

BSPN90270

-12602-3

2021.05.31.

큰 규모 서식굴(가재붙이)에 의한 생물교란 연구

www.kiost.ac.kr

Studies on bioturbation of mud shrimp *Laomedea astacina*
(Decapoda: Thalassinidea) with a big burrow system

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “ 큰 규모 서식굴(가재붙이)에 의한 생물교란 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2021. 05. 31

총괄연구책임자 : 구 본 주

참 여 연 구 원 : 서 재 환

“ : 장 민 성

보고서 초록

과제고유 번호	PN90270	해당단계 연구기간	2018.06.01- 2021.05.31	단계 구분	
연구사업명	중사업명	이공학 개인기초연구 지원사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	큰 규모 서식굴(가재붙이)에 의한 생물교란 연구			
연구책임자	구분주	해당단계 참여연구원수	총 : 3 명 내부: 2 명 외부: 1 명	해당단계 연구비	정부: 150,000 천원 기업: 천원 계 : 150,000 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 3 명 내부: 2 명 외부: 1 명	총 연구비	정부: 150,000 천원 기업: 천원 계 : 150,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 동해환경연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	112
<p>○ 가재붙이는 국내 서·남해안 상부 조간대에 고르게 분포하였으며 평균 1-10개체/m²의 서식밀도를 보였음. 갯벌이 넓지 않고 조수의 차이가 크지 않은 제주도에도 가재붙이가 서식하는 것을 확인함.</p> <p>○ 강화도, 곰소만 갯벌 가재붙이의 서식굴은 크고 복잡한 구조를 가진 반면, 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이의 서식굴은 상대적으로 작고 단순한 구조를 보였음. 이러한 서식굴의 수치, 구조 및 형태의 차이는 종간차이(섭식형태)와 서식지 특성(퇴적상, 노출시간)에 의한 것으로 추정됨.</p> <p>○ 국내에 보고되어진 가재붙이는 <i>Laomedea astacina</i> 한 종으로 보고되어져 있지만 강화도 갯벌에 서식하는 가재붙이는 <i>Laomedea astacina</i>와 형태적, 유전적으로 차이를 보였으며 현재까지 보고되어지지 않은 신종으로 추정됨.</p> <p>○ 가재붙이의 관개활동에 의한 퇴적물재배치는 침수시간이 증가할수록 증가하며, 노출시간이 증가할수록 증가하는 것으로 나타남. 곰소만 갯벌의 경우 가재붙이의 관개활동에 의해 약 71.2kg m⁻² year⁻¹의 퇴적물이 재배치되었음.</p> <p>○ 곰소만 갯벌에서는 가재붙이의 퇴적물재배치에 의해 탄소와 질소가 서식굴 내부에서 표층으로 각각 542gC m⁻² year⁻¹, 65gN m⁻² year⁻¹ 순환하였음.</p> <p>○ 가재붙이 서식굴 내부 산소환경은 가재붙이의 관개활동 및 호흡에 의해 산소 농도가 조절되며 이러한 산소환경의 변화와 가재붙이 개체의 서식굴 내부 활동은 서식굴 내 영양염 변화에 영향을 미치는 것으로 나타남.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	큰 규모 서식굴, 가재붙이, 생물교란, 유기물, 영양염			
	영 어	big burrow system, <i>Laomedea astacina</i> , bioturbation, organic matter, nutrients			

요 약 문

I. 제 목

큰 규모 서식굴(가재붙이)에 의한 생물교란 연구

II. 연구개발의 목표 및 필요성

○ 연구개발의 목표

가재붙이 생태특성 및 서식굴에 의한 생물교란 자료 축적

○ 연구개발의 필요성

- 가재붙이는 절지동물문의 갑각강 십각목 가재붙이과에 해당하는 펄새우류의 일종으로 우리나라 서·남해안 갯벌에 분포하고 있지만, 이 종의 생태학적 특징에 대한 정보는 거의 알려져 있지 않음.

- 가재붙이의 서식굴은 최대 2m 깊이까지 퇴적층 하부로 연장되어 있으며 서식굴에 의한 퇴적물-물 경계면은 1,044%가 증가하는 것으로 연구되었음.

- 큰 규모의 서식굴은 퇴적층의 생지화학적 프로세스 및 물질교환에 미치는 영향이 작은 서식굴에 비해 지대하지만, 가재붙이의 서식굴 수치 및 구조와 생물교란에 관한 연구는 부족한 실정임.

III. 연구개발의 내용 및 범위

○ 서식지별 가재붙이 서식굴 수치, 형태 및 구조 분석

- 국내 서·남해안 갯벌의 가재붙이 서식지 확인 및 서식지 특성 분석
- 서식지별 가재붙이 서식굴 수치, 구조 및 형태 분석
- 가재붙이 재분류

○ 가재붙이 퇴적물재배치율 및 유기물 순환 분석(*in situ*)

- 가재붙이 관개활동에 의한 퇴적물재배치율 산출
- 가재붙이 관개활동에 의한 유기물 순환 분석

○ 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 및 영양염 순환 분석(mesocosm)

- 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 분석
- 가재붙이 서식굴 내부 영양염 순환 분석

IV. 연구개발결과

○ 가재붙이는 국내 서·남해안 상부 조간대에 고르게 분포하였으며 평균 1-10개체/m²의 서식밀도를 보였음. 또한, 갯벌이 넓지 않고 조수의 차이가 크지 않은 제주도에도 가재붙이가 서식하는 것을 확인함.

○ 강화도, 곰소만 갯벌 가재붙이의 서식굴은 크고 복잡한 구조를 가진 반면, 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이의 서식굴은 상대적으로 작고 단순한 구조를 보였음. 이러한 서식굴의 수치, 구조 및 형태의 차이는 종간차이(섭식형태)와 서식지 특성(퇴적상, 노출시간)에 의한 것으로 추정됨.

○ 국내에 보고되어진 가재붙이는 *Laomedea astacina* 한 종으로 보고되어져 있지만 강화도 갯벌에 서식하는 가재붙이는 *Laomedea astacina*와 형태적, 유전적으로 차이를 보였으며 현재까지 보고되어지지 않은 신종으로 추정됨.

○ 가재붙이의 관개활동에 의한 퇴적물재배치는 침수시간이 증가할수록 증가하며, 노출시간이 증가할수록 증가하는 것으로 나타남. 곰소만 갯벌의 경우 가재붙이의 관개활동에 의해 약 71.2kg m⁻² year⁻¹의 퇴적물이 재배치되었음.

○ 곰소만 갯벌에서는 가재붙이의 퇴적물재배치에 의해 탄소와 질소가 서식굴 내부에서 표층으로 각각 542gC m⁻² year⁻¹, 65gN m⁻² year⁻¹ 순환하였음.

○ 가재붙이 서식굴 내부 산소환경은 가재붙이의 관개활동 및 호흡에 의해 산소 농도가 조절되며 이러한 산소환경의 변화와 가재붙이 개체의 서식굴 내부 활동은 서식굴 내 영양염 변화에 영향을 미치는 것으로 나타남.

V. 연구개발결과의 활용계획

○ 가재붙이의 서식굴을 통한 생물교란 자료는 갯벌생태, 갯벌기능 및 갯벌 퇴적층의 생지화학적 프로세스 및 물질순환을 이해하는데 있어 기초자료를 제공할 수 있음.

○ 가재붙이의 서식지 및 서식밀도 자료는 공급서비스에 갯벌 대형저서동물 자원량 정보를 제공할 수 있으며 가재붙이의 생물교란 자료는 조절서비스의 유기물 및 영양염 순환을 통한 정화기능 평가에 기초자료를 제공할 수 있음.

○ 국외의 경우 갯벌 생물의 생물교란이 생지화학적 프로세스 및 물질순환에 미치는 영향의 중요성으로 인해 해양공간계획에 있어 생물교란이 하나의 지표로 이용되어 지고 있음. 그러나 국내의 해양공간계획에는 이러한 지표가 포함 되어 있지 않아 새로운 지표로 활용 가능함.

○ 강화도 갯벌에 서식하는 가재붙이는 국제적으로 보고되어지지 않은 국내의 고유한 종일 가능성이 높으며, 또한 그 서식굴은 현재까지 알려진 해양대형무척추동물 중 가장 큰 것으로 추정되어짐. 이러한 결과는 가재붙이가 해양보호생물의 지정 조건에 필요한 조건을 갖추었음을 의미함. 본 연구의 결과는 가재붙이의 해양보호생물 지정에 있어 기초자료로 활용될 수 있음.

S U M M A R Y

I. Title

Studies on bioturbation of mud shrimp *Laomedea astacina* (Decapoda: Thalassinidea) with a big burrow system

II. Objective and Necessity of the study

○ Objective of the study

Accumulation of information on ecological characteristics of *L. astacina* and bioturbation through its burrow

○ Necessity of the study

- *Laomedea astacina* is a mud shrimp (Decapoda: Thalassinidea), which is distributed in the western and southern tidal flats in Korea, but little information is known about its ecological characteristics.

- The burrow of *L. astacina* is extended to the bottom of sediments up to 2m, and the sediment-water interface caused by that has been studied to increase by 1,044%.

- A big burrow system have a greater impact on biogeochemical processes and material exchange of sediments than small burrow system, but the studies on morphology and dimension of burrow of *L. astacina* and bioturbation is still limited.

III. Contents and Scope of the study

- Analysis of morphology and dimension of *L. astacina* burrow

- Identification on habitatas of *L. astacina* and analysis of habitat characteristics in tidal flats on the west and south coasts of Korea

- Analysis of morphology and dimension of *L. astacina* burrow by habitat

- Classification of *L. astacina*

- Analysis of sediment reworking rate and organic matter cycle of *L. astacina*(*in situ*)

- Estimation on sediment reworking rate of *L. astacina* by its irrigation

- Analysis of organic matter cycle by irrigation of *L. astacina*

- Analysis of internal oxygen environment and nutrients cycle in the burrow of *L. astacina*(mesocosm)

- Analysis of internal oxygen environment in the burrow of *L. astacina*

- Analysis of internal nutrients cycle in the burrow of *L. astacina*

IV. Results of the study

- *L. astacina* was evenly distributed in the upper tidal zone of the west and south coasts of Korea, with a mean density of 1-10 ind./m². Also, it is identified that it lives in Jeju Island, where tidal flats are not wide and there is not much difference in tides.

- While the burrows of *L. astacina* in Ganghwa and Gomso tidal flats have large and complex structures, that of Namhae island and Changseon island have relatively small and simple structures. These differences in morpholgy and dimensions are assumed to be

due to differences between species (feeding mode) and habitat characteristics (sedimentary facies, duration of exposure).

○ *Laomdeia astacina* is reported as a species of *Laomedia astacina* in Korea, but the *Laomedia* sp. inhabiting in the Ganghwa tidal flat differs morphologically and genetically from *Laomedia astacina* and is presumed to be a new species that has not been reported to date.

○ The sediment reworking rate of *L. astacina* by its irrigation increases with increasing submergence time and duration of exposure. In the case of Gomso tidal flat, 71.2 kg m⁻² year⁻¹ of sediment was reworked by irrigation activities of *L. astacina*.

○ In the Gomso tidal flat, carbon and nitrogen circulated from inside the burrow to the surface 542gC m⁻² year⁻¹, 65gN m⁻² year⁻¹, respectively, by sediment reworking of *L. astacina*.

○ The internal oxygen environment of the *L. astacina* burrow is controlled by the irrigation and breathing of *L. astacina*, and the changes in the oxygen environment and the internal activities of *L. astacina* affect the nutrient change in the burrow.

V. Application of the study

○ The information of bioturbation of *L. astacina* through its burrow can provide basic data in understanding the ecology, the function, and the biochemical processes and material exchange in intertidal sediments.

○ The habitats and density data of *L. astacina* can provide information on the macroinvertebrates resources in the ecosystem service, and bioturbation data of *L. astacina* can provide basic data on the evaluation of purification functions through organic matter and nutrient circulation in the ecosystem service.

○ The information on bioturbation of macroinvertebrates in tidal

flats is used as an indicator in marine spatial planning due to the importance of the effects of bioturbation on biogeochemical processes and material exchange in foreign countries. However, in Korea, marine spatial planning does not include such indicators, thus, the information on bioturbation of *L. astacina* can be used as new indicators.

○ The *Laomedea* sp. inhabiting in the Ganghwa tidal flat is likely to be a unique species of domestic species that has not been reported internationally, and the burrow of *L. astacina* is estimated to be the largest one known macroinvertebrates burrows to date. This result indicated that *L. astacina* meet the conditions necessary for the designation of marine conservation organisms. The results of this study can be used as a basic data for the designation of marine conservation organisms in *L. astacina*.

(KEYWORDS : 큰 규모 서식굴, 가재불이, 생물교란, 유기물, 영양염, big burrow system, *Laomedea astacina*, bioturbation, organic matter, nutrients)

C O N T E N T S

Chapter 1. Overview of the study	20
Section 1. Bioturbation	20
Section 2. Necessity of the study	23
Section 3. Objective of the study	27
Section 4. Assumption and logicity	28
Section 5. Annual objectives and contents	29
Chapter 2. Process and contents of the study	32
Section 1. First year contents of the study	32
Section 2. Second year contents of the study	34
Section 3. Third year contents of the study	35
Section 4. Flowchart of the study	36
Chapter 3. Results and achievement of research	37
Section 1. Achievement	37
Section 2. Materials and methods	38
Section 3. Results	51
Section 4. Conclusion	104
Section 5. Quantitative achievement	105
Chpater 4. Significance of the study	108
Chpater 5. Management and application of the study	109
Section 1. Application	109
Section 2. Necessity of further study	110
Chpater 6. References	111

List of Tables

Table 1-4-1. The summary of assumption and logical basis in the present study	28
Table 3-3-1. The habitat characteristics of <i>L. astacina</i> in Namhae island tidal flat	52
Table 3-3-2. The habitat characteristics of <i>L. astacina</i> in Chanseon island tidal flat	52
Table 3-3-3. The habitat characteristics of <i>L. astacina</i> in Nakdong estuary tidal flat	54
Table 3-3-4. The habitat characteristics of <i>L. astacina</i> in Ganghwa tidal flat	57
Table 3-3-5. The habitat characteristics of <i>L. astacina</i> in Gomso tidal flat	59
Table 3-3-6. Mean density and environmental characteristics of <i>L. astacina</i> habitats in southwest coast tidal flats	60
Table 3-3-7. Dimensions of <i>L. astacina</i> burrow casts in Gomso tidal flat	63
Table 3-3-8. Dimensions of <i>L. astacina</i> burrow casts in Ganghwa tidal flat	67
Table 3-3-9. Dimensions of <i>L. astacina</i> burrow casts in Namhae island tidal flat	69
Table 3-3-10. Dimensions of <i>L. astacina</i> burrow casts in Changseon island tidal flat	71
Table 3-3-11. Dimensions of <i>L. astacina</i> burrow casts by habitat	75
Table 3-3-12. Environmental characteristics by habitat of <i>L. astacina</i>	76
Table 3-3-13. The collection area, morphometric data and the results of phylogenetic analysis of <i>L. astacina</i>	78
Table 3-3-14. The tidal condition of mound by elevation	83
Table 3-3-15. Comparison of mean sediment reworking, mean duration of submergence and mean sediment reworking rate by mound	87
Table 3-3-16. Comparison of composition and mean gain size of surface sediments, mound sediments, burrow sediments and ambient sediments between submergence and emergence	91

List of Figures

Fig. 1-1-1. Illustration of bioturbation by macroinvertebrates	20
Fig. 1-1-2. Comparison of distribution of oxygen layer by presence/absence burrow of macroinvertebrates in intertidal sediments	21
Fig. 1-1-3. Example of bioturbation effects on biogeochemical change of intertidal sediments	22
Fig. 1-2-1. Burrow morphology of <i>Callianassa truncata</i>	23
Fig. 1-2-2. A study for spatio-temporal change on bioturbation index of macroinvertebrates community	24
Fig. 1-2-3. A study for bioturbation index mapping of marine organism ..	24
Fig. 1-2-4. A study for burrow of macroinvertebrates in Korea	25
Fig. 1-2-5. A study for bioturbation of macroinvertebrates in Korea	26
Fig. 1-3-1. Objective of the present study	27
Fig. 2-1-1. Habitats of <i>L. astacina</i> in southwest coast tidal flats	32
Fig. 2-1-2. Production of resin casts of <i>L. astacina</i> with its 3D model	33
Fig. 2-2-1. Sediment trap for estimation of sediment reworking rate	34
Fig. 2-3-1. Mesocosm for analysis of internal environment of <i>L. astacina</i> burrow	35
Fig. 2-4-1. Flowchart of the present study	36
Fig. 3-2-1. Regions of resin casting of <i>L. astacina</i>	38
Fig. 3-2-2. Plastic fence for resin casting	39
Fig. 3-2-3. Analysis of burrow dimension using 3D model	39
Fig. 3-2-4. Regions for collection of <i>L. astacina</i> for classification	40
Fig. 3-2-5. Collected individuals of <i>L. astacina</i> for classification	41
Fig. 3-2-6. Sampling times for reworked sediments on the mound	42
Fig. 3-2-7. Differences in elevation among mounds	42
Fig. 3-2-8. Estimation of volume of reworked sediments	43
Fig. 3-2-9. Mesocosm design for analysis of internal environment of <i>L. astacina</i> burrow	45
Fig. 3-2-10. Front view and rear view of main tank	46
Fig. 3-2-11. Front view and lateral view of mesocosm	46
Fig. 3-2-12. <i>L. astacina</i> in Gomso tidal flat	47
Fig. 3-2-13. Automatic seawater circulation system and stabilization of	

sediments	47
Fig. 3-2-14. Burrow of <i>L. astacina</i> in the mesocosm	48
Fig. 3-2-15. Measurement of internal oxygen concentration of <i>L. astacina</i> burrow and surface features	48
Fig. 3-2-16. Sampling times for analysis of nutrients with <i>L. astacina</i>	49
Fig. 3-2-17. Sampling times for analysis of nutrients without <i>L. astacina</i>	50
Fig. 3-3-1. Habitats of <i>L. astacina</i> in Namhae island and Chagseon island tidal flats	51
Fig. 3-3-2. Habitats of <i>L. astacina</i> in Namhae island and Chagseon island tidal flats	52
Fig. 3-3-3. Habitat of <i>L. astacina</i> in Seomjingang estuary tidal flat	53
Fig. 3-3-4. Habitat of <i>L. astacina</i> in Nakdonggang estuary tidal flat	54
Fig. 3-3-5. Habitat of <i>L. astacina</i> in Hadori (Jeju island) tidal flat	55
Fig. 3-3-6. Habitats of <i>L. astacina</i> in Hadori (Jeju island) tidal flat and mound of <i>L. astacina</i>	56
Fig. 3-3-7. Habitat of <i>L. astacina</i> in Ganghwa tidal flat	56
Fig. 3-3-8. Habitats of <i>L. astacina</i> in Daebu island and Jebu island tidal flats	57
Fig. 3-3-9. Habitat of <i>L. astacina</i> in Geumgang estuary tidal flat	58
Fig. 3-3-10. Habitat of <i>L. astacina</i> in Gomso tidal flat	59
Fig. 3-3-11. Burrow cast of <i>L. astacina</i> in Gomso tidal flat	61
Fig. 3-3-12. Burrow casts of <i>L. astacina</i> in Gomso tidal flat	62
Fig. 3-3-13. Upper part of <i>L. astacina</i> burrow and surface features	63
Fig. 3-3-14. Burrow cast of juvenile in <i>L. astacina</i> Gomso tidal flat	64
Fig. 3-3-15. Burrow cast of <i>L. astacina</i> in Ganghwa tidal flat	65
Fig. 3-3-16. Burrow casts of <i>L. astacina</i> in Ganghwa tidal flat	66
Fig. 3-3-17. Burrow cast of <i>L. astacina</i> in Namhae island tidal flat	68
Fig. 3-3-18. Burrow casts of <i>L. astacina</i> in Namhae island tidal flat	69
Fig. 3-3-19. Burrow cast of <i>L. astacina</i> in Changseon island tidal flat	70
Fig. 3-3-20. Burrow casts of <i>L. astacina</i> in Changseon island tidal flat	71
Fig. 3-3-21. Morphology and dimensions of <i>L. astacina</i> by habitat	74
Fig. 3-3-22. COI results of <i>L. astacina</i> by habitat	79
Fig. 3-3-23. Difference in COI between A group and B group	79
Fig. 3-3-24. <i>L. astacina</i> in Ganghwa tidal flat	81
Fig. 3-3-25. <i>L. astacina</i> in Changseon island tidal flat	82
Fig. 3-3-26. Sediment reworking of <i>L. astacina</i> by mound	84
Fig. 3-3-27. Correlation between submergence time and sediment reworking by mound	85

Fig. 3-3-28. Correlation between tidal condition and sediment reworking 86

Fig. 3-3-29. Comparison of composition and mean grain size of surface sediments, mound sediments and burrow sediments between submergence and emergence 88

Fig. 3-3-30. Comparison of particle size distribution of mound sediments between submergence and emergence 89

Fig. 3-3-31. Comparison of particle size distribution between burrow sediments in submergence and mound sediments in emergence 89

Fig. 3-3-32. Differences in organic matter concentration of surface sediments, mound sediments, burrow sediments and ambient sediments .. 90

Fig. 3-3-33. Differences in oxygen concentration of burrow by depth with *L. astacina* according to tidal cycle 93

Fig. 3-3-34. Differences in oxygen concentration of burrow by depth without *L. astacina* according to tidal cycle 94

Fig. 3-3-35. Fluctuation of nutrients concentrations in 10cm burrow depth with *L. astacina* 96

Fig. 3-3-36. Fluctuation of nutrients concentrations in 20cm burrow depth with *L. astacina* 97

Fig. 3-3-37. Fluctuation of nutrients concentrations in 40cm burrow depth with *L. astacina* 98

Fig. 3-3-38. Fluctuation of nutrients concentrations in 10cm burrow depth without *L. astacina* 99

Fig. 3-3-39. Fluctuation of nutrients concentrations in 20cm burrow depth without *L. astacina* 100

Fig. 3-3-40. Fluctuation of nutrients concentrations in 40cm burrow depth without *L. astacina* 101

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	20
제 1 절 생물교란(Bioturbation)	20
제 2 절 연구의 필요성	23
제 3 절 연구의 최종목표	27
제 4 절 연구가설 및 도출근거	28
제 5 절 연차별 연구목표 및 연구내용	29
제 2 장 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용	32
제 1 절 1차년도 연구 수행 내용	32
제 2 절 2차년도 연구 수행 내용	34
제 3 절 3차년도 연구 수행 내용	35
제 4 절 연구 흐름도	36
제 3 장 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	37
제 1 절 연구개발과제의 목표 달성 정도	37
제 2 절 연구수행 방법	38
제 3 절 연구결과	51
제 4 절 종합결론	104
제 5 절 정량적 연구개발성과	105
제 4 장 연구개발성과의 중요성	108

제 5 장 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	109
제 1 절 연구개발성과의 활용방안	109
제 2 절 추가연구의 필요성	110
제 6 장 참고문헌	111

표 목 차

표 1-4-1. 본 연구의 연구가설 및 도출근거 요약	28
표 3-3-1. 남해도 가재붙이 서식지 특성	52
표 3-3-2. 창선도 가재붙이 서식지 특성	52
표 3-3-3. 낙동강 하구 가재붙이 서식지 특성	54
표 3-3-4. 강화도 가재붙이 서식지 특성	57
표 3-3-5. 곰소만 가재붙이 서식지 특성	59
표 3-3-6. 국내 서·남해안 갯벌 가재붙이 서식지의 평균 서식밀도 및 환경특성	60
표 3-3-7. 곰소만 갯벌 가재붙이 서식굴 표본 수치	63
표 3-3-8. 강화도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본 수치	67
표 3-3-9. 남해도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본 수치	69
표 3-3-10. 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본 수치	71
표 3-3-11. 가재붙이 서식지별 서식굴 평균 수치	75
표 3-3-12. 가재붙이 서식지별 환경특성	76
표 3-3-13. 가재붙이 채집지역, 개체정보 및 분자 계통학적 분석 결과	78
표 3-3-14. 가재붙이 실험구 둔덕 고도별 조석환경	83
표 3-3-15. 가재붙이 실험구 둔덕별 평균 재배치 퇴적물, 평균 침수시간 및 평균 퇴적 물재배치율	87
표 3-3-16. 침수 전·후 표층 퇴적물, 둔덕 퇴적물, 서식굴 내부 퇴적물 및 주변 퇴적물 의 조성 및 평균 입자 크기	91

그 립 목 차

그림 1-1-1. 저서동물에 의한 생물교란 모식도	20
그림 1-1-2. 갯벌 퇴적물에서 생물 서식굴 유무에 따른 산소층 분포 비교	21
그림 1-1-3. 갯벌 대형저서동물의 생물교란이 갯벌 퇴적층의 생지화학적 변화에 미치는 영향의 예	22
그림 1-2-1. <i>Callianassa truncata</i> 의 서식굴 구조 및 형태	23
그림 1-2-2. 대형저서동물 군집의 생물교란 지수의 시·공간 변화 연구	24
그림 1-2-3. 해양생물의 생물교란 지수 맵핑 연구	24
그림 1-2-4. 국내 갯벌 대형저서동물 서식굴 연구	25
그림 1-2-5. 국내 갯벌 대형저서동물의 생물교란 연구	26
그림 1-3-1. 본 연구의 최종목표	27
그림 2-1-1. 국내 서·남해안 가재붙이 서식지	32
그림 2-1-2. 가재붙이 서식굴 표본 및 3D 모델 제작 과정	33
그림 2-2-1. 퇴적물재배치를 산출을 위한 sediment trap	34
그림 2-3-1. 서식굴 내부 환경 분석을 위한 mesocosm과 가재붙이 개체	35
그림 2-4-1. 본 연구의 연구 흐름도	36
그림 3-2-1. 가재붙이 서식굴 표본 제작 지역	38
그림 3-2-2. 레진 투입 및 플라스틱 펜스 설치 모습	39
그림 3-2-3. 3D 모델을 이용한 서식굴 수치 분석	39
그림 3-2-4. 가재붙이 종 분류를 위한 개체 채집지역	40
그림 3-2-5. 종 분류를 위해 채집된 가재붙이 개체	41
그림 3-2-6. 가재붙이 둔덕에 재배치된 퇴적물 샘플링 시간	42
그림 3-2-7. 실험구 및 대조구의 고도 차이	42
그림 3-2-8. sediment trap을 이용해 채집한 퇴적물의 부피 측정	43
그림 3-2-9. 가재붙이 서식굴 내부 환경 분석을 위한 mesocosm 디자인	45
그림 3-2-10. 메인수조의 전면과 후면 디자인	46
그림 3-2-11. 제작된 mesocosm의 전면과 측면	46
그림 3-2-12. 곰소만 갯벌에서 채집한 가재붙이	47
그림 3-2-13. 자동해수유통 시스템과 퇴적물 안정화	47
그림 3-2-14. 가재붙이 서식굴 생성	48
그림 3-2-15. Visisens TD를 이용한 서식굴 내부 산소농도 측정 및 서식굴 표층 모습	48
그림 3-2-16. 가재붙이 개체가 있는 경우 영양염 분석을 위한 샘플링 시간	49

그림 3-2-17. 가재붙이 개체가 없는 경우 영양염 분석을 위한 샘플링 시간	50
그림 3-3-1. 남해도와 창선도 갯벌 가재붙이 서식지	51
그림 3-3-2. 남해도와 창선도 가재붙이 서식지	52
그림 3-3-3. 섬진강 하구 갯벌 가재붙이 서식지	53
그림 3-3-4. 낙동강 하구 갯벌 가재붙이 서식지	54
그림 3-3-5. 제주 하도리 갯벌 가재붙이 서식지	55
그림 3-3-6. 하도리 갯벌 가재붙이 서식지와 가재붙이 둔덕	56
그림 3-3-7. 강화도 가재붙이 서식지	56
그림 3-3-8. 대부도 및 제부도 갯벌 가재붙이 서식지	57
그림 3-3-9. 금강 하구 갯벌 가재붙이 서식지	58
그림 3-3-10. 곰소만 갯벌 가재붙이 서식지	59
그림 3-3-11. 곰소만 갯벌 가재붙이 서식굴 표본	61
그림 3-3-12. 곰소만 갯벌 가재붙이 서식굴 표본	62
그림 3-3-13. 가재붙이 서식굴 상층부와 갯벌 표층	63
그림 3-3-14. 곰소만 갯벌 가재붙이 어린개체의 서식굴 표본	64
그림 3-3-15. 강화도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본	65
그림 3-3-16. 강화도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본	66
그림 3-3-17. 남해도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본	68
그림 3-3-18. 남해도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본	69
그림 3-3-19. 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본	70
그림 3-3-20. 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본	71
그림 3-3-21. 가재붙이 서식지별 서식굴 크기 및 구조	74
그림 3-3-22. 서식지별 가재붙이 개체의 COI 분석 결과	79
그림 3-3-23. A 그룹과 B 그룹의 COI 차이	79
그림 3-3-24. 강화도 갯벌 가재붙이	81
그림 3-3-25. 창선도 갯벌 가재붙이	82
그림 3-3-26. 가재붙이 실험구 둔덕별 퇴적물재배치	84
그림 3-3-27. 가재붙이 실험구 둔덕별 침수시간과 퇴적물재배치 상관성	85
그림 3-3-28. 조석환경과 가재붙이 퇴적물재배치의 상관성	86
그림 3-3-29. 침수 전과 후의 표층 퇴적물, 둔덕 퇴적물 및 서식굴 내부 퇴적물의 조성 및 평균 입도 분포	88
그림 3-3-30. 침수 전·후 가재붙이 둔덕 퇴적물의 크기별 입자 분포	89
그림 3-3-31. 침수 전 서식굴 내부 퇴적물과 침수 후 둔덕 퇴적물의 크기별 입자 분포	89
그림 3-3-32. 표층 퇴적물, 둔덕 퇴적물, 서식굴 내부 퇴적물 및 주변 퇴적물의 유기물 농도 변화	90
그림 3-3-33. 가재붙이 개체가 있는 경우 조석주기에 따른 서식굴 깊이별 산소농도 변 화	93

그림 3-3-34. 가재붙이 개체가 없는 경우 조석주기에 따른 서식굴 깊이별 산소농도 변화	94
그림 3-3-35. 가재붙이 개체가 있는 경우 10cm 깊이의 영양염 농도 변화	96
그림 3-3-36. 가재붙이 개체가 있는 경우 20cm 깊이의 영양염 농도 변화	97
그림 3-3-37. 가재붙이 개체가 있는 경우 40cm 깊이의 영양염 농도 변화	98
그림 3-3-38. 가재붙이 개체가 없는 경우 10cm 깊이의 영양염 농도 변화	99
그림 3-3-39. 가재붙이 개체가 없는 경우 20cm 깊이의 영양염 농도 변화	100
그림 3-3-40. 가재붙이 개체가 없는 경우 40cm 깊이의 영양염 농도 변화	101

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 생물교란(Bioturbation)

1. 생물교란의 정의

갯벌 생물은 생존을 위해 퇴적물을 파헤쳐 서식굴(burrow)을 만들며, 물이 들어왔을 때 굴 내부로 산소와 먹이원을 공급하고 신진대사 물질을 배출하기 위해 관개(irrigation) 활동을 한다. 생물활동에 의해 퇴적물과 물의 위치이동과 혼합이 일어나게 되고 이러한 현상을 생물교란이라 정의하며, 이 의미에는 넓게는 관개활동도 포함된다(그림 1-1-1).

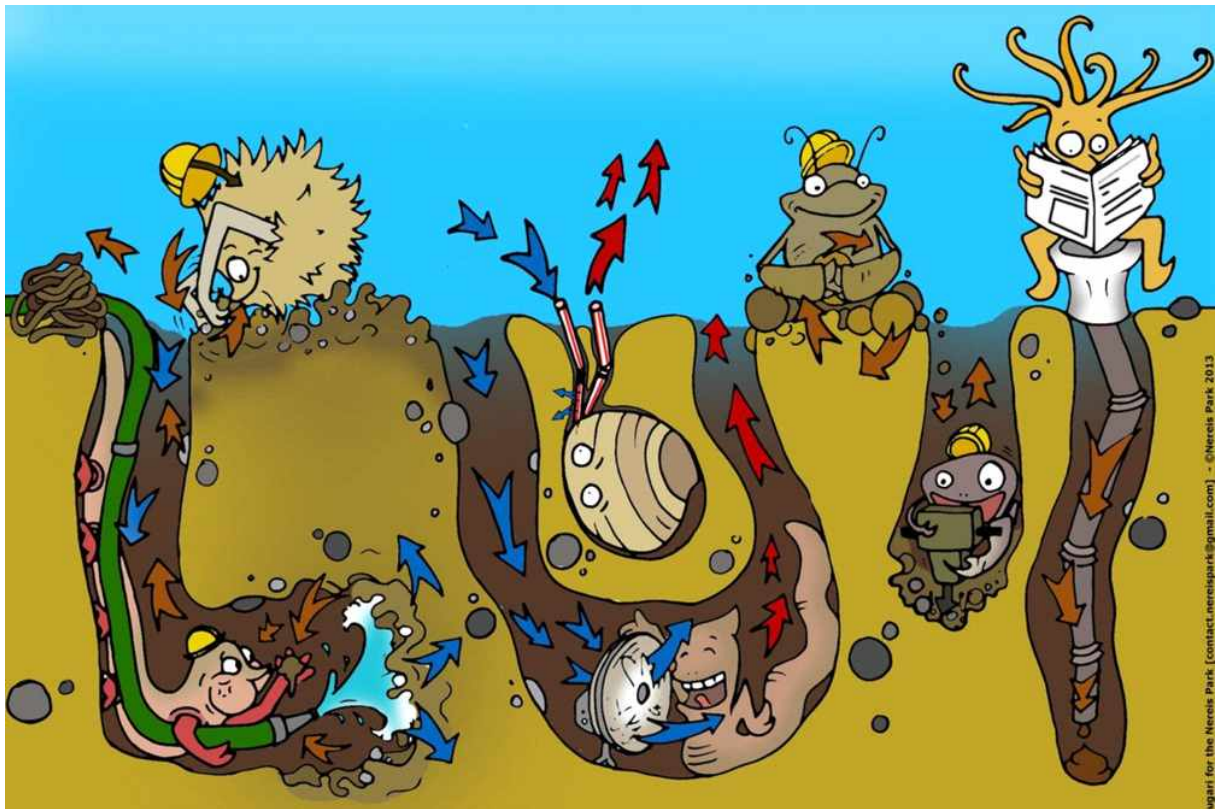


그림 1-1-1. 저서동물에 의한 생물교란 모식도
(출처 <http://www.nereispark.org/divers/NPretsop/index.php3>)

2. 생물교란의 생태적 역할

해양 퇴적물에서 일어나는 생지화학적 과정과 이와 연관된 미생물 군집은 깊이에 따른 수직분포를 한다. 일반적으로 해양환경에서 퇴적물 속으로의 산소 유입은 표층 수 mm로 제한되며, 그 정도는 수층으로부터 확산에 의한 산소 공급과 퇴적물 내부에서의 산소 소비 사이의 균형에 의해 조절된다. 생물교란이 없는 퇴적물에서 유기물 분해는 수직적으로 층서화된 일련의 반응에 따라 일어난다[1,2].

상층의 산소층, 그 아래 깊이의 질산염, 망간(IV)이온, 철(III)이온이 전자수용체로 이용되는 준산소층, 마지막으로 황산염환원과 메탄환원이 일어나는 빈산소층. 그러나 생물이 서식굴을 파는 등의 생물교란 활동은 퇴적물 내 이러한 물리적인 구조를 깨뜨리며, 궁극적으로는 화학종의 층서화된 분포와 퇴적물-물 경계면에서의 물질교환과 같은 일련의 생지화학적 프로세스에도 영향을 준다(그림 1-1-2).

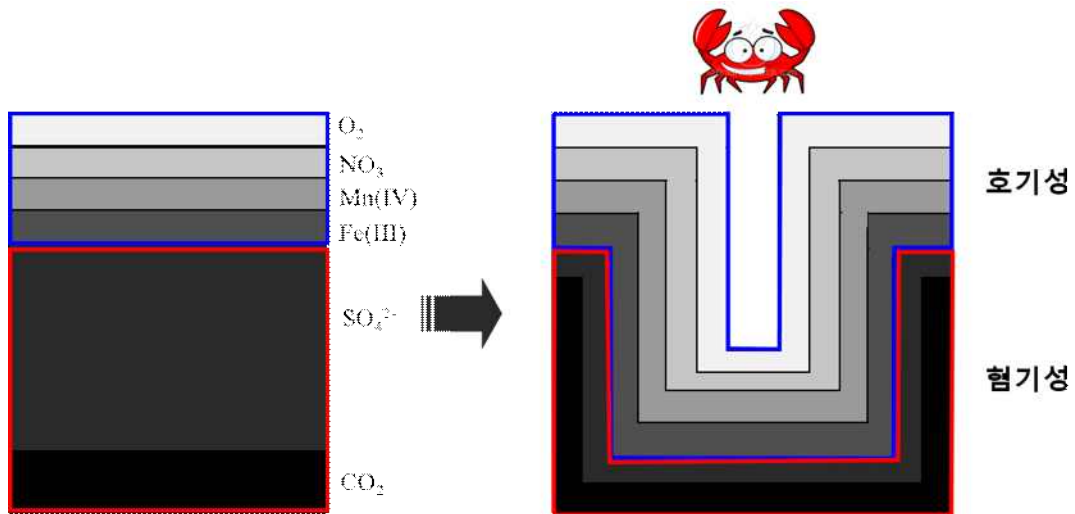


그림 1-1-2. 갯벌 퇴적물에서 생물 서식굴 유무에 따른 산소층 분포 비교
서식굴이 없는 경우 퇴적물의 산소층 분포(왼쪽),
서식굴이 있는 경우 퇴적물의 산소층 분포(오른쪽)

생물교란 활동을 통해 혐기성 퇴적물 속에 호기성 조건의 환경이 만들어지고, 이는 퇴적물 내 산화매개체와 환원화합물 간의 다차원적인 확산 패턴을 만든다. 이러한 산화환원 조건의 혼합은 호기성 유기물 분해뿐만 아니라 준호기성 및 혐기성 유기물 분해까지도 촉진한다. 일반적으로 갯벌 퇴적물내 서식굴은 생물의 관개활동과 굴을 유지하기 위한 활동 등에 의해 대부분의 시기동안 산소가 유지된다. 그러므로 생물의 서식굴은 혐기성 퇴적물 깊은 곳까지 산소를 공급한다.

