellite remote-sensing data is developed.
- Benthic ecosystem map and emergy evaluation is carried out domestically for the first time.
- Possibility of creating accurate benthic ecosystem map that fuses hyper resolution UAV imagery and AI based image analysis technic is identified.

### 2. Economy/Industrial part

- Real land cover of coastal area can be adapted to coastal development plan.
- Emergy evaluation can provide accurate worth of the tidal flat function. And influence of coastal ecosystem change to local economy can be understanding by providing objective coastal ecosystem change data.

### 3. Social part

- Emergy index, which is objective value index of tidal flat can be help to determinate policy of coastal management.
- Effective management policy to supervise biological resources of semi-enclosed coastal area can be suggested.

# C O N T E N T S

## I . Introduction

1. Object of the study
2. Importance of the study

## II. Trends in the research at domestic and overseas

1. Technical issue at domestic and overseas
2. Service issue at domestic and overseas

## III. Result

1. Coastal environment mapping
2. Benthos ecology mapping technic development
3. Ecosystem service evaluation of semi-enclosed coastal area

## IV. Achievement of research estimation and contribution to other area

1. Achievement estimation
2. Contribution

## V. Plan to application of the study

## VI. Reference

Attachment: papers from this study

# 목 차

## 제 1 장 서론

- 1 절 연구개발의 목표
- 2 절 연구개발의 중요성

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 1 절 국내외 기술동향 및 수준
- 2 절 국내외 시장 현황

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- 1 절 연안환경 기본도 제작
- 2 절 저서생물 생태지도 분석 기술 고도화
- 3 절 반폐쇄해역의 생태계 서비스 가치평가

## 제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 1 절 연구개발목표 달성도
- 2 절 대외기여도

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

## 제 6 장 참고문헌

별첨. 정량적 성과

## 표 목 차

표 3-1-1-1. 회전익 무인항공기 관측 지상기준점 측량 값 .....	26
표 3-1-1-2. 고정익 무인항공기 관측 지상기준점 측량 값 .....	29
표 3-1-1-3. 입도분석 결과 .....	38
표 3-2-1-1. 저서생물분포 예측도 제작을 위한 과거 연구지역 유형 및 정점 수 .....	40
표 3-2-1-2. 갯벌 대형저서동물과 환경요인간의 상관성 .....	41
표 3-2-1-3. 갯벌 유형에 따른 대형저서동물의 출현확률 정확도 .....	44
표 3-2-2-1. 회전익 무인항공기 시스템 .....	47
표 3-3-1-1. 에머지 평가항목에 사용되는 단위 및 환산방법 .....	51
표 3-3-3-1. 자연자본의 항목과 설명 .....	52
표 3-3-3-2. 해양생태계 서비스 항목과 설명 .....	52
표 3-3-3-3. 본 연구의 에머지 평가 자연자본 목록 .....	53
표 3-3-3-4. 본 연구의 에머지 평가 해양생태계서비스 목록 .....	53
표 3-3-4-1. 곰소만 일조 에머지 가치 평가 .....	54
표 3-3-4-2. 곰소만 바람 에머지 가치 평가 .....	54
표 3-3-4-3. 곰소만 강수 에머지 가치 평가 .....	54
표 3-3-4-4. 곰소만 파도 에머지 가치 평가 .....	55
표 3-3-4-5. 곰소만 조석 에머지 가치 평가 .....	55
표 3-3-4-6. 곰소만 대형저서동물 자원량 에머지 가치 평가 .....	55
표 3-3-4-7. 곰소만 미세조류 자원량 에머지 가치 평가 .....	56
표 3-3-4-8. 모래함량에 따른 곰소만 갯벌의 면적 .....	56
표 3-3-4-9. 곰소만 갯벌의 모래함량별 chlorophyll <i>a</i> 농도 .....	57
표 3-3-4-10. 퇴적상에 따른 미세조류 자원량 에머지 가치 평가 .....	57
표 3-3-4-11. 곰소만 자연자본 에머지 가치 평가 결과 .....	59
표 3-3-4-12. 부안군 어촌계 수산물 생산량 및 판매금액 .....	60
표 3-3-4-13. 고창군 어촌계 수산물 생산량 및 판매금액 .....	61
표 3-3-4-14. 수산물 에머지 가치 평가 .....	62
표 3-3-4-15. 곰소만 과학연구 에머지 가치 평가 .....	63
표 3-3-4-16. 곰소만 어촌체험마을 정보 .....	63
표 3-3-4-17. 곰소만 어촌체험마을 체험객 및 수입 .....	64
표 3-3-4-18. 곰소만 어촌체험마을 에머지 가치 평가 .....	65
표 3-3-4-19. 곰소만 영양염류 제거 에머지 가치 평가 .....	65
표 3-3-4-20. 사리와 조금 때의 두토막눈썹참갯지렁이의 개체 밀도, 길이, 생체량 .....	67

표 3-3-4-21. 두토막눈썹참갯지렁이의 생물교란에 의한 유기물 제거 에머지 가치 평가 .....	69
표 3-3-4-22. 곰소만의 에머지 가치 평가 결과 .....	70
표 3-3-4-23. 타지역과 곰소만의 에머지 가치 결과 비교 .....	72

# 그 립 목 차

그림 1-2-1-1. 곰소만 갯벌의 30년간의 환경변화 .....	19
그림 1-2-3-1. 곰소만 바지락 양식장의 위기 .....	19
그림 3-1-1-1. 연구지역 위성영상 .....	22
그림 3-1-1-2. TanDEM-X data; Interferometric phase .....	23
그림 3-1-1-3. TanDEM-X 기반 DEM .....	24
그림 3-1-1-4. 지상기준점 없이 Unwrapping 시 발생하던 에러 .....	24
그림 3-1-1-5. Sun's denoise 기법 적용 전과 후 .....	25
그림 3-1-1-6. 회전익 무인항공기 비행루트 및 지상기준점 .....	26
그림 3-1-1-7. 카메라 내부표정 왜곡보정을 위한 영상 왜곡모델 계산 .....	27
그림 3-1-1-8. 무인항공기를 활용한 DEM 제작 과정 모식도 .....	27
그림 3-1-1-9. 곰소만 갯벌의 정사영상 및 수치고도모델 .....	28
그림 3-1-1-10. 고정익 무인항공기 연구에 사용한 지상기준점 .....	29
그림 3-1-1-11. 고정익 무인항공기를 활용하여 획득한 연구지역의 정사영상 .....	30
그림 3-1-1-12. 고정익 무인항공기를 활용한 연안지형도 .....	30
그림 3-1-1-13. TanDEM-X 기반 DEM과 UAV 기반 DEM의 융합 예시 .....	31
그림 3-1-1-14. 기존의 분석을 통해 제작된 조류로 분포도 .....	32
그림 3-1-1-15. 연안지형도 기반 조류로 추출의 예 .....	33
그림 3-1-1-16. 재추출한 조류로 분포도 .....	33
그림 3-1-1-17. DEM으로부터 생성된 경사경향도 .....	34
그림 3-1-1-18. DEM으로부터 생성된 경사도 .....	35
그림 3-1-1-19. TanDEM-X 기반 조류로 밀도도 .....	36
그림 3-1-1-20. TanDEM-X 기반 조류로 거리도 .....	36
그림 3-1-1-21. 입도분석을 위한 퇴적물 시료 획득 정점 .....	37
그림 3-1-1-22. 객체기반 분류 방식을 이용해 제작한 연안 표층피복도 .....	39
그림 3-2-1-1. 갯벌 유형별 환경요인에 따른 분포 .....	40
그림 3-2-1-2. 대형저서동물과 환경요인과의 상관성 산출을 위한 주좌표분석 .....	42
그림 3-2-1-3. 갯벌 유형별 대형저서동물 출현확률 .....	43
그림 3-2-1-4. 저서생물분포 예측도 제작방법 개념도 .....	45
그림 3-2-1-5. 곰소만 갯벌 엽낭계 중분류 저서생물분포 예측도 .....	45
그림 3-2-1-6. 곰소만 갯벌 속 중분류 저서생물분포 예측도 .....	46
그림 3-2-1-7. 곰소만 갯벌 길게 중분류 저서생물분포 예측도 .....	46
그림 3-2-2-1. 가재붙이, 칠게, 농게 서식굴 입구 .....	47



그림 3-2-2-2. 회전익을 이용해 촬영한 곰소만 갯벌 표면 영상 .....	48
그림 3-2-2-3. 농계 서식굴 입구 검출 .....	48
그림 3-2-2-4. 칠계 서식굴 입구 검출 .....	49
그림 3-3-2-1. Landsat 영상을 이용해 산출된 곰소만 갯벌의 면적 .....	51
그림 3-3-4-1. 부안군과 고창군 어촌계 위치 .....	59
그림 3-3-4-2. 고창군 어업별 어장 구획도 .....	60
그림 3-3-4-3. 곰소만 어촌계별 수산물 에머지 가치 .....	62
그림 3-3-4-4. 곰소만 어촌체험마을 위치 .....	64
그림 3-3-4-5. 두토막눈썸참갯지렁이와 섭식활동 후 갯벌 표면에 배출된 펠렛 .....	66
그림 3-3-4-6. 두토막눈썸참갯지렁이의 섭식활동에 의한 유기물 제거 연구 지역 .....	66
그림 3-3-4-7. 조위변화 및 퇴적물과 펠렛 시료 채집 시간 .....	67
그림 3-3-4-8. 사리와 조금의 퇴적물과 펠렛의 탄소 농도 .....	68
그림 3-3-4-9. 사리와 조금의 퇴적물과 펠렛의 질소 농도 .....	69

# 제 1 장 서론

## 1 절. 연구개발의 목표

### 1. 다중플랫폼 원격탐사 기반 고해상도 연안환경 기본도의 제작

- 고평소만 갯벌에 대한 TanDEM-X 기반의 지형도를 제작하고 검증한다.
- 고평소만 갯벌에 대하여 고해상도 위성영상과 무인항공기 영상기반의 조류로 특성을 분석한다.
- 고평소만 갯벌의 다중 원격탐사자료 기반 연안 표층 피복도를 제작한다.

### 2. 저서생물 생태지도 분석 기술 고도화

- 연안환경-생물분포 기여도를 분석한다.
- 저서생물생태지도를 제작한다.

### 3. 반폐쇄해역의 생태계 서비스 가치평가

- 에머지 평가의 공간범위를 설정한다.
- 에머지 평가 모델 및 평가표를 작성한다.
- 에머지 지수를 계산한다(에머지 산출 비용, 환경 부하비용, 에머지 속성 지수 등).
- 에머지량을 계산한다(평가대상 시스템의 특성 파악 및 정책 시사점 제시).

## 2 절. 연구개발의 중요성

### 1. 연안관리에 대한 과학적 관리 시스템 필요

- 우리나라 경우 연안개발에 의하여 1998년을 기준으로 연안습지의 약 25% 이상이 소멸되었으며, 대규모 간척사업인 새만금 방조제가 완성되어 습지의 소멸은 더욱더 가속되는 실정이다. 중국도 1950년부터 매립을 통해 약 57%의 연안습지가 사라졌으며, 특히 급격한 도시화와 경제성장으로 인한 사회기반 시설 조성을 위하여 2006년부터 2010년까지 연평균 약 400 km<sup>2</sup>의 연안습지가 간척되었다 (Qiu, 2011, Ma et al., 2014).
- 해양환경보존과 녹색성장의 지속가능발전을 위해서는 국내 해양생태계의 변화를 감시하고 관리할 수 있는 과학적 근거를 기반으로 한 정량적 공간자료 확보가 요구되나, 현재 연안습지 및 갯벌 특성과 가치에 대한 정량화된 공간자료의 부재로 인하여 생태계 기반의 종합적 평가에는 한계가 있다.
- 해양생태계의 정기적, 지속적 감시를 위한 해양생태계 건강성 평가법의 개발이 필요하며, 전문가 집단은 물론 일반대중들도 쉽게 인지하고 이해할 수 있도록 해양생태계 건강 정보가 반영된 해양생태계 건강지수라는 표현 수단을 필요로 하고 있다.
- 육역 중심 국가기본도에 연안환경기본도와 생태지도를 연계함으로써 육해역과 인위적/자연적 변화를 통합 분석하고 관리할 수 있으며 공간정보 기반의 체계적인 생태계 서비스 지원이 가능해진다.

## 2. 원격탐사 기술을 활용한 연안생태지도 개발 필요

- 환경부에서 제공하는 토지피복도에서 연안은 연안습지, 갯벌, 염전으로만 분류되어 있으며, 생태적 가치를 등급화하는 생태·자연도에서 별도관리구역으로 대부분 제외되어 있다.
- 반면 해양수산부의 연안주제도는 해안, 해상구역, 양식장, 산업단지, 연안항 등의 15 항목으로 분류되어 있으나, 원격탐사 기반이 아니라 축척이나 분류방법이 체계적이지 않아 지속적 관리와 업데이트가 어렵다.
- 따라서 5년 주기로 수행하는 연안습지 면적조사의 경우 면적산출시기마다 기준이 달라 갯벌면적 및 그 변화를 계산하기 어려운 상황이다.
- 매립 및 간척에 의해서 많은 연안습지생태계가 훼손되어 많은 해양생물이 감소하였고, 이로 인해 수산 자원 이용에 많은 문제점을 야기하고 있으나 훼손면적이나 손실자료를 정량적으로 알 수 없다.
- 해양환경관리공단에서 제공하는 바다생태정보나라 전자지도는 해양생태계관련 조사항목에 대한 정보는 있으나 공간 정보를 제공하지 않는다.
- 따라서 연안생태지도를 작성함으로써 연안환경의 변화를 정량적으로 분석할 수 있는 공간 DB를 확보하고자 한다.

## 3. 생태계서비스의 공간적 가치평가 필요

- 해양생태계의 가치 평가는 우리 경제가 해양생태계에서 일어나는 다양한 생태적 과정으로부터 얻는 도움에 관한 평가로 생태계 변화가 인간에 미치는 영향을 이해하는 주요 수단이다.
- 우리나라 갯벌의 생태계서비스 평가는 1990년대 중반 이후 시작하여 소비자의 선호도에 기반을 둔 경제학적 가치 평가법을 중심으로 갯벌생태계가 제공하는 생태계서비스의 일부를 평가하였다.
- 그러나 현재 우리나라 갯벌의 생태적 특성과 사회경제적 여건을 반영하여 갯벌생태계의 자연자본과 생태계서비스를 체계적으로 분류한 사례가 없다.
- 특히 곰소만 바지락 양식장의 경우 인근 어민들의 생계 및 먹거리와 밀접한 연관이 있지만, 최근 들어 생산성이 꾸준히 감소하고 있는 실정이다(그림 1-2-3-1).
- 당초 곰소만이 바지락 양식장으로 성공할 수 있는 주된 요인으로 만의 한가운데 위치하는 모래톱이 외해의 강한 파도를 막아주고, 중심부에 위치한 주진천으로부터 영양염이 풍부한 담수가 유입되었기 때문으로 해석된다. 1980년대에는 하전리 마을 앞 가까운 곳에서 양식하였으나 이후 점진적으로 외해로 이동하게 되었다. 또한 30년 동안 다양한 환경변화가 일어나면서 곰소만의 바지락 양식이 위협받고 있다(그림 1-2-3-2).
- 이와 같은 현존하는 문제점에 대응하고, 갯벌생태계의 보전과 이용을 조화하기 위해서는 갯벌생태계의 관리를 공간 관리 측면에서 접근해야 하기 때문에 공간적 가치 평가가 필요하다.

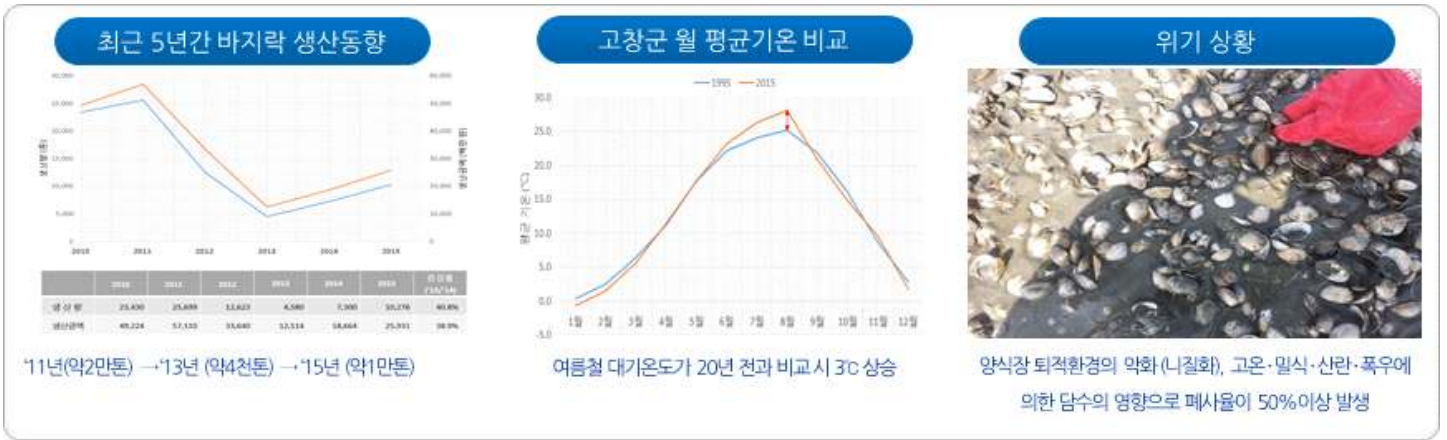


그림 1-2-3-1. 곰소만 바지락 양식의 위기



그림 1-2-3-2. 곰소만 갯벌의 30년간의 환경변화

## 제 2 장 국내외 연구개발 현황

### 1 절. 국내외 기술 동향 및 수준

#### 1. 국내사례

- 광학영상시계열 자료를 이용한 연안의 퇴적 변화량 추정 및 퇴적 작용의 경향성, 염생식물 분포, 저서 생물 분포 예측도 생성 등의 연안 연구가 활발히 이루어지고 있다(Ryu et al., 2008; Lee et al., 2011; Choi et al., 2011a, b).
- 한국해양과학기술원 해양위성센터에서는 우리나라 강화도 남단, 천수만, 근소만, 새만금방조제, 곰소만 갯벌 등을 대상으로 인공위성 원격탐사를 활용하여 지형변화, 퇴적상 변화, 생물상 변화 등에 대한 연구를 수행한 바 있다.
- 또한 Landsat series, IKONOS, Kompsat series, TerraSAR-X 와 같은 다양한 해상도를 갖는 다중위성 자료를 활용하여 연안주제도 작성을 고도화하는 연구를 수행하였다.
- 다중위성자료 뿐만 아니라 고해상도의 LiDAR 자료와 GIS 기술을 접목하여 정량적인 갯벌의 퇴적물과 퇴적상의 변화를 분석하는 등 다양한 갯벌 환경 변화를 관측하는 연구가 이루어지고 있다 (Choi et al., 2010). 또한, 최근에 발사된 TanDEM-X Pol-InSAR inversion 기법으로 광역적인 지역에 대한 정밀도 높은 3차원 지형도를 생성하는 연구가 진행 되고 있다 (Lee and Fatoyinbo, 2015).
- 또한, 최근에는 무인 항공시스템을 사용하여 연안의 지질/생태 환경 모니터링에 정밀도를 향상시키는 연구가 진행되고 있다.

#### 2. 국외사례

- 최근의 연안 호주의 Murray et al. (2012, 2014)은 황해 및 동중국해 연안의 갯벌 면적과약을 위해 Landsat TM/ETM+ 자료를 사용하여 NDWI (Normalized differenced water index)지수를 생성하여 적용한 결과, 1980년대 이후 황해 및 동중국해 연안의 갯벌이 약 28% 감소한 것으로 분석되었다. 하지만, 황해 연안 갯벌의 낮은 이해도와 원격탐사기법의 제약으로 인하여 정성적 추정에 그쳤다.
- EU 연안국 연구진들은 FAST(Foreshore Assessment using Space Technology) 사업을 통해 다중위성자료 및 현장자료를 공간 DB화한 뒤 GIS기법을 사용하여 연안의 퇴적상, 생물상, 지형에 대한 종합적인 분석을 진행 중에 있다.
- 미국의 USGS는 장·단기 해안변화분석 및 연안관리 목적으로 고해상도 항공사진과 위성영상을 적극 활용하고 있다.

#### 3. 현 기술의 한계 분석

- 단일 센서로서의 인공위성을 활용한 관측은 촬영 주기 및 촬영 영역의 제한으로 인하여 연안환경변화가 일어나는 시점에 맞춘 관측자료를 원활하게 획득하는데 어려움이 있다. 또한 정밀한 갯벌 생태환경과약을 위해서는 다양한 시기별, 해상도별 영상자료의 획득이 요구되나, 비용적인 문제로 인하여 연구의 효율성이 감소한다. 따라서 TanDEM-X 위성영상을 활용한 자료 및 무인항공 시스템을 이용하여, 대기 및 조석 변화에 영향을 최소화 할 수 있는 무인 원격탐사 기술을 비롯한 다양한 플랫폼의 다중 센서 자료를 적극 활용하는 것이 필요하다.
- 현재 국/내외에서 개발 중이거나 개발된 무인기의 경우 대부분 육역에서의 활용에 초점이 맞추어져 있

다. 따라서 수계를 포함한 연안역의 조사를 위해서는 무인항공기 영상을 처리할 수 있도록 새로운 영상 처리 기술개발과 현장관측이 필수적이다.

- 또한 현존하는 무인항공기의 시스템 한계로 인하여, 광역적인 영역을 촬영하기에는 비행시간이 짧은 편이다. 연안의 생태환경도 제작을 위해서는 보다 긴 비행시간으로 넓은 지역에 대한 영상 획득이 가능한 무인기 활용 기술이 필요하다.

## 2 절. 국내외 시장 현황

- 원격탐사 기반으로 생성된 다양한 연안생태지도가 해양수산부에서 제공하는 연안주제도 서비스에 포함되어 있지 않다.
- 해양환경관리공단에서 실시하는 해양생태계조사 항목 중 원격탐사를 기반으로 분석이 가능한 조사항목이 있음에도 원격탐사를 활용이 미비한 실정이다.
- 독일, 미국, 호주 등은 일부 연안에 대하여 연안토지피복도를 오픈플랫폼 형식의 웹서비스로 제공하고 있다.

# 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

## 1 절. 연안환경 기본도 제작

### 1. 연구지역

- 곰소만은 한반도 서해안의 중남부인 전라북도 부안군과 고창군 사이에 위치하며, 반폐쇄 형태의 만 지형을 가진다(그림 3-1-1-1). 상하 폭은 만 입구에서 7~9 km이고 좌우 길이는 20 km 에 달하는 대형 만이며, 만의 북쪽 40 km 지점의 해안으로 금강이 유입되며, 만의 내부로는 남부 해안에 소규모 준용하천인 주진천이 유입한다(장과 최, 1998).
- 곰소만은 대체로 수심 10 m 미만의 천해로서 대부분이 조간대로 구성되어 있다. 조간대는 주로 남쪽 해안을 따라 분포하며, 최고 폭이 6 km 에 달하며 만 입구에 가까운 조간대 상부에 위치한 썰질 조간대에 사주 형태의 쉼니어(Chenier)가 특징적으로 발달해 있다(Lee et al., 1994; Chough et al., 2000).
- 조석은 일조부등이 거의 없는 반일주조로 평균조차는 433.8 cm, 최대조차는 717.4 cm에 이른다. 조류는 만 북부에 나타나는 주조류로에서 창조류가 1.15 m/s, 낙조류가 1.50 m/s로 낙조가 우세한 환경이다(국립지리원, 1981).

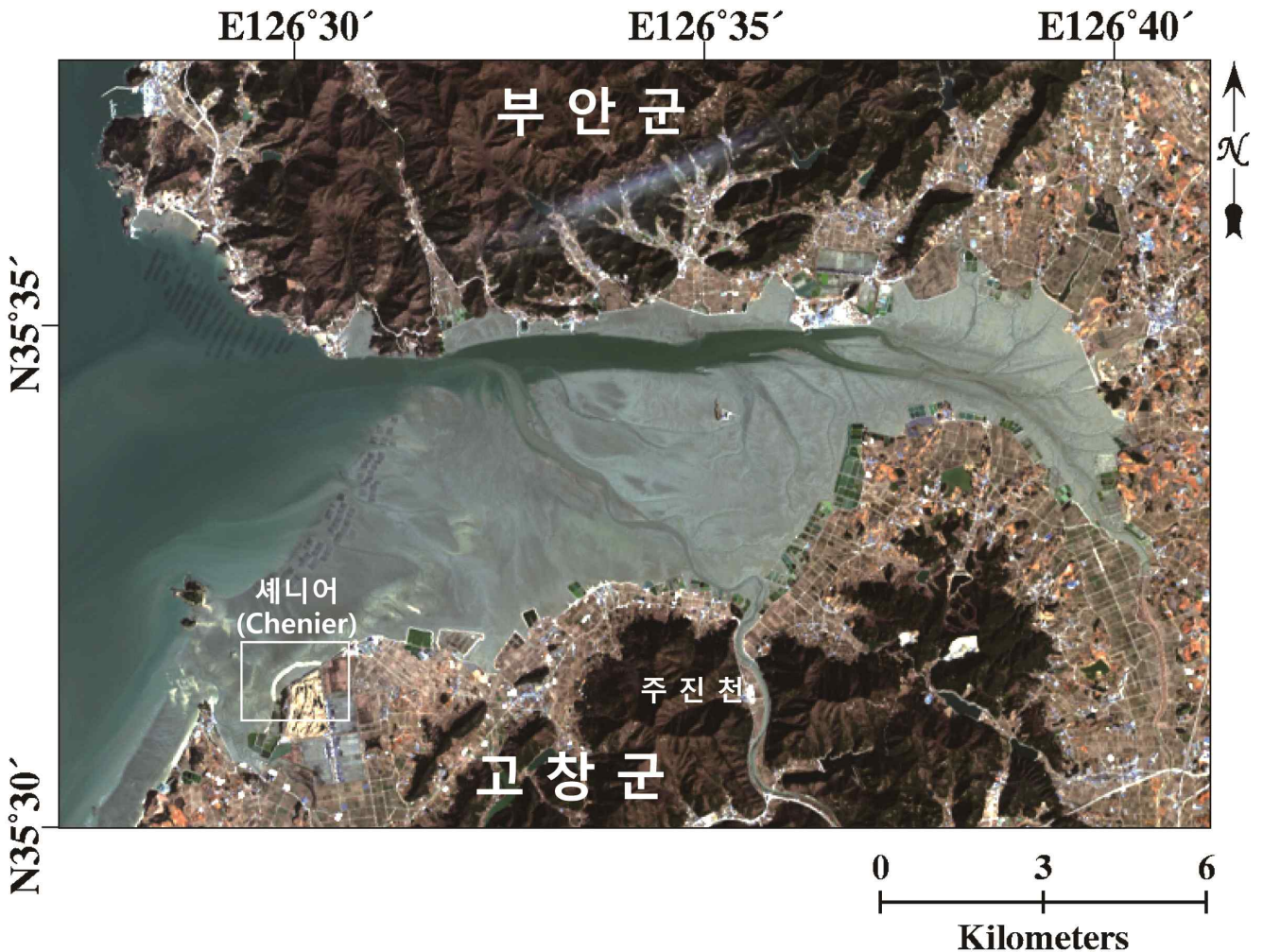


그림 3-1-1-1. 연구지역 위성영상

## 2. 연안 기본도 제작

### (가) 연안지형도: 수치지형도(Digital Elevation Model, DEM)

- 기존의 갯벌 DEM에 비해 고해상도의 영상인 TanDEM-X SAR(Synthetic Aperture Radar) 위성영상과 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 사용하여 고품질 갯벌의 DEM을 제작하였고, 연안지형도 제작기술을 고도화하였다.
- 독일 항공우주센터(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V., DLR)의 고해상도 SAR 계획의 일환으로 개발된 인공위성으로, TerraSAR-X와 한 쌍으로 운용될 수 있도록 설계되었다. TerraSAR-X 위성과 거의 동시에 촬영을 진행하여 시간차에 의한 에러를 낮출 수 있다.
- 두 위성은 Interferometric SAR(InSAR) 방식을 이용하여 지표를 관측하게 되며, 이 때 중요한 두 영상의 위상차가 중요한 요인 중 하나이다. 영상 간 위상차는 기선(baseline)의 길이에 따라 정확도가 결정되며, 시간 기선의 경우 TerraSAR-X 위성과의 동시 촬영 방식을 통해 매우 짧게 만들어 정확도를 높였으며, 공간적인 기선 역시 두 위성 간의 거리를 조절하는 방식으로 관측 지역에 따라 수직 오차를 줄일 수 있다(Lee & Ryu, 2017).
- TanDEM-X의 관측 모드는 Bistatic(Bi), Stripmap(SM) mode로 촬영되었으며, 이는 TerraSAR-X와 동시에 촬영을 진행하였고, 촬영 영역 전체를 스캐닝하는 방식으로 촬영했음을 의미한다. 완성된 연안지형도의 공간해상도는 5 m이다(그림 3-1-1-2, 3).

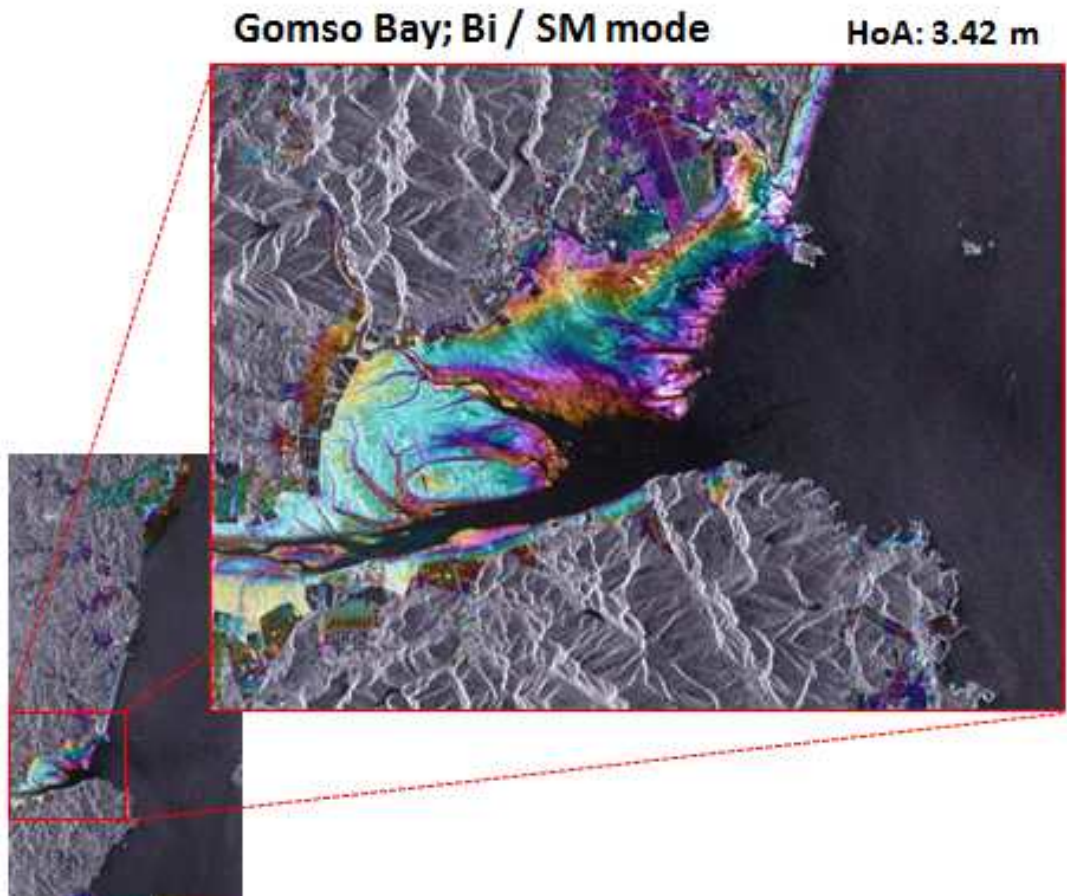


그림 3-1-1-2. TanDEM-X data; Interferometric phase

- 기존의 TanDEM-X 영상을 이용한 InSAR 기법 상에서 문제가 발생했던 unwrapping 에러를 지상기준점 없이도 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 자료를 이용한 후처리 기술로 제거하였다(그



림 3-1-1-4). 기존의 처리방식의 경우 기선 길이가 충분히 길다면 문제가 없지만, 기선 길이가 짧게 촬영된 경우 수직 오차가 크게 발생하는 문제를 가지고 있었다. 이를 전 지구를 대상으로 한 DEM인 SRTM의 표고를 활용하여 보정하였고, 오차를 크게 감소시킬 수 있었다.

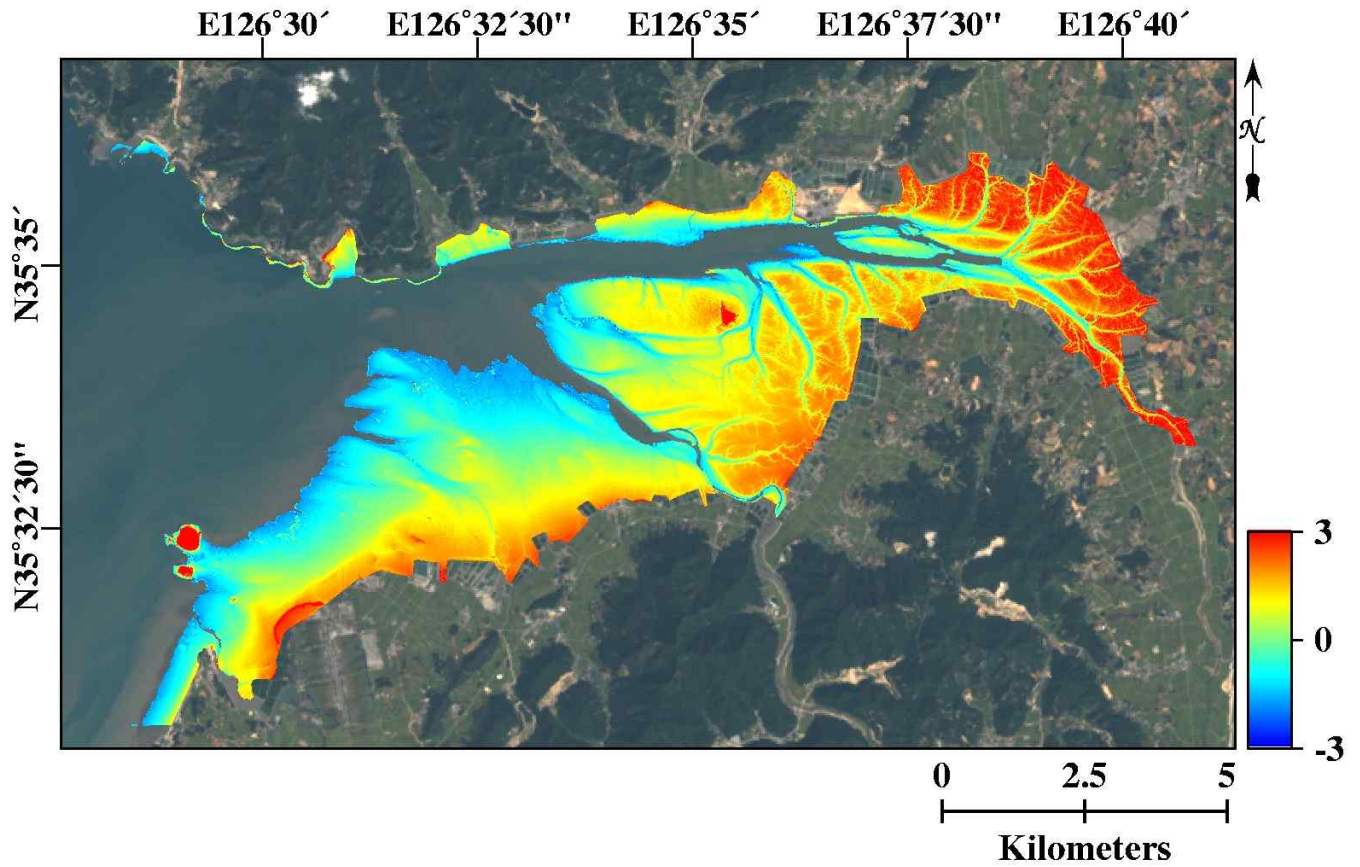


그림 3-1-1-3. TanDEM-X 기반 DEM, 단위:(m)

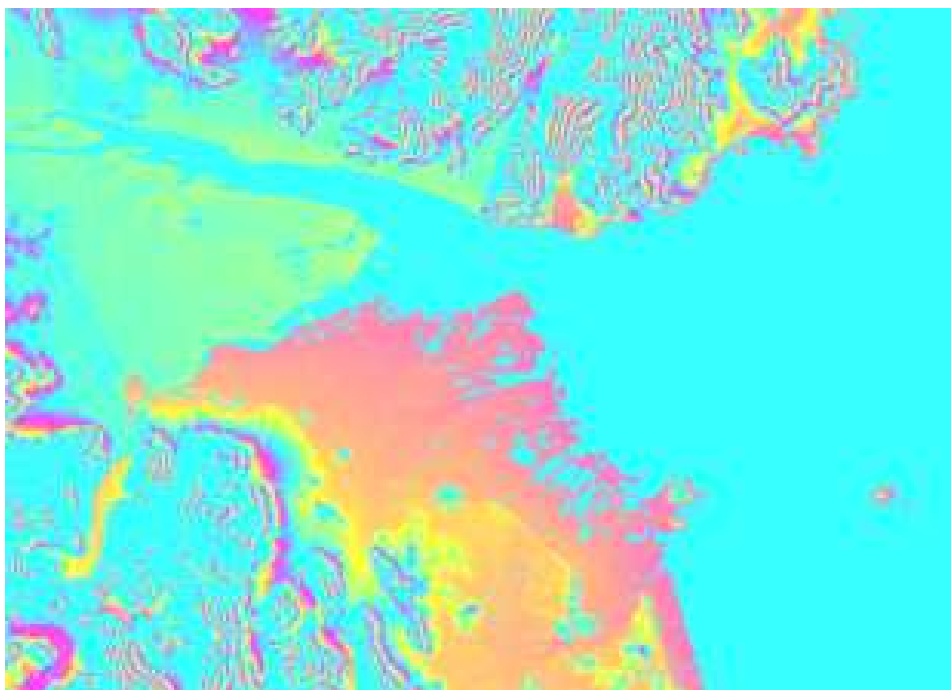


그림 3-1-1-4. 지상기준점이 없으면 Unwrapping시 발생하던 예러. 영상 중간에 noise 값들이 나타남.

- 또한 Sun's denoise 기법을 적용하여 speckle 영향으로 noise가 발생하던 값들을 지형고도의 왜곡을 최소화하여 제거하였다(그림 3-1-1-4).
- 타원체고로 표시되던 TanDEM-X 기반 DEM의 지형고도를 정표고로 변환해 주었다.
- TanDEM-X 기반 DEM을 통해 곰소만 갯벌의 지형고도 분포가 -3 m에서 3 m 사이에 주로 분포하는 것을 알 수 있다. 만 안쪽의 갯벌은 일부 3 m 보다 지형이 높게 나타나기도 하지만 대체로 범위 안에 분포하는 편이다. 조간대 상부에서는 고도 변화가 크게 나타나며, 조간대 하부로 내려갈수록 변화폭이 줄어들어 완만한 경사를 지닐 것으로 판단된다.

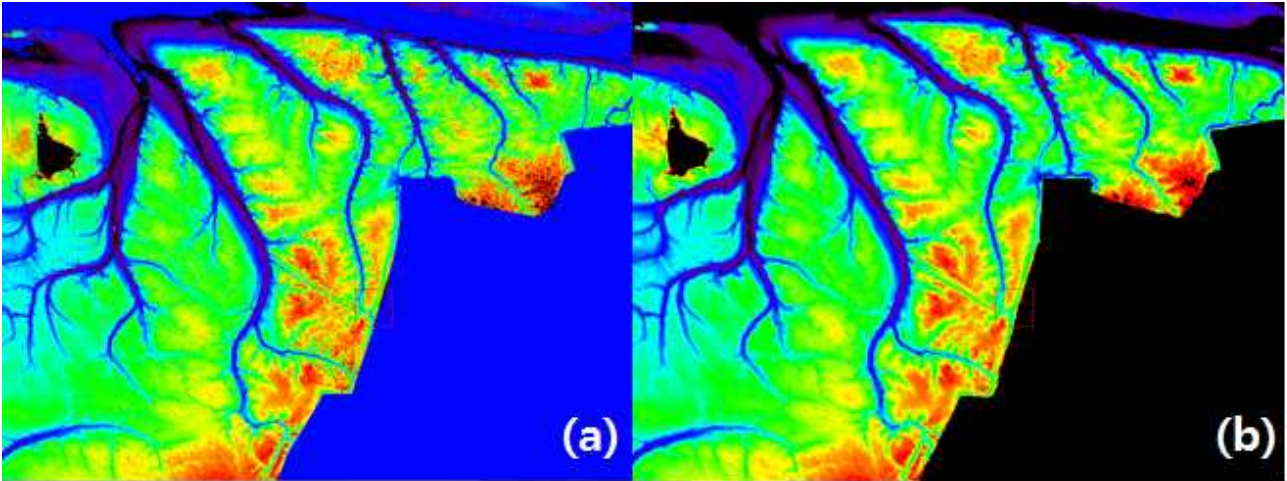


그림 3-1-1-5. Sun's denoise 기법 적용 전(a)과 후(b)

- 무인항공기를 이용한 연안지형도의 제작은 우선적으로 회전익 무인항공기를 이용해 진행되었다.
- 무인항공기는 저비용, 고효율의 플랫폼으로 원하는 시간에 최소한의 인력과 비용으로 고해상도의 DEM을 제작할 수 있는 장점이 있다(김 등, 2015).
- 특히 접근이 상대적으로 제한되는 갯벌 등에 대해서 최소한의 인력으로 관측을 수행할 수 있어, 최근 무인항공기를 이용한 연구가 증가하고 있는 추세이다.
- 회전익 무인항공기는 바람 등의 외부적인 요인에 대하여 안정적으로 대응할 수 있으며, 자세제어가 편리하다는 장점이 있다. 또한 탑재할 수 있는 센서의 무게 제한이 고정익 무인항공기에 비해 여유로운 편이기 때문에 다양한 센서를 탑재할 수 있다는 장점이 있다.
- 다만 배터리 용량의 한계로 인하여, 비행시간이 약 20 분 정도로 제한되어 있다. 그로 인하여 곰소만 영역 전체가 아닌 일부 지역을 대상으로 관측을 수행하였다(그림 3-1-1-6).
- 정확한 DEM의 획득을 위하여, 비행 루트를 따라 무인항공기 영상에서 확인 가능한 지상기준점을 설치 및 측량하였으며, 지상기준점의 지형고도는 Leica 사의 RTK-GPS(Real Time Kinetic - Global Positioning System)을 이용하여 측량하였다. 지상기준점은 무인항공기를 통해 획득한 영상의 정사영상을 제작하고 기하보정하여 실제 연안지형도를 제작하기 위해서는 필수적인 요소이다.
- 지상기준점은 국토지리정보원에서 제공하는 국가통합수준점을 기준으로 하여 지형표고 측정에 신뢰도를 더하였다.
- 연구지역 1과 2에서 각각 16개, 6개의 정점을 지상기준점으로 설정하였으며, 각 좌표와 고도는 표 3-1-1-1에 기술하였다.

