

BSPE9944T-11250-3

갯벌과 조하대 위협생물 대응기술 개발

2017. 2

한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 「갯벌과 조하대 위협생물 대응기술 개발」 과제의
보고서로 제출합니다.

2017. 2. 28

연구 책임자:	유옥환		
참여 연구원:	강래선,	강수민,	구본주
(가나다라순)	권순현,	김민규,	김민석
	김상렬,	김태원,	김명정
	방윤경,	서재환,	신은총
	이기섭,	이형곤,	장민성
	조홍연,	최동문,	황선완
	홍지민		

요약문

본 연구는 우리나라 조간대 및 조하대 위협생물의 대량발생원인 파악 및 권역별 위협생물 대응기술 개발하고자, 위협생물의 서식 환경 요인 분석을 통한 서식지 적합도 모델 개발과 모의생태계 활용 발생요인 분석을 실시하였다. 조간대 위협생물(쪽) 제어를 위한 서식지 적합도 모델을 개발하기 위하여, 서해 조간대 7지역(2016년 현장2지역 포함)에서 378 정점 자료에서, 쪽/바지락 서식 정보 및 환경(노출/퇴적) 정보 분석을 실시하여, 환경정보의 범위행렬을 이용한 쪽과 바지락의 서식유형 추정을 통한 서식환경 적합도 모델 모형을 수립하였다. 추정 모형의 성능 평가 점수는 52.3%였다. 조하대 위협생물(갯녹음 유발 생물)에 대한 수온 및 이산화탄소 농도영향 분석을 실시하였다. 수온에 따른 엽상체 해조류 2종(구멍갈파래, 진두발)과 석회조류(작은구슬산호말)의 광합성량 분석결과 석회조류는 수온이 증가할수록 광합성량 증가하였으나, 이산화탄소 농도가 증가할수록 석회조류의 Chl a 양 차이는 없었다. 해조류를 섭식하는 성게는 수온이 증가할수록 산소 소비율은 증가하였다. 또한, 해조장에 침입하여 해조류를 섭식하는 성게의 접근을 방지할 수 있는 기술 개발을 위하여, 성게의 접근을 방지하는 다양한 형태의 장비를 실험하였으며, 이 가운데 그물망 방지막이 성게의 접근을 차단하는 것으로 확인되었다. 이를 바탕으로 조식동물 방지 시스템 설계를 도안하였다. 본 연구를 통하여, 서해갯벌의 위협생물 대량발생에 따른 수산물 생산 감소로부터 갯벌의 생산성 유지 및 효율적 관리에 요구되는 기반기술을 제시하고, 쪽의 분포예측 결과를 바탕으로 선제적 대응체계 수립에 기여하며, 갯벌의 효율적 이용을 위한 공간계획에 기여할 것으로 여겨진다. 또한, 모의생태계 활용 발생요인 분석을 통하여, 동해연안 갯녹음 발생기작의 이해를 통해 암반생태계의 효율적 관리 방안제시 및 생산성 증가에 기여하고, 우리나라 갯녹음 및 해중립 조성 등의 효율적 관리 계획 수립에 활용할 수 있을 것으로 여겨진다.

목 차

제 1 장 연구 배경	1
제 1 절 연구의 필요성	1
제 2 절 국내외 연구 현황	4
제 3 절 연구 목표 및 연구방법	15
제 2 장 연구 내용	17
제 1 절 조간대 위협생물(족) 서식지 적합도 모델	17
1. 위협생물 서식 환경 분석	17
2. 위협생물 서식 적합도 모델	26
제 2 절 조하대 위협생물 발생 요인 분석	34
1. 해조류	34
2. 조식동물	52
3. 제어기술	61
제 3 장 활용 방안	68
제 1 절 기대 효과	68
제 2 절 활용 방안	68

그림 목차

그림 1-2-1. 복원 적정지 예측을 위한 레퍼런스 생물군집, 우점종, 지형특성 분석	8
그림 1-2-2. 갯녹음 대책 추진과정과 갯녹음 제거 기술(KMI, 2010)	9
그림 1-2-3. 갯녹음 대책 가이드라인 전과 예	10
그림 1-2-4. 하천의 특정 역영에서 다양한 환경 인자를 이용한 서식적합지 수 평가	11
그림 1-2-5. 미국 EPA의 메소코즘 적용 생태계 위해성평가를 위한 과정	11
그림 1-2-6. 갯녹음 방지를 위한 연안 해중립 생태계 대책 방안도	13
그림 1-3-1. 추진체계	16
그림 2-1-1. 썩과 바지락 서식 환경 분석을 위한 현장조사 및 과거자료 분석 지역	18
그림 2-1-2. 2016년 시화호 연구정점	18
그림 2-1-3. 주교리 노출환경	20
그림 2-1-4. 시화호 노출환경	21
그림 2-1-5. 2016년 9월 주교리 조간대에 출현하는 썩과 바지락의 개체수	21
그림 2-1-6. 썩과 바지락 서식밀도와 환경요인(조고, 퇴적상 제반지수) 간의 상관관계	25
그림 2-1-7. Classification of the habitat type	31
그림 2-2-1. 본 실험에 적용된 자동호흡측정기 모식도	35
그림 2-2-2. 수온에 따른 석회조류 및 엽상형 해조류의 광합성변화	37
그림 2-2-3. P-I 특성분석 과정	39
그림 2-2-4. Chlorophyll a 측정과정	39
그림 2-2-5. 구멍갈파래의 수온별 P-I curve	41
그림 2-2-6. 진두발의 수온별 P-I curve	42
그림 2-2-7. 작은구슬산호말의 수온별 P-I curve	43
그림 2-2-8. 수온별 1시간 동안 10초 단위로 측정된 구멍갈파래의 광합성력	44
그림 2-2-9. 수온별 구멍갈파래의 평균광합성력	44
그림 2-2-10. 수온별 1시간 동안 10초 단위로 측정된 진두발의 광합성력	45
그림 2-2-11. 수온별 진두발의 평균광합성력	45
그림 2-2-12. 수온별 1시간 동안 10초 단위로 측정된 작은구슬산호말의 광합성력	46
그림 2-2-13. 수온별 작은구슬산호말의 평균광합성력	46

그림 2-2-14. 대상해조류의 수온에 따른 pCO ₂ 농도별 광합성력 변화	49
그림 2-2-15. 대상해조류의 수온에 따른 pCO ₂ 농도별 Chlorophyll a 변화	51
그림 2-2-16. 둥근성게(<i>Mesocentrotus nudus</i>)	53
그림 2-2-17. 실험셋업	54
그림 2-2-18. 실험 수온 변화 스케줄	54
그림 2-2-19. 실험에 사용된 인큐베이터와 수조	55
그림 2-2-20. 산소 소비율 측정 장비 설치 모습	56
그림 2-2-21. 산소 소비율 측정 장비 구성도	56
그림 2-2-22. 산소 소비율 측정 장비	57
그림 2-2-23. 에어 오븐	58
그림 2-2-24. 수온에 따른 산소 소비율의 한 예. 빨간색과 파란색 레이블은 각각 Group H와 Group L의 개체	60
그림 2-2-25. 수온이 변동할 때의 시간에 따른 온도와 산소소비율의 예. 빨간색 과 파란색 레이블은 각각 Group H와 Group L의 개체	60
그림 2-2-26. 보라성게(<i>A. crassispina</i>)의 식해활동 관찰을 위한 (A)실험수 조와 4 종류의 구조물	63
그림 2-2-27. 실험수조 내의 수온, 염분, 용존산소 및 pH의 변동	64
그림 2-2-28. 실험기간 동안 구조물별 다시마에 접근한 보라성게(<i>A. crassispina</i>) 의 일별 개체 수 변동	66
그림 2-2-29. 실험기간 동안 일별 구조물별 보라성게(<i>A. crassispina</i>)의 섭식행동 관찰 결과	66
그림 2-2-30. 인공 해중립 보호를 위한 성게류 접근 방어막 설계도(안)	67

표 목 차

표 2-1-1. 쪽과 바지락의 서식 분포 및 서식환경 분석 현황	19
표 2-1-2. 2016년 주교리 연구지역 퇴적상	22
표 2-1-3. 2016년 시화호 연구지역 퇴적상	23
표 2-1-4. 쪽과 바지락의 출현 유무에 따른 분류	27
표 2-1-5. 변수 X_i 의 서식지 정보 행렬예시	28
표 2-1-6. 생물	28
표 2-1-7. 문자정보 항목(갯벌영역, 퇴적토사 유형)을 제외한 수치형 자료에 대한 분산팽창지수 계산결과	29
표 2-1-8. 다중공선성을 보이는 항목을 제외한 뒤의 분산팽창지수 계산결과 ...	29
표 2-1-9. 관측 생물-환경인자 항목의 유형별 범위(1-4는 유형 번호를 나타냄)	32
표 2-1-10. 환경인자 범위행렬정보를 이용한 쪽과 바지락 서식환경유형 추정 결 과(중략)	32
표 2-1-11. 생물기반 분류 유형과 환경인자의 범위로 분류한 유형의 비교 결과 (중략)	33
표 2-2-1. 대상해조류의 광합성력에 대한 분산분석	47
표 2-2-2. 대상해조류의 pCO ₂ 농도에 따른 광합성력에 대한 2요인 분산분석 ..	50
표 2-2-3. 대상해조류의 pCO ₂ 농도에 따른 Chlorophyll a에 대한 2요인 분산분석	52
표 2-2-4. Temp-OCR _{DW} Spearman's rank 상관분석	59
표 2-2-5. 실험 결과 데이터. TD=외곽 직경(test diameter)	61
표 2-2-6. 수온 구간 별 Q10값	61

제 1 장 연구 배경

제 1 절 연구의 필요성

1. 기술적 측면

- 지구적 기후변화 및 인간 활동 증가로 인해 권역별 연안생태계의 건강성/생산성/다양성 등 선 기능적 요소를 약화시키는 위협생물의 종류 및 생태계에 미치는 영향이 다양하게 나타나, 권역별 연안생태계 문제 해결을 위한 맞춤형 위협생물 대응 기술 개발이 필요하다.
- 최근 10년 사이에 서해안 갯벌에 생태계 위협생물(쪽 등)이 급격히 증가하여, 주요 자원생물(바지락, 동죽, 백합 등)의 서식지 교란과 대량 폐사가 반복적으로 나타나고 있어, 위협생물 대량 발생 예측 기술 개발이 필요함. 동해의 암반생태계는 무절석회조류가 번성하는 갯녹음 현상이 확대되며 모자반류, 다시마, 감태, 대황 등 해조군락의 소멸에 따른 바다의 사막화가 급속히 진행되고 있어, 갯녹음의 원인을 파악하고 제어할 수 있는 기술 개발이 필요하다.
- 위협생물이 유용생물의 서식 및 생존에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 이론적인 기술만 있을 뿐 실제로 체계적인 연구가 제한되어있음. 그러므로 위협생물의 대량 발생을 예측하고 관리하기 위한 위협생물 최적 서식 접합도 모델 기술 개발 및 모의생태계에서의 위협생물 대량 발생원인 파악을 통한 위협생물 제어 기술 개발이 필요하다.

2. 경제 · 산업적 측면

- 최근 서해안, 남해안 일부 연안에 급속히 확산 중인 쪽의 서식처는 바지락 등 패류의 생산량을 급격히 떨어뜨리고 있음. 쪽의 확산으로 패류 양식범위가 줄어들면서 지역 어민들의 소득이 약 1/20로 줄어드는 막대한 경제적 피해를 입고 있어, 이를 제어할 수 있는 기술개발을 통해 해양생태계의 건강성을 유지와 연안 수산업의 활성화가 필요하다.
- Y자 형태의 구멍을 1m 이상까지 파 살고 있는 쪽은 같은 공간에 살고 있는 저서동물의 먹이활동과 호흡을 방해하기 때문에, 조간대의 주요 수산생물인 바지락, 동죽, 백합 등에 피해를 주며, 연간 20,000톤(400억)의 패류 생산의 감소가 나타나고 있다.

- 우리나라의 갯녹음 지역은 해마다 1200 ha씩 증가하고 있으며, 이에 따른 해양 환경의 변화로 인해 연안 수산업의 피해가 증가하고 있음. 갯녹음의 발생기작 및 대응을 위한 기술 개발은 연안 생태계의 경제/산업적 가치창출을 지원할 수 있을 것으로 판단된다.
- 모의(폐쇄)생태계를 이용한 해양생태계의 건강성 악화와 관련된 유해인자의 위험성 평가는 실제 해양환경에서 지불해야할 막대한 경제적 손실의 예방 및 축소에 기여할 수 있다.

3. 사회 · 문화적 측면

- 우리나라 연안에 출현하는 해양생태계 교란생물에 대한 종류 및 생태적 특성과 인간의 재산에 미치는 영향에 대한 국민적 관심이 증가되고 있으며, 특히, 인간 활동 증가에 따라 쉽게 접근이 가능한 갯벌 생태계가 건강하고 안정되게 유지되고, 또한 갯벌 생물 생산 증가에 대한 사회적 관심이 증가하고 있는 실정이다.
- 따라서 본 연구는 향후 급격한 생물 증가로 인한 생태계 교란을 억제할 수 있는 기술 개발을 마련하는데 매우 중요한 기반 기술로 국민 삶의 질을 향상시키고 후손에게 건강한 해양 환경을 물려줄 수 있다.
- 인위적 훼손으로부터 해양생태계 보호와 해양생물다양성을 보전하기 위하여 서식지교란생물에 대한 모니터링 및 발생 원인을 파악하고, 체계적이고 종합적인 관리 대책을 수립하여 국민들의 재산피해 최소화를 위한 정책 개발 기여가 필요하다.

4. 정책적 측면

- 해양과기원 임무 및 경영목표 등과의 연계성
- 본 연구 개발은 해양과기원의 경영목표인 해양과학기술의 새로운 가치 창출과 미래세대 창의 인재 양성 달성을 위해 필요한 추진 전략인 ‘국가 사회적 해양현안해결’부분의 해양환경 보전 개발 및 해양오염 관리체계 강화를 통한 국민의 삶의 질 향상에 기여와 연관성이 높다.
- 연구개발 주제는 KIOST 중점연구전략목표 중 [바다 자원 찾기]지속가능한 해양생태계 관리 및 미래 유용자원 탐색·활용’부분에서 ‘3-1 환경변화에 따른 해양생태계 반응 이해 및 대응기술 연구’의 위협생물 대응기술 개발 분야에 해당된다.
- 연안 생태계 위협생물 대응 기술 개발을 통하여 연안생태계 건강성과 생산력을 회복 하여 지역사회의 현안문제 해결에 기여함으로써 KIOST의 기본 임무를 달성 할 수 있다.

- 해양과학기술원의 기본 임무인 기후변화에 따른 해양 생태계 변화를 이해/예측/대응을 위한 기반기술 개발을 통해 기관이 부여받은 역할과 임무를 수행할 수 있는 수월성을 확보할 수 있다.
 - 위협생물 대응을 통한 해양생태계 복원관리 기술개발은 해양과학기술원 중점연구분야 전략연구프로그램 과제(해양생태계 평가·관리·복원 프로그램)에 부합하며, 해양환경보전 및 해양생태계 관리를 위한 국내 선도적인 기술보유로 우심해역의 건강성 회복에 기여가 필요하다.
 - 한국해양과학기술원 12대 중점 연구 분야 중 ‘해양환경 및 생태계 보전기술’, ‘기후변화 예측 및 대응기술’, ‘해양생물자원 이용기술’과 연계된다.
- 국가적 아젠다(정부 140대 국정과제, 제3차 과학기술기본계획 등)와의 연계성
- 박근혜정부의 국정과제인 ‘13번 해양 신성장 동력 창출 및 체계적 해양영토 관리’, ‘14번 수산의 미래 산업화’, ‘99번 기상이변 등 기후변화 대응’, ‘104번 해양환경보전과 개발의 조화’와 관련하여 과제의 필요성이 있다.
 - 제3차 과학기술기본계획의 ‘깨끗하고 편리한 환경조성’, ‘미래 성장 동력 확충’에 필요하다.
 - 2020 해양과학기술로드맵(2020 MTRM)에서의 “자연친화적이고 안전한 해양이용확대를 통한 국민 삶의 질 향상을 위한 연안환경관리 기술로드맵 구축”에 부합하기 위한 과제 개발이 필요하다.
 - 수산자원관리법(2016. 6. 23. 시행)의 “제 5조 수산자원관리기술 연구개발“제7조 수산자원관리 기본계획의 2-4. 수산자원이 감소 또는 고갈될 위험이 있다고 인정되는 특정 수산자원에 대한 수산자원 회복계획에 관한 사항“에 따라 갯녹음에 의한 바다 숲의 회복 및 조성을 위한 정책목표 및 기본방향을 수립하고 과학적 연구개발 수행 필요하다.

제 2 절 국내외 연구 현황

1. 국내 동향

가. 갯벌 위협생물(쏙) 연구 동향

- 해양수산부와 해양환경관리공단은 습지보전법에 따라 1999년부터 2004년까지 갯벌생태계조사(1차 연안습지 기초조사)를 수행하여 조사결과를 토대로 연안습지 보전 5개년 기초계획을 수립하였으며, 2008년부터 2013년까지 조사권역별로 연안습지 생태계의 특성 및 변화를 파악하는 2차 연안습지 기초 조사를 수행하여 연안습지의 보전과 복원을 위한 과학적 기초자료를 제공하고 있다.
- 습지보전법 제8조와 해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률 제25조에 근거하여 연안습지보호지역 12개소(무안갯벌, 진도갯벌, 순천만갯벌, 보성별교갯벌, 웅진장봉도갯벌, 부안줄포만갯벌, 고창갯벌, 서천갯벌, 증도갯벌, 봉암갯벌, 송도갯벌, 시흥갯벌 등)와 해양생태계보호구역 6개소(신두리 사구해역, 문섬등 주변해역, 가거도 주변해역, 오류도 및 주변해역, 소화도 주변해역, 대이작도 주변 등)의 해양보호구역을 지정하여 갯벌환경 조사 및 생태특성에 대한 모니터링 사업을 시행 중이다.
- 2010년 서해안 바지락 양식장에서 쏙의 대량 발생 이후, 국립수산과학원 갯벌연구센터는 서해안 바지락 양식장에 분포하는 쏙의 밀도 조사하여 인천과 안산시 갯벌에 서식하는 쏙의 밀도는 평균 80 개체/50cm²가 분포하고 있음을 파악하였으며, 2012년부터 갯벌 바지락 생산 저해요인으로 대두된 쏙의 서식실태를 파악하고 다양한 제어기술을 개발하기 위한 연구를 시작하고 있다.
- 해양과학기술원은 2012년에 서해안 갯벌에서 대량 발생하고 있는 쏙의 발생 기작을 파악하기 위하여, 쏙의 개체군 특성에 대한 연구를 실시하였다.

나. 조하대 갯녹음 연구 동향

- 국내에서는 1980년대 이후부터 제주도와 남해안 일대의 해역에서 갯녹음 현상이 나타나기 시작하였으며 1990년대 이후부터는 동해 연안까지도 갯녹음 현상이 발생하여 피해가 일어나면서 이에 대한 심각성이 부각되었다.

- 한국과 일본은 공동으로 양국의 수산 발전을 위해 지난 1993년부터 창립된 한일해협 연안 시·도·현 교류 회의를 실시하는데 한국에서는 제주와 부산, 경남, 전남 일본에서는 사가현과 후쿠오카현, 나가사키현, 야마구현 등이 매년 순회 하면서 지구온난화, 기후변화 등에 대응하고 갯녹음 해역에 대한 해중림 조성사업을 한·일 공동 연구과제로 8개 시도현이 참가하여 수행하고 있다.
- 경상북도에서는 갯녹음 지역에 바다숲(40개소)을 조성하기 위하여 2007년부터 2009년까지 총 80억원의 예산을 투입한 바 있으며, 2016년부터는 동해안 연안 바다속을 푸르게 가꾸기 사업에 총력을 기울여 수산자원 회복에 일환으로 동해안 갯녹음 피해예방 대책을 수립해 연차적으로 예산을 증액하여 “갯녹음 예방의 성공적 사업추진을 위해서 동해안 5개 시·군의 수산행정의 당면 제1의 과제로 갯녹음 대책을 적극 추진해 나갈 계획”으로 노력하고 있다.
- 제주해양수산연구원에서는 기능성 어초 개발과 해조류 착생 등 인위적인 바다숲 조성 기술 개발 사업을 추진하였다.
- 2013년도 제주도의 CM비오택이라는 회사에서 ‘유용미생물을 이용한 바다숲 살리기 사업’에 참여하여 모판에 유용미생물 처리 과정을 거친 부분과 그렇지 않은 부분을 비교한 결과, 미생물 처리한 부분에서 7일 만에 모자반이 착생하였다.
- 농림수산식품부 (현 해양수산부)에서는 2009년부터 시작하여 2012년까지 전국 연안 38개소에 바다숲을 조성하기 위하여 약 540억 원을 투입하였다.
- 우리나라 갯녹음 해역에 해조숲을 조성하기 위하여 국립수산과학원을 중심으로 해중림초(seaweed reef)에 해조류를 이식하여 투하하는 방법과 자연적인 포자 가입 (spore recruitment)을 유도하기 위하여 해중림초와 포자백을 함께 이용하는 방법, 그리고 왕성한 해조류 섭식자인 성게의 접근을 억제하기 위한 수중 저연승방법이 이용되었다(Kwon, 2008). 하지만, 초식자의 왕성한 섭식활동으로 조성된 해조숲을 수일 내에 황폐화시키는 것으로 확인되어(Kwak, 2014), 갯녹음 해역에 이식된 해조류가 해조숲을 형성하거나 유지하기 위해서는 성게류와 같은 조식동물의 밀도 조절 혹은 접근과 섭식을 억제하는 방법이 개발되어야 한다(Kwak, 2014).
- 정부에서는 ‘바다 숲 가꾸기 사업’, ‘해중림 조성 사업’ 등 막대한 재원을 투자 하여 자원회복과 백화현상의 해결방안으로 2030년까지 전국 연안에 357억 원 투자 하여 역대 최대 규모인 3만5000ha규모의 바다숲을 조성하고 현재 860만 톤 수준인 연근 해수산자원량을 2020년까지 1,100만 톤 수준으로 회복시켜 수산물 자급률과 어업인의 소득을 높여나갈 계획 중이다.