산소는 퇴적물 내 생지화학적 프로세스를 조절하는 가장 중요한 요소이다. 즉, 생물이 만든 서식굴은 퇴적물과 물이 만나는 접촉 면적을 증가시켜 퇴적물과 해수 간의 물질교환이 일어나는 경계면을 증가시킨다.

혐기성 환경으로의 산소 공급을 통해 유기물을 분해하는 미생물의 활성을 증가시킨다. 생물의 서식굴 활동을 포함하는 생물교란은 혐기성 환경으로의 산소 공급과 함께 미생물 성장에 필요한 다른 전자수용체 및 신선한 유기물의 공급, 그리고 수층과의 해수교환을 통한 활발한 물질교환 등을 통해 호기성 및 혐기성 미생물 활동을 촉진시켜 궁극적으로는 퇴적물 내 유기물 분해력을 향상시키고 물질교환을 촉진시키는 역할을 한다(그림 1-1-3).

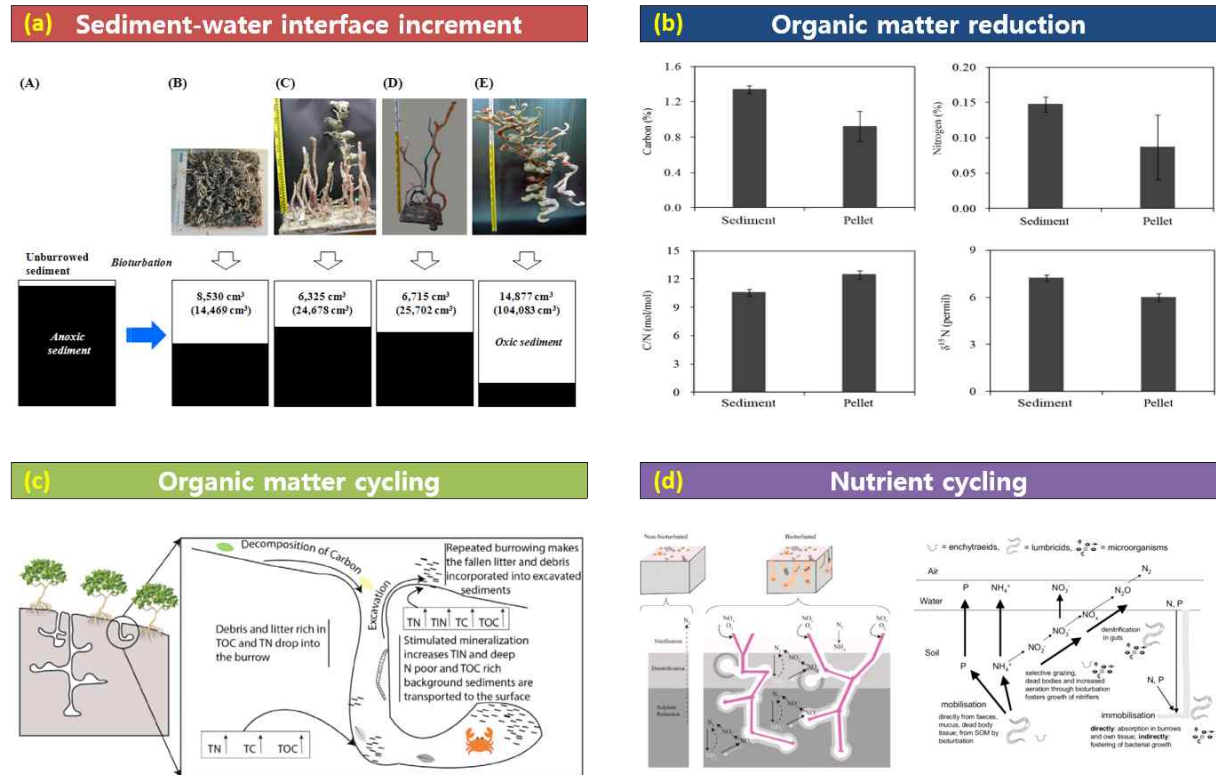


그림 1-1-3. 갯벌 대형저서동물의 생물교란이 갯벌 퇴적층의 생지화학적 변화에 미치는 영향의 예 (a) 갯벌 대형저서동물 서식굴에 의한 퇴적물-물 경계면 증가, (b) 칠게 섭식활동에 의한 표층 퇴적물의 유기물 제거, (c) 갯벌 대형저서동물 서식굴 생성, 유지 및 보수에 의한 유기물 순환, (d) 갯지렁이의 섭식 및 배설활동에 의한 영양염 순환

제 2 절 연구의 필요성

1. 국외 연구동향

(가) 대형저서동물 서식굴 연구

갯벌 저서동물의 서식굴 형태, 특히 큰 규모의 서식굴을 생성하는 십각류의 서식굴 형태는 레진 캐스팅(Resin casting) 방법의 전개와 함께 밝혀지기 시작했다. 1976년 Pemberton 등은 쪽 상과(Thalassinidea)에 해당하는 십각류의 서식굴 깊이가 2.5m에 이른다는 보고를 하였으며, 1996년 Ziebis 등은 이탈리아 지중해 연안의 *Callianassa truncata*의 서식굴의 복잡하고 특별한 구조(그림 1-2-1)에 대해 보고하였다[3,4]. 이후 와덴해의 갯벌 저서동물 서식굴 구조를 종별로 일반화하려는 시도가 있었으나 일부 국한된 종에 대한 기술에 그쳤으며, 서식굴 관련 연구는 대부분이 특정 종의 생태적 특징을 연구하는 과정에 부분 항목으로 포함시켜 연구가 진행되었기 때문에 세계적으로도 단편적인 결과만이 있다[5].

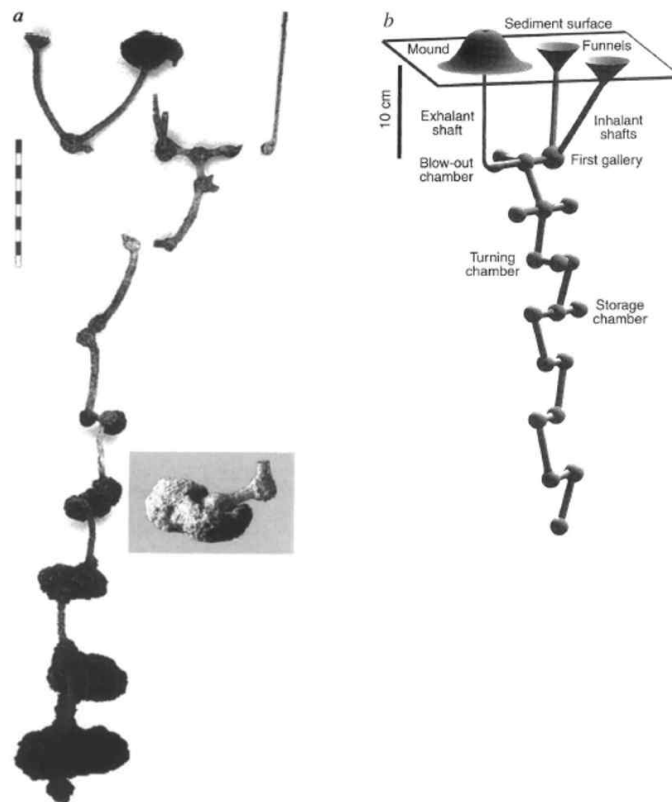


그림 1-2-1. *Callianassa truncata*의 서식굴 구조 및 형태 (a) 레진 캐스팅을 이용해 제작된 서식굴 표본, (b) 서식굴 3D 모델

(나) 대형저서동물 생물교란 연구

국외에서는 생물교란 전문가 모임인 'Nereis Park'을 중심으로 대형저서동물 개별종의 생물교란이 해양 퇴적물의 생지화학적 프로세스, 미생물 군집, 수층과 퇴적물 경계면에서의 물질순환 등에 미치는 영향 관련한 연구 결과를 상호 자료 공유하고 있으며, 활발한 연구 활동을 하고 있다. sediment type, 지역, 개별종에 따른 생물교란 연구가 수행되고 있으며 개별종의 생물교란의 영향을 지수화하여 지역별, 종별 생물교란의 차이를 산출하는 연구가 수행되고 있다(그림 1-2-2). 이러한 개별종의 생물교란 자료를 바탕으로 지역 또는 sediment type별 생물교란 잠재력을 추정하고 서식밀도와 생물량에 따라 생물교란 영향이 높은 key species를 찾아내는 연구가 수행되고 있다[6].

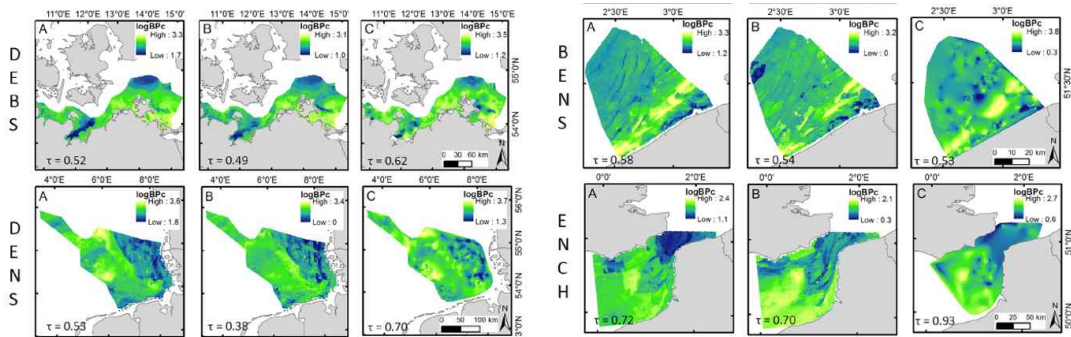


그림 1-2-2. 대형저서동물 군집의 생물교란 지수의 시·공간 변화 연구

최근에는 개별종의 생물변위작용 영향을 넘어 이를 공간화하는 연구가 수행되고 있다(그림 1-2-3). 공간화된 생물변위작용 자료를 바탕으로 생물변위작용의 시공간적 변화를 예측하고, 특정 지역을 벗어나 전지구적인 생물변위작용 맵핑 연구가 수행되고 있다[6,7].

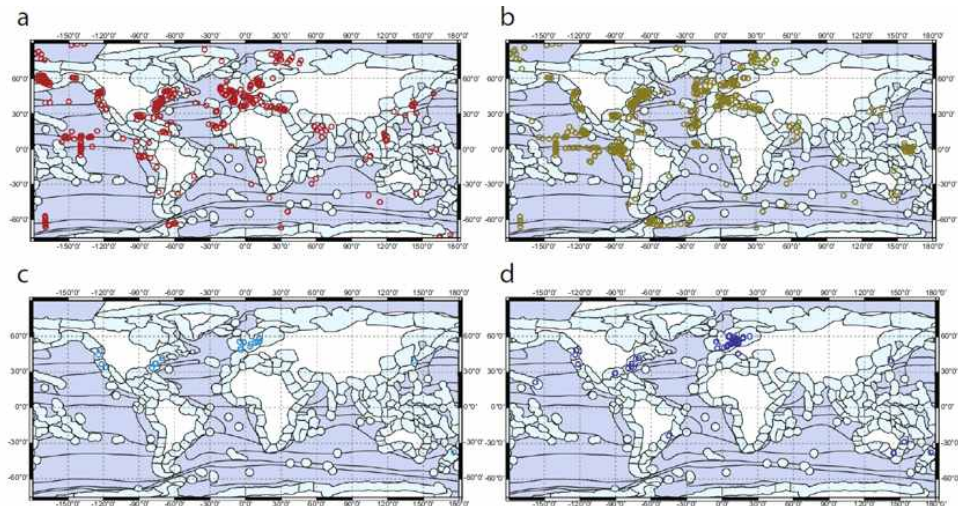


그림 1-2-3. 해양생물의 생물교란 지수 맵핑 연구 (a) biodiffusion, (b) sediment mixing, (c) ventilation, (d) ventilation rate

2. 국내 연구동향

(가) 대형저서동물 서식굴 연구

국내의 대형저서동물 서식굴 연구는 2005년 구 등에 의해 강화도 갯벌의 철게 (*Macrophthalmus japonicus*) 세스랑게(*Cleistostoma dilatatum*), 두토막눈썸참갯지렁이 (*Perinereis aibuhitensis*), 흰이빨참갯지렁이(*Periserrula leucophryna*)의 서식굴 구조가 보고되었으며[8], 2009년 새만금 갯벌의 가재붙이(*Laomedea astacina*) 서식굴 구조와 2016년 국내 서·남해안 갯벌 대형저서동물 21종의 서식굴 구조 연구[2,5]를 제외하고 국내 대형저서동물 서식굴 연구는 전무한 상황이다(그림 1-2-4).

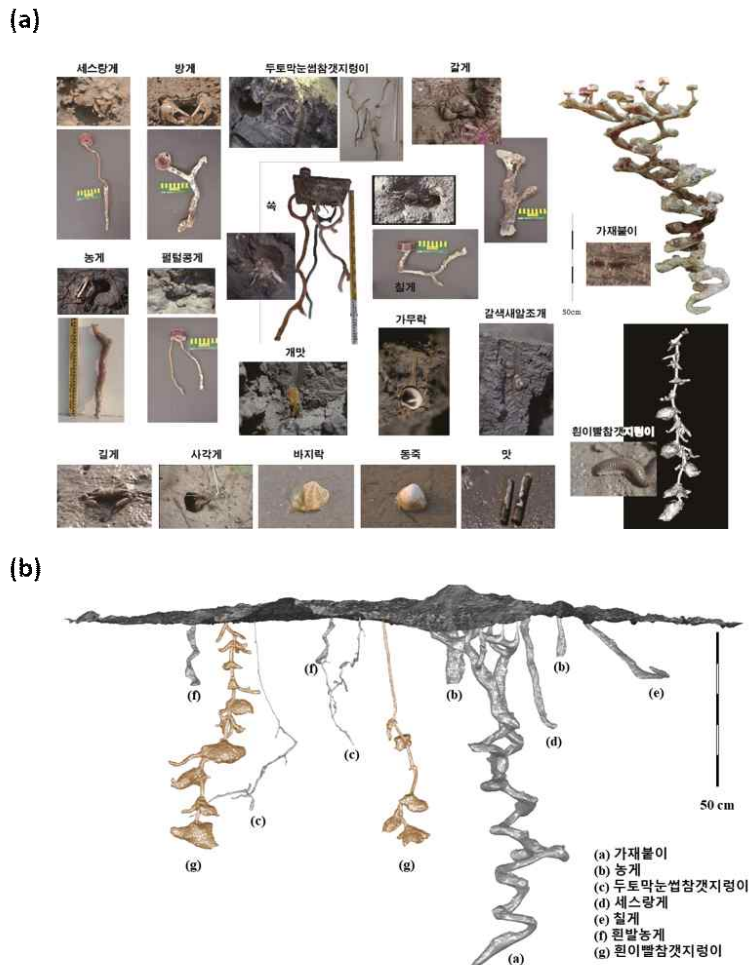


그림 1-2-4. 국내 갯벌 대형저서동물 서식굴 연구
 (a) 국내 갯벌 대형저서동물 21종의 서식굴 구조 및 형태, (b) 국내 갯벌 대형저서동물의 서식굴 3D 모델

(나) 대형저서동물 서식굴 연구

국내의 대형저서동물 생물교란 연구는 강화도 갯벌 칠게(*M. japonicus*) 섭식활동에 의한 유기물 제거[9], 근소만 갯벌 바지락(*Ruditapes philippinarum*)의 여과활동에 의한 유기물 제거[10], 곰소만 갯벌 두토막눈썹참갯지렁이(*P. aibuhitensis*)의 섭식활동에 의한 퇴적물재배치 및 유기물 제거[11], 안면도 갯벌 엽낭게(*Scopimera globosa*)의 섭식활동에 의한 퇴적물재배치 및 엽록소 제거[12], 강화도 갯벌 대형저서동물 군집에 의한 퇴적물-물 경계면 증가[13] 등의 제한적인 연구만 수행되었으며 국외의 생물교란 연구와의 격차가 큰 상황이다(그림 1-2-5).

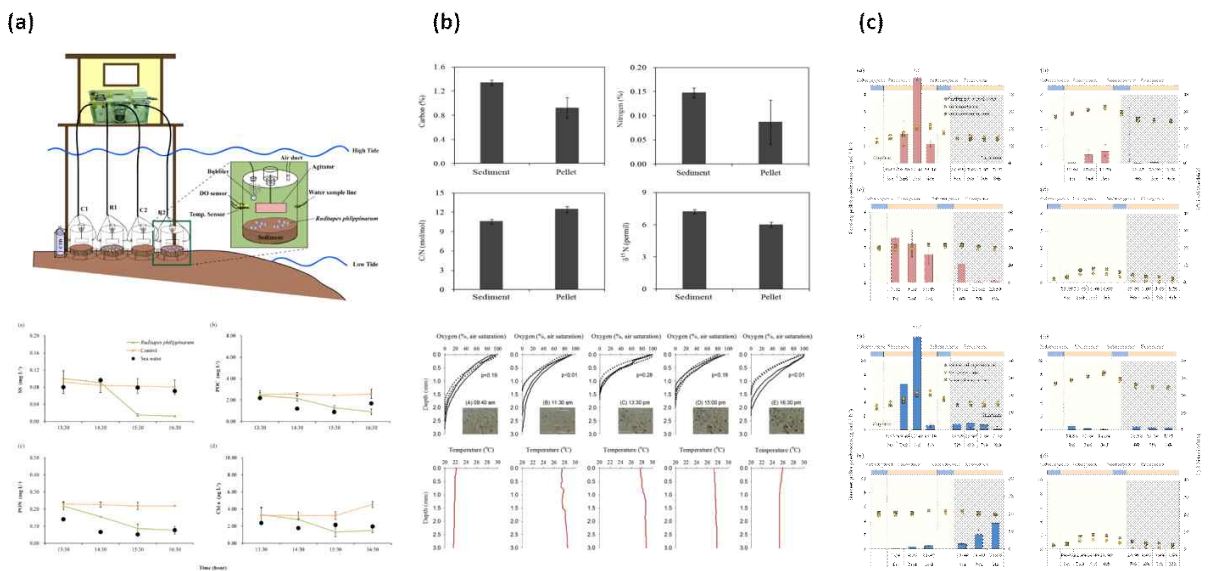


그림 1-2-5. 국내 갯벌 대형저서동물의 생물교란 연구

(a) 바지락의 여과활동에 의한 입자성 유기물 제거 연구, (b) 칠게 섭식활동에 의한 표층 퇴적물 유기물 제거 및 칠게 표층활동에 의한 퇴적물 산소투과 깊이 변화 연구, (c) 엽낭게의 섭식 및 서식굴 활동에 의한 퇴적물재배치 연구

제 3 절 연구의 최종목표

가재붙이는 절지동물문의 갑각강 십각목 가재붙이과에 해당하는 펄새우류의 일종으로 이 종의 생태학적 특징에 대한 정보는 거의 알려져 있지 않다. 본 연구팀의 선행연구 결과 가재붙이의 몸 길이는 5-8cm인 반면에 서식굴은 최대 2m 깊이, 부피는 최대 18,163cm³, 표면적은 최대 16,179cm²의 큰 규모의 서식굴을 형성하며, 나선형으로 길게 꼬인 복잡한 구조를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 가재붙이 서식굴은 현재까지 알려진 해양무척추동물의 서식굴 중에서 가장 큰 것으로 추정되고 있다.

대형저서동물의 서식굴은 층서화된 퇴적물의 물리적인 구조를 깨뜨려 퇴적물-물 경계면을 증가시켜 혐기성 환경에 산소를 공급하고 수층과의 해수교환을 통해 물질교환을 촉진시키는 역할을 한다. 현재까지 보고되어진 해양무척추동물의 서식굴에 의한 퇴적물-물 경계면의 증가율은 50-400%인 반면, 가재붙이 서식굴에 의해 최대 1,044%가 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 가재붙이와 같이 큰 규모의 서식굴을 생성하는 종의 생물교란은 작은 규모의 서식굴을 생성하는 종의 그것에 비해 퇴적층의 생지화학적 프로세스 및 물질교환에 미치는 영향이 지대함을 의미한다. 하지만, 가재붙이 서식굴의 이러한 생태적 중요성에도 불구하고 가재붙이의 생물교란에 관한 연구는 부족한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 (1) 서식지별 가재붙이 서식굴 수치, 구조 및 형태 분석, (2) 가재붙이 퇴적물재배치율 및 유기물 순환 분석, (3) 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 및 영양염 순환 분석을 통해 현재까지 연구되어지지 않은 가재붙이의 생태특성 및 서식굴에 의한 생물교란 자료를 축적하고자 한다 (그림 1-3-1).

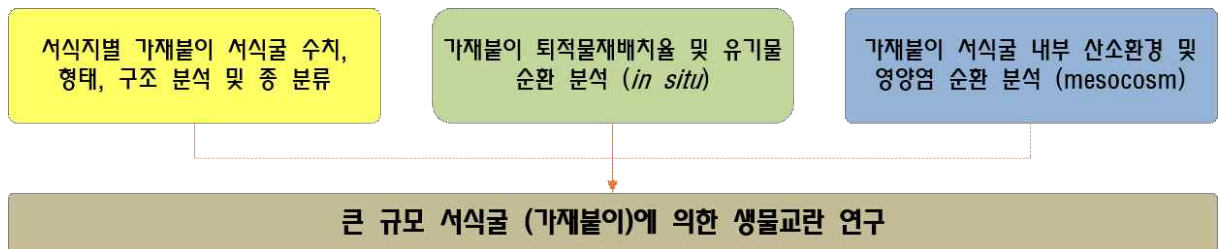


그림 1-3-1. 본 연구의 최종목표

제 4 절 연구가설 및 도출근거

1. 본 연구팀의 선행 연구 결과 각기 다른 지역의 갯벌에서 제작한 가재붙이 서식굴 표본 5점의 크기, 형태 및 구조에서 차이를 보였다. 이에 근거해 가재붙이서식지 환경에 따라 서식굴의 크기, 형태 및 구조가 다를 것으로 추정되며 이의 원인은 가재붙이 중간차이 또는 서식지 환경특성 때문일 것으로 추정된다.

2. 본 연구팀의 선행 연구 결과 조석주기 및 서식환경은 갯벌 대형저서동물의 퇴적물 재배치 및 유기물 제거에 영향을 미치는 주요 요인으로 나타났으며 이에 따라 서식환경에 따라 가재붙이의 퇴적물재배치율 및 유기물 순환이 다르게 나타날 것으로 추정된다.

3. 본 연구팀의 선행 연구 결과 가재붙이 서식굴 내부 산소환경은 조석주기에 따라 다르게 나타났으며, 이에 근거해 가재붙이의 행동, 위치이동과 같은 생물교란에 따라 서식굴 내부 산소환경이 다를 것으로 추정된다. 또한, 가재붙이 서식굴 내부 산소환경은 가재붙이의 관개활동에 의해 변화하므로 개체 유무에 따라 서식굴 내부 산소환경이 변할 것으로 추정된다.

4. 가재붙이 서식굴 내부 burrow water는 조석주기에 의한 해수에 침수 및 가재붙이 관개활동에 의한 해수의 배출에 의해 순환하며 가재붙이의 활동에 의해 농도가 변화한다. 이에 따라, 가재붙이 서식굴 내부 burrow water의 영양염 농도 및 순환은 조석주기와 개체 유무에 따라 변화할 것으로 추정된다.

표 1-4-1. 본 연구의 연구가설 및 도출근거 요약

연구목표	연구가설	도출근거
서식지별 가재붙이 서식굴 수치, 형태 및 구조 분석	서식지별 가재붙이 서식굴 수치, 형태 및 구조가 다름	선행연구 결과 서식지별 가재붙이 서식굴 차이 확인
	중간차이 또는 서식지 환경특성에 따라 가재붙이 서식굴 수치, 형태 및 구조 차이가 발생함	선행연구 결과 서식굴 크기는 환경특성에 의해 달라지며 서식굴 구조 및 형태는 중간차이에 의해 달라짐
가재붙이 퇴적물재배치율 및 유기물 순환 분석	조석주기 및 서식환경에 따라 퇴적물재배치 및 유기물 순환이 다름	선행연구 결과 조석주기 및 서식환경은 갯벌 대형저서동물의 퇴적물재배치 및 유기물 제거 차이에 주요한 원인임을 확인
가재붙이 서식굴 내부 산소환경 및 영양염 순환 분석	조석주기 및 개체 유무에 따라 서식굴 내부 산소환경 및 영양염 순환이 다름	선행연구 결과 조석주기에 따라 가재붙이 서식굴 내부 산소환경의 차이를 확인

제 5 절 연차별 연구목표 및 연구내용

1. 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용 및 범위
1차 년도	서식지별 가재붙이 서식굴 수치, 형태 및 구조 분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 서식굴 표본 및 3D 모델 제작 <ul style="list-style-type: none"> - 레진 캐스팅을 이용한 가재붙이 서식굴 표본 제작 - 3D 스캐닝을 이용한 서식굴 3D 모델 제작 ○ 서식굴 수치, 구조 및 형태 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 3D 모델을 이용한 서식굴의 길이, 깊이, 표면적, 부피의 수치 분석 - 3D 모델을 이용한 서식굴 구조 및 형태 분석 ○ 서식지 환경요인 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 가재붙이 서식지의 퇴적상 및 노출시간 분석 ○ 가재붙이 재분류 <ul style="list-style-type: none"> - 서식지별 가재붙이의 형태 및 유전적 차이 분석
2차 년도	가재붙이 퇴적물재배치율 및 유기물 순환 분석 (<i>in situ</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가재붙이 관개활동에 의한 퇴적물재배치율 산출 <ul style="list-style-type: none"> - sediment trap을 이용한 퇴적물재배치율 산출 - 서식고도(노출시간)에 따른 가재붙이 퇴적물재배치율 변화 분석 ○ 가재붙이 관개활동에 의한 유기물 순환 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 침수 전·후 가재붙이 서식굴 내부, 둔덕(mound), 표층 퇴적물의 유기물 농도 변화 분석
3차 년도	가재붙이 서식굴 내부 산소환경 및 영양염 순환 분석 (mesocosm)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 조석주기 및 개체 유무에 따른 서식굴 내부 깊이별 산소환경 변화 분석 ○ 가재붙이 서식굴 내부 영양염 순환 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 조석주기 및 개체 유무에 따른 서식굴 내부 영양염 농도 변화 분석

2. 당초 계획 및 변경 내용 비교

연차	당초 연구목표 및 연구내용		변경 연구목표 및 연구내용	
	연구목표	연구내용	연구목표	연구내용
1차 년도	가재붙이 서식굴 형태 및 구조 분석	가재붙이 서식굴 표 본 및 3D 모델 제작	서식지별 가재붙이 서식굴 수치, 형태 및 구조 분석	가재붙이 서식굴 표 본 및 3D 모델 제작
		서식굴 수치, 구조 및 형태 분석		서식굴 수치, 구조 및 형태 분석
				가재붙이 서식지 확 인
				서식지 환경요인 분 석
				가재붙이 재분류
2차 년도	가재붙이 서식굴 내부 퇴적물의 유기물 및 미생물 분포 분석 (<i>in situ</i>)	조석주기에 따른 서 식굴 내부 산소환경 변화 분석	가재붙이 퇴적물재배치율 및 유기물 순환 분석 (<i>in situ</i>)	
		조석주기에 따른 서 식굴 내부 퇴적물 유기물 농도 변화 분석		조석주기에 따른 서 식굴 내부 퇴적물 유기물 농도 변화 분석
		서식굴 내부 퇴적물 의 미생물 군집 분 석		
				관개활동에 의한 퇴 적물재배치율 산출
				관개활동에 의한 유 기물 순환 분석
3차 년도	가재붙이의 생물교란에 의한 산소환경 영향 분석 (mesocosm)	가재붙이 행동 및 관개율 분석	가재붙이 서식굴 내부 산소환경 및 영양염 순환 분석 (mesocosm)	
		조석주기에 따른 서 식굴 내부 산소환경 변화 분석		조석주기 및 개체 유무에 따른 서식굴 내부 산소환경 변화 분석
				조석주기 및 개체 유무에 따른 서식굴 내부 영양염 순환 분석

가. 1차년도 연구 수행 결과 가재붙이 서식굴 수치, 구조 및 형태가 서식지별로 다르게 나타났으며 이의 원인 규명을 위해 서식지 환경요인 분석과 가재붙이 재분류 연구를 추가로 수행하였다.

나. 당초 2차년도는 mesocosm 연구를 계획했으나 가재붙이 서식굴 내부 환경 분석을 위한 최적 mesocosm 디자인 및 제작을 위해 2차년도와 3차년도 연구내용을 교환하였다.

다. 2차년도의 당초 계획이었던 조석주기에 따른 서식굴 내부 산소환경 변화 분석(*in situ*)는 현장 갯벌 서식굴을 대상으로 현장관찰구를 설치하여 수행하려 했으나 현장 갯벌 특성상 대상으로 하는 깊이의 가재붙이 서식굴이 현장관찰구에 접하지 않을 가능성이 높기 때문에 mesocosm 실험으로 대체하였다.

라. 2차년도의 당초 계획이었던 가재붙이 서식굴 내부 퇴적물의 미생물 군집 분석은 서식굴 내부 퇴적물 환경을 미생물 군집 결과만을 가지고 해석하기에 무리가 있다고 판단해 수행하지 않았으며, 관개활동에 의한 퇴적물재배치율과 유기물 순환 연구를 수행하였다.

마. 3차년도의 당초 계획이었던 가재붙이 행동 및 관개율 분석을 수행하지 못하였다. mesocosm은 가재붙이의 행동관찰을 위해 앞면은 sampling port를 설치하지 않고 뒷면에만 burrow water를 채집할 수 있는 sampling port를 설치하였으나, 가재붙이 서식굴이 앞면에는 접하지 않고 sampling port가 설치된 뒷면에만 접하여 행동관찰을 수행하지 못하였다.

바. 가재붙이의 관개율은 둔덕(mound)과 함입구(funnel)를 통해 유입 및 유출되는 해수의 양을 이용해 분석하고자 하였으나 mesocosm 실험 시 mesocosm의 공간적 제약과 실제 현장 갯벌과 다른 조석(유속, 유량 등)으로 인해 둔덕이 생성되지 않아 관개율 측정을 수행하지 못하였다.

제 2 장 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

제 1 절 1차년도 연구 수행 내용

1. 국내 서·남해안 갯벌 가재붙이 서식지 확인 및 서식지 환경요인 분석

국내 서·남해안 주요 갯벌 탐사를 통해 가재붙이 서식지 및 서식밀도를 확인하였다. 서해안 갯벌 중 강화도, 대부도, 제부도, 금강, 곰소만 갯벌의 가재붙이 서식지를 탐사하였으며, 남해안 갯벌 중 섬진강 하구, 남해도, 창선도, 낙동강 하구, 제주도 갯벌을 탐사하였다(그림 2-1-1). 가재붙이 서식지 표층 퇴적물을 채집하여 퇴적물 입도, 조성 등의 퇴적상을 분석하였으며, RTK-DGPS를 이용하여 서식지 고도를 측량하였다.



그림 2-1-1. 국내 서·남해안 가재붙이 서식지

2. 가재붙이 서식굴 표본 3D 모델 제작 및 수치, 구조, 형태 분석

국내 서·남해안 가재붙이 서식지 중 강화도, 곰소만, 남해도, 창선도 총 4곳의 갯벌에 가재붙이 서식굴 표본을 제작하였다. 가재붙이 서식굴 표본은 경화수지에 경화제를 3%의 비율(v/v)로 혼합하여 레진을 제조한 후 가재붙이 둔덕(mound)에 투입하여 표본을 제작하였다(그림 2-1-2). 둔덕과 함입구(funnel) 상부까지 레진이 투입되는 것을 확인한 후 약 72시간 동안 경화시키고 주변 퇴적물을 조심스럽게 제거하여 경화된 서식굴 표본을 채집하였다. 채집된 표본은 파손되지 않게 조심하여 실험실로 운반한 후 3D 스캐너를 이용하여 3D 모델을 제작하였다. 제작된 서식굴 3D 모델을 이용해 서식굴의 길이, 깊이, 표면적, 부피, 챔버 개수, 챔버 부피 등의 수치와 구조 및 형태를 분석하였다.

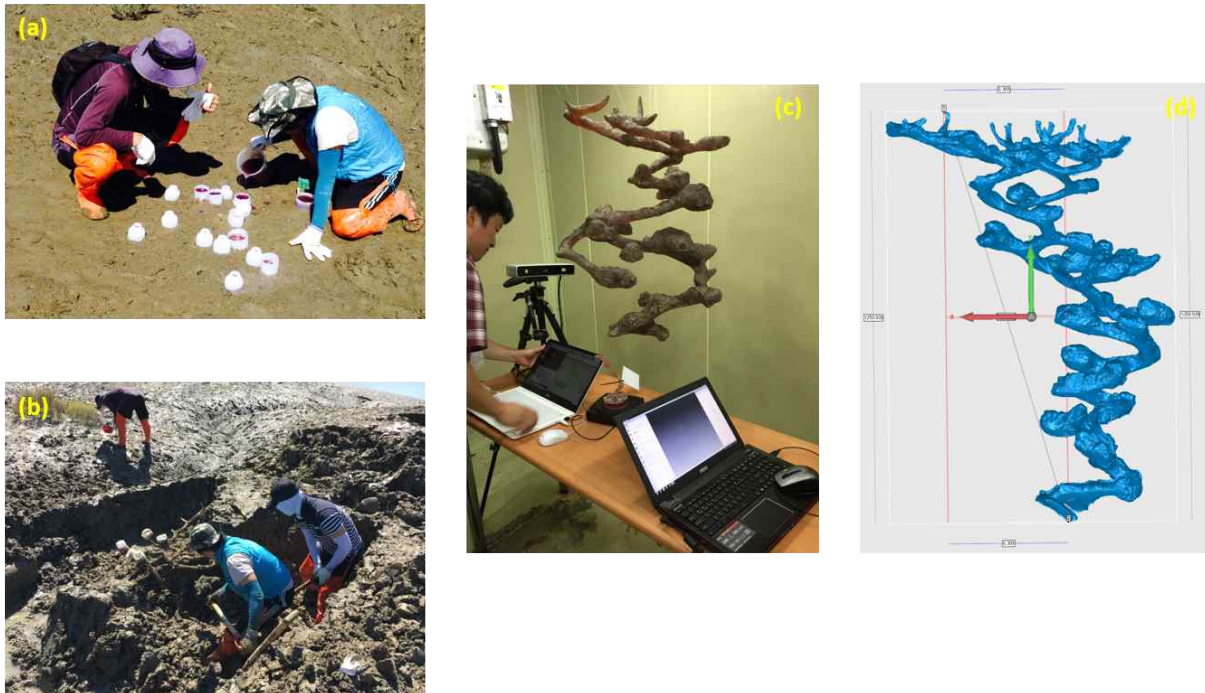


그림 2-1-2. 가재붙이 서식굴 표본 및 3D 모델 제작 과정

(a) 가재붙이 둔덕 (mound)에 레진 투입, (b) 서식굴 표본 채집, (c) 3D 스캐너를 이용한 3D 모델 제작, (d) 서식굴 수치, 구조 및 형태 분석

3. 가재붙이 재분류

가재붙이 생물표본을 채집 후 형태관찰 및 분자 계통발생학적 분석을 통해 강화도 갯벌 가재붙이 종을 재분류하였다.

제 2 절 2차년도 연구 수행 내용

1. 가재붙이 관개활동에 의한 퇴적물재배치율 산출

가재붙이의 관개활동에 의한 퇴적물재배치율 산출을 위해 곶소만 갯벌에서 sediment trap을 이용하여 침수시 둔덕을 통해 배출되는 퇴적물을 채집하였다(그림 2-2-1). 서식고도(노출시간)에 따른 가재붙이 퇴적물재배치율 차이 분석을 위해 각각 서식고도가 다른 가재붙이 서식굴을 선택하여 퇴적물재배치율을 비교하였다.



그림 2-2-1. 퇴적물재배치율 산출을 위한 sediment trap

2. 가재붙이 관개활동에 의한 유기물 순환 분석

가재붙이의 관개활동에 의한 유기물 순환 분석을 위해 곶소만 갯벌에서 침수 전·후 깊이별 가재붙이 서식굴 내부 퇴적물, 서식굴 내부 퇴적물과 동일한 깊이의 주변 퇴적물, 둔덕(mound) 퇴적물, 표층 퇴적물을 채집하여 침수 전·후 유기물 농도를 비교하여 가재붙이의 관개활동에 의한 유기물 순환을 분석하였다.

제 3 절 3차년도 연구 수행 내용

1. 가재붙이 관개활동에 의한 퇴적물재배치율 산출

mesocosm과 조석모의시스템을 이용해 실제 현장갯벌과 유사한 환경을 모의하여 조석 주기 및 개체 유무에 따른 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 변화를 분석하였다(그림 2-3-1). 조석모의시스템을 이용해 사리와 조금 조건을 모의하여 해수의 침수차이에 따른 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 변화를 측정하였다. 가재붙이 개체가 있는 경우와 개체를 제거한 경우 조석주기에 따른 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 변화를 측정하였다.

2. 가재붙이 서식굴 내부 영양염 순환 분석

mesocosm과 조석모의시스템을 이용해 실제 현장갯벌과 유사한 환경을 모의하여 조석 주기 및 개체 유무에 따른 가재붙이 서식굴 내부 영양염 순환을 분석하였다(그림 2-3-1). 조석모의시스템을 이용해 사리와 조금 조건을 모의하여 해수의 침수차이에 따른 가재붙이 서식굴 내부 영양염 농도 변화를 측정하였으며, 가재붙이 개체가 있는 경우와 개체를 제거한 경우 조석주기에 따른 가재붙이 서식굴 내부 영양염 농도 변화를 분석하였다.