표 3-1-1-1. 회전익무인항공기 관측 지상기준점 측량 값

명칭	좌표체계 (Geodetic-WGS84)			
	Longitude	Latitude	Elevation (m)	
연구지역 1	KH_1	126.558	35.544	1.214
	KH_2	126.556	35.545	0.998
	KH_3	126.555	35.547	0.659
	KH_4	126.553	35.548	0.408
	KH_5	126.550	35.549	0.269
	KH_6	126.548	35.550	0.037
	KH_7	126.546	35.552	-0.196
	KH_8	126.545	35.554	-0.484
	KH_9	126.542	35.555	-0.664
	KH_10	126.539	35.557	-0.997
	KH_11	126.536	35.558	-1.015
	KH_12	126.535	35.560	-1.225
	KH_13	126.533	35.561	-1.333
	KH_14	126.530	35.562	-1.178
	KH_15	126.527	35.563	-1.353
	KH_16	126.526	35.565	-1.37
연구지역 2	KB_1	126.617	35.575	1.606
	KB_2	126.617	35.577	1.65
	KB_3	126.6177	35.573	1.765
	KB_4	126.618	35.569	1.955
	KB_5	126.618	35.571	1.429
	KB_6	126.617	35.577	0.48



그림 3-1-1-6. 회전익 무인항공기 비행루트 및 지상기준점

- 영상의 처리는 Lowe(2004)에 의해 개발된 SIFT(Scale-Invariant Keypoints) 알고리즘과 항공삼각측량법을 사용하였으며, 추가적으로 카메라 내부표정을 실시하여 영상의 왜곡을 보정하였다(그림 3-1-1-7).
- 회전익 무인항공기의 촬영은 2016년 10월에 진행되었으며, 비행고도는 180m, 영상 중복도는 진행방향과 좌우방향 모두 70% 이상으로 설정하였다. 영상의 중복도는 정사영상 정합을 위한 필수적인 과정이며, 중복도가 부족하면 정사영상의 정합이 제대로 이루어지지 않아 영상 중간에 빈 공간이 생성되기도 하며, 중복도가 너무 높게 설정될 경우 정사영상 제작에 사용될 사진의 개수가 증가하여 정합 과정에 과도한 로드가 걸려 영상처리 시간이 급격하게 증가한다.

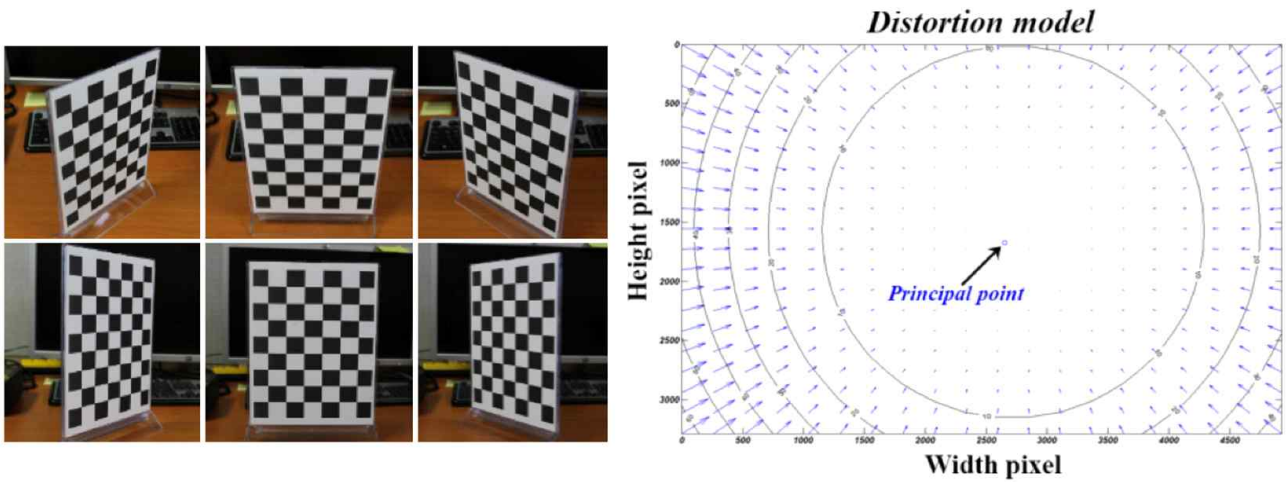


그림 3-1-1-7. 카메라 내부표정 왜곡보정을 위한 영상 왜곡모델 계산

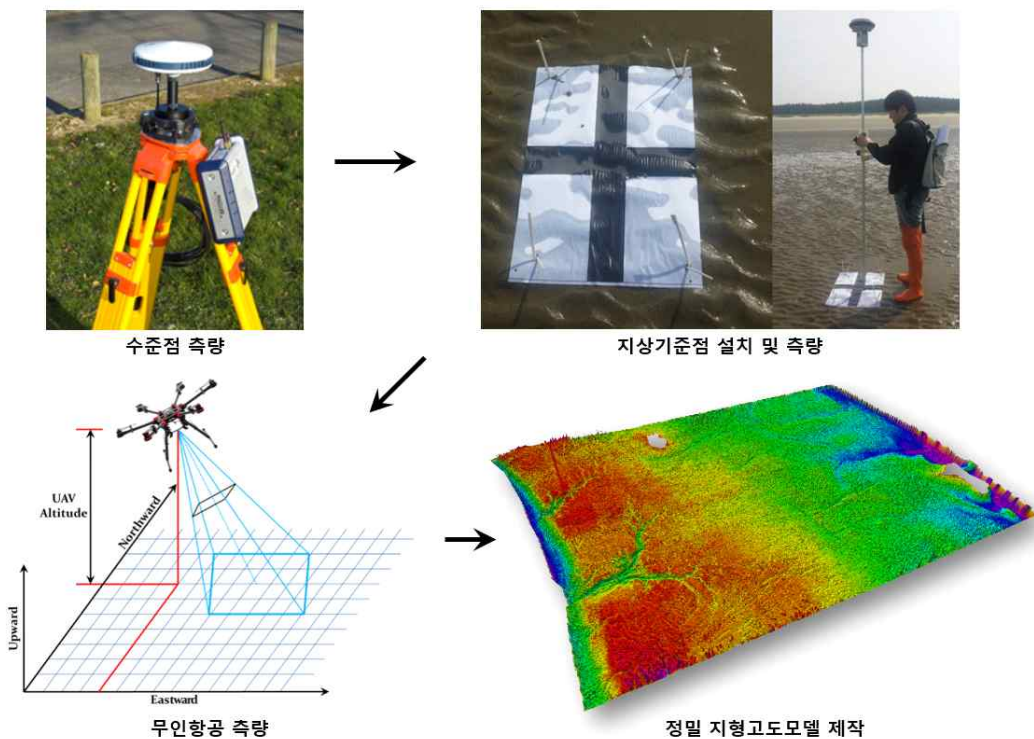


그림 3-1-1-8. 무인항공기를 활용한 DEM 제작 과정 모식도

- 영상왜곡을 최소화하기 위하여 자이로스코프 센서가 장착된 짐벌을 이용하여 센서를 고정하였으며, 센서는 Canon 6D DSLR 카메라를 사용하였다. 짐벌은 카메라 렌즈의 방향을 직하방향으로 고정시켜주는 역할을 수행하며, 무인항공기가 바람 등에 의해 자세가 틀어지더라도 항상 일정한 방향으로 영상을

촬영하는 것을 도와준다.

- 전체적인 무인항공기를 활용한 DEM 제작의 과정은 그림 3-1-1-8에 도시화하였으며, 영상 자체가 가지고 있는 기하오차를 수정해주는 1차 기하보정을 수행한 뒤 지상기준점을 이용한 2차 기하보정을 실시하였다. 1차 기하보정은 무인항공기 GPS로 측정된 위치정보와 IMU 자세정보 데이터를 이용하여 수행되었다.



그림 3-1-1-9. 곰소만 갯벌의 정사영상 및 수치고도모델(좌: KH 라인, 우: KM 라인)

- 정사영상과 연안지형도의 생성은 모두 Photoscan 영상처리 소프트웨어를 사용하여 진행하였으며, 생성된 정사영상과 연안지형도의 공간해상도는 각각 12cm, 48cm 였다(그림 3-1-1-9). 공간해상도는 무인항공기에 장착된 센서의 CCD(Charge Coupled Device) 크기, 센서의 FoV(Field of View), 촬영고도에 의해 결정된다.
- 회전익 무인항공기를 이용한 관측 결과, 연구지역 2에서는 높은 정확도의 연안지형도를 획득할 수 있었으나, 연구지역 1에서는 상대적으로 오차가 큰 연안지형도를 획득하였다. 특히 촬영 시 구름의 이동으로 인해 광량이 급격하게 감소하여, 잔존수가 많은 지역에서 상대적으로 영상이 어둡게 나오는 등의 오차가 발생하여, 많은 부분에서 정사영상이 정합되지 않았다.
- 이에, 회전익 무인항공기를 이용한 관측에서 발생한 문제를 해결하고, 보다 넓은 면적을 관측하기 위하여, 고정익 무인항공기를 도입하였다.
- 고정익 무인항공기는 회전익 무인항공기에 비하여 장시간 비행이 가능하며, 넓은 면적에 대해서 관측을 수행할 수 있는 장점이 있다.
- 회전익 무인항공기와 동일하게 지상기준점을 설정하여 지형고도를 측량하였다(그림 3-1-1-10).
- 지상기준점은 표 3-1-1-2와 같이 측정하였으며, 총 20개의 정점에서 RTK-GPS를 사용하여 측량하였다.
- 곰소만 갯벌은 그 면적이 수십  $\text{km}^2$  이상이므로, 전체 영역에 대해 한 번에 관측하는 것은 많은 어려움이 있다. 따라서 고정익 무인항공기의 배터리가 유지되는 시간 내에 촬영을 진행할 수 있도록 일부 지역에 대해서만 관측을 수행하여 정사영상을 제작하였다(그림 3-1-1-11).



그림 3-1-1-10. 고정익 무인항공기 연구에 사용한 지상기준점

표 3-1-1-2. 고정익 무인항공기 관측 지상기준점 측량 값

명칭	좌표체계 (Geodetic-WGS84)		
	Longitude	Latitude	Elevation (m)
GOM_01	126.4936	35.5220	0.916
GOM_03	126.4851	35.5329	-2.049
GOM_05	126.4941	35.5304	-0.028
GOM_10	126.5068	35.5281	2.692
GOM_12	126.5005	35.5391	-1.385
GOM_14	126.5074	35.5371	-0.494
GOM_19	126.5221	35.5334	1.91
GOM_21	126.5112	35.5465	-1.193
GOM_23	126.5233	35.5414	0.734
GOM_25	126.5369	35.5351	1.602
GOM_27	126.5268	35.5467	0.434
KH_01	126.5586	35.5447	1.111
KH_02	126.5564	35.5457	0.833
KH_04	126.5533	35.5485	0.234
KH_06	126.5482	35.5509	-0.154
KH_08	126.5447	35.5539	-0.569
KH_10	126.5388	35.5568	-0.99
KH_12	126.5350	35.5598	-1.274
KH_14	126.5306	35.5627	-1.383
KH_16	126.5255	35.5650	-1.453



그림 3-1-1-11. 고정익 무인항공기를 활용하여 획득한 연구지역의 정사영상

- 정사영상은 무인항공기로부터 연속촬영된 각각의 영상을 접합하여 제작하였으며, 동일하게 Photoscan 소프트웨어를 사용하여 진행하였다. 영상간의 수평중첩도, 수직중첩도 모두 70%로 고정해주었다.
- 촬영된 정사영상과 지상기준점 관측을 통하여 획득한 지형고도 자료를 이용하여 연안지형도를 제작하였다(그림 3-1-1-12).
- 정사영상과 연안지형도의 해상도는 각각 13 cm, 26 cm 였다.

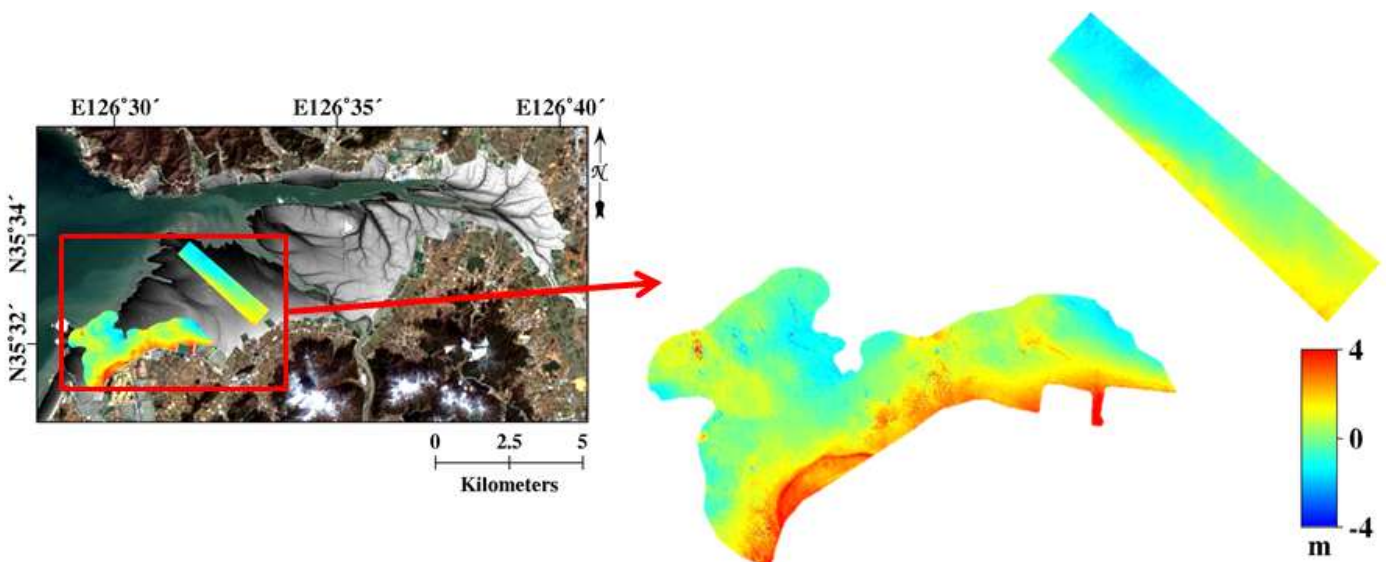


그림 3-1-1-12. 고정익 무인항공기를 활용한 연안지형도

- 비행은 2018년 4월에 시행되었으며, 간조 시간이 오후였기 때문에, Sun glint와 잔존수의 영향으로 영상의 일부에서 지형고도가 정확하게 적용되지 않아 오차가 큰 지형도가 생성되었다. 갯벌 내의 소조류로나 골에 잔존수가 남아있을 경우 햇빛이 반사되어 sun glint가 발생하게 된다. 이로 인해 해당 지점의 RGB 값에 noise가 발생하여 정상적으로 관측된 픽셀들에 비해 높은 오차를 보이게 된다. 그로 인해 고정익 무인항공기를 활용한 연안지형도의 일부를 제거해 주었다.
- 고정익 무인항공기를 이용한 갯벌 관측의 가능성을 시험하고 보다 효율적인 갯벌에서의 무인항공기 이용 방안을 위한 연구로 진행된 사항이며, 추가적인 시험비행과 후처리 기법 연구를 통해 고정익 무인항공기의 실용성을 높일 예정이다.
- TanDEM-X 기반 연안지형도와 무인항공기 기반 연안지형도를 함께 나타낸 결과 중장거리 영역에 대해서는 인공위성 원격탐사를, 보다 좁은 관심영역에 대해서는 무인항공기를 활용한다면, 갯벌 관리 및 연구에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다(그림 3-1-1-12).

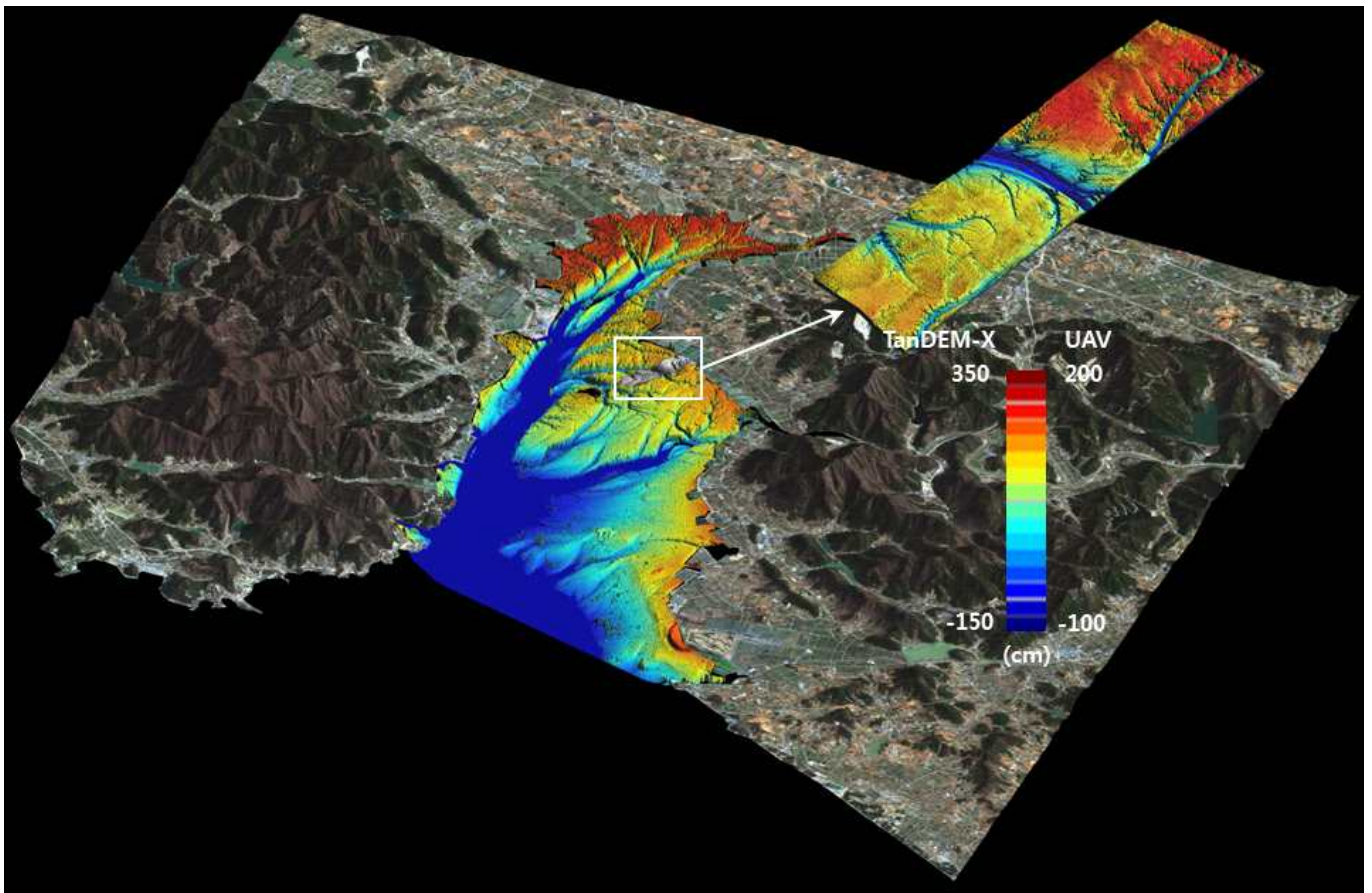


그림 3-1-1-13. TanDEM-X 기반 DEM과 UAV 기반 DEM의 융합 예시



(나) 조류로 분포도

- 5m 공간해상도를 갖는 TanDEM-X DEM 자료로부터 TidalBed와 조류로 깊이 차이를 Multi-window median neighborhood 분석기법과 Multi-scale Gaussian-Matched Filtering 기법을 적용하여 추출하였다(그림 3-1-1-13)(Liu et al., 2015).
- 조류로의 폭도 함께 고려하여 추출하였고, 기존의 조류로 분석시 사용되었던 2D 프랙탈 분석에서 폭과 깊이가 고려된 3D 프랙탈 분석이 가능하였다(그림 3-1-1-14).
- 그러나 이러한 방식은 조류로가 없는 지역에 대해서도 임의로 조류로를 생성하는 문제가 발생하였다. 특히 주진천 서쪽의 갯벌은 조류로가 적게 발달한 사질 퇴적물이 우세한 지역임에도 불구하고 많은 조류로 가지가 있는 것처럼 표현된다.
- 이러한 문제를 해결하기 위하여, DEM으로부터 생성된 경사도와 경사경향도에 기반하여 조류로를 재추출하였다(그림 3-1-1-15).
- 새로 생성한 조류로는 기존에 생성한 조류로와는 달리 폭과 깊이는 고려할 수 없지만, 곰소만 갯벌의 조류로의 분포를 비교적 정확하게 표현하였다.
- 만 안쪽의 조류로는 기존의 조류로 결과와 유사하게 나타나지만, 만 입구로 나아갈수록 조류로 가지의 수와 복잡도가 감소하였다.
- 곰소만 내에서 대부분의 조류로는 만 안쪽에 위치하지만, 조류로의 폭은 상대적으로 좁은 편이다. 폭이 넓은 큰 조류로의 경우 퇴적물의 입도가 굵어지고 외해에서 들어오는 해류나 파랑의 영향을 많이 받는 외해로 나갈수록, 주조류로에 가까워 질수록 넓어진다.

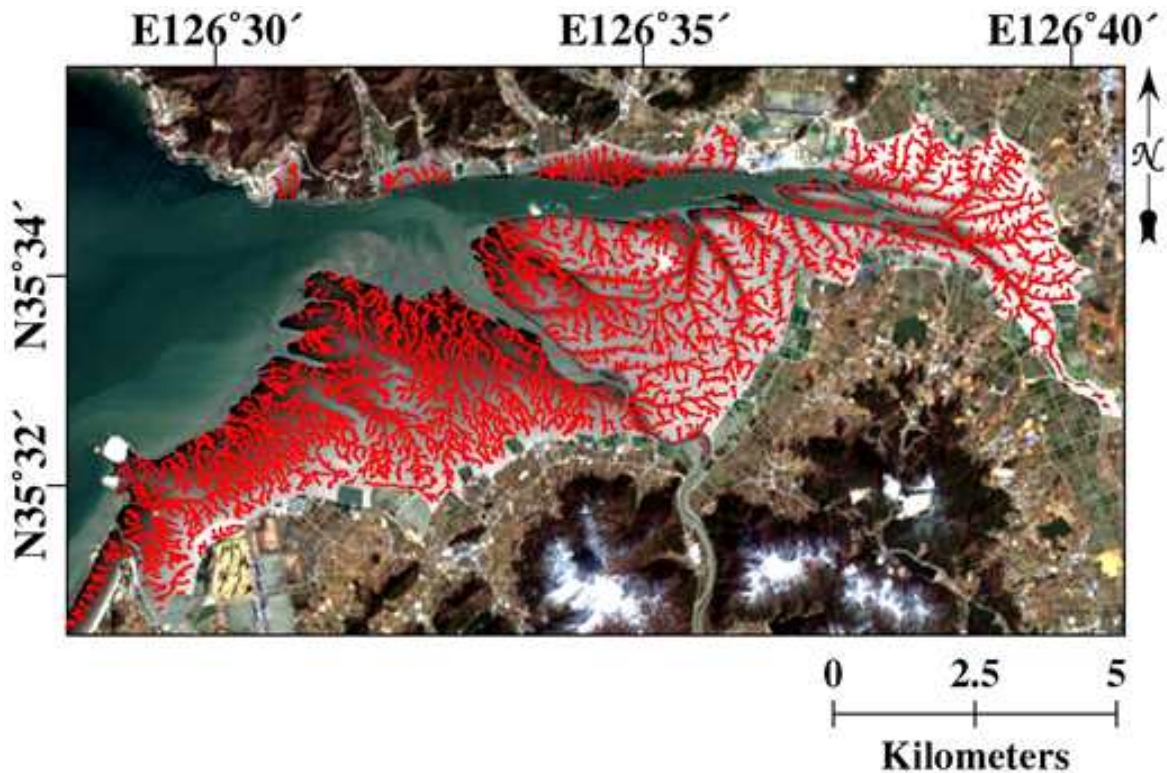


그림 3-1-1-14. 기존의 분석을 통해 제작된 조류로 분포도

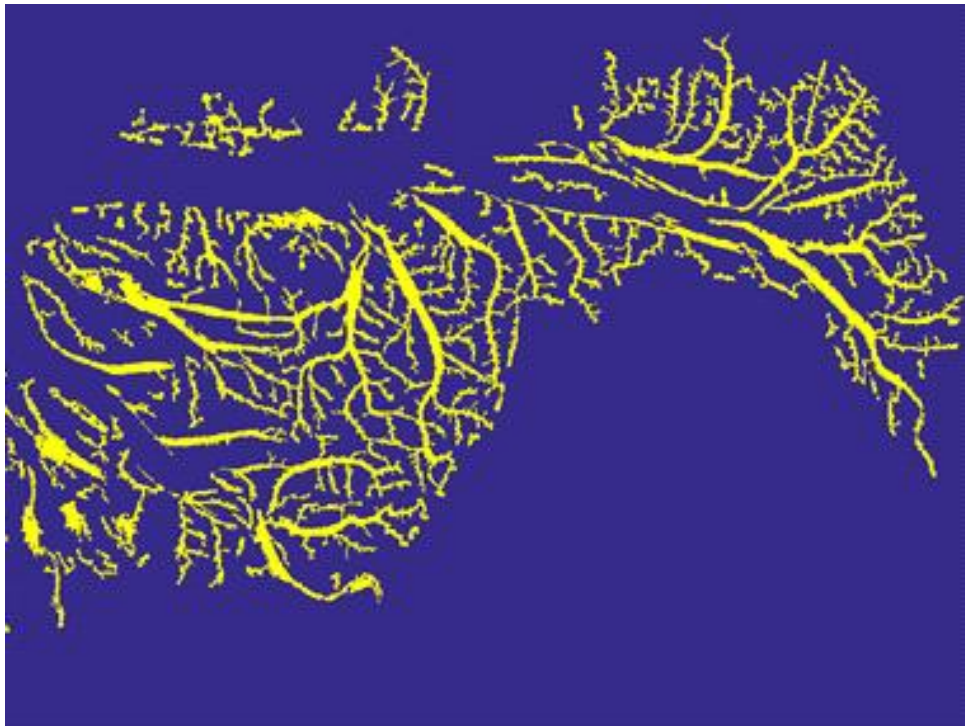


그림 3-1-1-15. 연안지형도 기반 조류로 추출의 예

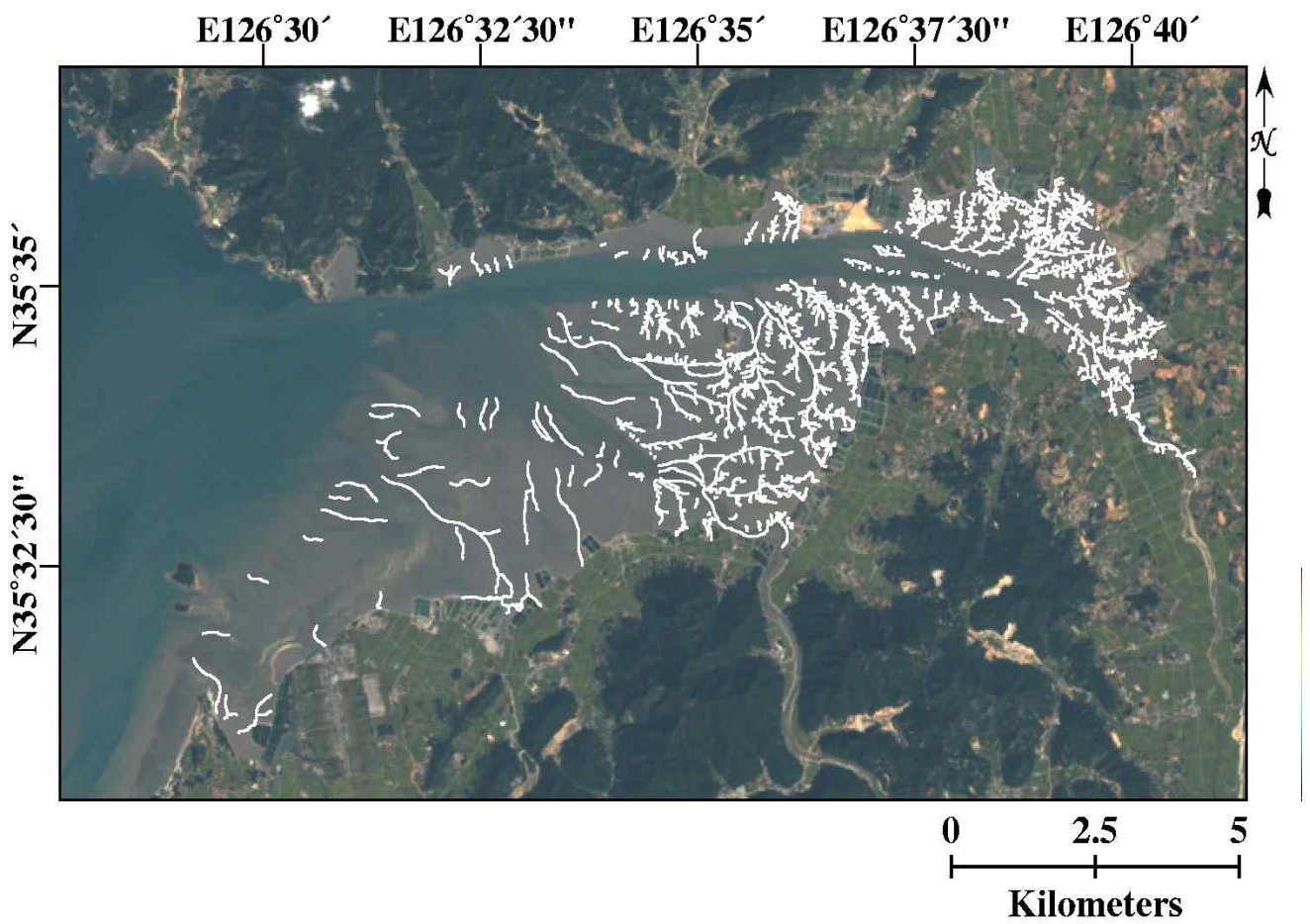


그림 3-1-1-16. 재추출한 조류로 분포도

(다) 주제도

- 경사경향도는 각 픽셀에서 어느 방향으로 지형이 기울어져있는지를 나타내는 주제도로, 0도가 북쪽이며 총 360의 방위각으로 나타내었다(그림 3-1-1-16). 단위는 도(°, degree)이다.
- 기존의 경사도와 경사경향도는 주로 산사태 등의 육역 원격탐사에서 사용되던 요소이지만, 갯벌에서도 조류로, 노출시간 등의 요소와 연관이 깊은 지형요소이기 때문에 저서생물 생태를 포함한 연구를 진행하기 위해서는 연구가 필요하다고 판단하였다.
- 경사도는 각 픽셀이 z 평면 0도를 기준으로 얼마나 경사져 있는지를 나타내는 지표로 경사경향도와 함께 조류로의 위치 및 갯벌의 기울기를 파악하는데 용이하며, 상대적으로 어느 지역이 더 완만한지 혹은 가파른지를 평가하는 기준이 될 수 있다(그림 3-1-1-17).
- 곰소만 전체의 경사도는 2도 미만의 낮은 경사를 보이지만, 조류로 부근에서는 최대 8도 이상의 높은 경사를 보인다. 이는 깊이가 깊은 조류로가 존재하며, 조류로의 굴곡이 복잡하게 구성되었음을 의미한다.
- 곰소만 남부 갯벌의 경우 대부분 북동쪽(0~90 도)을 향해 경사져 있으며, 만 내부의 경사도 분포가 상대적으로 주진천 서부의 만 입구쪽에 비해 복잡하게 분포함을 알 수 있다.
- 또한 북동쪽으로 경사져있는 경향을 통해 조류의 흐름을 예측할 수 있다. 만 안쪽의 조류로들은 대부분 북쪽의 주조류로에 합류되는 모습을 보이며, 만 중부의 조류로들은 주진천에 합류되어 외해로 흐르게 된다. 주진천 서쪽의 조류로들은 주진천으로 흐르는 경우가 없고 외해쪽으로 직접 연결된다.
- 만 중심부의 주진천을 기준으로 서부 갯벌은 조류로로 인해 경사도가 복잡하게 분포하며 4도 이상의 상대적으로 가파른 경사가 분포한다.
- 주진천 동부의 만 안쪽은 다양한 경사도의 분포로 인해 굴곡이 심한 지형이 나타남을 유추할 수 있다.
- 만 입구의 조간대 상부에 위치하는 세니어(Chenier)를 경사도 주제도를 통해 쉽게 확인할 수 있다.

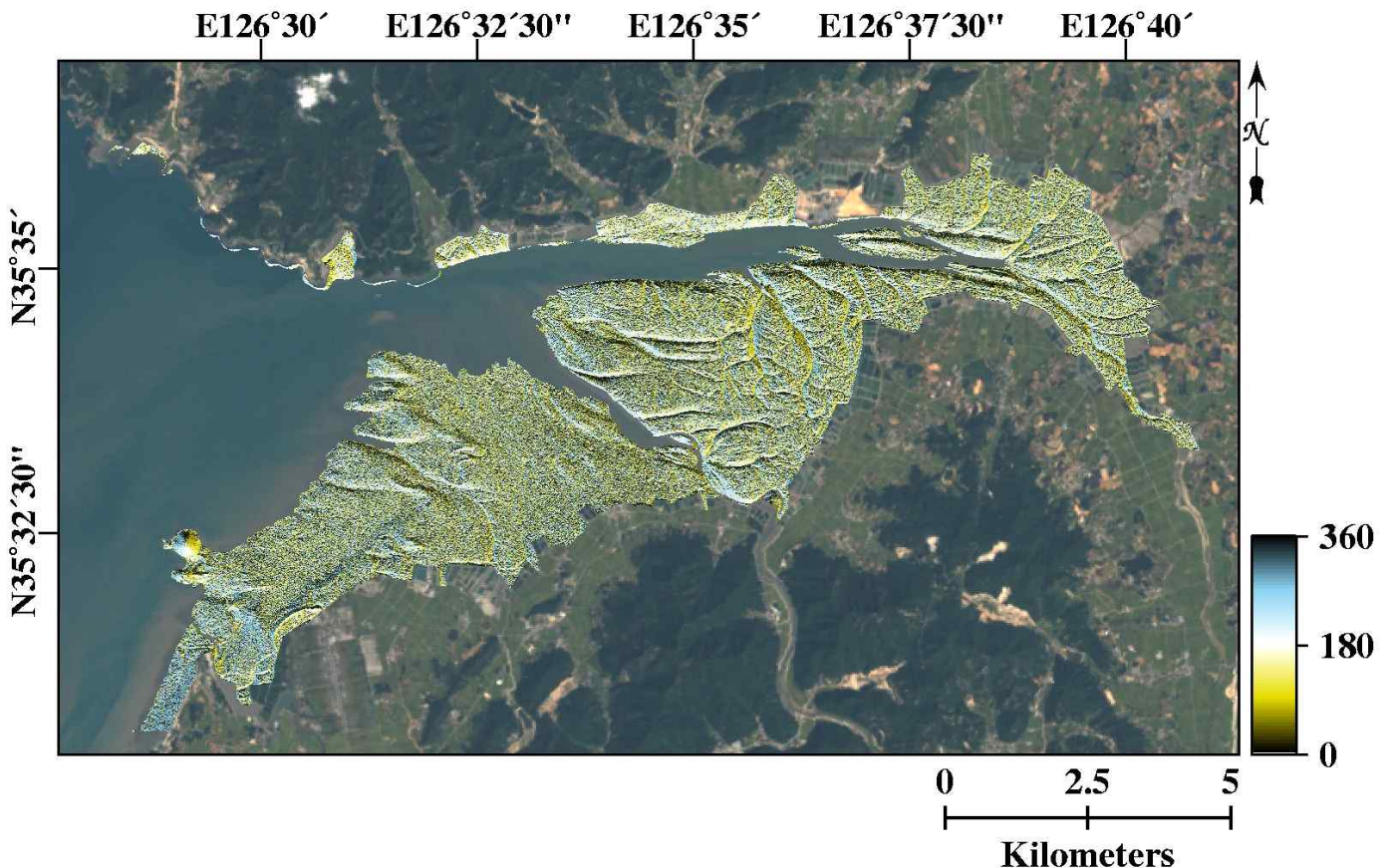


그림 3-1-1-17. DEM으로부터 생성된 경사경향도(단위: degree)

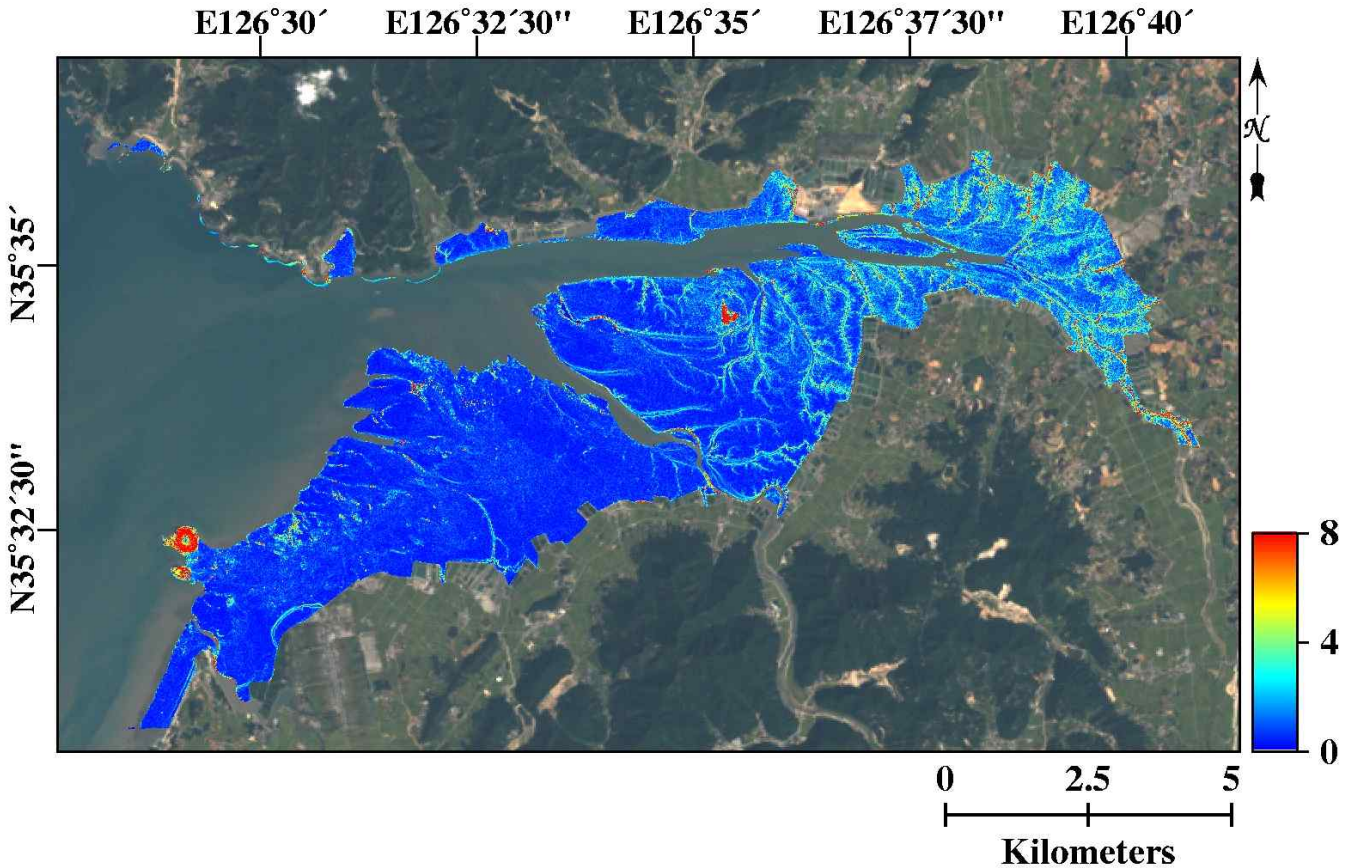


그림 3-1-1-18. DEM으로부터 생성된 경사도(단위: degree)

- 조류로 분포도를 기준으로 밀도도와 거리도를 생성하였다.
- 조류로 밀도도는 단위면적 내에 몇 m의 조류로가 분포하는지를 나타내며, 본 연구에서는 단위면적을 1 제곱미터로 설정하였다(그림 3-1-1-18). ArcGIS 프로그램의 Kernel Density function을 활용하여 계산하였다.
- 조류로 거리도는 조류로로 설정된 픽셀로부터 각 픽셀이 얼마의 거리를 보이는지를 나타내는 주제도이며 단위는 m이다(그림 3-1-1-19). ArcGIS 프로그램의 Euclidean Distance function을 활용하여 계산하였다.
- 조류로 밀도도와 거리도는 저서생물의 서식지 분포, 표층퇴적물 입도 분포와 연관이 있는 요소이며, 특히 조류로는 저서생물의 서식 조건 중 하나이기 때문에, 갯벌 생태계 연구에 필요하다고 할 수 있다.
- 경사도 및 경사경향도에서 연구한 바와 같이 주로 만 안쪽의 갯벌에서 조류로가 밀집한 것으로 나타났으며, 만 외곽으로 갈수록 조류로의 밀도가 줄어드는 것으로 나타났다.
- 다만 공간해상도인 5 m 보다 좁고 얇은 조류로의 경우 TanDEM-X 기반의 DEM에서는 정확하게 관측할 수 없기 때문에 이러한 소규모 조류로에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

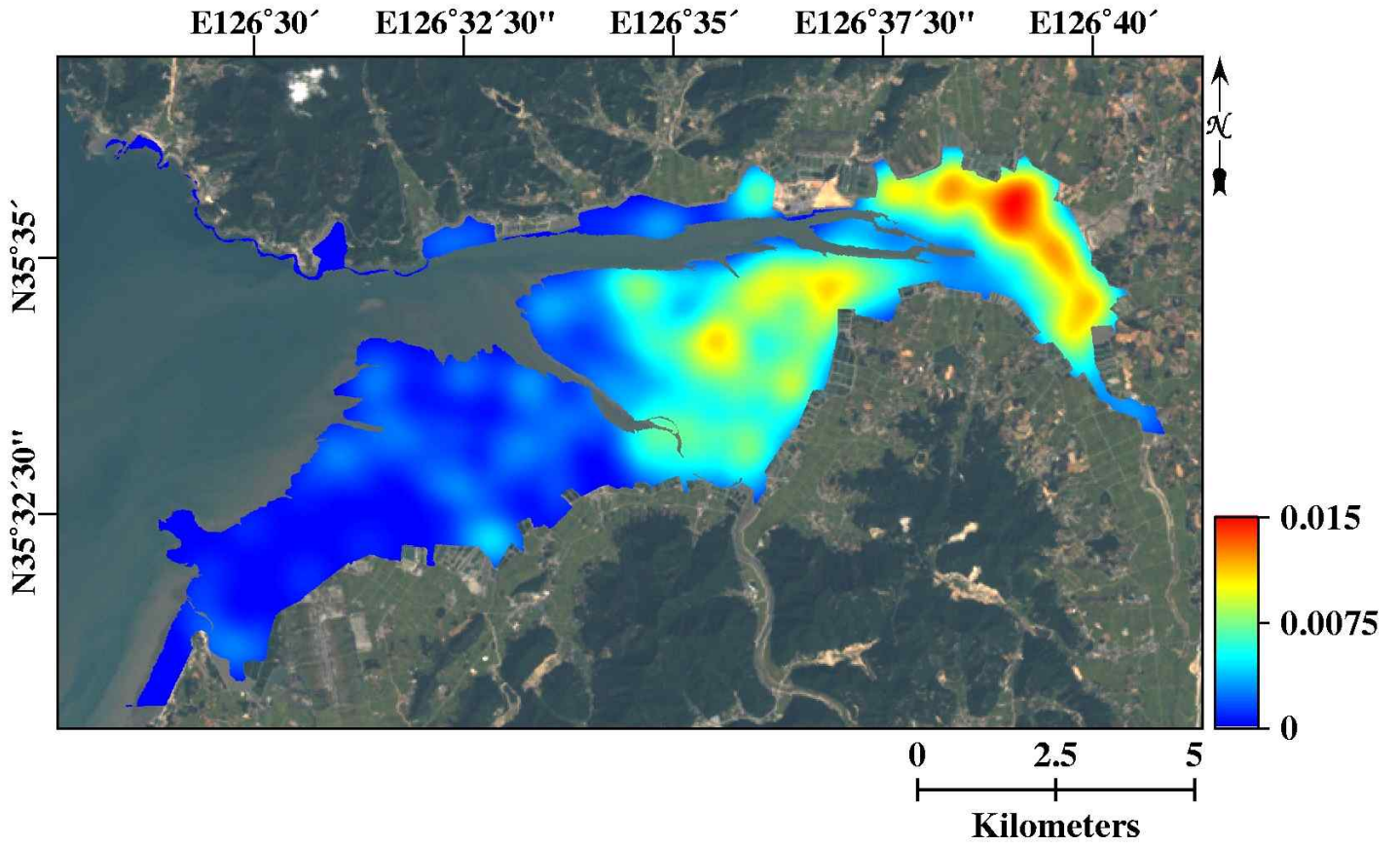


그림 3-1-1-19. TanDEM-X 기반 조류로 밀도도(단위:  $m^2$ )