다. 서식지 적합도 모델

- 해양 생물의 서식지 적합도 모델은 복잡한 환경반응과정, 생물의 생리적인 특성을 고려하여 구축하는 모델이 아니라, 특정 생물의 서식 공간, 서식밀도 등을 환경 특성인자의 범위를 통계적으로 관련시키는 모형이기 때문에 현장 관측 자료가 매우 중요하고, 필수적인 인자로 우리나라에서는 갯벌의 대기 노출시간, 퇴적물질의 입도 정보와 관련지어 갯벌 저서생물의 서식환경 적합 모형을 개발-적용한 사례가 있다(강화 갯벌, 천수만, 새만금 갯벌 등).
- 국내에서의 해양생물 서식지 적합모델 개발-활용 사례는 매우 미흡한 수준이며, 이는 모델개발의 어려움이 아니라 모델 개발을 위한 현장 관측 자료의 절대적인 부족에 있음. 또한 기존에 수립된 모델이라 할지라도 제한된 환경인자 정보를 이용하여 수립된 모델인 경우, 모델을 이용한 해양 저서생물의 서식밀도 추정오차가 상당할 수 있으나, 오차 평가부분도 매우 미진한 실정이다.
- 썩, 바지락에 대한 현장 환경인자 및 서식밀도 정보(기존의 연구 성과 활용 가능)를 이용하여 서식지 적합도 모델을 구성하면, 현장의 환경인자 정보만으로도 썩과 바지락의 서식밀도 정보 추정이 가능하다.

라. 모의생태계를 활용한 위협생물 발생 요인 연구

- 한국해양연구원 남해연구소에 폐쇄생태계 9기를 운용할 수 있는 Mesocosm raft가 건조된 이후 2001년과 2002년에 2,500리터 규모의 인공 부유폐쇄생태계를 운용하여 생태학의 가장 중요한 조절관점인 하향조절(Top-down control)과 상향조절(Bottom-up regulation)을 조절 및 운용 평가하였다.
- 2004년도 한국해양연구원과 포항공대 공동연구로 미래기후변동예측을 위해 메소코즘을 적용한 이산화탄소 농도의 미래농도 조절로 연안 부유생태계의 영향을 파악하는 연구를 수행한 결과 개발된 운용기술이 국제특허에 등록되었고, 그 과학적 방법론이 국제 유명학술지(Limnology and Oceanography)에 수록되어 등재되었다(Kim et al., 2008).
- 2008년에는 교과부 지원으로 다학제간 연구사업인 “유해조류 제어를 위한 바이오나노캡시드 제조 및 탑재 융합기술 개발” 연구의 일환으로 적조생물 제어물질의 해양생태계 생태학적 평가를 폐쇄생태계를 이용하여 수행하였으며 본 사업에서 유해물질에 대한 생태계 위해성 평가(Ecological risk

assessment) 연구기법이 도입되었고, 폐쇄생태계 용기 형태에 따른 결과 해석 오차를 줄일 수 있는 기초운용기술 획득하였다.

- 한국해양연구원 NAP 연구 사업으로 “해양 오염물질 유출사고 대응 지원기술 향상을 통한 깨끗하고 풍요로운 바다 만들기(2009-2011)” 과제를 통해 유류오염 및 유처리제 사용에 따른 부유생태계 위해성 평가를 폐쇄생태계에서 수행하였으며, 그 연구결과는 국제유명학술지(Journal of Hazardous Materials)에 논문으로 게재되었다(Jung et al., 2012; Joo et al., 2013).

2. 국외동향

가. 갯벌 위협생물(쪽) 연구 동향

- EU2020 생태계평가는 생태계를 구성하고 있는 생물 종의 다양성 진단과 생태계내의 기능을 평가하여, 건강한 생태계가 유지되도록 시도하고 있으며, 결국은 이를 이용하는 국민의 이익을 증진시키기 위한 생태계 서비스 개념이 포함되어 Ecosystems과 Socio-economic systems이 서로 연관되도록 연구가 진행 중이다.
- 일본에서는 유실되어진 갯벌을 인위적으로 복원하기 위해 주요 갯벌 생물에 대한 생태적 기능, 인간과의 관계, 서식 특성, 번식 및 먹이, 서식환경 조성 조건 등의 연구를 수행하여, 복원생물에 대한 최적 서식 조건 기준을 설정하였다.
- 캐나다의 아카디아대학 (Acadia Univ.)의 K. Millard 등의 연구자들은 펀디 베이 (Bay of Fundy)에서의 염습지 복원지역 선정을 위하여 복원 예정지 두 곳과 레퍼런스 사이트(그림 1-1)의 위성사진과 항공사진을 GIS, Remote sensing, GPS, LiDAR(Light detection and ranging) 등의 기술을 이용하여 분석하였으며, 식생 및 지형특성 데이터를 이용한 식생한계와 복원지역의 적정도 모델을 통해 적정 복원지를 예측하였다(K. millard et al., 2013).

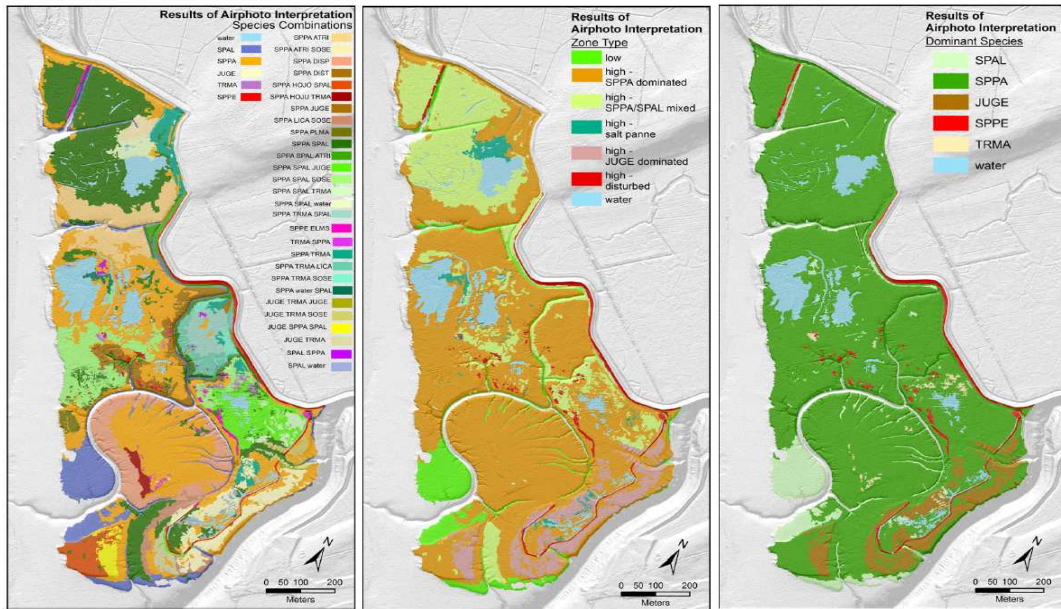


그림 1-2-1. 복원 적정지 예측을 위한 레퍼런스 생물군집, 우점종, 지형특성 분석

- 우리나라에서 출현하는 쪽에 대한 연구는 대부분 일본에서 진행되었으며, 현재까지 쪽연구는 개체의 발달단계의 유생 형태(Konishi, 1989), 서식 구멍 구조(Kinoshita, 2002), 개체군 비교(Kinoshita et al., 2003), 생리 및 섭식특성(Batang and Suzuki, 2003; Yokoyama et al., 2005), 공생 생물(Kato and Itani, 1995; Itoh and Nishida, 2002; Nanri et al., 2011), 유전자 분석(Kang et al., 2008; Kim et al., 2011)등 다양하게 수행되었다.
- Teske 등 (2006)은 남아프리카의 *Upogebia africana*종 지역집단간 분포관계 등 생물지리학적 비교연구에 미토콘드리아 COI 자료를 이용함. 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 김상희 박사팀은 충남 서천에 서식하는 쪽 (*Upogebia major*종)의 미토콘드리아 유전체를 완성하였다(Kim et al. 2011).

나. 조하대 갯녹음 연구 동향

- 미국 캘리포니아 연안 위원회는 연안역 보존활동 의제 20의 법률에 의해 1972년 11월에 설립되어 연안보존 활동을 계속해오고 있으며, 이 위원회에서는 1000마일 이상되는 캘리포니아 연안을 보존하고 바다숲을 복원하는 것을 목적으로 하고 있다.

- 일본에서는 수산업적인 측면에서 갯녹음에 대한 연구가 100여 년 전부터 이루어졌으며, 일본 도호쿠(동북)제국대학 엔도기치사부로는 1902년 해조 갯녹음 조사보고를 낸 후 1911년에 갯녹음에 대해 체계적으로 기술하였으며, 북해도대학에서는 1994년부터 갯녹음 현상을 이해하고 원인을 분석하였다.
- 일본은 바다숲 조성사업을 ‘풍부한 바다의 숲 조성사업’ 또는 ‘갯녹음 대책 사업’으로 부르고 있으며, 중앙정부(수산청)와 지자체(도도부현)에서는 수산 기본계획, 어황어장정비장기계획 또는 자체사업으로 바다숲을 복원 및 조성해 왔다.
- 일본 수산청에서 갯녹음 현상에 대한 효율적인 대책으로 1998~2002년에 걸쳐서 갯녹음 진단위원회를 구성하여 갯녹음의 진단방법, 갯녹음의 발생과 지속 요인, 여러 해역의 갯녹음 실태를 정리하고 갯녹음 진단지침을 작성하였다.
- 일본 수산청은 2004년부터 ‘갯녹음 대책 검토위원회’를 설치하여, ‘긴급 갯녹음 현상대책 모델사업’을 추진하였으며, 해조군락과 그 변동, 갯녹음현장 조장의 회복·잔존 사례, 갯녹음현상의 회복사업, 갯녹음현상 대책과 문제점을 파악하고 있음(후지타 다이ске, 2005). 검토위원회는 2007년 기존 갯녹음 관련 연구성과를 정리 분석하고 17개 지자체와 연구기관이 공동으로 참여하여 ‘갯녹음 대책 가이드라인’을 만들었다.
- 갯녹음 대책 가이드라인은 ‘긴급 갯녹음 대책 모델 사업’의 결과를 정리한 것으로 갯녹음 대책 과정과 갯녹음 제거 기술을 수록하여 어업인이 갯녹음 발생과 지속 원인을 파악하여 그것을 제거하고 해조류 증대를 위한 최적 기술을 선택함으로써 갯녹음 치유와 해조류 회복에 대한 성과를 올리는데 목적이 있다(그림 1-2-2).

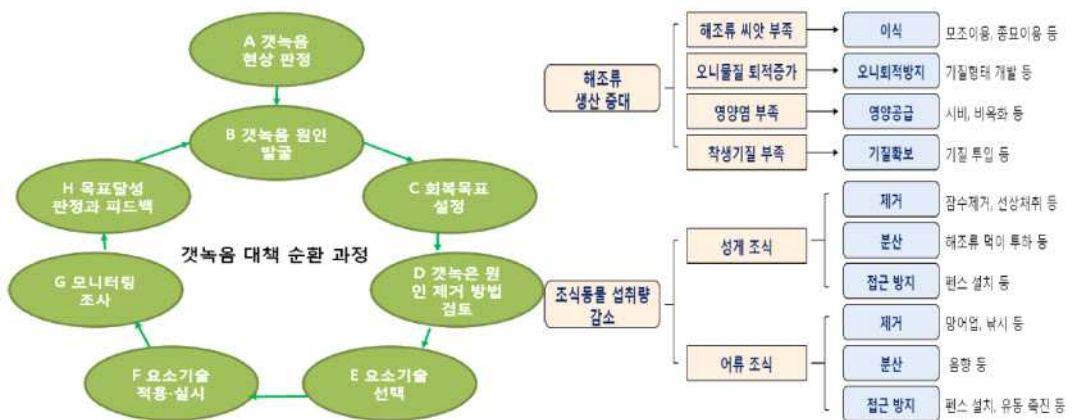


그림 1-2-2. 갯녹음 대책 추진과정과 갯녹음 제거 기술(KMI, 2010)

- 일본 수산청에서는 갯녹음 대책 가이드라인을 전국 각지로 전파하여 정착시키기 위해 2007년부터 2009년까지 ‘전국 풍부한 바다만들기 추진협회’에 사업을 위탁시키고 있음. 사업내용은 첫째, 해조류 조식어류의 낚시로 구제, 둘째, 전문가 및 강습회를 활용한 갯녹음 대책 가이드라인 강습회 개최, 해조장 조사 강습회 개최(해조장 조사 방법 등), 넷째, 갯녹음 대책 성공사례 발굴 및 전파 등이다(그림 1-2-3).



그림 1-2-3. 갯녹음 대책 가이드라인 전파 예

다. 서식지 적합도 모델

- 선진 외국의 생물 서식 적합정도 평가 모형도 현장 환경 관측 자료와 생물의 서식여부를 관련짓는 통계적인 모형 구조 (USGS - PHABSIM 모형 등). 따라서 어떤 해양 생물의 서식환경 적합정도 평가 모형은 대상 해양생물과 환경인자의 동시 조사 자료가 가용하다면 수립이 가능하며, 모델 수립과 독립적인 자료를 이용하여 모델의 오차분석, 성능평가가 수행되었다(그림 1-2-4).
- 서식지 적합도 모형이 가장 활발하게 활용되는 분야는 하천영역으로 하천의 흐름과 저질조건 등으로 서식 가능한 어류 등을 추정하는 모형이다. 또한 환경변화로 인한 어류상의 변화 예측에도 활용하고 있는 단계이다.

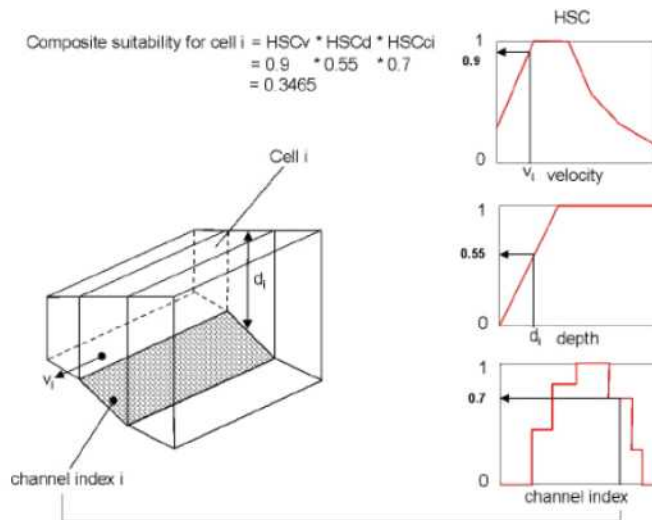


그림 1-2-4. 하천의 특정 영역에서 다양한 환경 인자를 이용한 서식적합지수 평가

라. 모의생태계를 활용한 위협생물 발생 요인 연구

- Mesocosm 적용 평가의 체계화 (그림 1-2-5) : 미국 EPA의 OPP에서 권장하는 폐쇄생태계를 이용한 위해성 평가방법은 아래 그림과 같이 체계적인 순서를 밟고 있다(Graney et al, 1994).

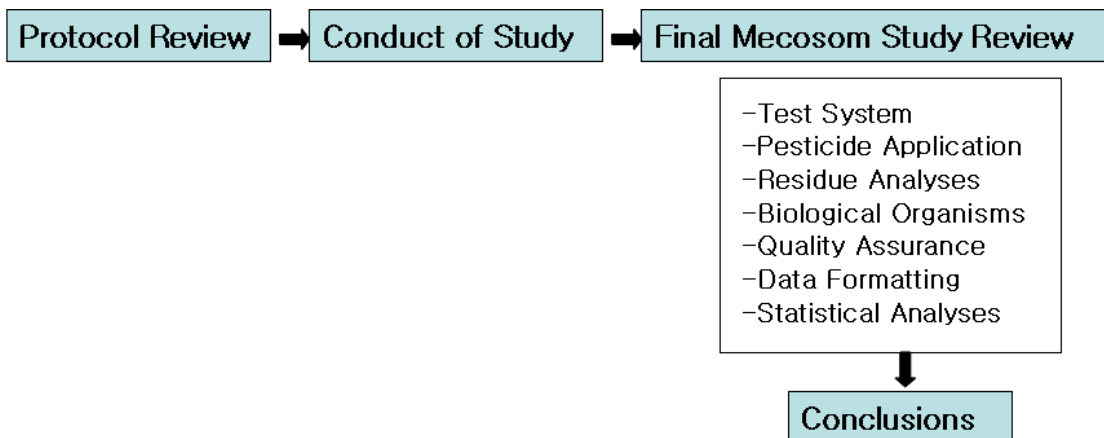


그림 1-2-5. 미국 EPA의 메소코즘 적용 생태계 위해성평가를 위한 과정

- 폐쇄생태계 연구센터를 통한 연구 집중화 : 미국의 경우 메릴랜드 대학의 환경과학센터 내에 Mutiscale Experimental Ecosystem Research Center (MEERC)를 설립하여 지난 20년간 미국 내 연구자들과 협력하여 폐쇄생태

계 설계 및 관련 연구를 수행하였으며 최근 연안생태계 이해와 관리를 위한 도구로 폐쇄형 실험 생태계에 관한 종합적 정보를 담은 서적을 출간하였다(Petersen et al., 2009).

- 폐쇄생태계는 평가대상 생물과 평가목적에 따라 맞춤형으로 모양과 크기가 제작되며 각 모양과 크기에 따른 효율성과 신뢰성을 확보하고자 기계적, 기술적 방안을 다각적으로 고안되었다(Petersen et al., 2003).

3. 현 기술의 한계 분석

가. 갯벌 위협생물(쏙) 연구 동향

- 국가 주도 갯벌 사업을 포함한 국내 갯벌 연구는 대부분이 생물의 시공간적 분포와 관련한 지리정보에 국한되어 있으며, 갯벌이 가지는 생태/환경적 기능에 대한 객관적이고 과학적인 연구결과는 절대적으로 미흡한 실정임. 이런 수준의 연구 부재는 지난 수십 년간 갯벌의 보존/개발에 대한 이익집단 간의 첨예한 대립과 사회적 갈등을 증폭시켰다.
- 현재 국가에서 수행 중인 생태계 복원 관련 사업은 이러한 갯벌의 기능을 제대로 파악하지도 못한 채 수행되고 있는 실정임. 그러므로 갯벌의 보존 및 복원, 나아가 체계적인 관리를 위해서는 종, 개체군, 군집, 생태계 수준에서 갯벌 및 갯벌 생물이 갖는 생태적 기능과 관련한 연구가 우선 되어야 할 것이다.
- 갯벌 종합관리시스템의 부재. 비록 연안습지 기초조사를 통해 갯벌정보시스템 서비스를 구축하였으나, 이는 단위 갯벌에 대한 단편적인 지리정보만을 제공할 뿐임. 국가차원의 생태계 보전 및 활용의 전략을 구축하기 위해서는 우리나라 전체 갯벌에 대한 정보시스템 구축이 필요함. 이를 통해 보다 신속하고 적절한 정책반영이 가능할 것임. 연안습지 기초조사에서는 point data로부터 단순히 한 정점에서의 생물지리정보만을 제공하고 있음. 보다 현실적이고 실용적인 정보 제공을 위해서는 point data로부터 area-based data를 구축하고, 나아가 우리나라 전체 갯벌을 대상으로 한 habitat mapping을 구축할 필요가 있다.
- 위협생물이 유용생물의 서식 및 생존에 영향을 미치는 행동 및 생리 메커니즘에 대해서 이론적인 기술만 있을 뿐 실제로 연구된 바가 없다.
- 서해안 갯벌조간대에서는 매년 기후변화에 의한 토사이동과 위협생물(쏙류)의 대량 잠식 영향으로 바지락의 생산량이 급감하고 자연 발생 종패의 침·

퇴적 및 환경변화에 의한 폐사 발생으로 종패부족과 성패의 대량폐사가 반복되고 있으나, 이를 해결하기 위한 근본적인 대책이 마련되지 못하고 있다.

나. 조하대 갯녹음 연구 동향

- 갯녹음 현상을 해소하기 위한 바다숲 복원사업은 바다 생태계를 살리기 위한 좋은 방법이나, 갯녹음의 원인으로 대두되는 무절석회조류의 다양성과 조식 섭취 동물에 의한 갯녹음은 현재까지 연구되지 않았다.
- 또한 정확한 갯녹음 원인을 분석 후, 진단 및 예측을 위한 기법은 반드시 연구할 필요성이 있다.
- 갯녹음 해역에서는 대부분 해조류를 먹는 조식동물의 해조류 섭취량이 해조류 생산량보다 많고 다양한 환경변화로 인해 갯녹음이 가속화되고 있어 그 대책으로 조식동물의 구제방법과 해조류 생산량을 증가시켜 생태계 균형을 맞추기 위한 중요한 선결 과제로 일본에서는 투석, 해조류 이식 등을 실시해 왔지만 회복된 사례는 극소수이며 획기적인 방안을 제시하지 못하고 있다(그림 1-2-6).

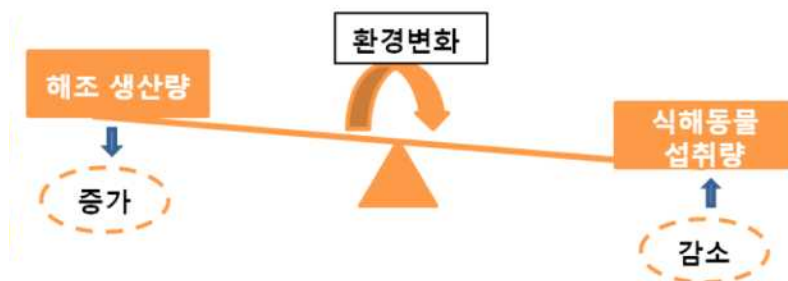


그림 1-2-6. 갯녹음 방지를 위한 연안 해중림 생태계 대책 방안도

다. 서식지 적합도 모델

- 현 기술의 한계는 가용한 현장 관측 자료의 부족이다. 환경자료에 비하여 상대적으로 미흡한 생물 밀도자료의 부족 또한 서식처 적합도 평가 모형의 개발을 제한하는 가장 큰 요인이다.
- 일단 모델을 수립하는 경우, 다양한 활용 및 생물변화 평가에 활용할 수 있으나 모델에 대한 인식부족으로 모델 수립에 대한 연구성과 및 활용이 매우 미진한 상황이다.

라. 모의생태계를 활용한 위협생물 발생 요인 연구

- 한국해양과학기술원 남해연구소의 폐쇄생태계 시설은 해상 부유식 시설로 다양한 환경요인 조절 및 연구목적에 담보하기에는 절대 부족한 실정이다.
- 현재까지 폐쇄생태계를 이용한 연구들은 주로 오염원에 대한 생태계 반응을 관찰하는데 주로 집중되어, 생태계 위해성 평가를 위한 체계적 기준 및 방법이 없는 상태이다.
- 폐쇄생태계를 이용한 실험대상은 유류오염, 살적조 및 신물질의 평가를 위한 부유생물이 주를 이루었고, 다른 서식지 생물들에 대한 적용은 미미한 수준이다.

