

발간등록번호

11-1541000-001126-01

유류피해지역 어장환경개선 프로그램 개발

2011. 07.

농림수산식품부



유류피해지역 어장환경개선 프로그램 개발

2011. 07.

농 립 수 산 식 품 부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “어장환경개선 프로그램 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2011년 07월 29일

주관연구기관명 : 전남대학교

총괄연구책임자 : 한 경 호

연 구 원 : 양한춘, 강연실,
추효상, 조현서,
서호영, 고강희,
신태선, 김대현,
이성훈, 황재호,
라성주, 윤호섭

< 목 차 >

제 1장. 조사개요	1
1. 연구명	1
2. 연구목적	1
3. 연구기간	1
4. 연구내용 및 방법	2
4.1. 기초 생물량 조사	2
4.2. 수질 및 저질조사	2
4.3. 저질의 유류잔류량 및 유해중금속 조사	4
4.4. 연구어장의 패류 성장도 및 생물상 조사	4
4.5. 연구어장의 저질 환경개선 방법별 생산성 및 사회·경제성 평가	4
제 2장. 기존자료조사	5
1. 기존자료수집 및 분석	5
1.1. 충남 태안	5
1.2. 전남 여수	23
2. 후보지역의 비교	32
3. 시험어장의 설정	33
4. 어장환경개선 프로그램 적용	41
5. 국내외 연구동향	45
제 3장. 식물플랑크톤	47
1. 서 론	47

2. 재료 및 방법	48
3. 결과	50
3.1. 종조성	50
3.2. 현존량	52
3.3. 생태지수	55
3.4. 계절별 집괴분석	60

제 4장. 동물플랑크톤

1. 서론	63
2. 재료 및 방법	64
3. 결 과	66
3.1. 하계	66
3.2. 추계	74
3.3. 동계	82
3.4. 춘계	90
3.5. 요약	98

제 5장. 저서생물

1. 서론	99
2. 재료 및 방법	100
2.1. 조사지역	100
2.2. 저서생물 조사	100
3. 결과 및 고찰	103
3.1. 저서생물의 출현비율	103
3.2. 대형저서동물의 생태지수, 종조성 및 현존량	105
3.3. 균집분석	112

제 6장. 해양환경	117
1. 서론	117
2. 연구내용 및 방법	117
2.1. 조사항목 및 대상해역	117
2.2. 수질환경	119
2.3. 퇴적물 분석방법	122
3. 결 과	124
3.1. 해양수질	124
3.2. 해양퇴적물	142
4. 소 결	151
제 7장. 유류 및 중금속 분석	154
1. 조사의 배경 및 목적	154
2. 해양에서 석유의 변화 및 분해	156
2.1. 석유의 확산	157
2.2. 석유성분의 용해	157
2.3. 석유의 침강	158
2.4. 풍화에 의한 석유의 성상변화	159
2.5. 풍화석유 및 증류잔유의 성상	159
2.6. 바나디움 및 니켈	160
2.7. 아스팔트	160
2.8. 유황	160
2.9. n-파라핀	161
3. 유류유출이 해양생물에 미치는 독성물질	164
4. 환경개선 방법별 대상어장의 PAHs 및 중금속 분석	169
4.1. 시료채취방법 및 보관	169

4.2. 전처리 방법	172
4.3. PAHs 분리방법	175
4.4. 정량방법	175
4.5. 표기방법	182
5. 결과	184
6. 요약	206

제 8장. 양식장 환경 개선방법별 효과 조사

1. 연구개요	208
2. 조사방법	208
2.1. 현존자원량 추정	209
3. 조사 결과	215
3.1. 바지락(<i>Tapes philippinarum</i>)의 일반 생태	215
3.2. 연구어장의 환경 개선방법별 성장도	222
3.3. 연구어장의 바지락 생존율 및 분포밀도	226
3.4. 현존량 추정	231

제 9장. 사회·경제적 효과 분석

1. 분석 개요	232
1.1. 분석의 목적 및 필요성	232
1.2. 분석 대상 및 주요내용	233
2. 사회·경제적 효과분석 이론 검토	234
2.1. 이론적 배경	234
3. 편익과 비용 항목추정	242
3.1. 사업의 경제적 편익 분류	242
3.2. 직접편익 추정	243

3.3. 간접편익 추정	249
4. 프로그램별 경제성 분석 결과	258
4.1. 경제성 분석 결과	258
4.2. 개선 프로그램별 효과 비교분석	262
제 10장. 종합결론	263
1. 기초생물량	263
2. 해양환경	264
3. 유류 및 중금속	265
4. 양식장 환경 개선방법별 효과 조사	266
5. 사회·경제적 효과	267
6. 결론	268
7. 연구의 한계점	274
8. 최종결론	274
참고문헌	277
부 록	293

< 표 목 차 >

<표 2-1> 원유 내 주요 탄화수소 성분(국토해양부, 2008)	8
<표 2-2> 허베이스피리트호 유류오염 사고로 유출된 사고유(국토해양부, 2008)	9
<표 2-3> 사고유내 분석대상 방향족탄화수소 화합물의 농도. 단위:μg/g (ppm); (국토해양부, 2008)	9
<표 2-4> 사고유내 알킬 PAHs 농도. 단위:μg/g (ppm); (국토해양부, 2008)	10
<표 2-5> 해수내 유류오염 조사내역(국토해양부, 2008)	11
<표 2-6> 사고초기 조간대 해수내 PAHs 조사결과 요약(국토해양부, 2008)	12
<표 2-7> 조간대 해수 중 형광 TPH 월별 조사결과 요약(국토해양부, 2008)	12
<표 2-8> 표간대 해수 중 GC-TPH 월별 조사 결과 요약(국토해양부, 2008)	13
<표 2-9> 조간대 해수내 크리센 농도의 월별 변화 및 미국 EPA 수질기준 과 비교결과(국토해양부, 2008)	14
<표 2-10> 조간대 퇴적물 중 GC TPH의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)	15
<표 2-11> 조간대 퇴적물 중 16PAHs의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)	16
<표 2-12> 조간대 퇴적물 중 알킬 PAHs의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)	16
<표 2-13> 조간대 퇴적물 중 알킬 PAHs의 월별조사 결과 요약(국토해양부, 2008)	17

<표 2-14> 초기 해상 표층퇴적물 중 GC TPH의 조사 결과 요약(국토해양부, 2008)	18
<표 2-15> 조하대 표층퇴적물 중 GC TPH의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)	18
<표 2-16> 조하대 표층퇴적물 중 16PAHs의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)	19
<표 2-17> 조하대 표층퇴적물 중 알킬 PAHs의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)	19
<표 2-18> 퇴적물 공극수 중 형광 TPH 월별 조사결과 요약(국토해양부, 2008)	20
<표 2-19> 굴 조직 내 PAHs의 계절별 조사결과(국토해양부, 2008)	21
<표 2-20> 굴 조직 내 알킬 PAHs의 계절별 조사결과(국토해양부, 2008)	22
<표 2-21> 폐유 수거실적 및 폐기물 발생량(자료출처: 해양경찰청 '08.10.2 기준	23
<표 2-22> 씨프린스호 사고당시 기름 적재량(해양수산부, 2002)	25
<표 2-23> 씨프린스호 사고진행상황(해양수산부, 2002)	26
<표 2-24> 씨프린스호 해안방제 작업일지(해양수산부, 2002)	30
<표 2-25> 씨프린스호 동원인원 및 장비(해양수산부, 2002)	31
<표 2-26> 충남 태안과 전남 여수의 유류유출 비교	32
<표 2-27> 어촌계별 시험어장 환경개선 적용	42
<표 2-28> 저질개선제(특허 제0477316호, 상표등록 제0571277호; 황금어장2) 성분분석표	43
<표 2-29> 시험어장에 적용한 어장환경개선 방법	44
<표 2-30> 유류오염지역의 정화기술 현황(성과 이, 2008)	46
<표 3-1> 식물플랑크톤 현장조사 일정 및 조사정점 수	49
<표 3-2> 조사해역에서 출현한 종조성 및 구성비	51

<표 3-3> 여름철(2010년 8월) 정점별 생태지수	56
<표 3-4> 가을철(2010년 11월) 정점별 생태지수	57
<표 3-5> 겨울철(2012년 2월) 정점별 생태지수	58
<표 3-6> 봄철(2011년 4월) 정점별 생태지수	59
<표 5-1> 조사지역의 GPS 위치	102
<표 6-1> 분석 항목 세부내용.	118
<표 6-2> 해역 수질기준(국토해양부, 2008).	125
<표 6-3> 해수의 pH에 따른 수질 및 저질 환경 변화와 해산생물의 생존과 의 관계도	153
<표 7-1> 방향족 탄화수소의 이름과 벤젠 고리수에 따른 분자량(Sauer와 Boebm, 1995에서 인용)	168
<표 7-2> 16 PAHs의 물리 및 화학적 특징	171
<표 7-3> PAHs의 분석에 사용된 내부표준물질과 그 순도 및 농도	174
<표 7-4> 어업생물의 체내 16 PAHs를 분석하기 위한 GC-MS 조건	176
<표 7-5> 16 PAHs 다환 방향족 탄화수소 분석 모니터링 이온분자량	177
<표 7-6> 16 PAHs의 상대적 독성 (Yender, et al., 2002에서 인용)	183
<표 7-7> 시설물 설치 전 법산어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값	184
<표 7-8> 시설물 설치 전 송현어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값	186
<표 7-9> 시설물 설치 전 신태어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값	188
<표 7-10> 시설물 설치 전 파도 어장 저질에 잔존하는 16 PAHs농도와 TEQ 값	190
<표 7-11> 시설물 설치 전 학암 어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값	192
<표 7-12> 시설물 설치 후 법산 어장에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값	

.....	194
<표 7-13> 시설물 설치 후 송현 어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값	196
<표 7-14> 시설물 설치 후 신덕 어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값	198
<표 7-15> 시설물 설치 후 파도 어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값	200
<표 7-16> 시설물 설치 후 학암 어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값	202
<표 8-1> 모래살포 후 객토한 연구어장의 정점별 바지락 분포밀도	227
<표 8-2> 경운 후 연구어장의 정점별 바지락 분포밀도	228
<표 8-3> 모래 및 저질개선제 살포 후 객토한 연구어장의 정점별 바지락 분포밀도	229
<표 8-4> 저질개선제 살포 후 객토한 연구어장의 정점별 바지락 분포밀도	230
<표 8-5>환경개선 방법별 현존량 추정	231
<표 9-1> 분석 필요성 및 목적	233
<표 9-2> 분석 대상지역 및 개선방법	233
<표 9-3> 경제성 분석 방법별 특징	236
<표 9-4> 할인율의 적정수준에 대한 견해	238
<표 9-5> 국내 공공투자사업 사회적 할인율	238
<표 9-6> 국외 공공투자사업 사회적 할인율	239
<표 9-7> 어장환경 개선사업의 경제적 편익 분류	243
<표 9-8> 생산물의 단위당 가격 추정	246
<표 9-9> 어장환경개선 프로그램별 자원량 자료	247
<표 9-10> 생산량에 따른 생산비용의 변화	247
<표 9-11> 초기투자비용 추정	248

<표 9-12> 초기투자비용 추정	249
<표 9-13> 응답자의 성비구조	254
<표 9-14> 응답자의 연령구조	254
<표 9-15> 간접편익 추정 실증분석 결과	256
<표 9-16> ‘경운’ 유형 경제적 타당성 분석결과	258
<표 9-17> ‘모래살포 + 객토’ 유형 경제적 타당성 분석결과	259
<표 9-18> ‘모래살포 + 저질개선제+ 객토’ 유형 경제적 타당성 분석결과	260
<표 9-19> ‘저질개선제 + 객토’ 유형 경제적 타당성 분석결과	261
<표 9-20> 프로그램별 경제적효과 비교분석결과	262
<표 10-1> 각 후보지별 어장환경 방법별 메뉴얼	269

< 그림 목 차 >

그림 2-1. (a) 허베이스피리트호 유류 유출사고 지점, (b) 허베이스피리트호 에 충돌한 크레인선 삼성 1호, (c) 허베이스피리트호(국토해양부, 2008).	6
그림 2-2. 허베이스피리트호 유류 유출사고 발생 후 인공위성 영상(국토해양 부, 2008).	7
그림 2-3. 어장환경개선 프로그램 개발 태안군 어촌계 협의 및 시험어장 시설.	34
그림 2-4. 학ampo어촌계 협의 및 조사전경.	35
그림 2-5. 신두어촌계 협의 및 조사전경.	36
그림 2-6. 천리포어촌계 협의 및 조사전경.	37
그림 2-7. 만리포어촌계 협의 및 조사전경.	38
그림 2-8. 모항어촌계 협의 및 조사전경.	39
그림 2-9. 태안군내 협의 어촌계 관할 지역 모식도.	40
그림 3-1. 어장환경개선 프로그램 식물플랑크톤 조사지역.	49
그림 3-2. 조사시기에 따른 식물플랑크톤 출현종 수 변화.	51
그림 3-3. 여름철(2010년 8월) 정점간 현존량.	52
그림 3-4. 가을철(2010년 11월) 정점간 현존량.	53
그림 3-5. 겨울철(2011년 2월) 정점간 현존량.	53
그림 3-6. 봄철(2011년 4월) 정점간 현존량.	54
그림 3-7. 여름철 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 현존량에 따른 정점별 집괴분석.	61
그림 3-8. 가을철 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 현존량에 따른 정점별 집괴분석.	61
그림 3-9. 겨울철 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 현존량에 따른 정점별	