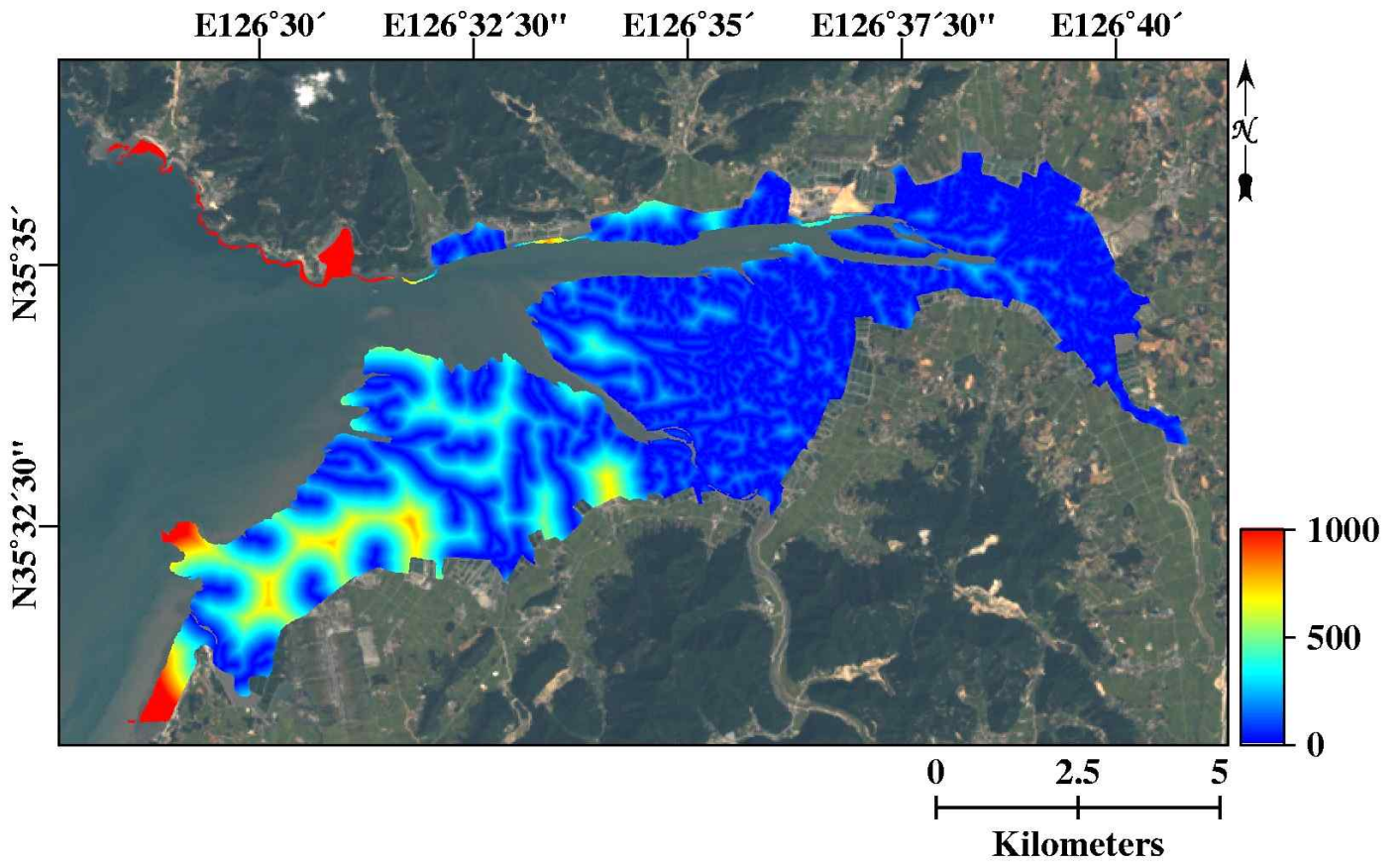


그림 3-1-1-20. TanDEM-X 기반 조류로 거리도(단위: m)

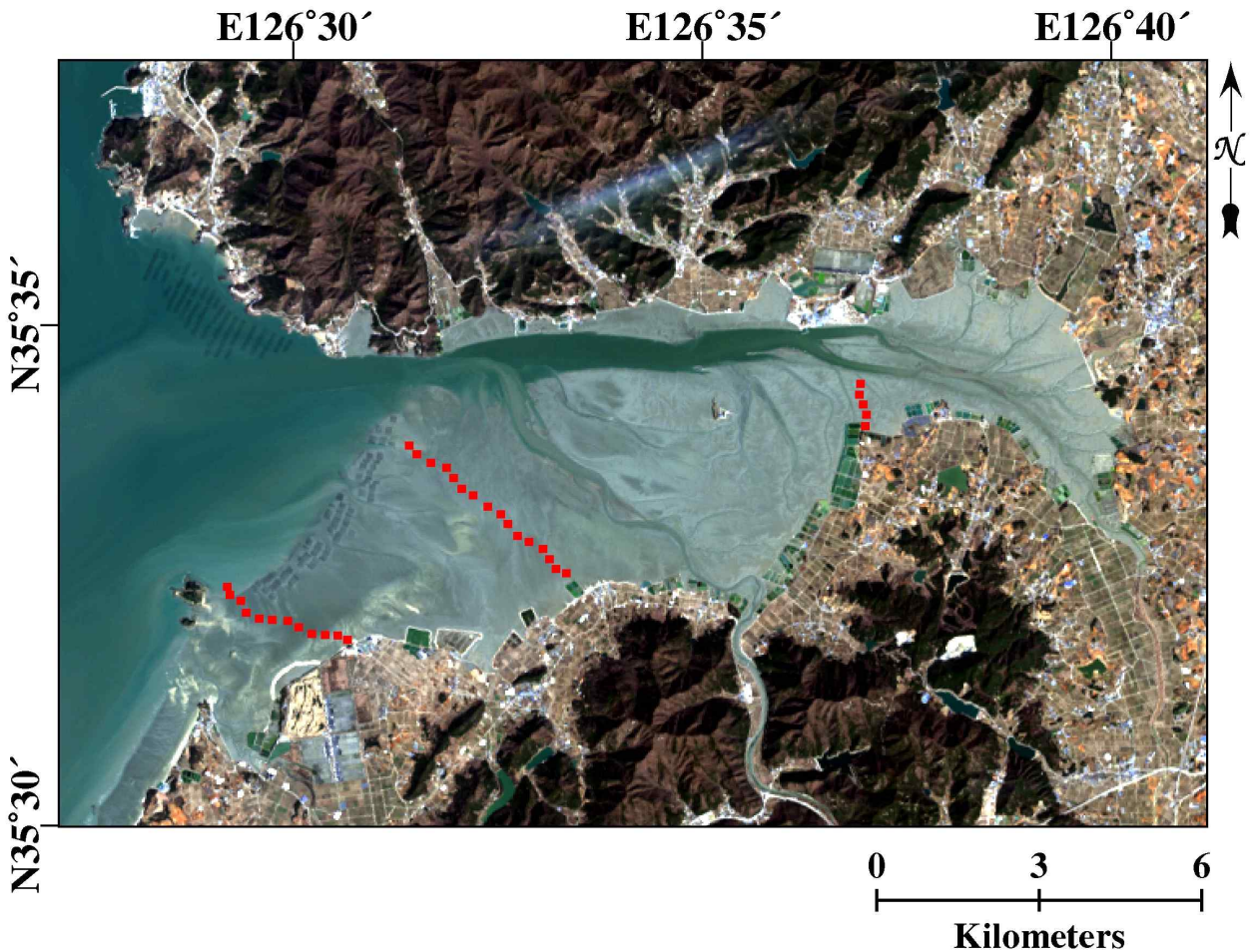


그림 3-1-1-21. 입도분석을 위한 현장조사 정점

- 연안 표층퇴적도를 제작하기 위하여 2016년 10월에 갯벌의 표층퇴적물 시료를 채취하였다.
- 총 34개의 정점에서 표층퇴적물을 채취하였고, 입도분석을 위하여 전처리를 시행하였다(그림 3-1-1-20). 정점은 만 입구, 만 중부, 만 안쪽으로 나누어 측선의 형식으로 설정하였다.
- 전처리는 탄산염과 유기물을 제거하기 위하여, 염산(HCl)과 과산화수소수(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)를 첨가하여 가열해주었다.
- 전처리가 끝난 퇴적물은 4 φ(0.0625 mm) 표준체로 습식체질하여 조립질 퇴적물과 세립질 퇴적물로 분리하였다.
- 조립질 퇴적물은 건조기에서 완전건조 후 진탕기를 이용하여 15분간 체질하여 1 φ 간격으로 등급별 무게를 측정하였다.
- 세립질 퇴적물은 응집현상을 방지하기 위하여 확산제 (Sodium hexametaphosphate, 0.2%)를 첨가한 뒤 X-ray 자동입도분석기(Sedigraph-5100)를 이용하여 등급별 백분율을 계산하였다.
- Folk and Ward(1957) 분류에 따라 각 정점의 퇴적상을 평가하였고, 평균입도(Mean), 분급도(Sorting), 왜도(Skewness), 첨도(Kurtosis)를 계산하였다(표 3-1-1-1).
- 연안표층퇴적도의 제작은 Sand의 함유량을 기준으로 갯벌을 분류하여 제작하였다. 총 5개의 class로 나누었고 각각 Sand 80% 이상, 60~80 %, 40~60 %, 20~40 %, 20 % 미만으로 설정하였다. 분류방법은 객체기반 분류기법을 사용하였으며, 이 기법은 영상을 단순히 픽셀(pixel)의 값에 그치지 않고 해당 픽셀과 연관된 주변 픽셀들을 묶어 한 개의 개체를 형성한 뒤, 분류하는 방식이다. 이와 같은 분류방법은 주변 픽셀과의 값 차이가 크지 않은 유사한 물질들로 구성되어 있을 때 사용하면 유리하다(Walter, 2004).

표 3-1-1-3. 입도분석 결과

St.	Composition (%)				Statistical Parameters				Sediment Type
	Gravel	Sand	Silt	Clay	Mean( $\phi$ )	Sorting	Skewness	Kurtosis	by Folk(1957)**
KH_1B	0	39.85	43.83	16.32	5.211	2.544	0.514	1.716	sZ
KH_2	0	25.83	48.29	25.88	6.294	2.783	0.623	0.736	sM
KH_3B	0	29.33	48.85	21.82	5.934	2.526	0.641	0.86	sZ
KH_4	0	26.59	52.37	21.04	5.93	2.5	0.677	0.948	sZ
KH_5B	0	36.66	44.73	18.61	5.623	2.445	0.7	1.211	sZ
KH_6	0	38.37	43.13	18.5	5.564	2.411	0.726	1.277	sZ
KH_7B	0	34.45	45.31	20.25	5.926	2.621	0.726	1.144	sZ
KH_8	0	38.62	40.32	21.06	5.789	2.841	0.596	1.012	sM
KH_9B	0	57.19	28.9	13.91	4.637	2.414	0.569	1.808	zS
KH_10	0	58.08	27.15	14.78	4.637	2.556	0.577	1.488	mS
KH_11	0	63.4	22.11	14.49	4.677	2.446	0.643	1.849	mS
KH_12B	0	60	27.75	12.24	4.421	2.042	0.621	2.175	zS
KH_13	0	57.51	25.79	16.71	5.096	2.415	0.754	1.568	mS
KH_14B	0	52.31	30.36	17.33	5.263	2.487	0.754	1.521	mS
KH_15	0	97.63	0.72	1.65	2.11	0.57	0.107	1.278	S
KH_16B	0	95.02	1.87	3.11	2.194	0.688	0.12	2.027	S
KM_1B	0	96.31	1.34	2.35	2.243	0.54	0.168	1.207	S
KM_2	0	97.04	1.18	1.78	3.115	0.383	-0.027	1.072	S
KM_3B	0	91.42	3.93	4.65	2.777	1	0.442	5.755	S
KM_4	0	47.4	31.17	21.43	5.71	3.05	0.606	0.83	sM
KM_5B	0	83.79	8.22	7.99	3.469	1.441	0.634	5.94	mS
KM_6	0	90.87	4.29	4.84	3.268	0.996	0.419	5.223	S
KM_7B	0	93.4	3.06	3.54	2.26	0.854	0.29	1.973	S
KM_8	0	91.61	4.03	4.36	3.328	0.909	0.475	4.751	S
KM_9B	0	88.59	5.9	5.51	3.378	1.086	0.541	5.263	mS
KM_10	0	76.78	13.24	9.98	3.904	1.753	0.771	4.04	mS
KM_11	0	70.09	19.15	10.76	4.088	1.897	0.773	2.352	mS
KM_12B	0	77.22	12.35	10.43	3.967	1.775	0.792	4.188	mS
KB_1-1B	33.01	35.98	21.17	9.84	1.256	3.948	0.494	0.92	msG
KB_1-2B	4.34	16.69	59.64	19.33	5.473	3.573	0.096	1.946	(g)sM
KB_2B	0	15.92	63.22	20.86	6.246	2.569	0.663	1.175	sZ
KB_3	0	17.16	63.81	19.03	5.927	2.368	0.664	1.357	sZ
KB_4B	0	32.34	47.74	19.92	5.745	2.475	0.695	1.18	sZ
KB_5	0	23.66	58.31	18.03	5.722	2.334	0.62	1.414	sZ
KB_6B	0	33.05	48.56	18.39	5.615	2.399	0.665	1.271	sZ
KB_7B	0	32.84	50.2	16.96	5.469	2.314	0.646	1.56	sZ

- Trimble 사의 ecognition 프로그램을 사용하여 분류하였으며, 해당영상은 다분광센서를 탑재한 인공위성 Sentinel-2 영상을 사용하였다. Sentinel-2 영상의 공간해상도는 10 m 이며 2016년 3월 9일의 영상을 사용하였다.
- 총 36 개의 정점 중 26개의 정점을 분류에 사용하였고, 10개의 정점으로 검증을 시행하였다.
- 분류 정확도는 70 %로 다소 낮은 정확도를 보이지만, 전반적인 곱소만의 표층 퇴적물 분포를 나타내고 있다. 다소 낮은 정확도 원인으로는 현장 자료의 부족, Sentinel 영상과 현장조사 날짜간의 차이 등이 있다.
- 비교적 낮은 정확도를 고려하더라도, 곱소만 지역의 표층퇴적물의 분포의 경향을 잘 나타내고 있다. 특히 만 입구 쪽의 Sand가 우세한 환경과 만 안쪽의 Silt, Clay 가 우세한 환경에 대해서 잘 나타내고 있다(그림 3-1-1-21).

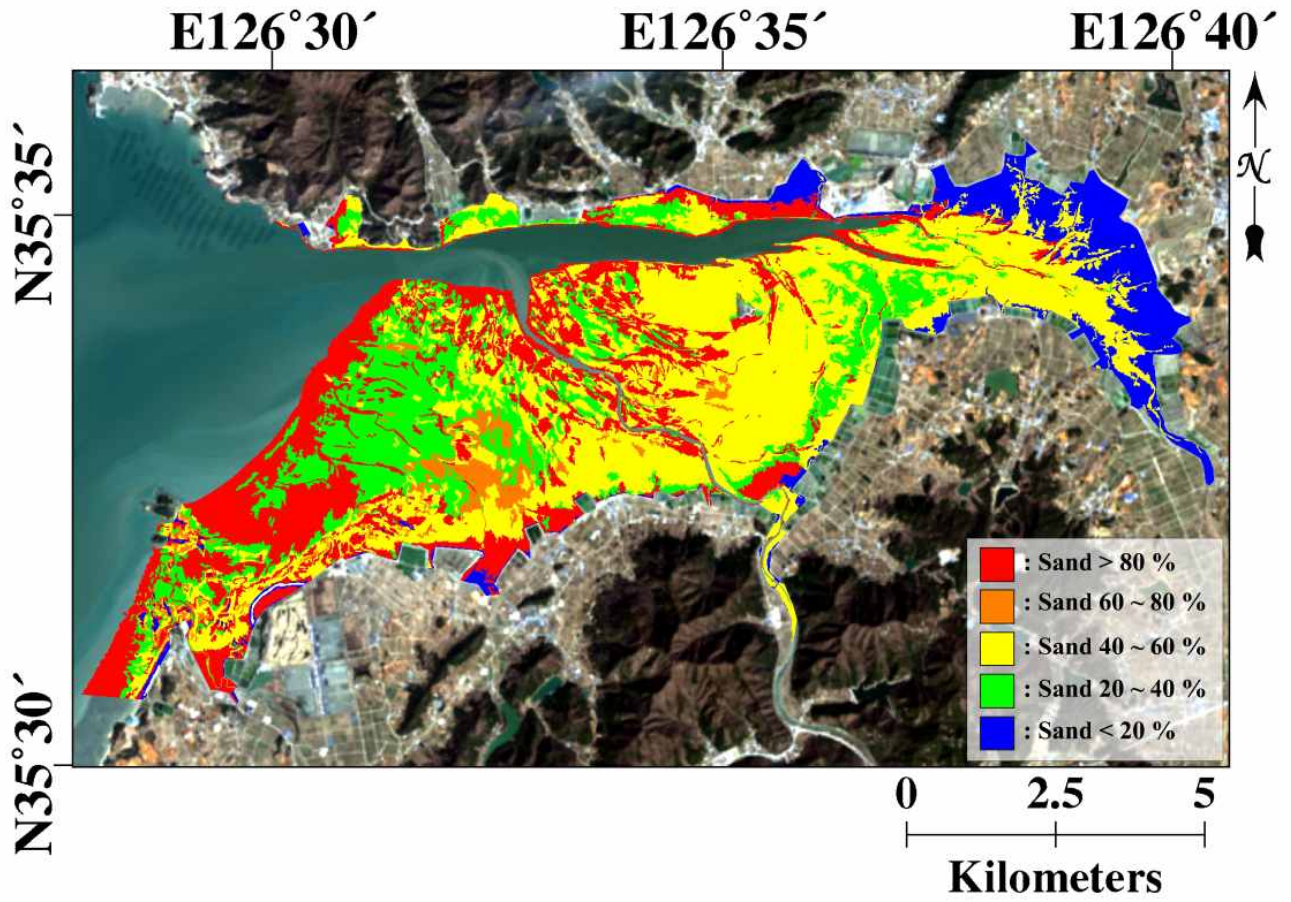


그림 3-1-1-22. 객체기반 분류 방식을 이용해 제작한 연안 표층피복도



## 2 절. 저서생물 생태지도 분석 기술 고도화

### 1. 저서생물 생태지도 제작

#### (가) 현장조사 및 과거자료 분석

- 저서생물분포 예측도 제작을 위해 환경요인과 대형저서동물 분포자료 획득을 위한 과거자료 분석 및 현장조사를 수행하였다.
- 본 연구에서 수행된 현장조사의 조사 정점은 황도 27개, 가로림만 24개였으며, 과거자료를 포함한 연구지역과 조사정점은 강화도를 포함한 7개 지역의 386개 정점이다 (표 3-2-1-2).

표 3-2-1-1. 저서생물분포 예측도 제작을 위한 과거 연구지역 유형 및 정점 수

유형	연구지역	조사년도	정점 수
하구형 (186개)	강화도	2003, 2006, 2007	90
	새만금	2002, 2003	44
	곰소만	2009	24
	근소만	2009	22
	가로림만	2016	24
개방형 (176개)	황도	2009, 2013, 2015	89
	새만금 외해	2002 - 2005	72
	증도	2002	21

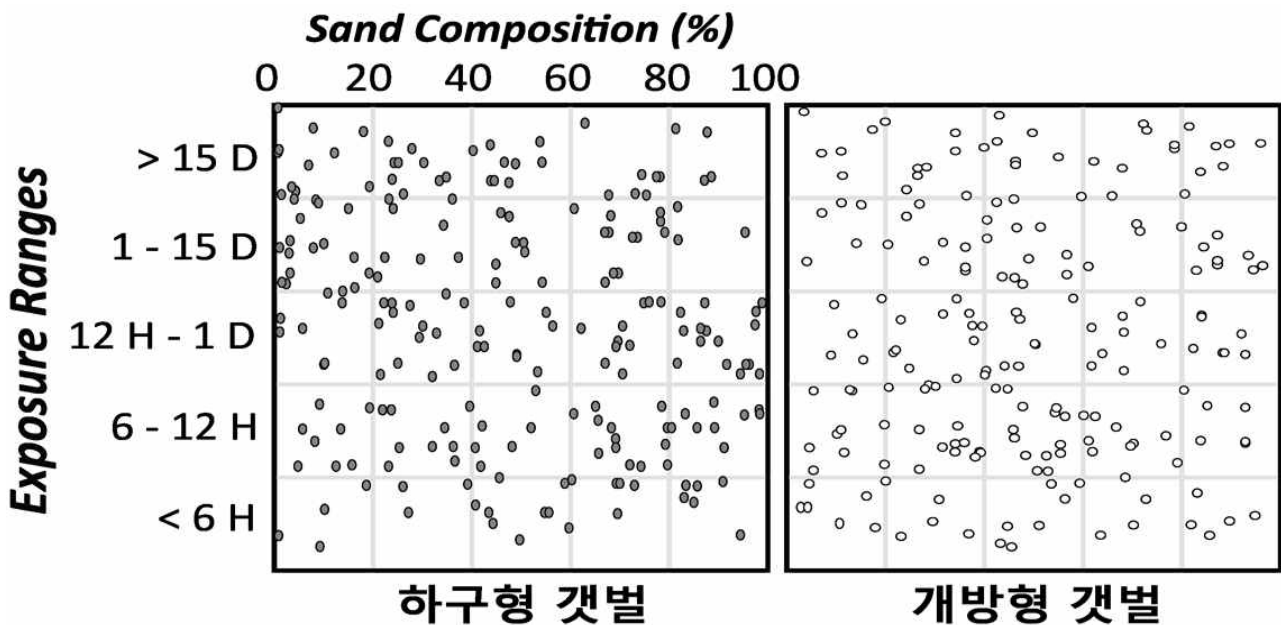


그림 3-2-1-1. 갯벌유형별 환경요인에 따른 분포 양상

- 연구지역은 갯벌 유형에 따라 하구형과 개방형으로 분류하였으며, 각각 204개와 182개 정점이다 (그림 3-2-1-1). 각 갯벌의 노출시간을 y축으로, 모래 함유량을 x축으로 하여 scatter plot을 제작한 결과를 보면 다양한 환경 조건의 갯벌들이 연구지역에 포함되었음을 알 수 있다.
- 현장조사는 대형저서동물 종별 개체수와 환경요인을 대상으로 도보로 이동하며 수행되었다.
- 대형저서동물은 0.5 m × 0.5 m 크기의 방형구를 이용하여 정점별로 3회씩 반복하여 방형구 내의 종별 개체수를 계수하였다. 종의 판단은 저서동물 굴 (burrow) 의 모양이나 생물의 활동 흔적을 통해 이루어졌으며, 이 과정에서 확인되지 않거나 혹은 알 수 없는 생물의 흔적은 직접 파서 생물을 잡거나, 굴 내에 레진을 투입하여 굴의 모양을 본 때, 종을 동정하였다.
- 환경요인은 현장조사 인공위성 영상분석으로부터 취득하였다. 퇴적상과 고도자료는 현장에서 취득하였으며, 인공위성 영상분석을 통해 생산된 원격탐사 기반 지수들도 연안저서생물분포 예측도 제작을 위한 분석에 활용되었다.
- 퇴적상 분석을 위해 퇴적물 표층 0.5 cm를 채취하여 Folk (1974) 의 퇴적상 분류법으로 자갈, 모래, 실트, 점토, 평균입도, 분급도, 왜도, 첨도 등의 퇴적환경 지수를 분석하였으며, 제작한 전단응력측정계 (sheer-strength-meter) 를 이용하여 각 정점의 전단응력을 측정하였다. 고도자료는 RTK-GPS를 이용하여 조사 정점의 실고도 측량을 통해 획득하였다. 저서동물과 환경요인과의 상관성 분석을 위해 인공위성 영상분석의 1·2차 결과물인 NIR band, Density of channel (m/m<sup>2</sup>), slope 등을 활용하였다.
- 갯벌 대형저서동물 출현과 다양한 환경요인간의 상관성을 분석을 위해 PRIMER v6 & PERMANOVA+ (PRIMER-e rtd.) 프로그램을 이용하여 PCO (Principle Co-Ordinates analysis) 분석을 실시하였으며 두 변수간의 상관성을 각 환경요인별로 산출하였다.

(나) 연안환경-생물분포 기여도 분석

- 갯벌 대형저서동물 출현과 다양한 환경요인간의 상관성을 위해 PCO (Principle Co-Ordinates analysis) 분석을 실시하였으며 두 변수간의 상관성을 각 환경요인별로 산출하였다 (그림 3-2-1-2).

표 3-2-1-2. 갯벌 대형저서동물과 환경요인간의 상관성

Environmental factors	Correlation value (r <sup>2</sup> )
Sand composition (%)	0.849
Silt composition (%)	0.845
Clay composition (%)	0.843
Height (m)	0.832
Sheer strength	0.826
Grain size (φ)	0.797
Max continuous exposure time (hour)	0.734
Kurtosis	0.725
Sorting	0.609
Remanant water (%)	0.597
NIR band	0.590
Thermal	0.582
Density of channel (m/m <sup>2</sup> )	0.541
Skewness	0.248
Gravel (%)	0.212
Slope (Degree, °C)	0.099

- 상관성 분석결과에 의하면, 대형저서동물의 출현은 퇴적상 (모래, 실트, 점토, shear strength, grain size 등) 과 지형고도 (고도, 노출시간) 와 큰 상관성을 보이고 있는 것으로 판단되며 모래함유량이 0.849로 가장 높은 상관성을 보였다 (표 3-2-1-2).
- 대형저서동물 출현과 높은 상관성을 보이는 퇴적상과 지형고도 중 모래함유량과 지형고도를 기반으로 하는 노출시간을 주요 환경요인으로 판단하여 대형저서동물 출현확률 산출을 위한 환경변수로 선정하였다.

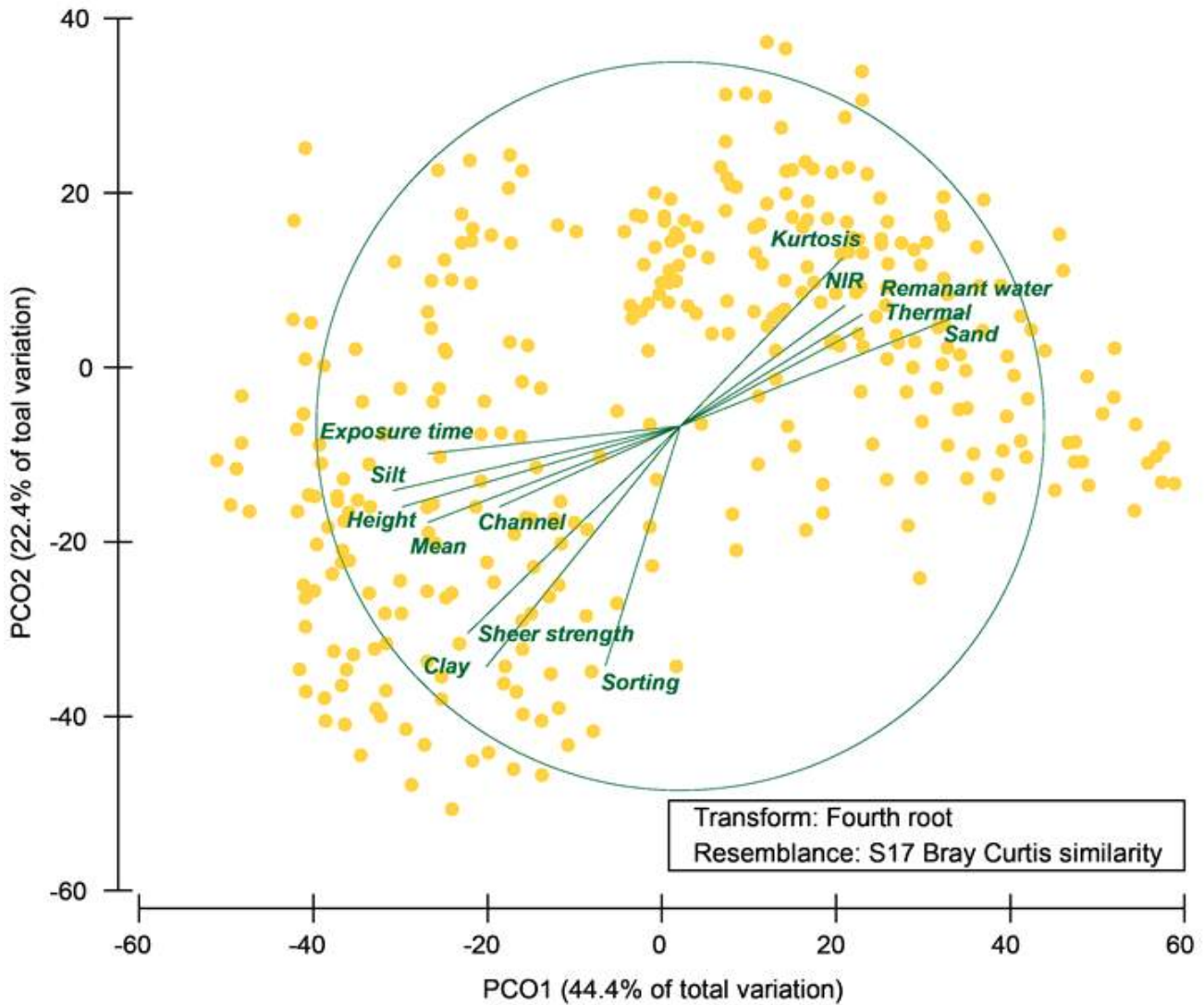


그림 3-2-1-2. 대형저서동물과 환경요인과의 상관성 산출을 위한 주좌표분석 (principal coordinates, PCO). 원의 지름은 두 변수간의 상관성 1을 의미하며 선의 길이는 상관관계의 정도를 의미함. 상관성이 0.5이상인 환경요인을 대상으로 표현함

(다) 대형저서동물 출현확률 분석

- 대형저서동물 출현확률 산출을 위해 대형저서동물-환경요인 간의 상관성을 분석하였으며, 퇴적상과 관련된 환경요인 중 모래함유율과 지형고도의 환경요인 중 최대연속노출시간을 선정하였다.
- 선정된 환경요인은 모래함유율의 20%기준으로 한 5개의 구간과 최대연속노출시간의 1/4일, 1/2일, 일일, 보름을 기준으로 한 5개의 구간으로 분류하였으며, 총 25개 환경요인(모래함유율 5개 × 노출시간 5개) 구간별로 대형저서동물 출현확률을 산출하였다.
- 대형저서동물 출현확률은 결합 확률 (Joint probability) 로 산출되었으며, 이는 적용 환경변수(독립변

수)인 모래함유량과 최대연속노출시간에 따른 대형저서동물이 출현 (양의 값을 갖음) 하는 각각의 확률의 곱을 의미한다. 출현확률은 5개의 구간 (>90%, 60-90%, 30-60%, 1-30%, absence) 으로 분류하여 산출하였다.

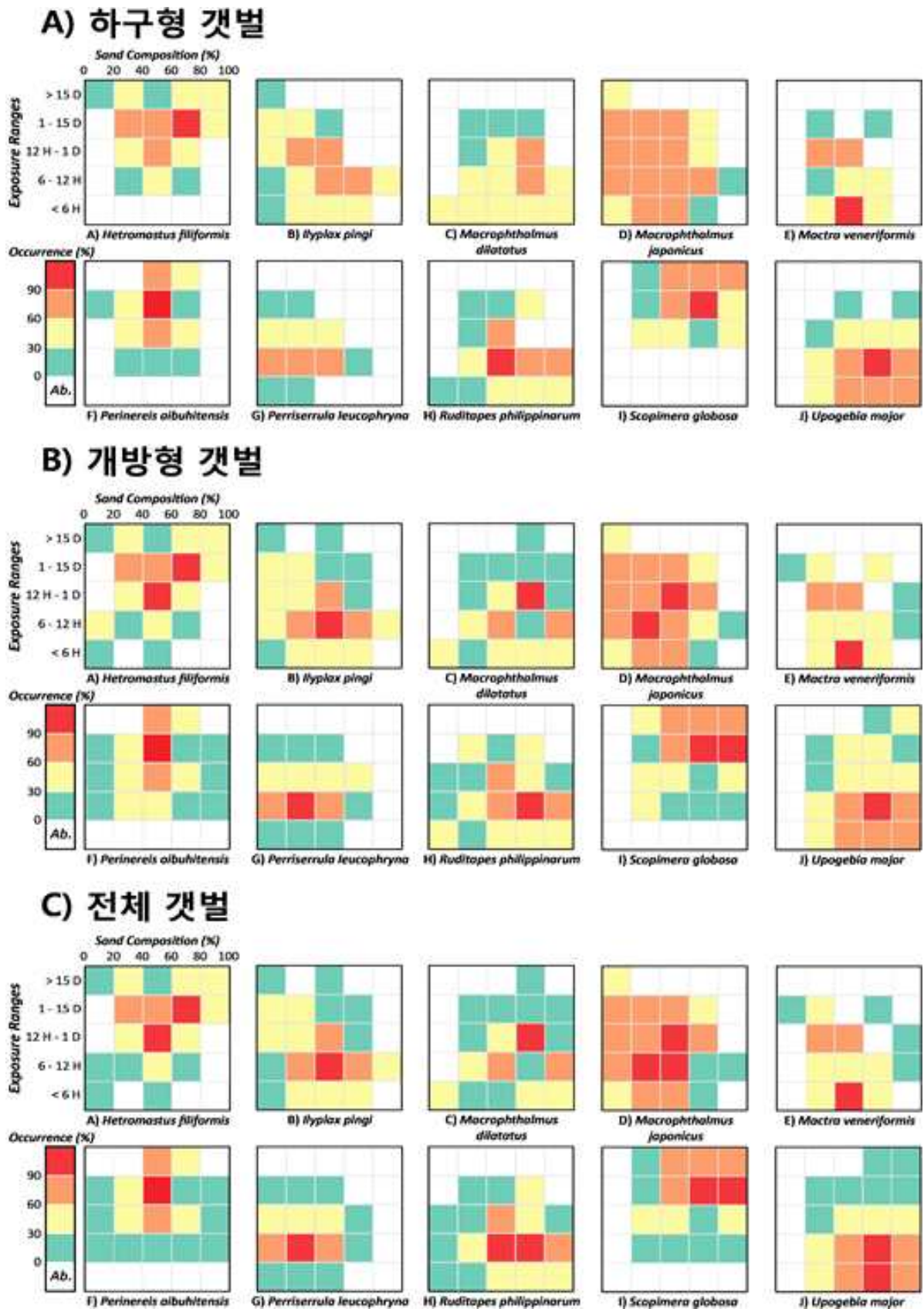


그림 3-2-1-3. 갯벌 유형별 대형저서동물 출현확률

- 버들갯지렁이류 (*Heteromastus filiformis*), 칠게 (*Macrophthalmus japonicus*), 길게 (*Macrophthalmus dilatatus*) 등 10종을 대상으로 하여 대형저서동물 출현확률을 산출하여 도식화였다 (그림 3-2-1-3). 산출된 대형저서동물 출현확률은 약 74%의 높은 정확도 ( $p < 0.05$ ) 를 나타냈다 (표 3-2-1-3).
- 대형저서동물의 출현확률은 갯벌 유형간 정확도 차이가 존재하였으며, 이는 곧 유형별로 출현확률 구분하여 적용하는 것이 필요함을 의미한다. 또한 이러한 차이에 큰 영향을 주는 주요 환경요인을 이해하고 출현확률을 산출하는 추가 연구가 필요하다고 판단되었다.

표 3-2-1-3. 갯벌 유형에 따른 대형저서동물의 출현확률 정확도 (>60% 확률대상)

Species	Accuracy (%)		
	하구형 갯벌	개방형 갯벌	전체 갯벌
<i>Heteromastus filiformis</i>	66.9	74.4	70.6
<i>Ilyplax pingi</i>	74.8	87.2	81.0
<i>Macrophthalmus dilatatus</i>	73.9	80.0	76.9
<i>Macrophthalmus japonicus</i>	58.5	70.5	64.5
<i>Macra veneriformis</i>	64.2	72.9	68.5
<i>Perinereis aibuhitensis</i>	71.4	72.1	71.7
<i>Perriserrula leucophryna</i>	71.2	79.2	75.2
<i>Ruditapes philippinarum</i>	83.5	90.9	87.2
<i>Scopimera globosa</i>	88.8	88.9	88.8
<i>Upogebia major</i>	81.5	90.0	85.8
Average	73.5±8.8	80.6±7.6	77.0±8.0

(라) 저서생물분포 예측도 제작

- 대형저서동물 출현확률을 기반으로 하여 인공위성 및 무인기 영상분석을 통해 곰소만 갯벌 중분류 저서생물분포 예측도를 제작하였다.
- 출현확률을 기반으로 한 연안저서생물분포 예측도의 경우에는 인공위성 및 무인기 영상분석을 통해 제작된 퇴적상과 지형고도분포도를 이용하여 모래함유량과 최대연속노출시간의 총 25개의 환경변수 구간을 영역화 하였으며, 이를 바탕으로 대형저서동물 대상 종의 출현확률을 영역화된 환경변수 구간에 도식화하여 제작하였다 (그림 3-2-1-4).
- 곰소만 갯벌의 엽낭게 (*Scopimera globosa*), 쪽 (*Upogebia major*), 길게 (*Macrophthalmus dilatatus*) 를 대상으로 인공위성 영상을 기반으로 하는 저서생물분포 예측도를 제작하였다.
- 엽낭게의 경우에는 노출시간이 짧으며 모래함유율이 높은 서식환경에서 주로 출현하였으며, 쪽의 경

우에는 노출시간이 긴 하부갯벌에서 높은 출현확률을 보였다. 길게의 경우에는 중부조건대에 넓게 분포하였으며 모래함유율이 높은 서식환경에서 출현확률이 높았다. 퇴적상과 큰 상관성을 보이는 길게가 81.3%로 가장 높은 값을 보였으며, 노출시간과 상관성을 갖는 엽낭계는 78.0%의 정확도를 보였다 (그림 3-2-1-5, 6, 7).

○ 곰소만 갯벌의 중분류 저서생물분포 예측도는 중별 서식환경을 잘 반영하는 것으로 판단되며, 총 평균 정확도는 77.4%를 보였다.