제 3 절 연구 목표 및 연구방법

1. 연구목표

- 위협생물 서식 환경 요인 분석을 통한 서식지 적합도 모델 개발과 모의생태계 활용 발생요인 분석을 통한 대량발생원인 파악 및 권역별 위협생물 대응기술 개발
 - 위협생물의 서식지 적합도 모델 구축
 - 모의생태계를 이용한 위협생물 발생요인 평가 (2건)

2. 연구방법

가. 서식지 적합도 모델

- 위협생물 서식 환경 분석
 - 연구지역: 위협생물이 서식하는 서해조간대 지역(2지역 이상)
 - 대상 생물: 쪽, 바지락
 - 연구 내용: 생물(쪽과 바지락) 서식 분포, 퇴적상(표층퇴적물 입도)분석, RTK-DGPS 실고도 측량을 통한 고도 분석, 과거 자료 분석을 통한 쪽, 바지락 서식환경 분석
- 위협생물 서식 적합도 모델
 - 위협생물과 환경의 동시 관측 정보 수집
 - 생물정보와 환경정보의 다차원 상관관계 모형 분석
 - 오차범위 20%이내의 서식 적합도 모델 수립
 - 서식환경 평가모형의 모형의 다양한 오차평가 및 성능 개선

나. 모의생태계 활용 발생요인 분석

- 수온·pH 변동에 따른 생리 변화
 - 수온/pH에 따른 석회조류 및 엽상형 해조류의 생리변화
 - Automatic Intermittent Flow Respirometer를 이용한 광합성 측정: P·I curve, Chlorophyll a 변화 분석
 - 수온·pH 변동 요인에 따른 조식동물(성게)의 호흡률 변화 분석: 일정기간 동안 수온(8.5~28.5°C)조건을 달리하여, 4일간의 호흡률 분석
- 용존산소와 온도 변화에 따른 행동 변화
 - 수온상승과 용존산소의 복합적인 변화에 따른 조식동물(성게)의 행동 변화 분석

- 조식물의 주요 행동 변화 분석: 먹이섭식, Righting에 걸리는 시간
- 실험 조건: 용존산소(40~100%), 수온(18.5℃, 22.5℃)

○ 석회조류와 엽상형 해조류 간 공간경쟁

- 적정 사육조건 설정
- 무절석회조류 유무에 따른 엽상형 해조류의 착생률, 생존률 분석

○ 인위적 제어기술 개발

- 기존 연구자료 조사 및 분석
- 해중립 보호를 위한 조식동물 방제 시설 유형별 연구
- 조식동물 방지 시스템 설계 도안 제시
- 조식동물 방지 시스템 확인(실내실험)
- 조식동물 방제 기술 현장 적용 및 분석
- 해중립 조식동물 유형별 방제 장치 및 매뉴얼 제시

3. 추진체계



그림 1-3-1. 추진체계

제 2 장 연구 내용

제 1 절 조간대 위협생물(쏭) 서식지 적합도 모델

1. 위협생물 서식 환경 분석

가. 연구개요

최근 10년 사이에 서해안 갯벌에 쫭의 개체수가 급격히 증가하여, 바지락, 동죽, 백합 등 이매패류의 서식지와 안정된 갯벌 생태계를 교란하고 있는 실정으로, 쫭의 대량발생에 대한 예측 정보와 대량 번식 원인 등에 대한 연구를 통하여 쫭 (*Upogebia major*)의 이상 발생에 따른 생태계 파괴 대응 기술 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 쫭의 서식환경에 적합한 서식환경 요인을 분석하고자 한다.

나. 조사 방법

(1) 현장조사 및 과거자료 분석

(가) 연구정점(그림 2-1-1)

쫭의 서식환경 요인 분석을 위하여 주교리 40정점과 시화호 66정점을 분석하였다(그림 2-1-2). 또한, 주교리 및 궁리 외 5지역의 자료 분석을 통하여 쫭과 바지락 서식 밀도 및 환경 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 쫭 서식환경 요인 분석을 위하여, 과거자료를 포함하여 총 378정점의 자료를 분석하였다(표 2-1-1).



그림 2-1-1. 썩과 바지락 서식 환경 분석을 위한 현장조사 및 과거자료 분석 지역



그림 2-1-2. 2016년 시화호 연구정점

표 2-1-1. 쪽과 바지락의 서식 분포 및 서식환경 분석 현황

지역 (조사시기)	정점수	서식밀도		서식환경		
		바지락	쪽	고도	조석환경	퇴적환경
주교리 (2014-04)	15개	+	+	+	+	+
주교리 (2014-07)	15개	+	+	+	+	+
주교리 (2014-10)	15개	+	+	+	+	+
주교리 (2016-09)	41개	+	+	-	-	+
궁리 (2014-04)	15개	+	+	+	+	+
궁리 (2014-07)	15개	+	+	+	+	+
궁리 (2014-10)	15개	+	+	+	+	+
황도 (2009-05)	27개	+	+	+	-	+
황도 (2013-05)	28개	+	+	+	-	+
황도 (2015-08)	28개	+	+	+	+	+
시화호 (2016-09)	66개	+	+	+	-	+
대부도 (2015-07)	84개	+	+	+	+	+
곰소만 (2011-06)	13개	+	+	+	+	+
파도리 (2013-2015) (단기변동)	1개	+	+	+	+	+

+: 분석완료, -: 분석중

(나) 위협생물 서식환경

- 고도: RTK-DGPS(오차 3cm 이하)를 이용한 실고도 측량을 하였다.
- 노출환경: 조석에 따른 노출시간 분석을 하였다.
 - 6개 (최대, 최소, 연속, 총노출시간, 총노출빈도, 노출빈도) 항목이 포함되었다.
 - 보령(2013년)/시화호조력발전소(2016년) 조위관측소 10분 조위 실측자료를 이용하여 분석하였다.
- 퇴적환경: 퇴적물 조성과 평균입도 및 퇴적환경 제반지수 분석을 하였다.
 - 9개 항목(자갈, 모래, 실트, 점토함량 / 평균입도, 분급도, 왜도, 첨도, 퇴적상)이 포함되었다.

(다) 위협생물 서식밀도

- 방형구(1 m × 1 m)를 이용하여 정점별 3회 반복, 방형구 내 종별 개체수를 계수하였다.
- 종의 판단은 저서동물 굴(burrow)의 모양이나 생물의 활동 흔적을 통해 이루어졌다.

다. 조사 결과

(1) 위협생물 서식환경

(가) 연구지역 노출환경 분석을 통한 연속노출범위 산출

- 주교리: -393 cm ~ 451 cm 조위범위와 -111 cm, 16 cm, 77 cm, 294 cm의 노출범위를 가졌다(그림 2-1-3).
- 시화호: -428 cm ~ -91 cm 조위범위와 -291 cm, -148 cm, -128cm, -97 cm의 노출범위를 가졌다(그림 2-1-4).

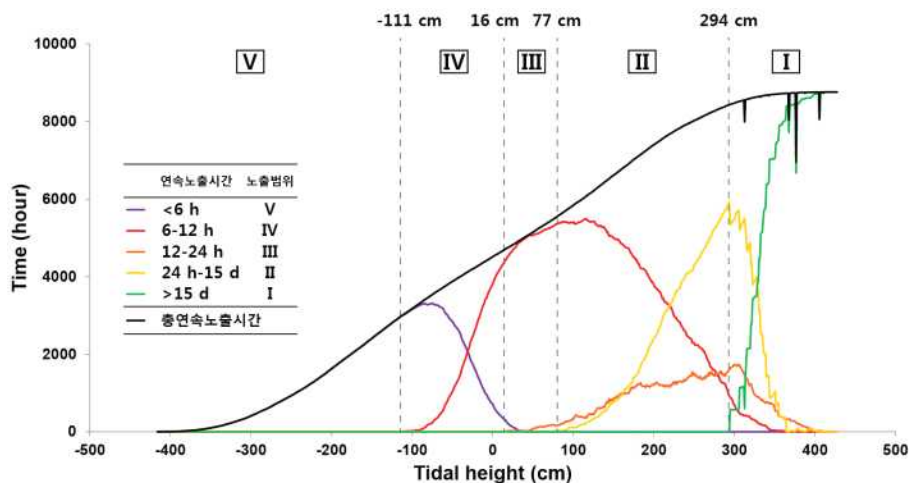


그림 2-1-3. 주교리 노출환경

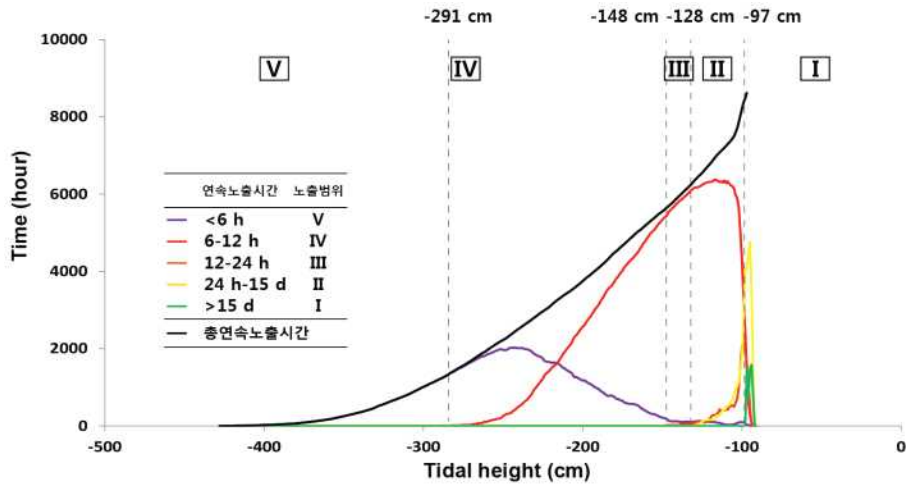


그림 2-1-4. 시화호 노출환경

(나) 연구지역 퇴적환경 분석

- 주교리(표 2-2)
 - 모래함량, 최소 29.6% ~ 최대 97.9%, 평균 71.3%
 - 평균입도, 최소 1.6 ϕ ~ 최대 5.1 ϕ , 평균 3.2 ϕ
- 시화호(표 2-3)
 - 모래함량, 최소 6.7% ~ 최대 96.1%, 평균 57.6%
 - 평균입도, 최소 2.5 ϕ ~ 최대 5.5 ϕ , 평균 4.0 ϕ
- 주교리가 시화호에 비해 모래퇴적상이 우세함

(2) 위협생물 서식밀도

- 연구지역인 주교리에서 출현한 쪽의 개체수는 최대 631 개체/m² 이었으며, 쪽의 대부분은 중부조간대에서 출현하고 있으며, 반면에 바지락은 최대 1436 개체/m² 가 출현하였으며, 조간대 중하부에 출현하고 있음. 쪽과 바지락의 서식지는 일부 지역을 제외하고는 거의 겹치지 않는 것으로 조사되었다(그림 2-1-5).

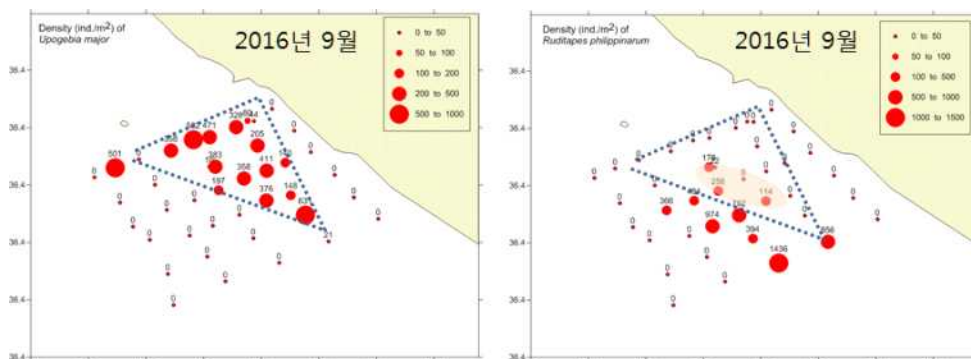


그림 2-1-5. 2016년 9월 주교리 조간대에 출현하는 쪽과 바지락의 개체수

표 2-1-2. 2016년 주교리 연구지역 퇴적상

정점	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	입도 (Mz)	분급도	왜도	첨도	Type
J1-1	0.0	63.2	29.9	6.9	3.6	2.1	0.4	1.5	zS
J1-2	0.1	63.7	30.7	5.5	3.7	1.7	0.2	1.9	(g)mS
J1-3	0.1	49.1	42.7	8.1	4.1	2.2	0.2	2.0	(g)M
J1-4	0.0	85.8	9.5	4.7	2.3	1.5	0.7	2.5	zS
J1-5	0.0	85.7	9.8	4.5	2.5	1.4	0.6	2.4	zS
J2-1	0.0	70.0	23.5	6.5	3.5	1.8	0.6	1.8	zS
J2-2	0.9	77.0	16.9	5.2	3.2	1.8	0.2	1.9	(g)mS
J2-3	0.0	55.6	31.2	13.2	4.0	3.1	0.5	1.3	zS
J2-4	1.4	62.9	23.9	11.8	3.7	2.8	0.7	1.3	(g)mS
J2-5	2.1	64.6	22.9	10.4	3.4	3.0	0.4	1.6	(g)mS
J3-1	0.0	34.4	56.8	8.8	4.7	1.6	0.5	1.9	sZ
J3-2	1.1	69.7	23.5	5.7	3.1	2.2	0.1	1.6	(g)mS
J3-3	0.9	85.0	9.4	4.7	1.9	2.0	0.4	1.7	(g)mS
J3-4	0.0	95.7	2.2	2.1	1.6	0.7	0.1	1.4	S
J3-5	0.0	96.5	2.4	1.1	2.2	0.6	-0.1	1.1	S
J5-1	0.0	76.1	18.4	5.5	3.6	1.5	0.4	2.7	zS
J5-2	0.0	81.5	14.0	4.5	2.9	1.7	0.3	2.1	zS
J5-3	0.4	76.3	15.2	8.1	2.9	2.5	0.6	2.1	(g)mS
J5-4	0.0	94.1	3.8	2.1	2.1	0.9	0.2	1.6	S
J5-5	2.3	64.5	22.1	11.1	3.3	2.8	0.8	1.2	(g)mS
J6-1	0.0	29.6	57.1	13.3	5.1	2.4	0.4	1.8	sZ
J6-3	0.4	71.5	19.3	8.8	3.2	2.6	0.5	1.5	(g)mS
J6-4	0.0	96.9	1.9	1.2	1.8	0.7	0.0	1.0	S
J6-5	0.0	97.9	1.1	1.0	1.9	0.5	0.2	1.0	S
J7-1	0.1	65.1	29.4	5.4	3.6	1.8	0.2	1.9	(g)mS
J7-2	0.0	62.2	32.0	5.8	3.7	1.8	0.3	1.6	zS
J7-3	0.4	62.2	30.4	7.0	3.5	2.3	0.2	1.5	(g)mS
J7-4	0.4	79.9	15.0	4.7	2.5	1.9	0.6	1.5	(g)mS
J7-5	0.1	67.7	23.5	8.7	3.3	2.4	0.6	1.3	(g)mS
J7-6	0.4	67.0	25.1	7.5	3.4	2.4	0.4	1.4	(g)mS
J8-1	0.0	57.4	35.3	7.3	3.9	2.1	0.3	1.6	zS
J8-2	0.0	61.5	29.8	8.7	3.8	2.3	0.4	1.5	zS
J8-3	0.0	77.1	16.0	6.9	2.8	2.2	0.7	2.5	zS
J8-4	0.0	71.3	19.4	9.3	3.2	2.6	0.6	1.5	zS
J8-5	0.0	78.1	16.6	5.3	3.1	1.8	0.4	1.8	zS

표 2-1-3. 2016년 시화호 연구지역 퇴적상

정점	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	입도 (Mz)	분급도	왜도	침도	Type
시화L1-3	0.0	42.5	53.4	4.1	4.3	1.0	0.4	1.6	sZ
시화L1-4	0.0	82.2	13.6	4.2	3.3	1.1	0.4	1.9	zS
시화L1-5	0.0	80.7	17.8	1.5	3.5	0.7	0.1	1.2	zS
시화L2-1	0.0	56.7	41.3	2.0	4.0	0.5	0.2	1.0	zS
시화L2-2	0.0	83.1	14.6	2.3	3.6	0.5	0.2	1.5	zS
시화L2-3	0.0	86.3	11.6	2.1	3.4	0.6	0.1	1.3	zS
시화L2-4	0.0	87.4	10.3	2.3	3.5	0.6	0.1	1.6	zS
시화L2-5	0.0	82.6	13.1	4.3	3.6	0.9	0.3	2.7	zS
시화L3-1	0.0	64.5	33.5	2.0	4.0	0.5	0.3	1.2	zS
시화L3-2	0.0	21.7	71.4	6.9	4.7	1.5	0.5	2.9	sZ
시화L3-3	0.0	18.2	75.9	5.9	4.7	1.2	0.4	2.3	sZ
시화L3-4	0.0	8.1	81.7	10.2	5.2	1.7	0.5	2.4	Z
시화L3-5	0.0	6.7	82.3	11.0	5.3	1.7	0.6	2.4	Z
시화L4-1	2.5	75.9	20.1	1.5	2.6	1.8	-0.4	0.8	(g)mS
시화L4-2	0.2	70.3	27.9	1.6	3.1	1.4	-0.3	0.8	(g)mS
시화L4-3	0.0	90.1	8.7	1.2	2.5	1.2	0.1	0.8	S
시화L4-4	0.8	83.2	13.6	2.4	3.1	1.0	-0.2	1.2	(g)mS
시화L4-5	0.4	78.6	19.3	1.7	3.2	1.1	-0.2	1.3	(g)mS
1	0.0	66.5	29.4	4.1	4.0	1.0	0.5	2.0	zS
2	0.0	80.9	16.3	2.8	3.6	0.7	0.2	1.6	zS
3	0.0	70.5	25.1	4.4	3.8	1.1	0.4	2.1	zS
4	0.0	90.3	7.6	2.1	3.2	0.6	0.3	1.2	S
5	0.0	82.9	14.2	2.9	3.5	0.7	0.2	1.6	zS
6	0.0	85.5	8.1	6.4	3.4	1.5	0.4	4.0	mS
7	0.0	62.7	34.6	2.7	3.9	0.8	0.1	1.3	zS
8	0.2	73.9	22.3	3.6	3.7	0.8	0.3	1.8	(g)mS
9	0.0	96.1	2.4	1.5	2.7	0.7	0.1	1.1	S
10	0.1	46.1	45.9	7.9	4.5	1.7	0.6	2.1	(g)M
11	0.0	83.5	13.3	3.2	3.4	0.8	0.2	1.4	zS
12	0.0	94.8	3.8	1.4	3.1	0.5	0.1	1.0	S
13	0.0	78.2	18.8	3.0	3.6	0.8	0.2	1.4	zS
14	0.0	89.6	7.9	2.5	3.4	0.6	0.1	1.5	zS
15	0.0	85.5	11.3	3.2	3.4	0.8	0.2	1.5	zS
16	0.0	14.1	79.4	6.5	4.8	1.4	0.4	2.5	sZ
17	0.9	26.3	66.3	6.5	4.6	1.4	0.4	2.3	(g)M

표 2-1-3. 2016년 시화호 연구지역 퇴적상(계속)

정점	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	입도 (Mz)	분급도	왜도	침도	Type
18	0.0	45.8	50.0	4.2	4.2	1.0	0.4	1.6	sZ
19	0.0	12.9	76.8	10.3	5.2	1.7	0.5	2.1	sZ
20	0.0	19.3	75.3	5.4	4.7	1.2	0.4	1.8	sZ
21	0.0	7.3	80.2	12.5	5.5	1.9	0.6	2.3	Z
22	0.0	72.4	22.5	5.1	3.8	1.3	0.4	2.5	zS
23	0.1	58.7	36.7	4.5	3.9	1.2	0.3	1.8	(g)mS
24	0.0	68.8	25.0	6.2	3.6	1.8	0.4	2.3	zS
25	0.1	78.1	17.2	4.6	3.5	1.2	0.4	2.3	(g)mS
26	0.0	76.3	19.1	4.6	3.6	1.2	0.4	2.2	zS
27	0.1	58.2	35.6	6.1	4.0	1.6	0.4	2.2	(g)mS
28	0.0	66.8	20.2	13.0	4.1	1.8	0.7	4.2	mS
29	0.0	65.3	28.3	6.4	4.0	1.5	0.5	2.7	zS
30	0.0	54.4	37.3	8.3	4.2	1.8	0.5	2.4	zS
31	0.0	79.9	16.8	3.3	3.7	0.7	0.4	2.2	zS
32	0.1	68.8	26.7	4.4	3.9	1.0	0.5	2.1	(g)mS
33	0.0	60.6	33.3	6.1	4.1	1.3	0.6	2.4	(g)mS
34	0.0	63.1	31.2	5.7	4.1	1.2	0.6	2.5	zS
35	0.3	42.3	50.0	7.4	4.5	1.6	0.5	2.3	(g)M
36	0.0	39.9	54.9	5.2	4.4	1.1	0.5	1.8	(g)M
37	0.0	26.7	67.2	6.1	4.7	1.3	0.4	1.8	sZ
38	0.0	42.3	49.7	8.0	4.4	1.6	0.6	3.1	sZ
39	0.0	57.1	38.8	4.1	4.1	0.9	0.4	1.7	(g)mS
40	0.2	71.3	24.8	3.7	3.6	1.3	0.1	2.1	(g)mS
41	0.0	51.3	44.5	4.2	4.2	0.9	0.5	1.7	zS
42	0.0	73.1	23.6	3.3	3.9	0.6	0.5	2.2	zS
43	0.0	56.2	38.7	5.1	4.2	1.1	0.6	2.1	zS
44	1.0	30.8	62.2	6.0	4.6	1.5	0.3	1.9	(g)M
45	0.1	42.3	52.6	5.0	4.3	1.1	0.5	1.9	(g)M
46	0.0	48.4	44.7	6.9	4.3	1.4	0.6	2.4	(g)M
47	0.1	26.2	68.3	5.4	4.6	1.2	0.4	1.7	(g)M
48	0.0	25.3	69.9	4.8	4.6	1.1	0.4	1.7	sZ
49	0.0	9.8	79.3	10.9	5.4	1.8	0.5	2.2	Z
50	0.0	35.3	59.2	5.5	4.6	1.3	0.5	1.8	sZ
51	0.0	25.9	67.9	6.2	4.7	1.4	0.4	1.8	sZ
52	0.1	25.8	65.9	8.2	4.7	1.6	0.5	2.3	(g)M

(2) 위협생물과 서식환경 특성 간 상관관계

- 쪽과 바지락의 서식환경은 고도와 퇴적상에 있어 유사한 환경에 서식하는 특성을 보이나, 높은 밀도를 서식환경에 있어서는 서로 다른 특성을 보였다(그림 2-1-6).
- 쪽이 바지락에 비해 높은 고도범위까지 서식하였다.
 - 쪽: -4.0 m ~ 2.0 m 고도범위에 고루 서식하였다.
 - 바지락: -4.0 m ~ -1.0 m 고도범위에 집중하여 서식하였다.
- 쪽이 바지락에 비해 넓은 모래함량 범위에서 서식하였다.
 - 쪽: 40% ~ 100% 모래함량의 퇴적환경에서 서식하였다.
 - 바지락: 70% ~ 90% 모래함량의 퇴적환경에 집중하여 서식하였다.
- 쪽이 바지락에 비해 넓은 평균입도의 퇴적환경에서 높은 밀도로 서식하였다.
 - 쪽: 2.0 ϕ ~ 6.0 ϕ 평균입도를 갖는 퇴적환경에서 서식하였다.
 - 바지락: 2.0 ϕ ~ 4.0 ϕ 평균입도를 갖는 퇴적환경에 집중하여 서식하였다.
- 쪽과 바지락의 퇴적환경의 분급도와는 서로 다른 상관관계를 보였다.
 - 쪽: 높은 분급도를 갖는 퇴적환경에서 집중하여 서식하였다.
 - 바지락: 낮은 분급도를 갖는 퇴적환경에서 집중하여 서식하였다.
- 쪽은 바지락에 비해 다양한 서식환경에서 높은 밀도를 보이며, 서식환경과의 상관관계가 뚜렷하지 않았다.