집괴분석.	62
그림 3-10. 봄철 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 현존량에 따른 정점별 집괴분석.	62
그림 4-1. 어장환경개선 프로그램 동물플랑크톤 조사지역.	65
그림 4-2. 하계 조사해역에 출현하는 망목 100 μ m 동물플랑크톤 네트에 채집 된 주요 분류군의 출현 비율.	67
그림 4-3. 하계 조사해역에 출현하는 망목 200 μ m 동물플랑크톤 네트에 채집 된 주요 분류군의 출현 비율.	67
그림 4-4. 하계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수 (100 μ m). ..	69
그림 4-5. 하계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수 (200 μ m). ..	69
그림 4-6. 하계 조사해역의 생태지수 (100 μ m).	70
그림 4-7. 하계 조사해역의 생태지수 (200 μ m).	70
그림 4-8. 하계 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거 한 집괴분석.	72
그림 4-9. 하계 망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거 한 집괴분석.	73
그림 4-10. 추계 조사해역에 출현하는 망목 100 μ m 동물플랑크톤 네트에 채집 된 주요 분류군의 출현 비율.	75
그림 4-11. 추계 조사해역에 출현하는 망목 200 μ m 동물플랑크톤 네트에 채집 된 주요 분류군의 출현 비율.	75
그림 4-12. 추계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수 (100 μ m). 77	
그림 4-13. 추계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수 (200 μ m). ..77	
그림 4-14. 추계 동물플랑크톤의 생태지수(100 μ m).	78
그림 4-15. 추계 동물플랑크톤의 생태지수 (100 μ m).	78
그림 4-16. 추계 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거 한 집괴분석.	80
그림 4-17. 추계 망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거	

한 집괴분석.	81
그림 4-18. 동계 조사해역에 출현하는 망목 100 μ m 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.	83
그림 4-19. 동계 조사해역에 출현하는 망목 200 μ m 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.	83
그림 4-20. 동계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수(100 μ m).	85
그림 4-21. 동계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수(200 μ m).	85
그림 4-22. 동계 조사해역의 생태지수(100 μ m).	86
그림 4-23. 동계 조사해역의 생태지수(200 μ m).	86
그림 4-24. 동계 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료에 근거한 집괴분석.	88
그림 4-25. 동계 망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료에 근거한 집괴분석.	89
그림 4-26. 춘계 조사해역에 출현하는 망목 100 μ m 동물프랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.	91
그림 4-27. 춘계 조사해역에 출현하는 망목 200 μ m 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.	91
그림 4-28. 춘계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수(100 μ m). ..	93
그림 4-29. 춘계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수(200 μ m).	93
그림 4-30. 춘계 조사해역의 생태지수(100 μ m).	94
그림 4-31. 춘계 조사해역의 생태지수(200 μ m).	94
그림 4-32. 춘계 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거한 집괴분석.	96
그림 4-33. 춘계 망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거한 집괴분석.	97
그림 5-1. 저서생물 조사정점도.	101
그림 5-2. 2010년 7월 조사해역에 출현하는 저서동물의 주요 분류군 비율.	

.....	103
그림 5-3. 2010년 10월 조사해역에 출현하는 저서동물의 주요 분류군 비율.	104
그림 5-4. 2011년 1월 조사해역에 출현하는 저서동물의 주요 분류군 비율.	104
그림 5-5. 2011년 4월 조사해역에 출현하는 저서동물의 주요 분류군 비율.	105
그림 5-6. 2010년 7월 저서동물의 정점별 현존량 및 출현종수.	106
그림 5-7. 2010년 7월 조사해역의 생태지수.	106
그림 5-8. 2010년 10월 저서동물의 정점별 현존량 및 출현종수.	108
그림 5-9. 2010년 10월 조사해역의 생태지수.	108
그림 5-10. 2011년 1월 저서동물의 정점별 현존량 및 출현종수.	109
그림 5-11. 2011년 1월 조사해역의 생태지수.	109
그림 5-12. 2011년 4월 저서동물의 정점별 현존량 및 출현종수.	111
그림 5-13. 2011년 4월 조사해역의 생태지수.	111
그림 5-14. 2010년 7월 출현한 현존량에 따른 정점별 집괴분석.	113
그림 5-15. 2010년 10월 출현한 현존량에 따른 정점별 집괴분석.	114
그림 5-16. 2011년 1월 출현한 현존량에 따른 정점별 집괴분석.	115
그림 5-17. 2011년 4월 출현한 현존량에 따른 정점별 집괴분석.	116
그림 6-1. 태안 조사지역 정점도.	118
그림 6-2. 태안 조사지역 대조구 정점도.	119
그림 6-3. 용존산소(DO, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)	128
그림 6-4. 부유물질(SS, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)	129
그림 6-5. 화학적 산소요구량(COD, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)	131

그림 6-6. 용존 무기질소(DIN, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하: 4월)	133
그림 6-7. 용존 무기인(DIP, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)	135
그림 6-8. 규산규소(Si(OH) ₄ -Si, μ g-at./L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)	137
그림 6-9. 총질소(TN, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하: 4월)	139
그림 6-10. 총인(TP, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하: 4월)	141
그림 6-11. 강열감량(IL, %)의 월별 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)	146
그림 6-12. 산취발성황화물(AVS, mg/g-dry)의 월별 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)	147
그림 6-13. 화학적 산소요구량(COD, mg/g-dry)의 월별 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)	148
그림 6-14. pH의 월별 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)	149
그림 6-15. 화학적 산소요구량(COD, mg/g-dry)의 정점별 분포도.	150
그림 6-16. 화학적 산소요구량(COD, mg/g-dry)의 대조구 정점별 분포도.	150
그림 7-1. 분석시료 채취지점	155
그림 7-2. 대상어장에서 분석한 16 PAHs 분자구조.	170
그림 7-3. 저질의 16 PAHs 분석공정 도해도.	173
그림 7-4. 저질의 중금속 분석공정 도해도.	174
그림 7-5. 시설물 설치 전 법산 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	185

그림 7-6. 시설물 설치 전 송현 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	187
그림 7-7. 시설물 설치 전 신덕 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	189
그림 7-8. 시설물 설치 전 파도 어장 저질의 16 PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	191
그림 7-9. 시설물 설치 전 학암 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	193
그림 7-10. 시설물 설치 후 법산어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	195
그림 7-11. 시설물 설치 후 송현 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	197
그림 7-12. 시설물 설치 후 신덕 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	199
그림 7-13. 시설물 설치 후 파도 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	201
그림 7-14. 시설물 설치 후 학암 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.	203
그림 7-15. 시설물 설치 전 각 어장의 16PAHs농도(ppb)와 TEQ 값.	204
그림 7-16. 시설물 설치 후 각 어장의 16PAHs농도(ppb)와 TEQ 값.	204
그림 7-17. 시설물 설치 전 각 어장의 중금속 농도(ppm) 값.	205
그림 7-18. 시설물 설치 후 각 어장의 중금속 농도(ppm) 값.	205
그림 8-1. 모래살포 후 객토어장 바지락의 성장(mm; g).	223
그림 8-2. 경운어장 바지락 성장도(mm; g).	224
그림 8-3. 모저질개선제 살포 후 객토어장 바지락 성장도(mm; g).	224
그림 8-4. 모래 및 저질개선제 살포 후 객토어장 바지락 성장도(mm; g). ·	225
그림 8-5. 환경개선방법별 생존율(%).	230

그림 9-1. 사업의 효과 발생·지속기간 설문 결과.	240
그림 9-2. 생산자잉여증가효과.	244
그림 9-2. 응답자의 연간 해당 지역 방문횟수.	255
그림 9-3 사업지역 응답자 만족도.	255
그림 10-1. 어장환경개선 프로그램 모식도.	273

제 1장. 조사개요

1. 연구명

어장환경개선 프로그램 개발

2. 연구목적

본 조사는 2007. 12. 7. 07:15 경 충남 태안군 원북면 신도 남서방 6마일 해상에서 삼성 중공업 소속 예인 선단이 1만2000톤급 삼성물산 소속 크레인선인 삼성 1호를 끌고 가던 중에 기상이 악화되어 피항을 하거나, 닻을 내려야 했음에도 무리하게 운행하다 크레인선 ‘삼성 1호’가 근처에 닻을 내리고 있던 14만 6000톤급 홍콩 선적 유조선인 “허베이 스피리트호”에 약 9차례에 걸쳐 충돌하였다. 이러한 선박충돌로 인하여 유조선의 왼쪽 5개 원유적조탱크 중 1번과 5번 탱크가 직경 30cm, 3번 탱크가 직경 1m 크기로 파손되었고, 이를 통해 원유 12,547kl(약 10,900톤)가 유출되어 충청남도 해안선 167km 및 전남지역 113.3km 등 300km 가 넘는 해안선과 만리포 등 15개 해수욕장, 충청남도내 양식장 1만5천39ha와 전라남도지역 1만9천17ha등의 광활한 지역에 피해가 발생한 실정이다.

그러나 현재까지 이러한 유류피해로 인하여 발생하는 어장에 대하여 보상을 목적으로 한 조사만 이루어졌을뿐 피해어장의 개선 방안 연구에 대해서는 구체적이고, 체계적인 방안을 제시한 바가 없다.

따라서 본 연구는 이러한 유류피해에 대한 보다 구체적이고 합리적인 개선방안 뿐만 아니라 노후화된 어장의 개선방안을 “어장 환경 개선 프로그램 개발”이라는 연구를 통하여 보다 구체적인 개선방안을 제시하고자 한다.

3. 연구기간

2010. 05. 04 ~ 2011. 07.31

4. 연구내용 및 방법

4.1. 기초 생물량 조사

본 연구는 시험양식어장 시설지역의 기초 생물량 조사를 실시하여 “어장 환경 개선 프로그램” 개발 연구와 관련한 해양생태계를 파악하기 위한 조사이다.

4.1.1 식물 플랑크톤

식물플랑크톤의 채집은 10개 정점에서 실시하고, 채수는 조사정점의 표층수(표면하 0.5m와 저층수(저면상 1.0m)를 Van-dorn채수기를 사용하여 시료를 채취해 식물 플랑크톤 군집의 특성을 설명하는 생태지수는 종다양성지수(H'), 종풍부도지수(R), 종균등도지수(J), 우점도지수(D)를 정점별로 계산하였다.

4.1.2 동물 플랑크톤

동물플랑크톤의 채집은 식물플랑크톤과 동일한 조사정점에서 망목 100 μ m, 구경 230mm의 Kitahara식 정량네트를 사용하여, 시료를 채취해 동물플랑크톤 군집의 특성을 설명하는 생태지수는 종다양성지수(H'), 종풍부도지수(R), 종균등도지수(J), 우점도지수(D)를 정점별로 계산하였다.

4.1.3. 저서생물

저서생물은 계절별 10개 정점을 선정하여 0.077m²(27×28.5cm)의 Van Veen Grab으로 저질을 채취하여 저서생물 군집의 특성을 설명하는 생태지수는 종다양성지수(H'), 종풍부도지수(R), 종균등도지수(J), 우점도지수(D)를 정점별로 계산하였다.

4.2. 수질 및 저질조사

4.2.1. 수질조사

가. pH, 수온, 염분농도, 용존산소

수질의 분석항목별 분석방법 중 pH는 pH Meter(IQ150)를 이용하여 수질을 현장에서 측정하고, 수온과 염분은 전도도 측정기(YSI-3200)를 사용하여 현장에서 측정하였다.

또한 용존산소(DO)는 윙클러-아지드화 나트륨 적정법을 이용하여 측정하였다.

나. 화학적 산소요구량 (COD ; Chemical Oxygen Demand)

해수중의 화학적 산소요구량은 알칼리성 과망간산칼륨법을 이용하여 측정하였다.

다. 총 질소(T-N)와 총 인(T-P)

총 질소와 총 인은 알칼리성 과황산칼륨 산화에 의한 총질소·총인 동시 분석법으로 분석하였다.

라. 용매추출 유분

해수시료 중의 미량유분을 염화메틸렌 유기용매로 추출한 다음 회전식 증발기를 이용하여 감압상태에서 유기용매를 증발시킨 후 10mL의 노말헥산에 재용해시킨다. 이 용액을 형광분광광도계를 이용하여 여기 파장 310nm와 형광파장 360nm에서 형광세기를 측정하여 유분을 측정한다.

4.2.2. 저질조사

가. pH 측정

양식어장 저질의 pH 측정방법은 채니기로 저질을 30cm 깊이까지 채취하여 저질시료 10g씩을 비커에 담고 5mL의 저층해수를 첨가하여 저질시료와 잘 혼합한 다음 현장에서 즉시 pH Meter로 측정하였다.