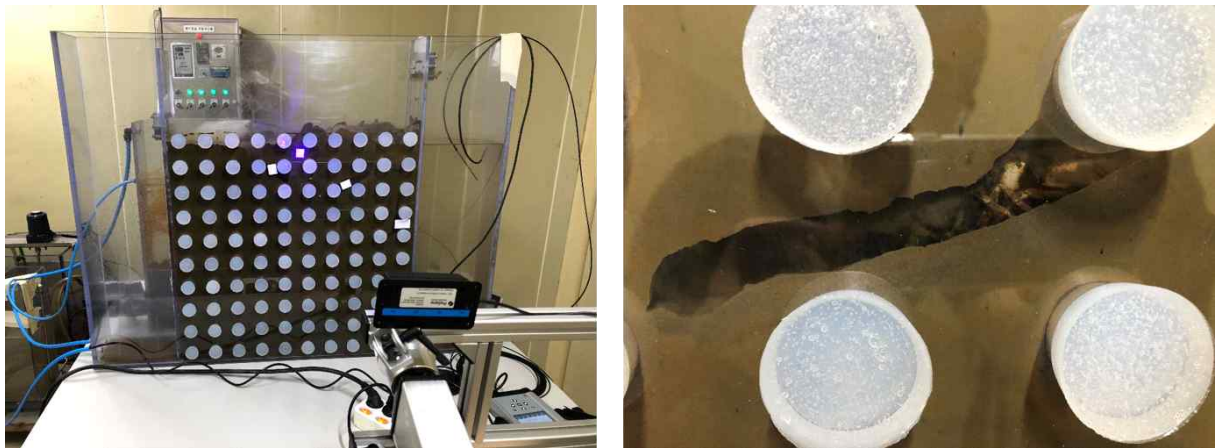


그림 2-3-1. 서식굴 내부 환경 분석을 위한 mesocosm과 가재붙이 개체

제 4 절 연구 흐름도

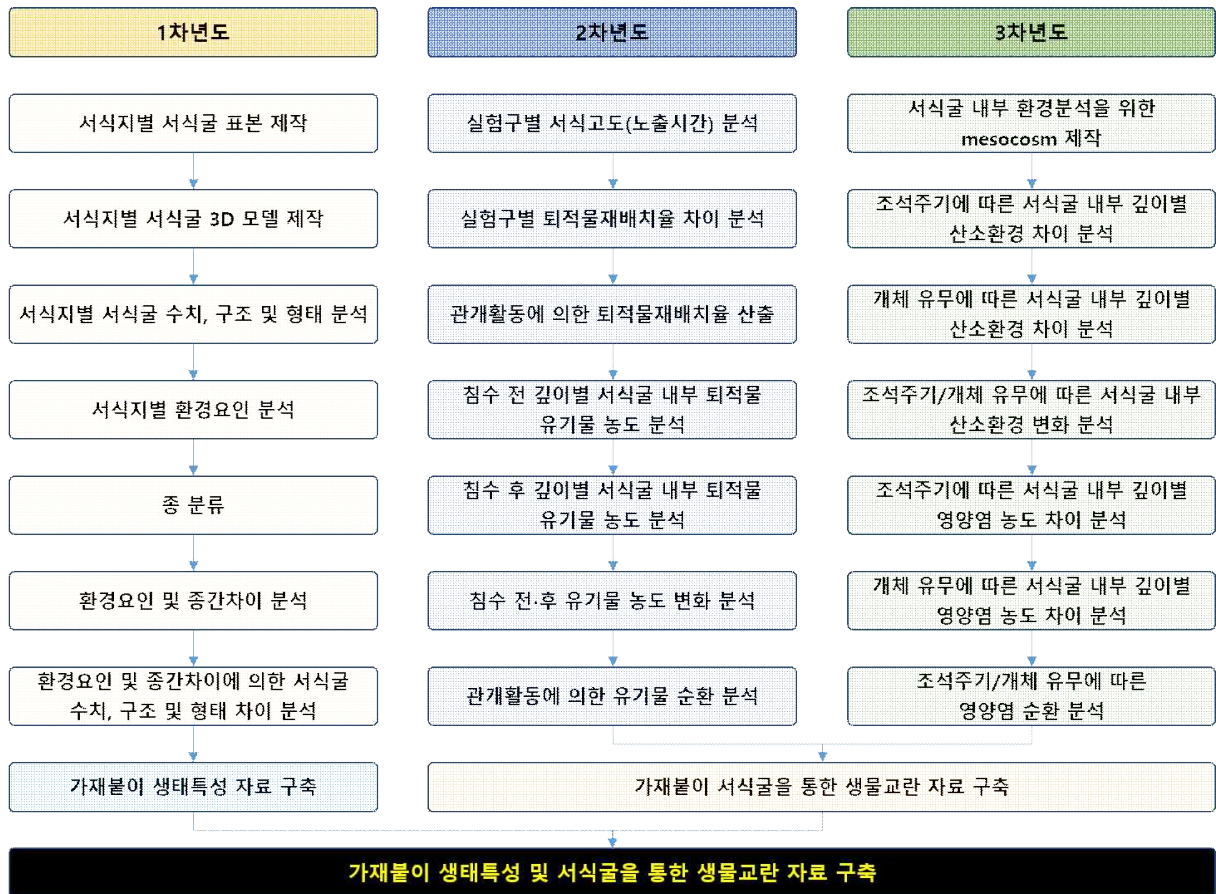


그림 2-4-1. 본 연구의 연구 흐름도

제 3 장 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

제 1 절 연구개발과제의 목표 달성 정도

연구 목표	수행 결과	달성도
서식지별 가재붙이 서식굴 형태 및 구조 차이 분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 서·남해안 주요 갯벌의 가재붙이 서식지 및 서식밀도 확인 ○ 서식지 환경요인에 따른 가재붙이 서식굴 수치, 구조 및 형태 차이 분석 ○ 형태 및 유전적 차이 분석을 통한 가재붙이 재분류 	100%
가재붙이 퇴적물재배치율 및 유기물 순환 차이 분석 (<i>in situ</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가재붙이 관개활동에 의한 퇴적물 재배치율 산출 ○ 환경요인(노출시간)에 따른 퇴적물 재배치율 변화 분석 ○ 가재붙이 관개활동에 의한 유기물 순환 분석 	100%
가재붙이 서식굴 내부 산소환경 및 영양염 순환 변화 분석 (mesocosm)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가재붙이 서식굴 내부 환경 분석을 위한 최적 mesocosm 디자인 및 제작 ○ 조석주기 및 개체 유무에 따른 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 변화 분석 ○ 조석주기 및 개체 유무에 따른 가재붙이 서식굴 내부 영양염 변화 분석 	100%

제 2 절 연구수행 방법

1. 가재붙이 서식굴 표본, 3D 모델 제작 및 수치, 구조, 형태 분석

국내 서·남해안 주요 갯벌 가재붙이 서식지 중 강화도, 곰소만, 남해도, 창선도 갯벌에서 가재붙이 서식굴 표본을 제작하였다(그림 3-2-1).



그림 3-2-1. 가재붙이 서식굴 표본 제작 지역

가재붙이 서식굴 표본은 경화수지에 경화제를 3%의 비율(v/v)로 혼합하여 레진을 제조한 후 가재붙이 둔덕(mound)에 투입하여 표본을 제작하였다. 둔덕에 비해 상대적으로 위치가 낮은 함입구(funnel)에서 레진이 흘러나올때까지 지속적으로 레진을 투입하고 둔덕 상부까지 레진을 투입하기 위해 함입구에 플라스틱 펜스를 설치하여 레진이 유출되는 것을 방지하였다(그림 3-2-2). 레진이 서식굴 하부부터 상부까지 투입될 수 있도록 지속

적으로 이 과정을 반복하였다. 둔덕 상부까지 레진이 투입되는 것을 확인한 후 약 72시간 동안 경화시키고 표본이 파손되지 않도록 주변 퇴적물을 조심스럽게 제거하여 경화된 서식굴 표본을 채집하였다.



그림 3-2-2. 레진 투입 및 플라스틱 펜스 설치 모습

채집된 표본은 파손되지 않게 조심하여 실험실로 운반한 후 3D 스캐너(Geomagic capture)를 이용하여 3D 모델을 제작하였다. 제작된 서식굴 3D 모델은 3D 모델 프로그램(Geomagic wrap)을 이용하여 둔덕 개수, 함입구 개수, 서식굴 깊이, 서식굴 길이, 표면적, 부피 등의 수치와 구조 및 형태를 분석하였다. 서식굴의 정밀한 수치를 분석하기 위해 서식굴 상부에 설치하였던 플라스틱 펜스로 인해 생성된 부분은 인위적으로 제거한 후 분석을 수행하였다(그림 3-2-3).

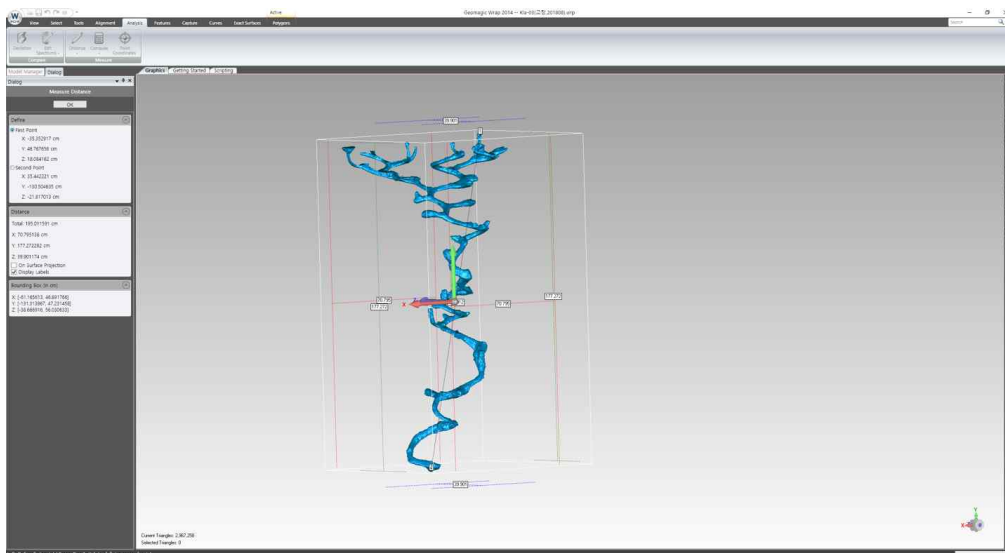


그림 3-2-3. 3D 모델을 이용한 서식굴 수치 분석

2. 가재붙이 재분류

국내 서·남해안 주요 갯벌 가재붙이 서식지 중 강화도, 대부도, 곰소만, 남해도, 창선도 갯벌의 가재붙이를 채집하여 형태분류 및 분자 계통학적 분석을 수행하였다(그림 3-2-4).



그림 3-2-4. 가재붙이 종 분류를 위한 개체 채집지역

가재붙이 종 분류를 위해 2019년 4월 강화도(D1a-02 정점), 대부도(Dbl1a-02 정점), 곰소만(K1a-01 정점), 남해도(N1a-01 정점), 창선도(C1a-03 정점) 갯벌에서 각각 3, 3, 9, 8, 12개체를 채집하였다. 사리에 가재붙이 서식굴을 따라 삽과 호미를 이용하여 주변 퇴적물을 파헤쳐가며 서식굴 내부에 서식하는 가재붙이를 채집한 후 99% 순도의 알코올을 이용하여 현장에서 채집된 개체를 고정하였다(그림 3-2-5).

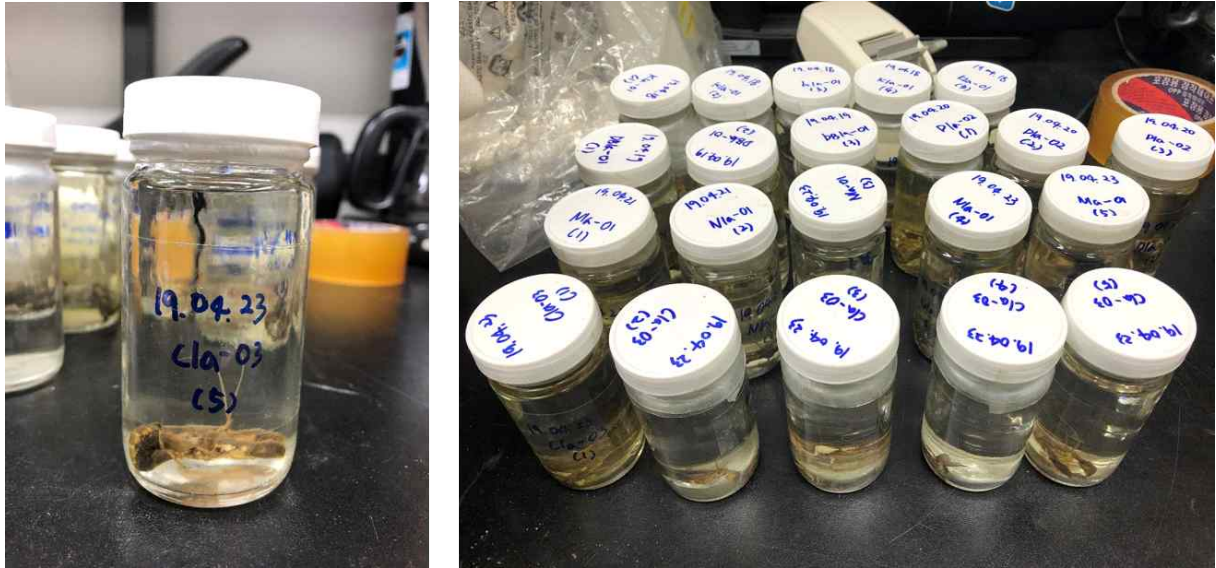


그림 3-2-5. 종 분류를 위해 채집된 가재붙이 개체

각각의 갯벌에서 채집된 가재붙이 개체의 Total genomic DNA는 알이나, 유영지 Tissue를 사용하였고, QIAamp® DNA Micro Kit (QIAGEN, Hilden)의 메뉴얼을 따라 추출하였다. Partial sequences(COI, 16S)는 HCO2198/LCO1490 프라이머를 사용하여 PCR을 진행하였다.

가재붙이 개체 표본은 실체현미경(Leica M205C, M125)으로 형태관찰이 이루어졌다. 채집된 개체는 개체의 외부에 붙어있는 펄을 최대한 제거한 후에 촬영을 진행하여 이들의 채색을 관찰하였다. Digital illustrations는 microscope digital camera(Leica MC170), Helicon focus software(Helicon focus 7.5.6, Ukraine)과 drawing tablet(Wacom Intuos Pro PTH - 660)과 Adobe Illustrator software(Adobe Systems)를 사용하였고, Coleman (2006)의 기법을 참고하였다. 참고 비교표본(Comparative material)은 국립생물자원관 및 국립해양생물자원관에 소장중인 *L. astacina* 표본이 사용되었다.

3. 가재붙이 퇴적물재배치율 산출

가재붙이 관개활동에 의한 퇴적물재배치율 산출과 환경요인에 따른 퇴적물재배치율 변화를 분석하기 위해 2020년 4월 곰소만 갯벌(Kla-01 정점)에서 현장조사를 수행하였다. 가재붙이 퇴적물재배치율은 침수시 가재붙이의 관개활동으로 인해 둔덕으로 배출된 퇴적물의 양의 습중량을 측정하여 산출하였다. 침수 시 가재붙이 서식굴로부터 둔덕으로 배출된 퇴적물은 sediment trap을 이용해 채집하였다(그림 2-2-1). sediment trap은 지름 20cm, 높이 15cm의 원기둥 형태로 제작하였으며 trap의 아랫면에 랩을 부착한 후 가재붙이 마운드에 trap을 고정하고 랩에 구멍을 뚫은 후 랩이 해수에 의해 이탈되지 않도록 고정하였다. 침수 후 sediment trap이 노출되자마자 sediment trap에 퇴적된 퇴적물과 해수를 실린지를 이용해 플라스틱 bottle에 옮겨 담았다. 퇴적물 샘플링 과정은 사리에 총 5회에 걸쳐 수행되었다(그림 3-2-6).

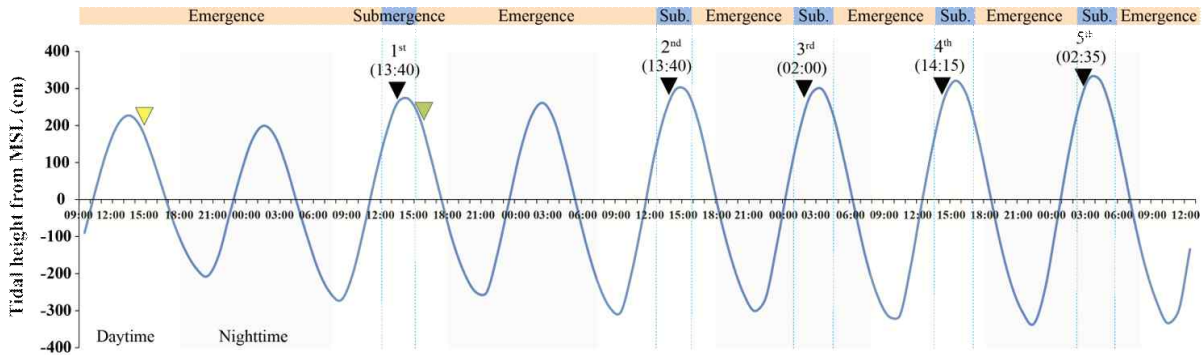


그림 3-2-6. 가재붙이 둔덕에 재배치된 퇴적물 샘플링 시간

환경요인(노출시간)에 의한 퇴적물재배치율 변화를 분석하기 위해 고도가 각각 다른 가재붙이 서식굴 5개를 선택해 퇴적물재배치율 차이를 분석하였다(그림 3-2-7).

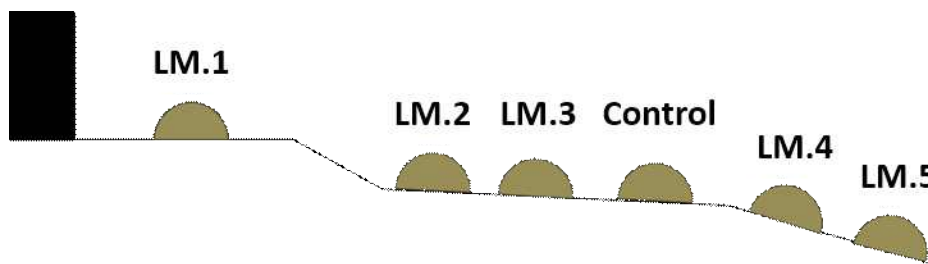


그림 3-2-7. 실험구 및 대조구의 고도 차이

해수중에서 침강되는 입자의 자연침강율을 보정하기 위해 둔덕과 유사한 크기의 대조구를 만들어 sediment trap을 동일하게 설치하였고, sediment trap에 퇴적된 퇴적물의 습중량을 이용해 자연침강율을 산출하였다.

가재붙이 서식굴의 서식고도는 RTK-DGPS를 이용해 측량하였으며, 국립해양조사원에서 2019년 1년간 영광조위관측소 조석의 10분 단위 자료를 제공받아 서식고도별 조석환경을 분석하였다.

sediment trap에서 채집한 각각의 퇴적물 시료는 실험실로 운반 후 메스실린더를 이용해 부피를 측정하고 전자저울을 이용해 습중량을 측정하였다(그림 3-2-8).

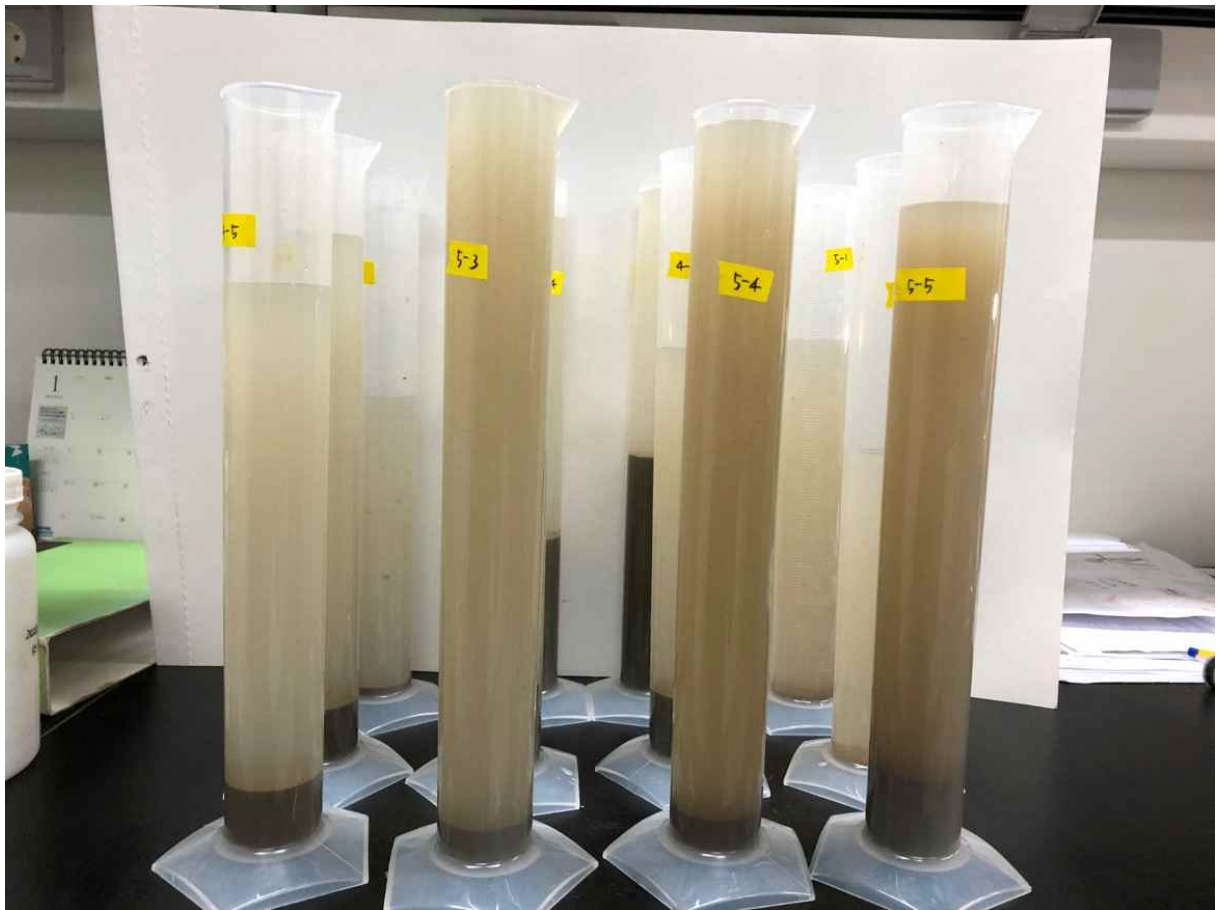


그림 3-2-8. sediment trap을 이용해 채집한 퇴적물의 부피 측정

4. 가재붙이 유기물 순환 분석

침수 전·후 가재붙이 서식지 표층 퇴적물과 가재붙이 서식굴 내부 퇴적물의 조성 및 유기물 농도 변화 분석을 위해 2020년 4월 곰소만 갯벌(KIa-01 정점)에서 현장조사를 수행하였다. 가재붙이 서식굴이 약 10일간 침수되지 않은 건조시기에 가재붙이 서식굴 3개를 선택하여 둔덕 퇴적물, 서식굴 내부 퇴적물(0-10, 10-30, 30-50cm, gallery sediment), 서식굴 내부 퇴적물과 동일한 깊이의 주변 퇴적물(ambient sediment)과 표층 퇴적물을 채집하고(그림 3-2-6 노란색 화살표), 해수에 의해 침수된 직후 침수 전과 동일하게 가재붙이 서식굴 3개를 선택하여 둔덕 퇴적물, 서식굴 내부 퇴적물(0-10, 10-30, 30-50cm, gallery sediment), 서식굴 내부 퇴적물과 동일한 깊이의 주변 퇴적물(ambient sediment)과 표층 퇴적물을 채집하여 퇴적물 조성 및 유기물 농도 변화를 분석하였다(그림 3-2-6 초록색 화살표).

퇴적물 시료는 실험실에서 유기물과 탄산염을 제거한 후에 습식체질을 하였으며, 4Φ 이상의 세립질 시료는 입도분석기(Sedigraph 5100)를 이용하여 분석하였다. 퇴적물 입도에 의한 퇴적상 분류는 Folk and Ward (1957)의 Inclusive Graphic Method에 의하여 산출하였다[14].

퇴적물의 유기물 농도 분석을 위해 동결건조기를 이용하여 48시간동안 완전 건조한 후 막자사발을 이용하여 고르게 분쇄하여 분말형태로 만들었다. 분말시료는 건조기에서 60℃로 24시간 동안 건조시켜 수분을 완전히 제거한 후 약 10mg을 취하여 은 캡슐에 넣고 원소분석기(2400 series II; Perkin Elmer)를 이용하여 탄소와 질소의 농도를 분석하였다.

5. 가재붙이 서식굴 내부 환경 분석을 위한 mesocosm 디자인 및 제작

가재붙이 서식굴은 퇴적층 하부로 최대 2m까지 확장되나 본 연구팀의 선행연구 결과 가재붙이가 서식굴 생성시 회전할 수 있는 충분한 공간이 확보되지 않으면 서식굴을 더 이상 생성하지 않는 것을 확인하였다. 하지만, 가재붙이가 회전할 수 있는 공간을 충분히 확보할 만큼 폭을 넓힐 경우 mesocosm 벽면에 가재붙이 서식굴이 접할 수 있는 가능성이 낮아지기 때문에 서식굴이 접하지 않을 경우 본 연구의 목적을 달성할 수 없다. 따라서, 본 연구의 mesocosm은 가재붙이의 회전 공간을 적절하게 확보하면서 mesocosm 외벽에 서식굴이 접할 수 있는 최적의 크기와 폭을 설정하였다.

mesocosm은 메인수조 1개와 보조수조 2개로 구성된다(그림 3-2-9). 메인수조는 가재붙이 개체를 투입하여 실험을 수행할 수조이며 메인수조 양 옆의 보조수조는 해수의 유통을 원활하게 하는 역할을 한다. 해수의 유속이 빠를 경우 메인수조에 투입된 퇴적물이 해수에 의해 파이게 되어 표층 구조가 변하게 되므로 보조수조를 통해 해수의 유속을 조절할 수 있도록 하였다. 메인수조는 가로 60cm, 높이 80cm, 폭 10cm, 보조수조는 가로 30cm, 높이 80cm, 폭 10cm의 크기로 디자인되었다.

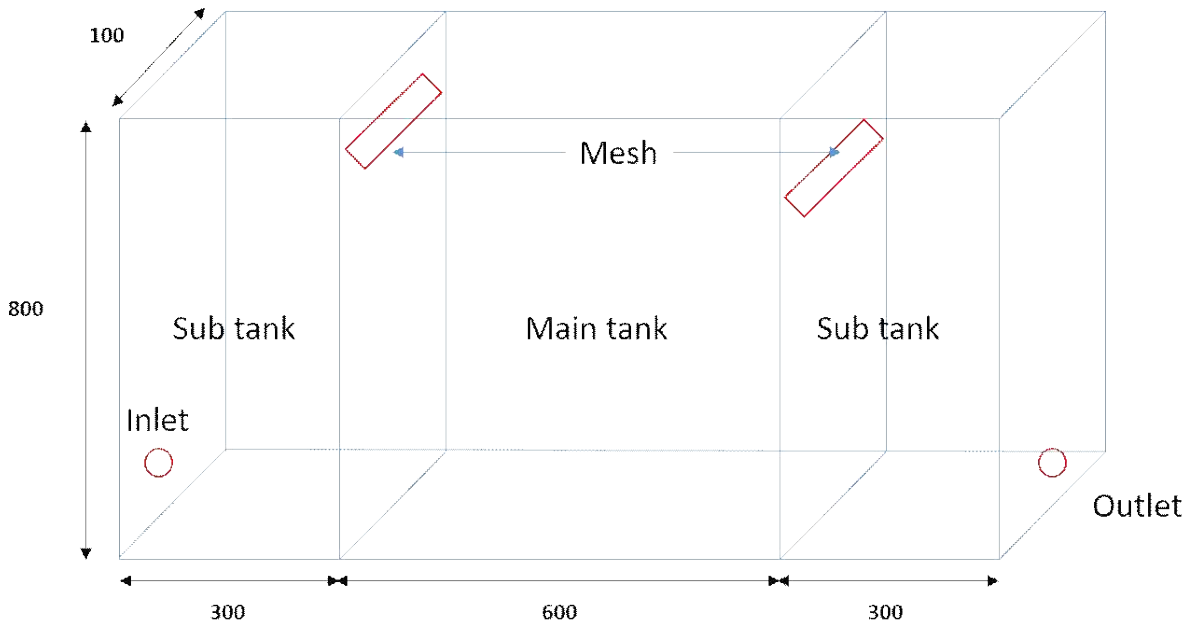


그림 3-2-9. 가재붙이 서식굴 내부 환경 분석을 위한 mesocosm 디자인

mesocosm 메인수조의 후면은 가재붙이 서식굴 내부 burrow water의 샘플링을 위해 일정간격으로 sampling port를 설치하였고, 전면은 서식굴 내부 산소환경 측정을 위해 sampling port를 설치하지 않았다(그림 3-2-10, 3-2-11). Sampling port는 실리콘 마개를 탈부착 할 수 있도록 제작하였으며, 메인수조 양 옆의 보조수조는 자동해수유통 시스템과 연결하여 해수를 유통할 수 있도록 제작하였다.

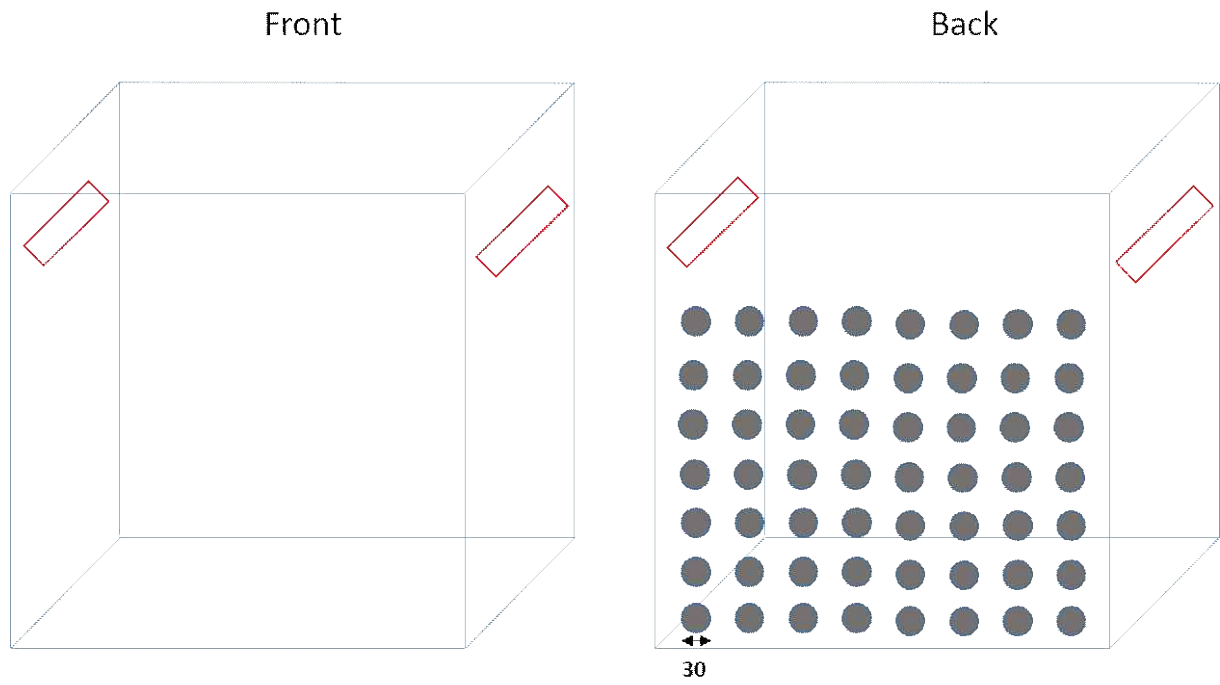


그림 3-2-10. 메인수조의 전면과 후면 디자인

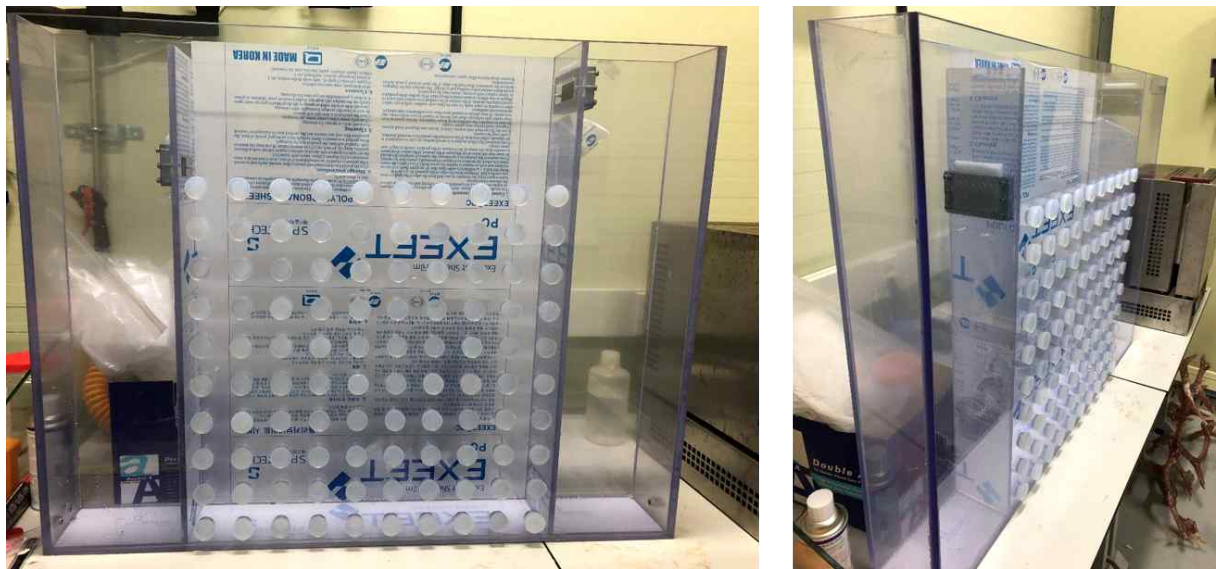


그림 3-2-11. 제작된 mesocosm의 전면과 측면

6. 가재붙이 서식굴 내부 산소 환경 분석

mesocosm 실험을 위해 2020년 9월 곰소만 갯벌(Kla-01 정점)에서 가재붙이 개체 및 퇴적물을 채집하였다. 가재붙이 개체는 가재붙이 서식굴을 따라 주변 퇴적물을 파내려가며 가재붙이 개체를 채집하였다(그림 3-2-12). mesocosm 실험에 사용할 퇴적물은 가재붙이 서식지 퇴적물을 깊이별로 채집한 후 현장에서 1mm sieve를 이용해 다른 생물들을 제거한 후 드라이아이스와 아이스박스를 이용하여 냉동상태를 유지하여 실험실로 운반하였다.



그림 3-2-12. 곰소만 갯벌에서 채집한 가재붙이

실험실로 운반한 퇴적물은 mesocosm 메인수조에 투입하고 자동해수유통 시스템을 이용하여 곰소만 갯벌 현장 조석과 동일한 조석을 모의하여 3일간 안정화하였다(그림 3-2-13). 퇴적물 안정화 후 가재붙이 개체를 투입하고 현장 조석과 동일한 조석을 모의하여 서식굴 생성 및 활동을 확인하였다.



그림 3-2-13. 자동해수유통 시스템(왼쪽)과 퇴적물 안정화(오른쪽)

가재붙이 개체 순치 10일 후 가재붙이는 mesocosm 하부(80cm)까지 서식굴을 확장하였으며 표층으로부터 10, 20, 40cm 깊이에서 서식굴이 메인수조 벽면과 접한 것을 확인하였다(그림 3-2-14).

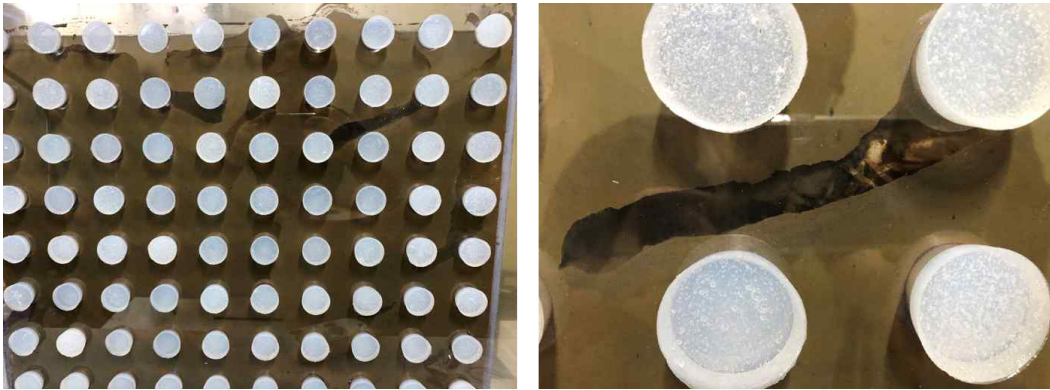


그림 3-2-14. 가재붙이 서식굴 생성

곰소만 갯벌 현장과 동일한 조석을 모의하여 24시간동안 서식굴이 메인수조 벽면에 접한 깊이인 10, 20, 40cm 깊이에서 Visisens TD(Presens)를 이용하여 서식굴 및 개체에 직접적인 영향을 주지 않고 산소농도 변화를 측정하였다(그림 3-2-15). 이후 가재붙이 개체를 mesocosm에서 제거한 후 가재붙이 개체가 없는 상태에서 동일한 방법으로 24시간 동안 10, 20, 40cm 깊이에서 산소농도 변화를 측정하였다. 가재붙이 개체를 서식굴의 변형 및 파손 없이 제거하기 위해 표층 부근까지 개체가 올라왔을 때 실리콘 마개를 제거한 후 개체를 제거하였다

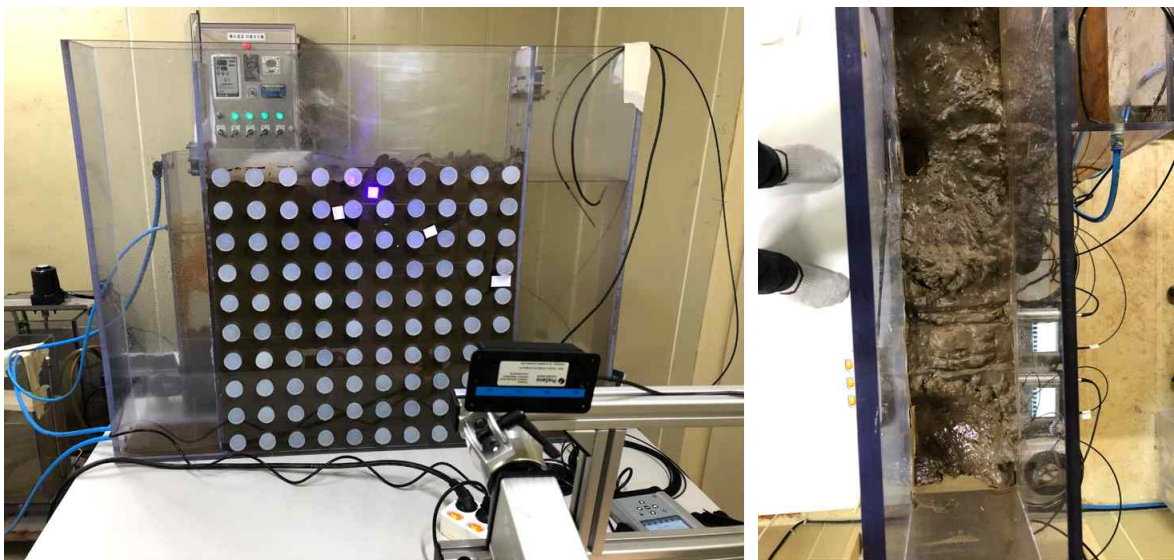


그림 3-2-15. Visisens TD를 이용한 서식굴 내부 산소농도 측정 및 서식굴 표층 모습

7. 가재붙이 서식굴 내부 영양염 순환 분석

가재붙이 서식굴 내부 영양염 농도 변화 분석 실험은 온도와 빛의 영향을 배제하기 위해 항온챔버 내에서 20℃, 암전상태를 유지하여 실험을 수행하였다. 곰소만 갯벌 사리의 조석환경과 동일한 조석을 모의하여 가재붙이 서식굴이 메인수조 벽면에 접한 깊이인 10, 20, 40cm 깊이에서 일정 시간 간격으로 총 15회 burrow water를 채수하였다(그림 3-2-16).