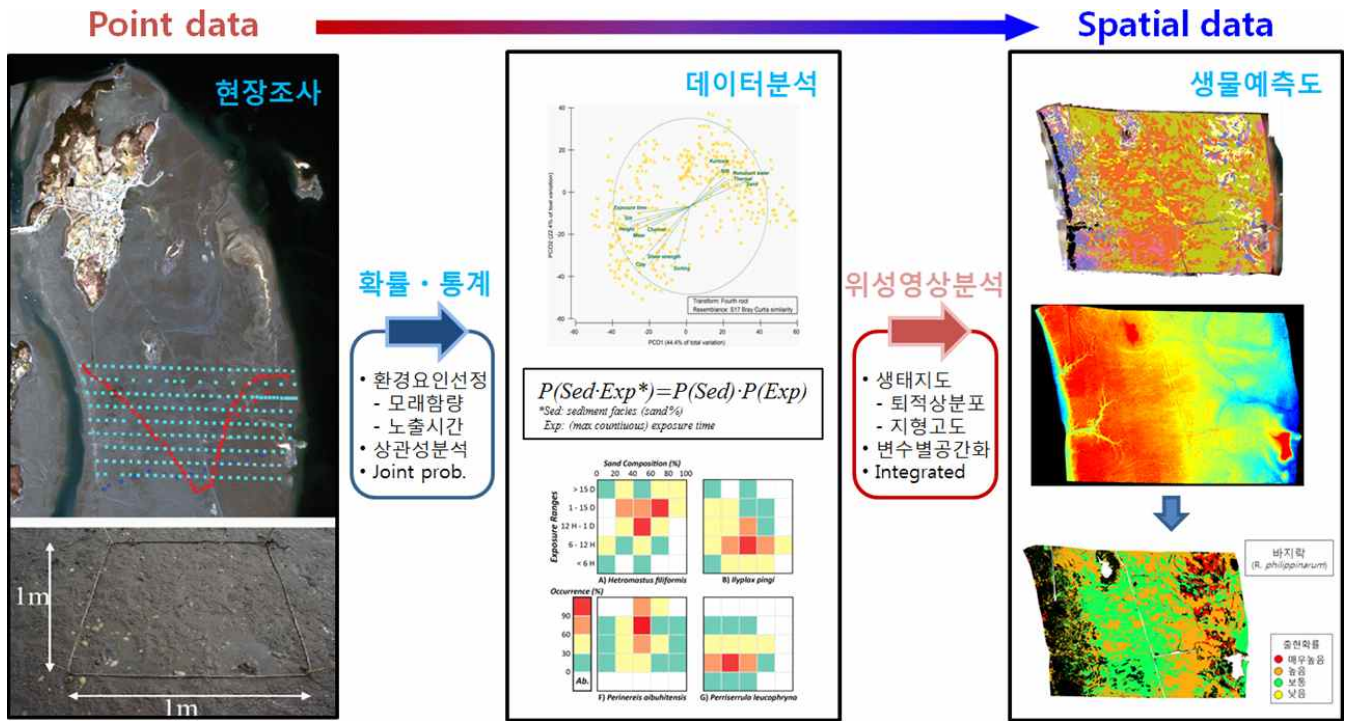


그림 3-2-1-4. 저서생물분포 예측도 제작방법 개념도

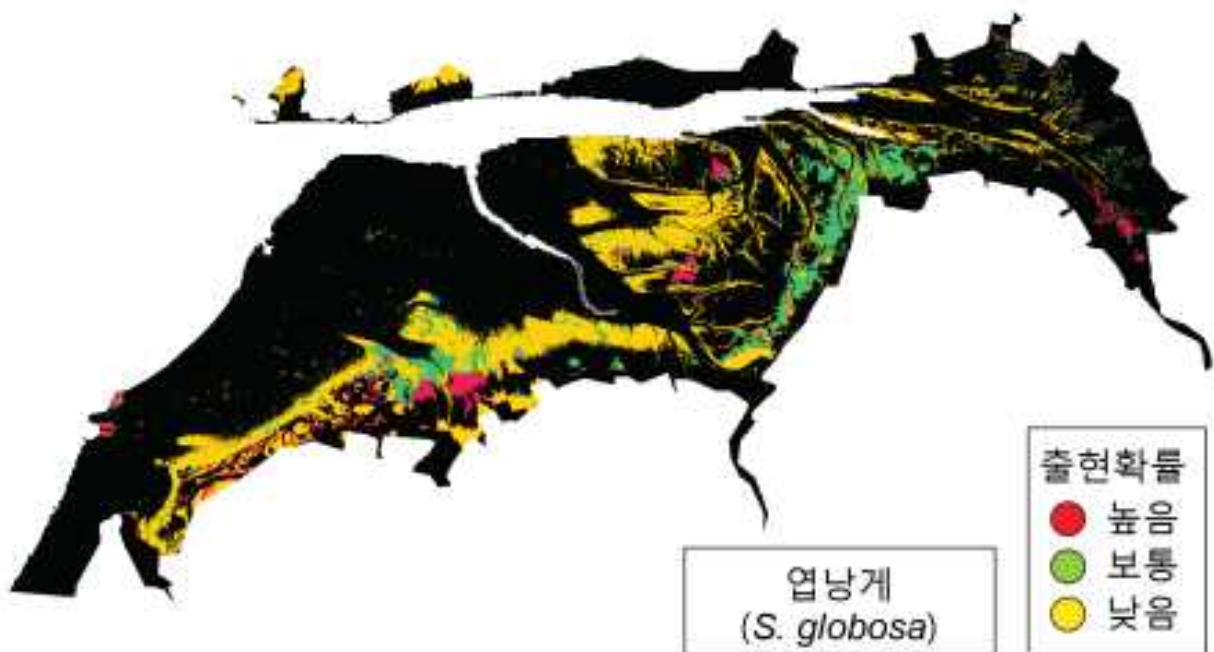


그림 3-2-1-5. 곰소만 갯벌 엽낭계(*S. globosa*) 중분류 저서생물분포 예측도

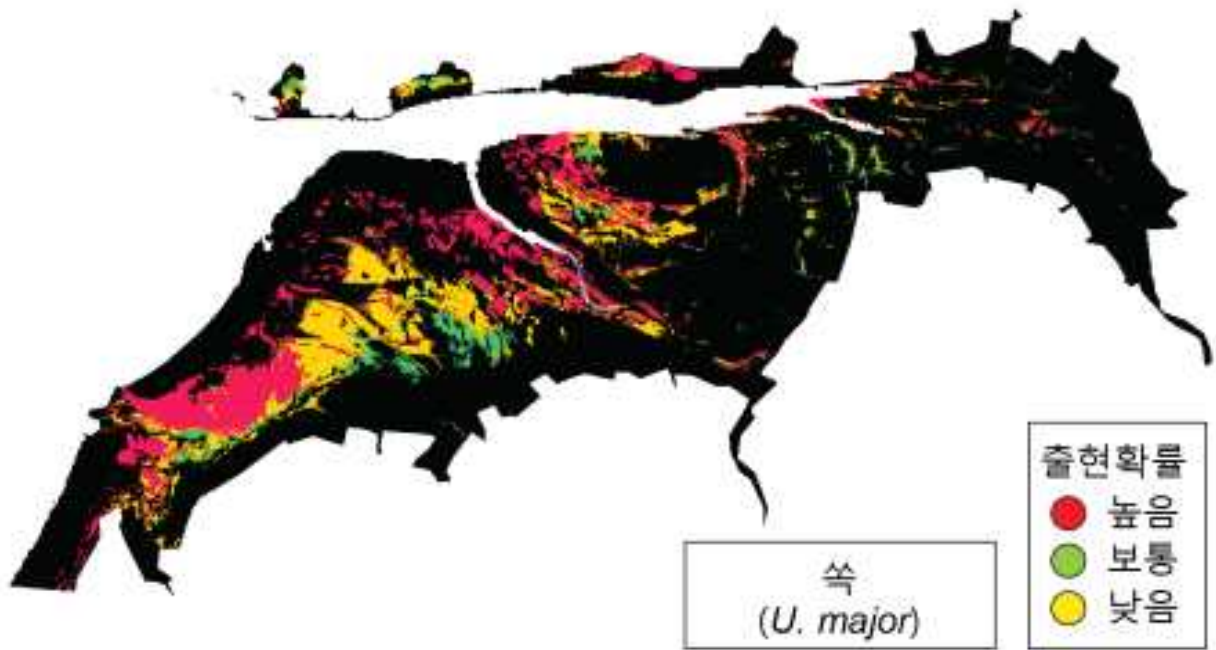


그림 3-2-1-6. 곰소만 갯벌 속(*U. major*) 중분류 저서생물분포 예측도

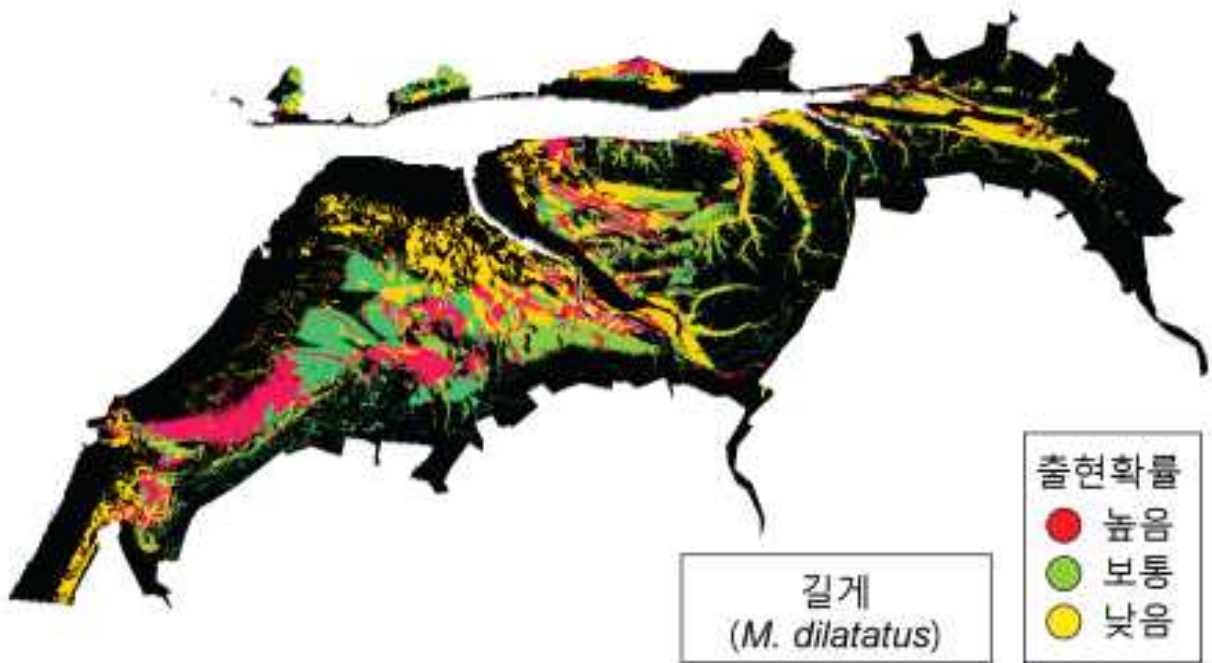


그림 3-2-1-7. 곰소만 갯벌 길게(*M. dilatatus*) 중분류 저서생물분포 예측도

## 2. 저서동물 공간정보 가시화 가능성 파악

- 현재까지의 저서생물 생태지도는 현장조사를 통한 저서생물의 분포 자료를 이용하여 제작되었다. 자료의 불확실성을 줄이고 효율적인 자료 확보를 위해 본 연구에서는 갯벌 저서생물 서식굴 입구 형태를 표준화하고 이를 무인항공기 영상에 적용하여 정밀한 갯벌 생물의 분포 자료를 획득할 수 있는 기술 개발을 시도하였다.
- 곰소만 갯벌의 우점종인 칠게, 농게, 가재붙이의 서식굴 입구를 대상으로 DSLR을 이용해 서식굴 입구 사진을 각각 100장 이상씩 촬영하였으며, MATLAB을 이용해 각 종의 서식굴 입구의 형태를 표준화하

였다 (그림 3-2-2-1).

- 가재붙이의 경우 마운드 (둔덕)을 대상으로 표준화를 수행하였다. 마운드는 가재붙이 활동에 의해 퇴적물이 갯벌 표층으로 배출되는 기능을 하는 곳으로 작은 원을 중심으로 배출된 퇴적물들이 비정형적으로 쌓여 있는 입체적인 형태를 띠고 있다.
- 칠게의 경우 서식굴 입구가 원 모양이지만 비정형적인 원의 형태를 하고 있으며 칠게 활동에 의해 배출된 퇴적물이 서식굴 입구 주변에 흩어져있는 형태가 주를 이룬다.
- 농게의 경우 서식굴 입구 주변을 따라 1-2 cm 높이의 울타리가 존재하는 형태를 하고 있으나 이러한 울타리가 없는 경우도 있다. 서식굴 입구 주변의 울타리는 주로 암컷 농게 서식굴에서 나타나며, 수컷의 경우에는 나타나지 않는다.



그림 3-2-2-1. 가재붙이 (왼쪽) 칠게 (가운데) 농게 (오른쪽) 서식굴 입구

- 정밀한 갯벌 표면 영상의 확보를 위해 무인항공기 (회전익)를 이용해 높이별 갯벌 표면 영상 촬영을 수행하였다. 회전익은 고정익 시스템에 비하여 넓은 영역의 촬영은 어렵지만, 자세제어가 쉽고, 보다 안정된 상태로 관측이 가능하다는 장점이 있다.
- 본 연구에서 사용된 회전익 신호의 송수신 거리는 최대 2 km이며, 비상시 자동 이/착륙이 가능하며, 미리 경로를 설정하여 비행이 가능하다. 회전익에 탑재한 센서는 Full frame으로 광학 영상을 촬영할 수 있는 Canon 6D DSLR 카메라를 사용하였다 (표 3-2-2-1).

표 3-2-2-1. 회전익 무인항공기 시스템

모델	회전익 무인항공기	
무게	약 9 kg (센서 포함)	
길이	90 cm	
비행 시간	약 15분	
비행 속도	10 m/s	
송·수신거리	약 2 km	
비행 형식	자동 이·착륙 및 경로비행	

- 저서생물의 서식굴 입구 검출을 위한 최적 촬영 높이를 산출하기 위해 회전익을 이용하여 5 m, 10 m, 30 m, 50 m 높이에서 영상 촬영을 수행하였으며, 이 중 가장 낮은 높이인 5 m 높이에서 촬영한 영상이 서식굴 입구 검출에 최적 높이인 것으로 나타났다 (그림 3-2-2-2).



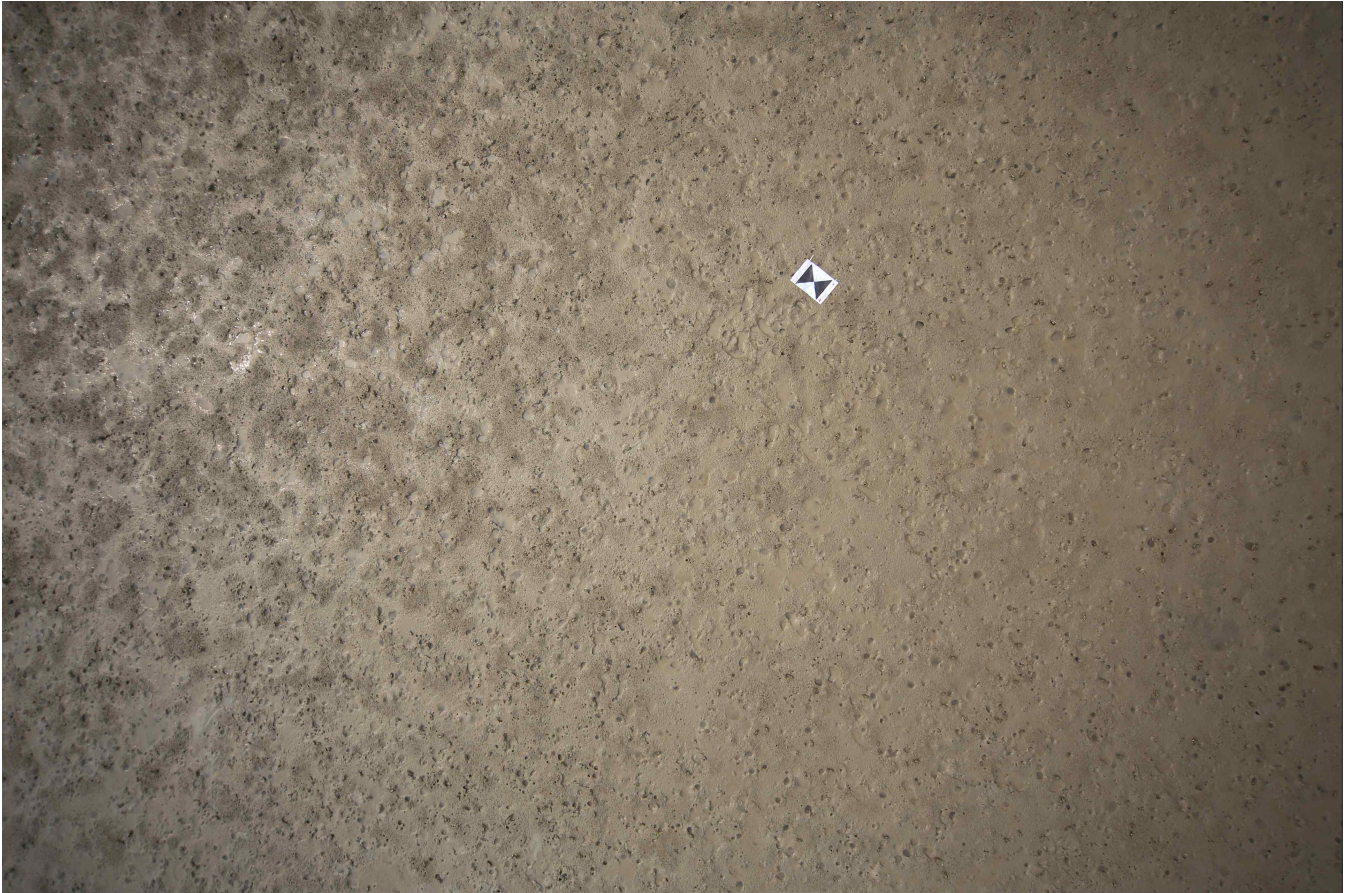


그림 3-2-2-2. 회전익을 이용해 촬영한 곰소만 갯벌 표면 영상

- MATLAB 프로그램의 경계 검출을 이용하여 농계와 칠계 서식굴 입구 표준화 자료를 갯벌 표면 영상에 적용한 후 각 종별 서식굴 입구 검출율을 검증하였다. 가재붙이 서식굴의 경우 입체적인 서식굴 입구 형태로 인해 서식굴 입구 형태 표준화가 이루어지지 않았다.
- 농계 서식굴의 경우 총 17개의 서식굴 중 14개의 서식굴을 검출하였고, 3개의 입구를 검출하지 못했으며 약 82%의 검출율을 나타냈다 (그림 3-2-2-3).

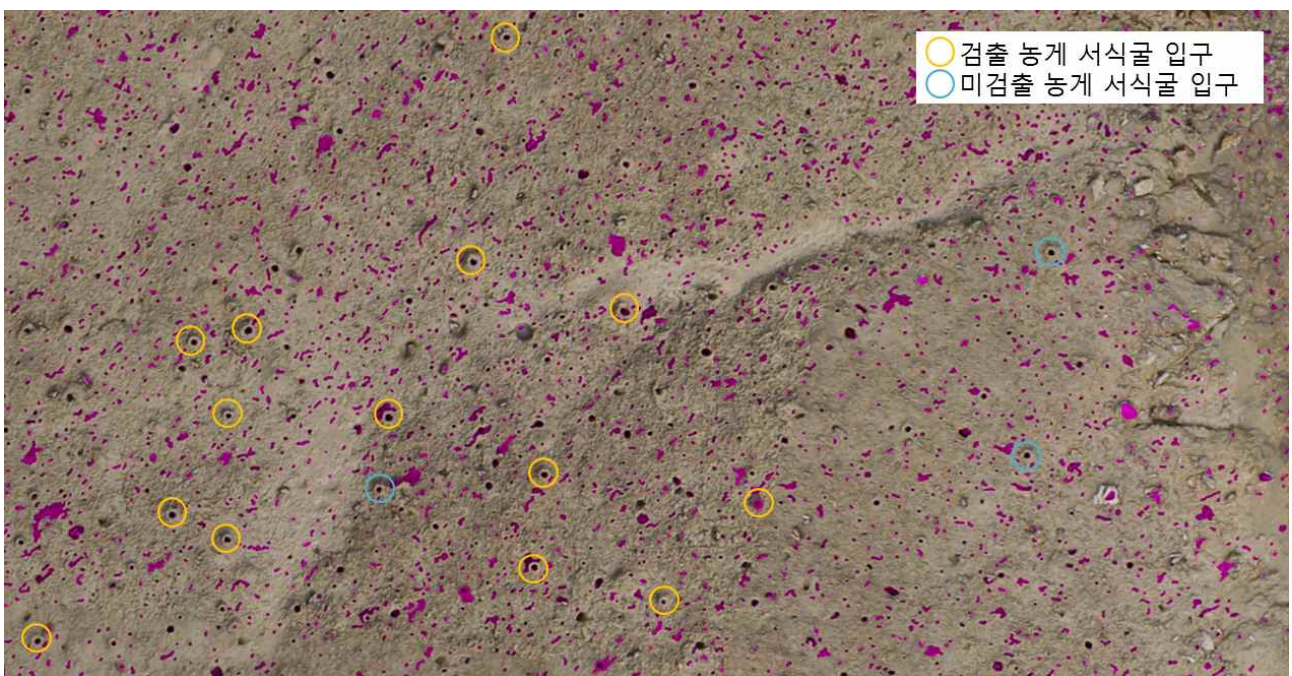


그림 3-2-2-3. 농계 서식굴 입구 검출

- 칠게의 경우 MATLAB의 경계 검출로 서식굴 입구를 전혀 검출하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 칠게 서식굴의 경우 잔존수가 많아 검출율이 낮은 것으로 판단되며, 칠게와 같이 잔존수가 많은 생물의 서식굴 검출의 경우 본 방법은 적합하지 않은 것으로 판단된다 (그림 3-2-2-4).

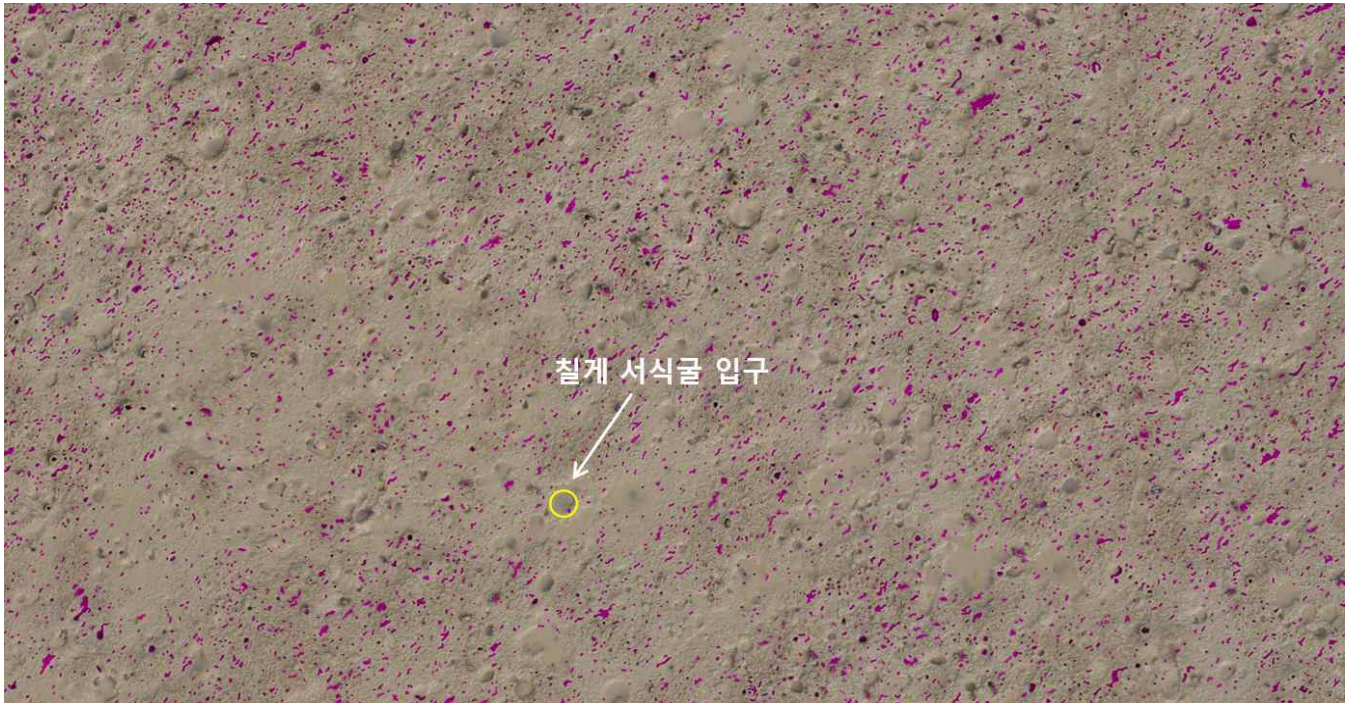


그림 3-2-2-4. 칠게 서식굴 입구 검출

- 갯벌 저서생물의 서식굴 입구 형태 표준화 자료를 무인항공기를 이용한 갯벌 영상에 적용시켜 갯벌 저서생물의 분포 자료 획득의 가능성을 확인하였으나 본 연구에서 사용된 방법은 한계점이 많은 것으로 나타났다. 따라서, 보다 정밀한 서식굴 입구 형태 표준화를 위해 향후 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 딥러닝과 같은 방법의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

### 3 절. 반폐쇄해역의 생태계 서비스 가치평가

#### 1. 에머지 개념 및 에머지 평가

##### (가) 에머지 개념

- 미국의 시스템생태학자인 Howard T. Odum이 제안한 에머지 개념은 지불의사와 화폐를 이용하는 경제학적 평가방법과 달리 가치 평가의 매개체로 에너지를 사용한다. 에머지는 energy memory를 줄여서 만든 용어로, “한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에 직접 그리고 간접으로 이미 소모된 한 종류의 이용 가능한 에너지” (Odum, 1996) 를 말한다. 즉, 에너지 관점에서 자원의 가치를 평가할 때 이 자원에 현재 남아 있는 에너지량을 이용하는 것이 아니라 이 자원이 만들어지는 동안 필요하였던 모든 에너지를 더한 값을 이용한다. 에너지 단위를 가치 평가에 이용함으로써 자원의 개발과 거래에 투입한 인간의 노동력뿐만 아니라 이 자원이 만들어지는 과정에서 자연환경이 기여한 부분까지 동일한 기준에서 비교할 수 있다. 에머지의 단위는 emjoule 을 사용한다 (강, 2013).
- 에머지 방법론에서 가장 중요한 개념 가운데 한 가지가 에너지의질 (energy quality)이다. Odum은 에너지 단위로 나타낸 에너지량이 같더라도 에너지의 종류가 다르면 일을 할 수 있는 능력이 다르다고 주장하였다. 이에 따라 에머지 방법론에서는 성격이 다른 에너지를 비교할 때 각 에너지를 기준으로 삼은 ‘한 가지 종류의 에너지’로 먼저 환산한다. 현재, 에머지 방법론에서 서로 다른 종류의 에너지를 비교하기 위해 기준으로 사용하는 에너지는 태양에너지이다. 태양에너지를 기준으로 계산한 에머지를 태양에머지 (solar emergy) 라 부르며, solar emjoules (sej) 을 단위로 사용한다.

##### (나) 에머지 평가

- 자원마다 일을 할 수 있는 능력의 차이를 나타내는 값 (기준 에너지 환산인자) 을 unit emergy value 라 하며, 환산인자를 구하는데 사용한 자료의 단위에 따라 에너지변환도(transformity), specific emergy, 에머지화폐비율(emergy-money ratio) 등으로 부른다. 에너지변환도는 한 가지 자원이 만들어 지는데 직접 및 간접으로 소모된 에너지의 합계를 이 자원에 현재 남아있는 에너지량으로 나눈 값이다 (Odum, 1996).
- 태양에너지가 현재, 에머지 방법론에서 사용하는 기준 에너지이기 때문에 에너지변환도를 태양에너지 변환도 (solar transformity) 라 부르며, 단위는 sej/J를 사용한다. Specific emergy는 평가대상 자원의 에머지량을 그 자원의 질량으로 나눈 값 (sej/g) 이며, 에머지화폐비율은 에머지량을 화폐량으로 나누어 구한 값 (sej/\$, sej/₩ 등) 이다 (표 3-3-1-1).
- 에너지량, 질량, 화폐량을 이용하여 계산한 unit emergy value가 에머지 방법론에서 가장 일반적으로 사용하는 자료이지만, 필요에 따라 다양한 단위를 이용하여 unit emergy value를 구해 에머지 평가에 활용할 수 있다. 평가하고자 자원에 현재 남아있는 에너지량(또는 질량, 화폐량 등)과 unit emergy value를 곱한 값이 그 자원의 에머지량이다.

표 3-3-1-1. 에머지 평가항목에 사용되는 단위 및 환산방법

Raw data	Unit Emergy Value (UEV)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue
J/yr, g/yr, \$/yr, ₩/ yr	sej/J, sej/g, sej/\$, sej/₩	Raw data × UEV	Solar emergy/Emergy-money ratio (em\$/yr, em₩/yr)

- Raw data : 평가항목의 에머지를 계산하는데 필요한 기초 자료, 연간자료를 이용
- Unit emergy value : 평가항목의 태양에너지 기준 환산인자. 환산인자의 계산에 사용한 자료의 단위에 따라 unit emergy value의 단위가 달라짐.
- Solar emergy : 평가항목의 태양에머지량, Raw data x Unit emergy value.
- Emvalue : 태양에머지량을 에머지화폐비율로 나눈 값, 에머지량을 화폐단위로 환산한 값. 에머지화폐비율을 우리나라 경제가 일년동안 사용한 에머지량 (sej/yr) 을 연간 국내총생산 (GDP/yr) 으로 나누어 구함. 본 연구에서 사용된 에머지화폐비율은 강 (2007) 이 제시한 2005년 국내 에머지화폐비율 ( $5.80 \times 10^9$ )을 적용하였음.

## 2. 곰소만 갯벌 면적 산출

- 2010년 국토해양부 연안습지 면적조사에 의하면 곰소만 갯벌의 면적은 약 117.7 km<sup>2</sup> 로 나와 있음. 하지만, 이 자료는 고창군 갯벌의 면적만을 대상으로 하고 있으며 부안군 갯벌의 면적은 포함되어 있지 않음. 따라서, 정밀한 곰소만 갯벌 면적을 구하기 위해 인공위성 영상을 이용해 곰소만 갯벌의 면적을 산출하였다.
- Landsat OLI 영상의 경우 한 개의 픽셀이 30 m × 30 m의 면적을 갖기 때문에 해당 영상에서 갯벌의 면적에 속하는 픽셀의 개수를 파악하여 900 m<sup>2</sup>를 곱해주었다.
- 위 방법에 의해 곰소만 갯벌의 면적은 63.06 km<sup>2</sup>로 산출되었으며, 국토해양부의 자료와 큰 차이를 나타냈다 (그림 3-3-2-1).

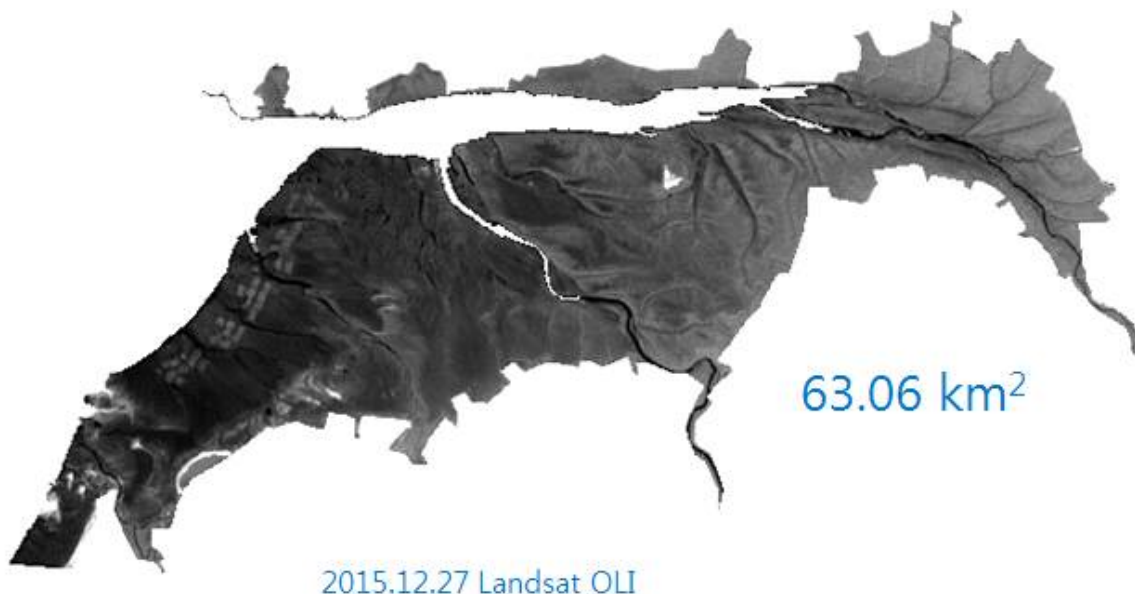


그림 3-3-2-1. Landsat 영상을 이용해 산출된 곰소만 갯벌의 면적

### 3. 곰소만 해역의 자연자본 및 생태계 서비스 목록의 선정

○ 자연자본은 인간의 삶을 지탱하는 재화와 서비스의 근원이 되는 생물 및 무생물 저장량으로 다음과 같은 항목들이 있다 (표 3-3-3-1).

표 3-3-3-1. 자연자본의 항목과 설명

자연자본	설 명
수산자원	해양생태계에 서식하는 유용 수산물
수자원	해수담수화에 이용할 수 있는 해수
광물자원	해저면 또는 해수 중에 있는 유용 광물
갯벌퇴적물	다양한 해양생물의 서식처가 되는 공간으로서 갯벌
해양에너지	조력, 조류, 온도차, 해상풍력 등 해양에너지 잠재력
해빈	해양여가활동을 가능하게 하는 모래의 저장 공간
해양경관	다양한 생태계서비스의 토대가 되는 해중경관 및 연안경관

표 3-3-3-2. 해양생태계 서비스 항목과 설명

대분류	중분류	소분류
공급서비스	식량	수산물 (어류, 연체류, 갑각류, 해조류, 기타 수산물)
조절서비스	기후 조절	온실기체 흡수
		연안침식 피해 저감
	재해 피해 저감	해일 피해 감소
		수질 정화
생물 조절	군집구조 안정화 (사람들의 건강과 연안 경제활동에 부정적 영향을 미치는 특정 생물종의 비정상적 번성 방지)	
문화서비스	사회문화 가치	해양문화유산 제공
		연안공동체 기반 제공 (어촌계 등 연안지역 사회의 특징적인 사회경제생활 공동체 형성 및 지역사회 기여)
	연구·교육 가치	과학연구가치 (해양과학조사 및 연구를 통해 지식기반 확충)
		교육 가치 (현장 학습, 체험활동 등 해양생태계를 이용한 다양한 교육 자료 및 기회 제공)
	건강 가치	치유·요양 기능 (해양생태계를 바탕으로 하는 치유·요양 기회 제공)
	심미적 가치	예술적 영감 (해양생태계의 지형, 생물, 건축물 등에 필요한 영감 제공)
종교적 영감 (해양 경관과 지역의 역사가 종교적 영감 부여)		
여가·관광 가치	여가 활동 및 휴식 공간 제공 (해수욕, 해양스포츠, 낚시, 유람선 이용) 및 휴식 공간 (휴식, 경치 감상 등을 통한 정신적 위안) 제공	
지원서비스	일차생산	유기물 생산 (해양식물이 해양생태계 먹이망의 토대인 유기물 생산)
	영양염 순환	영양염류 상태 변화 (해양생태계의 무생물 환경 및 생물 구성요소의 상호작용을 통한 영양염류 순환)
	물 순환	물 순환 (생태계 물질순환의 기본 토대로서 태양에너지에 기반한 물 순환)
	서식지 제공	해양생물 서식지 제공 (다양한 해양생물이 필요로 하는 서식 공간 제공)

- 생태계서비스는 인간이 누리는 생태계 편익의 공급능력으로 갯벌생태계는 공급서비스, 조절서비스, 문화서비스, 지원서비스 등의 다양한 생태계서비스를 제공하며 다음과 같은 항목들이 있다 (표 3-3-3-2).
- 곰소만 해역의 에머지 가치 평가를 위해 본 연구에서는 자연자본과 해양생태계서비스 목록 중 선행연구를 참고하여 평가 가능한 다음의 항목들을 선정하여 에머지 평가를 수행하였다 (표 3-3-3-3, 4).

표 3-3-3-3. 본 연구의 에머지 평가 자연자본 목록

자연자본	평가항목
갯벌퇴적물	대형저서동물 자원량
	미세조류 자원량
해양에너지	일조
	바람
	강수
	파도
	조석

표 3-3-3-4. 본 연구의 에머지 평가 해양생태계서비스 항목

대분류	중분류	소분류
공급서비스	식량	수산물
조절서비스	정화	탈질에 의한 영양염류 제거
		갯벌생물의 생물교란에 의한 유기물 제거
문화서비스	연구·교육 가치	과학연구가치
	여가·관광 가치	여가 활동

#### 4. 에머지 평가

##### (가) 자연자본 에머지 평가

##### (1) 일조

- 일조 에머지 평가에 사용된 자료는 기상청의 2016년 고창군 연간 일조량 자료를 사용하였고, 곰소만의 일조 에머지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-1).
- 곰소만 갯벌 면적 :  $63 \times 10^6 \text{ m}^2$
- 일조량 :  $5.24 \times 10^9 \text{ J/m}^2/\text{yr}$
- Albedo : 0.1
- 에너지 : 곰소만 면적  $\times$  일조량  $\times$  (1-Albedo)
- 에머지화폐비율 :  $5.80 \times 10^9$

표 3-3-4-1. 곰소만 일조 에너지 가치 평가

자연자본	Raw data (J/yr)	Solar transformativity (sej/J)	Solar energy (sej/yr)	Emvalue (em₩/yr)
일조	$2.97 \times 10^{17}$	1	$2.97 \times 10^{17}$	$5.12 \times 10^7$

(2) 바람

- 바람 에너지 평가에 사용된 자료는 기상청의 2016년 고창군 연간 풍속 자료를 사용하였고, 곰소만의 바람 에너지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-2).
- 곰소만 갯벌 면적 :  $63 \times 10^6 \text{ m}^2$
- 평균 풍속 : 1.69 m/s
- Geostrophic wind : 평균 풍속  $\times (10/6) = 2.82 \text{ m/s}$
- 에너지 : 곰소만 면적  $\times (1.3 \text{ kg/m}^3) \times (0.001) \times (\text{Geostrophic wind})^3 \times (3.14 \times 10^7 \text{ s/yr})$
- 에너지화폐비율 :  $5.80 \times 10^9$

표 3-3-4-2. 곰소만 바람 에너지 가치 평가

자연자본	Raw data (J/yr)	Solar transformativity (sej/J)	Solar energy (sej/yr)	Emvalue (em₩/yr)
바람	$5.79 \times 10^{13}$	2,450	$1.42 \times 10^{17}$	$2.44 \times 10^7$

(3) 강수

- 강수 에너지 평가에 사용된 자료는 기상청의 2016년 고창군 연간 강수량 자료를 사용하였고, 곰소만의 강수 에너지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-3).
- 곰소만 갯벌 면적 :  $63 \times 10^6 \text{ m}^2$
- 강수량 : 1.12 m/yr
- 에너지 : 곰소만 면적  $\times$  강수량  $\times (1,000 \text{ kg/m}^3) \times (4,940 \text{ J/kg})$
- 에너지화폐비율 :  $5.80 \times 10^9$

표 3-3-4-3. 곰소만 강수 에너지 가치 평가

자연자본	Raw data (J/yr)	Solar transformativity (sej/J)	Solar energy (sej/yr)	Emvalue (em₩/yr)
강수	$3.49 \times 10^{14}$	30,500	$1.06 \times 10^{19}$	$1.83 \times 10^9$

(4) 파도

- 파도 에너지 평가에 사용된 자료는 2014년 국립해양조사원의 해안선 통계 자료를 사용하였고, 곰소만의 파도 에너지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-4).
- 곰소만 갯벌 면적 :  $63 \times 10^6 \text{ m}^2$
- 해안선 길이 : 158,510 m

- 파고 : 0.5 m
- 파속 : 9.9 m/sec
- 에너지 : 해안선 길이 × (1/8) × (1,025 kg/m<sup>3</sup>) × (파고)<sup>2</sup> × 파속
- 에머지화폐비율 : 5.80 × 10<sup>9</sup>

표 3-3-4-4. 곰소만 파도 에머지 가치 평가

자연자본	Raw data (J/yr)	Solar transformity (sej/J)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (em₩/yr)
파도	5.03 × 10 <sup>7</sup>	51,000	2.56 × 10 <sup>12</sup>	4.42 × 10 <sup>12</sup>

(5) 조석

- 조석 에머지 평가에 사용된 자료는 2016년 국립해양조사원 영광 관측소의 연간 조위 자료를 사용하였고, 곰소만의 조석 에머지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-5).
- 곰소만 갯벌 면적 : 63 × 10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>
- 평균 조위 : 3.51 m
- 에너지 : 곰소만 면적 × (0.5) × (706 cycle/yr) × 평균 조위 × (1,025 kg/m<sup>3</sup>) × (9.8 m/s<sup>2</sup>)
- 에머지화폐비율 : 5.80 × 10<sup>9</sup>

표 3-3-4-5. 곰소만 조석 에머지 가치 평가

자연자본	Raw data (J/yr)	Solar transformity (sej/J)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (em₩/yr)
조석	2.74 × 10 <sup>15</sup>	73,900	2.02 × 10 <sup>20</sup>	3.49 × 10 <sup>10</sup>

표 3-3-4-6. 곰소만 대형저서동물 자원량 에머지 가치 평가

자연자본	Raw data (J/m <sup>2</sup> )	Solar transformity (sej/J)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (em₩/yr)
대형저서동물 자원량	3.96 × 10 <sup>13</sup>	8.10 × 10 <sup>5</sup>	3.21 × 10 <sup>19</sup>	5.53 × 10 <sup>9</sup>

(6) 대형저서동물 자원량

- 대형저서동물 에머지 평가에 사용된 자료는 2011년 한국해양과학기술원 곰소만 대형저서동물 군집조사 자료를 사용하였고, 곰소만의 대형저서동물 자원량 에머지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-6).
- 갯지렁이류 평균 생체량 : 3 g/m<sup>2</sup>
- 연체동물류 평균 생체량 : 55.7 g/m<sup>2</sup>
- 갑각류 평균 생체량 : 64.4 g/m<sup>2</sup>
- 기타 : 64.6 g/m<sup>2</sup>



- 에너지 : 평균 생체량 × (4 Kcal/g) × (4,186 J/Kcal) × (0.20)
- 에머지화폐비율 :  $5.80 \times 10^9$

(7) 미세조류 자원량

- 미세조류 에머지 평가에 사용된 자료는 정 외 (2015) 자료를 사용하였고, 곰소만의 미세조류 자원량 에머지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-7).
- 곰소만 갯벌 면적 :  $63 \times 10^6 \text{ m}^2$
- 미세조류 평균 생산량 :  $31.3 \text{ mg/m}^2/\text{day}$
- 에너지 : 곰소만 면적 × 미세조류 평균 생산량 × 10 × 365일
- 에머지화폐비율 :  $5.80 \times 10^9$

표 3-3-4-7. 곰소만 미세조류 자원량 에머지 가치 평가

자연자본	Raw data (mg/m <sup>2</sup> )	Solar transformity (sej/J)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (emW/yr)
미세조류 자원량	$7.2 \times 10^{12}$	$1.1 \times 10^4$	$7.9 \times 10^{16}$	$1.4 \times 10^7$

(8) 퇴적상에 따른 미세조류 자원량

- 곰소만 갯벌의 퇴적상에 따른 미세조류 자원량 에머지 가치 세분화를 위해 곰소만 갯벌 내에서 36개의 정점을 선택한 후 표층 퇴적물 시료를 채취하였다. 염산과 과산화수소를 사용하여 시료의 유기물을 제거하는 전처리 과정을 진행하였다. 전처리 후 입도 분석 기기인 Gradex 2000과 Sedigraph 5100을 사용하여 각 시료의 입도 분포, 평균입도, 분급도, 왜도, 첨도 등의 통계 자료를 획득하였다.
- 입도분석 결과를 토대로 각 정점의 좌표에 입도 자료를 대입하여 XYZ grid를 생성한 후 maximum curvate interpolation 기법을 적용하여 2차원 퇴적상 분포를 산출하였으며 이를 통하여 분석된 연구지역의 퇴적환경에 따라, 공간해상도가 4 m인 위성영상의 광학반사도 특성을 고려하여 훈련집합을 설정하였다. 설정된 훈련집합들을 최대 우도법 (Maximum likelihood method) 을 이용하여 퇴적상을 분류하였다.
- 모래함량 (0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100%) 을 기준으로 하여 곰소만 갯벌을 총 5개의 구역으로 나누었고, ER mapper 프로그램을 이용하여 모래함량에 따른 곰소만 갯벌의 면적을 산출하였다 (표 3-3-4-8).

표 3-3-4-8. 모래 함량에 따른 곰소만 갯벌의 면적

모래함량 (%)	갯벌 면적 (m <sup>2</sup> )
0-20	$6.31 \times 10^6$
20-40	$11.91 \times 10^6$
40-60	$25.54 \times 10^6$
60-80	$2.1 \times 10^6$
80-100	$16.6 \times 10^6$

- 퇴적상에 따른 곰소만 갯벌의 미세조류 자원량의 산출을 위해 모래함량에 따른 정점을 선정한 후 표층 퇴적물의 chlorophyll *a* 농도를 분석하였다 (표 3-3-4-9). 퇴적물 시료 10 g에 아세톤 10 ml를 가한 후 4 °C에서 24시간동안 추출한 후 4000 rpm으로 5분간 원심분리한 후 상등액을 취해 spectrophotometer를 이용해 chlorophyll *a* 농도를 분석하였다.

표 3-3-4-9. 곰소만 갯벌의 모래함량별 Chlorophyll-*a* 농도

모래함량 (%)	chlorophyll <i>a</i> 농도 (mg/m <sup>2</sup> )
0-20	36
20-40	14
40-60	36
60-80	28
80-100	33

- 퇴적상에 따른 미세조류 자원량의 에머지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-10).
- 에너지 : 모래함량에 따른 갯벌 면적 × 모래함량에 따른 미세조류 평균 생산량 × 10 × 365일
- 에머지화폐비율 :  $5.80 \times 10^9$

표 3-3-4-10. 퇴적상에 따른 미세조류 자원량 에머지 가치 평가

모래함량	Raw data (mg/m <sup>2</sup> )	Solar transformity (sej/J)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (emW/yr)
0-20	$8.3 \times 10^{11}$	$1.1 \times 10^4$	$9.1 \times 10^{15}$	$1.6 \times 10^6$
20-40	$6.1 \times 10^{10}$	$1.1 \times 10^4$	$6.7 \times 10^{14}$	$1.2 \times 10^5$
40-60	$3.4 \times 10^{12}$	$1.1 \times 10^4$	$3.7 \times 10^{16}$	$6.4 \times 10^6$
60-80	$2.2 \times 10^{11}$	$1.1 \times 10^4$	$2.4 \times 10^{15}$	$4.1 \times 10^6$
80-100	$2.0 \times 10^{12}$	$1.1 \times 10^4$	$2.2 \times 10^{16}$	$3.8 \times 10^7$
합계				$5.0 \times 10^7$

- 모래함량에 따른 곰소만 갯벌의 미세조류 자원량 에머지 가치 평가 결과 모래함량이 80-100%인 퇴적상에서 가장 높은 값을 나타냈다. 또한, 퇴적상에 따른 미세조류 자원량 에머지 가치는 약 5천만원으로 기존 문헌연구 결과에 의한 미세조류 자원량 에머지 가치인 1천 4백만원 보다 약 3배 이상 높게 나타났다. 퇴적상에 따른 미세조류 자원량 에머지 가치 평가 결과 국소지역의 자료를 전체 갯벌에 대입하여 에머지 가치를 평가하는 현재의 방법은 부정확한 결과를 산출할 수 있음을 시사하였다.
- 곰소만 전체 자연자본 에머지 가치 평가 결과는 다음과 같다 (표 3-3-4-11).