나. 강열감량(IL)

강열감량(IL)은 건조시료 10g를 도가니에 정확히 취하여 전기로를 이용하여 550℃에서 4시간 강열한다. 강열 후 데시케이터에서 약 1시간 방냉 후 실온으로 냉각되면 화학저울로 중량을 측정한 후 무게가 일정하게 될 때까지 강열, 방냉, 중량 측정을 반복한다. 결과는 채취한 시료에 대한 감량의 백분율(%)로 나타낸다.

다. 산취발성 황화물(AVS)

산 취발성 황화물(AVS)은 황산 산성 하에서 황화수소를 추출시켜 검지관법으로 측정한다.

라. 화학적 산소요구량(COD)

화학적 산소요구량(COD)은 과망간산칼륨 용액을 이용하여 측정하였다.

4.3. 저질의 유류잔류량 및 유해중금속 조사

4.3.1. 유류잔류량 조사

시료에 외부표준물질을 첨가하여 헥산과 아세톤 혼합용매로 속슬렛 추출물을 농축하여 실리카겔 컬럼으로 정제하고 컬럼을 통과시켜 디이글로로메산과 헥산 혼합용매로 용출된 획분을 농축하여 GC-MS로 시료의 16 PAHs를 분석한다.

4.3.2. 유해중금속 조사

60℃에서 90시간 건조시킨 시료를 여과 및 분쇄한 다음 균질화시켜 고압산분해 방법으로 분해한다. IDMS 분석을 위해 각 분석 원소의 농축동위원소를 첨가하여, 극미량까지 검출이 가능하고 다원소를 동시에 분석할 수 있는 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)로 시료의 유해중금속(As, Cd, Pb, Hg, Cr)을 분석한다.

4.4. 연구어장의 패류 성장도 및 생물상 조사

연구어장에 종패를 살포할 때부터 분기별로 연구어장과 대조어장 내에 분포하는 패류와 기타 서식생물을 대상으로 분기별로 1㎡ 내의 서식밀도와 성장도를 측정하여 생산성 평가 자료로 제공한다.

연구어장과 대조어장 내에 분포하는 생물의 종류와 밀도를 조사하여 경제성 분석 자료로 제공한다.

4.5. 연구어장의 저질 환경개선 방법별 생산성 및 사회·경제성 평가

연구어장의 환경개선 방법별로 분기별 성장도와 밀도를 조사한 생산량과 연구어장의 저질 환경개선 방법에 따른 연구어장 저질의 개선효과를 조사하여 종합적인 경제성 평가를 한다. 분기별로 조사한 생산량과 연구어장저질의 개선효과를 대조어장과 비교 검토하며, 연구어장을 제공해준 어촌계의 어민과 인근지역에서 본 연구에 관심을 갖고 있는 어민을 상대로 어장저질 환경개선에 대한 의견을 수렴하여 “양식어장 환경개선 프로그램”개발에 반영한다.

제 2장. 기존자료조사

1. 기존자료수집 및 분석

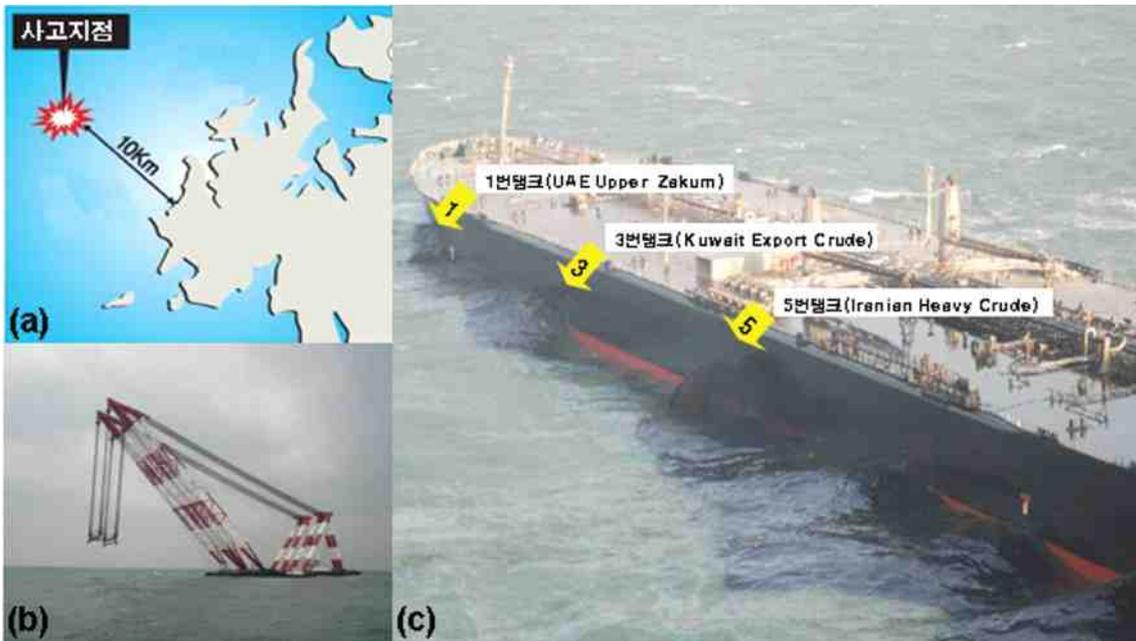
어장환경개선 프로그램은 급격한 환경변화와 연작으로 인한 어장의 노후화에 의해 악화된 환경을 개선하고 어장생산력 증가를 목적으로 하고 있다. 본 연구에서는 어장환경개선 프로그램 개발을 위해 실험실내에 제한된 조건에서 수행되는 연구가 아닌 해양환경 및 어장에 직접적으로 적용하여 수행하는 연구이므로 과거와 현재에 대한 환경조사를 고려하여 시험어장을 설정하고 환경개선 방법별 개선 효과를 검증하였다.

특히, 시험어장에 적합한 조건을 조사하기 위하여 마을어장 및 양식장이 발달하고, 급격한 해양오염과 연작으로 생산량이 감소하는 지역을 우선적으로 조사하였으며, 후보지역에 대한 자료를 수집하고, 비교 분석하여 시험어장으로서의 적합성을 조사하였다. 과거 유류오염 및 어장의 발달과 생산성을 고려하여 충남 태안 지역과 전남 여수지역을 후보지로 선택하였고, 이에 대한 자료를 기 환경분석자료¹⁾를 원용하여 비교분석하였다.

1.1. 충남 태안

충남 태안은 2007년 12월 7일 7시경 대형 크레인선을 예인하던 삼성 T-5호의 예인줄이 절단되면서, 크레인선 삼성1호가 태안군 원북면 신도 남서방 6마일 해상(36-52-00N, 126-02-09E)에서 투묘 중이던 원유운반선 허베이스피리트 (Hebei Spirit)호와 충돌하였다(그림 2-1). 그 결과 허베이스피리트호의 좌현 1번, 3번, 5번 탱크 3개소가 파공되어 각 탱크에 적재되어 있던 아랍에미레이트산 원유(UAE Upper Zakum), 쿠웨이트산 원유(Kuwait Export Crude), 이란산 원유(Iranian Heavy Crude)가 해상으로 유출되었다. 3종류의 원유의 총 유출량은 12,547 kℓ(10,900 M/T; 78,918 Barrels)로 공식 보고되고 있다. 3개 탱크의 파공의 크기는 1번 탱크가 30×3cm, 3번 탱크가 160×10cm, 5번 탱크가 200×160cm 였다. 원유가 유출되기 시작하여 파공 규모가 큰 5, 3번 탱크에서는 약 4시간 30분 만에 대부분이 쏟아졌으며, 1번 탱크는 파공규모가 비교적 작아 12월 8일 야간에 유출이 중단되었다.

1) 해양오염영향조사 및 생태계복원 연구(국토해양부), 씨프린스호 유류오염사고 백서 발체 및 원용.

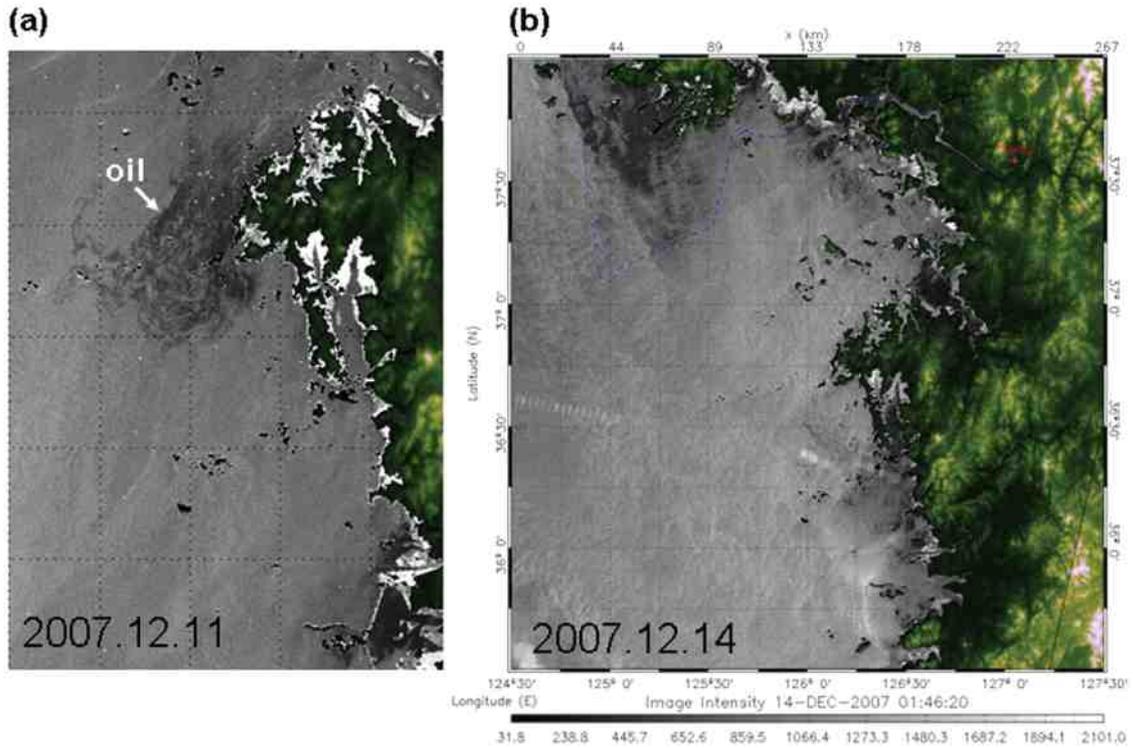


<사진제공: 해양경찰청>

그림 2-1. (a) 허베이스피리트호 유류 유출사고 지점, (b) 허베이스피리트호에 충돌한 크레인선 삼성 1호, (c) 허베이스피리트호(국토해양부, 2008).

유출된 기름은 강한 북서풍의 영향으로 빠르게 해안쪽으로 유입되어, 사고 발생 14시간이 지난 21:10경 태안군 소원면 의항리 구름포 해안에 기름이 유입된 것을 시작으로, 사고 후 4일째에는 학암포에서 파도리 구간 35km가 두꺼운 기름 층으로 오염되었다. 이 후 태안군 남면 지역과 도서지역 등의 해안에 기름덩어리가 유입되었다(그림 2-2). 해안으로 유입되지 않은 일부 기름은 에멀전 및 타르화 되어 해류를 따라 이동하면서 전라도 해안, 도서지역 등을 거쳐 사고 후 31일째(2008. 1. 6)에는 사고해역에서 약 205마일 떨어진 제주시 조천읍 다려도 해안까지 타르볼 유입되었다.

태안반도의 경우 해안지역은 액상형태의 기름이 표착하였으며, 안면도와 충남도 및 보령시의 도서 일부 지역은 액상의 원유와 에멀전(emulsion) 형태로 표착하였고, 나머지 충남도서 지역과 전라남북도의 해안과 도서지역은 에멀전 또는 타르 형태로 해안에 표착하였다.



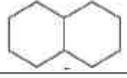
<위성영상제공: 프랑스 CEDRE>

그림 2-2. 허베이스피리트호 유류 유출사고 발생 후 인공위성 영상(국토해양부, 2008).
 (a) 2007년 12월 11일에는 태안 앞바다에서 사고유가 점차 남동방향의 안면도로 확산; (b) 2007년 12월 14일에는 사고유가 에멀전(emulsion)화 되어 인공위성 SAR로 식별되지 않음.

1.1.1. 사고유의 물리·화학적 특성

유출사고로 허베이스피리트호에 적재된 이란산, 아랍에미레이트산, 쿠웨이트산 3종의 원유가 유출되었다. 사고유의 비중은 0.85~0.87이고, 그 주성분은 대부분 탄화수소이며 일부 미량금속을 포함하였고, 원유의 특성상 다량의 휘발성유기탄화수소(VOC)를 함유하고 있어, 사고초기에 사고유의 30~50% 정도 휘발된 것으로 추정된다.

<표 2-1> 원유 내 주요 탄화수소 성분(국토해양부, 2008)

그룹	서브그룹	화합물 예	
포화탄화수소	알칸	부탄	
		헥산	
	시클로알칸	시클로헥산	
		테트라하이드로나프탈렌	
	왁스	고분자 알칸	
방향족탄화수소	BTEX (벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌)	벤젠	
		톨루엔	
	PAH	나프탈렌	
		벤조[a]피렌	
극성탄화수소	레진	티올	-SH
		decanomercaptan	
	아스팔텐	거대극성화합물-구조가 알려져 있지 않음.	