이후 가재붙이 개체를 mesocosm에서 제거한 후 가재붙이 개체가 없는 상태에서 10일 동안 해수를 유통하지 않고 가재붙이 개체가 없는 상태를 유지하며 위와 동일한 방법으로 10, 20, 40cm 깊이에서 24시간 동안 일정 시간 간격으로 총 15회 burrow water를 채수하였다(그림 3-2-17).

burrow water는 실리콘을 통해 주사바늘을 주입하여 한번에 10ml씩 채수하였으며, 채수 시에 굴 내부가 교란되지 않도록 천천히 채수하였다. 채수한 시료는 0.45 μ m 실린지 필터를 이용하여 burrow water 샘플에 포함된 입자 및 부유물을 제거한 후 실험이 종료 될 때까지 -30℃에 냉동 보관하였다.

영양염(암모늄, 질산염, 아질산염, 규산염, 인산염) 농도는 자동분석기(QuAAtro, Seal Analytical GmbH)를 이용하여 분석하였으며, 각각의 측정값은 표준해수시료로 정확도를 검증하였다.

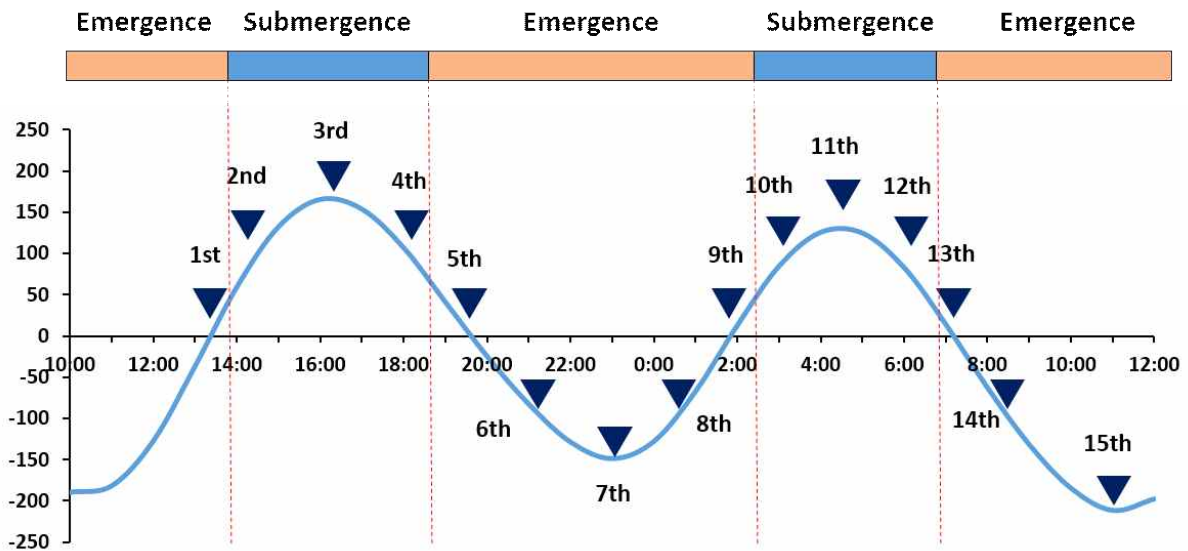


그림 3-2-16. 가재붙이 개체가 있는 경우 영양염 분석을 위한 샘플링 시간

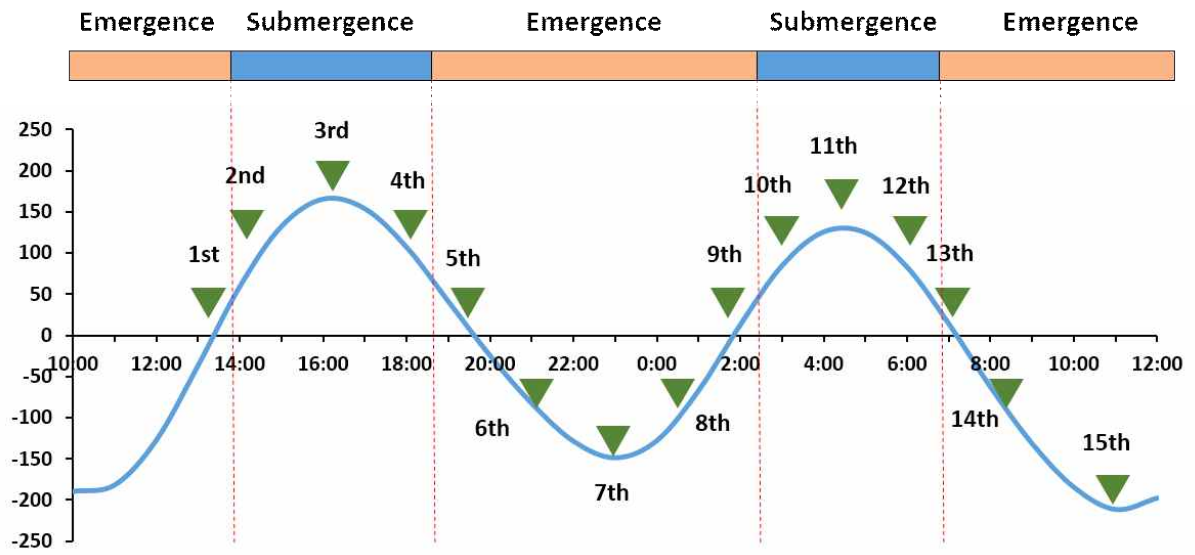


그림 3-2-17. 가재불이 개체가 없는 경우 영양염 분석을 위한 샘플링 시간

제 3 절 연구결과

1. 국내 서·남해안 주요 갯벌의 가재붙이 서식지 및 서식지 특성

(가) 남해도

남해도 갯벌은 총 3지역에서 가재붙이가 서식하는 것으로 확인되었다(그림 3-3-1, 3-3-2). 남해도에 서식하는 가재붙이는 전반적으로 둔덕(mound)의 크기가 작았으며 평균 서식밀도는 3개체/m²였음. 퇴적상은 모래와 clay가 우세한 퇴적상을 보였다(표 3-3-1). 남해도 갯벌 가재붙이 서식지의 고도는 평균해수면(Mean Sea Level, MSL) 기준 0.55m 였다.



그림 3-3-1. 남해도와 창선도 갯벌 가재붙이 서식지

표 3-3-1. 남해도 가재붙이 서식지 특성

	Elevation from MSL (m)	Composition (%)				Mean grain size (Φ)
		Gravel	Sand	Silt	Clay	
NL-01	0.55	0	43.17	19.31	37.53	6.158

(나) 창선도

창선도 갯벌은 총 3지역에서 가재붙이가 서식하는 것으로 확인되었다(그림 3-3-1, 3-3-2). 남해도와 마찬가지로 창선도에 서식하는 가재붙이의 둔덕(mound)의 크기는 작았으며, 평균 서식밀도는 3개체/m²였음. 퇴적상은 모래가 우세한 퇴적상을 보였다(표 3-3-2).



그림 3-3-2. 남해도(왼쪽, NL-01)와 창선도(오른쪽, CL-03) 가재붙이 서식지

표 3-3-2. 창선도 가재붙이 서식지 특성

	Elevation from MSL (m)	Composition (%)				Mean grain size (Φ)
		Gravel	Sand	Silt	Clay	
CL-03	0.33	8.8	66.79	7.9	16.52	3.374

(다) 섬진강 하구

섬진강 하구 갯벌은 총 2지역에서 가재붙이가 서식하는 것을 확인하였으며 평균 서식 밀도는 2개체/m²였음(그림 3-3-3). Sla-01 정점의 고도는 0.73m였으며, Sla-02 정점의 고도는 0.696m였다.

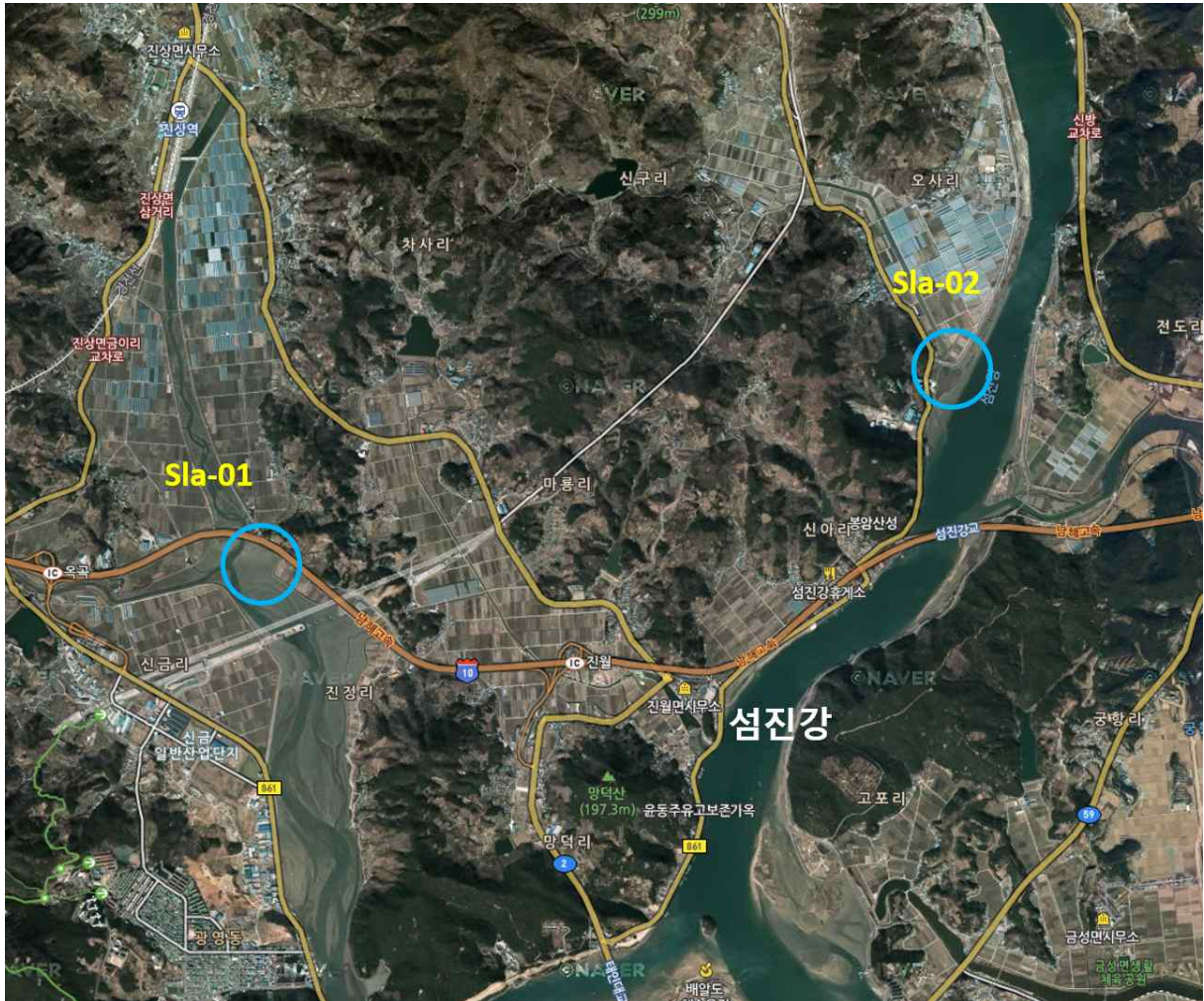


그림 3-3-3. 섬진강 하구 갯벌 가재붙이 서식지

(라) 낙동강 하구

낙동강 하구 갯벌은 갯벌 상부에 갈대가 서식하는 좁은 지역에서만 가재붙이가 서식하는 것으로 확인되었으며 평균 서식밀도는 1개체/m²를 보였다(그림 3-3-4). 낙동강 하구 가재붙이 서식지의 퇴적상은 모래와 silt가 우세한 퇴적상을 보였다(표 3-3-3).



그림 3-3-4. 낙동강 하구 갯벌 가재붙이 서식지

표 3-3-3. 낙동강 하구 가재붙이 서식지 특성

	Elevation from MSL (m)	Composition (%)				Mean grain size (Φ)
		Gravel	Sand	Silt	Clay	
ND-01	0.454	0	44.95	36.84	18.21	5.249

(마) 제주도

제주도는 서·남해안과 달리 갯벌이 거의 없어 가재붙이 서식지에서 제외되어졌다. 하지만, 과거 자료와 선행 연구 검토 결과 제주도에도 가재붙이가 서식할 가능성이 있다고 판단되어 제주도 가재붙이 서식지 탐사를 수행하였다.

과거 자료와 선행 연구 검토 결과 제주도 갯벌은 주로 동측 성산일출봉 부근에만 존재하는 것으로 나타나 성산읍을 중심으로 서식지 탐사를 수행하였다.

서귀포시 성산읍 주변의 종달리(서귀포시 성산읍), 시흥리(서귀포시 성산읍), 오조리(제주시 구좌읍) 갯벌을 중심으로 가재붙이 서식지를 탐사했으나 가재붙이가 서식하지 않았으며, 제주도 동측 갯벌 가재붙이 서식지 탐사결과 제주도 갯벌에 가재붙이가 서식하는 곳은 제주시 구좌읍 하도리 갯벌 한 곳 뿐이었다(그림 3-3-5).



그림 3-3-5. 제주 하도리 갯벌 가재붙이 서식지

이 지역은 안으로 움푹 패인 지형으로 해안도로 건설로 인해 해안도로 밑의 좁은 통로로만 해수가 유통되는 특징을 가지고 있으며 모래와 펄이 혼합된 퇴적상을 보였다.

가재붙이는 겨울에 서식굴 하부로 들어가 동면을 하는 것으로 추정되어져 가재붙이 개체를 직접 채집하진 못하였으나 가재붙이가 가지고 있는 특징적 형태의 마운드를 찾을 수 있었으며 평균 서식밀도는 2개체/m²였다(그림 3-3-6).



그림 3-3-6. 하도리 갯벌 가재붙이 서식지와 가재붙이 둔덕

(바) 강화도

강화도 갯벌은 총 2곳의 지역에서 가재붙이가 서식하는 것을 확인하였다(그림 3-3-7). D1a-01 정점의 평균 서식밀도는 2개체/m²였으며, D1a-02 정점의 평균 서식밀도는 10개체/m²였음. 강화도 가재붙이 서식지는 silt가 우세한 퇴적상을 나타냈다(표 3-3-4).



그림 3-3-7. 강화도 가재붙이 서식지

표 3-3-4. 강화도 가재붙이 서식지 특성

	Elevation from MSL (m)	Composition (%)				Mean grain size (Φ)
		Gravel	Sand	Silt	Clay	
Dla-02	3.92	0	0.7	76.44	22.86	6.72

(사) 대부도

대부도 갯벌은 총 3곳의 지역에서 가재붙이가 서식하는 것을 확인하였다(그림 3-3-8). Dbla-01 정점의 평균 서식밀도는 4개체/m², 고도는 3.566m였으며, Dbla-02 정점의 평균 서식밀도는 5개체/m², 고도는 3.489m였다. Dbla-03 정점의 평균 서식밀도는 3개체/m², 고도는 3.242m였다.



그림 3-3-8. 대부도 및 제부도 갯벌 가재붙이 서식지

(아) 제부도

제부도 갯벌은 1곳의 지역에서 가재붙이가 서식하는 것을 확인하였다(그림 3-3-8). J1a-01 정점의 평균 서식밀도는 3개체/m², 고도는 3.692m였다.

(자) 금강 하구

금강 하구 갯벌은 1곳에 지역에서 가재붙이 서식을 확인하였으며, Gla-01 정점의 평균 서식밀도는 4개체/m², 고도는 2.789m였다(그림 3-3-9).



그림 3-3-9. 금강 하구 갯벌 가재붙이 서식지

(차) 곰소만

곰소만 갯벌은 총 3곳의 가재불이 서식지를 확인하였으며 Kla-01 정점은 평균 서식밀도 4개체/m², KS-01 정점은 4개체/m², KDH-01 정점은 4개체/m²의 평균 서식밀도를 보였다(그림 3-3-10). Kla-01 정점과 KS-01 정점은 silt가 우세한 퇴적상을 보였다(표 3-3-5).



그림 3-3-10. 곰소만 갯벌 가재불이 서식지

표 3-3-5. 곰소만 가재불이 서식지 특성

	Elevation from MSL (m)	Composition (%)				Mean grain size (Φ)
		Gravel	Sand	Silt	Clay	
Kla-01	3.151	0	3.8	63.5	32.7	7.063
KS-01	2.511	0	1.6	64.0	34.4	7.281

(카) 가재붙이 서식지 분포 및 특성

가재붙이의 생태적 정보는 거의 알려져 있지 않은 상황이며 일생을 굴 안에서 생활하는 특성으로 인해 표층에서는 관찰이 불가능하여 현재까지 가재붙이의 서식지 및 특성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구결과 서해안 주요 갯벌인 강화도, 대부도, 제부도, 금강 하구, 곰소만 갯벌 및 남해안 주요 갯벌인 남해도, 창선도, 섬진강 하구, 낙동강 하구 갯벌의 가재붙이 서식지를 확인하였다. 또한, 국지적이긴 하나 현재까지 밝혀지지 않았던 제주도 갯벌에서 가재붙이 서식지를 확인하였다.

국내 서·남해안 주요 갯벌 가재붙이 서식지의 평균 서식밀도는 1-10개체/m²를 보였으며 가재붙이의 서식지는 고도가 높고 silt와 clay가 우세한 세립한 퇴적상을 가진 환경적 특성을 나타냈다(표 3-3-6).

본 연구에서 확인된 가재붙이 서식지 이외에 다른 지역에도 가재붙이가 서식할 것으로 판단되며 이의 확인을 위한 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

표 3-3-6. 곰소만 가재붙이 서식지 특성

Region	Elevation from MSL (m)	Composition (%)				Mean grain size (Φ)	Density (ind./m ²)
		Gravel	Sand	Silt	Clay		
남해도	0.55	0	43.17	19.31	37.53	6.16	3
창선도	0.33	8.8	66.79	7.90	16.52	3.37	3
섬진강 하구	0.73	-	-	-	-	-	2
낙동강 하구	0.45	0	44.95	36.84	18.21	5.25	1
제주도	-	-	-	-	-	-	2
강화도	3.92	0	0.7	76.44	22.86	6.72	10
대부도	3.48	-	-	-	-	-	4
제부도	3.69	-	-	-	-	-	3
금강 하구	2.79	-	-	-	-	-	4
곰소만	3.15	0	3.8	63.5	32.7	7.063	5

2. 가재붙이 서식지별 서식굴 수치, 구조 및 형태

(가) 곰소만 가재붙이 서식굴 수치, 구조 및 형태

2018년 7월 곰소만 갯벌(K1a-01 정점)에서 가재붙이 서식굴 표본 제작을 수행하였다. 총 4점의 서식굴 표본을 채집하였으며, 이 중 3점은 성체의 서식굴 표본이며 1점은 어린 개체의 서식굴로 추정되어 분석에서는 제외하였다.

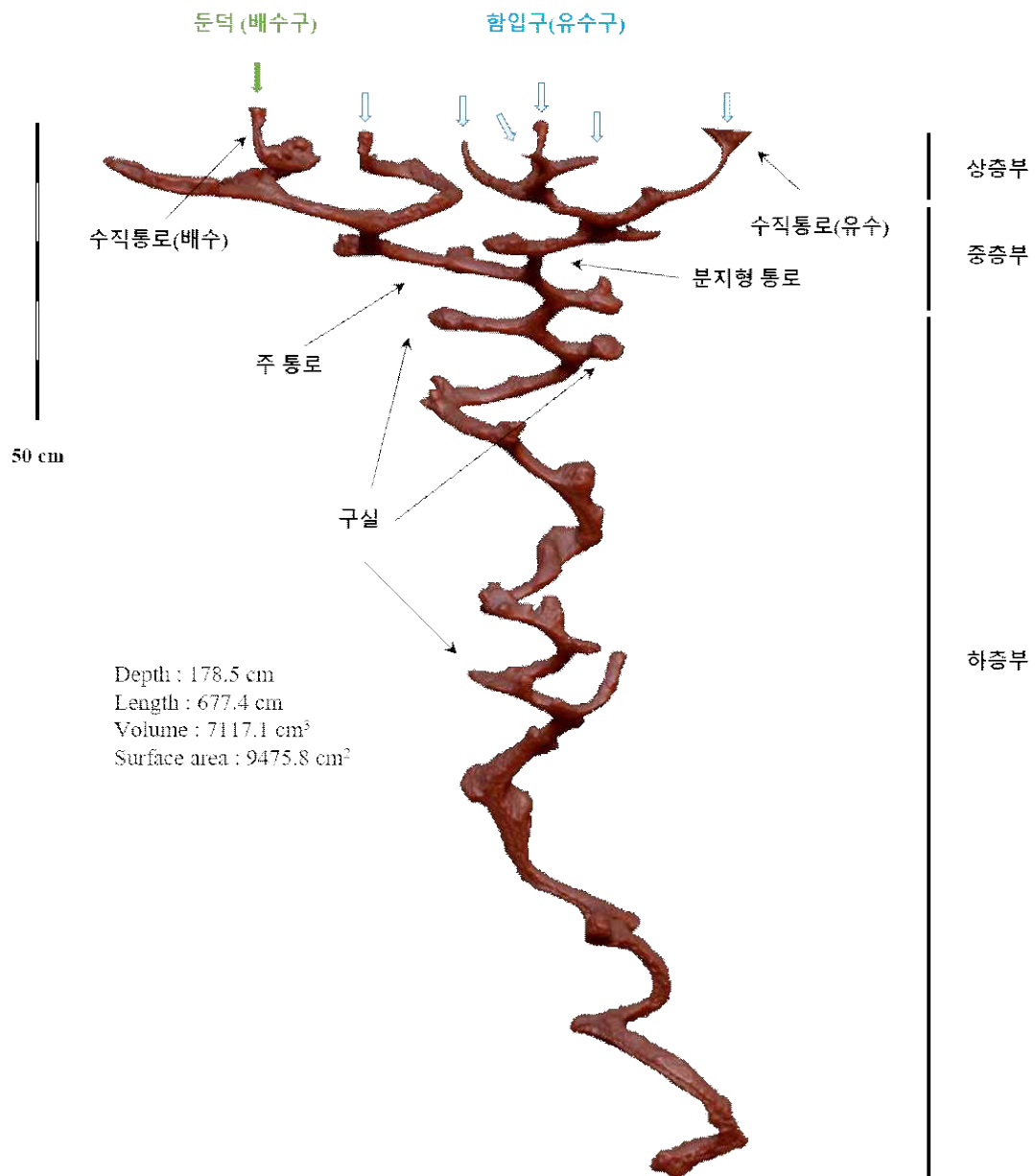


그림 3-3-11. 곰소만 갯벌 가재붙이 서식굴 표본

곰소만 갯벌 가재붙이 서식굴은 크고 복잡한 형태를 하며, 구조적으로 크게 3부분으로 나뉘는 특징을 보였다(그림 3-3-11, 3-3-12). 상층부는 수평통로(horizontal gallery)와 갯벌 표층으로 연결되는 수직통로(shaft)로 구성되어 있으며, 두 구조가 만나는 곳은 약간 부풀어 있었다. 5-7개(평균 6개)의 수직통로 중 1개는 갯벌 표면에서 종 모양으로 솟아오른 둔덕(mound)과 연결되며, 나머지는 깔때기 모양의 함입구(funnel)로 연결되었다. 둔덕은 퇴적물 및 해수가 배출되는 곳이며, 함입구로는 퇴적물 및 해수가 유입되는 역할을 한다(그림 3-3-13).

여러 개의 수평통로는 아래 쪽에서 주 통로(main gallery)로 연결되어 중층부를 구성하였다. 주 통로는 비스듬하게 나선형으로 꼬이면서 아래로 향하는 구조를 하며, 꼬임의 방향이 바뀌는 곳에는 옆으로 확장된 구실(chamber)이 있었다. 하층부에서는 주 통로가 거의 수직으로 하부로 향해 확장되며 일정 깊이 간격으로 수평으로 뻗은 구실과 연결되어 있는 경우와 연결되지 않는 경우가 있었다.

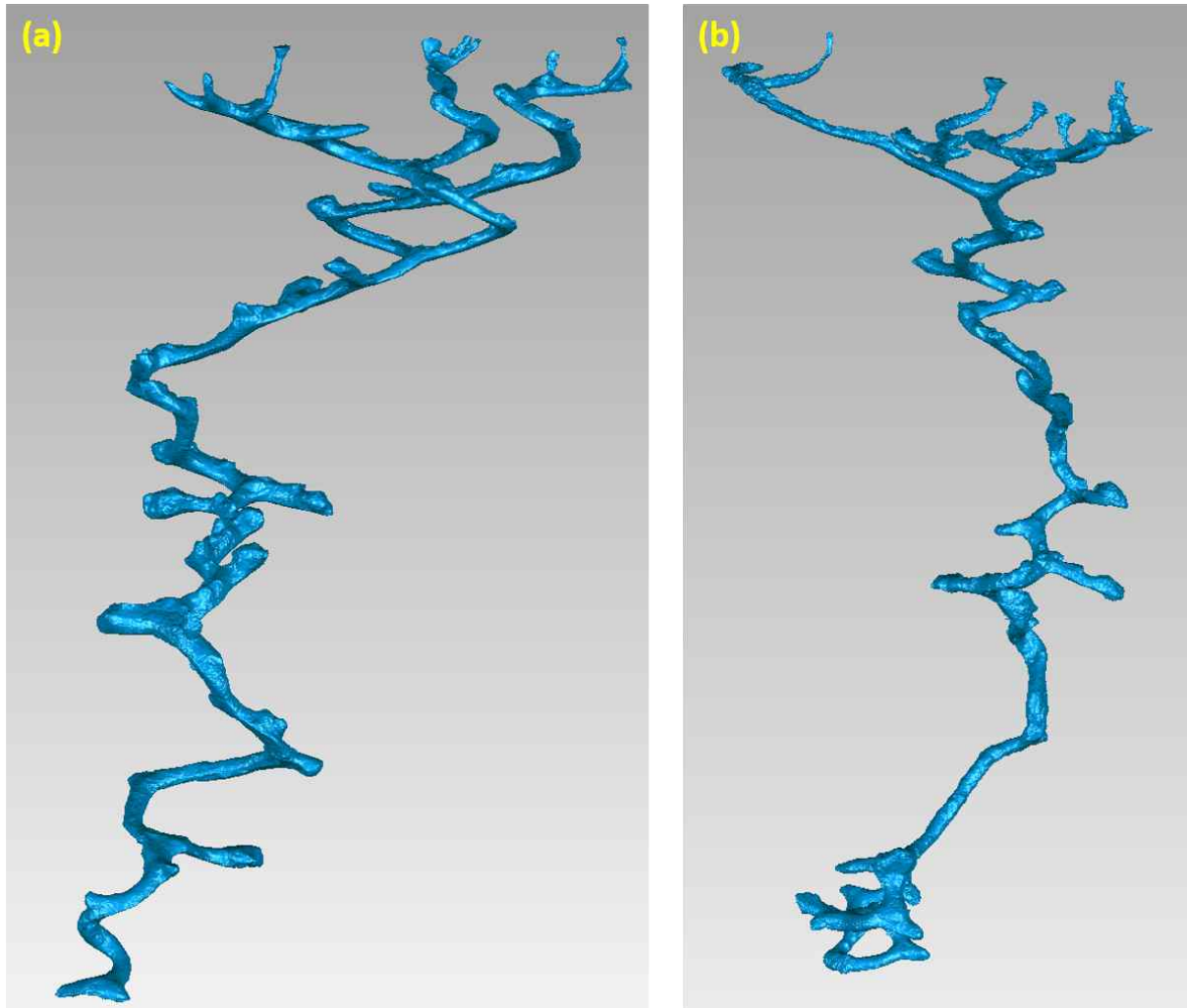


그림 3-3-12. 곰소만 갯벌 가재붙이 서식굴 표본

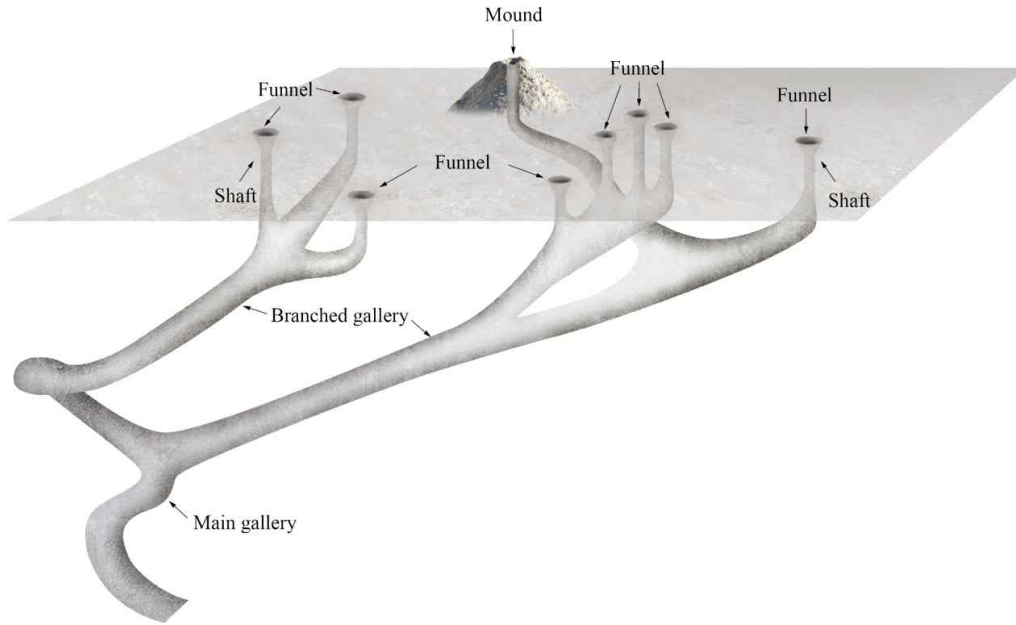


그림 3-3-13. 가재붙이 서식굴 상층부와 갯벌 표층

곰소만 갯벌 가재붙이 서식굴은 둔덕과 연결되는 1개의 수직통로와 함입구로 연결되는 평균 6개의 수직통로로 구성되었다(표 3-3-7). 서식굴의 길이는 677.4-802.3cm이며, 깊이는 165.5-190.1cm까지 퇴적층 하부로 연장되어 있었다. 표면적은 8,467.6-9,529.6cm²였으며, 부피는 6,452.7-7,162.2cm³였다.

표 3-3-7. 곰소만 갯벌 가재붙이 서식굴 표본 수치

	No. of mound	Diameter of mound (cm)	Height of mound (cm)	No. of funnel	Length (cm)	Depth (cm)	Surface area (cm ²)	Volume (cm ³)
표본 1	1	1.8	4.8	6	677.4	178.5	9,475.8	7,117.1
표본 2	1	1.5	5.7	7	733.5	165.5	8,467.6	6,452.7
표본 3	1	2.5	3.5	5	802.3	190.1	9,529.6	7,162.2
평균	1	1.9	4.7	6	737.7	178.0	9,157.7	6,910.7

가재붙이 성체의 서식굴과는 다르게 어린개체의 서식굴은 보다 단순한 구조를 가지고 있었다(그림 3-3-14). 상층부는 둔덕과 연결되는 1개의 수직통로와 함입구로 연결되는 1개의 수직통로로 구성되어 있었다. 분지된 통로가 없이 주 통로가 수직으로 퇴적층 하부로 향하며 중층부에서 주 통로의 꼬임이 있었다. 성체의 구실보다 작은 구실이 꼬임의 방향이 바뀌는 곳에 있으며 하층부는 꼬임과 구실 없이 수직으로 하부로 향하였다.



그림 3-3-14. 곰소만
갯벌 가재붙이
어린개체의
서식굴 표본

(나) 강화도 가재붙이 서식굴 수치, 구조 및 형태

2020년 5월 강화도 갯벌(D1a-02 정점)에서 가재붙이 서식굴 표본 제작을 수행하였으며, 총 3점의 서식굴 표본을 채집하였으며 이 중 형태가 온전한 2개의 표본을 대상으로 분석을 수행하였다.

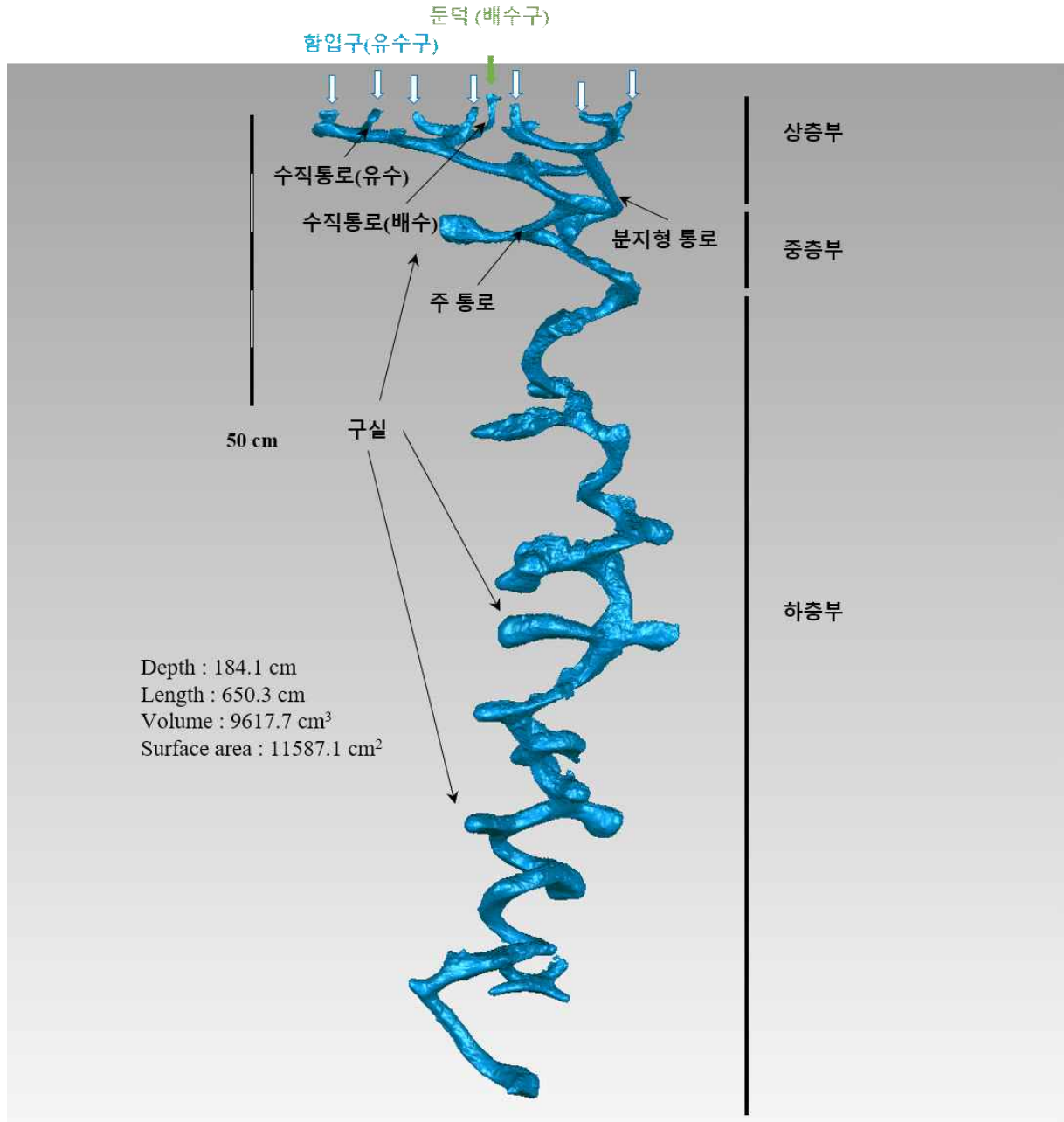


그림 3-3-15. 강화도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본

강화도 갯벌 가재붙이 서식굴은 곰소만 가재붙이 서식굴과 같이 크고 복잡한 형태를 하며, 구조적으로 크게 3부분으로 나뉘어지는 특징을 보였다(그림 3-3-15, 3-3-16). 상층부는 수평통로(horizontal gallery)와 갯벌 표층으로 연결되는 수직통로(shaft)로 구성되어 있으며, 두 구조가 만나는 곳은 약간 부풀어 있었다. 6-7(평균 6.5개)의 수직통로 중 1개는 갯벌 표면에서 종 모양으로 솟아오른 둔덕(mound)과 연결되며, 나머지는 깔때기 모양의 함입구(funnel)로 연결되었다.