표 3-3-4-11. 곶소만 자연자본 에머지 가치 평가 결과

자연자본	에머지가치 (원)
일조	5천 1백만
바람	2천 4백만
강수	18억 3천만
파도	442
조석	349억
대형저서동물 자원량	55억 3천만
미세조류 자원량	1천 4백만
퇴적상에 따른 미세조류 자원량	5천만
합계	424억

(나) 해양생태계서비스 에머지 평가

(1) 수산물

- 곰소만 해역의 수산물 공급서비스의 에머지 평가는 문헌조사와 현장조사를 통해 산출하였다.
- 부안군 수협 수산물 위탁판매 자료 (2016) 와 한국해양과학기술원 실뱀장어 구획어업 피해조사 (2005, 2006) 자료를 통해 위탁 판매되는 수산물 자료 및 실뱀장어 어획량과 판매금액 자료를 확보하였다.
- 해양수산부 수산정책과 자료 (2016) 를 통해 부안군과 고창군의 어촌계 정보를 확보하였다. 부안군은 총 4개소의 어촌계가 있으며, 고창군은 총 13개소의 어촌계가 있는 것으로 확인하였고 이 중 수산물 판매 기록 자료가 있는 곳은 자료를 확보하였다 (그림 3-3-4-1).



그림 3-3-4-1. 부안군과 고창군 어촌계 위치

- 수산물 판매 기록 자료가 없는 어촌계는 직접 방문하여 자료 존재 여부를 확인한 후 자료를 획득하였으며, 기록 자료가 없는 어촌계는 어촌계장을 통해 구두로 대략적인 생산량과 판매금액을 추정하였다.
- 정확한 수산물 어획량 통계 자료 확보를 위해 부안군청과 고창군청에서 2016년 어획량 자료를 확보하였으며, 어업별 어장 구획도 자료를 확보하여 어획량이 기록되지 않은 곳의 어획량 자료를 추정하였다 (그림 3-3-4-2).
- 부안군과 고창군의 어촌계별 및 수산물별 생산량과 판매금액 자료는 다음과 같다 (표 3-3-4-11, 12).

2016/2017년도 어장 이용개발계획-1

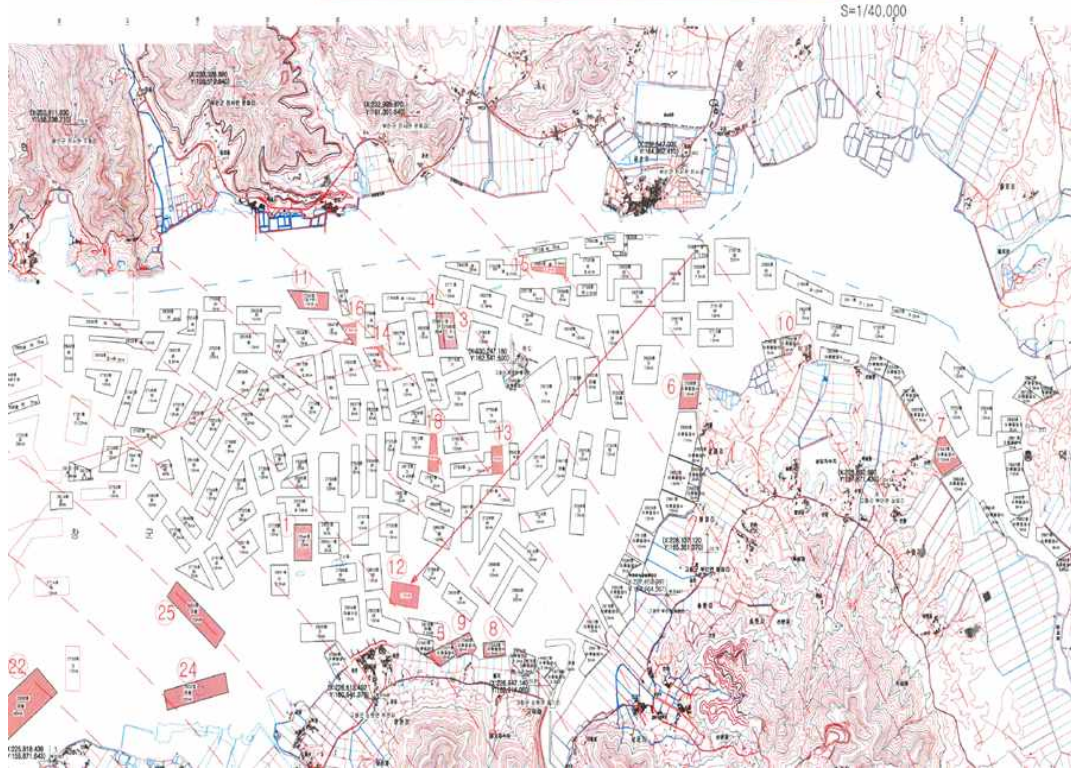


그림 3-3-4-2. 고창군 어업별 어장 구획도 (고창군청, 2016)

표 3-3-4-12. 부안군 어촌계 수산물 생산량 및 판매금액

어촌계		가무락	굴	김	바지락	전복
운호	생산량 (톤)	1	4	45	51	0
	금액 (백만원)	7	40	41	180	0
줄포	생산량 (톤)	4	0	0	68	0
	금액 (백만원)	26	0	0	237	0
도청	생산량 (톤)	0	0	1,031	45	0.1
	금액 (백만원)	0	0	945	158	11
곰소	생산량 (톤)	4	0	0	14	0
	금액 (백만원)	26	0	0	49	0

표 3-3-4-13. 고창군 어촌계 수산물 생산량 및 판매 금액

어촌계		가무락	김	동죽	바지락	새꼬막	어류
동호	생산량 (톤)			45		10	56
	금액 (백만원)			137		30	167
만월	생산량 (톤)	355					
	금액 (백만원)	639					
하전	생산량 (톤)	30	4,056	1,000	15,000		
	금액 (백만원)	300	24,338	1,800	37,500		
용기	생산량 (톤)	1,392			1,042		43
	금액 (백만원)	2,506			1,876		298
선운	생산량 (톤)	430			108		628
	금액 (백만원)	774			193		1,601
반월	생산량 (톤)	376			323		761
	금액 (백만원)	378			581		1,692
상포	생산량 (톤)	726			430		1,201
	금액 (백만원)	1,307			774		2,394
후포	생산량 (톤)	323					420
	금액 (백만원)	581					1,259
구시포	생산량 (톤)				215		215
	금액 (백만원)				387		387
장호	생산량 (톤)			91			91
	금액 (백만원)			274			274
광승	생산량 (톤)			183			183
	금액 (백만원)			548			548
죽도	생산량 (톤)	5		8			14
	금액 (백만원)	40		10			50

○ 부안군과 고창군의 어촌계별 수산물 어획량과 판매금액 자료로 산출된 에머지 가치는 다음과 같다 (표 3-3-4-13, 그림 3-3-4-3). 수산물의 경우 실제 판매금액보다 에머지 가치가 약 2배 높은 것으로 나타났는데 에머지 가치 평가의 경우 수산물이 생산되기까지 투입된 모든 에너지의 가치가 합산되기 때문에 실제 판매 금액보다 높게 나타난 것으로 해석할 수 있다.

표 3-3-4-14. 수산물 에머지 가치 평가

수산물	생산량 (톤/yr)	판매금액 (억원/yr)	에머지 가치 (억원/yr)
양식어업	27,863	797	1,497
실뱀장어	0.6	22.8	0.03
어류	186	15	10
갑각류	50	12	2.7
패류	0.5	0.03	0.03
연체동물	456	15	24.5
기타	0.1	0.01	0.001
합계	28,556	861.8	1,534

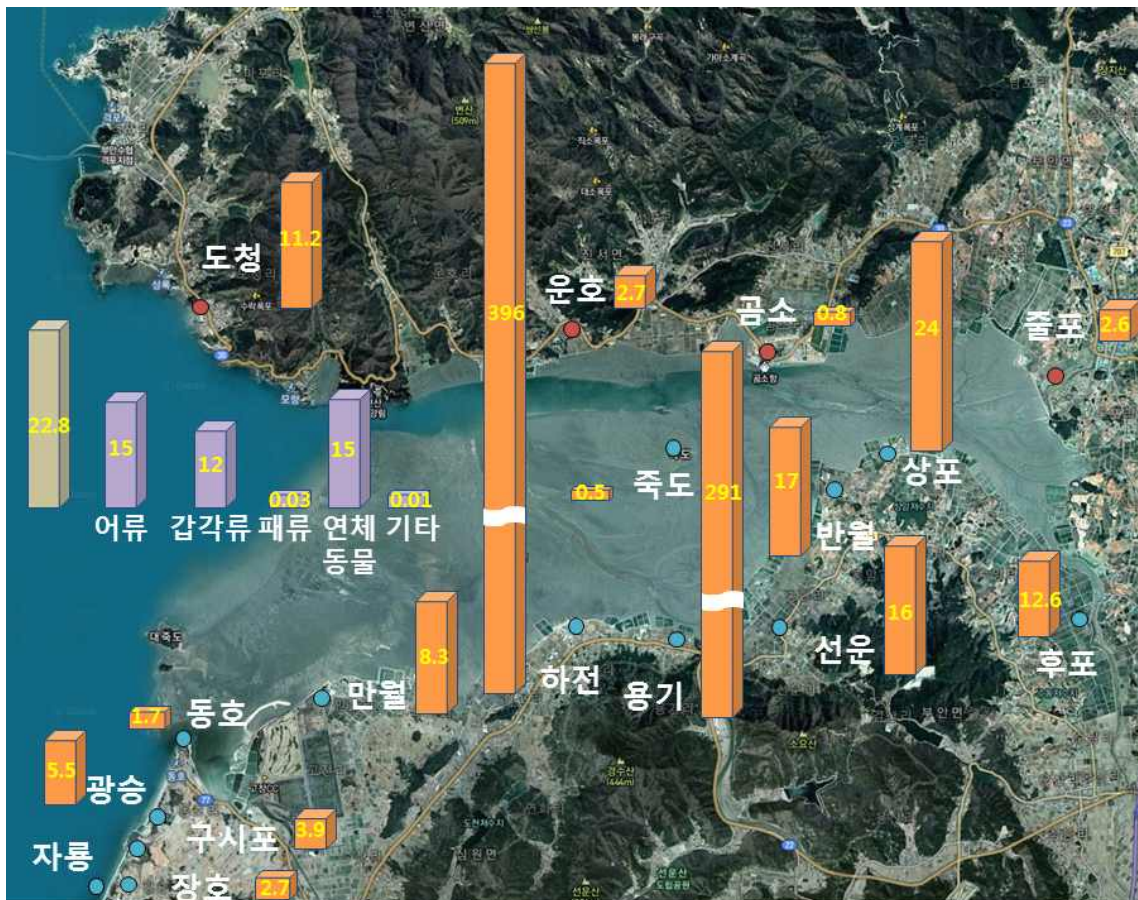


그림 3-3-4-3. 고평만 어촌계별 수산물 에머지 가치 (단위 : 억원)

(2) 과학연구가치

- 과학연구가치 평가에 사용된 자료는 문헌검색을 통해 곰소만을 대상으로 한 논문, 보고서, 책자 등의 수량을 사용하였고, 곰소만의 과학연구 에머지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-14).
- 출판물의 평균 페이지 수 (2000-2017년) : 4.3 page/yr
- 에너지 : 평균 페이지 수 × (10 page/paper) × (1 g/page) × (3.5 Kcal/g) × (4,186 J/Kcal)
- 에머지화폐비율 :  $5.80 \times 10^9$

표 3-3-4-15 곰소만 과학연구 에머지 가치 평가

해양생태계서비스	Raw data (J/yr)	Solar transformity (sej/J)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (emW/yr)
과학연구가치	$6.3 \times 10^5$	$5.2 \times 10^{12}$	$3.28 \times 10^{18}$	$5.65 \times 10^8$

(3) 어촌체험마을

- 곰소만의 어촌체험마을 에머지 가치 평가를 위해 전라북도 공공데이터 포털 (2015)을 통해 곰소만의 어촌체험마을 현황 자료를 확보하였다. 부안군 1개소, 고창군 3개소의 어촌체험마을이 있으며 세부적인 사항은 다음과 같다 (표 3-3-4-15, 그림 3-3-4-4).

표 3-3-4-16. 곰소만 어촌체험마을 정보

마을명	사업내용
하전마을	종합안내소 : 504m <sup>2</sup> , 주 차 장 : 1,800m <sup>2</sup> 갯벌체험장: 1개소, 야외수영장 : 30m <sup>2</sup>
만돌마을	종합안내소 : 316m <sup>2</sup> , 주 차 장 : 4,000m <sup>2</sup> , 갯벌체험장: 1개소
모항마을	종합안내소 : 515m <sup>2</sup> , 주차장·소공원: 각 1개소, 갯벌체험장: 1개소
장호마을	종합안내센터 : 356m <sup>2</sup> , 바다낚시체험장: 1개소

- 곰소만 어촌체험마을별 방문객수와 수입 자료는 해양수산부 어촌어항과 자료와 현장방문을 통해 확보 하였으며 다음과 같다 (표 3-3-4-16).





그림 3-3-4-4. 곶소만 어촌체험마을 위치

표 3-3-4-17. 곶소만 어촌체험마을 체험객 및 수입

2016년	하전마을		만돌마을		모항마을		장호마을	
	체험객 (명)	수입 (천원)	체험객 (명)	수입 (천원)	체험객 (명)	수입 (천원)	체험객 (명)	수입 (천원)
1월	0	0	35	328	0	0	471	3,746
2월	0	0	34	347	0	0	436	5,565
3월	82	794	32	356	0	0	594	5,680
4월	1,743	13,944	1,349	9,734	860	7,731	363	3,085
5월	5,057	40,456	4,568	32,463	2,635	24,120	604	5,365
6월	3,221	25,768	7,058	48,093	2,768	24,912	409	3,228
7월	2,713	21,690	5,379	41,599	3,668	33,012	1,246	12,715
8월	8,460	66,480	6,834	61,611	5,168	46,512	2,365	23,369
9월	3,084	24,672	615	4,391	1,641	14,769	651	5,461
10월	3,554	26,655	3,078	21,839	1,851	16,359	735	5,652
11월	3,135	24,453	413	3,506	127	1,143	209	2,740
12월	0	0	0	0	0	0	0	0
합계	31,049	244,912	29,395	224,267	18,718	168,558	8,083	76,606

- 곰소만 어촌체험마을의 에머지 가치는 어촌체험마을 수입 자료를 사용하였으며 다음과 같다 (표 3-3-4-17).

표 3-3-4-18. 곰소만 어촌체험마을 에머지 가치 평가

어촌체험마을	에머지 가치 (억원)
하전마을	2.44
만돌마을	2.24
모항마을	1.68
장호마을	0.76
합계	7.12

(4) 영양염류 제거

- 곰소만 갯벌의 탈질에 의한 영양염류 제거 에머지 가치 평가에 사용된 자료는 김과 양 (2001) 의 탈질 자료를 사용하였고, 곰소만의 영양염류 제거 에머지 가치는 다음과 같이 산출하였다 (표 3-3-4-18).
- 곰소만 갯벌 면적 :  $63 \times 10^6 \text{ m}^2$
- 평균 탈질을 :  $0.48 \text{ mmol N}_2/\text{m}^2/\text{day}$
- 에너지 : 평균 탈질을  $\times (365\text{일}) \times (14 \text{ gN/mol}) \times 0.001 \times$  곰소만 갯벌 면적
- 에머지화폐비율 :  $5.80 \times 10^9$

표 3-3-4-19. 곰소만 영양염류 제거 에머지 가치 평가

해양생태계서비스	Raw data (gN/yr)	Solar transformity (sej/gN)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (em₩/yr)
영양염류제거	$1.5 \times 10^8$	$1.04 \times 10^{11}$	$1.6 \times 10^{19}$	$2.8 \times 10^9$

(5) 갯벌생물의 생물교란에 의한 유기물 제거

- 해양생태계서비스 항목 중 영양염류 제거는 현재까지 갯벌 미생물의 탈질에 의한 제거만을 대상으로 평가되어져 왔으며, 갯벌생물의 생물교란에 의해 제거되는 유기물의 에머지 가치는 평가되어진 적이 없다. 본 연구에서는 갯벌 생물의 생물교란에 의해 제거되는 유기물의 양을 정량화 하고 이의 에머지 가치 평가를 수행하였다.
- 생물교란에 의한 유기물 제거 평가의 대상으로 두토막눈썹참갯지렁이를 선정하였다. 두토막눈썹참갯지렁이는 곰소만 갯벌의 우점종으로써 퇴적층 하부에서 퇴적물을 섭식하고 갯벌 표층으로 배설물을 배출하는 퇴적물상향재배치 생물이다. 섭식활동으로 생성된 배설물 (펠렛)을 갯벌 표면에 배출하기 때문에 관찰과 분석이 용이한 장점을 가지고 있다 (그림 3-3-4-5).



그림 3-3-4-5. 두토막눈썹참갯지렁이 (왼쪽) 와 섭식활동 후 갯벌 표면에 배출된 펠렛 (오른쪽)

- 두토막눈썹참갯지렁이의 섭식활동에 의한 유기물 제거 실험을 위해 곰소만 갯벌 중 개체밀도가 높고 실험이 용이한 지역을 선정하였으며 실험이 수행된 지역의 평균 개체밀도는 16 개체/m<sup>2</sup> 였다 (그림 3-3-4-6).



그림 3-3-4-6. 두토막눈썹참갯지렁이의 섭식활동에 의한 유기물 제거 연구 지역

- 두토막눈썹참갯지렁이의 섭식활동에 의한 유기물 제거를 정량화하기 위해 2018년 4월 조금과 사리때에 실험을 수행하였다. 사리에 연구지역은 하루에 두 번 만조시에 침수가 되는 지역으로 만조 후 연구지역이 드러났을 때 갯벌 표면에 배설된 펠렛을 모두 제거하였고 유기물 제거량을 비교하기 위해 두토막눈썹참갯지렁이의 섭식활동이 없는 퇴적물을 깊이별 (표층, 5-6 cm, 10-11 cm) 로 채집하였다. 연구지역이 침수되기 직전 갯벌 표면에 새롭게 생성된 펠렛을 채집하여 유기물 제거량을 산출하였다. 이 과정은 주간에 1번 야간에 1번 수행되었다 (그림 3-3-4-7).

- 조금에 연구지역은 침수가 되지 않는 지역으로 사리와의 비교를 위해 동일한 시간에 연구를 수행하였다. 위에 언급한 방법과 동일한 방법으로 퇴적물과 펠렛을 채집하였으며, 사리와 마찬가지로 주간 1번 야간에 1번 수행되었다 (그림 3-3-4-7).
- 채집된 퇴적물과 펠렛 시료는 실험실로 운반 후 60 °C에서 약 48시간동안 완전 건조시킨 후 균일화하여 일정량을 취해 원소분석기를 이용해 탄소와 질소 농도를 분석하였다.
- 사리와 조금의 실험기간의 두토막눈썹참갯지렁이의 개체 밀도, 길이, 생체량은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 따라서, 섭식활동에 의한 유기물 제거에 있어 개체의 차이에 의한 영향은 없는 것으로 판단하였다 (표 3-3-4-19).

표 3-3-4-20. 사리와 조금 때의 두토막눈썹참갯지렁이의 개체 밀도, 길이, 생체량

	개체 밀도 (개체/0.025 m <sup>2</sup> )	길이 (mm)	생체량 (g)
사리	19±3	9.36±4.57	0.66±0.74
조금	15±2	8.22±4.99	0.41±0.55
P value	>0.05	>0.05	>0.05

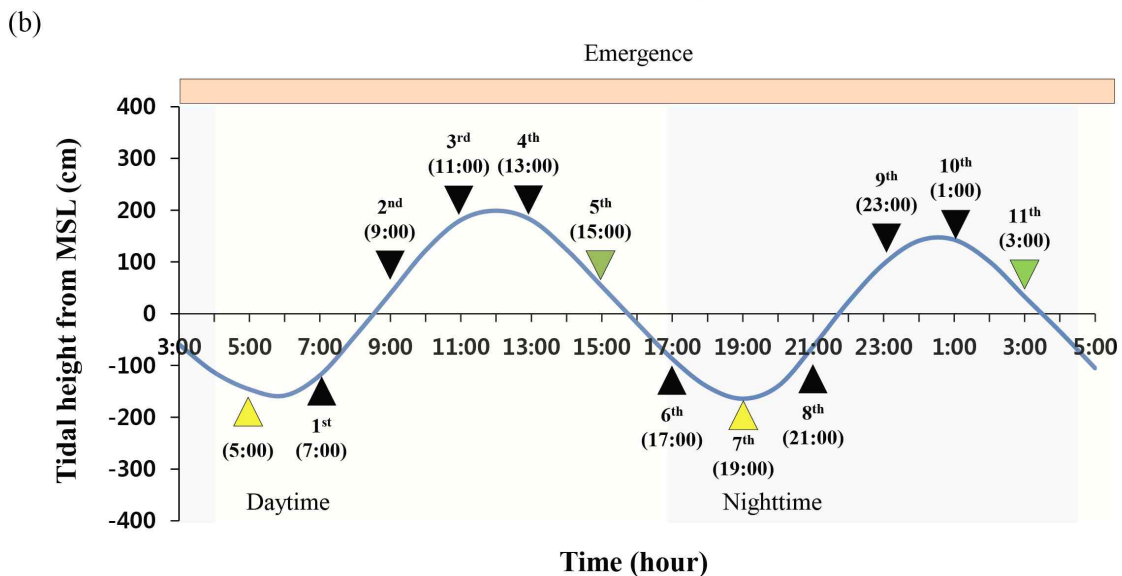
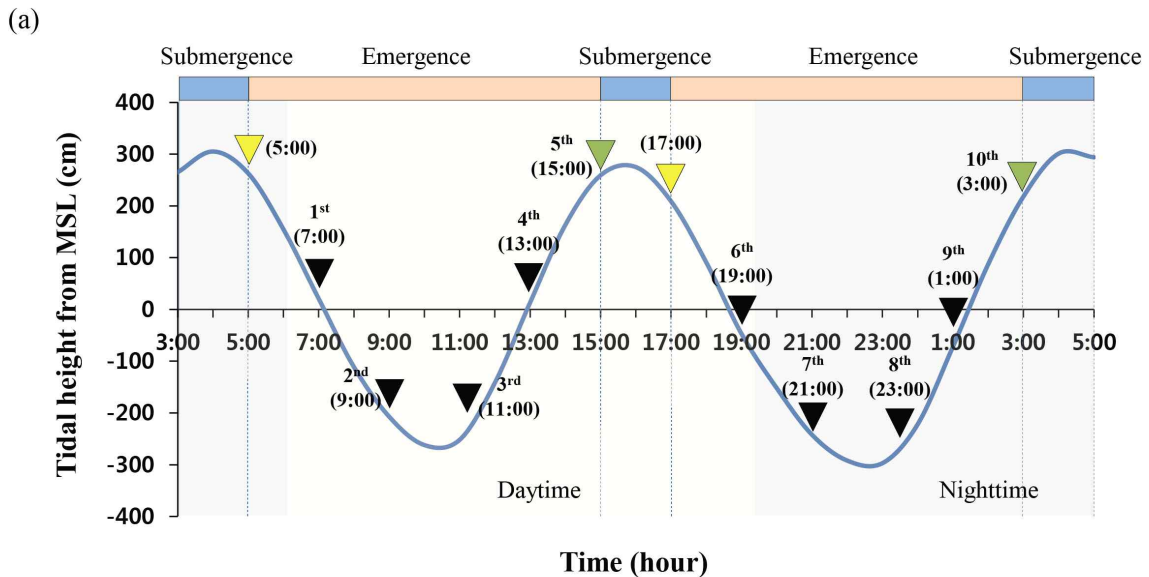


그림 3-3-4-7. 조위변화 및 퇴적물과 펠렛 시료 채집 시간 (a): 만조, (b): 간조 (노란색 삼각형은 퇴적물 채집시간, 초록색 삼각형은 펠렛 채집시간을 의미함)

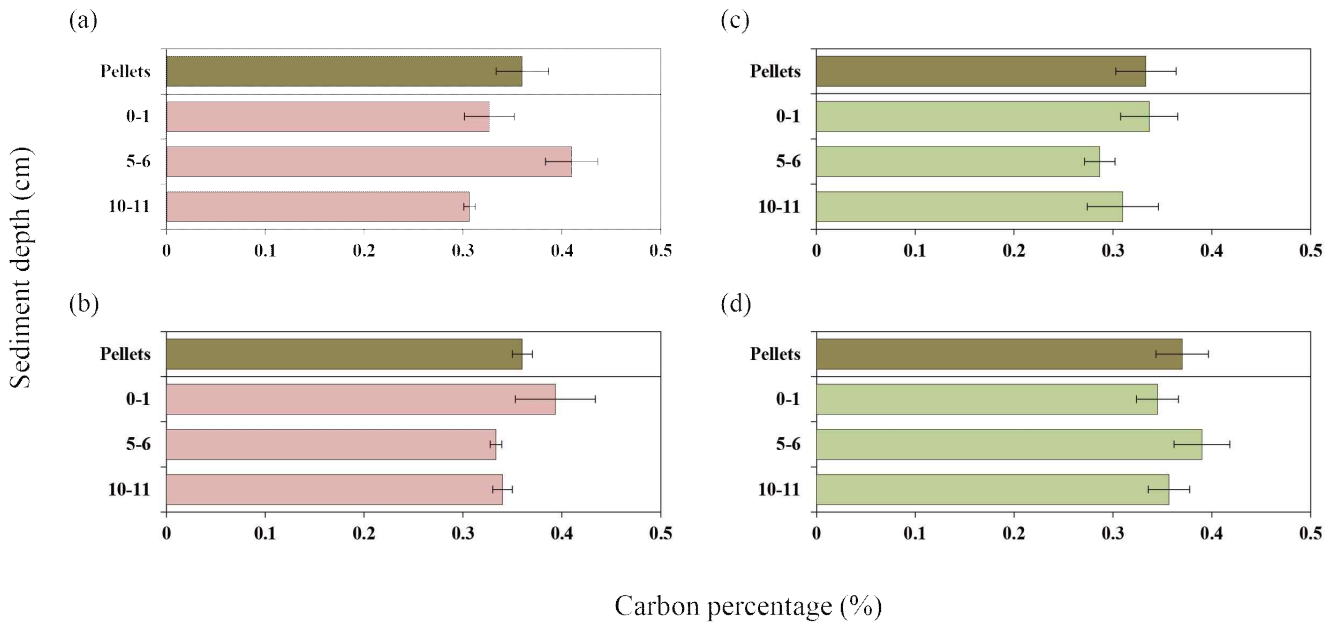


그림 3-3-3-8 . 사리와 조금의 퇴적물과 펠렛의 탄소 농도 - (a) 사리 주간 (b) 사리 야간 (c) 조금 주간 (d) 조금 야간

- 두토막눈썹참갯지렁이의 섭식활동으로 인한 유기물 제거 분석 결과 탄소의 경우 사리와 조금 두 시기의 주간과 야간 모두에서 퇴적물과 펠렛의 탄소 농도가 유의한 차이를 나타내지 않았다 (그림 3-3-4-8).
- 두토막눈썹참갯지렁이와 같이 퇴적층 하부에서 섭식활동을 하는 갯벌 생물의 경우 에너지 확보를 위해 선택적 섭식을 하는 것으로 알려져 있다 (Lopez et al., 1989). 퇴적물 입자의 크기가 작을수록 단위 면적당 흡착된 유기물의 농도가 증가하므로 정해진 섭식시간동안 많은 에너지 확보를 위해 작은 입자를 선택적으로 섭식하는 것이며, 두토막눈썹참갯지렁이의 경우 250  $\mu\text{m}$  이상의 입자는 섭식하지 않는 것으로 알려져 있다. 즉, 퇴적물과 펠렛의 탄소 농도가 유의한 차이를 나타내지 않은 것은 작은 입자를 선택적으로 섭식하는 선택적 섭식의 영향 때문인 것으로 판단된다.
- 질소의 경우 사리에 주간과 야간 모두에서 퇴적물과 펠렛에서 유의한 농도 차이를 나타냈다. 반면에, 조금에는 주간과 야간 모두에서 질소가 검출되지 않았다 (그림 3-3-4-9).
- 사리에 주간의 경우 모든 퇴적물 깊이에서의 질소농도보다 펠렛의 질소농도가 낮게 나타났으며 두토막눈썹참갯지렁이의 섭식활동에 의해 평균 약 39%의 질소가 제거되는 것으로 나타났다. 야간의 경우 주간보다 낮은 제거량을 나타냈으며, 평균 약 24%의 질소가 제거되는 것으로 나타났다. 주간의 경우 야간에 비해 섭식활동이 우세하며 야간의 경우 섭식활동보다 서식굴 보수 등과 같은 활동이 우세하게 나타난 것으로 판단되며 주간과 야간의 질소 제거량의 차이는 두토막눈썹참갯지렁이의 이러한 생태적 특성에 기인한 것으로 판단된다.
- 조금의 경우 퇴적층 모든 깊이에서 질소가 검출되지 않았으며 앞서 언급한 것처럼 본 연구지역은 조금에 해수에 의한 침수가 일어나지 않는 지역이다. 또한, 본 연구지역은 외부에서 유입되는 유기물원이 없는 지역이다. 따라서, 조금에 질소가 검출되지 않은 것은 해수에 의한 유기물 공급이 없었기 때문으로 판단된다.

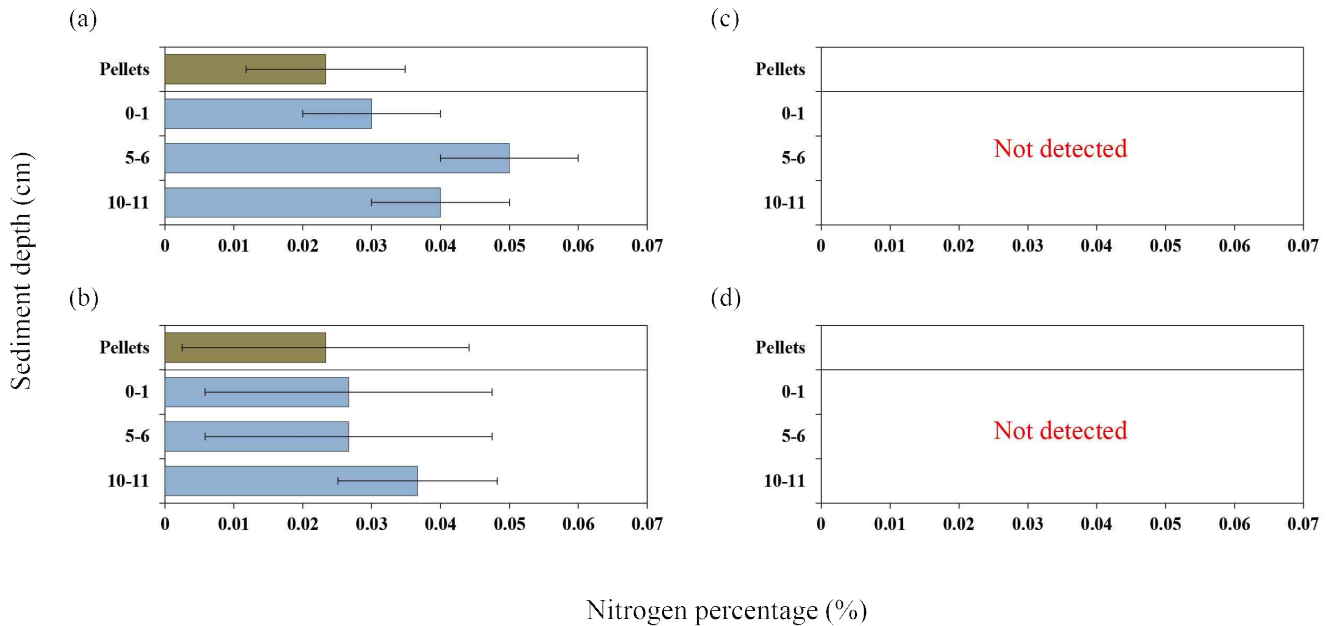


그림 3-3-4-9. 사리와 조곰의 퇴적물과 펠렛의 질소 농도 - (a) 사리 주간 (b) 사리 야간 (c) 조곰 주간 (d) 조곰 야간

- 두토막눈썹참갯지렁이의 섭식활동에 의한 유기물 제거 분석 결과 탄소의 경우 선택적 섭식에 의해 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 질소의 경우 섭식활동에 의한 제거가 뚜렷하게 나타났다. 사리에 섭식활동에 의해 제거되는 질소의 양은 약 5,386 mol/day 로 산출되었다.
- 이러한 갯벌 생물의 생물교란에 의한 유기물 제거는 그 만큼의 하수처리 비용을 절감한다. 따라서, 오염정화 서비스를 평가하기 위해 3차 처리가 가능한 하수 처리장의 건설 및 운영에 필요한 재화와 용역의 에머지량을 이 처리장의 질소제거량으로 나누어 단위질소제거량당 에머지 비용을 계산할 수 있다. 우리나라의 하수처리시설에 대한 에머지 평가 사례가 없어 본 연구에서는 스웨덴의 사례를 참고 하였다 (Geber and Bjorklund, 2002).
- 곰소만 갯벌에서 두토막눈썹참갯지렁이의 섭식활동에 의한 유기물제거의 에머지 가치는 다음과 같이 산출했다 (표 3-3-4-20).
- 두토막눈썹참갯지렁이의 섭식활동에 의한 질소 제거량 :  $5.39 \times 10^3$  mol/day
- 곰소만 갯벌에서의 연간 질소 제거량 :  $1.38 \times 10^7$  gN/yr
- 스웨덴 하수 처리장의 에머지량 :  $2.51 \times 10^{18}$  sej/yr
- 스웨덴 하수 처리장의 연간 질소 제거량 : 24,150 kg/yr
- 에머지화폐비율 :  $5.80 \times 10^9$

표 3-3-4-21. 두토막눈썹참갯지렁이의 생물교란에 의한 유기물 제거 에머지 가치 평가

해양생태계서비스	Raw data (gN/yr)	Solar transformity (sej/gN)	Solar energy (sej/yr)	Emvalue (em₩/yr)
생물교란에 의한 유기물 제거	$1.38 \times 10^7$	$1.04 \times 10^{11}$	$1.44 \times 10^{18}$	$2.48 \times 10^8$

- 곰소만 갯벌에서 두토막눈썹참갯지렁이의 생물교란에 의한 유기물 제거 에머지 가치는 평방미터당 약 2억 5천만원으로 갯벌 미생물의 탈질에 의해 제거되는 유기물 제거 에머지 가치인 28억원에 비해 1/10 수준인 것으로 나타났다. 하지만, 두토막눈썹참갯지렁이 한 종의 생물에 의한 에머지 가치임을 감안했

을 때 곰소만 갯벌에 서식하는 모든 갯벌 생물의 생물교란에 의한 유기물 제거 에머지 가치는 훨씬 더 클 것으로 판단된다.

- 본 연구는 현재까지 시도되어지지 않았던 갯벌 생물의 생물교란에 의한 유기물 제거 에머지 가치 평가를 수행했다는 점에서 의의를 가진다. 또한, 현재 갯벌 기능 중 정화기능 평가시 배제되었던 갯벌 생물에 의한 정화기능이 갯벌 미생물의 탈질에 의한 정화 기능보다 훨씬 높은 가치를 가짐을 제시하였다.
- 본 연구결과는 향후 갯벌의 가치 평가시 갯벌 생물에 의한 정화기능에 대한 평가가 필수적으로 수반되어야 갯벌 정화기능의 정확한 가치 평가가 이루어질 수 있음을 시사한다.

(다) 곰소만 해역의 에머지 가치 평가 결과

(1) 곰소만 해역의 에머지 가치

표 3-3-4-22. 곰소만의 에머지 가치 평가 결과

자연자본/생태계서비스	에머지 가치 (만원)
일조	5천 1백
바람	2천 4백
강수	18억 3천
파도	442 원
조석	349억
대형저서동물 자원량	55억 3천
미세조류 자원량	1천 4백
퇴적상에 따른 미세조류 자원량	5천
수산물공급	1,534억 1천
탈질에 의한 영양염류제거	27억 7천
갯벌 생물의 생물교란에 의한 유기물 제거	2억 5천
과학연구가치	5억 7천
어촌체험마을	7억 1천
합계	2,009억 5천 9백

- 곰소만의 자연자본과 생태계서비스 에머지 가치 평가 결과 곰소만 해역의 전체 에머지 가치는 연간 약 2,009억으로 산출되었다 (표 3-3-4-21). 하지만, 본 연구에서 평가하지 못한 다른 서비스들이 있기 때문에 이 값이 곰소만의 최종적인 총 가치를 의미하지는 않는다.
- 생태계서비스 항목 중 수산물 생산이 1,534억으로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 영양염류제거, 어촌 체험마을, 과학연구가치 순이었다. 자연자본 항목 중 조석의 에머지 가치가 349억으로 가장 높게 나타났으며 다음으로 대형저서동물, 강수, 일조, 바람, 미세조류, 파도 순이었다 (표 3-3-4-21).
- 에머지 관점에서 계산한 수산물생산 서비스의 가치는 곰소만 어촌계의 2016년 수산물 판매금액인 861

억보다 약 2배 높게 나타났다. 이는 곰소만에서 생산된 수산물의 시장가치가 곰소만 생태계의 자연환경이 이러한 생산에 기여한 바를 저평가하고 있다는 것을 의미한다.

- 또한, 해양수산부에서 제시한 결과에 따르면 갯벌의 수산물 생산기능의 경제적 가치는 단위면적당 (1 km<sup>2</sup>) 약 17.5 억원으로 이를 곰소만 갯벌 면적에 대입하면 약 1,102억원의 가치로 환산할 수 있다. 이는 본 연구결과의 수산물생산 에머지 가치인 1,534억원보다 낮은 가치로써 현재 갯벌 가치 평가에 사용되는 경제학적 가치 평가 방법이 갯벌의 가치를 저평가할 수 있음을 시사하고 있다.
- 따라서, 생태계의 이용, 개발, 보전과 같은 정책 결정을 위해 생태계의 기여 가치를 평가하고자 할 경우 일반적으로 활용하고 있는 경제학적 평가이외에 에머지 개념과 같이 다른 관점에서 생태계의 기여 가치를 평가하는 방법을 같이 활용할 필요가 있다.

#### (라) 곰소만 해역과 타지역의 에머지 가치 비교

- 현재까지 갯벌 생태계의 에머지 가치 평가 연구는 부족한 상황이며, 에머지 방법을 적용해 갯벌의 가치를 평가한 3개의 연구 결과와 곰소만의 에머지 가치 결과를 비교하였다 (표 3-3-4-22).
- 류 (2016) 의 연구에 따르면 함평만의 에머지 가치는 약 601억원이었으며, 강 (2013) 의 연구는 영산강 하구의 에머지 가치를 약 1,964억원으로 산출하였다. 국립공원관리공단 (2014) 의 연구에 의하면 변산반도의 에머지 가치는 약 67.4억원으로 나타났다.
- 함평만, 영산강 하구, 변산반도와 비교했을 때 곰소만의 에머지 가치가 가장 높은 것으로 나타났다. 하지만, 에머지 가치 평가 항목의 차이를 감안할 경우 타지역과의 직접적인 가치의 비교는 무리가 있다고 판단된다. 그럼에도 곰소만의 에머지 가치는 현재까지 연구된 갯벌 생태계 중 가장 높은 가치를 가지는 것으로 나타났다.
- 에머지 방법론을 이용하여 곰소만 해역 생태계의 기여 가치를 평가한 결과 곰소만 생태계가 우리 경제에 기여하는 가치가 아주 높은 것으로 나타났다.
- 본 연구에서 평가한 5가지 생태계 서비스의 경우 수산물 공급 서비스가 에머지 측면의 가치가 가장 높았으며, 어촌체험마을, 과학연구, 영양염류 제거, 갯벌 생물의 생물교란에 의한 유기물제거의 순으로 나타났다.
- 에머지 측면의 기여 가치는 경제학적 방법론에 근거한 가치보다 더 높아 자연환경과 인간 활동을 에너지를 이용하여 평가하고자 하는 에머지 개념과 방법론의 특성을 잘 보여주었다.
- 본 연구에서는 에머지 평가에 필요한 관련 자료 부족으로 교육기능을 제외하고 과학연구 기능만 평가하였으며, 과학연구의 경우도 세부 정보가 부족하여 외국 사례에 제시된 에너지변환도로 에머지 측면의 가치를 평가한 한계가 있다.
- 또한, 오염정화 서비스의 경우도 국내 하수처리장에 대한 에머지 평가 사례가 없어 외국의 자료를 사용하였다. 곰소만 생태계가 제공하는 생태계 서비스는 본 연구에서 평가한 5가지 이외에도 다양한 서비스가 있지만 평가에 필요한 자료가 충분하지 못하여 본 연구에서는 평가 대상에서 제외하였다.
- 에머지 가치 평가 방법은 생태계가 제공하는 서비스의 자료를 통해 산출되기 때문에 자료가 다양할수록 많은 서비스의 가치 평가가 가능해진다. 따라서, 향후 곰소만 생태계가 제공하는 서비스의 정확한 가치 평가를 위해서 보다 정확하고 많은 자료의 확보가 필요하며, 에머지 가치 평가 전 곰소만 생태계가 제공하는 서비스의 자료 확보 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.