<표 2-2> 허베이스피리트호 유류오염 사고로 유출된 사고유(국토해양부, 2008)

파손탱크 No.	적재유	적재량(kl)	기본 물성		
			비중	점도(cSt)	황분(%)
1번	Upper Zakum (아랍에미리트산)	18,215	0.856	4.8	2.05
3번	Kuwait Export Crude (쿠웨이트산)	25,019	0.868	7.0	2.70
5번	Iranian Heavy (이란산)	18,873	0.870	6.8	1.95

<표 2-3> 사고유내 분석대상 방향족탄화수소 화합물의 농도. 단위:µg/g (ppm); (국토해양부, 2008)

화합물 종류	이란산	쿠웨이트산	아랍에미리트산
BTEX 계열*	9,937	8,673	9,782
US EPA Priority 16 PAHs	277	130	236
Alkylated PAHs	6,763	4,511	8,259

<표 2-4> 사고유내 알킬 PAHs 농도. 단위:µg/g (ppm); (국토해양부, 2008)

알킬PAHs 종류	이란산	쿠웨이트산	아랍에미레이트산
C1-Naphthalene	991	433	790
C2-Naphthalene	1,226	738	1,223
C3-Naphthalene	1,265	806	1,875
C4-Naphthalene	682	471	1,095
C1-Fluorene	207	114	154
C2-Fluorene	114	58.7	87.2
C3-Fluorene	132	84.3	128
C1-Phenanthrene	189	101	180
C2-Phenanthrene	250	152	245
C3-Phenanthrene	167	102	163
C4-Phenanthrene	82.4	67.3	91.2
C1-Dibenzothiophene	370	265	596
C2-Dibenzothiophene	553	505	834
C3-Dibenzothiophene	477	585	749
C1-Chrysene	14.7	7.08	12.1
C2-Chrysene	21.4	10.5	17.4
C3-Chrysene	20.9	10.0	18.7
Total alkylated PAHs	6,763	4,511	8,259

1.1.2. 해수내 유류오염

사고 직후인 2007년 12월부터 조간대 및 조하대 해역의 해수 내 유류오염을 해양연구원에서 조사한 바 조간대 지역의 경우 2007년 12월 초기 광역조사 정점 대부분에서 유류오염에 의한 직접적인 영향이 확인되었다. 태안지역(가로림만~안면도)에 대한 계절별 조사(2008년 1월, 4월, 7월, 10월) 및 주요 7개 정점(학암포, 신두리, 개목항, 구름포, 만리포, 모항, 파도리)에 대한 월별조사 결과, 지역적인 환경특성, 방제상황, 잔존유 재유입 등의 영향으로 2008년 4월까지 해수 중 TPH 농도가 증감을 반복하였다.

<표 2-5> 해수내 유류오염 조사내역(국토해양부, 2008)

구분		조사시기	조사정점 (시료수)	조사항목
조간대	초기 조사	'07.12.11 - 12.23	72 (92)	TPH, 16종 PAHs, Alkylated PAHs
			19	형광 TPH
	월별 조사	'08.01 - '08.12	7	TPH, 16종 PAHs
			30-42	형광 TPH
계절별 조사	'08.01, '08.04, '08.07, '08.10	32	TPH, 16종 PAHs	
조하대	초기 해양조사	'07.12.18 - 12.22	73	TPH, 16종 PAHs
	계절별 조사	'08.01	19	TPH, 16종 PAHs
		'08.04	9	
		'08.07	13	
		'08.10	11	

2008년 6월 이후 해수 내 TPH 농도가 지속적으로 감소하여 2008년 12월 현재 대부분의 지역에서 해역수질 기준(10 ppb) 이하의 농도를 보였다. 그러나 일부 지역(신두리, 구름포, 모항 등)에서는 간헐적으로 TPH 농도가 기준치를 초과하거나, 유막 등이 관찰되어 이에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다. 조간대 해수 내

PAHs는 사고 초기 광역조사 시 최고 1,670 ppt 수준의 높은 농도를 보였으나, 사고 한 달 이후 100 ppt 이하로 그 농도가 급격히 감소하였다. 해수 내 PAHs의 일종인 크리센(chrysene)의 위해성평가 결과, 사고초기에는 미국 EPA의 수질기준(3.8 ppt)을 초과하였고, 그 이후 2008년 6월까지 주요지역에서 기준치를 간헐적으로 초과하였으나, 2008년 12월 에는 기준치 이하였다.

<표 2-6> 사고초기 조간대 해수내 PAHs 조사결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수 (시료수)	16종 PAHs 농도 (ng/L, ppt)		
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값
'07.12	72(92)	8.15 - 5,170	146 ± 585	25.1

<표 2-7> 조간대 해수 중 형광 TPH 월별 조사결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수 (시료수)	형광 TPH 농도(µg/L)			기준 초과 지역 (%)
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값	
'07. 12	19(51)	미검출 - 16,600	678 ± 2,810	14.0	57
'08. 01	30	미검출 - 69.3	9.2 ± 16.4	2.7	23
'08. 02	40	미검출 - 519	51.0 ± 124	2.2	28
'08. 03	41	0.6 - 96.7	7.0 ± 15.1	2.7	15
'08. 04	42	미검출 - 1,760	47.5 ± 271	1.3	14
'08. 06	31	미검출 - 38.7	5.6 ± 10.6	1.0	16
'08. 07	42	미검출 - 26.8	2.1 ± 4.8	0.6	5
'08. 10	42	미검출 - 18.5	1.3 ± 2.9	0.5	2

<표 2-8> 표간대 해수 중 GC-TPH 월별 조사 결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수 (시료수)	TPH 농도 (µg/L, ppb)			기준 초과 지역 (%)
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값	
'07.12	7(29)	116 - 19,800	3,260 ± 7,320	532	100
'08.01	7	4.47 - 172	48.5 ± 65.4	13.1	57
'08.02	7	0.89 - 94.2	31.8 ± 34.8	20.0	71
'08.03	7	0.84 - 56.1	14.2 ± 19.2	8.61	43
'08.04	7	0.21 - 715	104 ± 270	2.08	15
'08.05	7	미검출 - 35.6	5.47 ± 13.3	0.60	15
'08.06	7	미검출 - 122	20.7 ± 44.6	4.78	15
'08.07	7	3.38 - 10.5	6.49 ± 2.63	5.04	15
'08.08	7	1.07 - 9.04	3.21 ± 2.75	2.23	0
'08.09	7	미검출 - 8.63	4.69 ± 3.51	6.24	0
'08.10	7	미검출 - 5.27	2.14 ± 2.18	2.31	0
'08.11	7	미검출 - 48.8	7.76 ± 18.2	18.2	15
'08.12	6	미검출 - 11.3	4.32 ± 4.13	2.87	15

<표 2-9> 조간대 해수내 크리센 농도의 월별 변화 및 미국 EPA 수질기준과 비교 결과(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수 (시료개수)	Chrysene 농도(ng/L, ppt)			기준 초과 지역 (%)
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값	
'07. 12	7(32)	0.50 - 665	57.0 ± 126	13.0	84
'08. 01	7	0.61 - 9.59	3.27 ± 3.76	1.30	29
'08. 02	7	1.02 - 10.7	3.82 ± 3.34	2.35	29
'08. 03	7	0.39 - 4.60	1.28 ± 1.48	0.91	14
'08. 04	7	미검출 - 1.08	0.49 ± 0.35	0.43	0
'08. 05	7	0.29 - 2.98	0.78 ± 0.98	0.40	0
'08. 06	7	0.30 - 6.05	1.29 ± 2.11	0.42	14
'08. 07	7	0.32 - 3.02	1.00 ± 0.95	0.66	0
'08. 08	7	0.23 - 0.77	0.55 ± 0.22	0.51	0
'08. 09	7	0.15 - 0.39	0.26 ± 0.08	0.24	0
'08. 10	7	0.08 - 0.41	0.22 ± 0.11	0.21	0
'08. 11	7	0.22 - 1.73	0.57 ± 0.53	0.36	0
'08. 12	6	0.40 - 0.75	0.48 ± 0.14	0.43	0

1.1.3. 퇴적물 내 유류오염 조사

해양연구원의 자료에 의하면 사고 초기의 조간대 퇴적물 분석결과 유류오염에 의한 직접적인 영향을 확인할 수 있었으며, TPH는 최고 1,630 ppm, 16종 PAHs는 최고 3,350 ppb, 알킬 PAHs는 최고 66,430 ppb까지 검출되었다. 조간대 퇴적물 내 유류오염은 사고 한 달 이후부터 전반적으로 감소하였으나, 해수 및 생물체와 달리 시간 경과에 따른 농도감소 경향은 뚜렷하지 않았다. 한편 해안 표착 유류의 공간적인 불균일성(patchness), 퇴적물의 입도 및 지역별 방제현황 등의 영향에 따라 퇴적물의 유류오염은 조사정점 및 시기별로 큰 차이를 보였다.

<표 2-10> 조간대 퇴적물 중 GC TPH의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수	TPH 농도 (µg/g dw., ppm)		
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값
'07. 12 (사고초기)	22	0.33 - 1,630	100 ± 343	15.2
'08. 01	30	1.16 - 442	59.1 ± 110	8.74
'08. 04	31	미검출 - 175	32.8 ± 50	4.70
'08. 07	31	미검출 - 463	20.0 ± 83	0.84
'08. 10	30	미검출 - 371	15.0 ± 68	0.69

조간대 사질해빈(해수욕장 등)의 유류에 의한 퇴적물의 오염상황을 보다 정확히 평가하기 위하여 모래 공극수 중에 잔류하는 TPH를 분석하였다. 퇴적물 공극수 중의 TPH는 사고 직후 최고 2,320 ppb까지 매우 높은 농도를 보였으며, 2008년 6월까지 최고 1,160 ppb 수준으로 심한 농도변화를 보였다. 해수욕장 개장을 위한 본격적인 해안 방제이후 7월부터 뚜렷한 감소 경향을 보였다. 이후 2008년 10월까지 대부분의 조사정점에서 100 ppb 미만의 상대적으로 낮은 TPH 농도를 보였으나, 지역적으로 오염의 영향이 지속되고 있는 일부지역(구름포 해수욕장 등)에서는 500 ppb 이상의 높은 TPH 농도를 보였다.

<표 2-11> 조간대 퇴적물 중 16PAHs의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수	16종 PAHs 농도(ng/g, ppb)		
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값
'07. 12 (사고초기)	21	1.63 - 3,350	191±726	10.3
'08. 01	30	1.71 - 153	29.1±43	6.93
'08. 04	32	0.79 - 82.1	15.5±21	2.95
'08. 07	31	1.29 - 101	15.7±26	2.31
'08. 10	30	2.25 - 129	17.3±28	3.91

<표 2-12> 조간대 퇴적물 중 알킬 PAHs의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수	Alkylated PAHs 농도(ng/g, ppb)		
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값
'07. 12 (사고초기)	30	1.69 - 66,430	3,540±14,450	55.7
'08. 01	30	1.69 - 4,597	409±1090	20.0
'08. 04	32	0.28 - 1,609	70.2±283	5.73
'08. 07	31	0.90 - 2,060	112±399	2.83
'08. 10	30	5.13 - 3,570	148±649	9.32

유류오염의 시공간 분포를 정밀하게 파악하고자 만리포해수욕장의 퇴적물 공극수 내 TPH 농도를 분석하였다. 공극수 내의 TPH 농도는 3.5 km 해안에 걸쳐 매우 불균일하게 분포하였다. 만리포 해수욕장 퇴적물 공극수 내 TPH 농도는 해안의 밭갈이(tilling), 쇠파대를 이용한 퇴적물 정화(surf washing) 등의 방제현황에

따라 시공간적으로 큰 차이를 보였으나, 전반적으로 상부조간대 및 만리포 남단 지역에서 높은 농도를 보였다.

<표 2-13> 조간대 퇴적물 중 알킬 PAHs의 월별조사 결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수	16종 PAHs 농도(ng/g, ppb)			기준 초과 지역 (%)
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값	
'07. 12	5	31.3 - 4,680	1140±2000	93.04	
'08. 01	7	6.35 - 3,260	549±1200	39.6	
'08. 04	7	0.52 - 112	33.8±46	2.69	
'08. 05	7	2.28 - 4,730	1240±1980	116	
'08. 06	7	6.10 - 2,430	671±1050	10.2	
'08. 07	7	0.90 - 2,060	425±795	2.70	
'08. 08	7	1.05 - 591	213±259	71.3	
'08. 09	7	4.29 - 5190	747±1960	8.47	
'08. 10	7	5.69 - 335	56.6±123	8.78	
'08. 11	7	4.03 - 1320	220±491	5.85	
'08. 12	7	3.17 - 90	16.8±32	4.57	

<표 2-14> 초기 해상 표층퇴적물 중 GC TPH의 조사 결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수	TPH 농도($\mu\text{g/g}$, ppm)		
		최소 - 최대	평균 \pm 표준편차	중간값
'07. 12	73	미검출 - 109	5.92 ± 17.4	2.03

사고 초기 조하대 퇴적물의 TPH는 광역조사 대부분에서 평균 11.8 ppm 농도를 보였으며, 특히 학암포(109 ppm), 만리포(99 ppm), 남면 전방 조하대(최고 24 ppm)에서 상대적으로 높은 값을 보였다. 이후 계절조사에서 조하대 퇴적물의 평균 농도는 11.1 ppm(1월), 2.7 ppm(4월), 1.2 ppm(7월), 0.4 ppm(11월)로 감소하는 경향을 보였다.