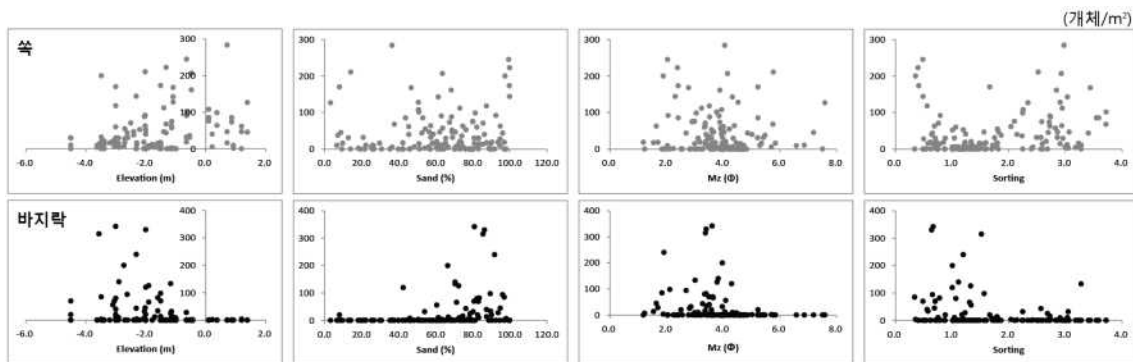


그림 2-1-6. 쪽과 바지락 서식밀도와 환경요인(조고, 퇴적상 체반지수) 간의 상관관계

2. 위협생물 서식 적합도 모델

가. 연구개요

본 연구는 썩과 바지락의 서식 유무, 서식 밀도와 다양한 환경변수들 사이의 관계를 통계 모형으로 만들어 썩과 바지락의 서식 환경에 대해 파악하고 정량화 하는 것을 목적으로 한다. 실제 현장 관측 자료를 이용하여 구축한 통계 모형은 일반적으로 오차범위가 크고, 고도화된 통계기법이 반드시 높은 예측 정확도를 담보하는 것은 아니기 때문에 일반적으로 많이 사용하는 다중 선형 회귀분석이나 범위를 이용한 서식지 모형으로 시작하여 필요에 따라 점진적으로 고도화 할 계획이다. 본 연구에서 구축한 모형은 다양한 환경정보를 입력하면, 썩-바지락의 분류된 서식환경(모형의 결과로 제시)을 예측하는 모형이다.

나. 조사 방법

(1) 다중 선형 회귀 모형(Multiple linear regression model)

(가) 다중 선형 회귀 일반

다중 선형 회귀식은 다음 식과 같이 예측하고자 하는 종속변수(본 연구의 경우, 바지락의 서식 밀도) \hat{Y} 을 i 개의 독립변수(바지락을 제외한 모든 환경변수) X 들의 선형 결합으로 나타내며 다변량 통계모형의 기본적인 형태이다.

$$\hat{Y} = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i$$

일반적으로 다차원 변수들의 선형 조합에서 오차 제곱합을 최소화하는 회귀직선을 찾아 계수를 결정한다.

(나) 모형의 기본 가정

다중 회귀모형에서는 독립변수들 사이의 상관관계, 즉, 다중공선성(multi-collinearity)이 없다는 것을 기본 가정으로 하는데, 강한 다중공선성이 존재하는 경우, 회귀계수의 표준오차가 증가하며, 이는 곧 모형의 정확도 감소를 의미한다. 실제 자료에서는 이 가정을 충족하는 경우가 흔치 않기 때문에 분산팽창지수(VIF, variance inflation factor)를 점검하여 모형에 변수사용을 고려해야한다. 분산팽창지수는 아래 식과 같이 계산한다. 첨자 i 는 i 번째 변수에 대한 값을 의미하며, R_i^2 는 결정계수(coefficient of determination)이다.

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2}$$

각 변수에 대한 분산팽창지수는 10을 넘어가게 되면 최소제곱법을 이용해 추정된 선형 관계식에 큰 영향을 주기 때문에 일반적으로 $VIF \leq 10$ 을 기준으로 변수를 제거하거나 다중공선성에 둔감한 모델을 사용한다.(J. Neter et. al., 1983)

(2) 환경인자의 범위를 이용한 판별 모형 (Environmental range-based model)

(1)에서 언급한 다중공선성 문제로 인해 다중 회귀 모형의 직접적인 적용이 문제가 되기 때문에 쪽과 바지락의 출현 유무에 따라 표 2.1.2-1과 같이 네 가지 유형으로 분류하는 판별 모형을 적용하였고, 그 순서는 다음과 같다. 문자정보로 제시되는 갯벌영역 구분과 퇴적토사 유형 정보는 초기 모형 구성단계에서는 제외하였다.

(가) 표. 2-1-4와 같이 쪽과 바지락을 기준으로 서식 유형을 분류한다.

표 2-1-4. 쪽과 바지락의 출현 유무에 따른 분류

Habitat Type	바지락 (<i>Rupitapes philippinarum</i>)	쪽 (<i>Upogebia major</i>)
1	X	O
2	O	O
3	X	X
4	O	X

(나) 표 2-1-4를 기준으로 분류한 유형 번호를 관측한 환경자료에도 똑같이 부여하여 각 유형에 따른 환경인자 값의 범위(최솟값-최댓값)를 추출한다.

(다) 해당 유형에 따른 범위를 정한 뒤에는 유형 1-4의 범위에 변수의 값이 포함되는지 판단하여 다음과 같이 나열한다. 변수가 각 유형의 범위에 포함되면 유형 번호를, 포함되지 않으면 0을 반환하도록 하였다. 환경변수는 중복이 가능하기 때문에 모든 서식 유형을 포함할 수 있으며, 관측된 환경인자를 이용하였기 때문에 적어도 하나의 서식 유형에는 포함된다. 그러나 새로운 환경인자 정보를 이용하여 서식 유형을 예측하는 경우에는 기존의 분류된 모든 서식 유형의 환경인자 범위를 벗어날 수도 있기 때문에 서식 환경인자에 가장 근접한 서식유형으로 판단하게 하는 등의 기술적인 처리가 요구된다.

아래 표 2-1-5의 경우, 변수 X_1 의 첫 번째 관측(1행)은 유형 2와 4의 범위에는 포함되고, 유형 1과 3의 범위는 벗어난다.

표 2-1-5. 변수 X_i 의 서식지 정보 행렬예시

관측 번호	X_1	X_2	...	X_{i-1}	X_i
1	0,2,0,4	1,2,0,0	...	1,2,3,4	1,2,3,0
2	0,0,0,4	0,0,3,4	...	1,0,3,4	1,2,3,4
3	0,2,0,4	1,2,0,0	...	1,2,3,4	1,2,3,4
			⋮		
206	1,0,3,0	1,2,0,0	...	1,2,3,4	1,0,3,0

(라) (다)의 표 2-5에서 각 행의 유형 교집합을 추출하여 아래 표와 같이 쪽과 바지락을 기준으로 분류한 유형과 비교한다. 아래 표 2.1.2-3에서 첫 번째 관측은 기존에 쪽과 바지락의 출현 유무로 분류한 유형과 비교했을 때, 서식 유형 1, 2, 3 모두에 해당하기 때문에 각각 1/3 확률로 약 33%정도의 판별 정확도를 가진다. 반면, 마지막 관측의 경우, 서식 유형 1, 3에 해당하기 때문에 50%의 정확도를 가진다고 할 수 있다. 가장 바람직한 결과는 주어진 환경정보로부터 단 하나의 서식 유형을 제시하는 경우이나, 각각의 서식 유형의 환경인자 정보가 어느 정도 중복되어 있기 때문에 다수의 유형으로 예측하는 것이 본 모형의 판별 한계라고 할 수 있다.

표 2-1-6. 생물

관측번호	생물 서식기반 분류	환경인자 범위 기반 분류
1	2	1,2,3,0
2	4	1,0,3,4
3	2	1,2,3,4
		⋮
206	1	1,0,3,0

다. 조사 결과

(1) 다중 선형 회귀 모형(Multiple linear regression model)

(가) 관측 항목의 분산팽창지수

관측 자료의 다중 선형 회귀식을 계산하기 위해 기본가정인 분산팽창지수를 점검해 본 결과 아래 표 2-7과 같이 10을 크게 웃도는 값들을 확인할 수 있었다. 앞서 설명한 바와 같이 이 값으로 모형을 구성하여 결정계수가 높게 나온다고 해도 각각 계수들의 추정 오차범위가 너무 크기 때문에 신뢰할 수 없는 모형이 된다. 따라서 $VIF \leq 10$ 조건을 만족할 때까지 가장 큰 분산팽창지수를 보이는 변수들을 반복적으로 제거해서 표

2-8과 같은 결과를 얻었고 선택된 변수를 이용하여 다중 선형 회귀 모형을 구성하였다. 환경인자 변수들의 다중 공선성문제는 다중 회귀분석에서 반드시 검토되어야 하는 매우 중요한 문제이지만, 명확한 제거기준은 제시되어 있지 않기 때문에 기존의 쪽-바지락에 관한 연구성과 및 환경인자의 상관관계 성과 등을 활용하는 모형 구축 연구 등이 수행되어야 한다.

표 2-1-7. 문자정보 항목(갯벌영역, 퇴적토사 유형)을 제외한 수치형 자료에 대한 분산팽창지수 계산결과

관측 생물-환경인자 항목	분산팽창지수(VIF)
쪽(individual/m ²)	1.15.E+00
고도(m)	9.24.E+01
최대연속 노출시간(hour)	9.86.E+00
최소연속 노출시간(hour)	3.07.E+00
평균연속 노출시간(hour)	9.13.E+00
총 노출시간(hour)	8.22.E+07
총 노출시간(%)	8.22.E+07
GRAVEL(%)	2.84.E+05
SAND(%)	4.99.E+06
SILT(%)	2.39.E+06
CLAY(%)	7.87.E+05
MEAN(Mz)	1.99.E+01
SORTING	2.74.E+00
SKEWNESS	1.54.E+00
KURTOSIS	2.00.E+00

표 2-1-8. 다중공선성을 보이는 항목을 제외한 뒤의 분산팽창지수 계산결과

관측 생물-환경인자 항목	분산팽창지수(VIF)
쪽(individual/m ²)	1.11
최대연속 노출시간(hour)	9.33
최소연속 노출시간(hour)	3.01
평균연속 노출시간(hour)	8.86
총 노출시간(hour)	2.25
GRAVEL(%)	1.50
SILT(%)	2.32
CLAY(%)	3.95
SORTING(-)	2.68
SKEWNESS(-)	1.50
KURTOSIS(-)	1.77

(나) 자료의 다중 선형 회귀 모형 적합 결과

(1)-(가)에서 언급한 과정을 통해 높은 상관관계를 보이는 독립변수들을 제외하고 바지락의 개체수를 종속변수로 하는 다중 선형 회귀 모형을 구성한 결과 결정계수(R^2)는

0.46 정도로 자료의 분산을 어느 정도 설명하는 것처럼 보였으나, 상당수의 회귀계수가 유의성이 없는 것으로 나타났다. 모형의 오차는 *RMSE*(Root Mean Squared Error)기준 383.43으로 매우 컸다. 이는 모형의 구성에 사용한 자료 중 다른 다수의 자료와는 달리 개체 밀도 변동 범위가 매우 크게 나타나는 자료의 영향에 의한 현상으로 보인다. 또한 구성된 모형을 이용하는 경우, 반드시 영(zero) 또는 양수로만 예측되어야 하는 바지락 개체밀도가 작은 수치이지만 음수로 예측되는 경우가 발생한다. 따라서 바지락의 개체밀도를 표현해야 하는 모형으로는 적절하지 않았으며, 수학적인 최적 매개변수 추정에만 의존하지 않고 실질적인 제약조건이 부여되는 모형 구성이 요구된다. 한편, 예측에 사용되지 않은 자료를 이용하여 수행한 모델 검증에서도 예측성능이 현저하게 떨어져서 바지락의 개체밀도(단위면적당 개체 수)를 예측하는 모형으로는 부적절한 것으로 판단되었다.

(2) 환경인자의 범위를 이용한 판별 모형 (Environmental range-based model)

(가) 총 216개 지점의 관측 자료를 이용한 쪽-바지락의 서식 유형 1-4의 구분 결과, 자료 수의 비율은 각각 84(38.9%), 16(7.4%), 72(33.3%), 44(20.4%)으로 나타났고, 특히 바지락과 쪽이 공존하는 경우는 전체 조사 자료의 약 7.4%로 매우 드문 것으로 파악되었다. 이를 토대로 쪽과 바지락의 서식 유무에 따라 유형을 구분하고 서식지 환경 정보를 동일한 조건으로 분류하였다(그림 2-1-7). 쪽과 바지락의 개체밀도의 변동범위는 매우 크기 때문에 대수함수를 이용하여 개체밀도를 표현하였으며, 영(zero) 개체밀도는 0.1 수치로 대체하여 대수함수($\log_{10}(0) = -\infty \rightarrow \log_{10}(0.1) = -1$)를 적용하였다.

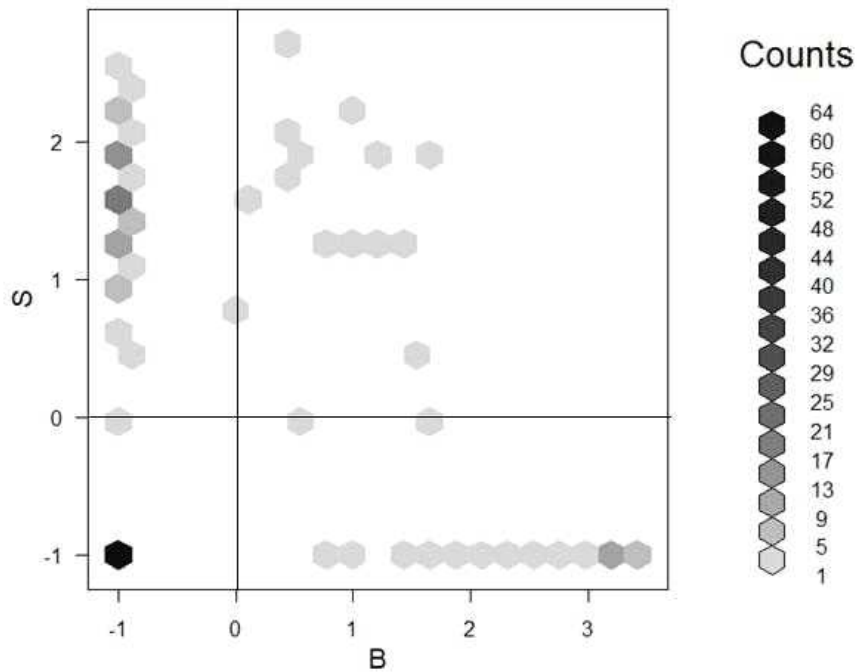


그림 2-1-7. Classification of the habitat type

서식지 분류 모형을 “나. 조사방법”에서 언급한 과정을 거쳐 검토한 결과 약 52.3%의 서식 유형 예측 성능을 보였다. 이 수치는 사전 정보가 전혀 없이 서식 유형을 무작위로 예측하는 경우, 평균 25% 수준임을 감안하면 대략 2배 이상의 예측성능에 해당한다. 그러나 모형을 이용한 예측수준은 단순한 산술적인 축척에 따른 평가는 100% 완벽한 예측이 경계로 작용하기 때문에 곤란하다. 100% 예측수준으로 접근할수록 예측수준 향상은 보다 동일한 5% 수준이라고 할지라도 25% -> 30% 개선과 50% -> 55%, 75% -> 80% 개선은 그 개선 효과의 평가에 차이를 부여할 필요가 있다. 서식지의 분류 과정에서 기초적이고 단순한 개념에 근거한 현재 모형에서는 환경인자의 범위를 Uniform 분포라고 가정하였으나 다음 단계에서는 자료기반 확률분포함수를 도입하여 최우도법으로 서식환경 유형을 추정하는 모형으로 발전시킬 필요가 있다.

표 2-1-9. 관측 생물-환경인자 항목의 유형별 범위(1-4는 유형 번호를 나타냄)

관측 생물-환경인자 항목	1.min	1.max	2.min	2.max	3.min	3.max	4.min	4.max
썩(individual/ m^2)	0	0	0	0	1	284	1	527
고도(m)	-3.4	4.0	-3.5	-0.2	-3.6	1.8	-3.5	1.2
최대연속노출시간(hour)	2.2	633.2	1.7	8	1.5	74.5	1.8	73.5
최소연속노출시간(hour)	0.2	10	0.2	0.8	0.2	4	0.2	3.3
평균연속노출시간(hour)	1.2	93.7	1.0	5.7	0.9	9.9	1.1	8.4
총노출시간(hour)	59.7	8623.7	5.2	4036.5	14.3	6417.8	36.3	5788.7
총노출시간(%)	0.7	98.4	0.1	46.1	0.2	73.3	0.4	66.1
GRAVEL(%)	0	32.5	0	22.5	0	68.6	0	2.5
SAND(%)	0.7	95.2	20.9	98.0	3.3	99.9	24.4	97.4
SILT(%)	0.4	75.6	0.2	65.0	0.0	69.3	2.3	56.7
CLAY(%)	2.1	64.7	0.3	24.9	0.0	40.1	0.3	19.3
MEAN(Mz)	0.8	8.9	1.2	6.1	-0.8	7.6	1.5	5.9
SORTING(-)	0.8	5.4	0.3	3.6	0.4	3.7	0.4	3.1
SKEWNESS(-)	-0.3	0.8	-0.7	2.3	-0.3	0.9	0	0.7
KURTOSIS(-)	0.5	4.0	0.8	8.8	0.5	3.8	1.0	2.8

표 2-1-10. 환경인자 범위행렬정보를 이용한 썩과 바지락 서식환경유형 추정 결과 (중략)

	썩	고도	최대연속 노출시간		sorting	skewness	kurtosis
1	0,2,0,4	1,2,0,0	1,2,3,4	...	1,2,3,0	1,2,3,0	1,2,3,4
2	0,0,0,4	0,0,3,4	1,0,3,4		1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
3	0,2,0,4	1,2,0,0	1,2,3,4		1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
4	0,2,0,0	1,2,0,0	1,2,3,4		1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
5	0,2,0,4	1,2,0,0	1,2,3,4		1,2,3,0	1,2,3,4	1,2,3,0
6	0,2,0,0	1,2,0,0	1,2,3,4		1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,0
7	0,2,0,0	1,2,0,0	1,2,3,4		1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
8	0,2,0,0	1,2,0,0	1,2,3,4		1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,0
9	0,2,0,0	1,2,0,0	0,2,3,4		1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
10	0,2,0,4	1,2,0,0	1,2,3,4		1,2,3,4	1,2,3,4	0,2,0,0
	∴				∴		
206	1,0,3,0	1,2,0,0	1,2,3,4		1,2,3,0	1,2,3,4	1,0,3,0

표 2-1-11. 생물기반 분류 유형과 환경인자의 범위로 분류한 유형의 비교 결과(중략)

관측번호	생물 서식기반 분류	환경인자 범위 기반 분류
1	2	1,2,3,0
2	4	1,0,3,4
3	2	1,2,3,4
4	2	1,2,3,4
5	2	1,2,3,0
6	2	1,2,3,0
7	2	1,2,3,4
8	2	1,2,3,0
9	2	0,2,0,0
10	2	0,2,0,0
	⋮	
206	1	1,0,3,0

제 2 절 조하대 위협생물 발생 요인 분석

1. 해조류

가. 연구개요

최근 우리나라 연안의 암반생태계는 무절석회조류가 번성하는 갯녹음 현상이 확대되어 해조군락이 소멸되는 바다의 사막화가 급속히 진행되고 있어 사회·경제적 문제로 제기되고 있다. 이에 갯녹음 발생과 지속 원인을 파악하고 이를 통한 위협생물 제어 기술개발의 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 위협생물 발생요인을 분석하기 위해 수온 및 pCO₂에 따른 석회조류 및 엽상형 해조류의 광합성 및 엽록소의 변화를 분석하였다.

나. 조사 방법.

(1) 수온에 따른 석회조류 및 엽상형 해조류의 광합성변화

(가) 대상종

본 연구의 실험생물은 엽상형 해조류인 구멍갈파래(*Ulva pertusa*)와 진두발(*Chondrus ocellatus*)과 석회조류 작은구슬산호말(*Corallina pilulifera*)을 대상으로 수행하였다. 실험생물은 2016년 9월에 충남 태안군 소면원 파도리 인근 조간대에서 채집하였고, 아이스박스에 담아 실험실로 운반하였다. 모든 생물은 실험에 사용하기 전에 600ℓ 크기의 실내수조에 분리수용한 후, 실험조건에 순치시켰다.

(나) 실험장치

실험에 사용된 자동호흡측정기(Automatic Intermittent-Flow Respirometer)는 수온조절이 가능한 순환여과식으로 저수탱크(reservoir), 공급탱크(head tank), 카트리리지 필터(cartridge filter), 자외선 살균기(UV lamp), 호흡실(respiration chamber), 측정실(DO sensor), 그리고 산소 연속측정 장치인 Multi Data Logger로 구성된 일종의 토털시스템이었다(그림 2-2-1). 또한 이 시스템에서는 현실성 있는 실험결과의 획득 및 장기 실험에 따른 시스템의 자가오염 방지를 위해 기존의 자동호흡측정기보다 그 규모를 훨씬 더 크게 하였다. 마찬가지로 저수탱크와 공급탱크 사이에 카트리리지 필터 2개를 설치함으로써 순환되는 물을 여과할 수 있게 하였고, 또 시스템 내에 미생물에 의한 산소소비를 최소화하기 위해 유수식 자외선살균기(Model: P301, 처리용량 3ton/hr, 삼지통상)를 설치하였다.