표 3-3-4-23. 타지역과 곶소만의 에머지 가치 결과 비교

자연자본/ 생태계서비스	에머지 가치 (원)			
	곶소만	함평만	영산강 하구	변산반도
일조	5천 1백만	-	1억 1천만	-
바람	2천 4백만	-	6억 3천만	-
강수	18억 3천만	-	40억 4천만	-
파도	442	-	247원	-
조석	349억	-	480억	-
대형저서동물	55억	1천만	-	-
미세조류 자원량	1천 4백만	1천 2백만	-	-
퇴적상에 따른 미 세조류 자원량	5천만			
수산물공급	1,534억	588억 2천만	1,101억	67.4억
탈질에 의한 영양염류제거	27억 7천만	12억 6천만	326억	-
갯벌 생물의 생물교란에 의한 유기물 제거	2억 5천만	-	-	-
과학연구가치	5억	-	9.3억	-
어촌체험마을	7억	6억 1천만	-	-
합계	2,009억 5천 9백만	601억	1,964억	67억

# 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

## 1 절. 연구개발목표 달성도

### 1. 3개년 연구결과 및 실적

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B)(%)
	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2016)	1.연안환경 기본도 제작	1-1.곰소만 수치표고모델 작성 및 검증	0.5	TanDEM-X 위성자료를 사용한 곰소만 DEM 제작 무인항공기를 사용한 곰소만 DEM 검증	90
		1-2.곰소만 표층입도 분석	0.1	표층 입도분석	
		1-3.곰소만 연안환경도 작성 및 분석	0.1	조류로 분포도, 조류로 밀도도, 잔존수 분포도 등 1:10,000 연안환경도 제작	
	2.저서생물 생태지도 분석기술 고도화	2-1.환경-생물분포 기여도 분석	0.3	1×1 m 방형구조사	100
				주요 우점종 및 수산종 선정	
기여도 분석체계 분류 및 확립					
			생물분포 주요 기여 환경변수 선정(생태지도제작용 독립환경변수 선정)		
계	1.0			93	
2년차 (2017)	1. 연안 기본도 제작	1-1. 연안 지형도 제작	0.4	TanDEM-X 영상 기반 연안 지형도 제작	40
		1-2. 조류로 특성 분석		TanDEM DEM 기반 조류로 추출 및 특성 분석 완료	
		1-3. 연안 표층 피복도 제작		다중원격탐사 자료 기반 표층 피복도 제작 완료	
	2. 저서생물 생태지도 분석 기술 고도화	2-1. 연안환경-생물분포 기여도 분석	0.3	연안환경에 따른 저서생물 종별 출현확률 산출 및 정확도 검증	30
		2-2. 저서생물 생태지도 제작		저서생물 3종에 대한 저서생물 생태지도 제작	
3. 반폐쇄해역의 생태계 서비스 가치평	3-1. 에머지 평가의 공간범위 설정	0.3	곰소만해역의 공간범위 설정 및 면적 산출 완료	30	

	가	3-2. 에머지 평가 모델 및 평가표 작성		곰소만해역의 자연자본 및 생태계서비스 목록, 평가항목 제시 완료	
		3-3. 에머지 지수 계산		곰소만해역의 생태계서비스별 에머지 지수 산출 완료	
		3-4. 에머지량 계산		곰소만해역의 생태계서비스항목별 에머지량 산출 및 시스템 특성 파악 완료	
	계		1.0		100
3년차 (2018)	1. 연안 기본도 제작	1-1. 연안 주제도 제작	0.4	무인항공기 기반 연안 지형도 제작 및 TanDEM-X 기반 DEM을 활용한 주제도 제작	40
		1-2. 조류로 분석 기술 고도화		TanDEM-X 영상 기반 조류로 재추출 및 주제도 작성	
	2. 저서생물 생태지도 분석 기술 고도화	2-1. 연안환경-생물분포 기여도 분석 기술 고도화	0.3	연안환경별 출현확률 산출 및 확률구간별 정확도 검증	30
		2-2. 저서생물 생태지도 제작 기술 고도화		무인항공기 영상 기반 서식굴 입구 표준화 가능성 확인	
	3. 반폐쇄 해역의 생태계 서비스 가치평가	3-1. 에머지 평가 모델 및 평가표 항목 세분화	0.3	갯벌 정화기능 평가항목 세분화 완료	30
		3-2. 에머지량 계산 비교분석		생물교란에 의한 유기물 제거기능 에머지 평가 완료 및 타지역과 비교분석 완료	
	계		1.0		100

## 2 절. 대외기여도

### 1. 기술적 측면

- 과거의 현장관측 위주의 갯벌연구에 비해 보다 현실성 있는 자료를 획득할 수 있다.
- 기존의 연안주제도들을 보완하고 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.
- 기존의 인공위성 원격탐사를 활용한 연안지형도들보다 높은 공간해상도를 가지는 TanDEM-X 위성영상을 활용하여 5m 급의 연안지형도를 제작하였다. 수직오차를 크게 줄였고, 정밀도를 증가시켰다.
- 연안환경에 따른 대형저서동물 출현확률을 산출하였다. 퇴적상, 고도 등의 인자를 이용하였으며, 기존 생태지도 제작방법들에 비해 간단한 방법론과 환경변수를 이용한 정확한 저서생물생태지도 제작 가능성을 확인하였다. 연안의 생태환경적 가치를 정량적으로 평가할 수 있는 과학적인 근거를 마련하였다.
- 국내 최초로 반폐쇄해역(곰소만)에 대한 갯벌 저서생물생태지도를 제작하였다.
- 국내 최초로 반폐쇄해역(곰소만)의 자연자본 및 생태계서비스 항목별 에머지 가치평가를 완료하였다.
- 고정익 무인항공기를 활용하여 연안지형도를 제작하였으며, 월등한 비행시간을 이용해 중장거리 영역

의 갯벌의 초고해상도 연안지형도를 제작할 수 있는 단초를 마련하였다.

- 무인항공기 영상에 기반한 갯벌 대형저서동물 서식굴 입구 표준화의 가능성과 저서생물 생태지도 정확도 향상 가능성을 확인하였다. 향후 AI 기반 이미지 분석기술을 적용하면, 초고해상도의 연안지형도와 결합하여 정밀한 저서생물 생태지도 제작이 가능할 것으로 판단된다.

## 2. 경제/산업적 측면

- 육역과 연계된 연안의 토지피복현황 파악이 가능하여 실제 토지 현황을 반영한 연안개발 계획 수립이 가능하다.
- 에머지 가치 결과를 통해 갯벌 기능의 정확한 가치를 제공할 수 있으며, 생태계서비스의 공간적 가치 평가 및 관리에 기초자료로 활용 가능하다.
- 국내 최초로 갯벌 대형저서동물의 한 종인 두토막눈썸참갯지렁이를 대상으로 한 섭식활동에 의한 질소제거량 산출 및 에머지 가치 산출을 수행하였다. 현재 갯벌의 정화기능 평가시 미생물 활동에 의한 유기물 분해/제거 기능만을 평가하고 있으나, 본 연구의 결과를 토대로 갯벌 생물에 의한 정화기능 가치를 보완하여 보다 정확한 갯벌의 가치를 평가할 수 있을 것이다.
- 객관적인 연안생태계 변화자료 제공을 통해 연안환경변화로부터 발생하는 지역경제 피해를 최소화할 수 있다.

## 3. 사회적 측면

- 갯벌 생태계의 가치를 에머지 지수라는 확립된 숫자로 표현할 수 있었고 이를 통해 갯벌의 보전 가치를 설명할 수 있게 되었다. 이러한 에머지 지수의 정확도를 높여, 갯벌의 가치를 통상적으로 설명할 수 있는 방법이 된다면 갯벌의 보전, 개발 등과 관련된 정책을 결정하는 방법이 될 수 있다.
- 출현확률 기반 저서생물생태지도는 갯벌 생태계 서비스 가치평가에 있어 수산자원 및 대형저서동물 등과 같은 항목에서의 정확도 향상에 기여할 수 있으며, 향후 생태계 관리방안 및 정책 마련에 기초자료로써 활용될 수 있다.
- 반폐쇄해역의 생물자원을 관리하고 생태계 서비스 기능을 확대할 수 있다.
- 갯벌의 객관적인 기능평가 및 효율적인 관리방안을 제시할 수 있다.
- 지방자치단체들이 통합적으로 연안역을 관리할 수 있는 정책 기반 조성에 기여한다.

# 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 고해상도의 연안 생태환경도는 국내 연안환경의 변화를 모니터링하기 위한 기초자료로 활용 가능하다.
- 정밀도가 높은 연안생태지도 작성을 통해 연안의 효율적인 관리 및 복원 방안 수립 지원이 가능하다.
- 국가기본주체도로 사용되기 위해 필요한 요구사항을 분석하고, 수요자 맞춤형 자료를 생산함으로써, 지속적이고 활용도 높은 자료를 구축한다.
- 생태계 가치평가 개선 및 지수개발을 통해 정확한 경제적 가치 자료제공할 수 있다.

## 제 6 장 참고문헌

- Sung Kwun Chough, Hee Jun Lee, and Seok Hoon Yoon, 2000. Marine geology of Korean seas. Elsevier, New York, 313 pp..
- David G. Lowe, 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 60(2): 91-110
- Geber, U. and J. Bjorklund, 2002. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems - a case study. *Ecological Engineering*. 19: 97-117
- Joo-Hyung Ryu, Chang-Hwan Kim, Yoon-Kyung Lee, Joong-Sun Won, Seung-Soo Chun, and Saro Lee, 2008. Detecting the intertidal morphologic change using satellite data. *Estuarine Coastal and Shelf science*. 78(2008): 623-632
- Jong-Kuk Choi, Joo-Hyung Ryu, Yoon-Kyung Lee, Hong-Rhyong Yoo, Han Jun Woo, and Chang Hwan Kim, 2010. Quantitative estimation of intertidal sediment characteristics using remote sensing and GIS. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 88: 125-134
- <sup>a</sup>Jong-Kuk Choi, Hyun-Joo Oh, Bon Joo Koo, Joo-Hyung Ryu, and Saro Lee, 2011. Crustacean habitat potential mapping in a tidal flat using remote sensing and GIS. *Ecological Modelling*. 222: 1522-1533
- <sup>b</sup>Jong-Kuk Choi, Hyun-Joo Oh, Bon Joo Koo, Saro Lee, and Joo-Hyung Ryu, 2011. Macrobenthos habitat mapping in a tidal flat using remotely sensed data and a GIS-based probabilistic model. *Marine Pollution Bulletin*. 62: 564-572
- Hee Hun Lee, Seung Soo Chun, Jin Ho Chang, and Sang-Joon Han, 1994. Landward Migration of Isolated Shelly Sand Ridge (Chenier) on the Macrotidal Flat of Gomso Bay, West Coast of Korea: Controls of Storms and Typhoon. *SEPM Journal of Sedimentary Research*. A64(4): 886-893
- Meiling Liu, Xiangnan Liu, Da Liu, Chao Ding, and Jiale Jiang, 2015. Multivariable integration method for estimating sea surface salinity in coastal waters from in situ data and remotely sensed data using random forest algorithm. *Computers and Geosciences*. 75: 44-56
- Nicholas J. Murray, Stuart R. Phinn, Robert S. Clemens, Chris M. Roelfsema, and Richard A. Fuller, 2012. Continental Scale Mapping of Tidal Flats across East Asia Using the Landsat Archive. *Remote Sensing*. 4(11): 3417-3426
- Nicholas J Murray, Robert S Clemens, Stuart R Phinn, Hugh P Possingham, and Richard A Fuller, 2014. Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 12(5): 267-272
- Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. John Wiley & Sons, New York, 370 pp.
- Odum, H.T., M.T. Brown, and S. Brandt-Williams, 2000. Folio #1: Introduction and Global Budget. *Handbook of Emergy Evaluation*. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, 16 pp.
- Qiu, J., 2011. China faces up to 'terrible' state of its ecosystems. *Nature*. 471(7336): 19
- Robert L. Folk and William C. Ward, 1957. Brazos River bar; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*. 27(1): 3-26
- Seung-Kuk Lee and Temilola E. Fatoyinbo, 2015. TanDEM-X Pol-InSAR Inversion for Mangrove Canopy Height Estimation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 8(7): 3608-3618
- Seung-Kuk Lee and Joo-Hyung Ryu, 2017. High-Accuracy Tidal Flat Digital Elevation Model

- Construction Using TanDEM-X Science Phase Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 10(6): 2713-2724
- Volker Walter, 2004. Object-based classification of remote sensing data for change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 58: 225-238
- Yoon-Kyung Lee, Joo-Hyung Ryu, Jong-Kuk Choi, Jae-Gwi Soh, Jin-Ah Eom, and Joong-Sun Won, 2011. A Study of Decadal Sedimentation Trend Changes by Waterline Comparisons within the Ganghwa Tidal Flats Initiated by Human Activities. *Journal of Coastal Research*. 27(5): 857-869
- Zhijun Ma, David S. Melville, Jianguo Liu, Ying Chen, Hongyan Yang, Wenwei Ren, Zhengwang Zhang, Theunis Piersma, Bo Li, 2014. Rethinking China's new great wall. *Science*. 346(6212): 912-914
- 강대석, 2013. 에머지 방법론을 이용한 영산강 하구생태계의 기여 가치 평가. *Journal of the Korean Society of Oceanography*. 18(1): 13-20
- 강대석, 2015. 한국 경제와 자연환경의 에머지 평가: 해양생태계서비스 가치평가 시사점. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*. 18(2): 102-115
- 국립지리원, 1981. 연안해역 기본조사 보고서(석포지구). 56 pp.
- 김나령, 류종성, 강대석, 2018. 갯벌생태계의 에머지 유입 특성과 생태계서비스의 관계 분석. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*. 21(2): 130-138
- 김도희, 양재삼, 2001. 곰소만에서의 오염물질 플럭스 및 탈질산화. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*. 4(4): 32-41
- 김범준, 이윤경, 최종국, 2015. 조간대 갯벌에서 무인항공기 활용 가능성에 관한 연구-수치표고모델을 중심으로. *대한원격탐사학회지*. 31(5): 461-471
- 남정호, 강대석, 2016. 에머지 방법론을 이용한 갯벌생태계의 가치 평가. *한국해양학회지, 바다*. 21(4): 134-143
- 오현택, 이석모, 이원찬, 정래홍, 홍석진, 김남국, C. Tilburg. 2008. 시스템 생태학적 접근법에 의한 가막만 패류생산의 지속성 평가 1. 가막만 패류양식의 에머지 평가. *Journal of the Environmental Sciences*. 17(8): 841-856
- 장진호, 최진용, 1998. 조간대 퇴적물의 계절적 집적양상과 보존: 한국 서해안의 곰소만. *한국해양학회, 바다*. 3(2): 149-157
- 정상욱, 조운식, 최윤석, 정희도, 송재희, 한형균, 2015. 한국 고창군 하전 갯벌의 미세조류 및 환경의 시공간적 변화. *Korean Journal of Environment and Ecology*. 29(5): 743-752

Original Article

## 가재붙이 (갑각강, 가재붙이과) 서식굴 내 영양염의 일간 변화

구본주<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 해양생태연구센터 책임연구원  
<sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 해양생물학과 부교수

### Diurnal Variations of Nutrients in Burrows of the Mud shrimp *Laomedea astacina* (Crustacea, Laomeidiidae)

Bon Joo Koo<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Principal Research Scientist, Marine Ecosystem Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Marine Biology, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

#### 요 약

본 연구의 목적은 큰 규모의 서식굴(가재붙이) 내부에서의 조석에 따른 산소 및 영양염 변동을 파악하고, 갯벌 퇴적물의 영양염 순환에 있어 큰 서식굴이 미치는 영향 정도를 파악하는 것이다. 이를 위해 서식굴을 파괴하지 않으면서 굴 내부의 환경을 측정할 수 있는 관찰구를 근소만 갯벌 현장퇴적물 속에 설치하고, 서식굴 내부의 산소 및 영양염의 일간 변동을 조사하였다. 가재붙이(*L. astacina*) 서식굴 내부의 영양염 농도는 노출시와 침수시 그리고 낮과 밤 동안에 뚜렷한 차이를 나타내며 일변화를 보였다. 특히 용존성무기질소의 경우에 그러한 경향이 뚜렷하였으며, 이는 굴 내부의 온도와 산소농도 조건에 따라 암모늄화, 질산화, 탈질산화 작용이 선택적으로 일어나고 있음을 지시하였다. 가재붙이 서식굴을 통한 영양염의 플럭스도 하루 중 밀물과 썰물 그리고 낮과 밤 간에 뚜렷한 일변화를 보였으며, 그 양은 갯벌 표층(자연상태의 대형저서동물 개체수 유지)을 통한 플럭스의 23~224% 범위에 있었다. 가재붙이와 같이 큰 굴을 가지며 활발하게 관개활동을 하는 생물의 서식굴이 갯벌 퇴적물과 해수 간의 영양염 순환에 보다 중요한 의미를 가질 수 있음을 시사하였다. 동일 조사지역에서 각기 다른 방법으로 측정된 영양염 플럭스 결과 비교에서 현장에서 직접 측정된 본 조사의 경우에 기존에 일반적으로 사용되고 있던 챔버를 이용한 퇴적물 배양법이나 미세전극을 이용한 플럭스 계산법에 비해 훨씬 높은 플럭스가 계산되었다. 기존의 방법을 통한 플럭스 계산에는 일정 이상의 규모를 가진 생물에 의한 플럭스 영향을 충분히 고려하지 못했기 때문인 것으로 판단되었다. 이로부터 가재붙이와 같이 큰 규모의 서식굴을 가지는 종이 갯벌 퇴적물의 영양염 순환에 미치는 영향이 지대함을 알 수 있었다. 따라서 조석 변동과 큰 규모의 서식굴을 반영하지 않은 갯벌의 영양염 플럭스 산출은 과소평가 될 수 있었다.

**Abstract** – This study aimed to investigate the variations of oxygen and nutrient in the burrows of *Laomedea astacina* with a huge burrow system and to understand its effect on the nutrient circulation in the tidal flat sediments. For this purpose, the observatory was installed in the sediments of Geunso tidal flat, and diurnal fluctuations of oxygen and nutrient in the burrow were directly measured. The nutrient concentrations in the burrow of *L. astacina* were significantly different between the exposure and submergence periods and between daytime and nighttime. This tendency was especially pronounced in the case of dissolved inorganic nitrogen, indicating that ammoniumation, nitrification, and denitrification selectively take place depending on the temperature and oxygen concentration in the burrow. The nutrient flux through the burrows of the *L. astacina* ia also showed clear diurnal variations between high and low tides and between daytime and nighttime, and the amount varied between 23 and 224% of the flux through the surface layer of the tidal flat (when the benthic population in natural conditions is maintained). These results suggest that the burrows of the organisms which have a large burrow and perform active irrigation activities, such as *L. astacina*, may play a very significant role in the nutrient circulation between intertidal sediments and seawater. As a result of comparing the results of this study with the measurements of the nutri-

\*Corresponding author: bjoo@kiost.ac.kr

ent flux by different methods in the same study area, values of nutrient flux calculated by direct field measurements in this study were much higher than those obtained by the generally used conventional methods, such as the sediment incubation method using a chamber or the flux calculation method using microelectrodes. This contrast is believed to show that the calculation of the nutrient flux by the conventional methods did not sufficiently take into account the influence of the organisms on the nutrient flux with a scale above a certain level. These results showed that species with a large-scale burrow such as *L. astacina* have a great effect on the nutrient circulation of the tidal flat sediments. Therefore, it is likely that the calculation of the nutrient flux of tidal flats which does not reflect tidal fluctuations and large-scale burrows will produce underestimated results.

**Keywords:** Burrow (서식굴), Nutrient (영양염), Oxygen (산소), Flux (플럭스), *Laomedea astacina* (가재붙이), Tidal flat (갯벌)

## 1. 서 론

연안 환경에서 영양염과 유기물은 수층과 퇴적층의 프로세스(일차생산과 분해)에 의해 생성되고 제거된다. 연안에서 일차생산에 의해 생성된 유기물은 외해로 유출되는 양도 있으나 일차적으로는 연안의 퇴적물로 유입되어 갯벌을 포함하는 연안역 생물의 신진대사에 이용된다. 퇴적물 내에서는 생물의 신진대사 산물로서 영양염이 재생산되어 수층의 일차생산을 지지한다. Cowan *et al.*[1996]은 연안의 수층에서 생산된 유기물 양의 50%가 저층의 퇴적물 내에서 분해되며, 이 과정에서 재생산된 영양염은 최대 94%까지 수층의 일차생산을 지지할 수 있다고 하였다. 생물교란 활동이 활발한 갯벌에서 퇴적물-물 경계면(sediment-water interface)을 통한 물질 교환은 연안 생태계 내 영양염 순환에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Cowan *et al.*[1996]; Koo and Koh[2013]; Kristensen and Kostka[2005]; Wahyudi *et al.*[2015]). 생물교란 활동을 통해 혐기성 환경으로 산소가 공급되어지고, 이는 호기성 유기물 분해뿐만 아니라 준호기성 및 혐기성 유기물 분해까지도 촉진하기 때문이다(Aller and Aller[1998]). 이러한 관계는 수심이 5 m 이하의 얇은 연안에서 특히 중요하다(Kemp *et al.*[1992]). 우리나라 서해안과 같이 얇은 수심을 가지며 넓은 갯벌이 잘 발달된 환경에서 수층과 퇴적물 경계면에서의 물질순환은 연안환경에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 결과적으로 생물교란은 퇴적물 내 유기물 분해를 배가하는 역할을 하며(Ziebis *et al.*[1996]), 특히, 큰 규모의 서식굴을 만드는 쪽 상과(Thalassinidae)의 무척추동물은 이러한 측면에서 중요할 수 있다.

대상종인 가재붙이(*Laomedea astacina*)는 절지동물문의 갑각강(Class Crustacea) 십각목(Order Decapoda) 가재붙이과(Family Laomedidae)에 해당하는 펄새우(mud shrimp)류의 일종으로 다자란 성체의 몸길이는 10 cm에 약간 못 미치는 정도이다. 아직 이종의 생태학적 특징에 대해서는 알려진 바가 거의 없으나 서식굴의 크기는 깊이 기준으로 2 m에 달하기도 한다(Koo[2017]). 이 종은 서해안과 남해안의 해안 중 상부 갯벌의 염습지가 보존되어 있는 곳에 주로 서식하며, 강화 동검리 염습지, 강화 창후리 염습지, 월곶 염습지, 대부 남사리 염습지, 태안 근소만 염습지, 새만금 동진강 염습지, 남해도 북서쪽에 위치한 설천면 해안 염습지, 그리고 창선도 동대만 염습지 등에 분포한다.

대형저서동물에 의한 생물교란이 갯벌 퇴적물과 수층의 경계면에서 물질순환에 영향을 미칠 수 있는 구간은 생물활동에 의해 깊은 퇴적물 속으로 산소 및 신선한 유기물이 공급되어질 수 있기 때문이다. 특히 산소는 퇴적물-물 경계면에서의 물질순환에 있어 가장 중요한 요소이다(Rabouille *et al.* 2003). 따라서 갯벌 퇴적물 내 산소농도의 분포를 파악하는 것은 물질순환의 과정을 이해하기 위한 가장 기본적인 항목이다. 갯벌 퇴적물 내 산소농도의 분포와 산소에 의존적인 분포를 보이는 미생물 군집 및 지화학 요소의 분포는 미세전극(electrode)과 광학센서(optic sensor) 등의 미세 측정기구의 개발과 함께 많은 연구가 진행되었다. 그러나 갯벌 저서동물이 만든 서식굴 내부에서의 조석주기에 따른 산소농도와 영양염 거동과 관련하여 현장에서 직접 측정된 자료는 아직까지 보고된 바 없다. 이는 퇴적물을 교란하지 않으면서 생물활동을 고려한 채 측정하기가 어렵기 때문이다.

본 연구의 목적은 큰 규모의 서식굴(가재붙이) 내부에서의 조석에 따른 산소 및 영양염 변동을 파악하는 것이다. 이를 위해 서식굴을 파괴하지 않으면서 굴 내부의 환경을 측정할 수 있는 관찰구를 현장 퇴적물 속에 설치하고, 이를 통해 서식굴 내부의 산소 및 영양염의 변동을 현장에서 직접 측정하였다. 한편, 기존의 영양염 플럭스 산출에 이용되었던 챔버 내 퇴적물 배양에 의한 방법과 미세전극을 이용한 영양염 플럭스 계산법의 결과를 현장에서 직접 측정 한 본 조사 결과와 비교를 통해 갯벌 퇴적물을 통한 영양염의 플럭스에 가재붙이(*L. astacina*)가 만드는 것과 같은 큰 규모의 서식굴이 생태학적으로 어떤 의미를 가지는지에 대해 고찰한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구지역

본 연구는 충청남도 태안반도에 위치한 근소만 갯벌에서 수행되었다(Fig. 1). 근소만은 조석의 영향을 받는 반폐쇄성 만으로 총면적은 30 km<sup>2</sup>이며(Kim and Kim[2008]), 이중 갯벌의 면적은 23.8 km<sup>2</sup>에 이른다. 조사지역으로 유입되는 하천이 없어 만 외부와 내부의 해수교환은 약 2 km 폭의 만 입구를 통해서만 이루어진다. 만 입구에서 계절별로 측정된 수온의 평균은 6.07~21.4°C이고, 평균 염분은 31.7~32.3 psu이다(Kim and Kim[2008]). 조사지역은 평균해수면 기준 약 125 cm 조고에 위치하며, 일년 중 약 68% 빈



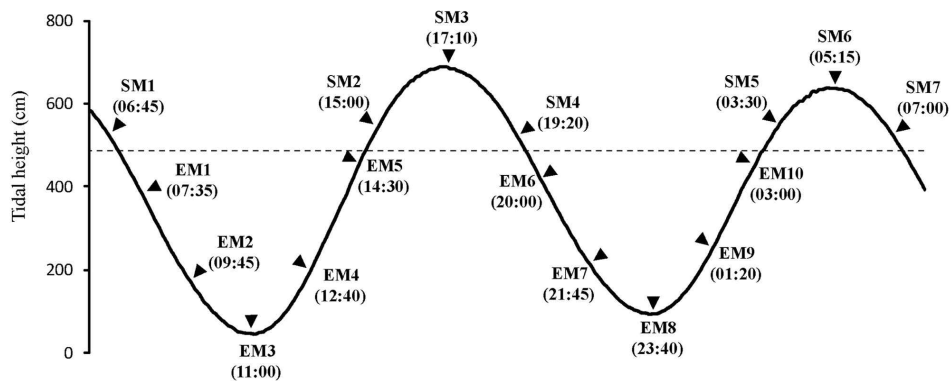


기(Fibox-3 oxygen meter, Presens Co Ltd)와 자료 백업장치를 두었다.

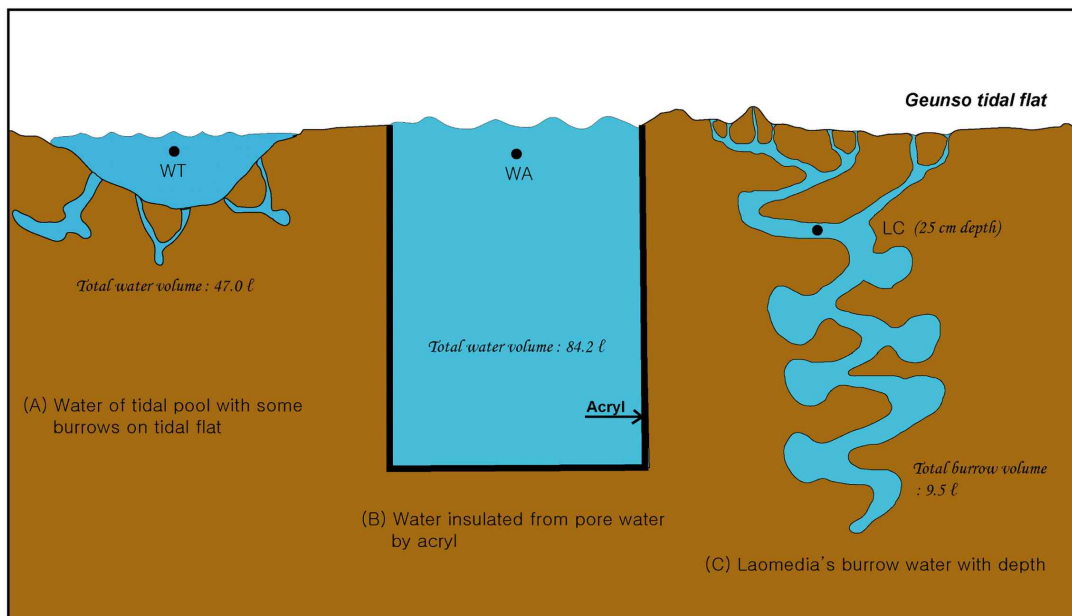
### 2.3 영양염 측정

가재붙이 서식굴 내에서 조수 움직임에 따른 산소농도와 영양염 농도의 변동을 조사하였다. 현장 관찰구의 벽면 실리콘 안쪽에 서식굴이 형성되어 있는 곳(퇴적물 표층으로부터 25 cm 깊이)의 굴 내 해수를 대상으로 조석에 따른 영양염 변동을 측정하였다. 굴 내 해수는 실리콘을 통해 주사바늘을 주입하여 한번에 10 ml씩 채수하였으며 매회 두 번 반복 채수하였다. 채수 시에는 굴 내부가 교

란되지 않게 아주 천천히 채수하였다. 관찰구 내에는 대기에 노출 시에도 해수가 채워져 있다. 그래서 굴 내 해수 시료는 항상 SCUBA 장비를 착용 한 상태로 채수하였다. 조사지역이 노출되기 직전에 첫 번째 시료를 채취하였으며, 이후 노출 및 침수가 두 번씩 반복 되는 동안 일정 간격으로 총 17회 약 24 시간 동안 시료를 채취하였다(Fig. 3; Fig. 4C). 실험이 진행되기 하루 전에 해수 시료를 채취할 곳을 선정하였으며, 동시에 산소 광학센서와 온도센서를 설치하여 현장 실험이 끝날 때까지 산소농도와 수온을 함께 연속 측정하였다. 실험이 끝나고 난 후에는 관찰 구내 해수를 모두 제거한 후 서식굴 내 해수 채취 깊이까지의 부피를 측정하였다. 부피는 해



**Fig. 3.** Water sampling occasions for nutrients with tides. Water samples were taken from *Laomedea* burrow, a tidal pool with the natural density of macrofauna, and a pool insulated from the sediments by acrylic (see Fig. 4). A dotted line represents tidal height of study site. SM and EM represent periods of submergence and emergence, respectively.



**Fig. 4.** Water sampling design for nutrients in three different sites. seventeen times of the sampling was done with tide. Tidal height here is 125 cm from mean sea level.

당 깊이의 실리콘을 통해 얇은 실리콘 판을 집어 넣어 굴 내부로부터 빠져 나온 해수 양으로 계산하였다. 그리고 관찰구 가장 아래 쪽에 구멍을 뚫어 동일한 방법으로 전체 서식굴의 부피를 측정하였으며, 그 부피는  $9.5 l$ 였다. 실험 시작 직전에 계수한 가재붙이의 평균 서식밀도는  $6.0 \pm 1.2$  개체( $N=10$ )이었다.

서식굴 내 영양염 변동과의 비교를 위해 관찰구와 동일한 조고에 위치한 또 다른 두 곳(WA, WT; Fig. 4)에서도 동일한 시기에 해수를 채수하였다. 두 비교 실험구는 큰 서식굴에 의한 영양염 플럭스 영향을 관찰구(LC)와 비교하기 위해 설정되었다. WT는 큰 규모의 서식굴이 없는 자연상태의 갯벌퇴적물을, 그리고 WA는 절연체(실리콘)로 차단되어 퇴적물과 접촉이 되지 않는 환경으로 설정하였다. 갯벌 상에 약  $110 \text{ cm}$  직경 크기의 면적으로 흙을 파낸 곳에 고여 있는 해수(WT; Fig. 4A)와 실리콘으로 주변 퇴적물 및 공극수로부터 완전 차단된 해수(WA; Fig. 4B)에서도 주사기를 이용하여 동일한 양의 해수를 채수하였다. 흙을 파내어 웅덩이를 만든 곳은 실험 시작 한 달 전에 미리 위치를 설정하고 흙을 파내었으며, 이때는 가재붙이가 서식하지 않는 곳을 선택하였다. 이 웅덩이 내에서 굴을 형성한 종은 칠게(*Macrophthalmus japonicus*)와 흰이빨참갯지렁이(*Periserrula leucophryna*)였으며, 각각 11 개체와 1 개체의 서식굴이 웅덩이 내에서 확인되었다. 이때 웅덩이의 표층 면적은 약  $0.8 \text{ m}^2$ 이었으며, 최대수심은 약  $10 \text{ cm}$ 이었다. 이곳에서도 실험 종료 후 부피를 측정하였다. 웅덩이와 웅덩이 아래로 형성된 칠게(*M. japonicus*)와 흰이빨참갯지렁이(*P. leucophryna*) 서식굴로 경화제를 첨가한 액상 폴리에스테르 레진을 갯벌 표층과 수평이 될 때까지 부었다. 4일 후 굳어진 레진을 파내고 그 부피와 표면적을 계산하였다. 웅덩이와 서식굴에 의한 부피는 총  $47 \text{ cm}^3$ 였으며, 서식굴 만의 표면적과 전체 표면적은 각각  $5,726 \text{ cm}^2$ ,  $15,803 \text{ cm}^2$ 였다. 또 다른 해수채취 위치는 주변 퇴적물과 공극수로부터 아크릴에 의해 차단된 두 개의 관찰구 중 나머지 하나에 고여진 물을 대상으로 하였다(WA; Fig. 4B). 실험 시작 전날 뚜껑을 열어 관찰구 내에 고여 있던 물과 흙을 완전히 제거하였으며, 다음 밀물 시 새로운 물이 들어올 수 있도록 뚜껑을 열어 두었다. 실험지역에는 CTD (SBE-19)를 설치하여 실험 기간 중 밀물 시 수심, 수온, 염분을 측정하였다. 그리고 썰물 시에는 YSI-85 계측기를 이용하여 WA와 WT 위치에서 용존산소, 수온, 염분을 매회 각각 측정하였다.

채집한 해수는 현장에서 질소가스로 충전된 혐기성 박스 안에서 시린지 필터(MFS-25, CA,  $0.2 \mu\text{m}$ )로 부유물을 제거한 다음  $6 \text{ ml}$ 의 시료에 수은용액( $\text{HgCl}_2$ )  $125 \text{ mM}$ 을  $60 \mu\text{l}$  가하여 냉동 보관하였다. 영양염 분석은 자동분석기(Proxima, Alliance Instruments)를 이용하였으며(Parson *et al.*[1984]), 각각의 측정값은 표준해수시료(CSK standard solution, Wako Pure Chemical Industries)로 정확도를 검증하였다.

#### 2.4 영양염 플럭스(nutrient flux) 계산

갯벌상에 설정한 웅덩이(WT)와 가재붙이 서식굴(LC)에서 영양염의 시간에 따른 농도 변화량을 이용하여 아래의 식에 의해 갯벌

퇴적물 혹은 가재붙이 서식굴과 수층간의 암모늄, 질산염, 용존성 무기질소(DIN), 인산염, 규산염의 플럭스를 계산하였다.

$$F = [(C_E - C_S)V/TA]$$

F: 영양염 플럭스

$C_S$ 와  $C_E$ : 분석에 이용된 시간동안 처음과 마지막의 영양염 농도  
V: 가재붙이 서식굴 내 해수부피 혹은 갯벌 상 웅덩이에 고인 해수부피

T: 시간, A: 갯벌 면적

조사지역은 갯벌 상에 위치하며 조석의 영향을 받기 때문에 영양염 농도는 조석에 따라 크게 변화된다. 그래서 조사지역이 대기에 노출된 시간동안(EM)과 해수에 덮힌 시간(SM)을 구분하여 영양염 플럭스를 각각 계산하였다. 그리고 낮과 밤의 노출과 해수침범 시간을 각각 구분하여 계산하였다. 조사지역이 대기에 노출되면 서부터 WT와 LC의 해수 중 영양염 농도는 해수가 다시 유입되기 직전까지 선형적으로 증가 혹은 감소하였으며, 해수가 유입되면서 농도는 희석되었다. 따라서 대기에 노출된 시기 동안 LC와 WT의 해수 중에 농축된 영양염이 해수유입에 의해 희석된 정도( $C_E - C_S$ )를 퇴적물 혹은 서식굴 내부에서 수층으로 유출된 양으로 계산하였다. 그리고 해수가 유입된 상태에서도 영양염의 농도는 변화를 보였으며, 이때는 해수가 유입되고부터 최고조위에 이를 때까지의 농도 변화(SM-a)와 최고조위에서 조사지역이 노출되기 직전까지의 농도 변화(SM-d)를 구분하여 영양염 플럭스를 계산하였다. ‘+’ 값은 퇴적물 혹은 서식굴에서 수층으로 유출된 양으로 그리고 ‘-’ 값은 해수로부터 유입된 양으로 표현하였다. 그리고 노출되었을 시 시료채취(회당  $20 \text{ ml}$ )에 의한 해수부피의 변화는 전체 부피(각각  $47 l$ 와  $9.5 l$ )에 비해 미약하여 영양염 플럭스 계산에는 고려하지 않았다.

### 3. 결 과

#### 3.1 영양염 변동

영양염의 변동을 각 측정 지역별로 낮과 밤, 노출과 침수 기간으로 구분하여 비교하였다. 아크릴에 의해 퇴적물 및 공극수로부터 차단된 해수(WA)에서 측정된 영양염의 농도는 시간에 따른 큰 변화를 보이지 않았다(Fig. 5). 다만, 암모늄의 농도는 낮 동안의 간조시에는  $4\text{-}5 \mu\text{mol/l}$ 로 상대적으로 높은 값을 보였으나, 밤에는 노출시기에도 약  $2 \mu\text{mol/l}$  농도로 일정하게 유지되었다. 아질산염의 농도도 암모늄과 유사한 분포 경향을 보였으나, 질산염은 뚜렷한 패턴없이 일정한 농도를 유지하였다. 인산염과 규산염의 농도는 조사 기간 동안 큰 변화를 보이지 않았다. 노출시기 동안 밤과 낮의 용존산소 함유량은 상반된 분포를 보였다. 낮에는 시간에 따라 약간 증가하는 경향을 보였으나, 밤에는 뚜렷이 감소하는 경향을 보였다. 낮 동안 노출시 수온은  $21\text{-}23 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 밤에 비해 약  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  가량 높았다.

갯벌 상에 흙을 파 웅덩이를 만든 곳(WT)에서의 영양염 변동은 낮과 밤 그리고 노출 시와 침수 시에 뚜렷하게 대비되는 양상을 보였다(Fig. 6). 특히, 암모늄은 낮과 밤 동안의 노출 시에 크게 증가되

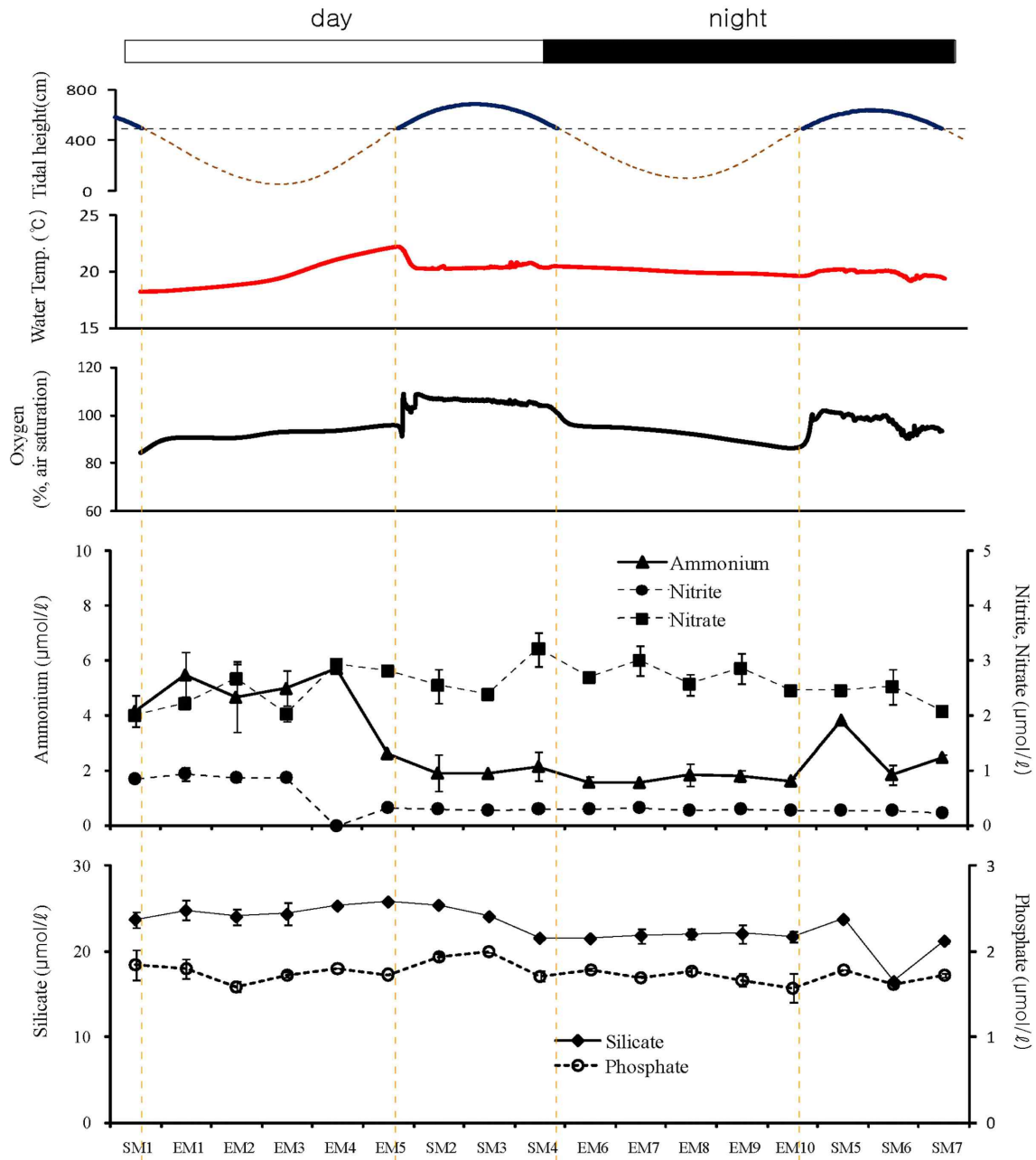
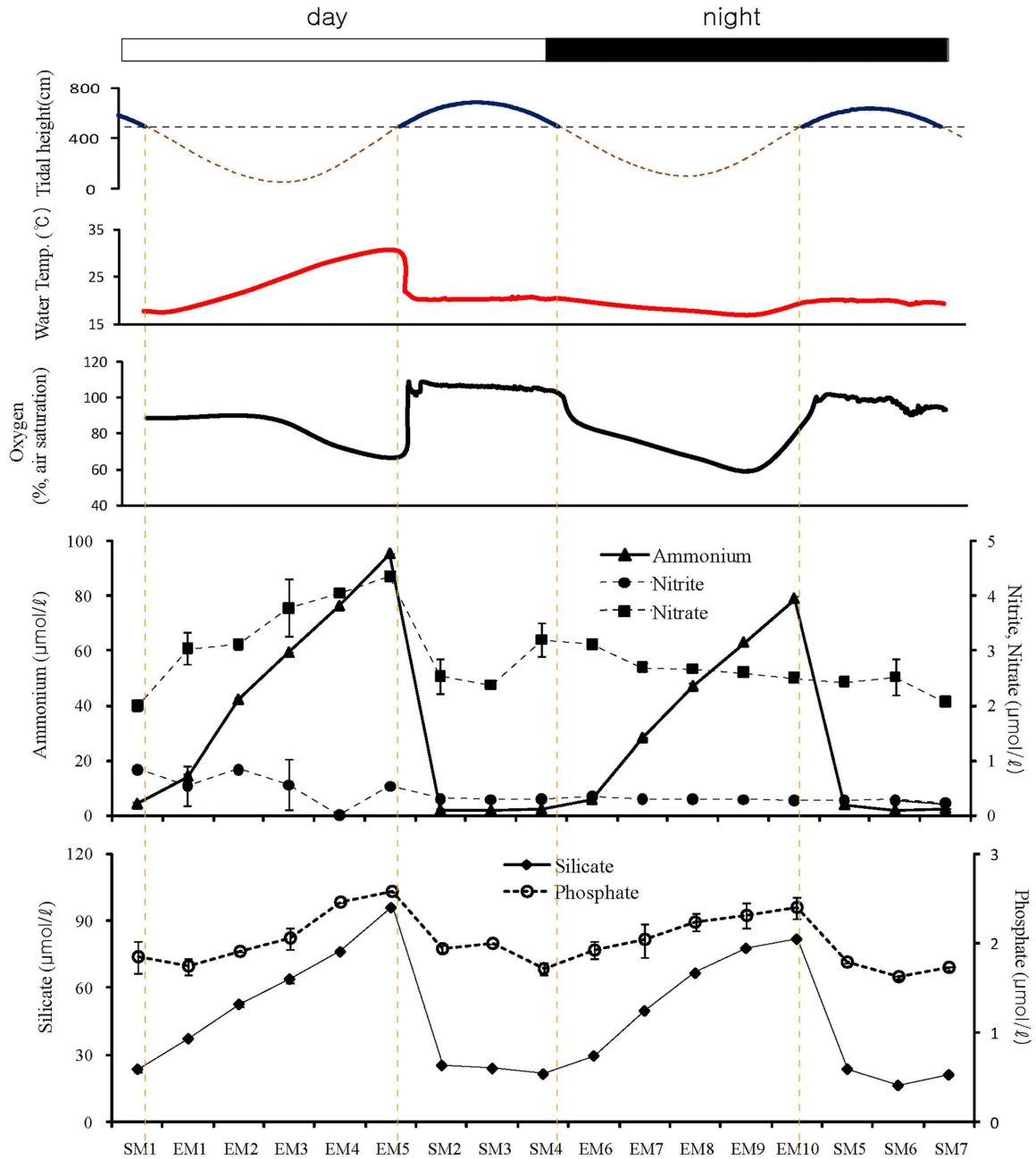


Fig. 5. Diurnal variations of nutrients and environments with tide at WA site (a water reservoir insulated from sediments by acrylic). SM and EM represent periods of submergence and emergence, respectively.