<표 2-15> 조하대 표층퇴적물 중 GC TPH의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수	TPH 농도 ($\mu\text{g/g dw.}$, ppm)		
		최소 - 최대	평균 \pm 표준편차	중간값
'08. 01	30	0.30 - 74.8	11.1 ± 15.4	4.62
'08. 04	34	미검출 - 10.4	2.73 ± 3.00	1.56
'08. 07	30	미검출 - 8.73	1.15 ± 1.72	0.70
'08. 11	24	미검출 - 1.83	0.35 ± 0.54	0.14

또한, 조하대 퇴적물의 16종 PAHs와 알킬 PAHs의 공간적 분포 특성 및 시간에 따른 농도 감소 경향은 TPH와 유사하였다. 조사해역의 사고이전 비교 자료 부재로 사고 초기 조하대 퇴적물의 TPH 및 알킬 PAHs 농도 자료로 유류오염 여부를 판단하기 어려우나, 시간에 따른 뚜렷한 농도 감소는 사고해역의 조하대 퇴적물이 사고 초기에 유류에 영향을 받았음을 나타낸다. 이는 해수 표면에서 수층으로 분산된(dispersed) 유류가 조하대 해저 퇴적물에 영향을 미쳤음을 간접적으로

나타낸다.

또한, 조하대 해상에서 저층으로 침강된 유류(submerged oil)의 확인을 위해 채니기(grab)를 이용하여 조하대 퇴적물 내 유지방포를 확인한 결과 2007년 12월 초기 광역조사 시 채니기로 채집된 퇴적물에서 육안으로 식별되는 유지는 관찰되지 않았으나, 2008년 1월 이후 조하대의 계절 및 집중 조사에서는 해안에 근접한 일부 지역(구름포, 모항 등)에서 소형 타르입자와 유막(양수조사 시)이 관찰되었다.

<표 2-16> 조하대 표층퇴적물 중 16PAHs의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수	16 PAHs 농도(ng/g, ppb)		
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값
'08. 01	30	1.57 - 41.8	10.6±11.0	7.86
'08. 04	34	0.21 - 91.0	10.9±18.7	3.82
'08. 07	30	2.42 - 74.3	11.7±15.7	6.41
'08. 11	24	2.15 - 27.0	8.53±6.9	6.85

<표 2-17> 조하대 표층퇴적물 중 알킬 PAHs의 계절조사 결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수	Alkylated PAHs 농도(ng/g, ppb)		
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값
'08. 01	30	0.66 - 129	18.7±28.4	7.86
'08. 04	34	0.01 - 61.3	8.16±14.1	2.77
'08. 07	30	4.01 - 60.4	12.1±11.9	7.95
'08. 11	24	3.25 - 23.2	8.76±5.4	7.99

2008년 10월 신두리, 소근리, 의항리(개목항) 갯벌을 중심으로 표층 및 표층하 유류오염 현황을 집중 조사하였다. 신두리와 소근리 갯벌 상부조간대에서 표층하

잔존유가 확인되었으며, 특히 소근리 갯벌 상·중부조간대 일부 지역에서는 액상상태의 원유가 발견되었다. 개목항에서는 주로 투석식 굴양식장의 암반 하단에서 잔존유가 확인되었다. 잔존유가 확인된 갯벌지역의 퇴적물과 서식생물 내의 PAHs 농도는 조사시기가 2008년 10월임에도 불구하고 사고 초기와 유사한 수준이었다.

<표 2-18> 퇴적물 공극수 중 형광 TPH 월별 조사결과 요약(국토해양부, 2008)

조사시기	정점수	형광-TPH 농도(µg/L)		
		최소-최대	평균±표준편차	중간값
'08.01	28	미검출 - 2,320	195 ± 594	6.7
'08.02	28	미검출 - 1,980	176 ± 428	5.9
'08.03	28	0.6 - 1,920	200 ± 506	7.7
'08.04	28	0.3 - 1,260	122 ± 297	7.0
'08.06	28	1.4 - 1,160	79 ± 240	5.5
'08.08	28	미검출 - 134	16 ± 32	0.9
'08.10	28	미검출 - 694	29 ± 133	0.1

1.1.4. 어패류 내 유류오염 조사

사고 해역에서 이매패류와 어류 등 생물체의 유류오염의 현황 및 시공간적인 분포특성을 조사하였다. 2007년 12월 초기 조간대 조사 결과 굴 체내의 알킬 PAHs 농도는 사고 이전 만리포(2001년, 207 ppb) 대비 약 40-500배 이상 높은 값을 보였다. 2008년 1월 이후 실시된 계절별(30개 정점) 및 월별(7개 정점) 조간대 굴 체내의 알킬 PAHs 농도는 시간의 경과에 따른 지속적인 농도감소를 보였으나, 2008년 12월 현재 주요 7개 정점(신두리 등) 모두에서 사고이전과 비교하여 여전히 높은 값을 보이고 있다. 유지문(oil fingerprinting) 분석결과(이중지수 이용) 굴 체내 잔존 유류는 사고유와 동질유로 판별되어, 2008년 12월 현재 지속적인 사고유의 영향이 확인되었다. 한편 침강유 조사를 위한 형광조사 시 채취된 조하대 일부 정점의 패류(키조개, 피조개 등), 연체동물(꾸꾸미), 갑각류(게) 시료에서

도 사고유의 영향이 확인되었다. 이는 조하대 퇴적물의 유류오염 분석결과와 일치하는 것으로 사고해역의 조하대 저서생물이 사고 초기에 수층으로 분산된 유류에 노출되었음을 나타낸다.

사고 초기 정치망(이각망, 의항리 해상)에서 채집된 어류 근육에서 최고 1,600 ppb의 알킬 PAHs가 검출되어 유류오염의 영향을 확인할 수 있었다. 이후 2008년 1월 이후 월별 조사에서 어류 근육 내 알킬 PAHs 농도는 뚜렷하게 감소하여, 2008년 2월 이후 대조구(거제도)와 유사한 수준으로 감소하였다. 이매패류와 비교하여 어류 근육 내 낮은 알킬 PAHs 농도 및 빠른 농도 감소는 어류의 유류 대사 능력이 반영된 결과이다.

유류 오염지역의 수산물의 섭취를 통한 인체위해성은 유류 성분 중 독성물질인 PAHs의 수산물 내 농도를 벤조[a]피렌 등가치(equivalent)로 환산하여 평가하였다 (미국 환경청 및 식품의약청 방법). 사고해역의 조간대 및 조하대에서 채집된 수산생물의 인체위해성 평가 결과, 조간대 서식 굴은 사고 초기(2007년 12월)에 다수의 정점에서 기준치(3.35 ppb)를 초과하였고, 2008년 3월까지 기준치 초과하는 지역이 존재하였다. 그러나 2008년 4월 이후 조간대 모든 조사 정점의 굴 내 PAHs 농도는 인체위해성 기준치 이하 값을 보였다. 한편 전 조사시기에 정치망, 트롤, 형망 등으로 채취된 조하대 어패류 시료에서는 유류오염의 징후는 있었으나, PAHs 농도는 인체위해성 기준치 이하 값을 보였다.

<표 2-19> 굴 조직 내 PAHs의 계절별 조사결과(국토해양부, 2008)

조사시기	조사정점	굴 조직 내 PAHs 농도 (ng/g dw.)		
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값
'07. 12	초기조사 30 개	91.6 - 1,196	416 ± 315	254
'08. 01	조간대 28 개	118 - 575	226 ± 111	205
'08. 04	조간대 30 개	31.1 - 116	59.8 ± 19.1	53.7
'08. 07	조간대 30 개	29.9 - 110	47.6 ± 16.2	43.2
'08. 10	조간대 29 개	27.7 - 72.7	40.0 ± 11.8	36.0

<표 2-20> 굴 조직 내 알킬 PAHs의 계절별 조사결과(국토해양부, 2008)

조사시기	조사정점	굴 조직 내 알킬 PAHs 농도 (ng/g dw.)		
		최소 - 최대	평균 ± 표준편차	중간값
'07. 12	초기시료 30 개	140 - 106,000	23,200 ± 27,400	11,600
'08. 01	조간대 28 개	550 - 40,567	11,100 ± 10,800	7,120
'08. 04	조간대 30 개	80 - 6,496	1,070 ± 1,460	320
'08. 07	조간대 30 개	40 - 3,601	470 ± 750	140
'08. 10	조간대 29 개	50 - 2,043	370 ± 560	110

1.1.5. 방제작업

사고 직후부터 지역주민 및 자원봉사자들은 해안에 밀려든 기름회수작업을 시작하였다. 2008년 1월 2일까지는 해안 표면에 두껍게 부착되어 재오염의 우려가 있는 기름을 제거하는 1단계 방제작업을, 2008년 1월 3일부터는 해안 표면에 부착된 기름뿐만 아니라 땅속에 스며든 기름까지 제거하는 2단계방제작업이 실시되었다. 작업방법도 직접 퍼담기, 기계적 회수, 닦아내기, 고압세척, 저압세척, 온수 세척, 갈아엎기, 골파기 등의 다양한 방법이 적용되었으며, 시험적으로 기름세정제 및 미생물처리제가 사용되기도 하였다. 자갈해안에 밀려든 기름은 유흡착제나 헝겊으로 직접 자갈이나 바위를 닦아내거나, 온수로 씻어낸 후 파도에 노출시켜 제거했으며, 부두, 안벽, 바위 표면에 말라 붙은 기름은 고압세척기로 제거했다. 전라도 지역의 타르 덩어리는 지역주민들이 동원되어 수작업으로 제거되었다.

사고 이후부터 2008년 10월 2일 기준으로 총 2,131,612명의 인원이 방제에 참여하였으며, 이중 1,226,730명이 자원봉사자였다. 허베이스피리트호 사고는 사안의 심각성 때문에 국민들의 관심이 집중되었다. 자원봉사자들은 사고 2일째부터 전국 각지에서 태안으로 몰려왔으며, 2007년 12월에는 일일 평균 16,300명, 최대 36,029명이 참여하기도 했다. 해당기간 선박은 총 19,864척, 헬기는 34대, 중장비는 포크레인, 세척기, 트랙터 등을 포함하여 총 28,893대가 방제작업에 동원되었다.

2008년 10월 2일 현재 해양경찰청 집계된 액상 폐유 및 고형의 흡착폐기물은

통계는 표 2-1에 나타낸 것과 같다. 물을 포함한 폐유는 해상에서 2,360 kL와 육상에서 1,815 kL가 수거되어 총 4,175 kL, 고형의 형태로 수거된 흡착폐기물은 해상에서 1,034톤과 육상에서 31,013톤이 수거되어 총량은 32,047톤이었다.

<표 2-21> 폐유 수거실적 및 폐기물 발생량(자료출처: 해양경찰청) '08.10.2 기준

합계		해상		육상	
폐유(kL)	흡착폐기물(톤)	폐유	흡착폐기물	폐유	흡착폐기물
4,175	32,047	2,360	1,034	1,815	31,013

1.2. 전남 여수

씨프린스호 좌초사고로 가장 큰 피해를 입은 여수해역은 리아시스식 해안으로서 가막만, 여자만, 여수해만, 광양만 등 반폐쇄성 만이 많이 발달되어 있다. 또한 다도해라 불릴 정도로 수 백개의 섬들이 산재되어 있는 복잡한 해안선을 갖는 해역이다. 해역 수심은 연안에서 30m내외의 수심을 보이며, 외해에서 수심 50m 해역을 중심으로 급격히 깊어지는 양상을 보인다.

씨프린스호가 좌초된 소리도는 당시 행정구역상 전라남도 여천군(남면)에 속하며, 씨프린스호로부터 유출된 기름은 해류와 바람의 영향으로 전남 여천군, 여천시, 여수시 뿐만 아니라 경남 통영, 거제해역을 지나 부산 태종대, 해운대 및 울산과 포항 해안까지 일부 확산되었다. 주요 오염 피해지역인 여천군, 여천시 및 여수시(현재는 여수시로 행정구역이 통합됨) 일대를 대상으로 하여 사고 발생시점인 1995년 당시의 각주요 지역현황을 요약하면 다음과 같다.