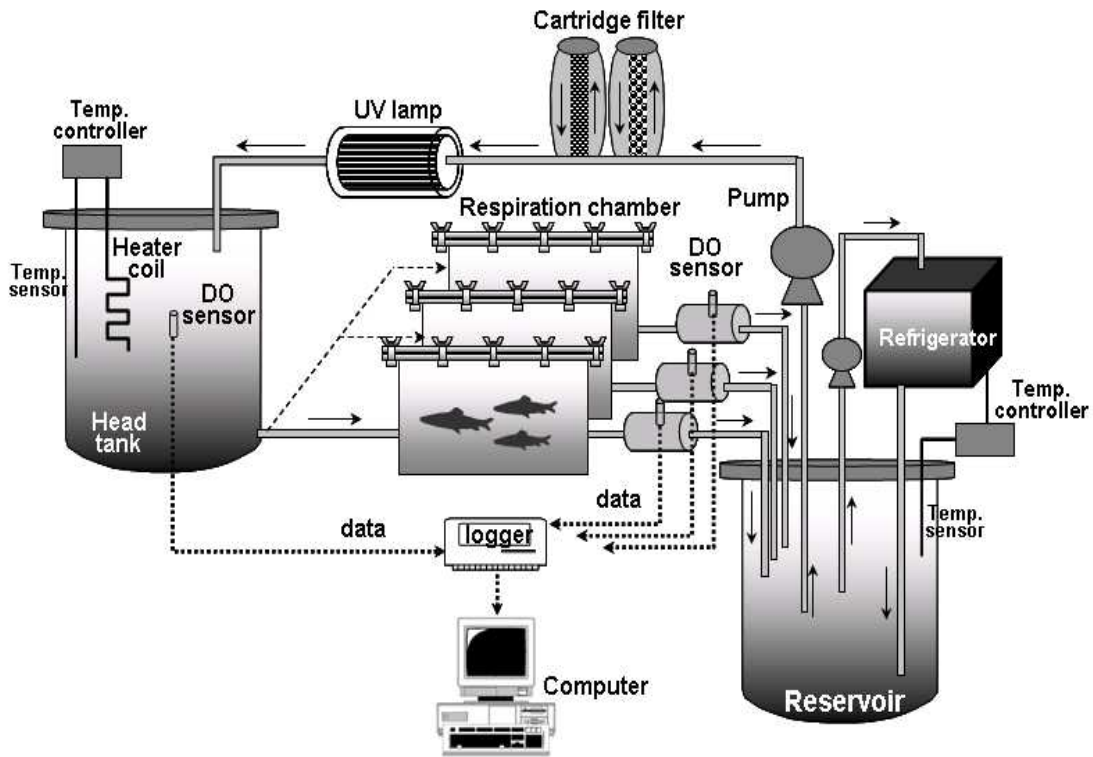


그림 2-2-1. 본 실험에 적용된 자동호흡측정기 모식도

이 시스템에 있어 시스템의 구동은 일차적으로 순환펌프에서 시작되도록 하였다. 즉, 저수탱크와 공급탱크 사이에 설치된 순환펌프(녹슬지 않은 마그네틱 펌프, NH-250PS, 80 ℓ/min, Pan World CO., LTD))로 저수탱크(700 ℓ)의 물을 공급탱크(저수탱크와 동일 용량)로 양수시키고, 이 물이 낙차에 의해 호흡실을 거친 후, 다시 저수탱크로 흐르도록 하였다. 시스템의 수온은 일차적으로 저수탱크에 든 물의 온도를 조절하고, 이 물이 상기의 흐름을 따라 흐르도록 함으로써 조절하였다. 저수탱크의 수온은 저수탱크 내측에 설치된 히터(용량 2kW)와 저수탱크와 연결된 냉각기(DA-100B, 1마력, 대일냉각기(주))의 동작을 자동온도조절기(NX-9, 한영기전(주))가 통제하는 방식으로 조절하였다. 실시간 수온변화는 이 자동온도조절기에 내장된 전송포트를 컴퓨터에 연결하여 기록하였다. 냉각기와 저수탱크의 연결은 저수탱크 바닥에 설치된 수중펌프(90w, 협신)가 관을 통해 냉각기로 물을 주입하고, 이 물이 다시 저수탱크로 유입되는 방식으로 이루어졌다. 호흡실은 두께가 10mm의 투명 아크릴로 제작되었다. 내경기준으로 가로, 세로, 높이가 각 40cm인 정육면체 형태로 제작하였으며, 호흡실의 윗부분은 공기가 새어 들어가거나 누수를 막기 위해 고무 밴드를 삽입한 후 뚜껑을 덮어 밀봉하였다. 물은 공급탱크와 연결된 직경 16 mm 관을 통해 호흡실로 들어가도록 하였고, 관의 끝은 호흡실 바닥으로부터 2cm 정도 위에 위치시킴으로서, 유입되는 물이 호흡실 상부가 아닌 하부로 들어가게 하였다. 이때 실험의 정밀도를 높이기 위해 유입되는 물의 양을 유량계(Korea flow, 최

대 3 l/min)로 일정하게 조절할 수 있도록 하였다. 하부로 유입된 물은 호흡실 뚜껑에 뚫린 구멍과 연결된 16mm 관을 통해 상부로 유출되도록 하였고, 이 관을 통한 물은 다시 측정실(원통 투명 아크릴, 두께 8mm, 직경 8cm, 길이 20cm)로 흐르도록 하였다. 측정실의 한 끝 면에는 산소 probe를 집어넣어 호흡실을 거쳐 나오는 물의 용존산소량을 측정하였다. 이때 산소 probe 연결 부위에 누수 및 공기가 새어 들어가는 것을 방지하기 위해 고무링을 밀착시켜 밀봉하였다. 또한 측정실의 측면에는 한 개의 구멍을 뚫어 16mm 관을 통해 물이 흘러나와 저수탱크로 흐르도록 하였다. 측정실에서의 용존산소는 형광용존산소측정기(MPA-48 Multi-Parameter Analyzer, Insite IG, USA)로 측정하였으며, 측정된 값은 컴퓨터와 연결된 GigaLog E Data Logger system을 이용하여 저장하였다. 배양광도 및 광주기는 80 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, 12L:12D 이었다(그림 2-2-2).

(다) 실험방법

실험은 반복구가 있는 일요인 디자인(Single-factor design with replicates)으로 수행하였다. 여기서 요인(Factor)은 수온이었고, Level은 변화시키고자 하는 수온의 수였다. 즉, 초기 수온인 10°C로 조절된 자동호흡측정기에 부착된 4개의 호흡실 중 3개에 순치된 구멍갈파래, 참도박, 그리고 작은구슬산호말을 각각 수용한 후(나머지 1개는 Blank로 둬), 1일간 더 순치시켰다. 그런 다음 매 24시간 마다 수온을 5°C씩 상승시켜 30°C까지 산소변화량을 측정하였다. 산소변화량은 수온을 증가시킨 1시간 동안 양수되는 물이 유량계를 거쳐 사육수조로 유입되도록 하여 1시간 동안 10초 간격으로 측정하였고, 유량은 여러 종류의 실험에서 얻은 경험치를 기준하여 분당 2 l로 진행하였다. 나머지 23시간은 양수된 물이 사육수조로 직접 흐르도록 하여 수온에 대한 스트레스를 충분히 받도록 하였다. 따라서 수온의 level은 5개였으며, 수온 별 반복구는 360개였다.

광합성력은 $P_n = (T - C) \cdot Q / W$ 식으로 계산하였다. 여기서 C는 Blank (Control)에서 매 10초 단위로 측정된 용존산소량(mg/L), T는 각 호흡실 (Treatment)에서 매 10초 단위로 측정된 용존산소량(mg/L), Q는 1시간동안 호흡실로 들어간 물의 양, 그리고 W는 실험생물의 중량(kg-wet wt.)이었고, 광합성 모델은 $P_g = P_{gmax} * (1 - \exp(-I/I_k))$, Webb et al. (1974)을 적용하였다.

실험생물의 수온에 따른 광합성력의 차이를 알기위해 One-way ANOVA를 실시하였다. 이때 분산분석에 앞서 Levene's test를 통해 분산의 동질성(homogeneity)을 검정하였다. 분산분석의 결과 유의한 차이가 있을 경우에는 Turkey multiple comparison test를 실시하였다. 통계처리는 SigmaPlot (SPSS Inc., USA), MINITAB release 13 (Minitab Inc., USA) 그리고 SYSTAT v.10 (SPSS Inc., USA) software를 이용하였다.



그림 2-2-2. 수온에 따른 석회조류 및 엽상형 해조류의 광합성변화

(2) pCO₂ 농도에 따른 석회조류 및 엽상형 해조류의 광합성 및 Chlorophyll a 비교

(가) 대상종

실험생물은 앞서 수온에 따른 해조류의 광합성변화에서 순치된 시료를 대상으로 실시하였다.

(나) 실험장치

실험에 사용된 장치는 저수조, 실험수조, 그리고 빛조절장치로 구성되었다(그림 2-2-3). 실험수조의 수온은 저수조에 설치된 히터(용량 2kW)와 저수조 외측에 연결된 냉각기(DA-100B, 1마력, 대일냉각기(주))의 동작을 자동온도조절기(DX-9, 한영기전(주))가 통제하는 방식으로 조절하였다. 냉각기와 저수탱크의 연결은 저수조 바닥에 설치된 수중펌프(90W)가 관을 통해 냉각기로 물을 주입하고, 이 물이 다시 저수탱크로 유입되는 방식으로 이루어졌다. 빛 조절장치는 해조류 배양에 쓰이는 일반적 장치로 본 실험에서는 자연광과 가장 유사한 파장(Spectrum)을 내는 HQI lamp(250W, Osram)를 사용하였고, 이 lamp의 좌우상하 위치를 달리하여 빛의 세기를 조절하였다. 빛의 세기는 LI COR-1400 (LI-COR, USA) 광량계를 이용하여 측정하였다. 하루 중 빛의 조사시간은 사용 타이머를 사용하였다.

(다) 실험방법

실험은 2×3 Multifactor analysis 체계로 실시되었다. Factor 1은 수온으로 2단계(20, 25℃)였고, factor 2는 pCO₂ 농도로 3단계(400, 700, 1000 ppm)였다. 배양광도는 150 μE/m²/s이었으며, 실험 시 배양시간은 1시간이었다. 산소량의 변화는 $P_n = (\text{final } [O_2] - \text{initial } [O_2])/DWT$ 의 식으로 추정하였고, 광합성 모델은 $P_g = P_{gmax} * (1 - \exp(-I/I_k))$, Webb et al. (1974)을 적용하였다. Chlorophyll a는 다음과 같이 분석하였다. 분석할 시료를 90% 아세톤이 든 20ml vial에 넣어 발색시킨 후 UV-1650 PC spectrophotometer (Shimadzu, Japan)를 이용하여 Chlorophyll a의 양을 측정하였다(그림 2-2-4). Chlorophyll a의 양을 측정한 후에는 시료를 다시 들어내어 60℃에서 48시간 건조시킨 뒤 건중량을 측정하였다. Chlorophyll a의 양은 $\text{Chlorophyll a} = 11.47 A_{664} - 0.46 A_{630}$ 의 식으로 구하였고, 구해진 값을 다시 중량으로 나누어 μM chl · mgdw⁻¹로 나타내었다. 수온 및 pCO₂ 농도 간 유의성분석은 2-way ANOVA without replication을 통해 실시하였다.



그림 2-2-3. P-I 특성분석 과정



그림 2-2-4. Chlorophyll a 측정과정

다. 조사 결과

(1) 수온에 따른 석회조류 및 엽상형 해조류의 광합성변화

구멍갈파래의 최대광합성량(P_{gmax})은 17.6~27.5의 범위를 보였고, 20℃에서 가장 높은 값을 나타내었다. 진두발의 최대광합성량(P_{gmax})은 3.7~13.1의 범위였으며, 작은구슬산호말은 1.0~3.9의 범위를 나타내었다. 3종의 해조류 모두 20℃까지는 수온이 올라갈수록 광합성력이 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보였다(그림 2-2-5~7). 이는 엽상형해조류인 구멍갈파래, 진두발과 석회조류인 작은구슬산호말의 경우 수온 변화에 따른 최대광합성량의 차이는 없음을 나타낸다.

실험대상 해조류의 수온별 1시간 동안 10초 단위로 측정된 광합성력과 평균광합성력을 나타낸 것은 그림 2-2-8~13와 같다. 구멍갈파래의 경우 주어진 수온조건에

서 광합성력은 553.1~660.4 mg O₂ kg⁻¹ hr⁻¹으로 나타났다. 한편, 수온별 광합성력에 대한 분산분석결과, 광합성력은 수온별로 유의한 차이가 있었다(P<0.001, 표 2-2-1). 다중비교의 경우, 10>15<20<25>30 °C의 관계로 유의한 차이를 보였다. 수온별 1시간 동안 10초 간격으로 측정된 진두밭의 광합성력은 114.6~210.7 mg O₂ kg⁻¹ hr⁻¹의 범위를 보였고, 수온 10°C에서 15°C까지는 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 분산분석결과, 광합성력은 수온별로 유의한 차이가 있었고(P<0.001, 표 2-2-1), 다중비교의 경우 10<15>20>25>30°C의 관계로 유의한 차이를 보였다. 작은 구슬산호말의 경우 수온별 광합성력은 280.8~384.3 mg O₂ kg⁻¹ hr⁻¹으로 나타났고, 수온이 증가할수록 광합성력도 증가하는 경향을 보였다. 분산분석결과, 광합성력은 수온별로 유의한 차이가 있었고(P<0.001, 표 2-2-1), 다중비교의 경우 10<15=20<25=30°C의 관계로 유의한 차이를 보였다. 이상의 결과에서 엽상형 해조류인 구멍갈파래와 진두밭은 수온변화에 따른 광합성력의 차이는 크게 나타나지 않거나, 감소하는 경향을 보인 반면, 석회조류인 작은구슬산호말은 수온이 증가할수록 광합성력이 증가함을 나타낸다.