었다. 낮에는 노출 전 해수에 잠겨져 있을 때와 비교하여 암모늄 농도는 최대  $91 \mu\text{mol/l}$ 가 증가하였으며, 밤에는 최대  $77 \mu\text{mol/l}$  증가되었다. 낮과 밤 동안의 노출시 암모늄의 증가량에는 차이가 있었다. 이 곳은 갯벌 상에 웅덩이(부피  $47 \text{l}$ )를 만들어 놓은 곳이기 때문에 해수 침범 시에는 노출시에 생성된 영양염이 해수에 희석된

다. 그래서 이러한 큰 농도의 변화가 나타난다. 그러나 질산염의 경우는 낮에는 암모늄 농도 증가와 함께 노출시에 꾸준히 증가하였으나, 밤 동안의 노출시에는 오히려 감소하였다. 아질산염의 농도는 조사기간 동안 큰 변화를 보이지 않았다. 인산염과 규산염의 농도도 노출 시에 크게 증가하였으나, 낮에 비해 밤 동안에는 그 증

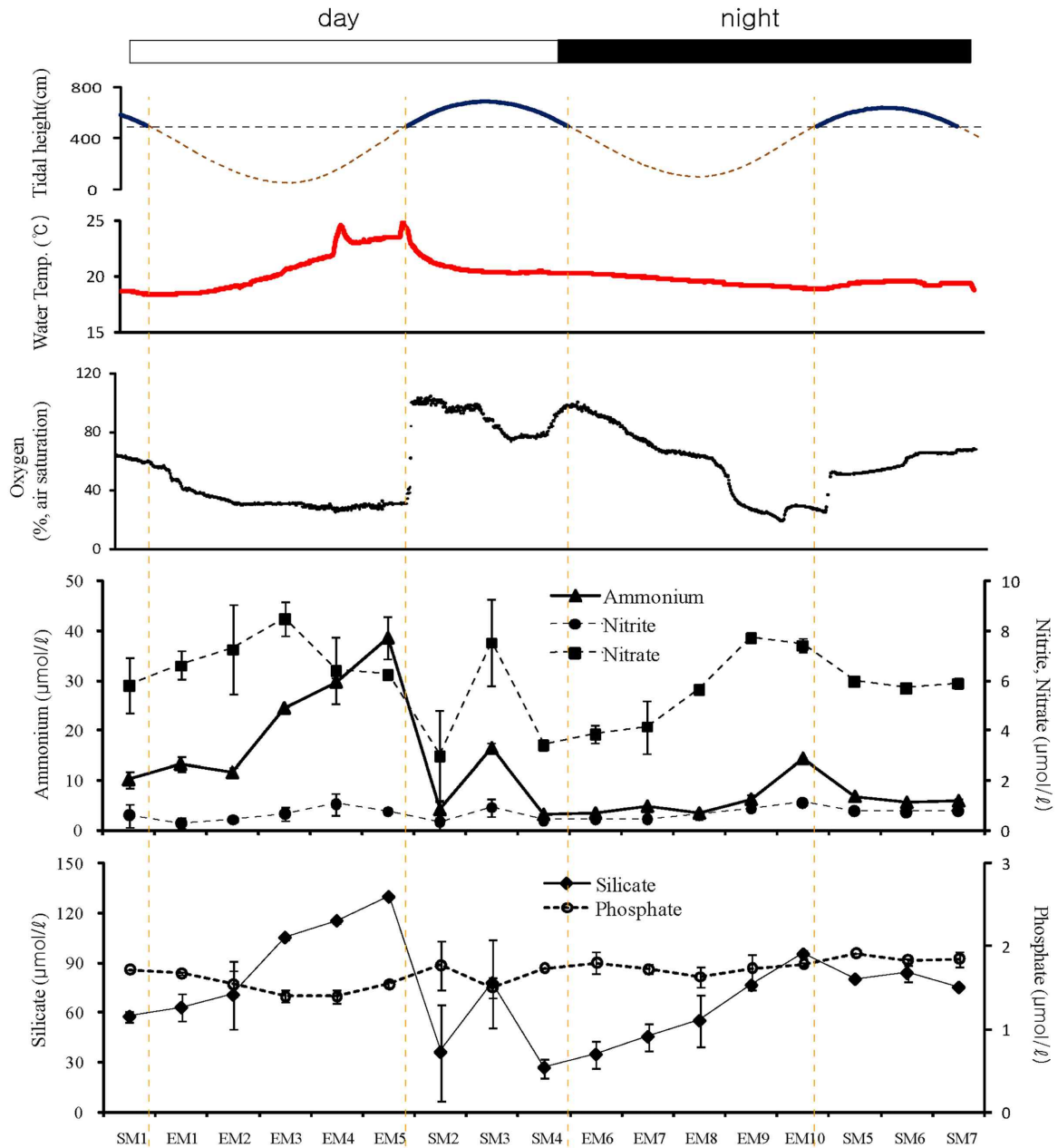


**Fig. 6.** Diurnal variations of nutrients and environments with tide at WT site (a pool scooped out on tidal flat). SM and EM represent periods of submergence and emergence, respectively.

가폭이 축소되었다. 수온은 낮 동안의 노출시에는 노출 직전과 비교해 최대 12 °C 증가하였으며 밤 동안에는 오히려 노출 시에 3 °C 정도 감소되었다. 용존산소 농도는 낮과 밤 동안의 노출 시에 밀물 시에 비해 약 30%까지 감소하였다.

가재붙이(*L. astacina*)의 서식굴 내 25 cm 깊이(LC)에서 측정된

영양염의 변동 양상은 두 지역에서 보인 양상과는 또 다른 것이었다. 암모늄의 농도는 낮 동안의 간조시에는 WT에서와 마찬가지로 크게 증가하였으나 밤 동안의 노출시에는 그러한 증가 양상을 보이지 않았다(Fig. 7). 또한 질산염의 변동 패턴에서도 WT와는 차이를 보였다. 낮 동안의 간조시 서식굴 내 질산염 농도는 EM3 까



**Fig. 7.** Diurnal variations of nutrients and environments with tide at LC site (in *Laomedea* burrow of 25 cm depth). SM and EM represent periods of submergence and emergence, respectively.

지는 증가하였으나 이후 다시 감소하는 경향을 보였으며, 질산염의 감소와 함께 아질산염의 농도는 증가하는 경향을 보였다. 이는 굴 내 산소 농도와 연관되어 있는 것으로 판단되었다. 산소농도 약 40%를 기준으로 그러한 농도 증가와 감소 현상이 있었다. 낮 동안의 침수시기에도 암모늄과 질산염의 농도는 증가한 후 감소하는 경향을 보였다. 밤 동안의 노출시에는 암모늄 농도의 큰 증가 없이 질

산염의 농도는 증가하는 경향을 보였다. 인산염과 규산염의 변동도 WT에서와는 다른 패턴을 보였다. 특히, 인산염의 경우에는 낮 동안의 노출시에 오히려 농도가 감소되었으며, 밤에는 큰 변화를 보이지 않았다. 규산염의 경우에는 두 번의 노출시에 모두 굴 내에서 증가하였다. 서식굴 내 수온은 노출시 낮 동안에는 18.5°C에서 해수 침범 직전에는 24.5°C로 약 6°C 증가하였으며, 밤 동안의 노출

시에는 20.3 °C~18.9 °C로 변화 폭이 작았다. 그리고 낮 동안의 해수 침범시에는 산소농도가 100%까지 증가되었으나 밤에는 60% 정도까지 증가되었다.

3.2 영양염 플럭스

영양염의 농도 변화는 노출과 침수, 그리고 주간과 야간에 따라 상이한 분포를 보였으며, 해수 유입시와 유출시에도 다른 경향을 보였다. 따라서 영양염 플럭스는 주간과 야간의 노출시와 침수시, 그리고 침수기간 동안의 해수 유입 시기와 해수 유출 시기를 구분하여 계산하였다. 이때는 각 시기별 영양염 농도 변화, 부피, 시간을 고려하여 계산하였다. 갯벌 상에 설정한 웅덩이(WT)에서의 플럭스 양과 가재붙이 서식굴(LC)에서의 영양염 플럭스 양을 비교하였다(Table 1). 암모늄, 질산염, 용존무기질소, 인산염, 규산염은 모두 갯벌 퇴적물(WT)에서 생성되어 유출되는 플럭스를 보였다. 특히, 암모늄과 규산염의 유출 플럭스가 상대적으로 컸다. 암모늄, 질산염, 아질산염을 합친 용존무기질소의 플럭스는 9.986 mmolm<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>였으며, 이중 암모늄이 9.845 mmolm<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>로 가장 많은 부분을 차지하였다. 질산염의 경우에는 0.058 mmolm<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>로 암모늄에 비해 낮은 값을 보였다. 규산염도 7.453 mmolm<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>로 많은 양이 해수로 유출되었다. 조사지역 갯벌에서의 인산염 플럭스는 상대적으로 낮았다.

갯벌 퇴적물(WT)에서의 영양염 플럭스는 낮과 밤 동안에 차이를 보였다. 인산염을 제외하고는 모두 낮 동안의 플럭스가 밤에 비해 높았다. 그리고 해수에 침범되었을 때는 노출되었을 때와 비교하여 낮은 플럭스를 보였다. 침수기간 동안 중 해수가 유입되는 시기와 해수가 빠지는 동안의 플럭스는 방향이 반대인 경우가 많았다. 무기질소 요소들은 해수가 빠지는 시기에는 해수로 유출되는 양이 많았으나, 해수가 유입되는 동안에는 반대로 퇴적물로 유입되는 양이 있었다. 인산염의 경우에는 해수가 들고 남에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 규산염의 경우에는 노출시에 퇴적물로부터 많은 양이 생성되어 해수로 유출되었으나, 물에 잠긴 동안에는 퇴적물로 유입

되는 양이 많았다.

가재붙이(*L. astacina*) 서식굴(LC)에서의 암모늄, 용존무기질소, 규산염은 낮 동안에 대부분이 해수로 유출되었으며, 밤에는 플럭스 양이 WT와 비교해 상당히 적었다. 가재붙이(*L. astacina*) 한 개 서식굴로부터 유출되는 암모늄과 용존무기질소는 갯벌 퇴적물의 약 1/4 정도였다. 그러나 질산염의 경우에는 가재붙이 서식굴을 통한 플럭스가 갯벌 상에서의 그것 보다 더 많았다. 가재붙이 서식굴을 통한 규산염의 플럭스는 갯벌 상에서 보여지는 플럭스의 약 70%를 차지하는 많은 양이었다. 인산염은 가재붙이 서식굴 내에서 퇴적물로 유입되는 플럭스를 보였다. 가재붙이 서식굴 내 영양염 플럭스는 갯벌 퇴적물에서의 경향과 달리 노출 기간 보다는 침수 기간 중에 더 높았다. 특히 이런 경향은 낮 동안에 더 뚜렷하였다(Table 1).

4. 고 찰

4.1 영양염의 일변화

아크릴에 의해 퇴적물과 접촉되지 않았던 해수(WA)에서는 하루 중 영양염 농도의 변화가 거의 없었다(Fig. 5). 단지, 낮 동안의 노출 시기에는 다른 때와 비교해 암모늄의 농도가 약간 높았다. 낮 동안의 증가된 수온의 영향으로 미생물에 의한 유기물 분해가 증가되면서 암모늄의 농도도 증가된 것으로 판단된다. 그러나 갯벌 상의 해수가 고인 웅덩이(WT)와 가재붙이(*L. astacina*) 서식굴(LC) 내에서는 노출시와 침수시 그리고 낮과 밤 사이에는 뚜렷한 영양염 농도의 차이가 있었다. 특히, 암모늄은 노출시와 침수시 간에 큰 농도 차이를 보였으며, 노출시기 동안의 비교에서는 밤에 비해 낮 동안에 농도가 더 증가되었다. 노출과 침수 동안의 차이는 해수에 의한 희석과 가재붙이 서식굴을 통한 관개활동 때문이었다. 퇴적물 내에서 암모늄은 유기물 분해와 생물 배설에 의해 공급수에 축적되고 확산에 의해 해수로 용출된다. 퇴적물 내에서는 산소량과 온도에 따라 암모늄화(ammonification), 질산화(nitrification), 탈질산

Table 1. Daily nutrient fluxes from a *Laomedea* burrow (LC) and the tidal sediment (WT) in Geunso tidal flat. Negative values indicate influx and positive values mean efflux. \*: tidal period of water level ascended, \*\*: tidal period of water level descended. \*\*\*: Average density (6 ind.m<sup>-2</sup>) of *Laomedea astacina* in the study site was applied

		Diurnal				Nocturnal				Total
		EM	SM-a*	SM-d**	Subtotal	EM	SM-a*	SM-d**	Subtotal	
		(mmol m <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup> )				(mmol m <sup>-2</sup> 12hr <sup>-1</sup> )				(mmol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
Tidal flat (WT)	Ammonium	0.709	0.000	0.008	5.509	0.576	-0.066	0.021	4.338	9.845
	Nitrate	0.014	-0.005	0.023	0.148	0.001	0.003	-0.015	-0.019	0.129
	DIN	0.725	-0.005	0.030	5.669	0.576	-0.064	0.004	4.316	9.986
	Phosphate	0.005	0.001	-0.008	0.025	0.005	-0.005	0.004	0.033	0.058
	Silicate	0.536	-0.036	-0.068	3.926	0.446	-0.101	0.160	3.526	7.453
<i>Laomedea</i> burrow*** (LC)	Ammonium	0.252	0.324	-0.348	1.908	0.054	-0.042	0.012	0.378	2.286
	Nitrate	0.024	0.120	-0.110	0.212	0.012	-0.012	0.001	0.076	0.288
	DIN	0.282	0.456	-0.468	2.142	0.072	-0.048	0.018	0.480	2.622
	Phosphate	-0.002	-0.006	0.006	-0.018	-0.001	-0.003	0.001	-0.006	-0.024
	Silicate	0.684	1.092	-1.338	4.788	0.108	0.114	-0.282	0.576	5.364

화(denitrification) 중 어느 작용이 활발하게 일어나는지가 결정되며, 온도가 높고 용존산소 농도가 낮을 때 암모늄의 생성이 활발하게 일어난다(Cowan [1996]). 밤 동안의 암모늄 농도 증가 폭의 감소는 하강한 온도의 영향으로 미생물의 활동성이 감소되어 나타난 것으로 해석된다.

그러나 WT와 LC 간에는 암모늄 및 질산염 농도의 시간에 따른 차이가 있었다. WT의 경우에는 낮 동안의 노출시기 동안에 암모늄의 증가와 함께 질산염의 농도도 증가하는 경향을 보였으며, 밤에는 암모늄의 농도는 증가함에 비해 질산염 농도는 감소하는 경향이 있었다. 낮 동안에는 고여진 해수에서 일차생산자에 의해 산소가 공급되었고(Fig. 6) 이에 따라 질산화 작용이 활발하게 일어났으나, 밤에는 해수 중의 산소가 빠르게 소비되면서 질산화가 덜 일어나 질산염 농도의 밤과 낮의 차이가 발생한 것으로 여겨진다. 한편, LC에서는 보다 복잡한 프로세스가 있었다. 낮 동안의 노출기간 중 산소 농도가 40% 이상으로 유지되었던 때는 질산화에 의해 질산염의 농도가 증가하였으나 굴 내 산소가 감소되면서 질산염 농도의 감소와 아질산염 농도의 증가가 있었다. 퇴적물 내에서 탈질산화 작용은 주로 혐기성 상태에서 일어나며(Canfield *et al.* [2005]), 때에 따라서는 준호기성(suboxic) 상태에서도 일어난다고 보고되었다(Omnes [1996]). 탈질산화 과정 중에는 질산염의 감소와 함께 아질산염의 증가가 나타난다. 가재붙이 서식굴 내 산소농도가 30% 이하로 감소하면서 탈질산화 작용이 일어난 것으로 판단된다. 밤 동안의 노출시에는 LC에서 또 다른 영양염 거동이 있었다. 낮아진 수온의 영향으로 암모늄의 농도 증가 폭은 줄어들었으나 질산염의 농도는 계속하여 증가하였다. 이는 굴 내 산소 농도와 연관된 것으로 추정된다. 낮 동안에 비해 밤에는 굴 내 산소 농도가 노출시에도 오랫동안 높게 유지되었으며, 이에 따라 질산화가 활발히 일어나 질산염이 증가한 것으로 해석된다.

규산염의 농도변화는 WT와 LC에서 유사한 변동 패턴을 보였다. 갯벌 퇴적물로 유입되는 생물기원 규소(biogenic silica)의 공급원은 부유성 규조류와 저서성 규조류이며, 퇴적된 생물기원 규소는 다른 영양염과는 달리 생물에 의해 분해되지 않고 화학적으로 용해된다(Kim and Kim [2008]). 규산염의 시간에 따른 농도 분포는 암모늄과 유사하게 노출시에 증가하며 침수시에 감소하는 경향이 있었다. 노출시에 퇴적물에서 용해된 규산염이 계속 농축되었다가 해수가 유입되면서 희석되어 나타난 결과였다. 그러나 인산염의 경우에는 WT와 LC에서 시간에 따라 다른 거동 양상을 보였다. WT에서는 노출시에 지속적인 농도의 증가가 낮과 밤에 나타났으나, LC에서는 완만한 감소 이후 다시 증가하는 경향을 보였다. 인산염은 퇴적물 내에서 유기물이 분해되어 인산염이 생성되는 정도와 퇴적물 내에서 철산화물에 흡착하여 제거되는 정도에 따라 농도가 결정된다(Froelich [1988]). 후자의 과정은 산소 농도가 낮은 환원환경에서 일어난다(Canfield *et al.* [2005]). 즉, 대기에 노출된 초기에는 산소농도가 높으며 밀물시 유입된 해수에 의해 희석되어 농도가 감소한 후, 점차 산소의 고갈과 함께 철산화물로부터 해리되어 농도가 증가되는 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 밤에도 유사

하게 나타났으며 농도의 증가 폭은 낮에 비해 낮았다. 가재붙이 서식굴 내 영양염의 농도는 퇴적물 내에서 일어나는 생지화학적 프로세스에 의해 영향을 받았으며 서식굴 내 수온과 용존산소 환경에 따른 일변화를 보였다.

#### 4.2 생물교란이 영양염 플럭스에 미치는 영향

칠게(*Macrophthalmus japonicus*)와 흰이빨참갯지렁이(*Periserrula leucophryna*)의 서식굴을 포함하는 갯벌 퇴적물(WT)과 가재붙이 서식굴(LC)에서의 영양염의 플럭스는 낮과 밤 그리고 노출시와 침수시에 각각 차이가 있었다. 두 지역에서는 전반적으로 밤에 비해 낮 동안에 퇴적물로부터의 영양염 유출이 컸다. 특히, 암모늄을 포함하는 용존무기질소의 플럭스가 그러했다. 일반적으로 연안 환경에서 용존무기질소는 해수 중에서 퇴적물로 유입된다고 보고되었다(Ogilvie *et al.* [1997]; Magalhães *et al.* [2002]; Thornton *et al.* [2007]). 그러나 연구지역에서는 이와는 다르게 용존무기질소가 퇴적물에서 해수 중으로 유출되었다. 퇴적물로부터의 용존무기질소의 유출은 생물활동에 의한 퇴적물 교란과 관계활동 때문인 것으로 판단된다(Marinelli [1992]; Rysgaard *et al.* [1995]). 그리고 낮 동안의 플럭스가 밤에 비해 높은 것은 생물의 활동이 밤에는 감소하기 때문인 것으로 해석된다. 실제로 조사지역의 칠게(*M. japonicus*)를 포함하는 저서동물은 밤에는 활동을 하지 않았다(Yasuhisa [1984]; personal observation). 또한 밤 동안의 낮아진 수온의 영향으로 미생물 활동성이 낮에 비해 감소하였기 때문에 유기물 분해가 감소된 것으로 여겨진다. 규산염의 경우에도 암모늄과 유사한 플럭스 경향을 보였다. 퇴적물 내에서의 규산염 플럭스도 생물교란의 영향으로 촉진된다고 알려져 있다(Feuillet-Girard *et al.* [1997]). 낮 동안의 노출시에는 표층 퇴적물에서 흡착되는 규산염 보다 활발한 칠게(*M. japonicus*)의 퇴적물 교란에 의해 용해되는 양이 많아 해수 중으로 농도가 축적되는 것으로 판단된다. 그리고 낮과 밤의 차이와 침수시와 노출시의 차이도 용존질소나 암모늄과 같이 칠게(*M. japonicus*)의 행동 특성 때문에 영양염의 플럭스에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 갯벌 퇴적물은 일반적으로 인산염의 공급원으로 작용하는 것으로 알려져 있으나(Cowan *et al.* [1996]), 본 연구에서는 인산염의 유출량과 유입량의 플럭스는 균형을 이루고 있었다. 조사지역이 위치한 근소만은 만폐쇄성 만으로 외부와 연결된 하천이나 강과 같은 큰 유기물 공급원이 없어(Kim and Kim [2008]) 퇴적물로부터 유출되는 인산염의 양이 많지 않은 것으로 판단된다.

노출과 침수 기간 동안의 영양염 플럭스는 칠게(*M. japonicus*) 등의 서식굴이 있는 갯벌상과 가재붙이(*L. astacina*) 서식굴 내에서 반대로 나타났다(Table 1). 갯벌 상에서는 노출시에는 퇴적물로부터 영양염이 유출되었으나 침수기 동안에는 대부분이 퇴적물로 유입되었다. 그러나 가재붙이(*L. astacina*) 서식굴 내에서는 침수기 동안의 시간당 영양염 유출량이 노출시에 비해 더 많았다. 이는 서식하는 생물의 활동과 관련이 있는 것으로 여겨진다. 칠게(*M. japonicus*)는 주로 갯벌이 노출되었을 시에 활발한 행동을 하며 해수에 침수되었을 때는 포식자로부터의 위협을 피해 굴로 피신한다.



**Table 2.** Comparison of nutrient fluxes from different kinds of measurements investigated in this study area of Geunso tidal flat. Negative values indicate uptake by sediments and positive values mean release from sediments

Measurement			Flux (mmol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )				
			Ammonium	Nitrate	DIN	Phosphate	Silicate
Kim & Kim (2008)	Chamber incubation	Spring	2.977	-0.958	2.102	0.019	4.074
		Summer	0.268	-0.683	0.352	-0.071	2.874
		Fall	0.49	-0.158	0.625	0.011	2.172
		Winter	0.066	-0.206	0.511	0.01	0.017
Hyun (unpublished data)	Diffusion by electrode	Spring	0.1037				
		Summer	0.1757				
This study	Direct measurement	Tidal flat	9.845	0.129	9.986	0.058	7.543
		<i>Laomedea</i> burrow	2.286	0.288	2.622	-0.024	5.364

한편, 가재붙이(*L. astacina*)는 산소가 충분히 공급되는 밀물시기에 굴 내에서 활발한 관개활동을 한다. 이러한 생물의 생태적 특성이 서식지별 영양염 플럭스에 영향을 주는 것으로 판단된다. 그러나 가재붙이(*L. astacina*) 굴에서도 밤에는 영양염이 퇴적물로 유입되었다. 이는 앞에서 설명한 것처럼 미생물의 활동성 감소와 가재붙이(*L. astacina*)에 의한 관개활동의 감소와 연관된 것으로 추정된다. 낮과 밤 동안의 해수 침수시 가재붙이(*L. astacina*) 서식굴의 관개에는 차이가 있었다. 낮에 비해 밤의 서식굴 내 산소농도는 현저히 낮았으며(Fig. 7), 이러한 요인이 영양염의 플럭스에 영향을 미친 것으로 해석된다.

WT에서의 영양염 플럭스 결과는 이곳 퇴적물에 서식하는 칠게(*M. japonicus*)와 흰이빨참갯지렁이(*P. leucophryna*) 서식굴과 함께 갯벌 표층에서 유출입 양을 함께 포함하고 있다. 이와는 달리 LC의 경우에는 가재붙이 서식굴 내부를 통해 유출입 되는 양만을 포함한다. 그럼에도 불구하고 가재붙이 굴을 통한 하루 동안의 플럭스 양은 WT의 플럭스 양과 비교해 23~224% 범위에 있었다. 이는 큰 굴을 가지며 활발하게 관개활동을 하는 생물의 서식굴이 갯벌 퇴적물과 해수 간의 영양염 순환에 보다 중요한 의미를 가질 수 있음을 시사한다.

본 조사지역과 동일한 지역에서는 각각 다른 방법에 의해 갯벌 퇴적물에서의 영양염 플럭스가 계산되었다. Kim and Kim[2008]은 10 cm 깊이까지의 현장 퇴적물을 저층챔버(benthic chamber)에 놓고 실험실에서 12시간 배양하며 계절별로 영양염의 플럭스를 계산하였으며, 현(unpublished data)은 미세전극을 이용하여 퇴적물 내 깊이별 농도차이에 의한 확산계수를 이용하여 암모늄 플럭스를 계산하였다(Table 2). 본 조사 결과와 비교하여 이들 자료에서 보인 영양염 플럭스는 크게 작았다. 이러한 차이는 생물활동이 영양염 플럭스에 미치는 영향에 대한 고려 정도에서 기인하는 것으로 여겨진다. 대상지역 갯벌에는 가재붙이(*L. astacina*), 칠게(*M. japonicus*), 흰이빨참갯지렁이(*P. leucophryna*) 등 서식굴을 가진 대형저서동물이 우점하고 있다. 그럼에도 불구하고 두 측정 방법에서는 이들 생물활동에 의한 효과가 고려되지 않았거나 혹은 얇은 표층 근처에서 서식하는 생물만을 고려하였기 때문에 생물교란에 의한 영양염의 플럭스를 제대로 반영하지 못하고 있다. 본 조사에서는 생물 활동

의 결과로부터 플럭스되는 영양염을 직접 측정하였기 때문에 그 결과는 실제 갯벌에서 나타나는 영양염 플럭스와 보다 가까운 것이라 판단된다. 그러나 실제로 대부분의 영양염 플럭스 관련된 연구는 지금까지 상기에서 언급한 두 방법에 의해 측정되어 왔다. 이는 퇴적물을 교란하지 않으면서 생물활동을 고려한 현장 측정을 하기가 어렵기 때문이었다. 이러한 사실로부터 많은 연구에서 발표된 영양염 플럭스 관련 결과는 자연에서 일어나는 사실 그대로를 담고 있지 못하며 대부분은 실제 보다 크게 과소평가되어 있다고 할 수 있다. 특히, 가재붙이(*L. astacina*)와 같이 큰 규모의 서식굴을 가지는 종이 갯벌 퇴적물의 영양염 순환에 미치는 영향이 지대함에도 불구하고 고려되지 못했기 때문에 더욱 그러하다. 이러한 이유로 본 연구의 결과는 중요한 의의를 가진다.

본 연구에서 가재붙이 서식굴을 통한 영양염 플럭스 결과는 서식굴 내 25 cm 깊이의 영양염 측정값으로부터 수층과의 농도차이에 의해 계산되었다. 영양염이 표층으로 확산, 이루어지는 과정에서 필연적으로 여러 생지화학적 프로세스를 겪을 것으로 예상된다. 따라서 이는 실제 갯벌 퇴적물 표층에서의 퇴적물-수층 간 플럭스를 대표하기에는 다소 부족한 결과이다. 그러므로 본 연구의 결과는 가재붙이 서식굴을 통한 영양염 플럭스를 대표하는 값 이라기보다는 기여한 값으로 판단하는 것이 타당할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국해양과학기술원(PE99605)과 한국연구재단(PN67620)의 지원을 받아 수행하였습니다. 저자는 영양염 분석에 도움을 준 한국해양과학기술원의 김성현 박사에게 감사드립니다.

## References

- [1] Aller, R.C. and Aller, J.Y., 1998, The effect of biogenic irrigation intensity and solute exchange on diagenetic reaction rates in marine sediments, *J. Mar. Res.*, 56, 905-936.
- [2] Canfield, D.E., Thamdrup, B. and Kristensen, E., 2005, *Aquatic geomicrobiology*. Elsevier Academic Press.
- [3] Cowan, J.L.W., Penock, J.R. and Boynton, W.R., 1996, Seasonal

- and interannual patterns of sediment-water nutrient and oxygen flux in Mobile Bay, Alabama (USA): Regulating factors and ecological significance, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 141, 229-245.
- [4] Feuillet-Girard, M., Gouleau, D., Blanchard, G and Joassard, L., 1997, Nutrient fluxes on an intertidal mudflat in Marennes-Oleron Bay, and influence of the emersion period, *Aquat. Living Resour.*, 10, 49-58.
- [5] Froelich, P.N., 1988, Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: A primer on the phosphate buffer mechanism, *Limnol. Oceanogr.*, 33, 649-668.
- [6] Kemp, W.M., Sampou, P.A., Garber, J., Tuttle, J. and Boynton, W.R., 1992, Seasonal depletion of oxygen from bottom waters of Chesapeake Bay: roles of benthic and planktonic respiration and physical exchange processes, *Geochim et Cosmochim Acta*, 45, 101-121.
- [7] Kim, D. and Kim K.H., Tidal and seasonal variations of nutrients in Keunso Bay, the Yellow Sea, *Ocean and Polar Res.*, 30, 1-10.
- [8] Koo, B.J., 2017, Burrows of macroinvertebrates in the Korean tidal flat, KIOST, ISBN 978-89-444-9060-6.
- [9] Koo, B.J. and Koh, C.-H., 2013. Oxygen penetration through invertebrate burrow walls in Korean tidal flat, *Ocean Sci. J.*, 48, 329-338.
- [10] Kristensen, E., Kostka, J.E., 2005, Macrofaunal burrows and irrigation in marine sediment: microbiological and biogeochemical interactions, in: Kristensen, E., Kostka, J.E., Haese, R. (Eds.), *Interaction between Macro- and Microorganisms in Marine Sediments*, American Geophysical Union, Washington, DC, 125-157.
- [11] Magalhães, C.M., Bordalo, A.A. and Wiebe, W.J., 2002, Temporal and spatial patterns of intertidal sediment-water nutrient and oxygen fluxes in the Douro River estuary, Portugal. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 233, 55-71.
- [12] Marinelli, R.L., 1992, Effects of polychaetes on silicate dynamics and fluxes in sediments: Importance of species, animal activity and polychaete effects on benthic diatoms, *J. Mar. Res.*, 50, 745-779.
- [13] Ogilvie, B. Nedwell, D.B., Harrison, R.M., Robinson, A. and Sage, A., 1997, High nitrate, muddy estuaries as nitrogen sinks: The nitrogen budget of the River Colne estuary (United Kingdom), *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 150, 217-228.
- [14] Omnes P, Slawyk, G, Garcia, N. and Bonin, P., 1996, Evidence of denitrification and nitrate ammonification in the River Rhone plume (northwestern Mediterranean Sea), *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 141, 275-281.
- [15] Parsons, T.R., Maita, Y., and Lalli, C.M., 1984, *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press.
- [16] Rabouille, C., Dennis, L., Dedieu, K., Stora, G, Lansard, B. and Grenz, C., 2003, Oxygen demand in coastal sediments: comparing in situ microelectrodes and laboratory core incubations, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 285, 49-69.
- [17] Rysgaard, S., Christensen, P.B. and Nielsen, L.P., 1995, Seasonal variation in nitrification and denitrification in estuarine sediment colonized by benthic microalgae and bioturbating infauna, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 126, 111-121.
- [18] Thomson, D.C.O., Dong, L.F., Underwood, G.J.C. and Nedwell, D.B., 2007, Sediment-water inorganic nutrient exchange and nitrogen budgets in the Colne Estuary, UK, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 337, 63-77.
- [19] Wahyudi, A.J., Wada, S., Aoki, M., and Hama, T., 2015, Gaetice depressus (Crustacea, Varunidae): Species profile and its role in organic carbon and nitrogen flow, *Ocean Sci. J.*, 50, 389-401.
- [20] Yasuhisa H., 1984, The description of wandering behavior and occurrence varying in different tidal areas in *Macrophthalmus japonicus* (De Haan) (Crustacea: Ocypodidae), *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 84, 211-224.
- [21] Ziebis, W., Forster, S., Huettel, M. and Jørgensen, B.B., 1996, Complex burrows of the mudshrimp *Callinassa truncata* and their geochemical impact in the sea bed, *Nature*, 382, 619-622.

---

Received

Revised

Accepted

별첨 2. 정량적 성과-연구논문: Spring-neap variation on sediment reworking with organic matter contents by a polychaete, *Perinereis aibuhitensis*, in the intertidal sediments of the Gomso Bay, Korea

1 **Spring-neap variation on sediment reworking with organic matter contents by a**  
2 **polychaete, *Perinereis aibuhitensis*, in the intertidal sediments of the Gomso Bay, Korea**

3

4 **Jaehwan Seo<sup>1,2</sup> · Bon Joo Koo<sup>1,2</sup>**

5

6 **Jaehwan Seo<sup>1,2</sup>**

7 Ph.D. Candidate

8 <sup>1</sup>Department of Marine biology, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113,  
9 Korea

10 <sup>2</sup>Marine Ecosystem Research Center, KIOST, Busan 49111, Korea

11

12 **Bon Joo Koo<sup>1,2</sup>**

13 Ph.D., Principal research scientist, Professor of Korea University of Science and Technology

14 <sup>1</sup>Department of Marine biology, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113,  
15 Korea

16 <sup>2</sup>Marine Ecosystem Research Center, KIOST, Busan 49111, Korea

17

18 \*Corresponding author. E-mail: [bjkoo@kiost.ac.kr](mailto:bjkoo@kiost.ac.kr)

19

20

21 **Abstract**

22 The tidal cycle of the spring and neap tide is one of the most important factors influencing  
23 benthic organism sediment reworking and sediment characteristics during bioturbation. This  
24 study was designed to evaluate sediment reworking rate differences of *Perinereis aibuhitensis*  
25 based on quantification of its pellet production and the ratio of organic matter reduction due  
26 to its feeding during spring and neap tide surveys. The organic matter concentration,  
27 especially nitrogen, was much higher at all sediment depths in spring tide than in neap tide,  
28 due to differences in organic matter supply by tidal cycle. The carbon reduction ratio was  
29 unclear in both tides due to differences in reduction ratio at each sediment depth, whereas a  
30 clear nitrogen reduction ratio was observed at all sediment depths in spring tide, with mean  
31 values of 39% and 25% in daytime and nighttime, respectively. The daily pellet production  
32 was much higher in spring tide than neap tide, which strongly depended on organic matter  
33 concentrations. The sediment reworking rate based on the pellet production of *Perinereis* was  
34 also much higher in spring tide ( $0.009 \text{ mm d}^{-1}$ ) than neap tide ( $0.002 \text{ mm d}^{-1}$ ), with the overall  
35 sediment reworking rate of this species being  $20 \text{ mm yr}^{-1}$  based on its density in the study  
36 area.

37

38       **Introduction**

39       Bioturbation, due to various activities of benthic organisms such as feeding and burrowing,  
40 is one of the major processes influencing the physical, chemical and biological characteristics  
41 of sediment environments. During the process of bioturbation, macrofauna modify sediment  
42 characteristics (i.e., vertical sediment composition and water contents) and enhance exchange  
43 of solute and solids across the sediment-water interface (Allen, 1995; Ciutat et al. 2005). The  
44 sediment reworking that results from feeding and burrowing of macrofauna is essential to the  
45 mineralization of the organic matter present in that environment, and to the release of  
46 nutrients from the sediment to the water column (Gilbert et al. 2007). There is a direct  
47 correlation between the sediment reworking rate and the characteristics of the dominant  
48 species, as well as the intensity of infaunal activity, with both depending on environmental  
49 parameters such as food availability and organic matter contents (Gérino et al. 1998;  
50 Mermillod-Blondin et al. 2005; Maire et al. 2007).

51       Deposit-feeding polychaete play an important role in accelerating the biogeochemical  
52 processes of the sediment compared to other organisms (Hylleberg, 1975). Such polychaetes  
53 reduce the organic matter content and change the physical structure of sediment through  
54 feeding and digestion (Sayama and Kurihara, 1983). The deposit-feeding *Perinereis*  
55 *aibuhitensis* is one of the most abundant species of polychaete in the coastal and estuarine  
56 regions of Korea (KOO et al. 2005; Ryu et al. 2011). Though *P. aibuhitensis* does not produce  
57 a distinct sediment mound, its mucous-coated fecal pellets can be found around its burrow  
58 openings. Rhoads (1974) considers this species an “upward conveyer-belt feeder,” deriving  
59 all of its food from sediment ingested below the surface.

60       Since *P. aibuhitensis* has unique sensitivity to organic and metal pollutants, previous  
61 research has focused on this species as a bioindicator to monitor pollution, rather than as a  
62 bioturbator (Wang et al. 2008; Sun et al. 2009). Studies on bioturbation of this species in

63 marine environments have only recently been conducted. In one recent study, the sediment  
64 reworking rate based on quantification of pellet production (PP) by *P. aibuhitensis* showed  
65 seasonal differences that depended on sediment density and the individual sediment  
66 reworking rate (Koo and Seo, 2016). Studies also revealed that carbon- and nitrogen-based  
67 organic matter contents were significantly reduced by the feeding and digestion of this  
68 polychaete (Fang et al. 2017, 2018). However, the bioturbation effects of this species on  
69 sediment environments are still poorly understood.

70 Numerous studies have investigated spatio-temporal variations in bioturbation of benthic  
71 organisms, with some of these studies reporting spring-neap variations. Macrofaunal burrow  
72 shape and size varied on tidal flats and according to tidal phase, burrow depth and burrow  
73 diameter, and showed spring-neap variation according to differences in exposure duration  
74 (Lee and Koh, 1994; Koo et al. 2007). The oxygen penetration distance through the burrow  
75 walls of benthic organisms differed between spring and neap tides, mainly due to differences  
76 in organism activities (Koo and Koh, 2013). Activity patterns, and feeding and burrowing  
77 behavior of macrofauna also varied between spring and neap tides (Nordhaus et al. 2009).  
78 However, little research has been conducted on spring-neap variation in bioturbation of  
79 benthic fauna, or its effects on sediment environments.

80 The purpose of this study is to evaluate differences in the sediment reworking rate of *P.*  
81 *aibuhitensis* based on quantification of its PP and the organic matter reduction ratio resulting  
82 from its feeding between spring and neap tides, and between daytime and nighttime. The  
83 results can be used to better understand spring-neap variation in the sediment reworking  
84 characteristics of this species, and provide baseline data for further study.

85

## 86 **Materials and Methods**

87 This study was conducted in the upper tidal zone of Gomso Bay, on the west coast of

88 Korea (Fig. 1). Gomso Bay is a funnel-shaped embayment, 7–9 km wide and 20 km long.  
89 The southern shore hosts expansive tidal flats, while the northern shore is fringed by narrow  
90 tidal flats. The mean tidal range is 4.34 m, with spring and neap tide at 5.90 m and 2.78 m,  
91 respectively. The main channel of Jujin debouches into the bay and the maximum tidal  
92 current velocities are 1.2 and 1.5 ms<sup>-1</sup> during flood and ebb, respectively (Lee, 2010). The  
93 study area consists primarily of mud, with a mean grain size of 6.78 to 7.28 Ø, and is  
94 positioned 2.5 m above mean sea level (MSL). The polychaete *P. aibuhitensis* is one of the  
95 most abundant species in the study area, with a mean density of 72 ind. m<sup>-2</sup>.

96 Field surveys were conducted at spring tide and neap tide in April 2018. A series of three  
97 quadrats, 0.25 m<sup>2</sup> (50 cm × 50 cm) in area, was established at the study site in both tides. At  
98 the moment of tidal flat exposure, the quadrats were cleared of existing fecal pellets without  
99 any surface disturbance in spring tide. As the study site was not submerged during neap tide,  
100 existing fecal pellets in the quadrats were removed 2 hours before the beginning of the pellet  
101 collection process. After 2 hours, forceps were used to carefully load the newly produced  
102 pellets into glass vials. This pellet collection process was repeated 10 times at spring tide and  
103 11 times at neap tide, during both day and night (Fig. 2).

104 A quadrat 0.25 m<sup>2</sup> (50 cm × 50 cm) in area was established independently at the study site  
105 for organic matter concentration analysis in both tides. Since the feeding depth of this species  
106 was unknown, sediment at depths 0–1, 5–6 and 10–11 cm, and surface pellets, were collected  
107 to estimate the organic matter reduction ratio due to feeding of the species. The organic  
108 matter reduction ratio was calculated based on differences in PP and concentration between  
109 sediments at each depth (0–1, 5–6 and 10–11 cm). The sediment samples were collected first  
110 (yellow triangles), followed by surface pellets just before the submergence period (green  
111 triangles) during both day and night at spring tide (Fig. 2). Since the study site was not  
112 submerged during neap tide, the samples were collected during this tide at the same times as

113 during the spring tide. The sediment and pellet samples were homogenized after drying for 3  
114 days at 60 °C. Carbon and nitrogen concentrations were then determined using an elemental  
115 analyzer (2400 series II; Perkin Elmer, Waltham, MA, USA).

116 After pellet collection, the inhabitants of the quadrats were captured for density, length and  
117 biomass measurements. The body and pellet lengths were measured with calipers, and the  
118 masses of both inhabitants and pellets were obtained by weighing. The sediments were  
119 collected at depths of 0–1, 5–6, 10–11, 15–16 and 20–21 cm to estimate water content, and  
120 the weight-volume conversion factor for sediment reworking rate calculations. These  
121 sediment depths were determined based on the burrow depth of *P. aibuhitensis* observed in  
122 this study area.

123 The wet weight of the sediment was measured initially, and the dry weight was then  
124 obtained after drying the samples for 3 days at 60 °C. The sediment water content was  
125 estimated based on the difference between the wet and dry weights. The wet weight per  
126 volume of sediment was measured using a 10 ml syringe, and the weight-volume conversion  
127 factor was determined as the specific gravity of water divided by the wet weight per volume  
128 of sediment.

129 The sediment reworking rate was calculated based on the pellet weight. The wet weight of  
130 pellets was converted into volume using a weight-volume conversion factor. The reworking  
131 depth was estimated as the converted pellet volume divided by the reworked area (Koo and  
132 Seo, 2016). The sediment reworking rate was given by the sediment depth reworked over 1  
133 day by the polychaete.

134 The grain size distributions were analyzed using standard sieving (Folk, 1968) for the sand  
135 fraction and a particle size analyzer (Sedigraph 5100; Micromeritics, Atlanta, GA, USA) for  
136 the mud fraction at 0.5  $\phi$  intervals. The sand and mud fractions were separated by wet sieving  
137 through a 4  $\phi$  sieve after removing organic matter and carbonates with 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and 0.1 N



138 HCl, respectively. The sand fraction was sieved again for 15 minutes using a Ro-Tap sieve  
139 shaker mounted with the 0.5  $\phi$  sieves, and weight percentages were calculated for each  
140 particle size class. The inclusive graphic method was used to determine sediment type and  
141 mean grain size (Folk and Ward, 1957).

142 Air temperature was measured 1.5 m above the sediment surface and sediment temperature  
143 was obtained by placing a thermometer directly at a sediment depth of 10 cm during each  
144 collection period. The elevation from MSL was measured using a real-time kinetic  
145 differential global positioning system (RTK DGPS) at the study site. Tidal records for the  
146 study area were obtained from the Korean Hydrographic and Oceanographic Agency  
147 (KHOA).

148 A two-sample *t*-test was used to determine differences between daytime and nighttime, as  
149 well as between spring and neap tide. The results were considered statistically significant  
150 when  $p < 0.05$ .

151

## 152 **Results**

153 Daily variation in air and sediment temperatures followed similar curves in spring tide and  
154 neap tide, with both showing a peak in the early afternoon. The mean temperature was also  
155 similar between the spring and neap tides, with values of 13 and 14 °C in the air and 14 and  
156 15 °C in the sediment (Fig. 3).