당시 행정구역상 소리도 해역이 포함되는 여천군은 남면 연도리(작도), 화정면 여자리, 삼산면 덕촌리, 여천군 율촌면 여동리를 동서남북상의 경계로 하여 127°19'E에서 127°54E(동서간 47km), 34°00'N에서 34°45'N(남북간 87km)에 위치한 총면적 344km²으로, 총 281개의 도서와 796km의 해안선으로 구성된 지역이다. 연평균 14.1℃(-5.9℃ ~ 32.8℃), 연강수량 1,083mm인 해안접안형 지역으로서, 1995년 현재, 총 18,316세대 65,729명이 거주하며, 이중 약 4,901세대 16,334명

이 도서지역에 거주하고 있다. 이중 어업을 하는 세대는 총 4,659세대 약 16,108명이다. 사고당시 여천군의 어선보유 현황을 보면, 동력선 3,085척(누계톤수 13,122톤), 무동력선 290척(354)톤이며, 1995년에 1,207톤, 57억8천만원 상당의 수산물 계통판매고를 보였다(참고: 1994년에는 66억원).

여천시는 낙포동 사포, 해산동 고막, 소호동 송소, 묘도동을 동서남북 경계로 한 127°38'E에서 127°46'E(동서간 15km), 34°40'N에서 34°35'N(남북간 19.6km)에 위치한 총면적 107km²으로, 총 17개의 도서와 65.8km의 해안선을 갖는다. 연평균 15.1℃(-6.6℃ ~ 37.1℃), 연강수량 1,048mm인 해안 접안형 지역으로서, 1995년 현재, 총 20,755세대 74,848명이 거주하며, 이중 563세대 2,250명이 도서지역에 거주하고 있다. 이중 어업을 하는 세대는 총 600세대 약 2,390명이다. 1994년 현재 여천시의 어선보유 현황을 보면, 동력선 754척(누계톤수 1,756톤), 무동력선 63척(58톤)이며, 1994년에 2550톤, 16억원 상당의 수산물 계통판매고를 보였다.

여수시는 수정동(오동도), 신월동, 경호동(넙도), 오천동을 동서남북 경계로 한 127°40'47"에서 127°46'5"E, 34°40'20"N에서 34°48'14"N에 위치한 총면적 45.16km²으로, 총 18개의 도서와 50.2km의 해안선을 갖는다. 연평균 15.1℃, 연강수량 1,008mm인 해안접안형 지역으로서, 1994년 현재, 총 50,643세대 186,005명이 거주하며, 이중 503세대 2,111명이 도서지역에 거주한다. 이중 어업을 하는 세대는 총 2026가구, 9,121명이다. 1994년 현재, 여수시의 어선보유 현황을 보면, 동력선 1,282척(누계톤수 31,072톤), 무동력선 10척(18톤)이며, 1994년에 134,084톤, 1,764억4천만원 상당의 수산물 계통판매고를 올렸다.

씨프린스호 오염사고가 발생한 여수해역의 해안형태를 최근 개발된 환경민감도 지수(ccEnvironmental Sensitivity Index, ESI)의 개념에 의거하여 표현하면 1 ~ 4등급이 우세한 지역으로 대부분 굽은 자갈과 모래가 혼합되거나 해파에 개방된 암벽으로 구성된 해안을 가지고 있다. 그러나 기름의 투과성이 높은 자갈, 굽은 모래 등으로 이뤄진 해안들(ESI 6 ~ 7등급)도 많이 산재되어 있다.

1999년 사고해역 환경조사를 수행한 서울대학교의 연구결과에 따르면(2차환경조사), 사고해역의 해저 퇴적물의 종류는 지역에 따라 달라진다. 여수반도와 남해도 사이의 여수해만 북해역은 사니질 또는 니사질이 우세하며, 돌산도와 금오도 오른쪽 해역은 대체로 니질이 우세한 퇴적상을 보이고 있다.

씨프린스로 사고 이후인 '99~'00년의 4계절에 걸쳐 한국해양연구원에 의해 수행된 연구결과에 따르면(3차 사고해역 환경조사), 여수해역의 조하대 연성저질에서 출발한 크기 1mm 이상의 저서동물은 신타래갯지렁이과에 속하는 *Chaetozone setosa*, *Tharyx* sp. 등 총 237종이 서식하고 있는 것으로 보고되었다. 이들의 평균 서식밀도는 1,284개체/m², 생물량은 170.0/m²였다. 갯지렁이류가 96종으로 전체 출현종수의 40.5%를 차지하며, 개체수에서도 역시 갯지렁이류가 전체의 71.6%를 차지한다. 생물량에서는 극피동물이 전체의 44.3%를 구성한다.

암반에 서식하는 저서동물을 조사한 결과 최대 113종(연목)에서 최소 73종(소리도덕포)으로 지역에 따라 분포차이를 보인다. 서식밀도의 경우 돌산도 방죽포와 여수해만 소치에서 밀생하는 조무래기따개비와 진주담치 치패로 인하여 특히 높은 값을 보였으며, 상대적으로 금오도 연목 등에서 낮은 서식밀도를 보였다. 해조류의 경우 구멍 갈파래, 패, 미역, 툫, 우뚝가사리, 지충이 등 약 60여종 이상의 해조류가 여수해역에 주변 암반부에 서식하는 것으로 보고되었다.

사고해역에 서식하는 어류자원 생태조사에 의하면, 여수해역에는 70종의 어류가 서식한다. 계절별로 28~42종이 출현하며, 가을철이 가장 다양한 종조성을 보이며 반대로 겨울철에 빈약하다. 주요 어종은 주둥치로 총 어획개체수의 26%를 차지한다. 아울러 주둥치 이외에 청멸, 실양태 점줄망둑, 반지, 참서대 등이 우점하는 것으로 나타났고, 여수해역의 생태특성에 관한 상세자료는 씨프린스호 오염 사고 환경조정위원회 주관하에 3차례에 걸쳐 수행된 '여수·여천 해양환경조사 연구보고서'에 제시되어 있으므로 참고할 수 있다.

<표 2-22> 씨프린스호 사고당시 기름 적재량(해양수산부, 2002)

총계(톤)	원유(톤)	벵커A유	벵커C유	비고
88,381	86,886	100	1,395	
○ 여수입항시 적재량 (A)		265,518 톤		
○ 호남정유 부두 양하량 (B)		178,631.8 톤		
○ 태풍 피항시 원유적재량 (A-B)		86,886.2 톤		

<표 2-23> 씨프린스호 사고진행상황(해양수산부, 2002)

시간	주요진행상황
'95/6/24 17:50	씨프린스호, 중동에서 원유선적 후 출항
7/18 22:00	씨프린스호, 여수외항 입항
7/21 16:45	씨프린스호, 호남정유 원유부두에서 화물양하 작업 시작
7/22 16:25	씨프린스호, 태풍 내습예보에 의해 원유 양하작업 중단
18:05	씨프린스호, 원유부두 출항 (원유잔량 : 약 86,886톤)
22:00	여수 외해 세존도 북쪽 3.6마일 해상에 투묘
7/23 10:20	씨프린스호, 2차 피항을 결정하고 양묘 시작 (제주도 서쪽해상을 피항지로 결정, 11:50 시작)
14:05	강풍에 떠밀려 작도(여수 남장 20마일 지점)에 좌초
17:00	씨프린스호, 강풍에 표류하여 소라도 남단에 2차 좌초

1.2.1. 잔존유지의 분포현황

해양퇴적물내 유지의 분포현황에 대한 조사에서 퇴적층의 특징 등 일반적인 사항과 함께 특히 유분의 퇴적층내 분포현황에 대한 정밀조사를 수행하였다. 1차 및 2차 조사에서는 조간대 및 조하대, 그리고 해양 근해역을 대상으로 수행하였으며, 3차 조사에서는 조간대 지역만을 대상으로 하였다.

조간대 지역에서는 굴토조사를 통한 유출유류의 잔존상태 확인 분석과 시료채취가 주로 실시되었고 조하대 지역에는 스쿠바 다이빙을 통해 해저면의 유출유류 오염상태의 확인과 비디오 촬영, 그리고 시료채취가 실시되었다. 근해역 지질조사에서는 다양한 퇴적물 채취기등을 이용하여 해저퇴적물을 채취하여 퇴적물 깊이별로 잔존 유류의 함유여부를 분석하고, 퇴적구조와 조직을 관찰 기재한 후 깊이별

로 분석시료를 채취하여 입도와 환수율, 유기물 함량 등을 분석하였다.

조간대 지역에 대한 제1차 및 2차 조사결과는 대부분의 지역(소리도 덕포, 소횡간도, 금오도 연목 등)에서 유류가 조립질 퇴적물을 통과하여 하부의 기반암 굴곡표면위 퇴적층내에 보존되어 있는 형태를 보여 앞으로도 상당기간 축방이나 하부의 유출없이 잔존할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 다만 금오도 소유지역의 사질 조간대 지역은 높은 투수율과 해류, 파랑의 영향으로 2차 조사에는 1차 조사에 비해 유류잔존층의 분포 깊이가 10~20m정도 하부층으로 침강하였고 잔류농도 또한 훨씬 희석되어 퇴적물내 유류성분이 계속 풍화를 받고 있는 것으로 나타났다.

또한, 2차 조사시에는 화태도의 묘두 부근 조간대 지역과 소리도의 당포해안, 소리도의 연도항 해안에서 새로이 조간대 퇴적층내에 유출유류의 잔존이 확인되었다. 조하대 조사지역에서는 2차 조사결과에서 1차 조사에 비해 유류오염상태가 현저히 감소 했음이 관찰되었다. 화태도 연안 조하대 지역을 제외하고는 Scuba diving을 통해 해저면의 육안관찰을 실시했으나 유출유류의 잔존을 확인할 수 없었으며, 특히 1차 조사에는 대량의 유류잔존물이 발견되었던 소리도 덕포 조하대와 금오도 연목 조하대에서 제2차 조사시에는 유류를 관찰할 수 없었다. 이와 같은 조사결과를 종합해보면 비교적 짧은 시간의 경과(약1년)에도 불구하고 조간대 지역과 조하대 해역에서는 유출유류의 풍화와 분해 , 그리고 하부 퇴적층으로의 침투가 빨린 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 암반층이 광범위하게 분포하는 일부 조간대 지역(소리도 덕포해안, 금오도 연목지역)과 이질 퇴적물이 분포하는 조간대 지역(소리도 당포 및 화태도 묘두해안)에서는 이미 분포하고 있는 잔존유류가 축방이나 하부로 이동하는 것이 제한되어 오염상태가 유지되어 있었으며, 이러한 결과를 통해서 인위적인 방제를 실시하지 않는 한 차후에도 상당한 시간동안 이러한 상태가 지속 될 것으로 추정되었다.

근해역 해저 퇴적물층에서는 1차 조사시에만 일부 지역에서 1cm 두께의 얇은 유질층이 발견되고 다른 지점에서는 직접적인 잔존 유출 유류의 징후는 나타나지 않았다. 이러한 현상은 해안에 가까운 해역일수록 퇴적물의 입도가 조립해지는, 즉 해류의 유속이 빠른 것으로 추정되어 잔존 유류가 분산되었기 때문이라 여겨졌다.

'96~'97'년의 1차 조사에 이어 '99~'00'의 3차 조사에서는 조간대 지역만을 대상으로 하여 잔존 유류 확인 조사를 수행하였다. 씨프린스호 오염당시 유출유가 해안에 부착한 지역들을 대상으로 하여 총 233개 지점에서 육안으로 잔존 유류

출현 여부를 확인하고, 오염우려가 있는 지역을 포함하여 퇴적물 표품을 총 38개 채취하여 분석기관에 의뢰하였다. 그 결과, 소항간도에서 패각 사질층에 고형화 된 탄분이 사층에 잔존하였고, 금오도 연목에서는 바위 하부를 파을 때 몇 개 지점에서 검은 점 또는 필름 형태로 유분이 물위에 뜨는 것을 발견하였다.

3차 조사에서 일부 조간대 퇴적물을 대상으로 다환방향족탄화수소(PAHs)의 농도를 측정된 결과, 소유와 연목의 일부 퇴적물에서 그 농도가 20 ng/g dw 또는 800 ng/g dw 정도 검출 되었으며 기타지역은 낮은 농도값을 보였다.

1.2.2. 잔존 유류의 풍화

잔존유류의 특성변화를 살펴보기 위해 금오도 연목 해역에서 채취한 잔존유류의 성분비를 조사한 결과, 총 PAHs의 양은 177~398 ppm TSEM의 범위를 보였는데, 시간에 따른 감소양상은 나타나지 않았다. 그리고 고분자량의 PAHs의 비율증가와 알킬화된 PAHs의 분포양상으로 PAHs의 총량에 관계없이 잔존유류의 풍화는 계속되고 있음을 확인할 수 있었다.

1.2.3. 환경 및 생물체내 PAHs의 농도수준 및 기원

3차 조사에 조하대 퇴적물내 PAHs를 분석한 결과, 소리도 부근에서 57 ppb로 가장 낮았으며, 금오도 부근이 137 ppb, 여수 소치부분이 124 ppb로 전체적으로 1, 2차 조사보다 낮은 값을 보였다. 금오도 연목 인근 조하대에서 최고 85 ppb로 다른 지역의 총 PAHs 농도보다 높았으며, PAHs 조성 또한 달라서 이 지역에서 잔존유류의 조하대 이동가능성을 나타냈다. 연목 부근을 제외한 다른 조하대 해역에서는 총 PAHs의 농도수준이 낮았고, 조성에 대한 분석결과 잔존유류가 조하대에 퇴적된 징후는 없었다. 이들 PAHs의 유입원을 알아보기 위하여 오염원 판별지수를 분석한 결과 여수해역내 PAHs는 유류오염 기원뿐만 아니라 산업형 연소기원에 의해서도 유입되고 있음이 발견되었다.