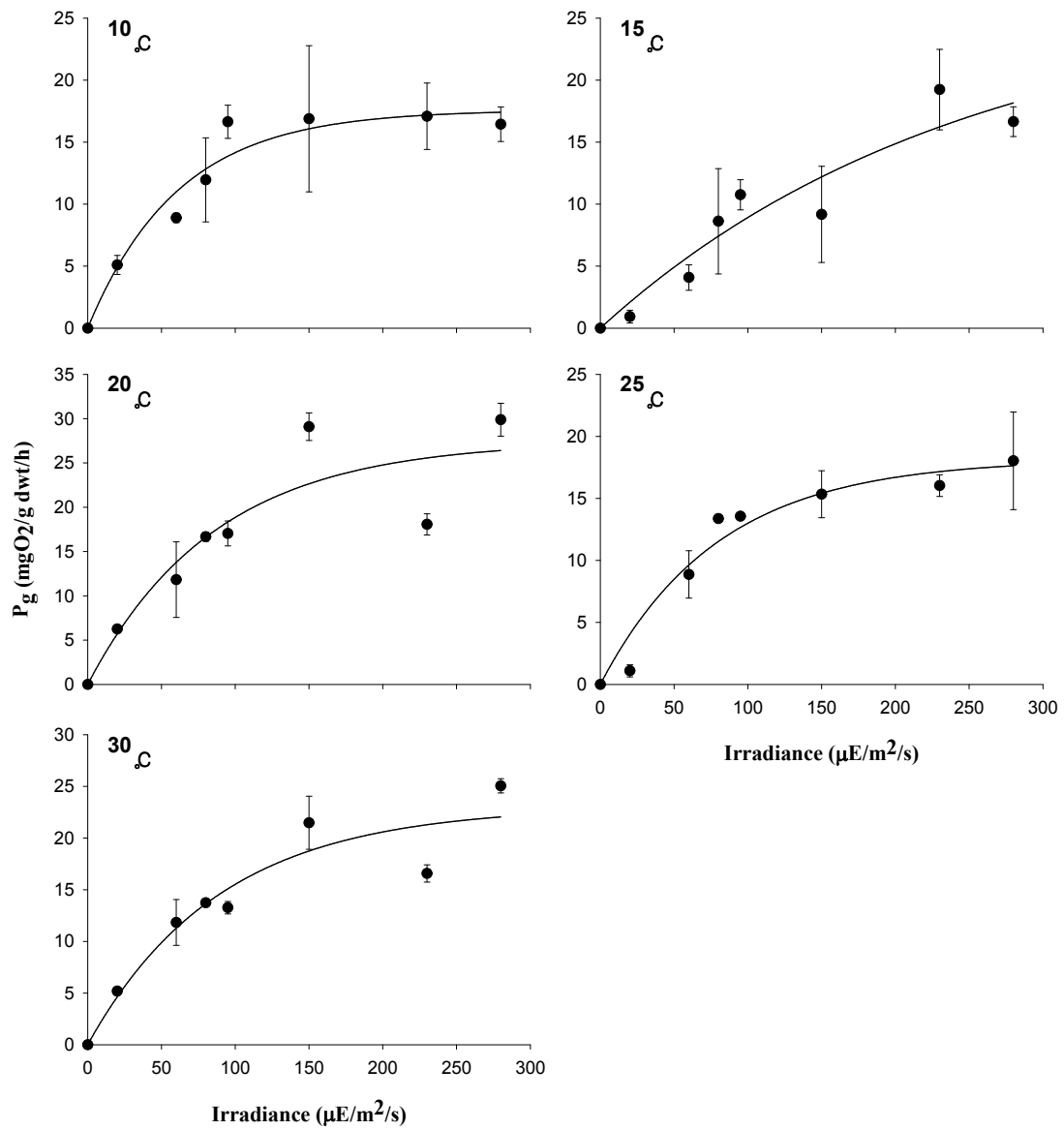


그림 2-2-5. 구멍갈파래의 수온별 P-I curve

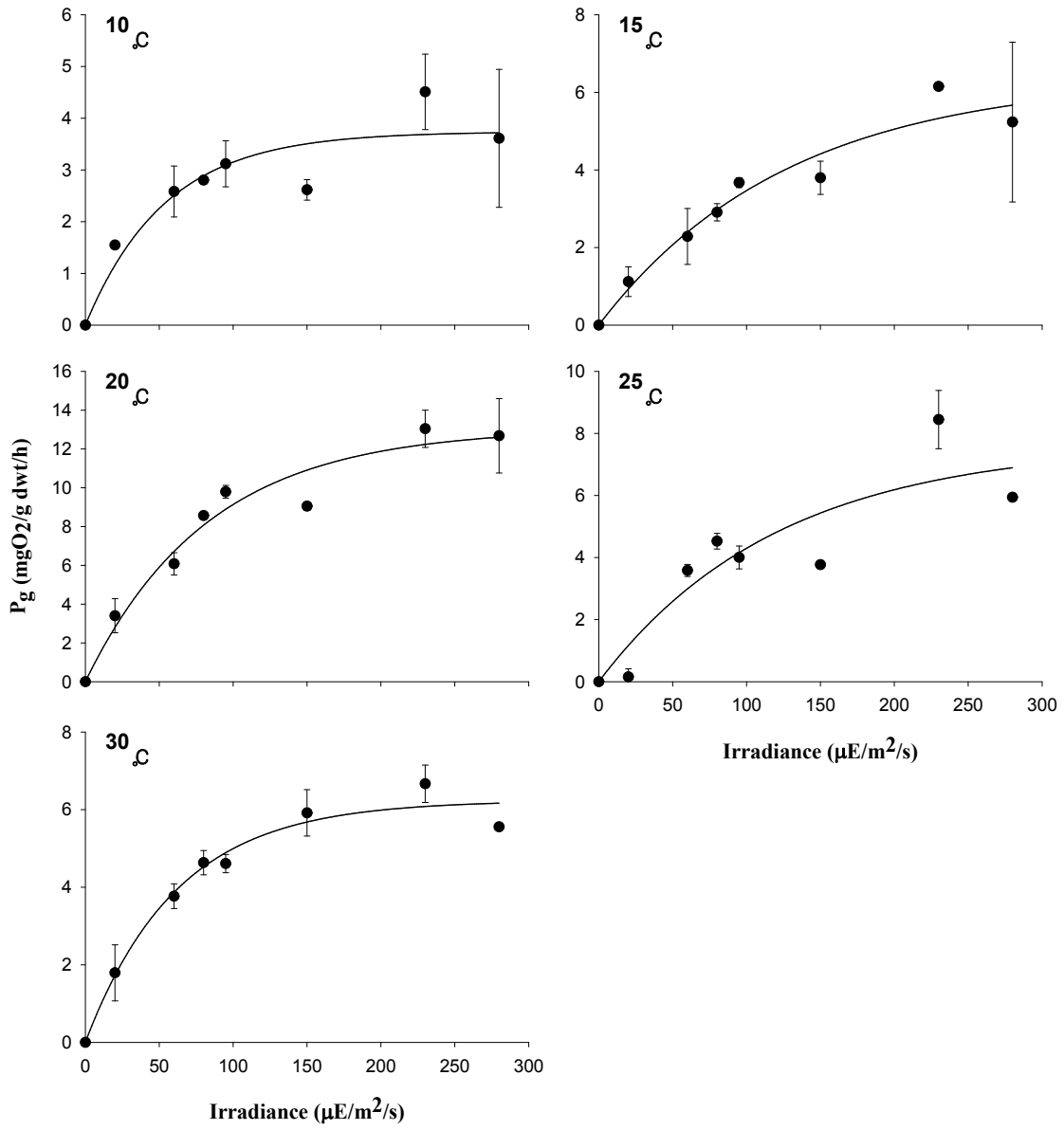


그림 2-2-6. 진두발의 수온별 P-I curve

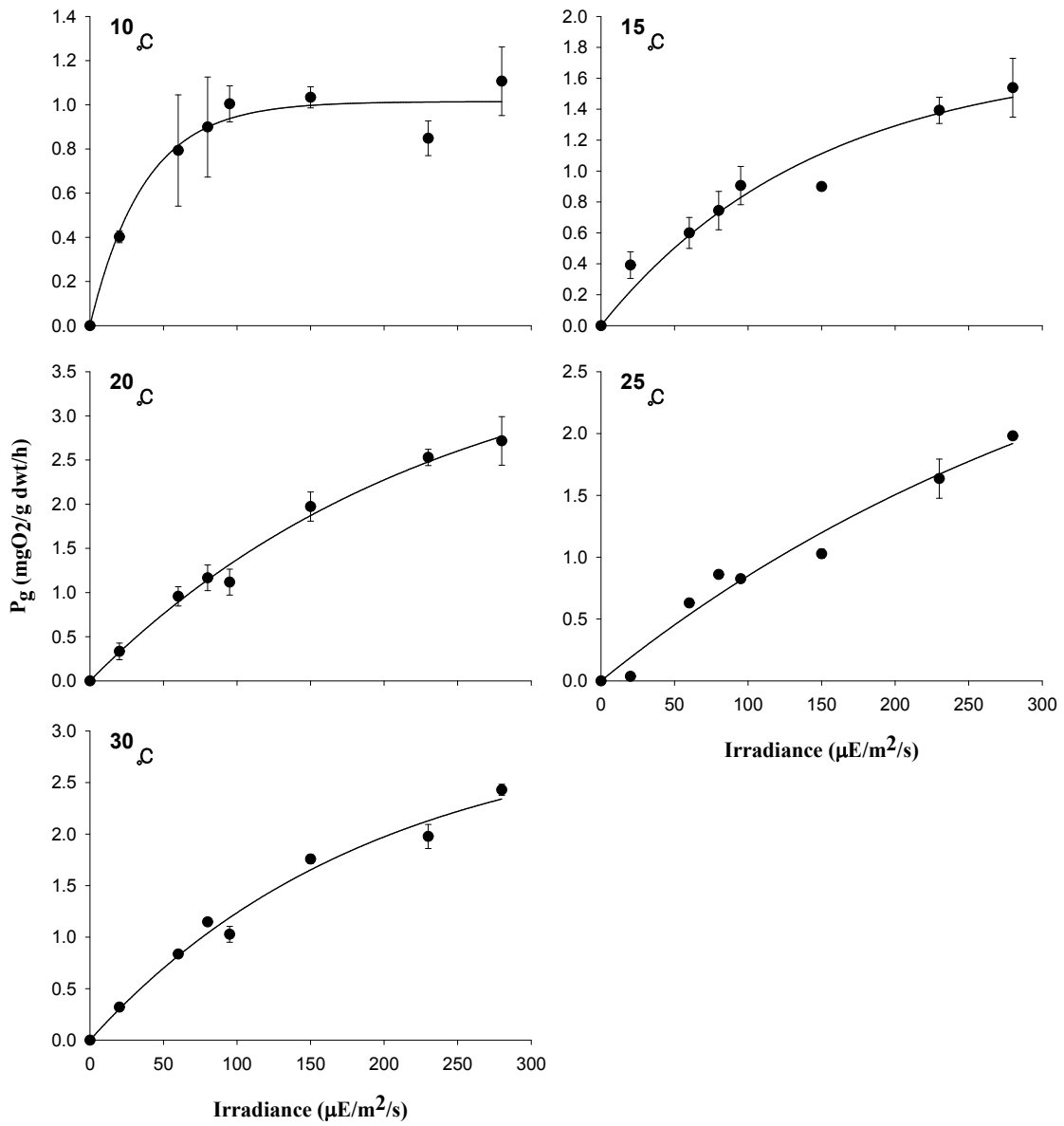


그림 2-2-7. 작은구슬산호말의 수온별 P-I curve

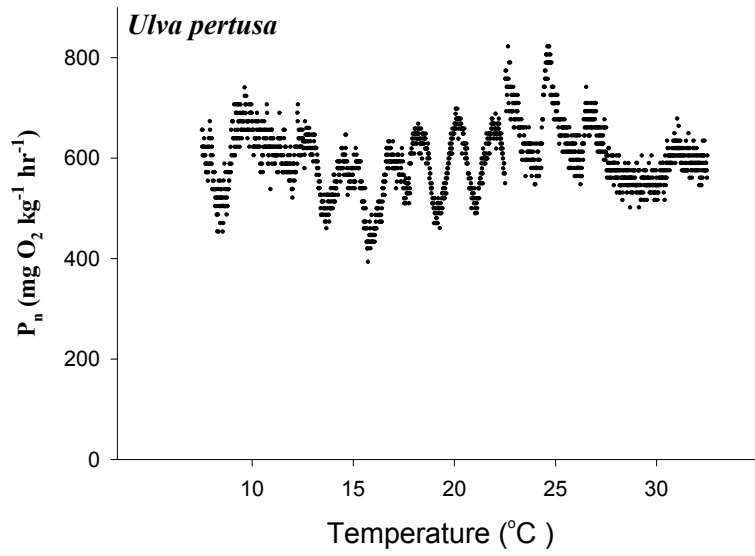


그림 2-2-8. 수온별 1시간 동안 10초 단위로 측정된 구멍갈파래의 광합성력

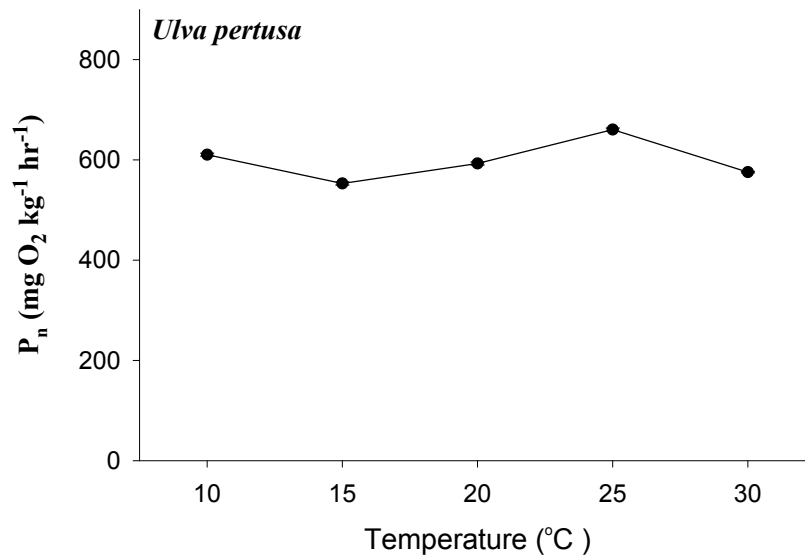


그림 2-2-9. 수온별 구멍갈파래의 평균광합성력

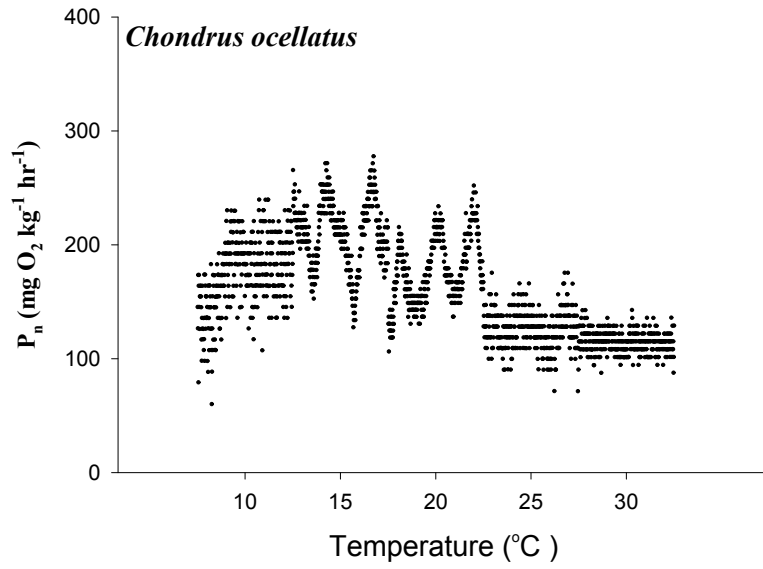


그림 2-2-10. 수온별 1시간 동안 10초 단위로 측정된 진두발의 광합성력

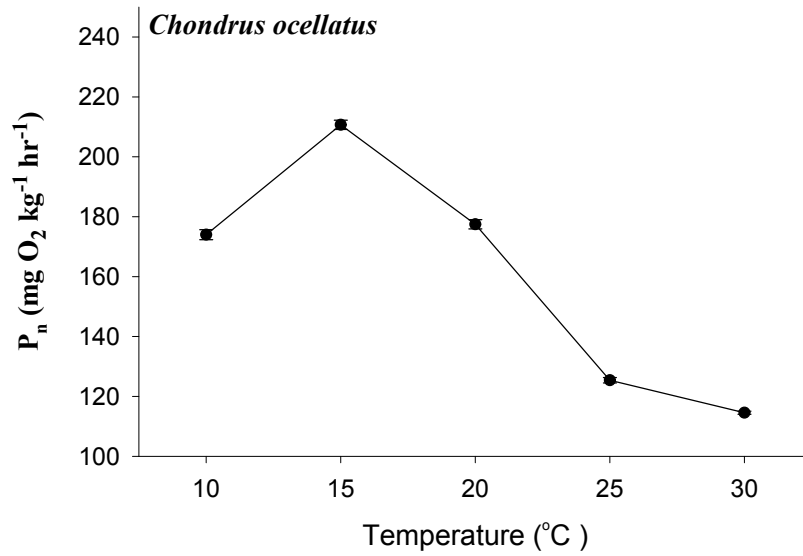


그림 2-2-11. 수온별 진두발의 평균광합성력

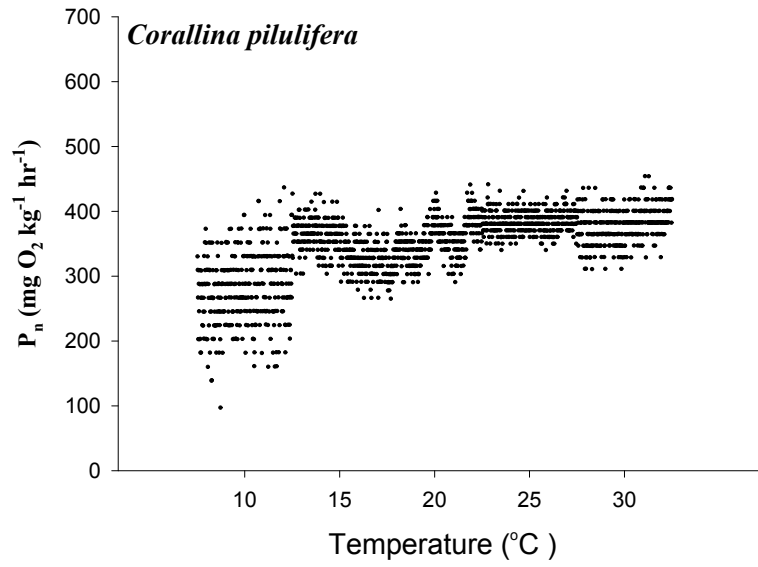


그림 2-2-12. 수온별 1시간 동안 10초 단위로 측정된 작은구슬산호말의 광합성력.

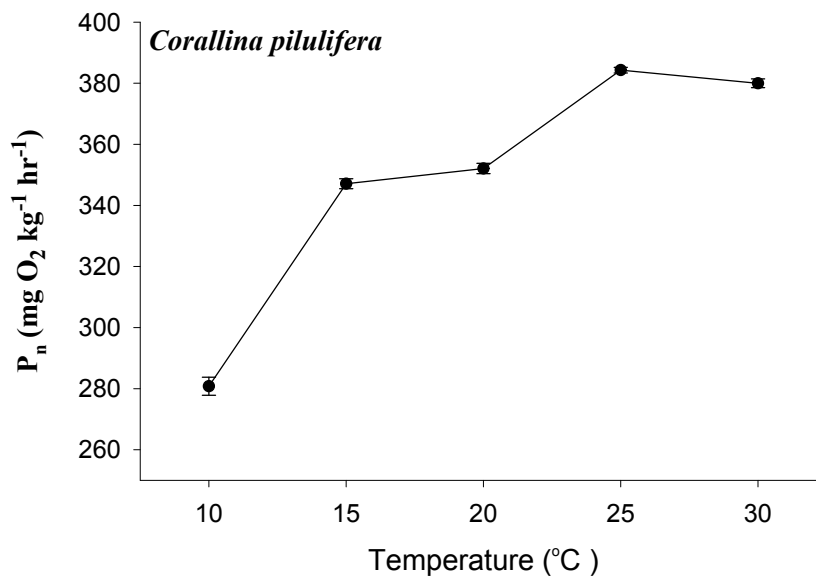


그림 2-2-13. 수온별 작은구슬산호말의 평균광합성력

표 2-2-1. 대상해조류의 광합성력에 대한 분산분석

<i>Source of variation</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>
<구멍갈파래>			
광합성력(P _n)	4	592,974	202.75***
Error	1,795	2,925	
Transformation	None		
Levene's test	Test statistic: 39.685, P=0.000		
Multiple comparison	10>15<20<25>30 °C		
<진두발>			
광합성력(P _n)	4	569,840	817.22***
Error	1,795	621	
Transformation	None		
Levene's test	Test statistic: 101.143, P=0.000		
Multiple comparison	10<15>20>25>30°C		
<작은구슬산호말>			
광합성력(P _n)	4	618,370	503.07
Error	1,795	1,229	
Transformation	None		
Levene's test	Test statistic: 103.270, P=0.000		
Multiple comparison	10<15=20<25=30 °C		

(2) pCO₂ 농도에 따른 석회조류 및 엽상형 해조류의 광합성 및 Chlorophyll a 비교
대상해조류의 수온에 따른 pCO₂농도별 광합성력 변화는 그림 2-2-14와 같다. 구멍갈파래의 경우 수온 20℃에서는 pCO₂ 농도가 증가할수록 광합성력이 증가하는 경향을 보인 반면, 25℃에서는 감소하는 경향을 보였다. 진두발의 경우 두 수온 모두에서 pCO₂ 농도가 증가할수록 광합성력이 감소하는 경향을 보였고, 작은구슬산호말은 pCO₂ 농도가 증가하여도 유사한 광합성력을 나타내었다. 한편, pCO₂ 농도에 따른 광합성력에 대한 2요인 분산분석을 실시한 결과는 표 2-2-2와 같다. 광합성력은 수온, pCO₂농도, 그리고 수온 및 pCO₂농도의 교호작용에 따라 유의한 차이를 보이지 않았다(P>0.05). 이는 광합성력은 주어진 범위의 수온과 pCO₂농도에 의해 영향을 받지 않는다는 것을 시사한다. 다만, 진두발의 경우 pCO₂농도에 대해서만 농도가 높아질수록 광합성력이 낮아지는 경향을 보였다.

대상해조류의 수온에 따른 pCO₂농도별 Chlorophyll a는 그림 2-2-15와 같다. 구멍갈파래의 경우 수온 20℃에서 Chlorophyll a의 양이 25℃보다 높았고, pCO₂ 농도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 진두발의 경우 두 수온 모두에서 pCO₂ 농도가 증가할수록 Chlorophyll a는 유사한 값을 보였고, 작은구슬산호말의 경우 20℃에서는 pCO₂ 농도가 증가하여도 유사한 Chlorophyll a의 값을 보였지만, 25℃에서는 pCO₂ 농도가 증가할수록 낮아지는 경향을 보였다. 한편, pCO₂ 농도에 따른 Chlorophyll a에 대한 2요인 분산분석을 실시한 결과는 표 2-2-3과 같다. Chlorophyll a는 수온, pCO₂농도, 그리고 수온 및 pCO₂농도의 교호작용에 따라 유의한 차이를 보이지 않았다(P>0.05). 이는 Chlorophyll a는 주어진 범위의 수온과 pCO₂농도에 의해 영향을 받지 않는다는 것을 시사한다. 다만, 구멍갈파래의 경우 pCO₂농도에 대해서만 농도가 높아질수록 Chlorophyll a가 낮아지는 경향을 보였고, 작은구슬산호말은 20℃보다 25에서 Chlorophyll a가 낮은 값을 보였다.

결과적으로 엽상형 해조류인 구멍갈파래와 진두발은 pCO₂ 농도가 증가할수록 광합성력이 감소하거나 Chlorophyll a의 양이 감소하는 반면에 석회조류인 작은구슬산호말은 pCO₂ 농도가 증가하여도 광합성력은 큰 영향을 미치지 않지만, 수온이 증가할수록 Chlorophyll a의 값은 일부 영향을 미치는 것으로 판단된다.

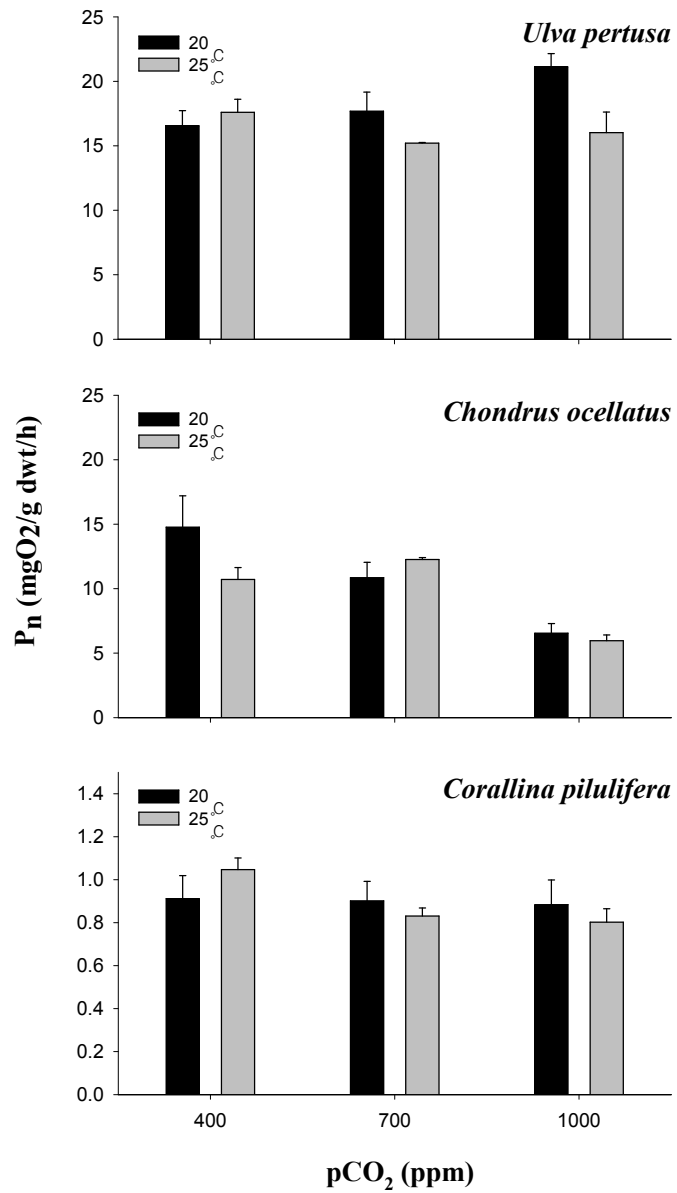


그림 2-2-14. 대상해조류의 수온에 따른 pCO_2 농도별 광합성력 변화

표 2-2-2. 대상해조류의 pCO₂ 농도에 따른 광합성력에 대한 2요인 분산분석

Source of variation	df	MS	F
<i><구멍갈파래(Ulva pertusa)></i>			
<i>Temperature</i>	1	14.158	5.134ns
pCO ₂	2	4.754	1.724ns
Temperature x pCO ₂	2	9.53	3.456ns
Error	6	2.758	
Transformation		None	
<i><진두발(Chondrus ocellatus)></i>			
<i>Temperature</i>	1	3.47	1.16ns
pCO ₂	2	47.66	15.936*
Temperature x pCO ₂	2	7.633	2.552ns
Error	6	2.991	
Transformation		None	
<i><작은구슬산호말(Corallina pilulifera)></i>			
<i>Temperature</i>	1	0	0.008ns
pCO ₂	2	0.021	1.556ns
Temperature x pCO ₂	2	0.015	1.087ns
Error	6	0.014	
Transformation		None	

ns: not significant, *: P<0.05

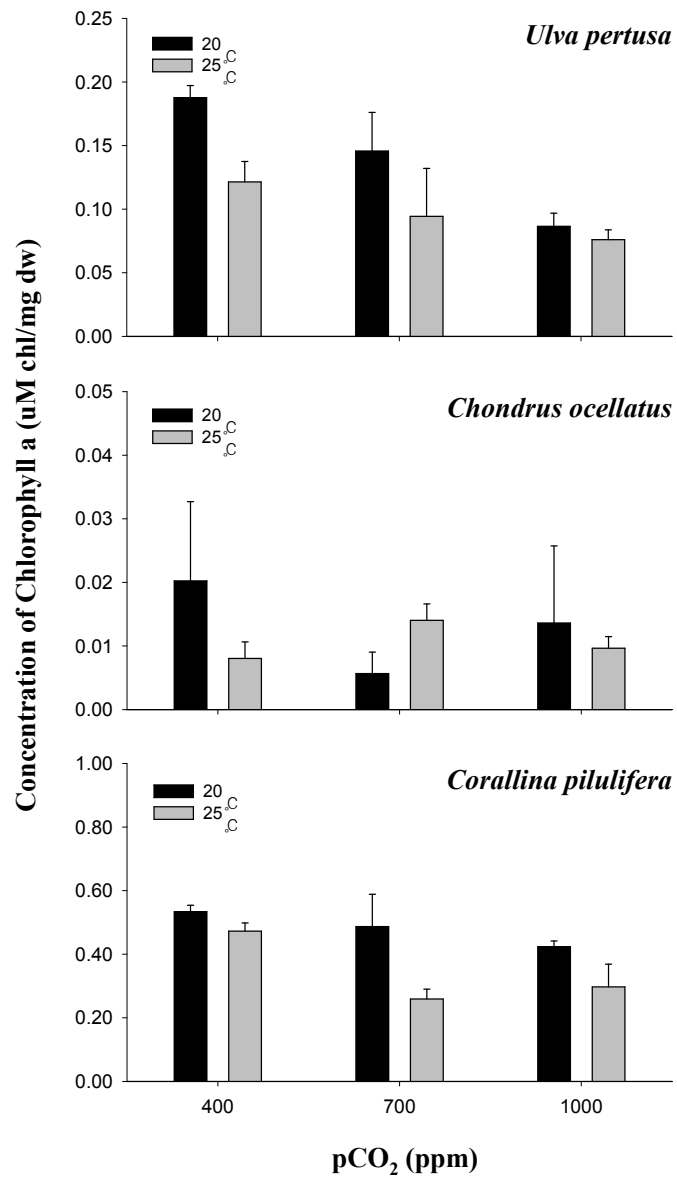


그림 2-2-15. 대상해조류의 수온에 따른 pCO₂농도별 Chlorophyll a 변화

표 2-2-3. 대상해조류의 pCO₂ 농도에 따른 Chlorophyll a에 대한 2요인 분산분석

Source of variation	df	MS	F
<구멍갈파래(<i>Ulva pertusa</i>)>			
Temperature	1	0.005	5.77ns
pCO ₂	2	0.005	5.662*
Temperature x pCO ₂	2	0.001	0.876ns
Error	6	0.001	
Transformation		None	
<진두발(<i>Chondrus ocellatus</i>)>			
Temperature	1	0.000	0.047ns
pCO ₂	2	0.001	0.047ns
Temperature x pCO ₂	2	0.005	0.047ns
Error	6	0.006	
Transformation		forth	root
<작은구슬산호말(<i>Corallina pilulifera</i>)>			
Temperature	1	0.057	9.703*
pCO ₂	2	0.025	4.201ns
Temperature x pCO ₂	2	0.007	1.191ns
Error	6	0.006	
Transformation		None	

ns: not significant, *: P<0.05

2. 조식동물

가. 연구개요

산업 혁명 이후 현재에 이르기 까지 온실가스 배출의 증가로 인해 지구온난화 가속화가 진행되고 있다. 이러한 기후 변화는 해양의 수온 상승을 야기 시킨다. 해양 수온 변화에 관한 국내 연구로는 1880년도부터 2010년 까지 130년간 한반도 주변 수온 변화의 경향을 분석한 결과 한반도 근해의 표층수온은 산업혁명 이후 약 1℃ 이상의 증가를 보였으며, 전 지구적 평균수온은 대체적으로 지속적으로 상승하는데 반해 한반도 주변의 수온변화 경향은 단순하지 않고 다양한 주기의 변동성을 보였음을 밝힌 연구가 있다(김

외, 2011). 또한 한국 연안의 27개 정점의 표층수온을 분석하여 1970년대에 꾸준히 증가해 1980년대 후반에 급격히 상승한 이후 최근까지 높은 수온이 유지되었으며 한국 남서해역보다 상대적으로 동해안에서의 선형증가추세가 가장 크다는 연구 결과가 있다 (Min and Kim, 2006). 이러한 한반도 주변 해역의 수온 증가에 따라, 수온 일변화의 폭 또한 증가할 것으로 보인다.