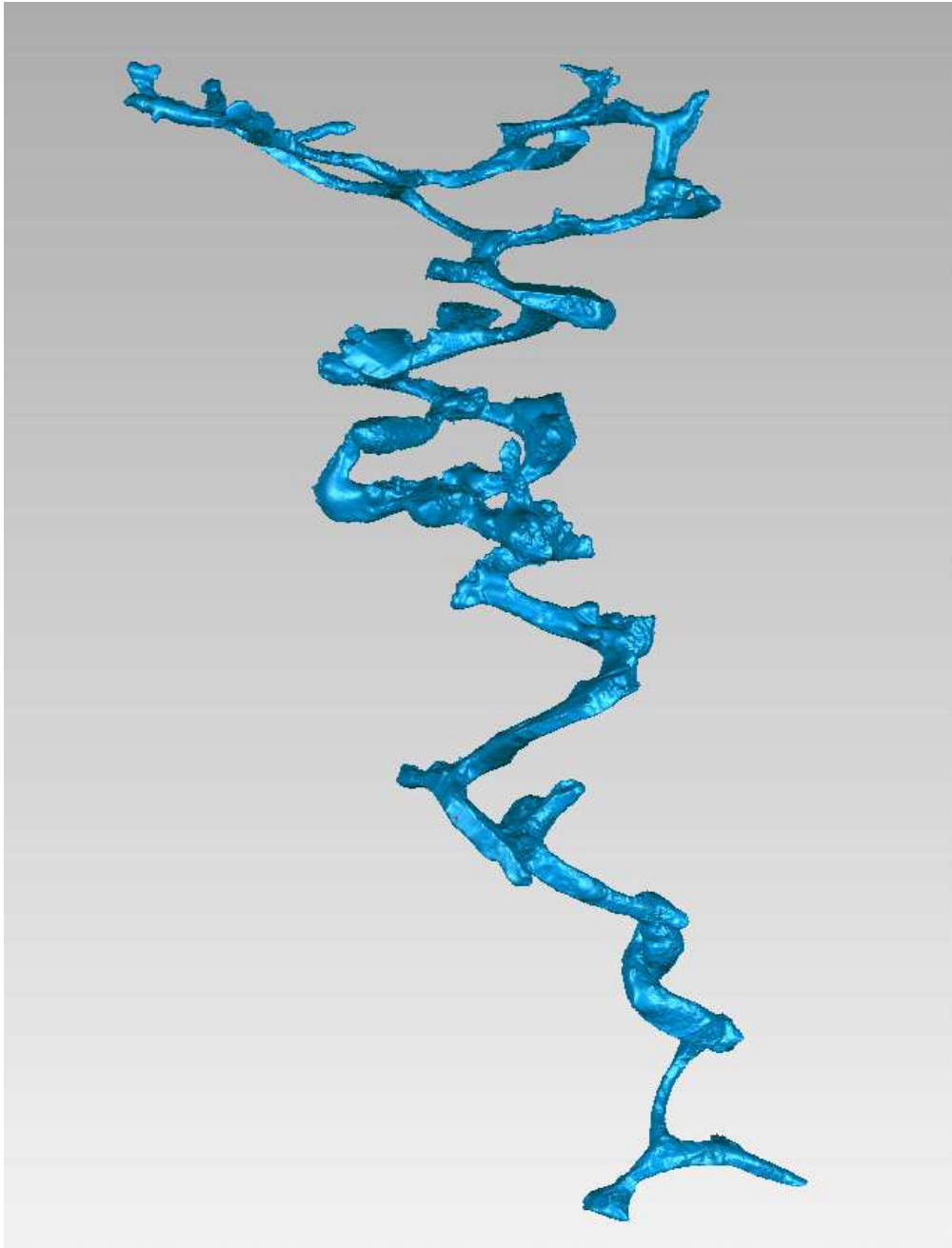


그림 3-3-16. 강화도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본

여러 개의 수평통로는 아래 쪽에서 주 통로(main gallery)로 연결되어 중층부를 구성하였다. 주 통로는 비스듬하게 나선형으로 꼬이면서 아래로 향하는 구조를 하며, 꼬임의 방향이 바뀌는 곳에는 옆으로 확장된 구실(chamber)이 있었다.

하층부에서는 주 통로가 거의 수직으로 하부로 향해 확장되며 일정 깊이 간격으로 수평으로 뻗은 구실과 연결되어 있는 경우와 없는 경우가 있었다. 곰소만 가재붙이 서식굴과 다르게 꼬임의 방향이 바뀌는 곳에 구실이 쌍을 이루는 경우가 있었다.

강화도 갯벌 가재붙이 서식굴은 둔덕과 연결되는 1개의 수직통로와 합입구로 연결되는 평균 6.5개의 수직통로로 구성되었다(표 3-3-8). 서식굴의 길이는 586.0-650.3cm이며, 깊이는 161.8-184.1cm까지 퇴적층 하부로 연장되어 있었다. 표면적은 4,884.1-9,617.7cm²였으며, 부피는 10,571.1-11,587.1cm³로 나타났다.

표 3-3-8. 강화도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본 수치

	No. of mound	Diameter of mound (cm)	Height of mound (cm)	No. of funnel	Length (cm)	Depth (cm)	Surface area (cm ²)	Volume (cm ³)
표본 1	1	1.8	4.7	7	650.3	184.1	9,617.7	11,587.1
표본 2	1	1.4	7.0	6	586.0	161.8	4,884.1	10,571.1
평균	1	1.6	5.9	6.5	618.2	173.0	7,250.9	11,079.1

(다) 남해도 가재붙이 서식굴 수치, 구조 및 형태

2018년 8월과 2019년 4월 남해도 갯벌(NL-01 정점)에서 가재붙이 서식굴 표본 제작을 수행하였으며, 총 4점의 서식굴 표본을 채집하였다.

남해도 갯벌 가재붙이 서식굴은 곰소만, 강화도 갯벌 가재붙이 서식굴과 다르게 단순한 구조를 가지고 있으며 크기가 작았다(그림 3-3-17, 3-3-18). 상층부의 경우 함입구의 개수가 곰소만, 강화도 서식굴에 비해 상대적으로 적으며 분지된 통로와 주 통로가 결합되는 중층부의 특징을 보였다. 하층부의 경우 수직으로 하부로 향하는 구조를 보이지만 주 통로가 회전하는 곳에 구실이 존재하지 않았다.

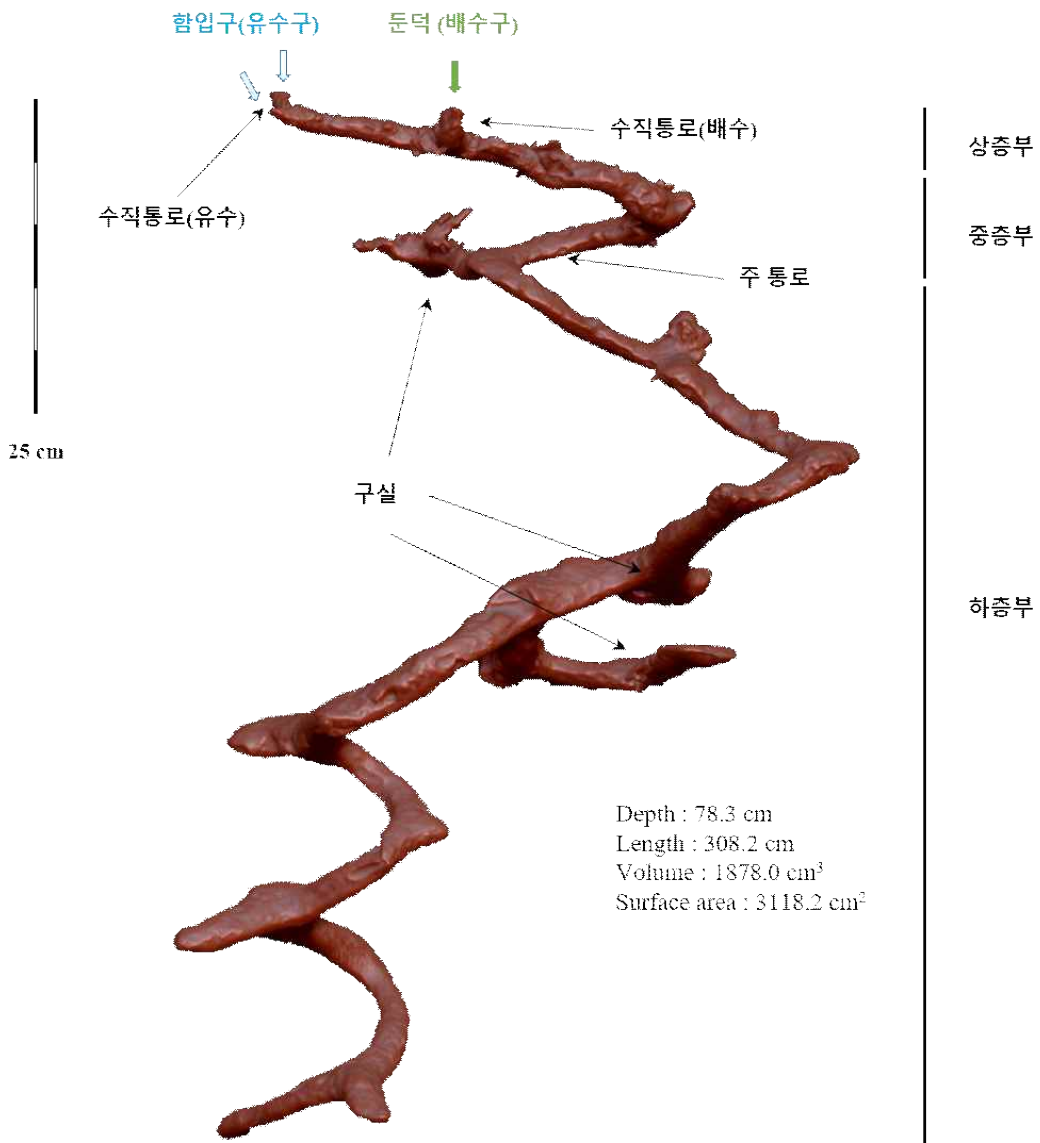


그림 3-3-17. 남해도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본

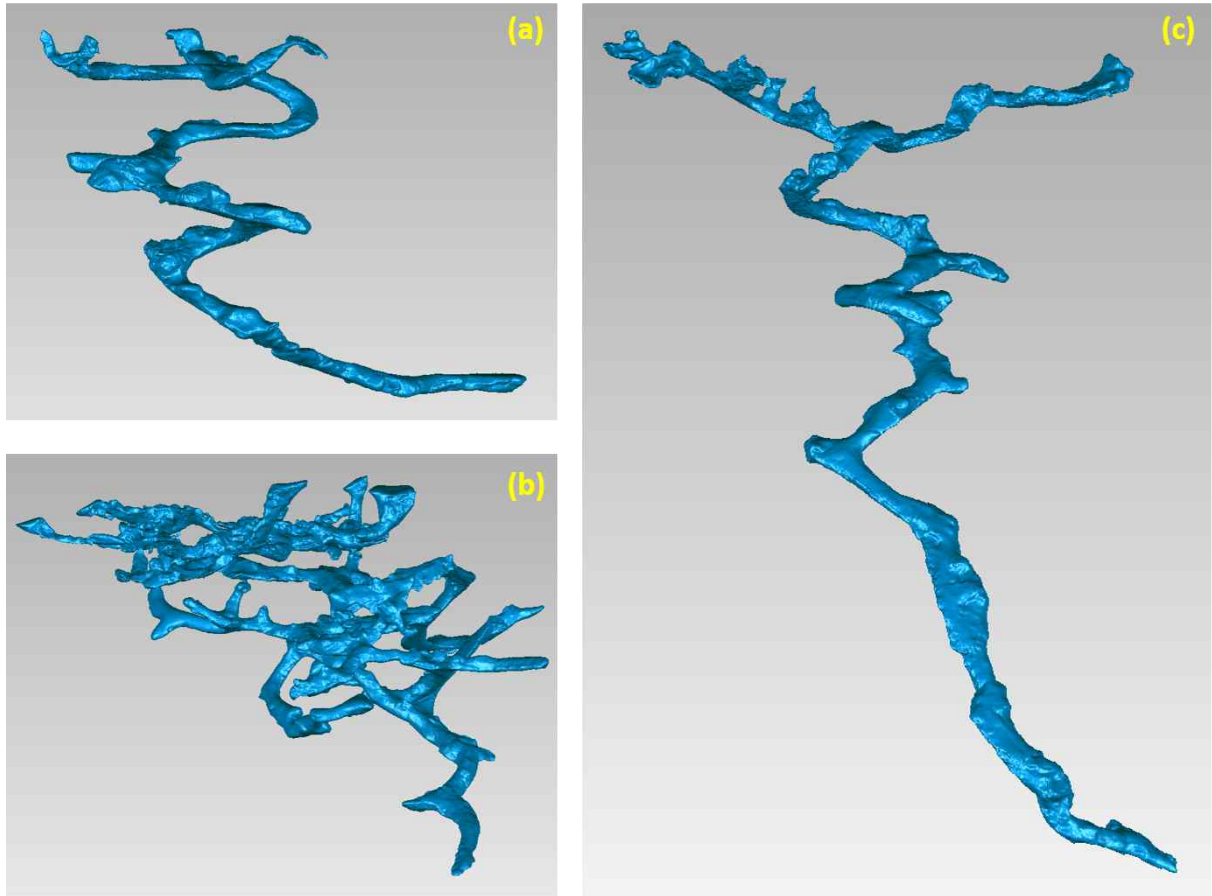


그림 3-3-18. 남해도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본

남해도 가재붙이 서식굴 표본 중 가재붙이 서식굴의 전형적인 구조가 아닌 것으로 판단되는 표본 1점(그림 3-3-18b)은 수치분석에서 제외하였다. 서식굴의 길이는 216.1-308.2cm이며, 깊이는 50.1-97.8cm까지 퇴적층 하부로 연장되어 있었다. 표면적은 2,424.6-3,679.5cm²였으며, 부피는 1,384.3-2,423.6cm³였다(표 3-3-9).

표 3-3-9. 남해도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본 수치

	No. of mound	Diameter of mound (cm)	Height of mound (cm)	No. of funnel	Length (cm)	Depth (cm)	Surface area (cm ²)	Volume (cm ³)
표본 1	1	1.0	3.8	2	308.2	78.3	3,118.2	1,878.0
표본 2	1	1.0	3.8	6	216.1	50.1	2,424.6	1,384.3
표본 3	1	1.0	3.0	3	247.4	97.8	3,679.5	2,423.6
평균	1	1	3.5	3.7	257.2	75.4	3,074.1	1,895.3

(라) 창선도 가재붙이 서식굴 수치, 구조 및 형태

2018년 8월과 2019년 4월 창선도 갯벌(CL-03 정점)에서 가재붙이 서식굴 표본 제작을 수행하였으며, 총 6점의 서식굴 표본을 채집하였으나 형태가 온전한 서식굴 표본은 총 4점이었다.

창선도 갯벌 가재붙이 서식굴은 전반적으로 강화도, 곰소만, 남해도 갯벌 가재붙이 서식굴과 비교하여 크기가 상대적으로 작으며 구조 또한 단순한 형태를 보였다(그림 3-3-19, 3-3-20). 분지된 통로와 주 통로가 결합되어 중층부를 구성하고 꼬임의 방향이 바뀌는 곳에 구실이 존재하긴 하지만 구실의 크기가 작았다. 하층부의 경우 주 통로가 수직으로 하부로 향하지 않고 비스듬하게 하부로 향하며 꼬임이 없는 경우가 대부분인 것으로 나타났다(그림 3-3-19, 3-3-20a).

그림 3-3-20b와 같이 상층부, 중층부, 하층부의 구분이 없는 매우 단순한 형태의 서식굴도 확인되었으며, 그림 3-3-20c와 같이 가재붙이 서식굴의 전형적인 특징들이 나타난 서식굴도 확인되었다.

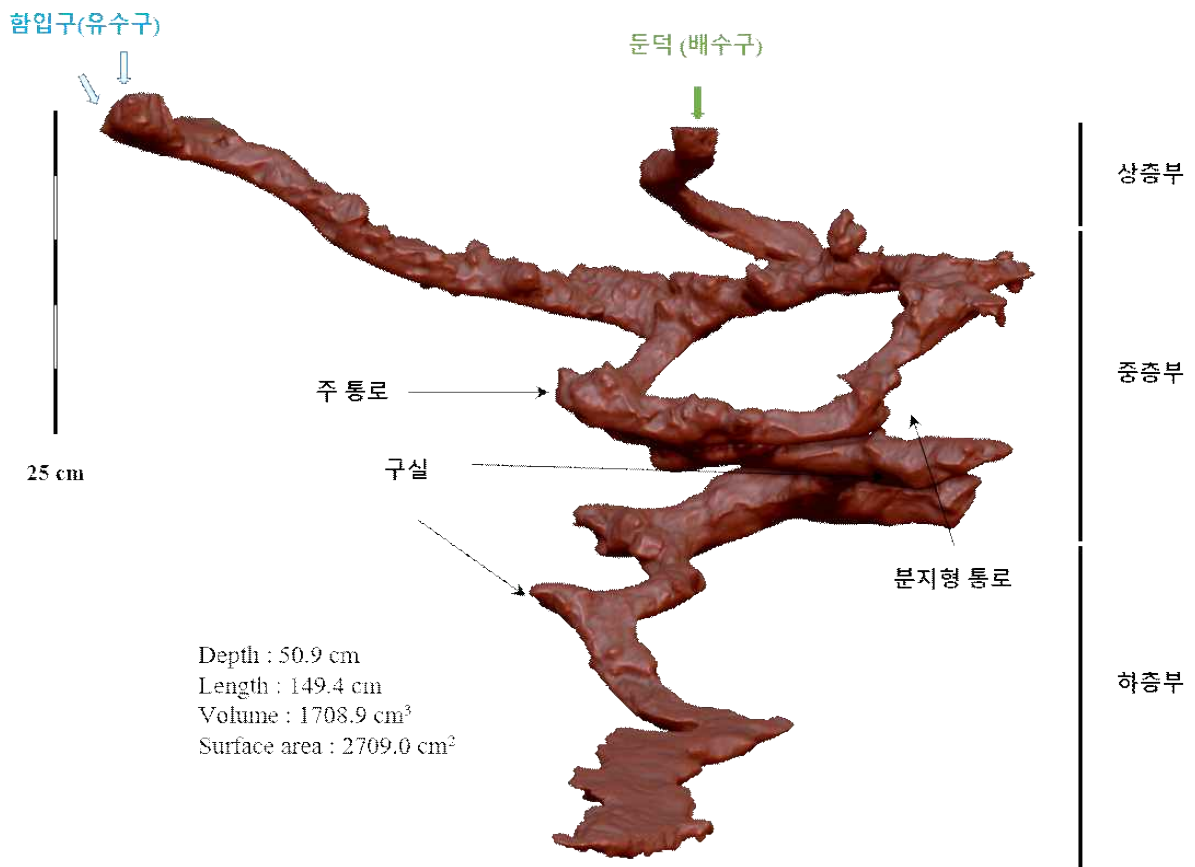


그림 3-3-19. 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴 표본

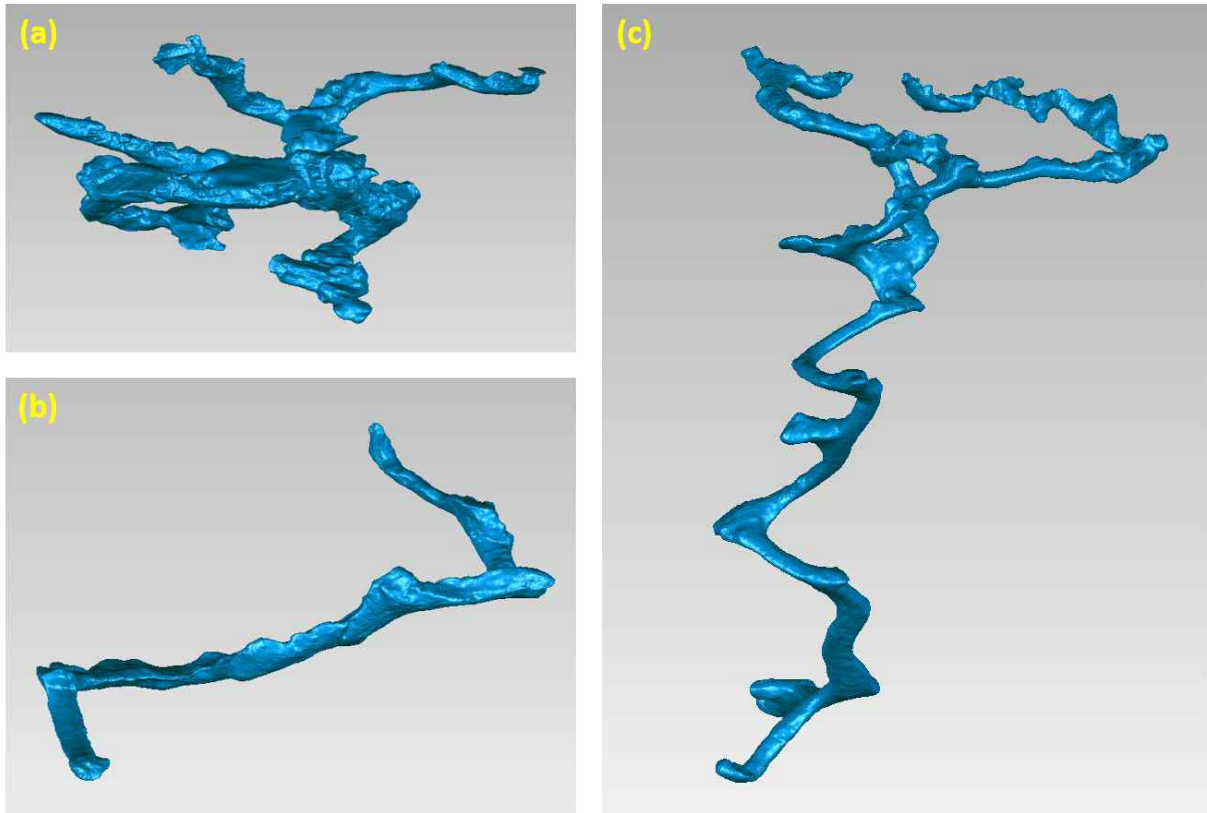


그림 3-3-20. 창선도 갯벌 가재불이 서식굴 표본

창선도 갯벌 가재불이 서식굴은 다른 갯벌 서식굴에 비해 작은 수치를 보였다(표 3-3-10). 서식굴의 길이는 67.7-151.2cm이며, 깊이는 12.3-50.9cm까지 퇴적층 하부로 연장되어 있었다. 표면적은 276.7-2,709.0cm²였으며, 부피는 637.4-1,944.2cm³였다.

표 3-3-10. 창선도 갯벌 가재불이 서식굴 표본 수치

	No. of mound	Diameter of mound (cm)	Height of mound (cm)	No. of funnel	Length (cm)	Depth (cm)	Surface area (cm ²)	Volume (cm ³)
표본 1	1	0.8	1.8	2	149.4	50.9	2,709.0	1,708.9
표본 2	1	1.5	2	9	151.2	35.7	1,147.4	1,944.2
표본 3	1	1.2	2.5	2	141.4	42.3	276.7	960.6
표본 4	1	1.0	3.0	3	69.7	12.3	289.3	637.4
평균	1	1.1	2.3	4.0	127.9	35.3	1,105.6	1,102.3

(마) 가재붙이 서식굴의 구조적 특징

본 연구에서 확인된 곱소만, 강화도, 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴은 형태적으로 유사한 모습을 보였다. 가재붙이 서식굴 표층은 중 모양의 1개의 둔덕과 다수의 함입구로 구성되며, 가재붙이 서식굴은 구조적으로 크게 상층부, 중층부, 하층부 3부분으로 나뉘어지는 특징을 보였다.

상층부의 수직통로 중 1개는 표층의 둔덕과 연결되고 나머지는 함입구와 연결되는데 해수에 의한 침수시 둔덕을 통해 해수 및 퇴적물이 배출되고 함입구를 통해 해수 및 퇴적물이 서식굴 안으로 공급된다. 주 통로는 사선으로 비스듬하게 하부로 향하는데 이는 펄새우류 서식굴에서 흔히 관찰되며 먹이탐색을 위해 표층에 용이하게 접근하기 위한 구조로 알려져 있다[15,16]. 하지만, 본 연구 및 선행연구 결과 가재붙이의 경우 현장조사 기간 동안 표층에서 관찰된 적이 없었다. 또한, 가재붙이 개체의 크기는 평균 1.6cm이고 서식굴 수직통로의 폭은 평균 0.9cm로 가재붙이가 수직통로를 통과하여 표층에 접근하기에 수직통로의 폭이 상대적으로 작았다. 이러한 결과는 가재붙이 서식굴의 주 통로가 사선으로 비스듬하게 하부로 향하는 구조는 다른 펄새우류와 다르게 표층 접근을 위한 구조가 아님을 나타낸다.

펄새우류의 서식굴에서 흔하게 발견되는 구실은 먹이를 저장하거나 퇴적물을 섭식하는 섭식활동으로 생기는 것으로 알려져 있다[17,18]. 가재붙이의 섭식형태에 대한 정보는 알려져 있지 않지만, 중층부와 하층부에서 발견되는 구실을 통해 가재붙이가 표층하퇴적물식자(subsurface deposit-feeder)임을 추정할 수 있다. 하지만, 서식굴 형태만으로 가재붙이의 섭식형태를 추정하는 것은 불충분하므로 추후 이에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

가재붙이 서식굴 중층부에서는 분지된 통로가 주 통로에 연결되어 하부로 향하는 형태를 보였다. 펄새우류인 *Upogebia omissa*와 *Upogebia noronhensis*의 서식굴에서도 이와 유사한 구조가 보고되었는데 이러한 구조는 산란시기에 나타나는 것으로 산란을 위해 수컷과 암컷 개체가 서로의 서식굴을 연결한 후 산란하고 산란 이후에는 다시 각각의 서식굴로 분리되는 것으로 알려져 있다[19,20]. 본 연구의 가재붙이 서식굴 표본들 중 일부에는 가재붙이 수컷과 암컷 개체가 포함되어 있는 경우가 있었으며, 갯벌 현장에서 가재붙이 개체 채집시 하나의 서식굴에서 수컷과 암컷이 동시에 채집되는 경우가 있었다. 따라서, 가재붙이 서식굴의 경우 산란 또는 다른 이유로 인해 수컷과 암컷의 서식굴이 연결된 후 따로 분리되지 않고 하나의 서식구로 결합되어 이러한 구조가 발생하는 것으로 추정되나 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

가재붙이 서식굴의 특징적인 구조는 시계방향 또는 반시계방향으로 주 통로가 회전하며 하부로 향하는 구조이다. 쪽 상과의 *Axianassa australis*와 *Biffarius arenosus*의 서식굴에서 이러한 회전구조가 보고되었는데, 현재까지 정확한 이유는 밝혀지지 않았다[21,22]. 이러한 회전구조를 형성하는 몇 가지 가설만이 제시되었는데 (1) 집게발 크기의 차이로 인한 회전, (2) 태풍과 같은 돌발적인 상황으로 인해 개체가 외부로 노출되었을 경우 빠르게 퇴적층 하부로 잠입하기 위한 행동, (3) 개체의 서식굴내 원활한 이동 등이

제시되어지고 있다. 가재붙이의 왼쪽과 오른쪽 집게발은 유의한 크기 차이가 없고 표층과 연결되는 수직통로는 직선형태이기 때문에 (1)과 (2)의 이유는 부적합한 것으로 판단된다. 가재붙이 서식굴은 회전구조(중층부, 하층부)의 길이가 비회전구조(상층부)에 비해 상대적으로 길기 때문에 서식굴내 원활한 이동을 위한 회전구조의 이유는 타당성이 있는 것으로 판단된다.

이러한 회전구조의 가장 합리적인 가설은 회전구조는 제한된 공간내에서의 먹이원 이용을 위한 구조라는 가설이다[21,23]. 앞서 언급한 것처럼 구실의 존재는 가재붙이가 퇴적물을 섭식하는 것을 나타내는데 이러한 구실이 회전이 발생하는 곳에 일정간격으로 분포하는 것은 구실이 존재하는 곳에서 선택적으로 섭식활동이 일어났음을 의미한다. 따라서, 이러한 회전구조는 가재붙이가 먹이를 찾는 과정에서 먹이원의 농도가 높은 경우 섭식활동으로 인해 구실이 생성되고 농도가 낮은 경우 섭식활동을 하지 않아 회전구조만 형성되는 것으로 추정해 볼 수 있다. 하지만, 가재붙이의 섭식형태, 먹이원, 생태특성 등에 대한 정보가 부족한 상황이므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(바) 가재붙이 서식지별 서식굴 수치, 구조 및 형태의 차이

곰소만, 강화도, 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴은 구조적으로 크게 유사하지만 세부적인 부분에서 차이를 보였다(그림 3-3-21). 곰소만과 강화도 갯벌 가재붙이 서식굴의 경우 남해도와 창선도 갯벌 서식굴에 비해 구실(chamber)의 크기가 크고 개수도 많았다(표 3-3-11). 앞서 언급한 것처럼 구실은 가재붙이의 섭식활동에 의해 생성되므로 이러한 구실의 개수와 크기 차이는 가재붙이 개체의 섭식활동 빈도 차이가 하나의 원인일 수 있다.

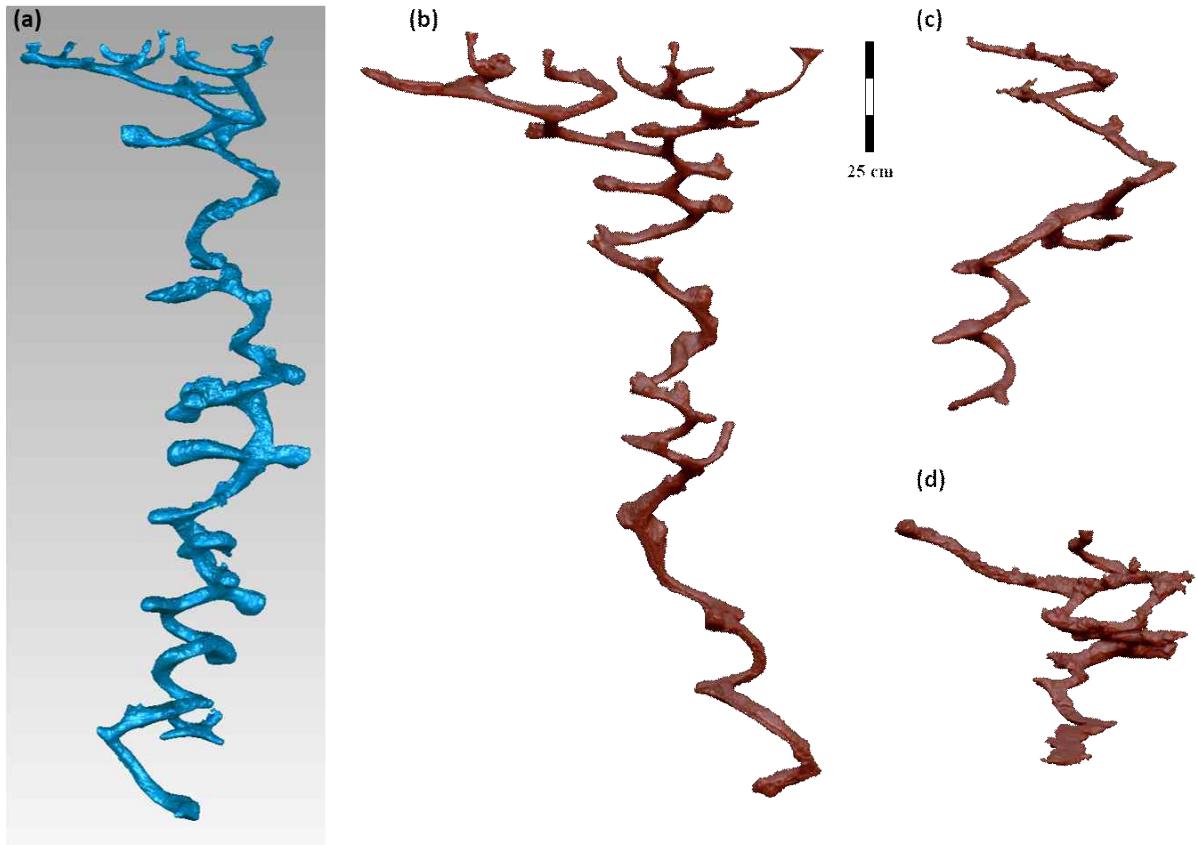


그림 3-3-21. 가재붙이 서식지별 서식굴 크기 및 구조
(a) 강화도 갯벌, (b) 곰소만 갯벌, (c) 남해도 갯벌, (d) 창선도 갯벌

서식굴 구조 및 형태 차이의 가장 주요한 원인 중 하나는 종간차이(섭식형태의 차이)이다. 여과식자(filter-feeder)의 서식굴은 U 또는 Y 형태가 일반적이며 퇴적물식자(deposit-feeder)의 서식굴은 여과식자의 서식굴에 비해 크고 복잡한 구조를 가지는 것으로 알려져 있다. 형태 및 유전적 분석 결과 곰소만, 강화도 가재붙이와 남해도, 창선도 가재붙이는 다른 종이므로 다른 섭식형태를 가질 수 있다. 남해도, 창선도 가재붙이 서식굴에 비해 곰소만, 강화도 가재붙이 서식굴의 크기가 상대적으로 크며 구조적으로 훨씬 복

잡한 구조를 보이고 구실의 개수가 더 많은 것은 두 종의 섭식형태가 다를 수 있음을 시사한다. 이러한 서식굴 구조 및 형태의 차이로 보면 곰소만, 강화도 가재붙이는 퇴적물식자, 남해도, 창선도 가재붙이는 퇴적물식자, 여과식자 또는 복합적인 섭식형태를 가지며 이에 따라 서식굴의 구조 및 형태의 차이가 발생하는 것으로 추정할 수 있으나 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 3-3-11. 가재붙이 서식지별 서식굴 평균 수치

Region	No. of mound	No. of funnel	Length (cm)	Depth (cm)	Surface area (cm ²)	Volume (cm ³)	No. of chamber	Volume of chamber (cm ³)
강화도 (n=2)	1	6.5	618.2	173.0	7,250.9	11,079.1	14	245.6
곰소만 (n=3)	1	6	737.7	178.0	9,157.7	6,910.7	6	135.4
남해도 (n=3)	1	3.7	257.2	75.4	3,074.1	1,895.3	2	40.9
창선도 (n=4)	1	4.0	127.9	35.3	1,105.6	1,102.3	2	35.2

서식지의 환경특성은 서식굴의 크기에 영향을 미치는 주요한 원인 중에 하나로 알려져 있다. 갯벌 생물의 서식굴 중요한 기능 중 하나는 해수 저장 기능이다. 남해도, 창선도 갯벌에 비해 곰소만, 강화도 갯벌의 가재붙이 서식지 고도가 높으며 이는 곰소만, 강화도 갯벌의 노출시간이 길다는 것을 나타낸다(표 3-3-12). 남해도, 창선도 갯벌에 비해 강화도, 곰소만 갯벌의 최대연속노출시간은 약 10배 정도 긴 것으로 나타났으며 이는 강화도, 곰소만 갯벌의 조석환경이 남해도, 창선도 갯벌에 비해 열악함을 의미한다. 서식지의 노출시간이 증가할수록 즉, 해수에 의한 침수가 빈번하지 않을수록 갯벌 생물은 서식굴을 크고 깊게 만들어 해수 저장 용량을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 따라서, 서식고도(노출시간)의 차이에 의해 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴 보다 곰소만, 강화도 갯벌 가재붙이 서식굴의 크기가 더 큰 것으로 판단된다.

서식지 퇴적상은 서식굴 크기를 결정하는 주요한 원인 중에 하나이다. 일반적으로 서식지 퇴적상이 조립할수록 입자간 공극의 크기가 크기 때문에 세립한 퇴적상에 비해 해수의 배수가 더 많이 발생하게 된다. 이에 따라, 조립한 퇴적상에 서식하는 생물은 해수를 더 많이 저장하고 배수를 방지하기 위해 크고 복잡한 구조의 서식굴을 생성한다. 곰소만, 강화도 갯벌에 비해 남해도, 창선도 갯벌의 퇴적상이 조립하기 때문에 해수의 저장과 배수를 방지하기 위해 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴의 크기가 커야하지만 본 연구결과는 곰소만, 강화도 갯벌의 서식굴이 더 크고 복잡한 것으로 나타났다. 이는 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이 서식지는 다수의 바위와 자갈로 이루어져 있으며 특히, 창선도의

경우 표층으로부터 약 30cm 깊이부터 단단한 암석들이 다수 분포하고 있어 가재붙이가 서식굴을 하부로 확장할 수 없는 환경을 가지고 있었다. 따라서, 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴의 깊이가 고평만, 강화도 갯벌에 비해 얕은 것은 이러한 서식지 퇴적상에 의한 것으로 판단된다.

표 3-3-12. 가재붙이 서식지별 환경특성

Region	Elevation from MSL (m)	Maximum duration of continuous exposure (day)	Composition(%)				Mean grain size (Φ)
			Gravel	Sand	Silt	Clay	
강화도	3.92	35	0	0.7	76.4	22.9	6.72
곶소만	3.15	30	0	3.8	63.5	32.7	7.06
남해도	0.55	3	0	43.2	19.3	37.5	6.16
창선도	0.33	3	8.8	66.8	7.9	16.5	3.37

3. 가재붙이 재분류

서태평양 갯벌에서 발견되는 *Laomedia* 속은 5종 (1종의 화석종 포함)으로 구성된 분류군이다: *Laomedia astacina* De Haan, 1841[24], *Laomedia barronensis* Ngoc-Ho & Yaldwyn, 1997[25], *Laomedia healyi* Yaldwyn & Wear, 1970[26], *Laomedia paucispinosa* Ngoc-Ho, 1997[27], *Laomedia praeastacina* Karasawa 1989[28]. 이 중 *Laomedia* 속의 모식종인 *L. astacina*(국명: 가재붙이)는 일본이 모식산지인 분류군으로 현재 한국, 중국, 대만, 베트남, 말레이시아에서 보고되어왔다. 한국에서는 인천의 주안 인근에서 처음 보고한 이후, 서해 및 남해 갯벌 지역에서 널리 보고되어왔다. 우리나라에는 *L. astacina* 한 종만이 분포하는 것으로 보고돼 있다.

기존 연구들에서 쪽 상과 필새우류의 서식굴의 수치, 구조 및 형태는 서식지 특성과 더불어 종간차이(특히 섭식형태)에 따라 달라진다고 보고되어졌다. 앞서 국내 서·남해안 가재붙이 서식굴의 수치, 구조 및 형태차이 결과는 이러한 차이들의 원인이 서식지 뿐만 아니라 종간차이에 의한 것일 수 있음을 나타냈다. 따라서, 국내에 서식하는 가재붙이 종의 재분류가 필요하며 이를 위해 강화도, 대부도, 곰소만, 남해도, 창선도 갯벌의 가재붙이를 채집하여 형태분류 및 분자 계통학적 분석을 수행하였다.