조하대 해수내 PAHs 농도를 분석한 결과 전체적으로 하계에는 0.24 ~ 0.33 ppt, 추계에는 0.05 ~ 0.14 ppt 농도수준으로 1, 2차 조사결과와 비슷한 농도범위를 보였다. 소리도의 덕포와 금오도 연목 인근해역이 주변해역에 비해 높은 농도를 보였다. 소리도의 덕포와금오도 연목 인근해역이 주변해역에 비해 높은 농도를 보였다. PAHs의 조성분석을 수행한 결과, 용해도가 높은 나프탈렌과 저분자량

PAHs가 총 PAHs의 대부분을 차지하였으며, 일부 고분자량 PAHs의 비율이 용해도와 사고유 구성성분비에 높아서 해역내 PAHs의 기원은 사고 유류와 산업형 연소기원이 서로 혼재 되어 있는 것으로 나타났다.

조간대 생물체내 축적된 PAHs 분석결과, 소리도 덕포의 담치류에서 평균 183 ppb로 가장 낮았으며, 금오도 소유와 연목 정점에서 각각 465 ppb, 339 ppb로 다른 지역보다 높았다. 다른 지역은 대조구인 방죽포와 비슷한 농도구배(약 200 ppb)를 보였다. 당시 3차 조사에서는 총무 등다른 지역에서 채취한 굴을 사고지역으로 이식하여 체내 PAHs의 변화특성을 살펴보고자 하였는데, 그 결과 처음 340 ppb인 굴의 체내 PAHs 함유량이 여수해역으로 이식된지 2달만에 171 ppb로 오히려 감소하는 현상이 나타났다. 이러한 결과는 소리도가 총무 굴 양식장보다 오히려 오염도가 낮음을 보여주는 것이었다. 생물체내에 축적된 PAHs의 조성은 해수와 비슷하였으며, PAHs 유입원을 파악하고자 오염원 판별지수 분석결과 99년 동계 이후 유류기원 성분비가 높아지고 있는 것으로 나타났다. 여수해역에서 채취한 어류 담즙내 PAHs 대사산물을 분석한 결과, 대체적으로 생물체내 PAHs의 기원은 산업형 연소기원 PAHs임이 나타났다.

1.2.4. 사고해역내 잔존 PAHs의 독성화학적 특징

1999년 3차 조사에서 독성화학적 접근분석을 통해 사고해역으로부터 유입된 PAHs가 풍화과정을 거치면서 그 조성이 변화되고 있으며, 금오도 연목인근 해역을 제외하고는 조간대에 표착된 유류의 조하대 이동에 관한 징후는 나타나지 않았다. 아울러 씨프린스호 사고발생 4년이 경과된 시점에서 여수해역의 퇴적물, 해수, 생물체내 PAHs의 총농도 수준은 금오도를 제외하고는 낮은 수준으로써 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 당시 측정된 PAHs의 기원은 대체적으로 사고유 뿐만 아니라 여수 및 여천의 공단에서 유입되는 연소기원 PAHs가 상당부분 차지하고 있는 것으로 나타났다. 당시조사팀은 특히 금오도 연목 인근해역에서 조간대 부착유분이 조하대로의 이동현상이 의심되고 아울러 다른 지역에 비해 특히 높은 PAHs의 농도치를 보이고 있기에 차후에도 지속적인 모니터링이 필요하다라는 의견을 제시하였다.

1.2.5. 방제작업

- 해상방제-해양경찰청주관
 - 사고선 주변의 오염이 심한 해역은 방제정, 대형 기름회수기(트롤스키머, 스크류키머등) 등을 이용하여 유출유를 기계적으로 회수하고 아울러 흡착재에 의한 흡착제거에 주력
 - 얇은 유막과 광범위하게 확산된 기름은 선박 및 항공기에 의한 유처리제 살포 방제
 - '95. 8. 11 해상방제완료
 - 해양방제 : 호유해운측 주도, 전남도(여천군) 및 경남도 감독
 - 초기단계 : 경찰기동대, 육군장병, 자원봉사자 지원으로 포착유 제거
 - 호유해운 : 주민 동원하여 본격적으로 방제작업 수행(수작업 의존)
 - 연안으로 밀린 기름층은 회수기 등에 의해 기계적 수거
 - 방파제 암반 등 인력작업 불가지역의 표착기름은 고압세척기 이용
 - '95. 1.. 27. 소리도 등을 제외한 대부분 지역에서 방제작업 완료
 - 가장 오염이 심했던 소리도 덕포해안 등은 .01년까지 추가작업 실시

<표 2-24> 씨프린스호 해안방제 작업일지(해양수산부, 2002)

구분	기간	지역
1차 작업	95.07.26~11.17	●전남 전지역 여수 돌산도, 남면동 해안가 26.9km ●경남 남해도, 거제도 일부해안 10.6km ●부산 및 울산 해운대, 태종대, 울산 일부해안가 15.7km
2차 작업	96.04.01~07.17	●여수 남면 소리도 덕포해안
3차 작업	98.03.25~04.14	●여수 남면 소리도 당포, 금오도 소유해안, 소횡간도
4차 작업	99.04.29~05.01	●소리도 남포 덕포, 금오도 소유, 연목, 소횡간도, 대횡간도, 화태도, 나발도
5차 작업	01.10.29~11.19	●여수 남면 소리도 덕포해안

<표 2-25> 씨프린스호 동원인원 및 장비(해양수산부, 2002)

기관별	인원	장비		방제기자재			
		선박 (척)	항공기 (대)	유화수기 (대)	오일펜스 (m)	유흡착재 (kg)	유처리제 (톤)
계	166,905	8.295	45	126	13.766	239.678	717.6
해경	15,525	826	21	120	864	65.514	302.5
항만청	750	80	-	2	200	745	10.6
국방부	12,674	159	5	-	470	9.580	19.5
기타기관	7,916	335	17	-	-	25.490	21.7
호남정유 (어민)	130,040	6.895	2	4	12.232	138.349	363.3

2. 후보지역의 비교

환경보고서와 방제작업에 대한 기준 및 오염정도를 조사하여 충남 태안과 전남 여수지역을 비교하였다. 두 지역 모두 대규모 유류오염에 의하여 생태계, 지역 산업 및 수산업이 지대한 피해를 입었고, 방제작업을 위해 많은 비용과 노력이 투입되었다.

전남 여수지역은 유류오염의 발생시기가 1995년으로 상당한 시간이 경과되었고, 방제이후 생태복원을 위해 지속적인 노력을 기울여 현재는 생태계와 수산업의 생산성이 비교적 회복되었다고 판단된 반면 충남 태안 지역은 2007년 12월 발생하여 전남 여수에 비하여 최근에 오염된 지역이고, 전세계적 관심속에 막대한 자원봉사자 및 방제인원이 투입되어 단시간에 방제작업을 마쳤음에도 불구하고 정제유가 아닌 원유의 유출로 더욱 큰 피해가 있었다.

따라서 본 연구에서는 비교적 최근에 급격한 환경오염과 연작으로 노후화된 충남 태안지역 어장에 시험어장을 설정하였다.

<표 2-26> 충남 태안과 전남 여수의 유류유출 비교

	충남 태안	전남 여수	비고
유류오염시기	2007.12.07	1995.07.23	
유출유류의 종류	원유(3종)	원유, 벙커A유, 벙커C유	
유출량	12,547 kl	86,886.2 t	
사고원인	선박 충돌	태풍으로 인한 좌초	

3. 시험어장의 설정

과거 환경조사결과와 지역환경을 고려하여 충남 태안지역의 어촌계 및 태안군청에 의뢰하였고, 현장답사 및 사전조사를 실시하였다. 시험어장의 기준은 유류오염 및 생산성이 감소한 노후어장이므로 이에 대한 지역현황을 자세히 알고 있는 어촌계장에게 설명을 하고 참여를 유도하였다. 이에 2010년 3월 태안군청 어촌계장 회의에 참석한 태안군 어촌계장 및 태안군청, 충남도 태안수산사무소 관계자 등에게 본 연구사업에 대한 개요 및 프로그램별 적용과 대상생물 등을 어촌계장에게 설명하였으며, 이 중 태안군 이원면 당산리 활곡어촌계, 태안군 소원면 파도어촌계, 의항2구어촌계, 법산어촌계, 태안군 근흥면 죽정3리 갈음이어촌계에서 참여를 희망하였다.

2010년 5월 본 연구과제가 개시됨과 동시에 각 참여 어촌계에 협조를 요청하였으나 어장환경 개선방법에 따라 이견이 있어 태안군내 파도어촌계와 의항어촌계를 우선 선정하여 어장환경개선 프로그램을 적용 실시하였다.

시험어장의 현장답사를 실시하여 적합한 어장환경개선 프로그램을 적용하기 위하여 저질의 성상, pH를 조사하고, 과거 주요 수산물을 설문조사하였다. 파도어촌계에서 제공한 시험어장은 패각편이 다량 함유된 사니질이었으며, 저질에서 용출된 해수의 pH는 7.42~7.47 이었고, 과거 바지락 생산지였으나 유류오염 및 환경악화로 생산성이 없어져 대부분의 어민들이 어촌계내 타 어장에서 어로활동을 하고 있었다. 의항2구어촌계 제공한 시험어장 역시 패각편을 다량 함유하고 있었으나 저질의 성상은 니질이었으며, 저질에서 용출된 해수의 pH는 7.58 이었으나 입어가 어려울 정도의 환경이었고, 선착장과 생활하수의 배출구가 같이 있는 지역으로 어장환경개선 프로그램 적용에 적합하지 않은 지역이었다. 따라서, 파도어촌계에 2개 시험어장을 설정하고, 어장환경개선 프로그램을 적용하여 연구를 실시하였다. 이후 지속적인 협의를 거쳐 파도어촌계를 포함한, 송현어촌계, 신덕어촌계, 법산어촌계에서 참여의사를 밝혔으며, 각 어촌계에 시험어장 및 각각 어촌계의 특성을 조사하여 2010년 7월 각 어촌계에 시험어장을 설치하였다(그림 2-3). 또한, 2010년 9월 어장환경개선 프로그램 개발 연구관련 협의회에서 허베이스피리트호 1차 피해지역인 태안군 학암포, 신두, 천리포, 만리포, 모항 등에 추가 어장 신설요구에 따라 2010년 10월 각 어촌계장과 연락하여 협의를 진행하였으며, 그 중 허베이스피리트호 유류유출과 가장 근접한 학암포어촌계에 2010년 11월 추가로 신설하였다(그림 2-4~8; 2-9).



그림 2-3. 어장환경개선 프로그램 개발 태안군 어촌계 협의 및 시험어장 시설.



- 어촌계원: 91명
- 어촌계 주요 저질 구성: 모래, 펄, 일부 암반
- 주요생산품종(신고어업포함): 굴, 바지락, 해삼, 전복
- 마을어장품종: 굴, 바지락, 해삼, 전복
- 조사정점: N 36°53'59" E 126°12'01"
- 조사정점 pH: 7.38
- 유류사고 이후 현황: 현재 회복되고 있으나 약 60%정도 회복 예상
- 시험어장에 대한 의견
 - 바지락 관련된 어장환경개선을 기대함
 - 조사정점지역에 시험어장 설치가 가능함을 시사
- 기타사항
 - 주요 토착어종인 놀래기과 어류가 피해 이후 60%이상 감소
 - 마을공동어장의 생산성 향상을 위한 대책이 필요하다고 강조

그림 2-4. 학암포어촌계 협의 및 조사전경.



- 어촌계원: 약 150명
- 어촌계 주요 저질 구성: 모래, 펄
- 주요생산품종(신고어업포함): 굴, 바지락
- 마을어장품종: 굴, 바지락
- 조사정점: N 36°49'41" E 126°10'34"
- 조사정점 pH: 7.36
- 유류사고 이후 현황:
 - 마을 공동어장은 유류사고 이전 굴양식이었으나 사고 이후 철거함
 - 굴양식시설물 철거 후 모래가 유입(자연유입), 바지락 서식이 관찰
 - 2010년 바지락 생산량이 급증하여 바지락 생산량 확대를 위해 바지락 종패도 살포하였고, 마을 공동어장도 유류피해 이후 바지락양식장으로 변경하였으며, 굴양식장은 2010년 신청하여 시설 중
- 시험어장에 대한 의견
 - 신두어촌계는 학암포어촌계에서 분리된 어촌계로 관리 어장구역이 좁고 현재 바지락 생산량 및 모래유입이 지속적으로 증가하고 있어 시험어장의 설정에 대해서는 어촌계원과 상의 후 내용에 대한 토의를 하자고 함
- 기타사항
 - 조사정점은 본래 펄 지역이었으나 모래저질로 바뀌었음
 - 신두에서 관리하는 어장 구역 중 조간대 상부 상시 노출지역과 조간대 중하부를 나누어 상부쪽은 사유지, 중하부는 어촌계 관할을 하고 있어 시험어장의 설정시 사유지 관련된 협의가 요구됨

그림 2-5. 신두어촌계 협의 및 조사전경.