둥근성게(*Mesocentrotus nudus*)는 극피동물로 우리나라의 동해, 남해 연안의 조하대에 분포한다. 성게는 다양한 범주의 해조류를 주된 먹이로 섭취하여 열악한 환경에서도 생존 능력이 뛰어난 생물로 여겨짐과 동시에 최근 해조장 파괴로 인한 갯녹음의 주된 원인으로 주목을 받고 있다. 이 연구에서 다루는 산소 소비는 유기 호흡하는 생물의 대사 작용 전반의 과정에서 수반되는 현상으로, 이 척도는 대사율의 지표가 생물의 생리적 상태를 정성, 정량적으로 해석하는 데 이용해오고 있다. 생물을 둘러싼 환경요인 중 수온은 특히 변온동물의 대사율을 결정짓는 데 매우 중요한 인자로서 많은 연구자들에 의해 수온에 의한 대사 생리적 반응 및 영향을 보는 다양한 연구가 이루어져왔다. 그러나 실제의 수온 일변화가 둥근 성게 뿐 만 아니라 다른 해양 생물에게도 직접적으로 미치는 영향에 대한 연구는 미미하다.

본 연구는 수온의 일변화가 조하대에 서식하는 성게의 대사에 미치는 영향을 알아보기 위해 수온의 일변화 폭을 5°C 그리고 10°C 의 두 개의 실험구로 나누어 산소 소비율 측정 실험을 진행하였다.

나. 조사 방법

(1) 실험동물



그림 2-2-16. 둥근성게(*Mesocentrotus nudus*)

2016년 5월 31일과 6월 22일, 그리고 9월 28일에 대한민국 독도에서 채집한 둥

근성게(*Mesocentrotus nudus*) 성체들 중 36마리를 호흡률 측정 실험에 사용하였다 (그림 2-2-16). 그 중 실험도중 사망하거나, 유효 데이터 수가 적은 6개체의 데이터는 제외하였다. 또한 호흡률 측정 시에 섭이에 의한 대사 작용을 엄격히 배제하기 위해 측정 48시간 전에는 먹이 공급을 중단하였다.

(2) 실험 셋업

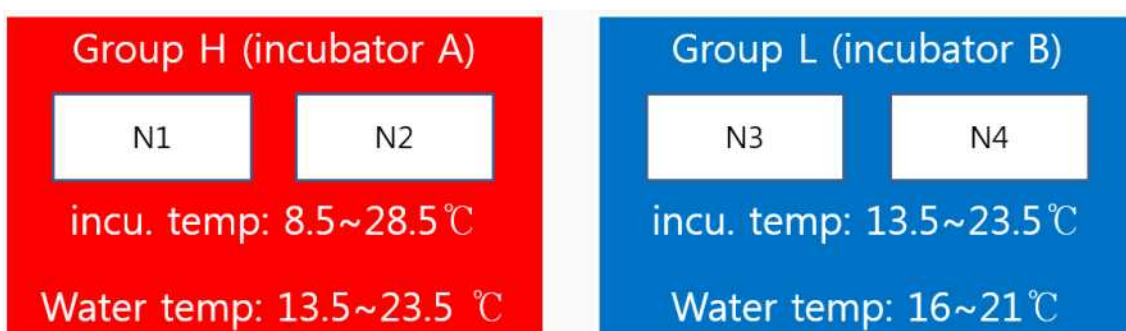


그림 2-2-17. 실험셋업

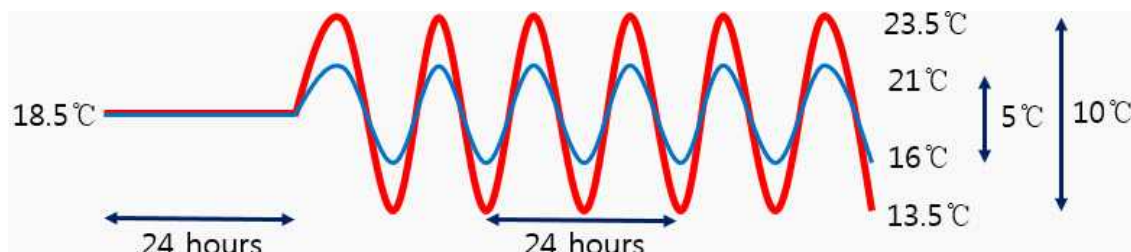


그림 2-2-18. 실험 수온 변화 스케줄

매 실험마다 4마리의 성게가 각각 두 마리씩, 두 개의 실험 구(인큐베이터 A=Group H, 인큐베이터 B=Group L)로 나뉘어져 실험이 진행되었다. 인큐베이터 A와 B에 실험을 할 수조(water bath)를 각 2개씩 넣는다. 실험 전 두 인큐베이터의 온도를 18.5도로 맞춰두어 실험 전 내부 수조의 수온 또한 18.5도로 유지되게 하였다. 각각의 수조안에는 호흡률 측정 챔버를 하나씩 설치하였다. 인큐베이터 A, B 모두 18.5도로 24시간 유지되게 설정하였으며 이후 6시간 간격으로 72시간동안 A는 8.5도와 28.5도가 유지되도록 온도를 설정하여 실제 수온이 13.5도에서 23.5도 사이에서 약 10도 변화를 나타내며 움직이도록 설정하였다(Group H). 그리고 인큐베이터 B는 13.5도와 23.5도가 유지되도록 온도를 바꾸어 실제 수온이 16도에서 21도 사이에서 약 5도 변화를 나타내며 움직이도록 설정하였다.(그림 2-2-17, 그림 2-2-18)



그림 2-2-19. 실험에 사용된 인큐베이터와 수조

인큐베이터 내에는 별도의 광원을 설치하지 않아 산소 소비율 측정이 암상태에서 이루어지도록 하였다 (그림 2-2-19).

(3) Respirometry



그림 2-2-20. 산소 소비율 측정 장비 설치 모습

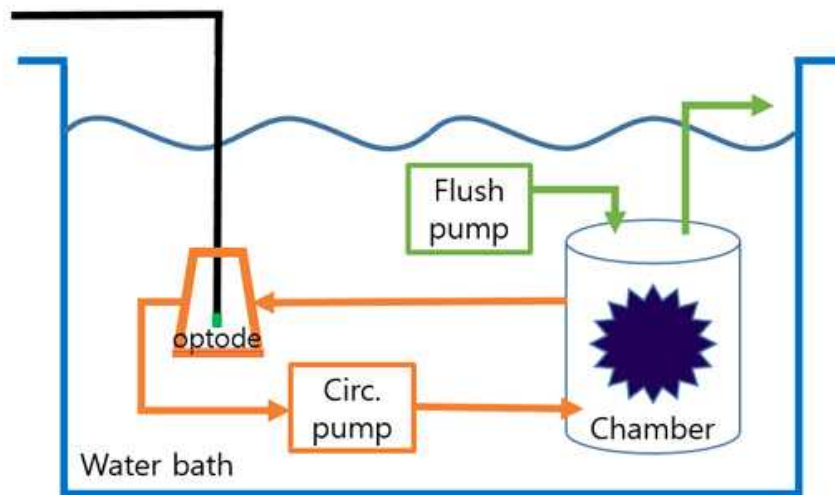


그림 2-2-21. 산소 소비율 측정 장비 구성도

산소 소비율 측정은 각 성체 개체 별로 실시하였으며 closed와 flow-through respirometry를 병합하여 반복적으로 측정 하였다 (intermittent measurement). 처음 30 초는 flush 펌프를 작동시켜 바깥의 물과 측정 챔버내의 해수가 섞이게 하고, 이 후 30 초의 시간을 기다린 뒤, closed상태로 360초 동안의 산소소비량을 측정하였다. 이것을 1 loop로 하여 4일간 (24시간+72시간) 반복하였다(그림 2-2-20, 그림 2-2-21). 펌프의 작동은 Loligo system사의 Auto.Resp software에 의해 조절 되었다. 측정된 산소 소비량

은 곧 성계의 습중량과 측정 시간에 대해 산소소비율(OCR)로 계산 하였다. 실험이 끝난 이후 성계의 육질 건조 중량을 측정하여 앞서 얻어낸 산소 소비율을 육질 건조 중량에 대한 산소 소비율(OCR_{DW})로 변환하였다.

$$OCR(\text{mgO}_2/\text{kg}/\text{hr})=[(\text{IDO}-\text{FDO})(\text{mg}/\text{L})/\text{WV}(\text{L})/\text{WW}(\text{kg})/\text{T}(\text{hr})]$$

$$OCR_{DW}(\text{mgO}_2/\text{kg}/\text{hr})=OCR(\text{mgO}_2/\text{kg}/\text{hr})\text{DW}(\text{g})/\text{WW}(\text{g})$$

OCR=산소소비율 (Oxygen consumption rate, IDO=최초 DO, FDO=나중 DO, WB=실험 수 부피=챔버와 관의 부피 - 동물의 부피, WW=습중량(wet weight) DW=건중량(dry weight), T=측정시간



그림 2-2-22. 산소 소비율 측정 장비

얻어낸 육질 건조중량에 대한 산소 소비율은 개체별로 온도가 일정한 처음 24시간 구간과, 이 후 온도가 변하는 구간의 값을 나누어 산소 소비율의 평균값을 계산하여 각각 COCR과 FOOCR로 나타내었다(그림 2-2-22).

(4) 건조중량 측정

성계는 육질에 비해 껍데기와 가시의 비중이 큰 생물이다. 따라서 순수 육질의 대사량을 알아보기 위해 생물의 육질 건조중량을 측정하였다.



그림 2-2-23. 에어 오븐

실험이 끝난 뒤 성게의 육질을 분리하여 은박지 그릇에 넣고 에어오븐에 80℃에서 24시간 건조 후 그 중량을 재었다 (그림 2-2-23). 또한 습중량과 건조중량 사이의 관계를 구하기 위해 실험에 사용된 성게뿐만 아니라 추가로 실험사용 개체의 크기 범위 밖의 성게의 건조중량을 더 구하였다. 건조중량 데이터에 사용된 성게의 개체수는 총 38마리이며 구한 건조중량 값은 OCR을 OCR_{DW} 로 변환시키는데 이용되었다.

(5) Q10

각 수온 대에서의 수온민감도를 파악하기 위하여 아래와 같이 Q10 값을 구하였다.

$$Q10 = (OCR'_{DW2} / OCR'_{DW1})^{10 / (T1 - T2)}$$

$OCR'_{DW1} = T1 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 에서 평균 OCR_{DW} , $OCR'_{DW2} = T2 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 에서 평균 OCR_{DW} , T=수온

실험에 사용한 개체는 총 36마리로, 그 중 30마리의 측정 자료를 본 실험의 결과 해석에 사용하였다.

다. 조사 결과

(1) 산소소비율(OCR)

수온과 성계의 산소 소비율은 상관관계를 지니고 있다 (그림 2-2-24, 그림 2-2-25, 표 2-2-4, Spearman's rank correlation analysis $P < 0.01$). 그러나 호흡률의 평균은 각각의 실험 구 내에서 온도변화 전과 후가 통계적으로 유의한 차이가 없었으며 (표 2-2-5, Wilcoxon signed-rank test: Group H: $Z = -0.415$, $N = 9$, $P = 0.678$, Group L: $Z = -0.153$, $N = 10$, $P = 0.878$), 또한 온도변화가 있을 때의 호흡률 평균이 두 실험 구 사이에서도 통계적으로 유의한 차이가 없었다(표 2-2-5, Mann-Whitney U -test: $U = 99$, $N1 = 15$, $N2 = 15$, $Z = -0.560$, $P = 0.595$).

표 2-2-4. Temp-OCR_{DW} Spearman's rank 상관분석

Group H	ρ	P	Group L	ρ	P
H1	0.308	0.000	L1	0.306	0.000
H2	0.185	0.000	L2	0.117	0.004
H3	0.374	0.000	L3	0.241	0.000
H4	0.136	0.003	L4	0.207	0.000
H5	0.758	0.000	L5	0.467	0.000
H6	0.579	0.000	L6	0.492	0.000
H7	0.386	0.000	L7	0.791	0.000
H8	0.879	0.000	L8	0.581	0.000
H9	0.656	0.000	L9	0.632	0.000
H10	0.757	0.000	L10	0.526	0.000
H11	0.802	0.000	L11	0.677	0.000
H12	0.598	0.000	L12	0.618	0.000
H13	0.710	0.000	L13	0.533	0.000
H14	0.887	0.000	L14	0.784	0.000
H15	0.758	0.000	L15	0.693	0.000

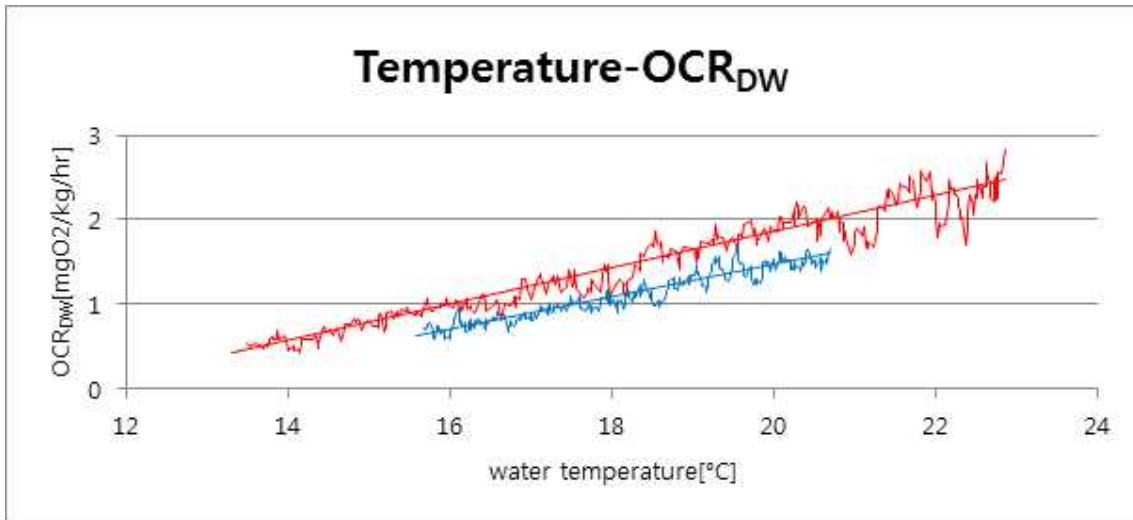


그림 2-2-24. 수온에 따른 산소 소비율의 한 예. 빨간색과 파란색 레이블은 각각 Group H와 Group L의 개체

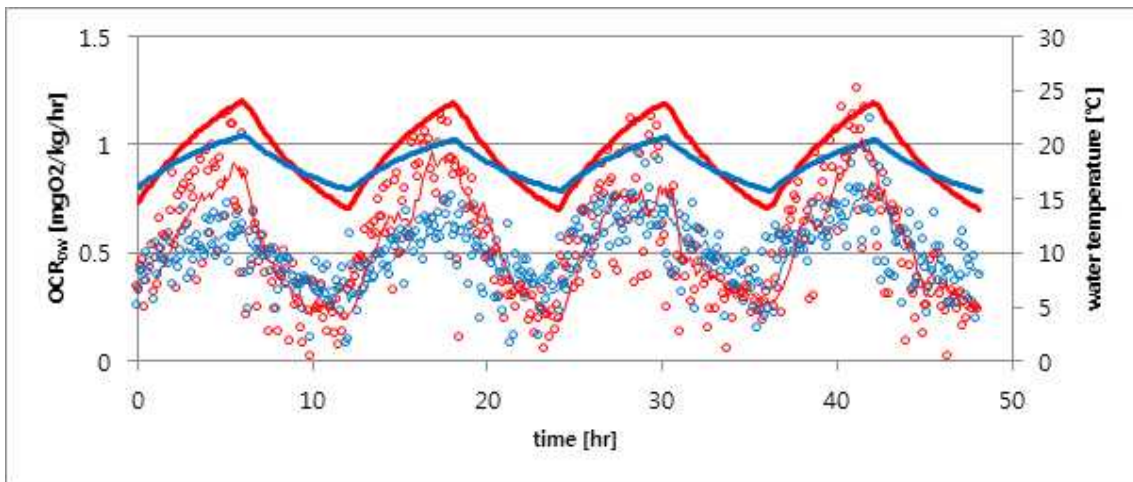


그림 2-2-25. 수온이 변동할 때의 시간에 따른 온도와 산소소비율의 예. 빨간색과 파란색 레이블은 각각 Group H와 Group L의 개체

표 2-2-5. 실험 결과 데이터. TD=외곽 직경(test diameter)

		TD(mm)	DW(g)	COCR (mgO ₂ /kg/hr)	FOCR (mgO ₂ /kg/hr)	Min water temp(°C)	Max water temp(°C)	N
Group H	Mean	52.8788	2.1449	0.6136	0.5040	13.1667	23.4540	15
	SD	5.1421	0.4003	0.3154	0.3154	0.4692	0.5156	
Group L	Mean	54.0968	2.1398	0.8007	0.6109	15.6393	21.0187	15
	SD	5.8587	0.4160	0.3164	0.3793	0.5133	0.5663	

(2) Q10

수온이 증가 할수록 Q10 값은 감소하며 (표 2-2-6), 18.5-22.5°C 구간에서 동물의 일반적인 Q10값인 2~3수준에 가깝게 나타났다. 16.5-20.5°C 구간에서의 두 실험 구의 Q10 값은 통계적으로 유의한 차이가 없다 (Mann-Whitney *U*-test: $U=76$, $N1=15$, $N2=13$, $Z=-0.990$, $P=0.339$).

표 2-2-6. 수온 구간 별 Q10값

	temperature interval(°C)		
	14.5-18.5	16.5-20.5	18.5-22.5
Group H	8.11±5.30	6.23±4.32	3.31±1.83
Group L		4.81±3.23	

3. 제어기술

가. 연구개요

해조류가 성장 및 성숙하여 종자은행의 역할을 하여 안정된 해중림 생태계가 유지되기 위해서는 조하대의 조식동물 중 가장 큰 피해를 주는 보라성게 (*Anthocidaris crassispina*)로부터 해중림을 보호할 필요가 있다.

본 연구는 실내실험을 통하여 보라성게(*A. crassispina*)의 조식압으로부터 해중림을 보호할 수 있는 인위적 제어기술을 개발하는데 있다.

나. 조사 방법

조식동물의 식해(grazing) 활동으로부터 해중립을 보호할 수 있는 인위적 제어기술을 개발하기 위하여 실내실험을 실시하였다.

(1) 실험생물 준비

(가) 보라성게

실험에 사용한 보라성게(*A. crassispina*)(평균 각장 8.0 cm, 평균 체중 68.4 g)는 실험 개시 7일 전에 강원도 양양에서 자망에 어획된 것으로, 공기 주입장치를 설치한 아이스박스에 해수와 함께 실험실로 운반하여 실험 개시 직전까지 순환여과 시스템의 원통형 FRP 수조에 수용하여 먹이 공급 없이 순치시켰다.

(나) 해조류

실험에 사용한 해조류는 다시마였으며, 충남 태안군 파도리에서 다시마를 뿌리째 채취해 운반하여 별도의 수조에서 관리하였다.

(2) 실험 디자인

조식동물의 식해활동으로부터 해중립을 보호할 수 있는 인위적 제어기술을 개발하기 위해 원통형 FRP 수조(약 500 L)에 상단부에는 PP선을 이용하여 다시마를 부착한 4개의 세라믹 블록을 설치하고, 보라성게(*A. crassispina*) 22 마리를 투여한 다음, 보라성게(*A. crassispina*)의 식해활동을 관찰하였다(그림 2-2-26). 각각의 블록에 부착한 다시마 공급량은 약 200 g 이었다. 실험기간 동안 실험수조 내의 수온, 염분, 용존산소, pH 등의 수질환경 변동을 YSI를 이용하여 관측하였다. 실험수조 안의 4개 블록 중 한 개는 보라성게의 식해활동으로부터 다시마를 보호하기 위한 별도의 장치를 하지 않았고(그림 2-2-26-1B), 나머지 세 개의 블록에는 각각 보라성게(*A. crassispina*)의 식해활동으로부터 다시마를 보호하기 위한 장치로, 그물망(그림 2-2-26-1C)과 플라스틱 망(그림 2-2-26-1D) 그리고 인공 해조(그림 2-2-26-1E)를 각각 설치하였다.

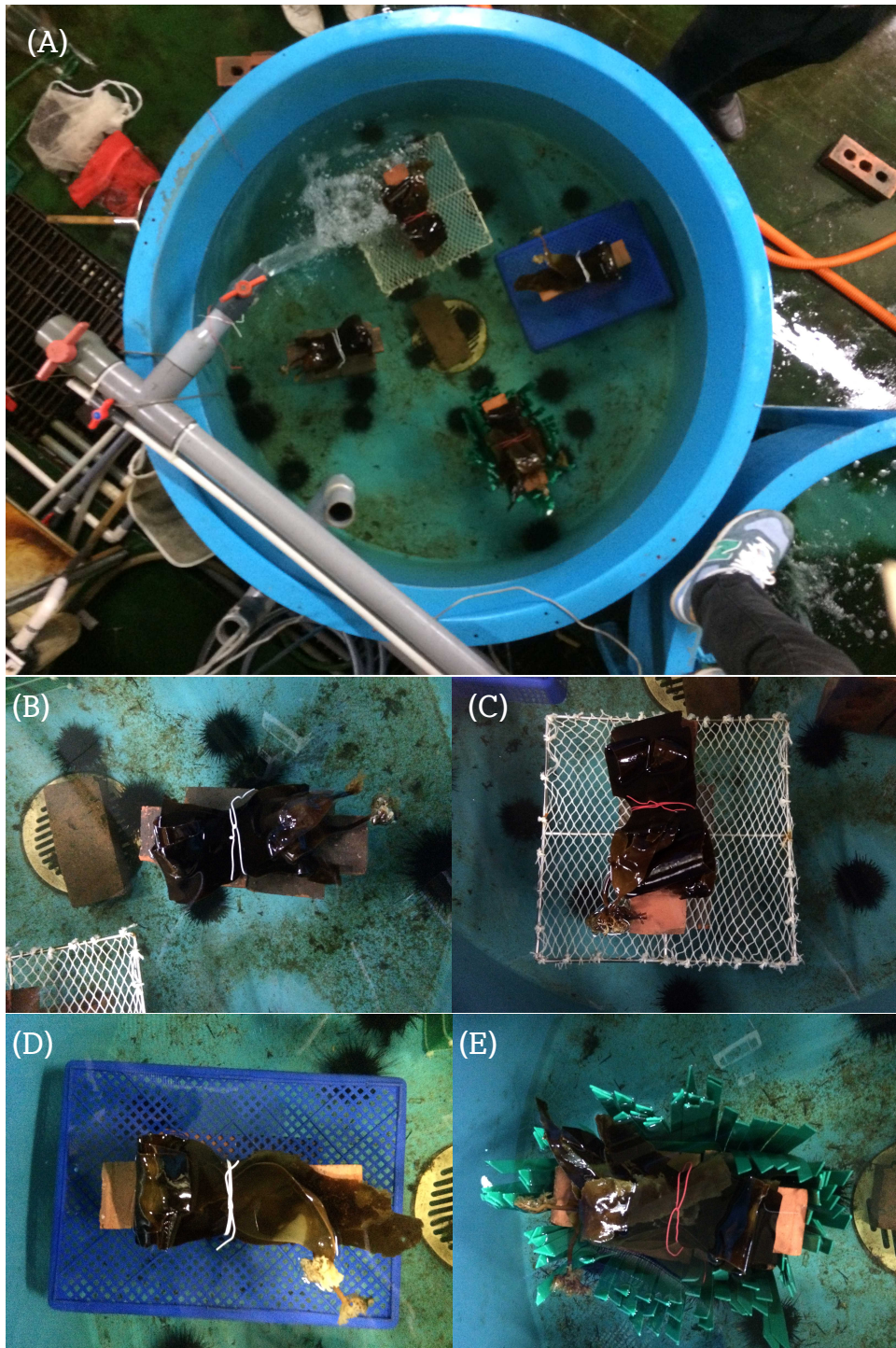


그림 2-2-26. 보라성게(*A. crassispina*)의 식해활동 관찰을 위한 (A)실험수조와 4 종류의 구조물(B: 대조구로 상단에 다시마를 부착한 블록에 보라성게(*A. crassispina*)의 식해활동 방지용 장치를 하지 않았음; C: 보라성게(*A. crassispina*)의 다시마 식해활동 방지용으로 블록과 상단의 다시마 사이에 그물망을 설치함; D: 보라성게(*A. crassispina*)의 다시마 식해활동 방지용으로 블록과 상단의 다시마 사이에 플라스틱 망을 설치함; E: 보라성게(*A. crassispina*)의 다시마 식해활동 방지용으로 블록 외부를 인조풀로 둘러 씌움)

다. 조사 결과

(1) 실험수조의 수질환경

실험기간 동안 실험수조 내의 수질환경은 수온은 15.2 ~ 15.9°C 범위, 염분은 28.49 ~ 28.64 psu 범위, 용존산소는 6.68 ~ 7.73 mg/L 범위, pH는 7.44 ~ 7.83 범위를 보여 비교적 안정적이었음을 알 수 있다(그림 2-2-27).