분자 계통학적 분석 결과 강화도, 대부도, 곰소만, 남해도, 창선도 갯벌에서 채집한 가재붙이는 두 개의 그룹으로 유전적 차이를 보였다(표 3-3-13). 곰소만, 대부도 갯벌은 A그룹과 B그룹이 혼재되어 서식하고 있었으며, 강화도 갯벌은 B그룹, 남해도와 창선도 갯벌은 A그룹의 가재붙이만이 서식하고 있었다. A그룹과 B그룹의 COI distant relationship은 14.3%를 나타냈다(그림 3-3-22, 3-3-23). 즉, A그룹과 B그룹의 유전적 차이는 약 14.3%의 차이를 보였으며 일반적으로 동일 속의 종은 유전적으로 약 7-10%를 나타낸다. 이러한 결과는 A그룹과 B그룹이 다른 종이라는 것을 나타내며 A그룹과 B그룹이 혼재되어 있는 대부도와 곰소만 갯벌을 제외하고 강화도와 남해도, 창선도 갯벌에 서식하는 가재붙이는 유전적으로 다른 종임을 시사하고 있다.

강화도 갯벌 가재붙이 서식굴은 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이 서식굴은 구조적으로 크기적으로 뚜렷한 차이를 보였으며 이러한 서식굴의 크기 및 구조의 차이는 두 갯벌 가재붙이의 종간차이에 의해 발생한 것일 수 있으며 분자 계통학적 분석 결과는 종간차이에 의한 서식굴 크기 및 구조 차이를 뒷받침하고 있음을 알 수 있다.

표 3-3-13. 가재붙이 채집지역, 개체정보 및 분자 계통학적 분석 결과

Site	No.	Sample No.	gDNA No.	Carapace length (cm)	Group
곰소만 갯벌 (Kla-01)	1	Kla-01-1	La1	7	A
	2	Kla-01-2	La2	6	A
	3	Kla-01-3	La3	3.5	-
	4	Kla-01-4	La4	5	-
	5	Kla-01-5	La5	3.5	-
	6-1	Kla-01-6-1	La6	5	B
	6-2	Kla-01-6-2	La7	4.5	-
	7	Kla-01-7	La8	6.5	-
	8	Kla-01-8	La9	4	A
대부도 갯벌 (Dbla-01)	1	Dbla-01-1	La11	4.5	B
	2	Dbla-01-2	La12	4	A
	3	Dbla-01-3	La13	5.5	-
강화도 갯벌 (Dla-02)	1	Dla-02-1	La14	7	B
	2	Dla-02-2	La15	6	B
	3	Dla-02-3	La16	4	B
남해도 갯벌 (Nla-01)	1	Nla-01-1	La17	4.5	A
	2	Nla-01-2	La18	5.5	A
	3	Nla-01-3	La19	5.5	A
	4	Nla-01-4	La20	5.5	A
	5	Nla-01-5	La21	5	A
	6	Nla-01-6	La22	6	A
	7	Nla-01-7	La23	2	A
	8	Nla-01-8	La24	3.5	A
창선도 갯벌 (Cla-03)	1	Cla-03-1	La25	4	A
	2	Cla-03-2	La26	4	A
	3	Cla-03-3	La27	3	A
	4	Cla-03-4	La28	4	A
	5	Cla-03-5	La29	2	A
	6	Cla-03-6	La30	2.5	A
	7	Cla-03-7	La31	4	A
	8	Cla-03-8	La32	4	A

	JH26_L...	JH27_L...	La14_t...	La6_tm...	La11_t...	La16_t...	La1_tm...	La26_t...	La2_tm...	La12_t...	La18_t...	La35_t...	La10_t...	La9_tm...	La32_t...	La19_t...	La23_t...	La31_t...	La27_t...	La17_t...
JH26_Laomedia_sp_dt...	99.5%	99.5%	99.5%	99.5%	99.2%	88.1%	88.3%	88.4%	88.4%	88.4%	88.4%	88.4%	88.6%	88.4%	88.3%	88.4%	88.3%	88.3%	88.3%	88.6%
JH27_Laomedia_sp_dt...	99.5%	100%	99.5%	99.7%	99.4%	88.6%	88.8%	88.9%	88.9%	88.9%	88.9%	88.9%	89.1%	88.9%	88.8%	88.9%	88.8%	88.8%	88.8%	88.8%
La14_tm44_jgCOL_65...	99.5%	100%	99.5%	99.7%	99.4%	88.6%	88.8%	88.9%	88.9%	88.9%	88.9%	88.9%	89.1%	88.9%	88.8%	88.9%	88.8%	88.8%	88.8%	88.8%
La6_tm40_jgCOL_re	99.5%	99.5%	99.5%	99.5%	99.2%	88.5%	88.7%	88.8%	88.8%	88.8%	88.8%	88.8%	89.0%	88.8%	88.7%	88.8%	88.7%	88.7%	88.7%	89.0%
La11_tm42_jgCOL_65...	99.5%	99.7%	99.7%	99.5%	99.4%	88.3%	88.4%	88.6%	88.6%	88.6%	88.6%	88.6%	88.8%	88.6%	88.4%	88.6%	88.4%	88.4%	88.4%	88.8%
La16_tm44_jgCOL_65...	99.2%	99.4%	99.4%	99.2%	99.4%	88.0%	88.0%	88.1%	88.3%	88.3%	88.3%	88.3%	88.4%	88.3%	88.1%	88.3%	88.1%	88.1%	88.1%	88.4%
La1_tm38_jgCOL_658bp	88.1%	88.6%	88.6%	88.5%	88.3%	88.0%	88.0%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	99.1%	98.9%	99.1%	98.8%	98.9%	98.9%	99.1%	98.8%
La26_tm48_jgCOL_65...	88.3%	88.8%	88.8%	88.7%	88.4%	88.1%	99.2%	99.2%	99.1%	99.1%	99.1%	99.1%	98.9%	98.8%	98.9%	98.6%	98.8%	98.8%	98.8%	98.6%
La2_tm38_jgCOL_658bp	88.4%	88.9%	88.9%	88.8%	88.6%	88.3%	99.2%	99.1%	100%	100%	100%	100%	99.8%	99.7%	99.8%	99.5%	99.7%	99.7%	99.7%	99.5%
La12_tm42_jgCOL_65...	88.4%	88.9%	88.9%	88.8%	88.6%	88.3%	99.2%	99.1%	100%	100%	100%	100%	99.8%	99.7%	99.8%	99.5%	99.7%	99.7%	99.7%	99.5%
La18_tm46_jgCOL_65...	88.4%	88.9%	88.9%	88.8%	88.6%	88.3%	99.2%	99.1%	100%	100%	100%	100%	99.8%	99.7%	99.8%	99.5%	99.7%	99.7%	99.7%	99.5%
La35_tm48_jgCOL_65...	88.4%	88.9%	88.9%	88.8%	88.6%	88.3%	99.2%	99.1%	100%	100%	100%	100%	99.8%	99.7%	99.8%	99.5%	99.7%	99.7%	99.7%	99.5%
La10_tm42_jgCOL_65...	88.6%	89.1%	89.1%	89.0%	88.8%	88.4%	99.1%	98.9%	99.8%	99.8%	99.8%	99.8%	99.5%	99.7%	99.4%	99.5%	99.5%	99.5%	99.4%	99.1%
La9_tm42_jgCOL_658bp	88.4%	88.9%	88.9%	88.8%	88.6%	88.3%	98.9%	98.8%	99.5%	99.5%	99.5%	99.5%	99.4%	99.5%	99.7%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	98.9%
La32_tm48_jgCOL_65...	88.3%	88.8%	88.8%	88.7%	88.4%	88.1%	99.1%	98.9%	99.8%	99.8%	99.8%	99.8%	99.7%	99.8%	99.7%	99.5%	99.5%	99.5%	99.4%	99.1%
La19_tm46_jgCOL_65...	88.4%	88.9%	88.9%	88.8%	88.6%	88.3%	98.8%	98.6%	99.5%	99.5%	99.5%	99.5%	99.4%	99.5%	99.7%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	98.8%
La23_tm48_jgCOL_65...	88.3%	88.8%	88.8%	88.7%	88.4%	88.1%	98.9%	98.8%	99.7%	99.7%	99.7%	99.7%	99.5%	99.4%	99.5%	99.2%	100%	100%	99.2%	98.9%
La31_tm48_jgCOL_65...	88.3%	88.8%	88.8%	88.7%	88.4%	88.1%	98.9%	98.8%	99.7%	99.7%	99.7%	99.7%	99.5%	99.4%	99.5%	99.2%	100%	100%	99.2%	98.9%
La27_tm48_jgCOL_65...	88.3%	88.8%	88.8%	88.7%	88.4%	88.1%	99.1%	98.6%	99.5%	99.5%	99.5%	99.5%	99.4%	99.2%	99.4%	99.1%	99.2%	99.2%	99.2%	98.8%
La17_tm46_jgCOL_65...	88.6%	89.1%	89.1%	89.0%	88.8%	88.4%	98.8%	98.6%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	99.1%	98.9%	99.1%	98.8%	98.9%	98.9%	98.9%	98.8%
La20_tm46_jgCOL_65...	88.6%	89.1%	89.1%	89.0%	88.8%	88.4%	98.6%	98.5%	99.1%	99.1%	99.1%	99.1%	98.9%	98.8%	98.9%	98.6%	98.8%	98.8%	98.8%	99.5%
La24_tm48_jgCOL_65...	88.8%	89.2%	89.2%	89.1%	88.9%	88.6%	98.8%	98.6%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	99.1%	98.9%	99.1%	98.8%	98.9%	98.9%	98.9%	98.8%
La29_tm48_jgCOL_65...	88.8%	89.2%	89.2%	89.1%	88.9%	88.6%	98.8%	98.6%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	99.1%	98.9%	99.1%	98.8%	98.9%	98.9%	98.9%	98.8%
La30_tm48_jgCOL_65...	88.8%	89.2%	89.2%	89.1%	88.9%	88.6%	98.8%	98.6%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	99.1%	98.9%	99.1%	98.8%	98.9%	98.9%	98.9%	98.8%
La33_tm48_jgCOL_65...	88.8%	89.2%	89.2%	89.1%	88.9%	88.6%	98.8%	98.6%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	99.1%	98.9%	99.1%	98.8%	98.9%	98.9%	98.9%	98.8%
La22_tm48_jgCOL_65...	88.8%	89.2%	89.2%	89.1%	88.9%	88.6%	98.8%	98.6%	99.2%	99.2%	99.2%	99.2%	99.1%	98.9%	99.1%	98.8%	98.9%	98.9%	98.9%	98.8%
La28_tm48_jgCOL_65...	88.6%	89.1%	89.1%	89.0%	88.8%	88.4%	98.6%	98.5%	99.1%	99.1%	99.1%	99.1%	98.9%	98.8%	98.9%	98.6%	98.8%	98.8%	98.8%	99.5%
La34_tm48_jgCOL_65...	88.6%	89.1%	89.1%	89.0%	88.8%	88.4%	98.6%	98.5%	99.1%	99.1%	99.1%	99.1%	98.9%	98.8%	98.9%	98.6%	98.8%	98.8%	98.8%	99.5%
La21_tm48_jgCOL_65...	88.4%	88.9%	88.9%	88.8%	88.6%	88.3%	98.5%	98.3%	98.9%	98.9%	98.9%	98.9%	98.8%	98.6%	98.8%	98.5%	98.6%	98.6%	98.5%	99.4%
Laomedia_healyi	82.8%	83.0%	83.0%	83.3%	82.7%	82.4%	83.6%	83.9%	83.6%	83.6%	83.6%	83.6%	83.7%	83.4%	83.4%	83.4%	83.4%	83.4%	83.6%	83.9%

그림 3-3-22. 서식지별 가재붙이 개체의 COI 분석 결과

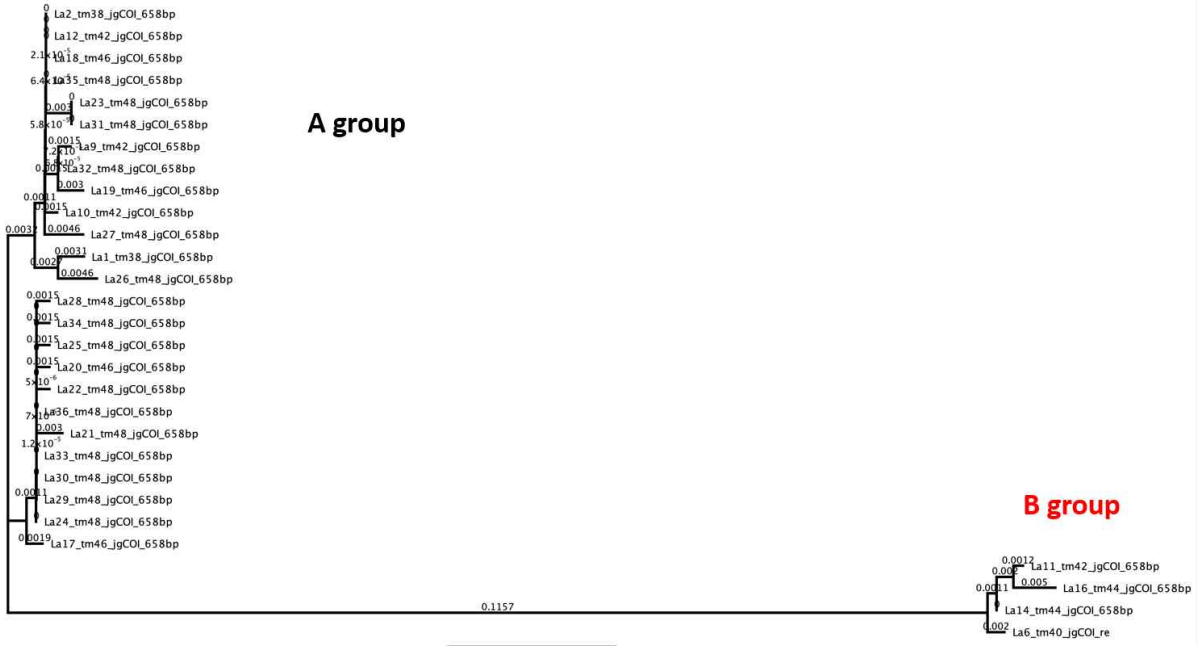


그림 3-3-23. A 그룹과 B 그룹의 COI 차이

유전적 차이 분석 결과 A그룹만이 서식하는 남해도 및 창선도 갯벌의 가재붙이는 서식굴의 크기 및 형태 그리고 개체의 형태 분석결과 국내에 서식하는 것으로 보고되어진 *L. astacina*의 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 따라서, 유전적 차이를 보인 강화도 갯벌 가재붙이가 다른 종일 가능성이 높은 것으로 판단되어 강화도 갯벌 가재붙이와 *L. astacina*의 형태적 차이를 분석하였다.

강화도 갯벌 가재붙이와 *L. astacina*는 Rostrum의 형태, 집게다리의 형태, 걷는다리의 비율 및 구기부의 형태가 매우 유사한 것으로 나타났다(그림 3-3-24, 3-3-25). 하지만, 두 종의 차이를 구분 짓는 확연히 다른 형태적 특징을 보였다. *L. astacina*는 갑각 이마뿔 뒷가시의 크기가 매우 잘 발달되어 있었으나 강화도 갯벌 가재붙이는 갑각 이마뿔 뒷가시가 상대적으로 덜 발달되어 있었다. 또한, 첫 번째 가슴다리의 carpus의 윗가시가 *L. astacina*는 매우 잘 발달되어 있는 반면에 강화도 갯벌 가재붙이는 상대적으로 약하게 발달되어 있었다.

분자 계통학적 분석과 형태분석 결과 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이(A그룹)와 강화도 갯벌 가재붙이(B그룹)는 COI distant relationship은 14.3%의 차이를 보였으며 형태적으로도 다른 특징을 나타냈다. 유전자적, 형태적 분석 결과 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이는 국내에 서식하는 것으로 보고되어진 *L. astacina*일 것으로 추정되며, 강화도 갯벌 가재붙이는 현재까지 보고되어지지 않은 신종일 것으로 판단된다. 대부도, 곰소만 갯벌은 위의 두 종이 혼재되어 서식하는 것으로 나타났다.

강화도 갯벌에 서식하는 가재붙이와 창선도, 남해도 갯벌에 서식하는 가재붙이는 유전적, 형태적 차이를 보였으며 서식굴 크기 및 구조도 뚜렷한 차이를 보였다. 본 연구결과는 강화도 갯벌과 창선도, 남해도 갯벌 가재붙이의 중간차이 또는 서식지 특성차이에 따라 서식굴의 크기 및 구조의 차이가 발생하는 것을 확인하였지만 중간차이와 서식지 특성 중 어떤 것이 주요한 원인인지를 규명하진 못했다. 따라서, 서식지별 서식굴 크기 및 구조 차이의 주요 원인을 밝히는 추가연구가 필요할 것으로 판단되며 본 연구에서 조사되어진 서식지 이외의 서식지 추가 확인 및 서식지별 가재붙이의 유전적, 형태적 차이 분석을 통해 국내에 서식하는 가재붙이 종의 재분류 추가 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.



그림 3-3-24. 강화도 갯벌 가재붙이



그림 3-3-25. 창선도 갯벌 가재붙이

4. 가재붙이 관개활동에 의한 퇴적물재배치

(가) 가재붙이 퇴적물재배치율 및 환경요인에 따른 변화

가재붙이 실험구 둔덕 고도에 따라 조석환경이 다르게 나타났다(표 3-3-14). 고도가 가장 높은 LM.1의 경우 연간 184회의 노출과 침수가 반복되고 평균 침수시간은 2.3h, 평균 노출시간은 45h, 최대 연속 노출시간은 14일로 나타났으며, 고도가 가장 낮은 LM.5의 경우 연간 292회의 노출과 침수가 반복되고 평균 침수시간은 2.8h, 평균 노출시간은 27h, 최대 연속 노출시간은 10일로 고도에 따라 조석환경이 다른 것으로 나타났다. 고도가 높을수록 침수/노출 횟수와 평균 침수시간이 감소하고 평균 노출시간과 최대 연속 노출시간은 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 가재붙이 서식고도가 높을수록 조석환경이 열악해지며 이에 따라 가재붙이가 관개활동을 할 수 있는 시간이 감소하는 것으로 나타났다.

표 3-3-14. 가재붙이 실험구 둔덕 고도별 조석환경

	Elevation from MSL (cm)	Submergence /Exposure frequency (yr ⁻¹)	Mean duration of submergence (h)	Mean duration of continuous exposure (h)	Maximum duration of continuous exposure (day)
LM.1	273	184	2.3±1.4	45±73	14
LM.2	268	200	2.3±1.4	41±67	12
LM.3	265	213	2.2±1.4	38±63	12
LM.4	260	229	2.5±1.4	26±58	12
LM.5	243	292	2.8±1.5	27±44	10

가재붙이 관개활동에 의한 퇴적물재배치는 모든 실험구에서 침수시간이 증가할수록 퇴적물재배치가 증가하는 경향을 보였다(그림 3-3-26, 3-3-27). 고도가 가장 높은 LM.1의 경우 3번째 샘플링 시간을 제외하고 전반적으로 침수시간이 증가할수록 퇴적물재배치가 증가하는 경향성을 보였으며, 모든 실험구 중 침수시간과 가장 유의한 상관성을 나타냈다($r^2=0.56$). LM.2는 모든 실험구 중에서 가장 낮은 퇴적물재배치를 보였으나 침수시간과 높은 상관성을 보였고, LM.3의 경우 4번째 샘플링 시간에서 가장 높은 퇴적물재배치를 보였다. LM.4의 경우 3번째 샘플링 시간까지 침수시간과 퇴적물재배치가 비례하는 경향성을 보였지만 4,5번째 샘플링 시간에는 침수시간이 증가함에도 퇴적물재배치가 감소하는 것으로 나타났으며 이에 따라 침수시간과 가장 낮은 상관성을 나타냈다($r^2=0.17$). LM.5는 LM.2를 제외하고 가장 낮은 퇴적물재배치를 보였지만 침수시간과 높은 상관성을 나타냈다.

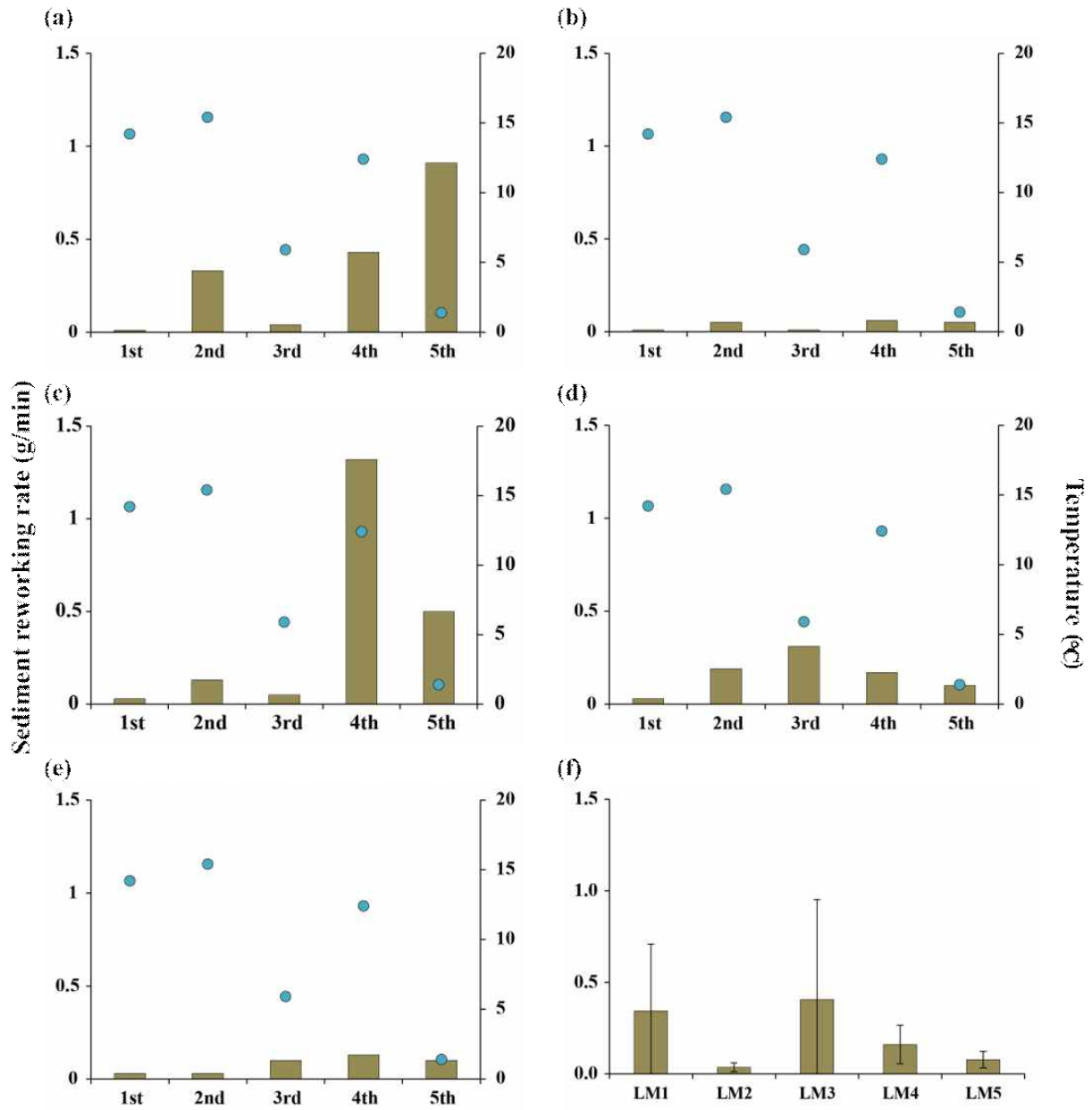


그림 3-3-26. 가재붙이 실험구 둔덕별 퇴적물재배치 (a:LM.1, b:LM.2, c:LM.3, d:LM.4, e:LM.5) 및 평균 퇴적물재배치(f)

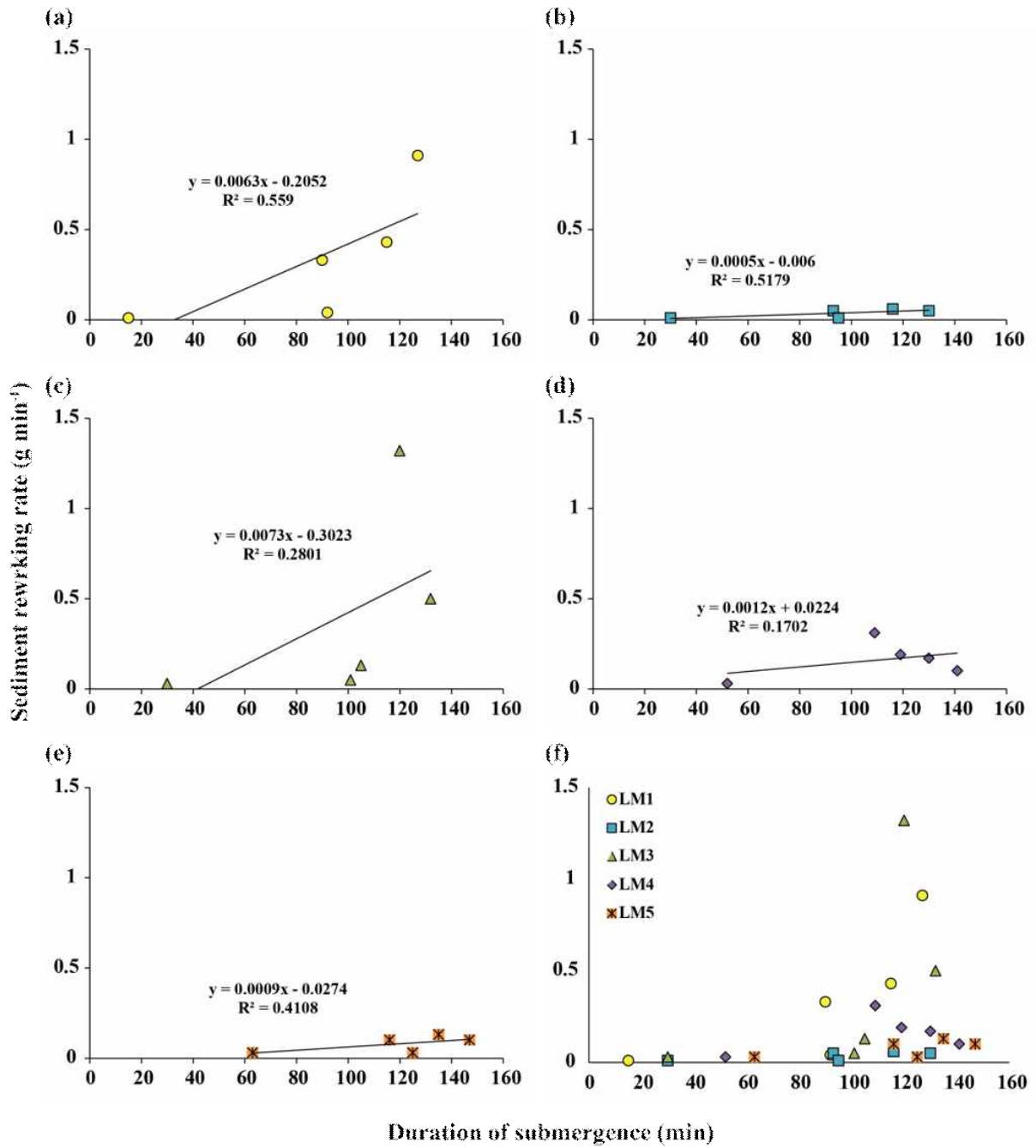


그림 3-3-27. 가재붙이 실험구 둔덕별 침수시간과 퇴적물재배치 상관성 (a:LM.1, b:LM.2, c:LM.3, d:LM.4, e:LM.5, e:통합)

가재붙이 관개활동에 의한 퇴적물재배치는 조석환경과 유의한 상관성을 나타냈다(그림 3-3-28). 퇴적물재배치는 침수/노출 횟수와 평균 침수시간이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으나, 평균 노출시간과 최대 연속 노출시간이 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈다. 즉, 서식고도가 증가할수록 퇴적물재배치는 증가하며 가재붙이의 관개활동 가능 시간이 감소할수록 퇴적물재배치가 증가하는 것으로 나타났다.

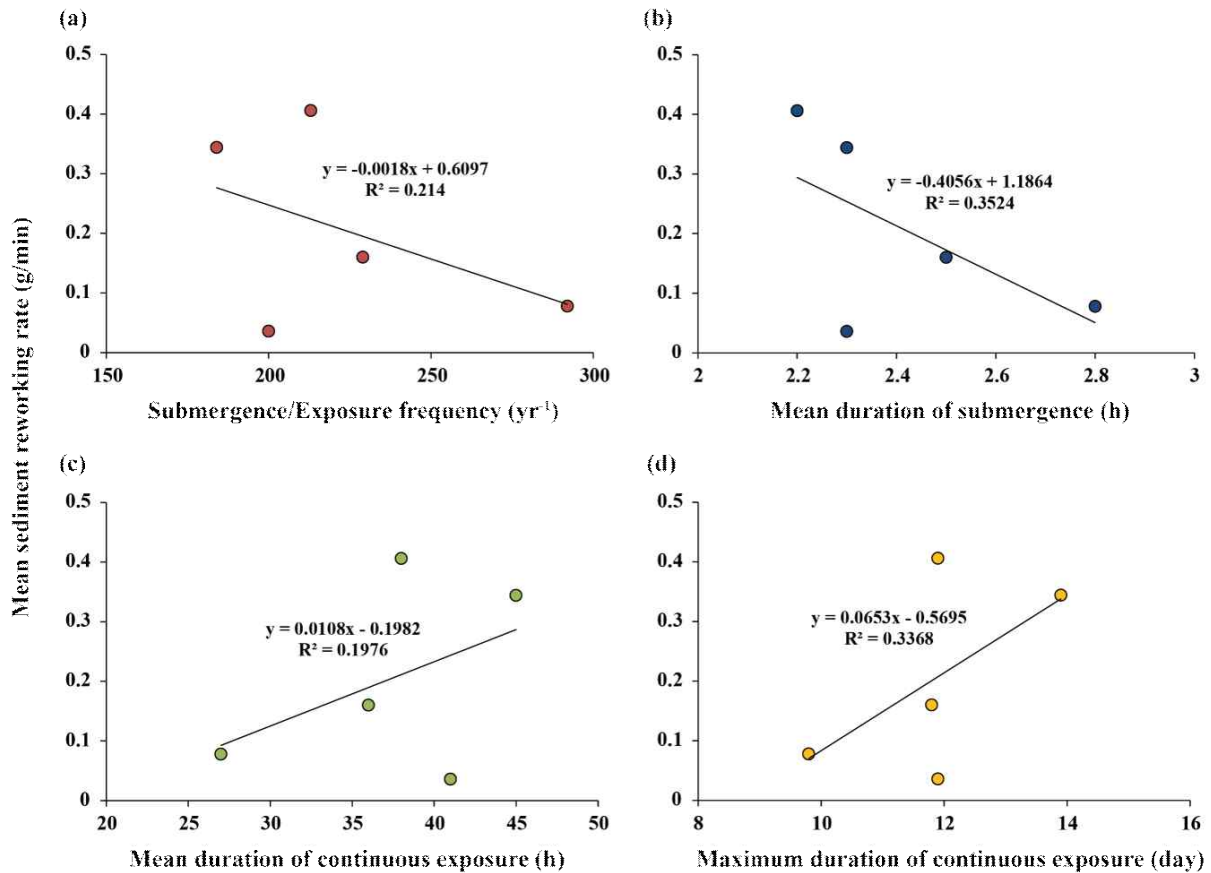


그림 3-3-28. 조석환경과 가재붙이 퇴적물재배치의 상관성

가재붙이의 퇴적물재배치는 모든 실험구에서 침수시간이 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈다(그림 3-3-27). 서식고도의 차이는 펄새우류의 서식굴이 해수에 의해 침수되는 기간의 차이를 발생시키며 이는 먹이원의 침전시간의 차이를 발생시킨다. 먹이원 침전시간이 감소할수록 먹이원의 풍부도는 낮아지게 되고 개체는 에너지 요구량을 충족시키기 위해 더 많은 관개활동을 하는 것으로 알려져 있다[29,30]. 가재붙이의 서식고도가 높을수록 해수에 의한 침수시간이 감소하게 되고 이는 먹이원의 풍부도가 낮아지는 결과를 낳게 되므로 단위시간당 퇴적물재배치는 증가하게 된다. 본 결과는 침수시간이 가재붙이의 관개활동을 조절하는 중요한 요인임을 시사한다.

가재붙이의 퇴적물재배치는 침수시간이 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈지만 서식고도가 낮아질수록 상관성이 낮아지는 경향을 나타냈다(그림 3-3-27). 또한, 평균 퇴적물

재배치는 침수시간이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다(그림 3-3-28b). 서식고도가 높은 LM.1의 경우 침수시간이 증가함에 따라 퇴적물재배치가 증가하는 것을 볼 수 있지만, 서식고도가 낮은 LM.4와 LM.5의 경우 침수시간이 일정시간에 도달하면(약 120분) 퇴적물재배치가 거의 변화가 없음을 확인할 수 있었다. 이는 가재붙이는 관개활동을 할 수 있는 시간이 충분히 확보되면 관개활동의 증가가 나타나지 않는 것으로 추정할 수 있다. 따라서, 침수시간이 짧은 경우 가재붙이의 퇴적물재배치는 침수시간의 증가에 따라 증가하지만 침수시간이 충분히 확보될 경우 침수시간이 퇴적물재배치에 미치는 영향은 감소하는 것으로 판단된다. 본 결과는 침수시간이 충분할 경우 가재붙이가 관개활동보다 서식굴 유지/보수 등과 같은 다른 활동의 빈도가 증가할 수 있음을 시사하지만 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구의 서식고도별 퇴적물재배치율은 LM.3이 0.41g min^{-1} 으로 가장 높은 값을 보였으며 LM.2가 0.04g min^{-1} 로 가장 낮은 값을 나타냈다(표 3-3-15). 곰소만 갯벌 가재붙이의 평균 퇴적물재배치율은 $39\text{g ind.}^{-1}\text{ day}^{-1}$ 로 산출되었으며 이는 다른 쪽 상과의 새우류의 퇴적물재배치율과 비교했을 때 월등하게 높은 값으로 나타났다. 쪽 상과 새우류인 *Callinassa subterranean*과 *Callinassa filholi*의 퇴적물재배치율은 $1.3\text{g ind.}^{-1}\text{ day}^{-1}$ 과 $15.5\text{g ind.}^{-1}\text{ day}^{-1}$ 으로 보고되었다[31,32]. 곰소만 갯벌의 가재붙이 서식밀도를 고려했을 때 가재붙이의 퇴적물재배치율은 $71.2\text{kg m}^{-2}\text{ year}^{-1}$ 로 산출되었으며, 이 결과는 가재붙이의 퇴적물재배치가 조간대 퇴적층의 생지화학적 변화에 중요한 영향을 미치는 요인임을 시사한다.

표 3-3-15. 가재붙이 실험구 둔덕별 평균 재배치 퇴적물, 평균 침수시간 및 평균 퇴적물 재배치율

	Mean expelled sediment (g)	Mean duration of submergence (min)	Mean sediment reworking rate (g min^{-1})
LM.1	44±53	88±44	0.34
LM.2	6±5	93±38	0.04
LM.3	55±69	98±40	0.41
LM.4	26±14	110±35	0.16
LM.5	18±11	117±32	0.08

5. 가재붙이 관개활동에 의한 유기물 순환

(가) 침수 전·후 표층 퇴적물과 burrow sediment의 조성 및 유기물 농도 변화

침수 전 표층 퇴적물(surface), 둔덕 퇴적물(mound) 및 서식굴 내부 퇴적물(gallery)은 각기 다른 조성 및 평균 입도를 보였다(그림 3-3-29). 표층 퇴적물에 비해 둔덕 퇴적물과 30cm 깊이의 서식굴 내부 퇴적물은 조립한 것으로 나타났으며 12.5cm 깊이의 서식굴 내부 퇴적물은 세립한 것으로 나타났다. 반면에, 침수 후 표층 퇴적물, 둔덕 퇴적물 및 서식굴 내부 퇴적물의 조성 및 평균 입도는 유사하게 나타났다. 이는 가재붙이의 관개활동에 의해 해수 및 퇴적물의 유입과 유출을 통해 서식굴 내부에서 해수가 순환되어 퇴적물 조성 및 평균 입도가 균일해진 것을 나타낸다.

침수 전·후 가재붙이 둔덕 퇴적물의 입자 크기별 분포는 유사한 것으로 나타났다(그림 3-3-30). 침수 전·후 둔덕 퇴적물은 0.5-480 μ m의 분포범위를 보였으며 25-160 μ m 범위의 입자가 전체의 약 75%를 차지하였다. 본 결과는 가재붙이의 관개활동에 의해 둔덕으로 배출된 퇴적물은 일정 크기 이상의 퇴적물만 둔덕으로 퇴적되며 세립한 입자들은 수층으로 분산되는 것을 나타낸다. 침수 전 가재붙이 서식굴 내부 퇴적물(gallery)과 침수 후 둔덕(mound) 퇴적물의 입자 크기별 조성을 보면 둔덕 퇴적물은 조립한 sand의 비율이 높으며 서식굴 내부 퇴적물은 세립한 silt와 clay의 비율이 높은 것으로 나타났다(그림 3-3-31). 본 결과는 관개활동에 의해 서식굴 내부에서 배출된 퇴적물 중 약 30 μ m 이하의 세립한 퇴적물이 수층으로 분산되는 것을 나타낸다.