157 Table 1 shows a comparison of sediment characteristics according to the depths of the two  
158 tides. The water content of sediment ranged from 25 to 30% in spring tide and from 22 to  
159 26% in neap tide, and gradually increased in depth during both tides. In spring tide, water  
160 content was positively correlated with mean grain size, but a negative correlation between  
161 these factors was observed in neap tide. The water content was slightly higher in spring tide  
162 than in neap tide at all sediment depths, with mean values of 27% and 25%, respectively.

163 The sediment was divided into sand, silt and clay (Table 1). While the sand and silt  
164 percentages increased with depth in spring tide, the clay percentage decreased. In contrast,  
165 the former decreased and the latter increased with depth in neap tide. In spring tide, the grain  
166 size of the sediment became coarser as depth increased, with mean values ranging from 7.17  
167 to 7.34  $\phi$ . In neap tide, grain particles became finer as depth increased, and mean grain size  
168 ranged from 6.78 to 7.14  $\phi$ . Pellets were slightly finer in spring tide than in neap tide, with  
169 mean grain size values of 6.16 and 7.10  $\phi$ , respectively.

170 The density and morphometric dimensions of this species were compared between the two  
171 tides (Table 2). The mean density was  $19 \pm 3$  and  $15 \pm 2$  ind.  $0.25 \text{ m}^{-2}$  in spring and neap tide,  
172 respectively. Although the mean density was slightly higher in spring tide than neap tide, the  
173 difference was not statistically significant. The mean body length, biomass and pellet length  
174 were also slightly higher in spring tide than neap tide, but without significance.

175 The distribution of PP, representing the pellet quantity produced by an inhabitant in hour  
176 (Fig. 3), varied by sampling time during the two different tides. In spring tide, diurnal and  
177 nocturnal PP rates were not significantly different, at  $0.009$  and  $0.011 \text{ g ind.}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , respectively.  
178 Daily PPs per individual polychaete and per area were  $0.20$  and  $3.81 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectively.  
179 The daytime PP rate was highest during the first sampling occasion, particularly at 2 hours  
180 after emergence, before gradually decreasing over time. At nighttime, the highest PP rates  
181 were observed on the ninth sampling occasion (8 hours after emergence), and no specific  
182 trend in the PP rate was found. In neap tide, the diurnal and nocturnal PP rates were  $0.004$   
183 and  $0.001 \text{ g ind.}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , respectively (Table 3). However, the neap tide nocturnal diurnal PP rate  
184 was four times higher than that of spring tide. Daily PP per individual polychaete and per area  
185 in neap tide were  $0.06$  and  $0.93 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectively. In daylight, the PP rate in neap tide  
186 was highest during the first sampling occasion, and showed a similar tendency to that of the  
187 daytime rates in spring tide. As with the nighttime rates during spring tide, the highest

188 nocturnal PP rate during neap tide occurred during the tenth sampling occasion. However, the  
189 daily PP per inhabitant and per area in spring tide was double and triple that of neap tide,  
190 particularly the diurnal and nocturnal PP rates during spring tide, which were two and eleven  
191 times higher than in neap tide.

192 Based on sediment density, the sediment reworking rate was  $3.2 \text{ mm yr}^{-1}$  in spring tide and  
193  $0.8 \text{ mm yr}^{-1}$  in neap tide, i.e., a four-fold higher rate in the former than in the latter ( $p < 0.05$ ).  
194 The sediment reworking rate per individual polychaete was also significantly higher in spring  
195 tide than in neap tide, with values of  $0.16$  and  $0.05 \text{ mm ind.}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , respectively.

196 The vertical distribution of carbon and nitrogen in the organic matter varied by tide (Fig. 4).  
197 The daytime carbon concentration in spring tide was highest at 5 cm, followed by surface and  
198 10 cm, whereas the nighttime carbon concentrations were highest at surface followed by 10  
199 and 5 cm. The spring tide nitrogen concentrations during daytime showed similar tendencies  
200 to those of carbon, being highest at 5 cm, followed by surface and 10 cm. In neap tide,  
201 nitrogen was not detected at all depths in daytime and nighttime, while carbon concentrations  
202 were highest at surface in daytime and at 5 cm in nighttime. The organic matter concentration  
203 increased as mean grain size decreased in both tides, but no correlation with water content  
204 was seen (Fig. 5).

205 The carbon- and nitrogen-based organic matter reduction ratio differed by tide, and  
206 between daytime and nighttime (Fig. 4). The carbon reduction ratio at spring tide was unclear,  
207 due to differences in the carbon reduction ratio by depth. The spring tide carbon reduction  
208 ratio was calculated at 5 cm in daytime and at surface in nighttime, where carbon  
209 concentration was found to be higher in sediment than in pellets at both times (12% and 8%,  
210 respectively); negative values were calculated at other depths. In contrast, a clear nitrogen  
211 reduction ratio was observed at all depths during both daytime and nighttime in spring tide.  
212 The nitrogen reduction ratio in daytime was highest at 5 cm, followed by surface and 10 cm,

213 with values of 53%, 42% and 22%, respectively, while the nitrogen reduction ratio gradually  
214 decreased as depth increased at nighttime, with values of 36%, 22% and 13%, respectively.  
215 During neap tide, the mean nitrogen reduction ratio was higher in daytime than nighttime,  
216 with values of 39% and 25%, respectively. The carbon reduction ratios in neap tide were  
217 calculated at surface in daytime and at 5 cm in nighttime, being 3% and 1%, respectively.  
218 However, both of these low values are considered to be within the range of statistical error.

219

## 220 **Discussion**

221 Sediment characteristics based on water content, grain size and composition differed  
222 between spring and neap tides (Table 1). The water content vertical profile showed a similar  
223 tendency, of increasing in depth, during both spring tide and neap tide, even though the mean  
224 grain size distribution was different between the two tides. This difference is thought to be  
225 due to the burrowing activity and bioturbation of crabs in the sample areas. The areas  
226 populated by burrowing crab species show higher water content and lower permeability  
227 (Botto and Iribarne 2000). They reported that the sediment substrate found in the first 20 cm  
228 of crab concentrated water coincides with crab burrow depths. These increases in water  
229 content are most likely due to the effects of crabs loosening sedimentary fabric while  
230 burrowing, thus decreasing sediment firmness. The mean density of the burrowing crab *Uca*  
231 *arcuata* in this study site was 8 ind.  $0.25 \text{ m}^{-2}$ , with a burrow depth of over 20 cm (Koo 2017).  
232 The water content in both tides increased up to 20 cm of sediment, which coincides with the  
233 burrow depth of this crab species. These findings suggest that water content depends not only  
234 on grain size, but also on the bioturbation of inhabitants.

235 The percentage of clay in sediment was higher in spring tide than in neap tide at all depths,  
236 with mean values of 33% and 26% respectively, and especially in surface sediment, which  
237 had 10% higher clay content in spring tide than in neap tide (Table 1). This data clearly

238 shows that the main process controlling net sediment accumulation is the fortnightly spring-  
239 neap tidal cycle (Allen et al. 1980). During periods of decreasing tidal amplitude, peak  
240 velocities decrease and slack durations increase, thus increasing the ratio of sedimentation to  
241 erosion and resulting in net sedimentation during waning tidal ranges. This sedimentation  
242 leads to the accumulation of pools of fluid mud during neap tide. When tide ranges increase  
243 during spring tide, the reverse process occurs, resulting in increased current velocities that  
244 cause net erosion and the seaward escape of fine particles. The study site was not submerged  
245 during neap tide due to the elevation exceeding the tidal height. Thus, fine particles did not  
246 accumulate during neap tide, which resulted in spring-neap variation in sediment composition  
247 during the study period.

248 The vertical sediment composition showed that clay percentage decreased in depth during  
249 spring tide, while a countertrend was observed in neap tide as a result of crab burrows  
250 trapping sediment with a high percentage of clay during high tide (Botto and Iribarne, 2000).  
251 During low tide, the crabs then take part of this clay material to the surface and create  
252 mounds. The crabs displayed more burrowing activity in spring tide than in neap tide  
253 (Micheli et al. 1991). This is thought to be due to the rise in the water table level during  
254 spring tide, which either moistens the sediment (thus facilitating digging) or causes the  
255 burrows to cave in (thus forcing the crabs to restore them). Considering the density and  
256 burrow depth of *U. arcuata*, a species that makes mounds by collecting and piling sediment  
257 (Koo, 2017), it is expected that the spring-neap variation of vertical sediment composition is  
258 related to the differences in burrowing activity frequency of this species in the study area.

259 Differences in proportion of juvenile *Perinereis aibuhitensis* to adult *Perinereis*  
260 *aibuhitensis*, and the density of the species as a whole, are important factors influencing its  
261 PP, due to different feeding frequencies and competition for trophic resources and territory  
262 (Koo and Seo, 2016). However, though the mean population of juvenile *P. aibuhitensis* was

263 somewhat higher in spring tide than in neap tide, at 65% and 70%, respectively, this  
264 difference was not statistically significant. *P. aibuhitensis*' density and morphometric  
265 characteristics, including body length, biomass and pellet length, were slightly higher in  
266 spring tide and neap tide, but this difference was also not statistically significant. Thus, it was  
267 assumed in this study that the PP in both tides was unaffected by these factors.

268 The organic matter concentration, especially nitrogen, was higher in spring tide than in  
269 neap tide at all depths (Fig. 4). The particle transport associated with the incoming tide is a  
270 primary source of organic matter, and the feeding patterns of organisms accordingly  
271 correspond to this spike in food source (Jumars and Self, 1986). In the study area, there was  
272 no input source of organic matter, which suggests that the differences in organic matter  
273 concentration between the two tides were mainly due to the tidal cycle. The vertical  
274 distribution of organic matter fluctuated in depth during both tides, with the highest  
275 concentrations of organic matter occurring at different depths between daytime and nighttime.  
276 In general, the organic matter concentration of natural sediment decreases with depth, but  
277 increases in the water content of areas inhabited by burrowing deposit feeders due to  
278 increased microbial activity and bioturbation (Rowden et al. 1998; Botto and Iribarne 2000).  
279 Therefore, the vertical distribution of organic matter in areas inhabited by burrowing crabs  
280 strongly depends on crab bioturbation.

281 The ingestion rate of deposit feeders varies, and modification of feeding rate is the most  
282 likely mechanism controlling energy intake (Taghon and Jumars, 1984). In areas of low food  
283 concentration, optimal ingestion rates are slow to ensure adequate digestive products are  
284 obtained, where these products drive absorption, while rates are faster in areas of high food  
285 concentration to maintain the maximum absorption rate (Dade et al. 1990). Not surprisingly,  
286 our results showed different PP between the two tides based on the different organic matter  
287 concentrations present during each tide (Figs. 3 and 4). The daily PP in spring tide was four

288 times higher than in neap tide, which shows that the variation in organic matter between the  
289 two tides is an important factor in determining PP. Such variation include the effects of tidal  
290 flooding, which create a spike in the amount of high-quality organic materials in feeding  
291 areas (Anderson and Mayer, 1984). Jumars and Self (1986) examined the feeding response of  
292 deposit feeders to the particle transport associated with the incoming tide, and found that  
293 organisms dramatically increase their feeding rates at this time. Thus, it is expected that the  
294 tidal cycle caused differences in organic matter concentration between the spring and neap  
295 tides, which resulted in PP variation of *P. aibuhitensis*.

296 In spring tide, the diurnal PP gradually decreased over time, while nocturnal PP fluctuated  
297 regardless of time, suggesting that the feeding activity of this species is highest in the early  
298 part of the daytime while other activity, such as burrow maintenance, is highest at nighttime.  
299 Therefore, time-based variations in the PP of this species reflect the ecological characteristics  
300 of spring tide. Additionally, the metabolic rate of this species is more active in nighttime than  
301 in daytime (Yang et al. 2016). The nocturnal PP was slightly higher than the diurnal PP in  
302 spring tide, while diurnal PP was four times higher than nocturnal PP in neap tide. This  
303 variation in PP supports that deposit feeders adjust their feeding rates in relation to organic  
304 matter concentration. Feeding rates decrease when *P. aibuhitensis* is switched from high to  
305 low organic concentration, and a slow, steady rate of feeding is maintained until the species is  
306 again exposed to a high organic concentration (Bock and Miller, 1999). The PP in neap tide  
307 gradually decreased during daytime and continued to decrease at nighttime, indicating that  
308 the feeding rate of the species changed to a steady-state during this tide due to low organic  
309 matter concentration. Therefore, PP is more dependent on organic matter concentration than  
310 on ecological characteristics in neap tide.

311 Crab activity on the surface may be an important factor influencing *P. aibuhitensis* PP.  
312 Even though *Perinereis* is known as a subsurface deposit feeder, its feeding activity was

313 observed on the surface in field observations using video recordings during this study (videos  
314 not included). In addition, pellets were found inside *Perinereis* burrows in both tides, which  
315 suggests that this species did not completely excrete pellets to the surface, most likely as a  
316 result of crab activities nearby such as feeding, moving and resting. Thus, it is expected that *P.*  
317 *aibuhitensis* PP is largely influenced by crab disturbance, and this important point should be  
318 considered when evaluating sediment reworking of this species.

319 The sediment reworking rate based on the PP of this species showed a large difference  
320 between spring and neap tides, with mean values of 3.2 and 0.8 mm d<sup>-1</sup>, respectively (Table  
321 1). The total sediment reworking rate of this species, as recorded during both tides, was 0.16  
322 mm ind.<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, which is a similar value to that recorded during a previous study (KOO and Seo,  
323 2016). The overall sediment reworking rate of *Perinereis* observed in this study area was  
324 estimated at 2 cm yr<sup>-1</sup>. These findings indicate that *P. aibuhitensis* is an important bioturbator,  
325 greatly influencing biogeochemical changes in the marine sediments in which it is present.

326 Some laboratory experiments have reported that organic matter, based on the presence of  
327 carbon and nitrogen, is reduced by the feeding of *P. aibuhitensis*. Fang et al. (2017) found  
328 that this species contributed to a 60% reduction in the nitrogen content of deposited material,  
329 while an additional study conducted in the following year showed a reduction rate ratio of  
330 50% nitrogen and 20% organic carbon (Fang et al, 2017). However, the organic matter  
331 reduction ratio of this study was significantly lower compared to previous studies (Fig. 4).  
332 Since an organism cannot permanently lose more organic matter than it absorbs (Lopez et al,  
333 1989), production of organically enriched pellets by this species is indicative of selective  
334 ingestion. The deposit feeders select small particles for consumption, since food quantity in  
335 marine sediments increases with increasing surface-to-volume ratio (Taghon et al. 1978). The  
336 selection of small particles maximizes net energy and nutrient gain over time, thus increasing  
337 fitness for the polychaete and exemplifying optimal foraging theory (MacArthur and Pianka,



1966). This species does not eat particles larger than 250  $\mu\text{m}$  and prefers smaller sediment particles to large particles (Fang et al. 2018), which is supported by results of this study. The mean grain size of pellets was smaller than that of the consumed sediment particles, and the pellets produced during both tides were carbon-enriched, which indicates selective feeding. An important consequence of selective feeding is that the biochemical composition of the ingested material is not represented by measurements of the bulk sediments. In addition, the differences between the bulk sediment and the ingested particles are unpredictable, making it difficult to use functional-response results obtained in the laboratory to predict feeding rates in the field (Bock and Miller, 1999). Thus, the field experiments in this study could not fully evaluate the organic matter reduction ratio by *Perinereis*. Further study is required to accurately estimate the organic matter reduction ratio in natural water environments. Nevertheless, this study did show that nitrogen content was reduced from 25% to 39% in 1 day due to the feeding of the polychaete, which suggests that this species may have a profound impact on the organic matter cycling of marine sediments.

This study is significant because it evaluated differences in sediment characteristics, sediment reworking based on quantification of PP, and the organic matter reduction ratio due to the feeding of *P. aibuhitensis* between spring and neap tides. Though this study was limited by factors that affected variations in PP and the organic matter reduction ratio, the findings provide important information about the effects of the tide cycle on marine sediments and its inhabitants, and provide baseline data for further study.

358

### 359 **Acknowledgments**

360 This research was supported by the Basic Science Research Program through the National  
361 Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education  
362 (No.2018R1D1A1B07049632) and Korea Institute of Ocean Science and Technology

363 (KIOST, PN67620 and PE99605). We thank M. Kim and M. Jang for their assistance in the  
364 field.

365

366 **Compliance with ethical standards**

367 **Conflict of interest:** The authors declare that they have no conflict of interest.

368 **Ethical approval:** All applicable international, national, and/or institutional guidelines for  
369 the care and use of animals were followed.

370

371 **References**

372 Allen GP, Salomon JC, Bassoullet P, Penoat YD, Grandpre CE (1980) Effects of tides on  
373 mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sediment Geol* 26:69-90

374 Allen HE (1995) Metal contaminated aquatic sediments. Ann Arbor Press, Chelsea, MI, USA

375 Anderson FE, Mayer LM (1984) Seasonal and spatial variability of particulate matter of a  
376 muddy intertidal flood front. *Sedimentology* 31:383-394

377 Bock MJ, Miller DC (1999) Particle selectivity, gut volume, and the response to a step  
378 change in diet for deposit-feeding polychaetes. *Limnol Oceanogr* 44(4):1132-1138

379 Botto F, Iribarne O (2000) Contrasting effects of two burrowing crabs (*Chasmagnathus*  
380 *granulate* and *Uca uruguayensis*) on sediment composition and transport in estuarine  
381 environments. *Estuar Coast Shelf Sci* 51:141-151

382 Ciutat A, Anschutz P, Gerino M, Boudou A (2005) Effects of bioturbation on cadmium  
383 transfer and distribution into freshwater sediments. *Environ Toxicol Chem* 24:1048-1058

384 Dade WB, Jumars PA, Penry DL (1990) Supply-side optimization: maximizing absorptive  
385 rates. In: Hughes R N (ed) Behavioral mechanisms of food selection. Springer, New York  
386 Heidelberg Berlin 531-555 pp

387 Fang J, Jiang Z, Jansen HM, Fawen HU, Fang J, Liu Y, Gao Y, Du M (2017) Applicability of  
388 *Perinereis aibuhitensis* Grube for fish waste removal from fish cages in Sanggou Bay, P. R.  
389 China. *J Ocean Univ China* 16(2):294-304

390 Fang J, Jiang Z, Fang J, Kang B, Gao Y, Du M (2018) Selectivity of *Perinereis aibuhitensis*  
391 (Polychaeta, Nereididae) feeding on sediment. *Mar Biol Res* 14(5):478-483

392 Folk RL, Ward W (1957) Brazos River bar: A study in the significance of grain size

- 393 parameters. J Sediment Petrol 27(1):3-26
- 394 Folk RL (1968) Petrology of sedimentary rocks. Hemphills, University of Texas. USA 170 pp
- 395 Gerino M, Aller RC, Lee C, Cochran JK, Aller JY, Green MA, Hirschberg D (1998)  
396 Comparison of different tracers and methods used to quantify bioturbation during a spring  
397 bloom: 234-thorium, luminophores and chlorophylla. Estuar Coast Shelf S 46:531-547
- 398 Gilbert F, Hulth S, Grossi V, Poggiale JC, Desrosiers G, Rosenberg R, Gérino M, François-  
399 Caracaillet F, Michaud E, Stora G (2007) Sediment reworking by marine benthic species  
400 from the Gullmar Fjord (Western Sweden): Importance of faunal biovolume. J Exp Mar Biol  
401 Ecol 348:133-144
- 402 Hylleberg J (1975) Selective feeding by *Abarenicola pacifica* with notes on *Abarenicola*  
403 *vagabunda* and a concept of gardening in lugworms. Ophelia 21:159-166
- 404 Jumars PA, Self RFL (1986) Gut-marker and gut-fullness methods for estimating field and  
405 laboratory effects of sediment transport on ingestion rates of deposit-feeders. J Exp Mar Biol  
406 Ecol 98:293-310
- 407 Koo BJ, Kwon KK, Hyun JH (2005) The sediment-water interface increment due to the  
408 complex burrows of macrofauna in a tidal flat. Ocean Sci J 40(4):221-227
- 409 Koo BJ, Kwon KK, Hyun JH (2007) Effect of environmental conditions on variation in the  
410 sediment-water interface created by complex macrofaunal burrows on a tidal flat. J Sea Res  
411 58:302-312
- 412 Koo BJ, Koh CH (2013) Oxygen penetration through invertebrate burrow walls in Korean  
413 tidal flat. Ocean Sci J 48(4):329-338
- 414 Koo BJ, Seo J (2016) Sediment reworking by a polychaete, *Perinereis aibuhitensis*, in the  
415 intertidal sediments of the Gomso Bay, Korea. Ocean Sci J 52(4):511-518
- 416 Koo BJ (2017) Burrows of macroinvertebrates in the Korean tidal flats. KIOST, ISBN 978-  
417 89-444-9060-6, 40-41 pp
- 418 Lee YH, Koh CH (1994) Biogenic sedimentary structures on a Korean mud flat: spring-neap  
419 variations. Neth J Sea Res 32(1):81-90
- 420 Lee HJ (2010) Preliminary results on suspended sediment transport by tidal currents in  
421 Gomso Bay, Korea. Ocean Sci J 45(3):187-195
- 422 Lopez G, Tantichodok P, Cheng I (1989) Radiotracer methods for determining utilization of  
423 sedimentary organic matter by deposit feeders. In: Lopez G, Taghon G, Levinton J (eds)  
424 Lecture notes on coastal and estuarine studies: ecology of marine deposit feeders. Springer,  
425 New York Heidelberg Berlin, 149-170 pp
- 426 MacArthur RH, Pianka ER (1966) On optimal use of a patchy environment. The American

- 427 Naturalist 100:603-609
- 428 Maire O, Duchêne JC, Grémare A, Malyuga VS, Meysman FJR (2007) A comparison of  
429 sediment reworking rates by the surface deposit-feeding bivalve *Abra ovate* during  
430 summertime and wintertime, with a comparison between two models of sediment reworking.  
431 J Exp Mar Biol Ecol 343:21-36
- 432 Mermillod-Blondin F, François-Caracaillet F, Rosenberg R (2005) Biodiversity of benthic  
433 invertebrates and organic matter processing in shallow marine sediments: an experimental  
434 study. J Exp Mar Biol Ecol 315:187-209
- 435 Micheli F, Gherardi F, Vannini M (1991) Feeding and burrowing ecology of two East African  
436 mangrove crabs. Mar Biol 111:247-254
- 437 Nordhaus I, Diele K, Wolff M (2009) Activity patterns, feeding and burrowing behavior of  
438 the crab *Ucides cordatus* (Ucididae) in a high intertidal mangrove forest in North Brazil. J  
439 Exp Mar Biol Ecol 374:104-112
- 440 Rhoads DC (1974) Organism-sediment relations on the muddy seafloor. Oceanogr Mar Biol  
441 Ann Rev 12:263-300
- 442 Rowden AA, Jago CF, Jones SE (1998) Influence of benthic macrofauna on the geotechnical  
443 and geophysical properties of surficial sediment, North Sea. Cont Shelf Res 18:1347-1363
- 444 Ryu J, Khim JS, Choi JW, Shin HC, An S, Park J, Kang D, Lee CH, Koh CH (2011)  
445 Environmentally associated spatial changes of a macrozoobenthic community in the  
446 Saemanheum tidal flat, Korea. J Sea Res 65:390-400
- 447 Sayama M, Kurihara Y (1983) Relationship between burrowing activity of the polychaetous  
448 annelid, *Neanthes Japonica* (Izuka) and nitrification-denitrification processes in the  
449 sediments. J Exp Mar Bio Ecol 72:233-241
- 450 Sun F, Zhou Q, Wang M, An J (2009) Joint stress of copper and petroleum hydrocarbons on  
451 the polychaete *Perinereis aibuhitensis* at biochemical levels. Ecotoxicol Environ Saf  
452 72:1887-1892
- 453 Taghon GL, Self RFL, Jumars PA (1978) Predicting particle selection by deposit feeders: a  
454 model and its implications. Limnol Oceanogr 23:752-759
- 455 Taghon GL, Jumars PA (1984) Variable ingestion rate and its role in optimal foraging  
456 behavior of marine deposit feeders. Ecology 65(2):549-558
- 457 Wang J, Zhou Q, Zhang Q, Zhang Y (2008) Single and joint effects of petroleum  
458 hydrocarbons and cadmium on the polychaete *Perinereis aibuhitensis* Grube. J Environ Sci  
459 20:68-74
- 460 Yang D, Chen F, Zhou Y, Xiu Z (2016) Diel variation in metabolism and ammonia excretion  
461 of *Marphysa sanguinea* (Polychaeta: Eunicidae). Chin J Oceanol Limol 34(6):1209-1217

462 Table 1. Sediment and pellet characteristics at spring and neap tide

	Depth (cm)	Composition (%)			Mean grain size ( $\phi$ )	Water content (%)
		Sand	Silt	Clay		
Spring tide	Pellet	1.6	63.1	35.3	7.34	-
	0-1	1.6	64.0	34.4	7.28	24.8
	5-6	2.5	64.2	33.3	7.24	25.1
	10-11	2.7	64.8	32.6	7.19	27.2
	15-16	2.3	64.6	33.1	7.22	28.3
	20-21	2.8	65.3	32.0	7.17	29.7
Neap tide	Pellet	2.6	65.9	31.6	7.14	-
	0-1	2.1	73.7	24.3	6.78	22.7
	5-6	3.0	70.8	26.2	6.85	24.8
	10-11	2.3	69.2	28.5	7.04	25.3
	15-16	3.4	69.2	27.4	7.00	26.4
	20-21	3.1	69.7	27.2	6.99	26.3

463

464 Table 2. Comparison of abundance and morphometric data for *Perinereis aibuhitensis*  
465 between spring and neap tide. Significance differences by t-test at 0.05

	Abundance	Inhabitant		Pellet (n=100)
		Length (mm)	Biomass (g)	Length (mm)
Spring tide	19±3	9.36±4.57	0.66±0.74	1.86±0.38
Neap tide	15±2	8.22±4.99	0.41±0.55	1.80±0.46
P value	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05

466

467 Table 3. Comparison of pellet production during daytime and nighttime and sediment  
468 reworking rate between spring and neap tide. Significant differences by t-test at 0.05

	Pellet production		Daily production		Sediment reworking rate (mm d <sup>-1</sup> )
	Daytime (g ind. <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Nighttime (g ind. <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Inhabitant (g ind. <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	Area (g 0.25 m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	
Spring tide	0.009±0.009	0.011±0.005	0.20±0.03	3.81±0.42	0.009
Neap tide	0.004±0.004	0.001±0.001	0.06±0.02	0.93±0.02	0.002
P value	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

469

470

471

472

473

474

### Figure captions

475

476

477 Fig. 1. Location and layout of the study site in the Gomso tidal flat, on the western coast of  
478 Korea.

479 Fig. 2. Sampling times for collection of *Perinereis aibuhitensis* fecal pellets by tidal height:  
480 (a) spring tide, (b) neap tide.

481 Fig. 3. Variation in pellet quantity produced by each inhabitant per hour at each sampling  
482 time: (a) spring tide, (b) neap tide.

483 Fig. 4. Organic matter concentrations with sediment depth and pellet production over the  
484 entire study period: (a) daytime in spring tide for carbon, (b) nighttime in spring tide for  
485 carbon, (c) daytime in neap tide for carbon, (d) nighttime in neap tide for carbon, (e) daytime  
486 in spring tide for nitrogen, (f) nighttime in spring tide for nitrogen, (g) daytime in neap tide  
487 for nitrogen, (h) nighttime in neap tide for nitrogen.

488 Fig. 5. Correlation between organic matter concentration and mean grain size over the  
489 entire study period: (a) spring tide for carbon, (b) neap tide for carbon, (c) spring tide for  
490 nitrogen, (d) neap tide for nitrogen.

491

492

493

494

495

496

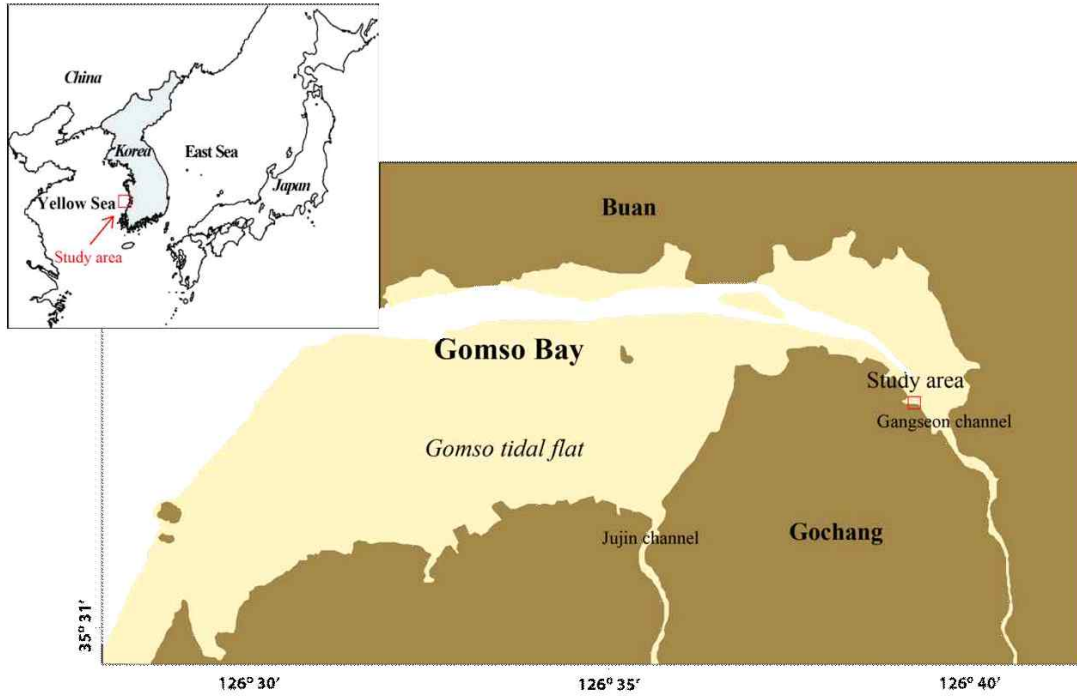
497

498

499

500

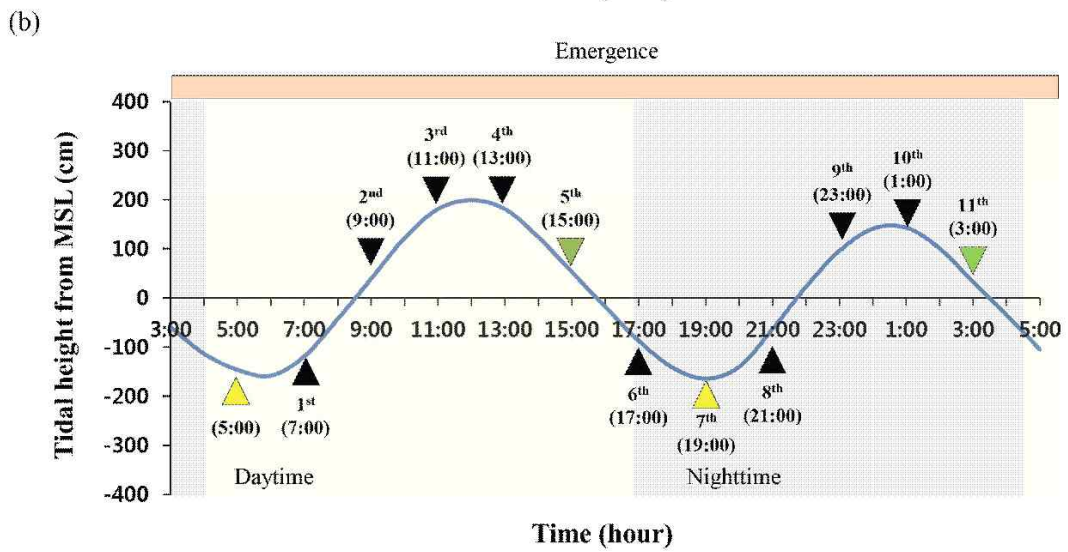
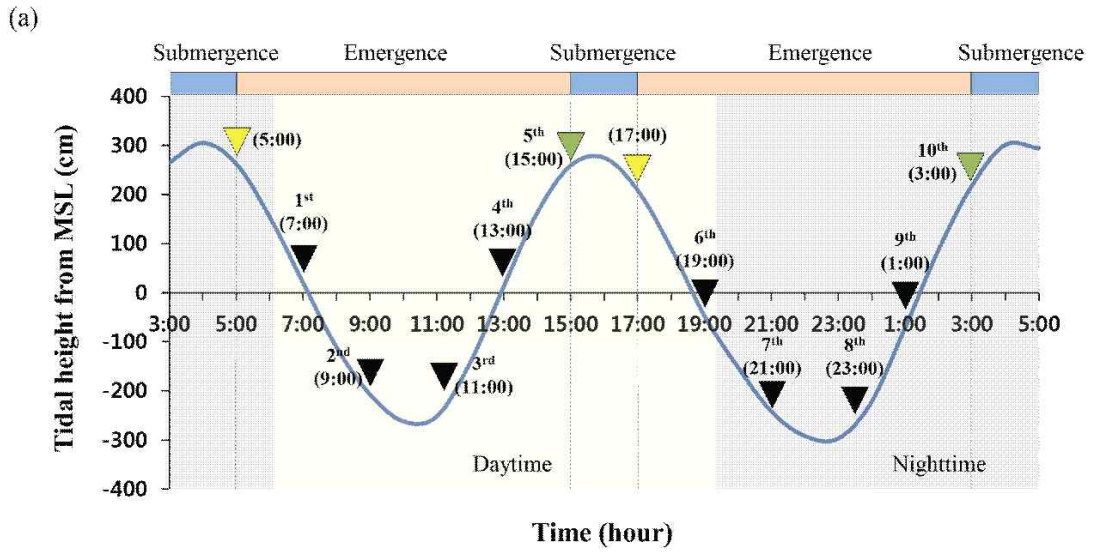
Fig. 1.



501

502

503 Fig. 2.



504

505

506

507

508

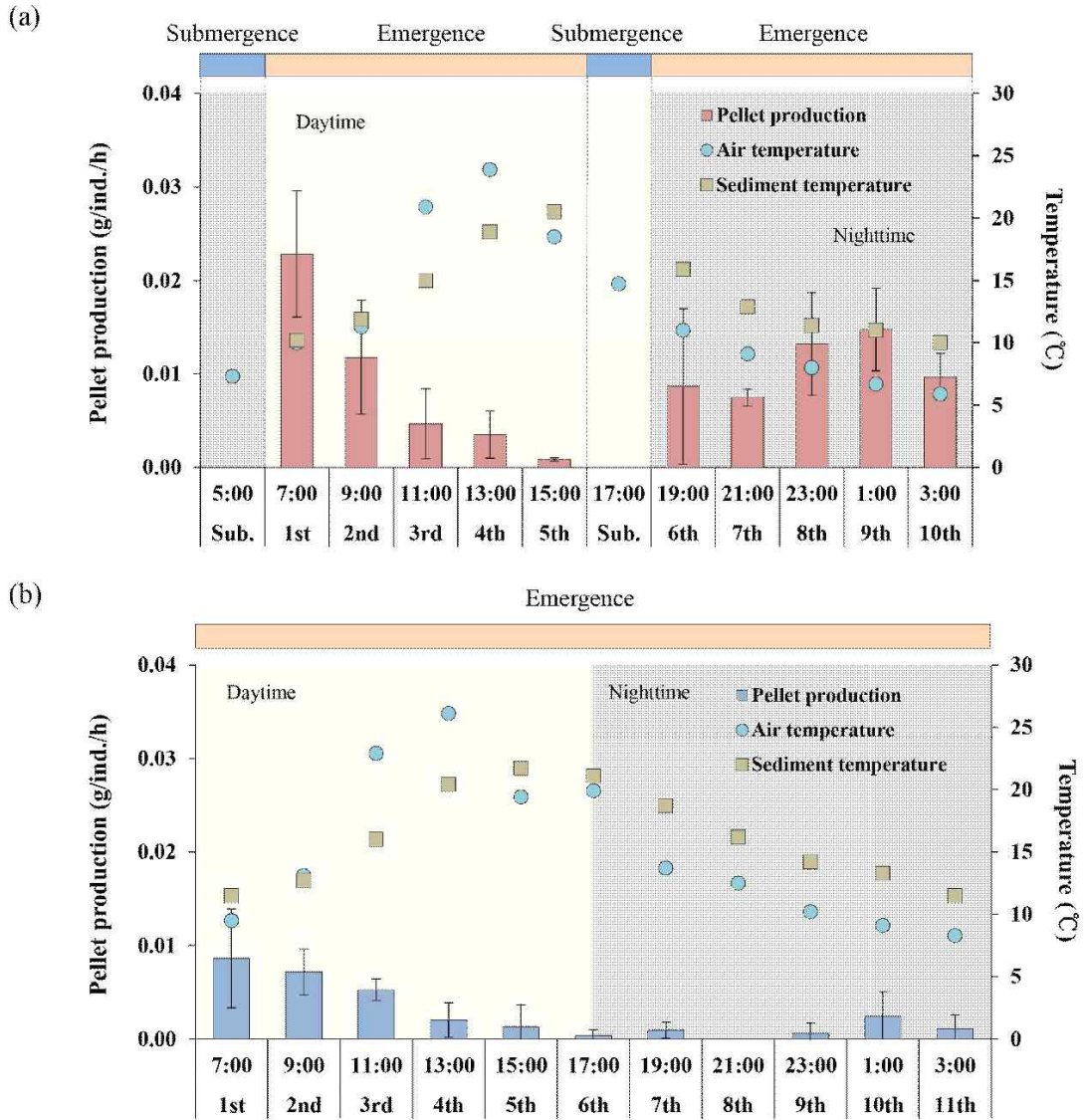
509

510

511



512 Fig. 3.



513

514

515

516

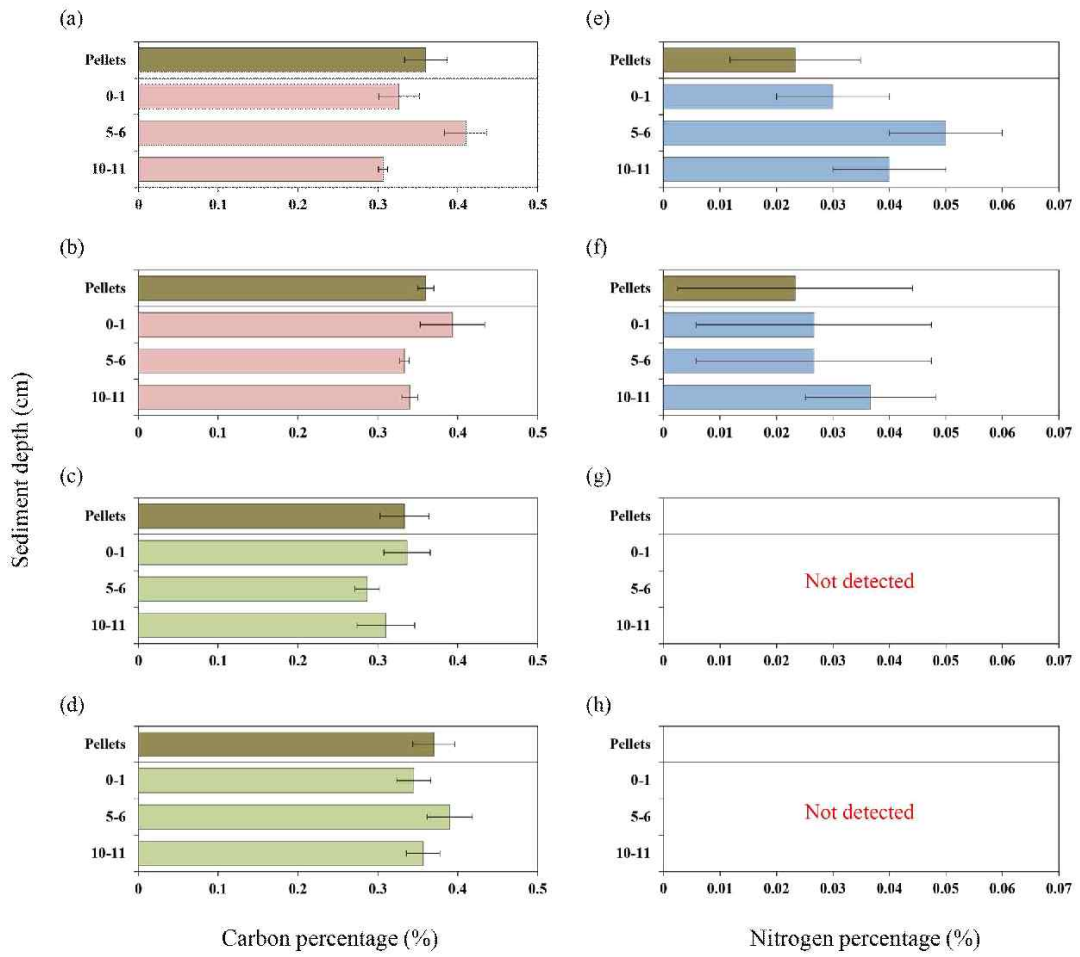
517

518

519

520

521 Fig. 4.



522

523

524

525

526

527

528

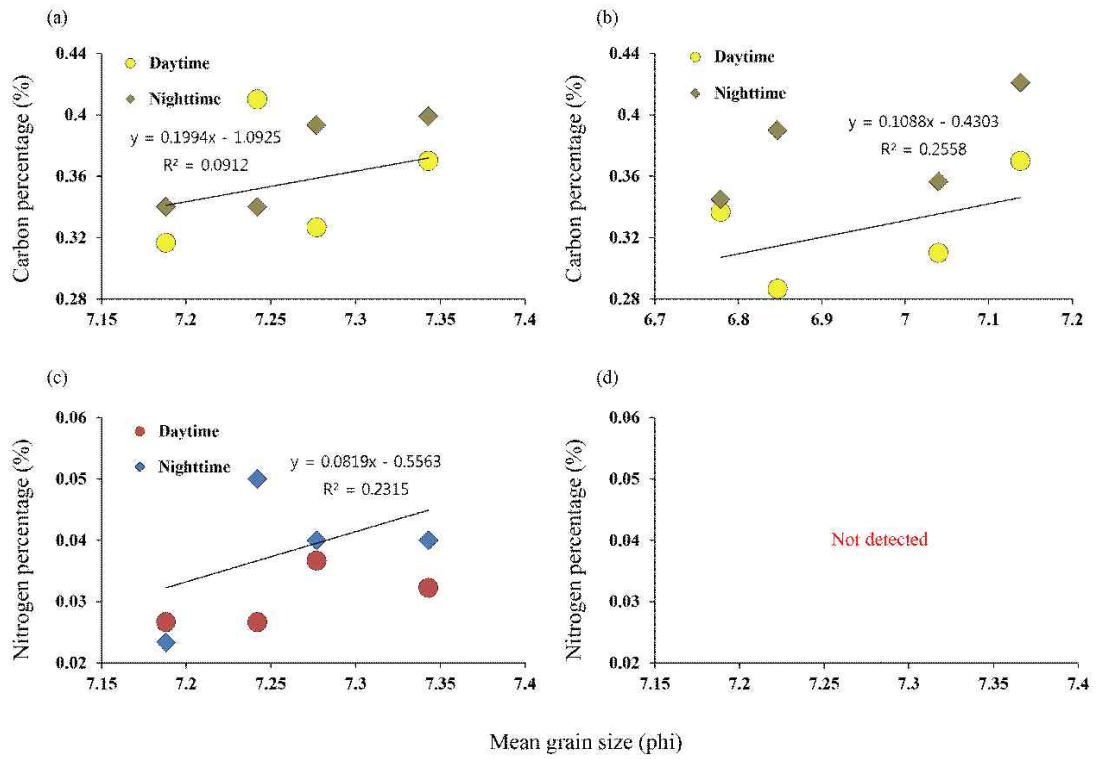
529

530

531

532

533 Fig. 5.



534

535

536

537

538

539

540

541

542

543

544

545

546

547 The English in this document has been checked by at least two professional editors, both  
548 native speakers of English. For a certificate, please see:  
549  
550 <http://www.textcheck.com/certificate/vOeR9z>  
551

## 주 의

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