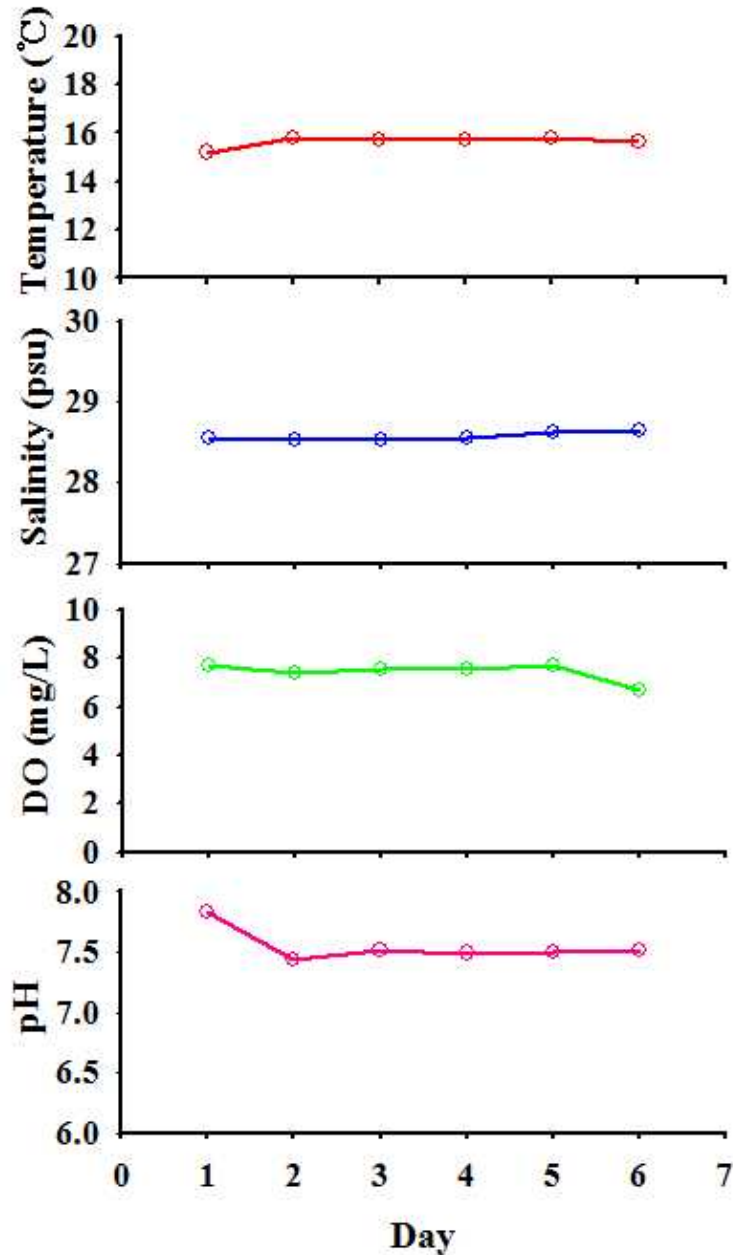


그림 2-2-27. 실험수조 내의 수온, 염분, 용존산소 및 pH의 변동

(2) 구조물별 보라성게의 식해활동 반응

실험기간 동안 구조물별 다시마에 접근한 보라성게(*A. crassispina*)의 일별 개체 수 변동을 관찰한 결과는 그림 2-2-28 ~ 2-2-29에 나타내었다. 대조구에는 실험 첫 날에 2 마리가 다시마에 접근하여 섭이활동을 하였고, 그 후로는 실험 경과 일에 따라 블록 상단의 다시마에 접근하여 식해활동을 하는 보라성게(*A. crassispina*)의 수는 3 ~ 7 마리/일로 활발한 섭이활동을 보였으며, 실험 시작 7일째에 상단에 부착한 다시마를 모두 섭이하였다. 보라성게(*A. crassispina*)의 식해활동 방지용으로 인조풀을 부설한 블록에서는 실험 첫 날에는 다시마에 접근한 보라성게(*A. crassispina*)가 한 마리도 없었지만, 그 후로는 실험 경과 일에 따라 블록의 상단에 부착된 다시마에 접근하여 식해활동을 하는 보라성게(*A. crassispina*)의 수는 3 ~ 6 마리/일로 활발한 섭이활동을 보였으며, 대조구의 경우와 마찬가지로 실험 개시 후 7일째 상단에 부착된 다시마는 모두 소진되었다. 이 두 가지 형태의 구조물과는 달리 보라성게(*A. crassispina*)의 식해활동 방지용으로 플라스틱 망이나 그물망을 부설한 블록에서는 실험기간 동안 블록의 상단에 부착한 다시마에 접근하여 식해활동을 한 보라성게(*A. crassispina*)는 한 마리도 관찰되지 않았다.

이상의 결과로부터 그물망이나 플라스틱 망과 같은 구조물을 잘 활용하면, 보라성게(*A. crassispina*)의 식해활동으로부터 해중립을 효과적으로 보호할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 바다 사막화(갯녹음) 대응 기술로 개발할 경우, 바다 녹색화에 많은 기여가 있을 것으로 기대된다.

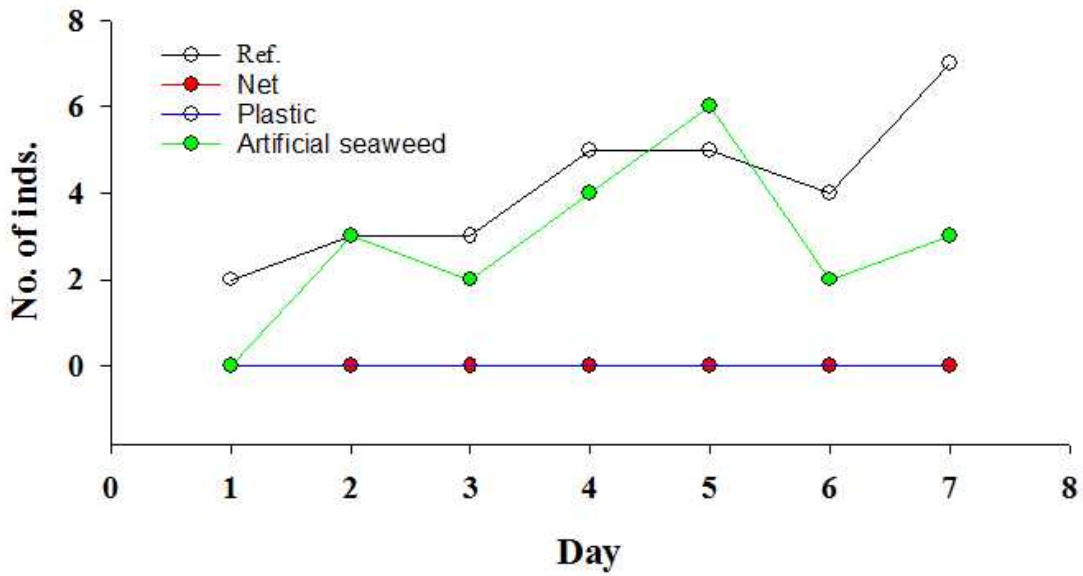


그림 2-2-28. 실험기간 동안 구조물별 다시마에 접근한 보라성게(*A. crassispina*)의 일별 개체 수 변동

실험기간 실험구	1일	2일	3일	4일	5일	6일	7일
Ref							
Net							
Plastic							
Artificial seaweed							

그림 2-2-29. 실험기간 동안 일별 구조물별 보라성게(*A. crassispina*)의 섭식행동 관찰 결과

(3) 인공 해중립 보호를 위한 성게류 접근 방어막 설계도(안)

본 연구의 실내실험 결과를 토대로 인공 해중립에 대한 성게류의 조식활동을 제어할 수 있는 침입 방지막 설계도(안)를 그림 3-5에 제시하였다. 설계된 조식동물

침입 방지막은 두 개의 구조로, 해중립 어초의 형태나 구조에 맞추어 해저 바닥에서 약 40~50 cm 정도 떨어진 위치에 볼트와 너트로 결합하여 고정시킬 수 있다. 모양은 사각형, 원형, 원뿔형, 원통형 등 다양한 형태가 가능하며, 재질도 여러 가지가 활용 가능하다(그림 2-2-30).

향후 현장 적용을 위해서는 현장실증실험 및 검증 과정을 통해 해중립초의 기능에 맞는 구조물을 제작하는 등 다양한 측면에서 연구가 이루어져야 할 것이다.

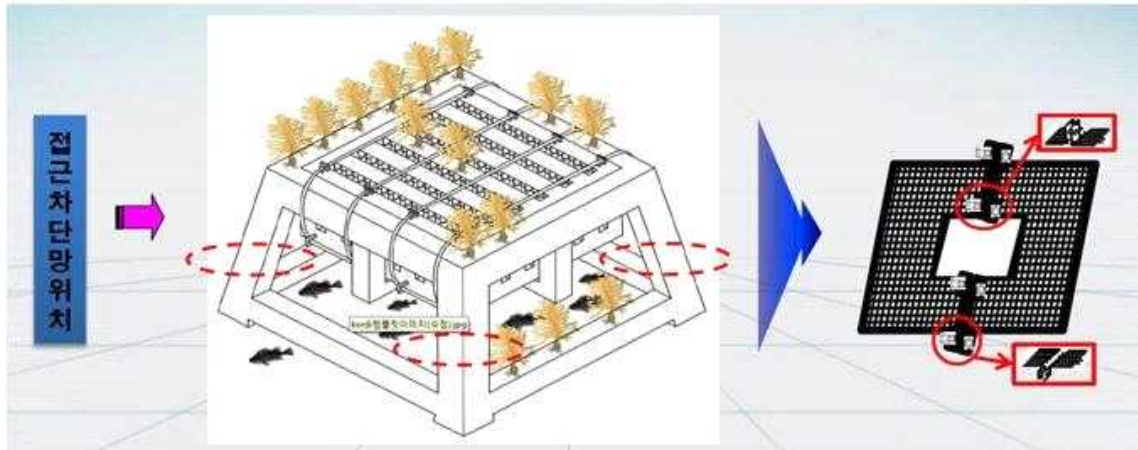


그림 2-2-30. 인공 해중립 보호를 위한 성게류 접근 방어막 설계도(안)

제 3 장 활용 방안

제 1 절 기대 효과

- 서식 적합도 모델
 - 서해갯벌의 위협생물 대량발생에 따른 수산물 생산 감소로부터 갯벌의 생산성 유지 및 효율적 관리에 요구되는 기반기술 제시
 - 위협생물 서식지 적합도 모델 개발을 통해 갯벌의 효율적 이용을 위한 공간계획 수립 및 선제적 위협생물 대응체계 수립
- 모의생태계 활용 발생요인 분석
 - 동해연안 갯녹음 발생기작의 이해를 통해 암반생태계의 효율적 관리 방안제시 및 생산성 증가에 기여
 - 갯녹음 관련 국가 연구기관 및 시행기관, 관련 기업으로의 기술 이전 및 핵심 정보 제공을 통한 연구성과 극대화
 - 현재 활발히 진행되고 있는 바다숲 조성사업에 적합가능하고 성공률이 높은 복원 기술 제시
 - 갯녹음 해역이나 바다숲 조성에 효과적인 사후관리가 가능해지므로 국내 연안 관리에 획기적으로 기여함
 - 갯녹음 방지 기술의 성공적인 개발은 연안 수산업에 막대한 경제적인 이익창출
 - 최근 환경변화에 따른 해양생태계 복원으로 기후변화에 따른 생물다양성 및 연안 생태계 복원에 기여함

제 2 절 활용 방안

- 서식 적합도 모델
 - 서해갯벌의 위협생물 대량발생에 따른 수산물 생산 감소로부터 갯벌의 생산성 유지 및 효율적 관리에 요구되는 기반기술 제시
 - 축의 분포예측 결과를 바탕으로 선제적 대응체계 수립에 기여
 - 서식지 적합도 모델 개발을 통해 갯벌의 효율적 이용을 위한 공간계획에 기여
- 모의생태계 활용 발생요인 분석
 - 동해연안 갯녹음 발생기작의 이해를 통해 암반생태계의 효율적 관리 방안제시 및 생산성 증가에 기여

- 우리나라 갯녹음 및 해중립 조성 등의 효율적 관리 계획 수립에 활용
- 해조류 조식동물 제어기술 개발을 통한 동해안 해중립의 건강성 회복
- 갯녹음 관련 국가연구기관 시행기관 관련기업으로의 기술이전 및 핵심정보 제공을 통한 연구성과 극대화
- 현재 활발히 진행되고 있는 바다숲 조성사업에 해역 및 환경특성별로 적합가능하고 성공률 높은 복원 가이드라인 제시
- 국내외 해조류 위협생물 대응 기술개발 매뉴얼 제공
- 연구 인프라를 활용한 실험실 증 실험으로 효과적인 갯녹음 대응방안의 실효성 검증 가능

참고문헌

- 갯녹음(백화)현상의 원인규명 및 대책. 2002. 해양수산부, 109p.
- 곽철우, 정의영, 김태연, 손수현, 박기열, 김영식, 최한길. 2014. 성계의 조식압 감소를 위한 해조류 이식 방법 비교. 한국자연보호학회지 8(1): 32-38.
- 권혜옥. 2008. 갯녹음 해역의 해조장 복원 절차에 관한 연구. Pukyong National University pp.124.
- 김성중, 우성호, 김백민, 허순도. 2011. 지난 130년 간 한반도 근해의 표층 수온 변화 경향. *Ocean and Polar Research* 33(3): 281-290.
- 김수경, 김영대, 전창영, 공용근, 김동삼, 김진희, 김명래, 한형균. 2007. 둥근성게, 북쪽말뚝성게 및 참전복의 일일 먹이소비량 및 해조류 먹이선택성. 한국수산과학회지 40: 133-140.
- 민홍식, 김철호. 2006. 한국 연안 표층수온의 경년변동과 장기변화. *Ocean and Polar Research* 28(4): 415-423.
- 오승용, 박홍식, 김종관. 2010. 대구 *Gadus macrocephalus* 치어의 산소 소비율에 미치는 수온과 광주기의 영향. *Ocean and Polar Research* 32: 229-236.
- 유재원, 손용수, 이창근, 김정수, 한창훈, 김창수, 문영봉, 김동삼, 홍재상. 2004. 동해안 삼척 호산에 서식하는 둥근성게 *Strongylocentrotus nudus*의 분포와 피식 패턴. 한국해양학회지 바다 9: 40-49.
- 이정아, 이재성, 김지혜, 명정구, 오승용, 강래선. 2014. 말쥐치, *Thamnaconus midestus*의 산소소비율과 수온의 관계. *Ocean and Polar Research* 36: 39-47.
- Batang, Z. B., Suzuki, H. 2003. Gill cleaning mechanisms of the burrowing thalassinidean shrimps *Nihonotrypaea japonica* and *Upogebia major* (Crustacea: Decapoda). *Journal of Zoology* 261(1): 69-77.
- Bjorn, T., Jon, C. S. and John, F. S. 2015. Effect of temperature on specific dynamic action in Atlantic cod *Gadus morhua*. *Fish Physiol Biochem* 40: 41-50.
- Claireaux, G., D. M. Webber, S. R. Kerr and R. G. Boutilier. 1995. Physiology and behaviour of free swimming Atlantic cod (*Gadus morhua*) facing fluctuating temperature conditions. *The Journal of Experimental Biology* 198: 49 - 60.

- Elizabeth, S. 2015. Can sea urchins beat the heat? Sea urchins, thermal tolerance and climate change. *Peer J*.
- Graney, R. L., Kennedy, J. H., Rodgers, J. H. 1994. Aquatic Mesocosm Studies in Ecological Risk Assessment. *Lewis Publishers, Boca. Raton. FL 723*.
- IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report, 2014. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Itoh, H. and S. Nishida 2002. A new species of Hemicyclops (Copepoda, Poecilostomatoida) from burrows of the mud shrimp *Upogebia major* in an estuarine mud-flat in Tokyo Bay, Japan. *Hydro biologia* 474(1-3): 139-146.
- Joo, C., Shim, W. J., Ha, S. Y., An, J. G., Kim, E, Kim, M., Kim, G. B., Jung, S. W., Kim, Y. O., Yim, U. H. 2013. Mesocosm study on weathering characteristics of Iranian heavy crude oil with and without dispersants. *J. Haz. Mat.* 248-249: 37-46.
- Jung, S. W., Kwon, O. Y., Joo, C. K., Kang, J. H., Kim, M, Shim, W. J., Km, Y. O. 2012. Stronger impact of dispersant plus crude oil on natural plankton assemblages in short-term marine mesocosm. *J. Haz. Mat.* 217-218: 338-349.
- Kang, B. J., Nanri, T., Lee, J. M., Saito, H., Han, C. H., Hatakeyama, M., Saigusa, M. 2008. Vitellogenesis in both sexes of gonochoristic mud shrimp, *Upogebia major* (Crustacea): Analyses of vitellogenin gene expression and vitellogenin processing. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology* 149(4): 589-598.
- Kato, M. and Itani, G. 1995. Commensalism of a bivalve, *Peregrinamor ohshimai*, with a thalassinidean burrowing shrimp, *Upogebia major*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 75(4): 941-947.
- Konishi, K. 1989. Larval development of the mud shrimp *Upogebia* (*Upogebia*) *major* (De Haan)(Crustacea: Thalassinidea: Upogebiidae) under laboratory conditions, with comments on larval characters of thalassinid families. *Bull Nat Res Inst Aquacult.* 15: 1-17.
- Kim, J. M., Shin K, Lee K, Park B. K. 2008. In situ ecosystem-based carbon dioxide

- perturbation experiments: Design and performance evaluation of a mesocosm facility. *Limnol. Oceanogr. Methods* 6, 208–217.
- Kim, S., Kim, T., Choi, H. G., Park, J. K., Ahn, D. H., Min, G. S. 2011. The complete mitochondrial genome of the Japanese mud shrimp *Upogebia major* (Crustacea, Decapoda). *Mitochondrial DNA* 22(4): 94–96.
- Kinoshita, K. 2002. Burrow structure of the mud shrimp *Upogebia major* (Decapoda: Thalassinidea: Upogebiidae). *Journal of Crustacean Biology* 22(2): 474–480.
- Kinoshita¹, K., Wada², K. Kogure², T. Furota¹ 2003. Mud shrimp burrows as dynamic traps and processors of tidal-flat materials. *Marine Ecology Progress Series* 247: 159–164.
- Millard, K., Redden, A. M., Webster, T., Stewart H. 2013. Use of GIS and high resolution LiDAR in salt marsh restoration site suitability assessments in the upper Bay of Fundy, Canada. *Wetl. Ecol. Manag.* 21: 243–262.
- Nanri, T., Fukushige, M., Ubaldo, J. P., Kang, B. J., Masunari, N., Takada, Y., Hatakeyama, M., Saigusa, M. 2011. Occurrence of abnormal sexual dimorphic structures in the gonochoristic crustacean, *Upogebia major* (Thalassinidea: Decapoda), inhabiting mud tidal flats in Japan. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 91(5): 1049–1057.
- Neter, J. et. al., 2004. Applied Linear Regression Models, Richard D Irwin, pp. 547.
- Petersen, J. E., Kennedy, V. S., Dennison, W. C., Kemp, W. M. 2009. Enclosed experimental ecosystems and scale. New York. *Springer-Verlag* 221p.
- Siikavuopio, S. I., Mortensen, A. and Christiansen, J. S. 2008. Effects of body weight and temperature on feed intake, gonad growth and oxygen consumption in green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*. *Aquaculture* 281, 77–82.
- Teske, P. R., McQuaid, C. D., Froneman, P. W. and Barker, N. P. 2006. Impacts of marine biogeographic boundaries on phylogeographic patterns of three South African estuarine crustaceans. *Marine Ecology Progress Series* 314: 283–293.
- Ulbricht, R. 1973. Effect of temperature acclimation on the metabolic rate of sea urchins. *Marine Biology* 19, 273–277.
- Ulbricht, R. J. and Pritchard, A. W. 1972. Effect of temperature on the metabolic rate of sea urchins. *The Biological Bulletin* 142, 178–185.
- Webster, S. K. and Giese, A. C. 1975. Oxygen consumption of the purple sea

urchin with special reference to the reproductive cycle. *The Biological Bulletin* 148, 165-180.

Yokoyama, H., Tamaki, A., Koyama, K., Ishihara, Y., Shimoda, K., Harada, K. 2005. Isotopic evidence for phytoplankton as a major food source for macrobenthos on an intertidal sandflat in Ariake Sound, Japan. *Marine Ecology Progress Series* 304: 101-116.