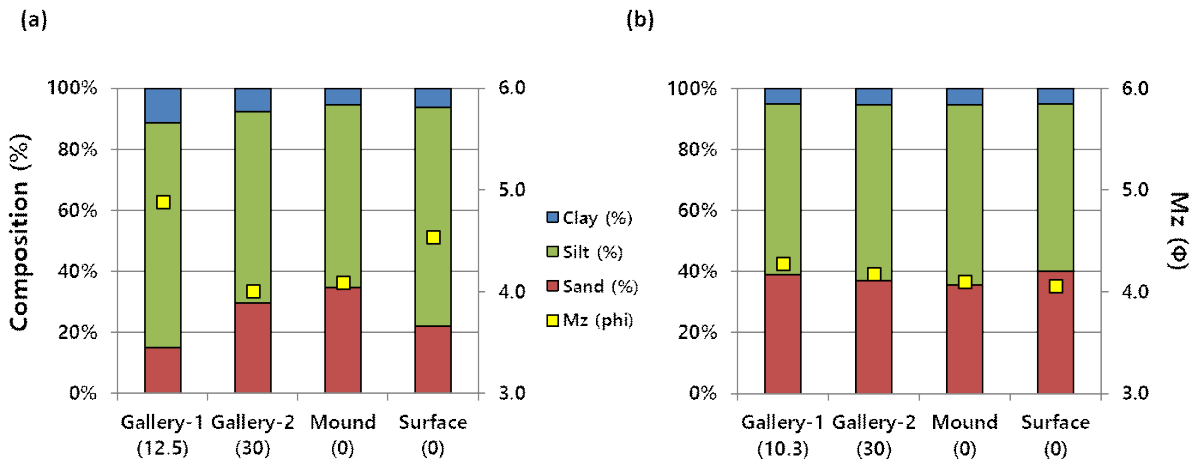


그림 3-3-29. 침수 전(a)과 침수 후(b)의 표층 퇴적물, 둔덕 퇴적물 및 서식굴 내부 퇴적물의 조성 및 평균 입도 분포(괄호안의 숫자는 표층으로부터 깊이를 의미함)

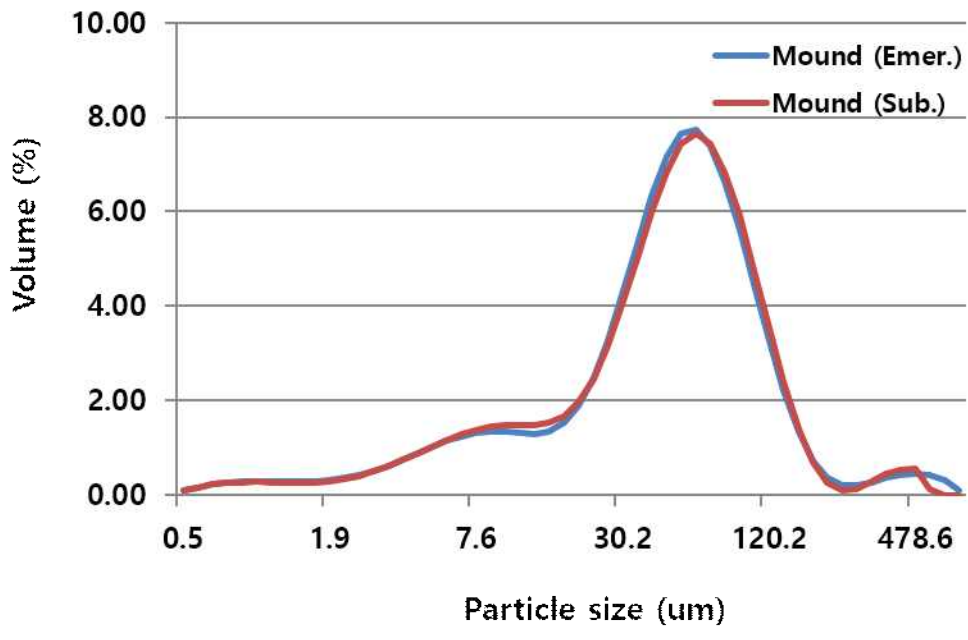


그림 3-3-30. 침수 전·후 가재붙이 둔덕 퇴적물의 크기별 입자 분포 (Emer.:침수 전, Sub.:침수 후)

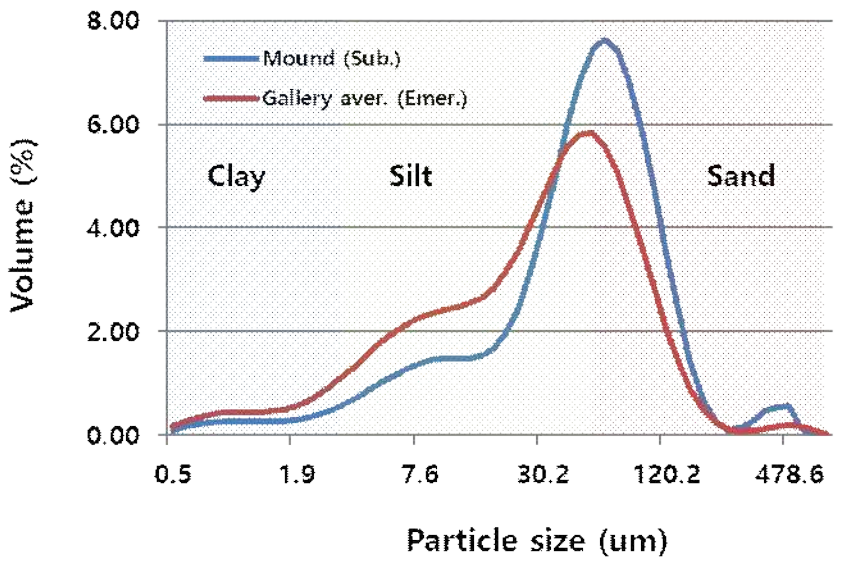


그림 3-3-31. 침수 전 서식굴 내부 퇴적물과 침수 후 둔덕 퇴적물의 크기별 입자 분포 (Emer.:침수 전, Sub.:침수 후)

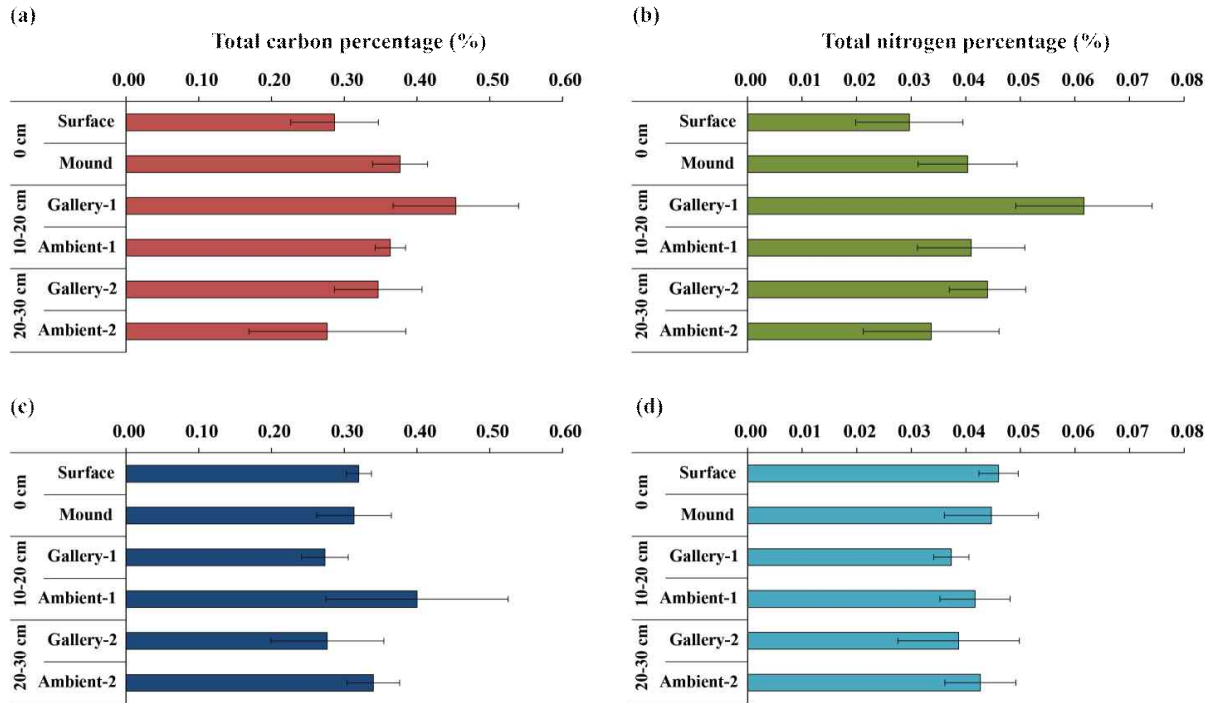


그림 3-3-32. 표층 퇴적물, 둔덕 퇴적물, 서식굴 내부 퇴적물 및 주변 퇴적물의 유기물 농도 변화 (a)침수 전 탄소 농도, (b)침수 전 질소 농도, (c)침수 후 탄소 농도, (d)침수 후 질소 농도

침수 전·후 둔덕 퇴적물, 서식굴 내부 퇴적물(gallery sediment), 서식굴 내부 퇴적물과 동일한 깊이의 주변 퇴적물(ambient sediment)과 표층 퇴적물의 탄소 및 질소 농도는 다른 양상을 나타냈다(그림 3-3-32).

침수 전 서식굴 내부 퇴적물의 탄소 및 질소는 주변 퇴적물보다 높은 농도를 나타냈다. 대부분의 축 상과 새우류의 서식굴 내부 퇴적물과 주변 퇴적물의 유기물 농도는 유사한 수준을 보이지만 서식굴 내벽을 점액질로 코팅하는 새우류의 경우 점액질 성분으로 인해 주변 퇴적물보다 서식굴 내부 퇴적물의 유기물 농도가 높게 나타나는 것으로 보고되었다[33,34]. 가재붙이 서식굴 내부 퇴적물의 유기물 농도가 주변 퇴적물보다 높은 것은 가재붙이 서식굴 내벽이 점액질로 코팅되어 있을 가능성을 시사하지만 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 3-3-16. 침수 전·후 표층 퇴적물, 둔덕 퇴적물, 서식굴 내부 퇴적물 및 주변 퇴적물의 조성 및 평균 입자 크기

	Depth (cm)	Composition (%)			Mean grain size (Φ)
		Sand	Silt	Clay	
Emergence	0 (Surface sediment)	45.1±38.9	51.4±36.3	3.3±3.2	2.8±2.8
	0 (Mound)	51.0±18.2	44.9±16.8	3.8±1.7	1.7±2.2
	10-20 (Gallery sediment)	20.9±5.7	71.5±2.5	7.5±3.4	4.6±0.3
	10-20 (Ambient sediment)	26.0±1.3	68.1±1.4	5.9±0.6	4.5±0.1
	20-30 (Gallery sediment)	22.4±6.5	70.7±6.9	7.0±0.8	4.4±0.4
	20-30 (Ambient sediment)	19.3±11.2	71.7±3.8	9.0±7.4	4.8±0.7
Submergence	0 (Surface sediment)	34.4±5.6	60.8±5.4	4.8±0.3	4.2±0.1
	0 (Mound)	36.8±1.2	58.6±0.7	4.6±0.6	4.1±0.1
	10-20 (Gallery sediment)	32.7±4.4	62.6±4.7	4.7±0.3	4.1±0.2
	10-20 (Ambient sediment)	26.3±7.0	67.0±5.9	6.7±2.2	4.4±0.2
	20-30 (Gallery sediment)	35.3±5.7	60.2±5.1	4.4±1.1	4.1±0.2
	20-30 (Ambient sediment)	27.2±3.5	66.2±5.1	6.5±1.6	4.4±0.1

침수 후에는 침수 전과 다르게 주변 퇴적물의 탄소 및 질소 농도와 서식굴 내부 퇴적물의 탄소 및 질소 농도가 유사하게 나타났다. 일반적으로 조립한 입자에 비해 세립한 입자의 표면적이 크기 때문에 세립한 입자의 유기물 함량이 조립한 입자에 비해 높게 나타난다. 침수 전·후 가재붙이 서식굴 내부 퇴적물(gallery sediment)의 silt와 clay의 비율을 보면 침수 전에 비해 침수 후에 silt와 clay의 함량이 감소한 것으로 나타났는데 이는 가재붙이의 관개활동에 의해 서식굴 내부 퇴적물의 세립한 입자가 수층으로 배출된 것을 의미한다(표 3-3-16). 따라서, 침수 후 가재붙이 서식굴 내부 퇴적물과 주변 퇴적물의 유기물 농도가 유사한 것은 유기물 함량이 높은 세립한 입자들이 가재붙이의 관개활동에 의해 수층으로 배출되었기 때문으로 판단된다.

(나) 가재붙이 관개활동에 의한 유기물 순환

침수 시 가재붙이 관개활동에 의해 서식굴 내부의 세립한 입자가 서식굴 외부로 배출되게 되고 이로 인해 서식굴 내부로부터 표층으로 유기물 순환이 발생하게 된다. 본 연구 결과 곰소만 갯벌에서 가재붙이 관개활동에 의해 서식굴 내부에서 표층으로 약 $542\text{gC m}^{-2}\text{ year}^{-1}$, $65\text{gN m}^{-2}\text{ year}^{-1}$ 이 순환하는 것으로 산출되었으며, 이는 가재붙이의 관개활동이 퇴적층 유기물 순환에 있어 중요한 역할을 하고 있음을 시사한다.

6. 조석주기와 개체 유무에 따른 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 및 영양염 순환 변화

(가) 조석주기 및 개체 유무에 따른 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 변화

가재붙이 개체가 있는 경우 조석주기에 따른 가재붙이 서식굴 내부 산소농도는 깊이 별로 다른 양상을 나타냈다(그림 3-3-33).

10cm 깊이의 서식굴 내부 산소농도는 해수 침수 전 30-50%의 산소농도가 유지되다가 해수에 침수된 직후 산소농도가 100%로 증가하였고 이후 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이후 노출시간 동안 산소농도는 서서히 감소하였고 다시 해수에 침수되면 산소농도가 급격히 증가하고 서서히 감소하는 경향을 보였다. 20cm 깊이의 서식굴 내부 산소농도는 10cm 깊이와 유사한 경향을 보였다. 해수 침수 전 10-20%의 산소농도가 유지되다가 해수에 침수된 직후 산소농도가 100%로 증가하였고 이후 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이후 노출시간 동안 산소농도는 서서히 감소하였고 다시 해수에 침수되면 산소농도가 급격히 증가하고 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 40cm 깊이의 서식굴 내부 산소농도는 10, 20cm 깊이와 다른 양상을 보였다. 40cm 깊이에서는 해수에 의한 침수 및 노출에 관계없이 실험기간 동안 1%이하의 낮은 산소농도가 유지되었다.

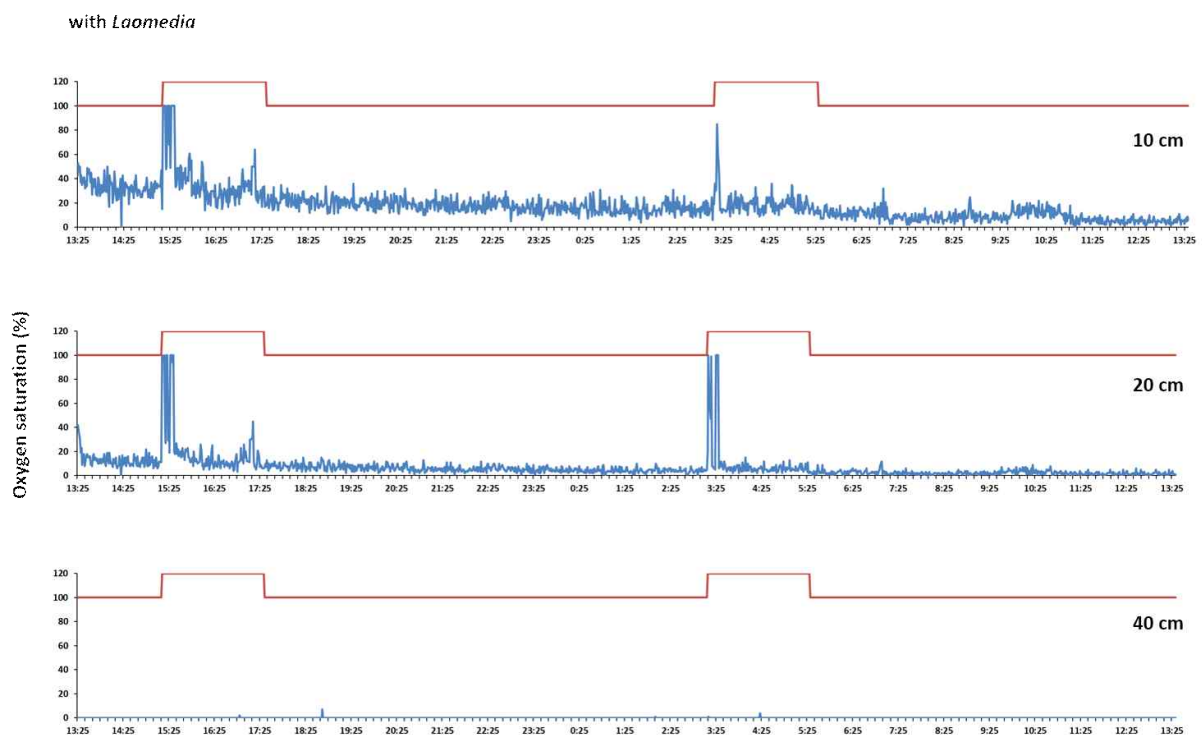


그림 3-3-33. 가재붙이 개체가 있는 경우 조석주기에 따른 서식굴 깊이별 산소농도 변화

가재붙이 서식굴 내에 개체가 없는 경우 서식굴 내부 산소농도는 개체가 있는 경우와 전혀 다른 양상을 보였다. 10, 20, 40cm 모든 깊이에서 해수에 의한 침수 및 노출과 상관 없이 실험기간 동안 5% 이하의 산소농도가 유지되었다(그림 3-3-34).

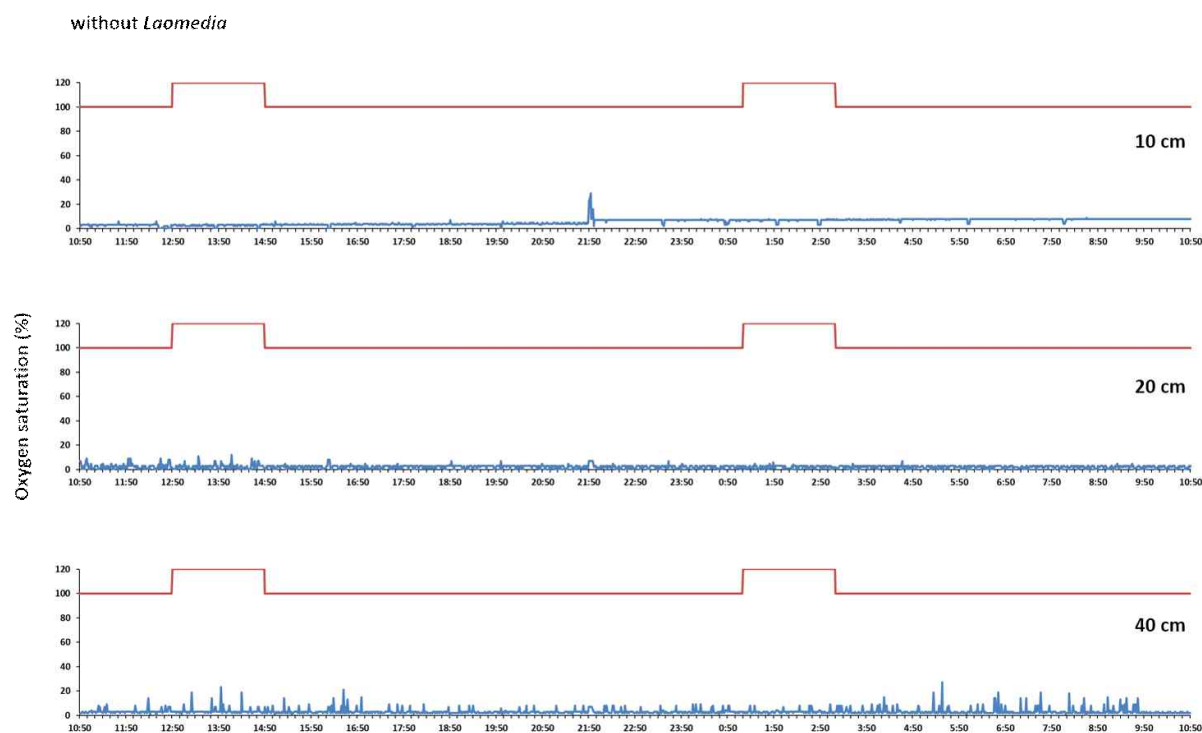


그림 3-3-34. 가재붙이 개체가 있는 경우 조석주기에 따른 서식굴 깊이별 산소농도 변화

가재붙이는 서식굴이 해수에 의해 침수되었을 때 관개활동을 통해 수층의 해수를 서식굴 내부로 유입시키고 burrow water를 순환시켜 수층으로 배출한다. 이러한 해수 순환 과정에서 서식굴 내부로 산소가 공급되게 되며 노출시 가재붙이 개체 및 미생물의 호흡에 의해 산소가 소모되는 과정이 반복되게 된다.

가재붙이 개체가 있는 경우 10, 20cm의 깊이에서는 침수 직후 산소농도가 급격하게 증가하였는데 이는 가재붙이의 관개활동에 의한 해수교환으로 산소농도가 증가한 것으로 판단된다. 반면에, 40cm 깊이에서는 침수와 노출에 따른 산소농도 변화가 나타나지 않고 빈산소 상태가 유지되었는데 이는 가재붙이의 관개활동이 이 깊이에서 발생하지 않았음을 나타낸다.

갯벌 현장에서 가재붙이 서식굴 내부 산소환경을 측정한 본 연구팀의 현장연구에서는 본 연구의 40cm보다 깊은 60cm 깊이에서도 침수 시 산소농도가 100%까지 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 가재붙이 서식굴 내부 60cm 깊이에서도 관개활동이 발생했다는 것을 나타내는데 본 연구에서는 40cm 깊이에서도 관개활동이 발생하지 않았다. 가재붙이 서식굴은 최대 2m까지 하부로 연장되는 큰 규모를 가지는데 mesocosm 수조는 공

간이 제한적이기 때문에 실제 가재붙이 서식굴의 크기만큼 서식굴을 확장할 수 없는 한계를 가진다. 서식굴의 크기가 작아짐에 따라 실제 갯벌 현장의 서식굴에 저장되는 해수의 양보다 저장되는 해수의 양이 적기 때문에 관개활동이 감소하게 되며 이에 따라 서식굴 내부로 유입되는 산소의 양이 상대적으로 적기 때문에 40cm 깊이는 빈산소 상태가 유지되는 것으로 추정되나 이를 규명하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

가재붙이 개체가 없는 경우 서식굴 내부 산소환경이 변하지 않는 것으로 보아 가재붙이 서식굴 내부 산소환경은 가재붙이의 관개활동에 의한 산소 유입과 가재붙이 개체 및 서식굴 내부의 미생물 등의 호흡에 의한 산소소모에 의해 변화하는 것으로 판단된다.

(나) 조석주기 및 개체 유무에 따른 가재붙이 서식굴 내부 영양염 순환 변화

가재붙이 개체가 있는 경우 가재붙이 서식굴 10cm 깊이에서는 암모늄과 아질산염의 농도는 침수가 시작된 직후 농도가 급격하게 감소하고 이후 점차 증가하다가 침수가 다시 시작되면 감소하고 노출시기 동안 점차 증가하는 경향을 보였다(그림 3-3-35). 질산염의 경우 침수 직후 급격하게 농도가 증가한 후 다시 감소하였다가 점차 증가하다가 침수가 다시 시작되면 감소하는 경향을 보였다. 인산염과 규산염의 농도도 침수 직후 급격하게 감소한 후 점차 증가하다가 침수가 시작되면 다시 감소 후 점차 증가하는 것으로 나타났다.

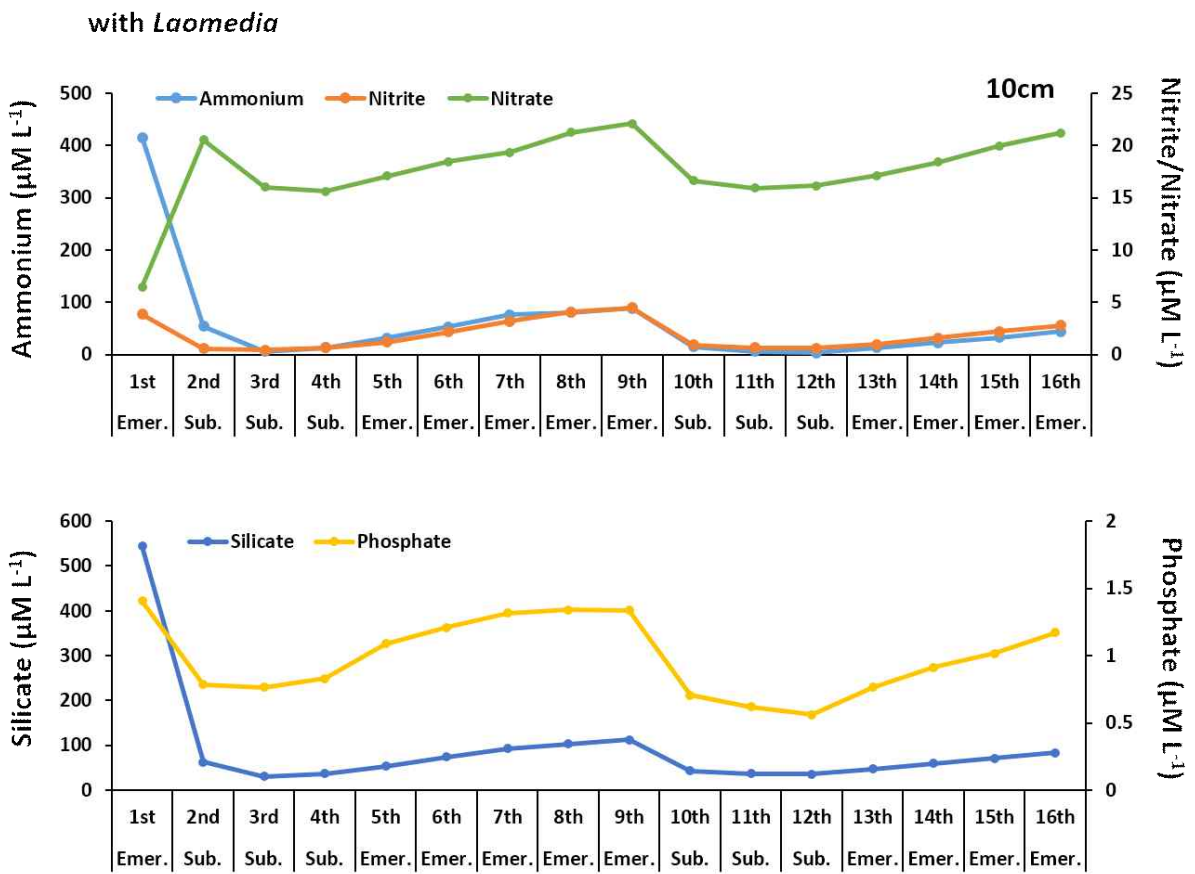


그림 3-3-35. 가재붙이 개체가 있는 경우 10cm 깊이의 영양염 농도 변화

가재붙이 개체가 있는 경우 가재붙이 서식굴 20cm 깊이에서의 영양염 농도 변화는 10cm 깊이의 영양염 농도 변화와 유사한 경향을 보였다(그림 3-3-36). 암모늄과 아질산염의 농도는 침수가 시작된 직후 농도가 급격하게 감소하고 이후 점차 증가하다가 침수가 다시 시작되면 감소하고 노출시기 동안 점차 증가하는 경향을 보였다. 아질산염은 노출기간 중 농도가 급격하게 증가하였으며(7th) 침수가 시작된 직후 급격하게 감소하는 모습을 보였다(10th). 질산염의 경우 침수 직후 급격하게 농도가 증가한 후 다시 감소하였다가 점차 증가하다가 침수가 다시 시작되면 감소하는 경향을 보였다. 인산염과 규산염의 농도도 침수 직후 급격하게 감소한 후 점차 증가하다가 침수가 시작되면 다시 감소 후 점차 증가하는 것으로 나타났다.

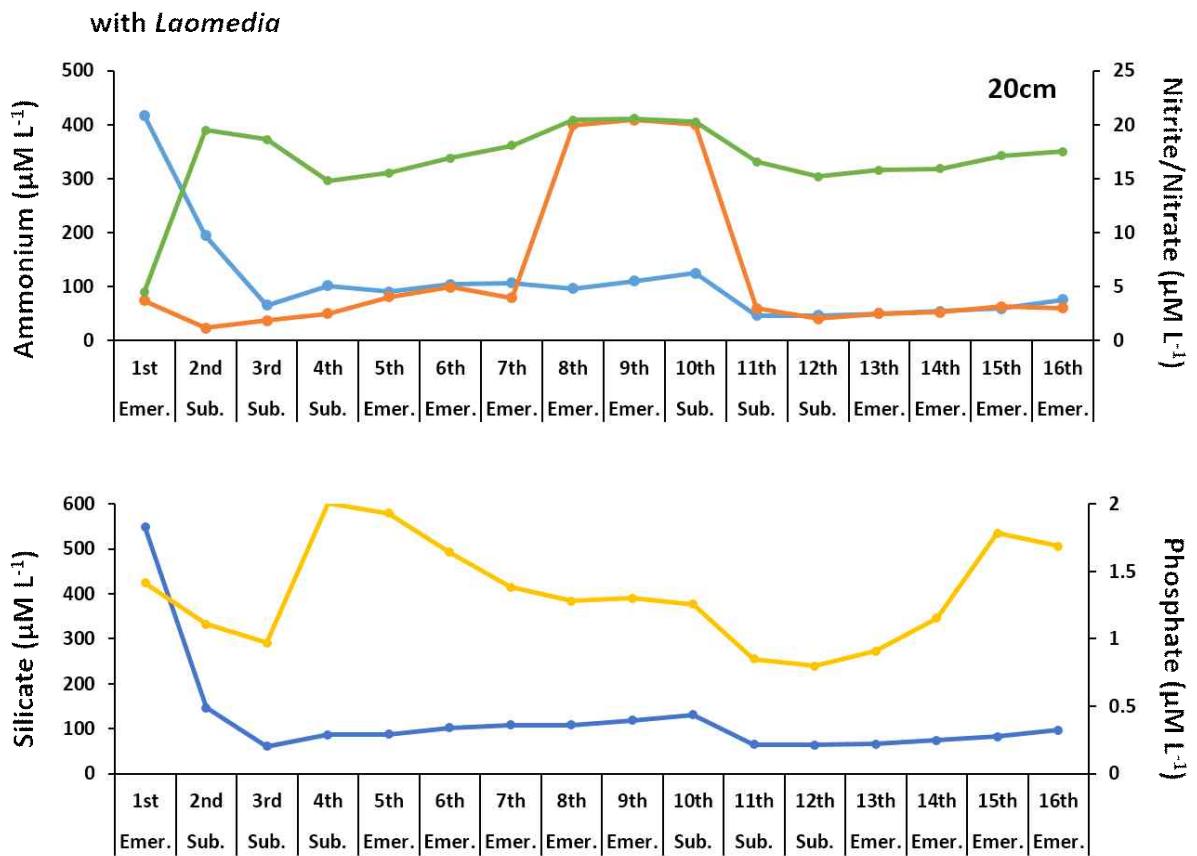


그림 3-3-36. 가재붙이 개체가 있는 경우 20cm 깊이의 영양염 농도 변화

가재붙이 개체가 있는 경우 가재붙이 서식굴 40cm 깊이에서의 영양염 농도 변화는 10, 20cm 깊이의 영양염 농도 변화와 유사한 경향을 보였다(그림 3-3-37). 암모늄과 아질산염의 농도는 침수가 시작된 직후 농도가 급격하게 감소하고 이후 점차 증가하다가 침수가 다시 시작되면 감소하고 노출시기 동안 점차 증가하는 경향을 보였다. 질산염의 경우 침수 직후 급격하게 농도가 증가한 후 다시 감소하였다가 점차 증가하다가 침수가 다시 시작되면 감소하는 경향을 보였다. 10, 20cm 깊이와 다르게 40cm 깊이에서는 질산염의 농도보다 암모늄의 농도가 높게 나타났다. 인산염과 규산염의 농도도 침수 직후 급격하게 감소한 후 점차 증가하다가 침수가 시작되면 다시 감소 후 점차 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 10, 20cm 깊이에서와 다르게 실험기간 동안 인산염과 규산염의 농도 변화폭은 크지 않았다.

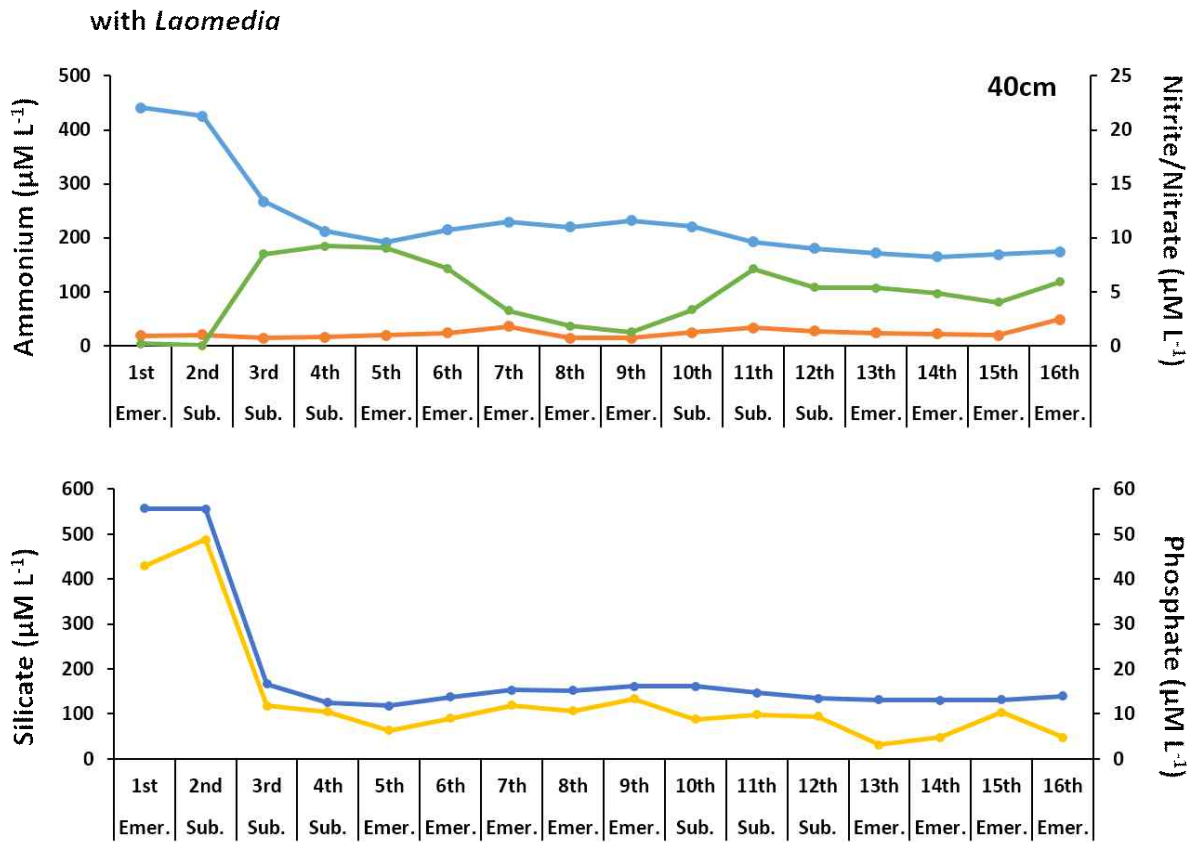


그림 3-3-37. 가재붙이 개체가 있는 경우 40cm 깊이의 영양염 농도 변화

가재붙이 개체가 없는 경우 가재붙이 서식굴 10cm 깊이에서는 암모늄, 아질산염 및 질산염의 농도는 침수가 시작된 직후 농도가 급격하게 감소하고 이후 점차 증가하다가 침수가 다시 시작되면 감소하고 노출시기 동안 점차 증가하는 경향을 보였다(그림 3-3-38). 인산염과 규산염의 농도도 유사하게 침수 직후 급격하게 감소한 후 점차 증가하다가 침수가 시작되면 다시 감소 후 점차 증가하는 것으로 나타났다.

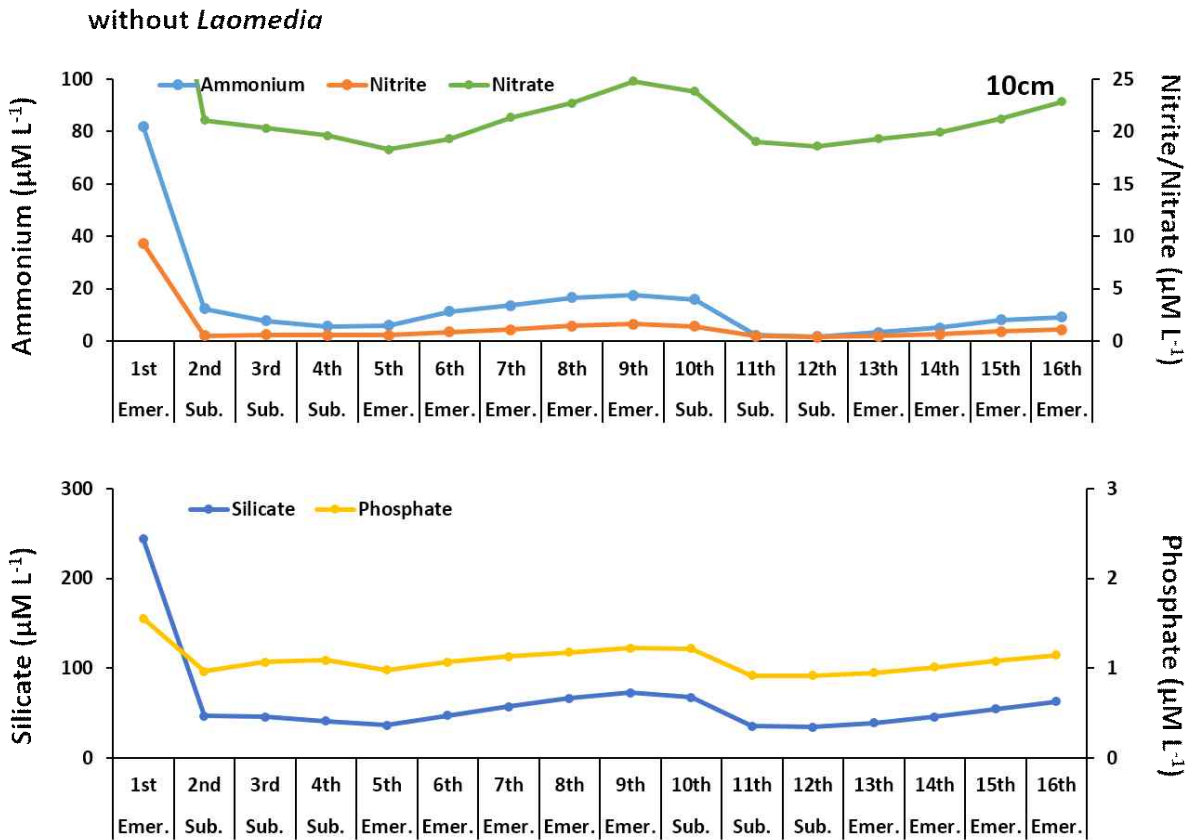


그림 3-3-38. 가재붙이 개체가 없는 경우 10cm 깊이의 영양염 농도 변화

가재붙이 개체가 없는 경우 가재붙이 서식굴 20cm 깊이의 영양염 농도 변화는 10cm 깊이의 영양염 농도 변화와 유사한 경향을 보였다. 암모늄, 아질산염 및 질산염의 농도는 침수가 시작된 직후 농도가 급격하게 감소하고 이후 점차 증가하다가 침수가 다시 시작되면 감소하고 노출시기 동안 점차 증가하는 경향을 보였다(그림 3-3-39). 인산염과 규산염의 농도도 침수 직후 급격하게 감소한 후 점차 증가하다가 침수가 시작되면 다시 감소 후 점차 증가하는 것으로 나타났다.

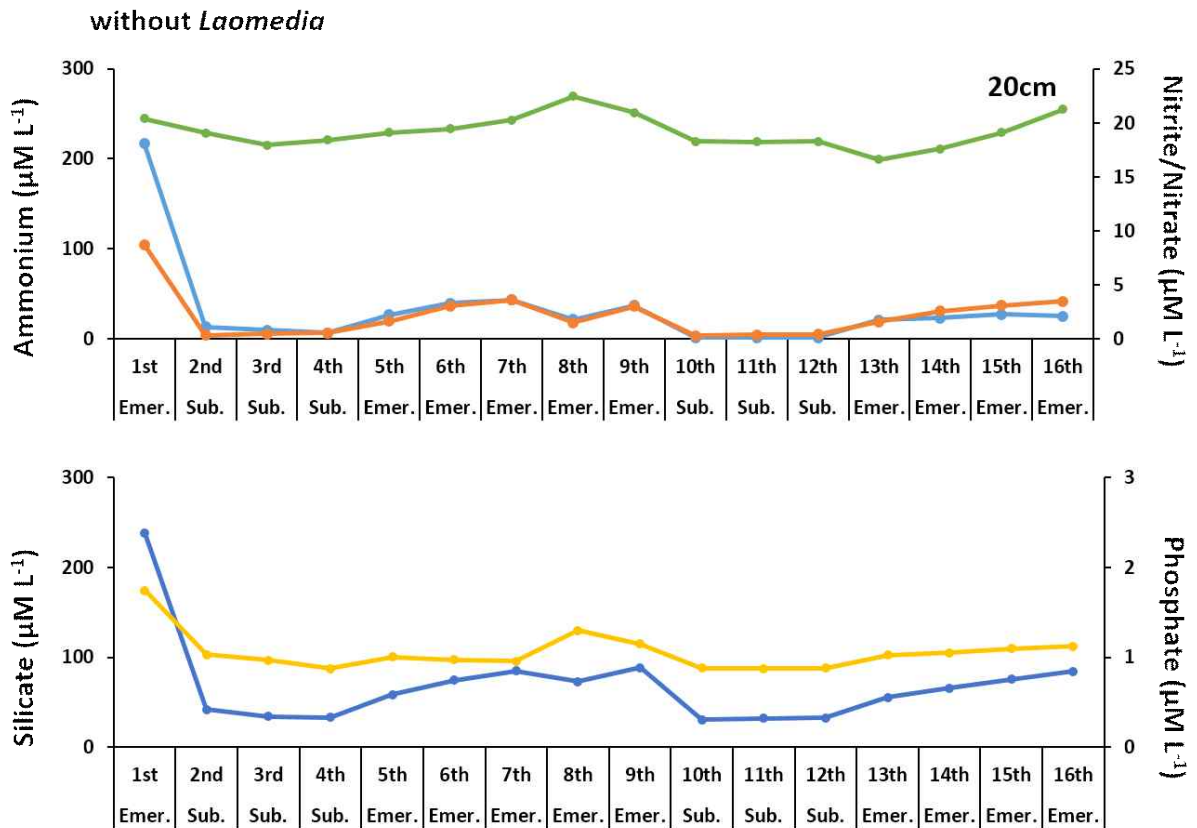


그림 3-3-39. 가재붙이 개체가 없는 경우 20cm 깊이의 영양염 농도 변화

가재붙이 개체가 없는 경우 가재붙이 서식굴 40cm 깊이의 영양염 농도 변화는 10, 20cm 깊이의 영양염 농도 변화와 다른 경향을 나타냈다(그림 3-3-40). 암모늄, 아질산염 및 질산염의 농도는 침수가 시작된 직후 농도가 급격하게 감소하고 이후 농도가 꾸준히 감소하는 것으로 나타났다. 규산염의 농도는 침수 직후 약간 증가하였다가 이후 서서히 감소하다가 농도가 일정하게 유지되었으며, 인산염의 농도는 침수 직후 급격하게 감소하였다가 다시 급격하게 증가한 이후 다시 급격한 감소를 보였으며 이후 큰 변화 없이 농도가 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

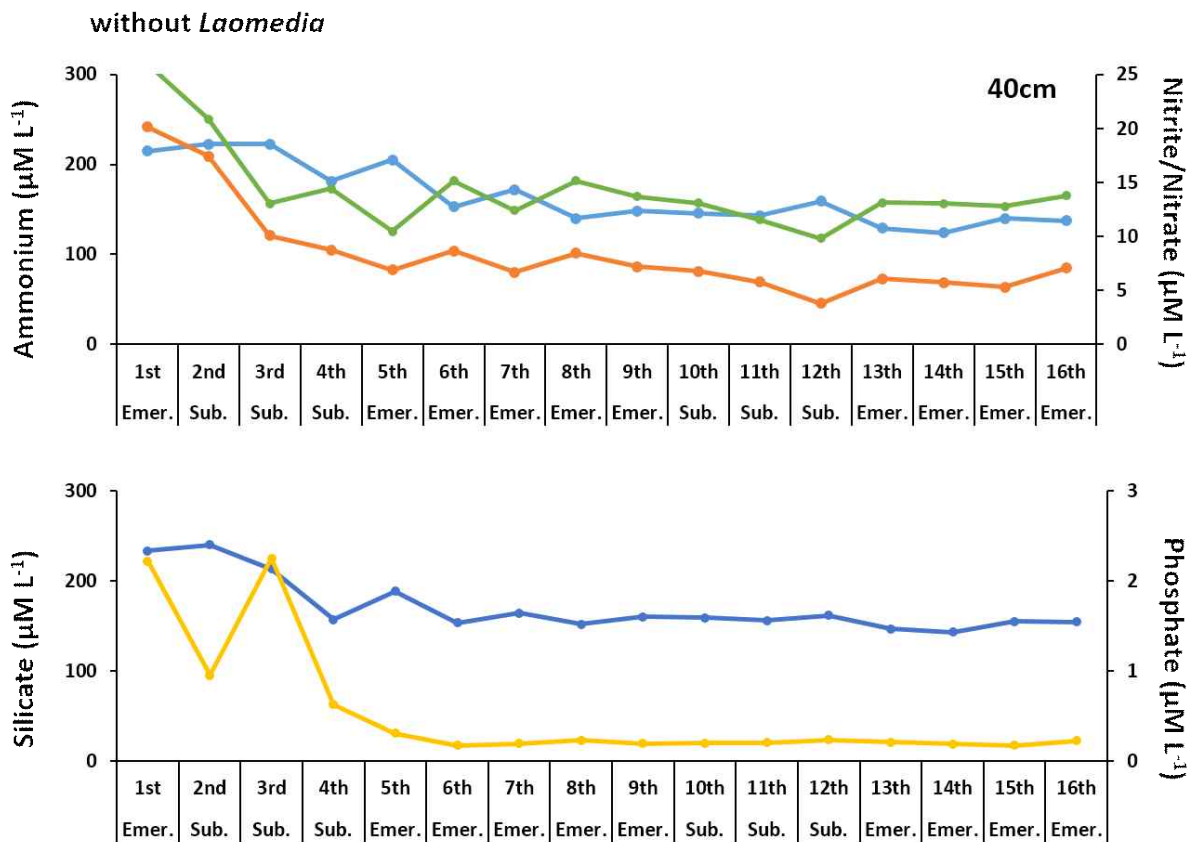


그림 3-3-40. 가재붙이 개체가 없는 경우 40cm 깊이의 영양염 농도 변화

가재붙이 개체가 서식굴 내에 있는 경우 암모늄, 질산염 및 아질산염의 농도는 침수기간 동안 농도가 감소하고 노출기간 동안 농도가 증가하는 반복된 경향을 나타냄. 침수기간과 노출기간 동안의 이러한 농도 변화는 해수에 의한 희석과 가재붙이의 관개활동 때문인 것으로 판단된다.

퇴적물 내에서 암모늄은 유기물 분해와 생물 배설에 의해 공급수에 축적되고 확산에 의해 해수로 용출됨. 퇴적물 내에서는 산소량과 온도에 따라 암모늄화(ammonification), 질산화(nitrification), 탈질산화(denitrification)의 과정이 결정되며 온도가 높고 용존산소가 낮을 때 암모늄의 생성이 활발하게 일어나게 된다[35]. 침수 직후 해수에 의한 희석효과로 암모늄 농도가 급격하게 감소하게 되고 이후 노출기간에 산소가 급격하게 감소하게 되어 암모늄화 작용이 활발하게 일어나 암모늄 농도가 증가한 것으로 판단된다. 본 실험의 경우 실험기간 동안 온도를 20℃로 일정하게 유지했기 때문에 온도의 영향은 없는 것으로 판단된다.

퇴적물 내에서 탈질산화 작용은 주로 혐기성 상태에서 일어나며 질산화 작용은 호기성 상태에서 활발하게 일어난다. 탈질산화 과정 중에는 질산염의 감소와 함께 아질산염의 증가가 나타나고 질산화 과정 중에는 질산염의 농도가 증가하게 된다. 노출기간 동안 10cm 깊이에서는 질산염과 아질산염의 농도가 유사한 경향으로 증가하였다. 갯벌 현장의 가재붙이 서식굴 내 영양염 변화 연구 결과 산소 농도가 40% 이상일 경우 질산화가 우세하게 일어나며 30% 이하일 경우 탈질산화가 우세하게 일어난다고 보고되었다[36]. 본 연구에서 노출기간 동안 10cm 깊이의 산소 농도는 30-40%를 유지했는데 이로 인해 질산화와 탈질산화 작용이 동시에 활발하게 일어나 질산염과 아질산염의 농도가 유사한 증가 경향을 나타낸 것으로 해석된다. 20cm 깊이의 경우 노출기간 동안 10% 내외의 산소 농도가 유지 되었는데 낮은 산소 농도로 인해 탈질산화 작용이 우세하여 아질산염의 증가폭이 질산염에 비해 크게 나타난 것으로 판단된다. 40cm 깊이의 경우 침수 기간에는 질산염이 증가하고 아질산염이 감소하며 노출 기간에는 질산염이 감소하고 아질산염이 증가하는 경향을 보였다. 40cm 깊이의 경우 침수와 노출 기간과 상관없이 실험기간 동안 1% 이하의 낮은 산소농도가 유지되었다. 따라서, 침수 기간 동안 질산염의 증가는 20-30cm 깊이에서의 확산에 의해 질산염의 농도가 증가하고 노출 기간 동안에는 낮은 산소농도로 인한 아질산염의 증가가 나타나는 것으로 해석된다.

갯벌 퇴적물로 유입되는 생물기원 규소의 공급원은 부유성 규조류와 저서성 규조류이며 퇴적된 생물기원 규소는 생물에 의해 분해되지 않고 화학적으로 용해된다[37]. 규산염은 암모늄과 유사하게 노출 기간에 농도가 증가하고 침수 기간에 농도가 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 노출 기간에 퇴적물에서 burrow water로 용해되어 농도가 증가하며 침수 기간에는 해수가 유입되면서 희석되어 농도가 감소한 것으로 해석된다.

인산염은 퇴적물 내에서 유기물이 분해되어 생성되는 정도와 퇴적물 내에서 철산화물에 흡착하여 제거되는 정도에 따라 농도가 결정된다[38]. 즉, 인산염은 산소 농도가 낮은 침수 직전에 가장 높은 농도를 보였으며 침수 기간에 해수에 의해 희석되어 농도가 급격하게 감소하였고 이후 낮은 산소 농도로 인해 철산화물로부터 인산염이 해리되어 농도가 증가한 것으로 해석된다.

가재붙이 개체가 없는 경우 침수와 노출에 따른 암모늄, 질산염 및 아질산염의 농도 변화는 가재붙이 개체가 있는 경우와 유사한 경향을 보였다. 하지만, 암모늄의 경우 가재붙이 개체가 없는 경우 개체가 있는 경우에 비해 동일한 깊이에서 약 10-50% 수준의 낮은 농도를 보였다. 특히, 산소 농도의 차이가 크게 나타난 10, 20cm 깊이에서는 10-20% 수준으로 농도가 크게 낮은 것으로 나타났다. 이는 서식굴 내 낮은 산소 농도로 인한 미생물 활동저하와 개체에 의한 생물배설 활동이 없기 때문인 것으로 해석된다. 40cm 깊이는 가재붙이 개체의 유무와 상관없이 침수 및 노출 기간 동안 일정하게 낮은 산소 농도가 유지되었기 때문에 그 차이가 크지 않은 것으로 판단된다. 규산염과 인산염의 경우 가재붙이 개체 유무에 따라 농도 변화 및 경향성의 유의한 차이를 보이지 않았다.

가재붙이 서식굴 내 영양염의 변화는 조석주기와 가재붙이 개체의 활동에 의한 산소 농도에 따라 조절되는 것으로 나타났다. 해수에 의한 침수는 영양염을 희석시켜 농도를 감소시키며 가재붙이의 관개활동과 호흡을 통해 서식굴 내 산소 환경을 변화시켜 암모늄화, 질산화, 탈진산화 작용들이 조절되었다. 암모늄 이온의 경우 가재붙이 개체 유무에 따라 농도의 차이가 확연하게 나타났는데 이러한 결과는 퇴적물 내 미생물의 활동과 더불어 가재붙이 개체의 활동 또한 영양염 순환에 중요한 역할을 함을 시사한다.

제 4 절 종합결론

1. 가재붙이는 국내 서·남해안 상부 조간대에 고르게 분포하였으며 평균 1-10개체/m²의 서식밀도를 보였다. 또한, 갯벌이 넓지 않고 조수의 차이가 크지 않은 제주도에도 가재붙이가 서식하는 것을 확인하였다.

2. 강화도, 곰소만 갯벌 가재붙이의 서식굴은 크고 복잡한 구조를 가진 반면, 남해도, 창선도 갯벌 가재붙이의 서식굴은 상대적으로 작고 단순한 구조를 보였다. 이러한 서식굴의 수치, 구조 및 형태의 차이는 중간차이(섭식형태)와 서식지 특성(퇴적상, 노출시간)에 의한 것으로 추정된다.

3. 국내에 보고되어진 가재붙이는 *Laomedía astacina* 한 종으로 보고되어져 있지만 강화도 갯벌에 서식하는 가재붙이는 *Laomedía astacina*와 형태적, 유전적으로 차이를 보였으며 현재까지 보고되어지지 않은 신종으로 추정된다. 이러한 결과는 국내에 서식하는 가재붙이는 한 종 이상이며 더 많은 신종 또는 국내에 보고되어지지 않은 가재붙이 속의 다른 종들이 서식할 수 있음을 시사한다.

4. 가재붙이의 관개활동에 의한 퇴적물재배치는 침수시간이 증가할수록 증가하며, 노출시간이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 곰소만 갯벌의 경우 가재붙이의 관개활동에 의해 약 71.2kg m⁻² year⁻¹의 퇴적물이 재배치되었다.

5. 가재붙이의 퇴적물재배치에 의해 서식굴 내부의 퇴적물이 서식굴 외부로 배출되고 이로 인해 서식굴 내부로부터 표층으로 유기물 순환이 일어났다. 곰소만 갯벌에서는 가재붙이의 퇴적물재배치에 의해 탄소와 질소가 서식굴 내부에서 표층으로 각각 542gC m⁻² year⁻¹, 65gN m⁻² year⁻¹ 순환하는 것으로 나타났다.

6. 가재붙이 서식굴 내부 산소환경은 가재붙이의 관개활동 및 호흡에 의해 산소 농도가 조절되며 이러한 산소환경의 변화와 가재붙이 개체의 서식굴 내부 활동은 서식굴 내 영양염 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

7. 본 연구는 가재붙이의 서식지 분포 및 특성, 서식굴 수치, 구조 및 형태의 생태특성을 분석했으며 퇴적물재배치, 유기물 및 영양염 순환의 생물교란 효과를 정량화하였다. 본 연구결과는 가재붙이와 같이 큰 규모의 서식굴을 생성하는 종의 생물교란은 갯벌 퇴적층의 생지화학적 프로세스에 지대한 영향을 미치므로 생물교란 영향이 물질순환 평가에 반드시 고려되어야 함을 시사한다.

제 5 절 정량적 연구개발성과

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제 번호	게재 연월	논문제목	총저자 명	출처	학술지 명	권(호)	학술지 구분	sci여 부	impact Factor	국제공 동 연구논 문	기여도
2018 R1D1 A1B0 70496 32	2019 07	Feeding behavior of the ocypodid crab <i>Macrophthalmus japonicus</i> and its effects on oxygen-penetration depth and organic-matter removal in intertidal sediments	Koo, Bon Joo; Kim, Sung-Han; Hyun, Jung-Ho;	SCI	ESTUARINE COASTAL AND SHELF SCIENCE	228(0)	국외	SCI 등재	2.611	아니오	80
2018 R1D1 A1B0 70496 32	2019 09	Spring-neap variation on sediment reworking with organic matter contents by a polychaete, <i>Perinereis aibuhitensis</i> , in the intertidal sediments of the Gomso Bay, Korea	Seo, Jaehwan; Koo, Bon Joo;	SCI	MARINE BIOLOGY	166(10)	국외	SCI 등재	2.134	아니오	100
2018 R1D1 A1B0 70496 32	2020 02	Filtration rates of the manila clam, <i>Ruditapes philippinarum</i> , in tidal flats with different hydrographic regimes	Koo, Bon Joo; Seo, Jaehwan;	SCI	PLOS ONE	15(2)	국외	SCI 등재	2.74	아니오	50
2018 R1D1 A1B0 70496 32	2018 11	가재붙이 (갑각강, 가재붙이과) 서식굴 내 영양염의 일간 변화	구분주	KCI	한국해양환경 •에너지학회지	21(4)	국내	SCI 미등재		아니오	70

학술대회 논문발표 성과정보							
과제번호	발표 년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회 구분	개최국	온라인개최
2018R1D 1A1B070 49632	2018 08	한국습지학 회 2018년 정기학술발 표대회	서재환, 구분주	조식에 따른 두토막논썩참갯지렁이의 퇴적물 재배치 변화	국내학술 대회	대한민국	
2018R1D 1A1B070 49632	2020 08	한국습지학 회 2020년 정기학술발 표대회	Seo, Jaehwan, Koo, Bon Joo	가재붙이(갑각강, 가재붙이과) 생물변위작용에 의한 퇴적물 재배치 및 유기물 순환 정량화	국내학술 대회	대한민국	○
2018R1D 1A1B070 49632	2019 08	2019 한국습지학 회 국제학술발 표회	구분주, 김성한	Feeding behavior of the ocypodid crab Macrophthalmus japonicus and its effects on oxygen-penetration depth and organic-matter removal in intertidal sediments	국제학술 대회	대한민국	
2018R1D 1A1B070 49632	2020 05	The EGU General Assembly 2020	Seo, Jaehwan, Koo, Bon Joo	The effects of organic matter concentration on sediment reworking of Perinereis aibuhitensis : a mesocosm study	국제학술 대회	오스트리아	○
2018R1D 1A1B070 49632	2020 06	Goldschmidt 2020	Koo, Bon Joo, Seo, Jaehwan	Diversity in burrow architecture of Laomedia spp. with habitat characteristics in the intertidal sediments of Korea	국제학술 대회	미국	○

수상실적 성과정보							
과제번호	수상연월	수상명	수상자		시상기관	시상국가	수상사유
			성명	소속기관			
2018R1D1A 1B07049632	202008	우수논문상	서재환	과학기술연 합대학원대 학교	한국습지학 회	대한민국	한국습지학 회 2020년도 학술발표회 에서 발표한 논문이 우수논문으 로 선정

학위배출인력 성과정보							
과제번호	학위취득연 월	학위구분	학위취득자				진로
			성명	성별	대학	학과	
2018R1D1A 1B07049632	202102	박사	서재환	남성	과학기술연 합대학원대 학교	해양학	취업(박사후 연구원 포함)

언론보도성과			
과제번호	2018R1D1A1B07049632		
보도게재일자	20180901	보도및게재처	에코비전21
기사제목	갯벌 생물이 만든 집을 아시나요? 갯벌 생물의 집, 서식굴		
관련연구업적	가재붙이 서식굴 형태 및 구조 분석		
과제번호	2018R1D1A1B07049632		
보도게재일자	20181001	보도및게재처	에코비전21
기사제목	갯벌 생물이 만든 집을 아시나요? 서식굴의 규모와 생태적 역할		
관련연구업적	가재붙이 서식굴 규모와 생태적 역할 분석		
과제번호	2018R1D1A1B07049632		
보도게재일자	20181101	보도및게재처	에코비전21
기사제목	갯벌 생물이 만든 집을 아시나요? 서식굴의 생태적 의의와 서식굴의 종류		
관련연구업적	가재붙이 서식굴의 생지화학적 역할 분석		
과제번호	2018R1D1A1B07049632		
보도게재일자	20190501	보도및게재처	화성시
기사제목	화성호 생물들은 무엇을 먹을까?		
관련연구업적	화성호 연안지역과 갯벌에 서식하는 생물의 사진 및 자료 제공		
과제번호	2018R1D1A1B07049632		
보도게재일자	20200529	보도및게재처	비밀의 초원 into the world
기사제목	저서생물의 이해		
관련연구업적	일반인을 대상으로 시화호 생태계 일반현황과 저서생물의 역할에 대한 강연		
과제번호	2018R1D1A1B07049632		
보도게재일자	20200613	보도및게재처	갯벌 저서생물의 생태와 환경
기사제목	갯벌 저서생물의 생태와 환경		
관련연구업적	대부도 습지보호지역 주민들을 대상으로 한 갯벌의 생태적 특성 및 저서생물에 대한 강연		
과제번호	2018R1D1A1B07049632		
보도게재일자	20200617	보도및게재처	화성시군공향이전대응 담당관
기사제목	새 친구들을 만나러 화성호로 떠나요		
관련연구업적	화성호 연안지역과 갯벌에 서식하는 생물을 어린이를 대상으로 홍보하고자 만든 팝업 책자(QR코드 동영상 제공)에 사진 및 자료 제공		

제 4 장 연구개발성과의 중요성

1. 가재붙이는 절지동물문의 갑각강 십각목 가재붙이과에 해당하는 필새우류의 일종으로 현재까지 국내 뿐만 아니라 국외에서도 이 종의 생태학적 정보는 거의 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 현재까지 전혀 연구되어지지 않은 가재붙이의 서식지 정보, 서식굴의 수치, 구조 및 형태의 생태정보와 함께 관개활동에 의한 퇴적물재배치, 유기물 순환, 영양염 순환과 같은 가재붙이 생물교란 영향을 정량화했다는 점에서 중요성을 가진다.

2. 강화도 및 곰소만 갯벌의 가재붙이 서식굴은 크고 복잡한 구조를 가지고 있으며 남해도 및 창선도 갯벌의 가재붙이 서식굴은 상대적으로 작고 단순한 구조를 가지고 있었다. 본 연구는 서식지별 가재붙이 서식굴의 크기 및 구조를 최초로 밝혀냈다는 점에서 의의를 가진다. 또한, 강화도 및 곰소만 갯벌의 가재붙이 서식굴은 현재까지 국내외에 보고되어진 해양무척추동물 서식굴 중 가장 큰 것으로 추정되어진다.

3. 현재까지 국내에 서식하는 가재붙이는 *Laomedea astacina* 한 종으로 보고되어져 있다. 하지만, 분자 계통학적 분석 및 형태분류 결과 강화도 갯벌에 서식하는 가재붙이는 *Laomedea* 속에 보고되어지지 않은 미기록종인 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 국내에 서식하는 가재붙이가 한 종 이상이며 *Laomedea* 속에 보고되어진 4종 이외에 신종이 국내 갯벌에 서식함을 밝혀냈다는 점에서 중요성을 가진다.

4. 국외의 생물교란 연구는 개별종의 생물교란 연구를 넘어 군집 및 국소적인 지역의 생물교란 나아가 전세계적인 생물교란 영향을 평가하는 연구가 수행되고 있다. 하지만, 국내의 경우 개별종의 생물교란 연구조차 부족한 실정이다. 본 연구는 국내 갯벌에 서식하는 우점종인 가재붙이의 퇴적물재배치, 유기물 순환, 영양염 순환과 같은 생물교란 영향을 정량화하여 국외와의 연구격차를 극복해가는 과정으로써의 의의를 가진다.

5. 현재까지 국내에서는 갯벌 기능 및 가치평가에 있어 갯벌 대형저서동물의 생물교란 영향은 제외되어져 있다. 국외의 경우 갯벌 기능, 생태계서비스 평가에 있어 생물교란 영향이 고려되어지며 나아가 해양공간계획에 있어 생물교란이 하나의 지표로 이용되어지고 있다. 본 연구는 과소평가되어져 있는 국내 갯벌의 기능, 가치 및 생태계서비스를 보완할 수 있는 생물교란 자료를 축적했다는 점에서 중요성을 가진다.

제 5 장 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

제 1 절 연구개발성과의 활용방안

1. 갯벌 퇴적층의 생지화학적 프로세스 및 물질순환에 관한 국내 연구는 갯벌 생물의 생물교란에 제외되어진 미생물에 국한되어 있는 상황이다. 가재붙이의 서식굴을 통한 생물교란 자료는 갯벌생태, 갯벌기능 및 갯벌 퇴적층의 생지화학적 프로세스 및 물질순환을 이해하는데 있어 기초자료를 제공할 수 있다.

2. 현재 갯벌이 제공하는 생태계서비스 중 공급서비스와 조절서비스 평가에는 갯벌 대형저서동물의 생물교란이 제외되어져 있다. 가재붙이의 서식지 및 서식밀도 자료는 공급서비스에 갯벌 대형저서동물 자원량 정보를 제공할 수 있으며 가재붙이의 생물교란 자료는 조절서비스의 유기물 및 영양염 순환을 통한 정화기능 평가에 기초자료를 제공할 수 있다.

3. 국외의 경우 갯벌 생물의 생물교란이 생지화학적 프로세스 및 물질순환에 미치는 영향의 중요성으로 인해 해양공간계획에 있어 생물교란이 하나의 지표로 이용되어 지고 있다. 그러나 국내의 해양공간계획에는 이러한 지표가 포함되어 있지 않아 새로운 지표로 활용 가능하다.

4. 해양수산부는 2006년 ‘해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률’을 제정하여 생존을 위협받거나 우리나라의 고유한 종, 학술적·경제적 가치가 높은 종을 해양보호생물로 지정하여 관리하고 있다. 강화도 갯벌에 서식하는 가재붙이는 국제적으로 보고되어지지 않은 국내의 고유한 종일 가능성이 높으며, 또한 그 서식굴은 현재까지 알려진 해양대형무척추동물 중 가장 큰 것으로 추정되어진다. 이러한 결과는 가재붙이가 해양보호생물의 지정 조건에 필요한 조건을 갖추었음을 의미한다. 본 연구의 결과는 가재붙이의 해양보호생물 지정에 있어 기초자료로 활용될 수 있다.

제 2 절 추가연구의 필요성

1. 강화도 갯벌에 서식하는 가재붙이는 분자 계통학적 분석 및 형태분류 결과를 미루어 보아 *Laomedia* 속의 미기록종 이었다(신종 발표 예정). 본 연구팀의 선행연구 결과에 따르면, 강화도 갯벌의 미기록종 이외에 국내에는 미기록종이 추가로 존재할 가능성을 시사했다. 따라서, 국내 가재붙이 속의 재분류 및 새로운 미기록종의 발견에 관한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

2. 강화도, 곰소만 갯벌의 가재붙이 서식굴은 남해도, 창선도 갯벌의 그것과 수치, 구조 및 형태에서 뚜렷한 차이를 보였다. 가재붙이 서식지 환경특성과 중간차이에 의해 이러한 서식굴의 차이가 나타나는 것으로 추정되나 본 연구에서는 차이의 원인을 명확히 규명하지 못했다. 따라서, 서식지별 가재붙이 서식굴 차이의 원인 및 주요 요인을 규명하는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 가재붙이의 서식굴은 크고 복잡한 구조를 가지며 퇴적층 하부로 최대 2m까지 연장되어 있다. 퇴적층 하부로 깊게 연장되어 있는 특성으로 인해 가재붙이 서식굴 하층부에 대한 정보는 제한적인 상황이다. 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 분석 결과는 서식굴 하층부의 경우 조석주기와 상관없이 빈산소 환경이 지속될 가능성을 시사하고 있다. 가재붙이 서식굴 내에 복합적으로 존재하는 호기성, 준호기성, 혐기성 산소환경 분포 및 다양한 산소환경이 갯벌 퇴적층의 생지화학적 순환에 미치는 영향 평가를 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 가재붙이의 생태정보는 가재붙이 생물교란을 이해하는데 있어 필수적인 자료임에도 현재까지 가재붙이의 생태정보는 부족한 상황이다. 따라서, 가재붙이 생물교란이 갯벌 퇴적층의 생지화학적 프로세스 및 물질순환에 미치는 영향을 이해하기 위해 가재붙이의 생활사, 섭식형태, 번식과 같은 생태정보 자료 축적을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 가재붙이는 구조적으로 복잡하고 규모가 큰 서식굴을 생성하기 때문에 제한된 크기의 mesocosm을 통한 연구는 온전한 형태의 서식굴을 생성하지 못하는 한계점을 가진다. 앞서 언급한 가재붙이 서식굴 하층부 정보의 획득을 위해서는 갯벌 현장의 온전한 서식굴을 통한 연구가 수반되어야 한다. 따라서, 정밀한 가재붙이 서식굴 내부 산소환경 분포와 이에 따른 미생물 군집 분석을 위한 현장 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

제 6 장 참고문헌

- [1] Aller, R.C. (1982) The effects of macrobenthos on chemical properties of marine sediment and overlying water. In: McCall, P.L., Tevesz, M.J.S.(Eds), Animalsediment relations. Plenum Publishing Company, NewYork, pp. 53-102.
- [2] 구분주 (2006) 갯벌 생물의 집, 서식굴. KIOST (ISBN:978-89-444-9060-6).
- [3] Pemberton, S.G., Risk, M.J., Buckley, D.E. (1976) Supershrimp: deep bioturbation in the Strait of Canso, Nova Scotia. Science, 192:790-791.
- [4] Ziebis, W., Forster, S., Huettel, M., Jørgensen, B.B. (1996) Complex burrows of the mud shrimp *Callinassa truncata* and their geochemical impact in the sea bed. Nature, 382:619-622.
- [5] 구분주 (2009) 대형저서동물의 생물교란이 서해안 갯벌 퇴적물 내 산소 및 영양염 거동에 미치는 영향. 이학박사학위청구논문, 서울대학교
- [6] Gogina, M., Zettler, M.L., Vanaverbeke, J., Dannheim, J., Hoey, G.V., Desroy, N., Wrede, A., Reiss, H., Degraer, S., Lancker, V.V., Foveau, A., Braeckman, U., Fiorentino, D., Holstein, J., Birchenough, S.N.R. (2020) Interregional comparison of benthic ecosystem functioning: Community bioturbation potential in four regions along the NE Atlantic shelf. Ecol. Indic., 110:105945.
- [7] Solan, M., Ward, E.R., White, E.L., Hibberd, E.E., Cassidy, C., Schuster, J.M., Hale, R., Godbold, J.A. (2019) Worldwide measurements of bioturbation intensity, ventilation rate, and the mixing depth of marine sediments. Sci. Data, 6:58.
- [8] Koo, B.J., Kwon, K.K., Hyun, J.H. (2005) The sediment-water interface increment due to the complex burrows of macrofauna in a tidal flat. Ocean Sci. J., 40:221-227.
- [9] Koo, B.J., Kim, S.H., Hyun, J.H. (2019) Feeding behavior of the ocypodid crab *Macrophthalmus japonicus* and its effects on oxygen-penetration depth and organic-matter removal in intertidal sediments. Estuar. Coast. Shelf S., 228:106366.
- [10] Koo, B.J., Seo, J. (2020) Filtration rates of the manila clam, *Ruditapes philippinarum*, in tidal flats with different hydrographic regimes. PLoS ONE, 15(2):e0228873.
- [11] Seo, J., Koo, B.J. (2019) Spring - neap variation on sediment reworking with organic matter contents by a polychaete, *Perinereis aibuhitensis*, in the intertidal sediments of the Gomso Bay, Korea. Mar. Biol., 166:124.
- [12] Seo, J., Koo, B.J. (2021) The variation on sediment reworking with influencing factors by a sand bubbler crab, *Scopimera globosa*, in Intertidal sediments of the Anmyeon Island, Korea. Sustainability, 13:5703.
- [13] Koo, B.J., Kwon, K.K., Hyun, J.H. (2007) Effect of environmental conditions on variation in the sediment-water interface created by complex macrofaunal burrows on

a tidal flat. *J. Sea Res.*, 58:302-312.

[14] Folk, R.L., Ward, W.C. (1957) A study in the significance of grain-size parameters. *J. Sed. Petrol.*, 27:3-26.

[15] Nickell, L.A., Atkinson, R.J.A. (1995) Functional morphology of burrows and trophic modes of three thalassinidean shrimp species, and a new approach to the classification of thalassinidean burrow morphology. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 128:181-197.

[16] Kinoshita, K., Itani, G. (2005) Interspecific differences in the burrow morphology between the sympatric mud shrimps, *Austinoergia narutensis* and *Upogebia issaeffi* (Crustacea: Thalassinidea: Upogebiidae). *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 85:943-947.

[17] Griffis, R.B., Suchanek, T.H. (1991) A model of burrow architecture and trophic modes in thalassinidean shrimp (Decapoda: Thalassinidea). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 79:171-183.

[18] Maginn, H., Bird, F.L. (2011) Functional burrow morphology of *Laomedea healyi* (Crustacea: Decapoda: Thalassinidea) in Western Port Bay, Victoria. *Victorian Nat.*, 128:4-10.

[19] Coelho, V.R., Cooper, R.A., Rodrigues, S.A. (2000) Burrow morphology and behavior of the mus shrimp *Upogebia omissa* (Decapoda: Thalassinidea: Upogebiidae). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 200:229-240.

[20] Candisani, L.C., Sumida, P.Y.G., Pires-Vanin, A.M.S. (2001) Burrow morphology and mating behavior of the thalassinidean shrimp *Upogebia noronhensis*. *J. Mar. Biol. Ass. UK*, 81:799 - 803.

[21] Dworschak, P.C., Rodrigues, S.D.A. (1997) A modern analogue for the trace fossil *Gyrolithes*: burrows of the thalassinidean shrimp *Axianassa australis*. *Lethaia*, 30:41-52.

[22] Bird, F.L., Poore, G.C.B. (1999) Functional burrow morphology of *Biffarius arenosus* (Decapoda: Callianassidae) from southern Australia. *Mar. Biol.*, 134:77-87.

[23] Pervesler, P., Dworschak, P.C. (1985) Burrows of *Jaxea nocturna* NARDO in the Gulf of Trieste. *Senckenb. mari.*, 17:33-53.

[24] De Haan, W. (1833 - 1850) Crustacea. In: Siebold Ph.F. (Ed.), *Fauna Japonica Sive Descriptio Animalium, quae in Itinere per Japoniam, Jussu et Auspiciis Superiorum, Qui Summum in India Batavia Imperium Tenent, Suscepto Annis 1823 - 1830 Collegit, Notis, Observationibus et Adumbrationibus Illustravit* (Crustacea), Lugduni-Batavorum, Leiden, xvii + xxxi + ix - xvi + 243 pp., pls. A - J, L - Q, 1 - 55.

[25] NGOC-HO, N. & J. C. Yaldwyn, 1997. A new species of *Laomedea* (Crustacea, Thalassinidea, Laomediidae) from Australia with notes on its ecology. *Zoosystema*, 19(2-3):337-343.

[26] Yaldwyn, J.C., Wear, R.G. (1970) The eastern Australian, burrowing mud-shrimp *Laomedea healyi* (Crustacea, Macrura Reptantia, Laomediidae) with notes on larvae of

the genus *Laomedea*. Australian Zoologist, 17:126-141.

[27] NGOC-HO, N. (1997) The genus *Laomedea* De Haan, 1841 with description of a new species from Vietnam (Crustacea, Thalassinidea, Laomedidae). Zoosystema, 19(4):729-747.

[28] Karasawa, H. (1989) Decapod crustaceans from the Miocene Mizunami Group, central Japan. Part 1. Superfamily Thalassinioidea, Leucosioidea and Grapsidoidea. Bulletin of the Mizunami Fossil Museum, 16:1 - 28.

[29] Suchanek, T.H., Colin, P.L., McMurty, G.M., Suchanek, C.S. (1986) Bioturbation and redistribution of sediment radionuclides in Enewetak Atoll lagoon by *Callinassa* shrimp: biological aspects. Bull. Mar. Sci., 38:144 - 152.

[30] Nickell, L.A., Hughes, D.J., Atkinson, R.J.A. (1995) Megafaunal bioturbation in organically enriched Scottish sea lochs. in: Proc. 28th Eur Mar Biol Symp Crete.

[31] Stamhuis, E.J., Schreurs, C.E., Videler, J.J. (1997) Burrow architecture and turbative activity of the thalassinid shrimp *Callinassa subterranea* from the central North Sea. Mar. Ecol. Prog. Ser., 151:155 - 163.

[32] Berkenbusch, K., Rowden, A.A. (1999) Factors influencing sediment turnover by the burrowing ghost shrimp *Callinassa filholi* (Decapoda: Thalassinidea). J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 238:283 - 292.

[33] Aller, R.C., Yingst, J.Y., Ullman, W.J. (1983) Comparative biogeochemistry of water in intertidal *Onuphis* (Polychaeta) and *Upogebia* (Crustacea) burrows: temporal patterns and causes. J. Mar. Res., 41:571 - 604.

[34] Kristensen, E. (1985) Oxygen and inorganic nitrogen exchange in a *Nereis virens* (Polychaeta) bioturbated sediment-water system. J. Coast. Res., 1(2):109 - 116.

[35] 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.

[36] 구본주 (2018) 가재붙이 (갑각강, 가재붙이과) 서식굴 내 영양염의 일간 변화. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 21(4):1-12.

[37] Kim, D., Kim K.H. (2008) Tidal and seasonal variations of nutrients in Keunso Bay, the Yellow Sea, Ocean and Polar Res., 30:1-10.

[38] 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.

큰 규모 서식굴(가재붙이)에
의한 생물교란 연구

Studies on bioturbation of mud shrimp *Laomedea astacina* (Decapode: Thalassinidea)
with a big burrow system



- 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.