- 어촌계원: 64명
- 어촌계 주요 저질 구성: 암반, 일부 모래(fine sand)
- 주요생산물종(신고어업포함): 해삼, 전복, 굴, 홍합
- 마을어장품종: 해삼, 전복, 굴
- 조사정점: N 36°48'01" E 126°08'56"
- 조사정점 pH: 7.96
- 유류사고 이후 현황:
 - 사고 이후 현재 약 60% 수준의 생산량이
 - 간조시 조하대 부근에서 기름띠가 가끔 관찰됨
- 시험어장에 대한 의견
 - 천리포 어촌계는 암반저질이 대부분이며, 강한 해수유동과 파도 및 바람의 영향으로 여타의 저질(모래, 황토 및 투석) 및 객토의 효과가 낮을 것으로 예상
 - 특히, 약 직경 20-30cm 정도의 암석도 해수 유동에 의해 쓸려간다고 함
 - 닭섬을 기준으로 형성된 마을어장에 해삼, 전복을 나잠으로 생산하고 있어 투석 방식에 의한 어장생산성 향상을 바라고 있음
- 기타사항
 - 환경의 영향(암반저질 및 강한 해수유동)으로 주 어업이 어선어업에 치중됨
 - 주요 토착어종인 놀래기과 어류가 피해 이후 60%이상 감소
 - 해수욕장사업 관련하여 여타의 암석을 제외한 기타 저질의 살포 또는 객토에 대해서는 우려함
 - 투석식 개선에 관심이 있으며, 시설에 대해서는 협의가 필요하다고 함

그림 2-6. 천리포어촌계 협의 및 조사전경.



- 어촌계원: 30명
- 어촌계 주요 저질 구성: 암반, 일부 모래(fine sand)
- 주요생산품종(신고어업포함): 해삼, 전복, 굴, 홍합, 낙지
- 마을어장품종: 해삼, 전복
- 조사정점: N 36°47'04" E 126°07'57"
- 조사정점 pH: 8.12
- 유류사고 이후 현황:
 - 사고 이후 현재 약 50% 수준의 생산량
 - 방파제 안쪽 및 간조시 조하대 부근에서 기름띠가 가끔 관찰됨
- 시험어장에 대한 의견
 - 만리포 어촌계는 암반저질이 대부분이며, 강한 해수유동과 파도 및 바람의 영향으로 여타의 저질(모래, 황토 및 투석) 및 객토의 효과가 낮을 것으로 예상
 - 마을어장에 해삼, 전복, 담치류를 나잠 및 신고어업으로 생산하고 있어 투석 방식에 의한 어장생산성 향상을 바라고 있음
- 기타사항
 - 환경의 영향(암반저질 및 강한 해수유동)으로 주 어업이 어선어업에 치중됨
 - 또한, 해수욕장 사업이 활성화되어있어 이에 차질을 미칠 수 있는 어장환경개선 방식은 생업에 문제시 생각함

그림 2-7. 만리포어촌계 협의 및 조사전경.



- 어촌계원: 140명
- 어촌계 주요 저질 구성: 암반지역이며, 그 위에 펄이 쌓인 형태
- 주요생산품종(신고어업포함): 해삼, 전복, 굴, 홍합, 톳, 미역
- 마을어장품종: 해삼, 전복
- 조사정점: N 36°46'32" E 126°07'52"
- 조사정점 pH: 8.34
- 유류사고 이후 현황:
 - 사고 이후 현재 약 30-40% 수준의 생산량이며, 현재도 기름띠가 관찰되는 곳이 있으며, 방파제나 암석 틈 사이에는 남아 있다고 함
- 시험어장에 대한 의견
 - 모항 어촌계는 암반저질이 대부분이며, 강한 해수유동과 파도 및 바람의 영향으로 여타의 저질(모래, 황토) 및 객토의 효과가 낮을 것으로 예상
 - 마을어장에 해삼, 전복, 담치류를 나잠 및 신고어업으로 생산하고 있어 투석 방식에 의한 어장생산성 향상을 바라고 있음
 - 조사지역은 만의 형태를 띠고 있어 투석식 개선방식에 대한 긍정적 효과를 기대하고 있으며, 본 지점에 시설할 경우 적극적으로 협조할 예정
- 기타사항
 - 환경의 영향으로 주 어업이 어선어업과 마을어업(전복, 해삼)에 치중됨
 - 주요 토착어종인 놀래기과 어류가 피해 이후 60%이상 감소
 - 시험어장으로 추천하는 지역은 기존에 전복, 해삼양식이 추진되는 마을어장내로 5년 이상 지속적으로 유지하고 있으며, 이에 대한 시설추가가 더욱 요구되기에 투석식 개선방식에 적극적으로 유치하고자 함

그림 2-8. 모항어촌계 협의 및 조사전경.

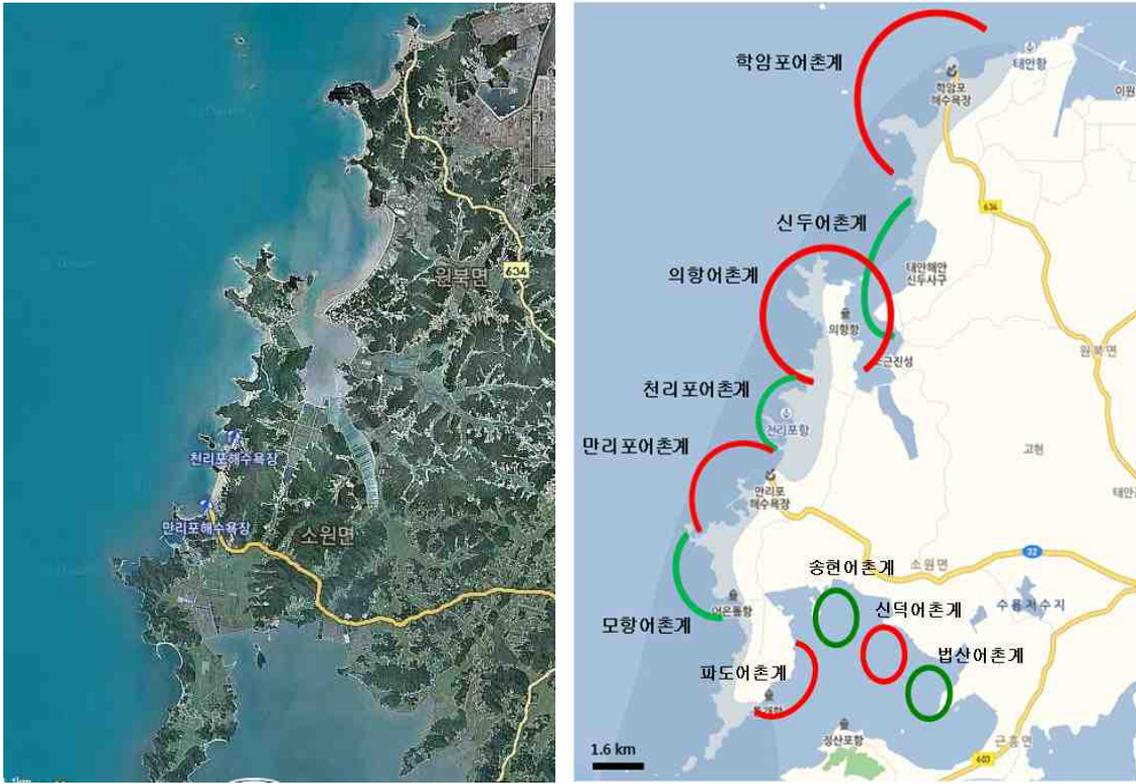


그림 2-9. 태안군내 협의 어촌계 관할 지역 모식도.

4. 어장환경개선 프로그램 적용

어장환경개선 프로그램개발을 위하여 태안군내 어촌계와 협의하여 선정된 파도어촌계, 송현어촌계, 신덕어촌계 및 법산어촌계에 각 어장환경개선 프로그램별 방법을 적용하였으며, 2010년 9월 농림수산식품부 협의에 따라 근소만내 지역을 제외한 유류피해 외해지역인 학암포어촌계, 신두어촌계, 천리포어촌계, 만리포어촌계, 모항어촌계와 협의하였으며, 이 중 학암포어촌계와 협의하여 추가로 2010년 11월에 시험어장을 신설하였다.

각 시험어장에 시설한 어장환경개선 방법은 모래살포, 경운, 객토, 저질개선제 살포 및 복합적인 방법을 각각 시험어장에 적용하였다(<표 2-27>). 본 연구에서는 황토살포가 포함되어 있었으나 참여하는 모든 어촌계에서 주요 수산물의 생태 및 생산량 감소를 우려하였으며, 황토살포시 어장환경개선 프로그램에 불참을 통보하여, 이를 농림수산식품부에 보고하여 황토살포를 제외토록 하였다.

참여 어촌계는 대부분 바지락이 주요 생산종이었으며, 저질은 학암포어촌계를 제외한 어촌계가 사질과 니질이 섞인 상태였고, 시험어장에 대한 사전조사에서 저질 pH가 7.8이하로 오염과 노후화가 심화되어 어로활동이 거의 이루어지지 않는 어장이었다. 각각의 개선방법 중 모래살포와 객토를 가장 선호하였고, 저질개선제(<표 2-28>)의 사용에 대하여는 우려를 표명하였으나 협의과정을 통하여 개선방법 타당성을 제시하여 설정하였고 각 어장에 적용한 환경개선 방법은 <표 2-29>와 같다. 각 시험어장에 적용한 어장환경개선 방법은 과업이 시작된 후 현장조사에서 저질환경과 저서생물의 총출현종수 및 출현량에 기준하여 적용하였다.

<표 2-27> 어촌계별 시험어장 환경개선 적용

어촌계	어장환경 개선방법	비고	
파도어촌계	모래살포+객토	대상어장 환경상태	저질형성 퇴적물 유출현상: 사니질, 니사질 퇴적물환경 파악: pH 7.56 유용생물 지표종 유무조사: 과거 바지락 서식 오염지표종 유무관계: 2종 총출현상수: 3종 총출현량: 225개체
		개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무(비교 여부) 오염지표종 유무
	모래살포+ 저질개선제+객토	대상어장 환경상태	저질형성 퇴적물 유출현상: 니사질 퇴적물환경 파악: pH 7.46 유용생물 지표종 유무조사: 과거 바지락 서식 오염지표종 유무관계: 1종 파악 총출현상수: 4종 총출현량: 200개체
		개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무 오염지표종 유무
송현어촌계	모래살포+객토	대상어장 환경상태	저질형성 퇴적물 유출현상: 사니질, 니사질 퇴적물환경 파악: pH 7.56 유용생물 지표종 유무조사: 과거 바지락 서식 오염지표종 유무관계: 2종 총출현상수: 9종 총출현량: 450개체
		개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무(비교 여부) 오염지표종 유무
신덕어촌계	모래살포+ 저질개선제+객토	대상어장 환경상태	저질형성 퇴적물 유출현상: 니사질 퇴적물환경 파악: pH 7.46 유용생물 지표종 유무조사: 과거 바지락 서식 오염지표종 유무관계: 1종 파악 총출현상수: 4종 총출현량: 125개체
		개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무 오염지표종 유무
법산어촌계	경운	대상어장 환경상태	저질형성 퇴적물 유출현상: 니사질 퇴적물환경 파악: pH 7.65 유용생물 지표종 유무조사: 과거 바지락 서식 오염지표종 유무관계: 3종 총출현상수: 8종 총출현량: 600개체
		개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무 오염지표종 유무
학암포어촌계	저질개선제+객토	대상어장 환경상태	저질형성 퇴적물 유출현상: 사질 퇴적물환경 파악: pH 7.38 유용생물 지표종 유무조사: 과거 바지락 서식 총출현상수: 2종 총출현량: 1,775개체 2010년 11월 신설 시험어장
		개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무

<표 2-28> 저질개선제(특허 제0477316호, 상표등록 제0571277호; 황금어장2) 성분분석표

성분	분석기관	국립수산과학원의 성분분석 결과(%) (2003. 12. 26) 용도 : 수질 개선용	한국기기유화시험연구원의 성분분석 결과(%) (2005. 11. 21) 용도 : 저질 개선용
SiO ₂ (규산)		2.4	3.08
MgO(산화마그네슘)		10.4	11.9
Fe ₂ O ₃ (산화철분)		0.4	0.477
CaO (산화칼슘)		84.7	80.2
Al ₂ O ₃ (산화알루미늄)		1.5	2.73
P ₂ O ₅ (린산)		-	0.0518
K ₂ O (산화칼륨)		0.1	0.247
TiO ₂ (티탄산염)		-	0.136
MnO (산화망간)		-	0.0382
SO ₃ (황산)		0.3	0.644
RuO ₂ (루데늄염)		0.2	-
Na ₂ (나트륨염)		-	0.322
Cl (염소)		-	0.162
SrO(스트론튬염)		-	0.0578
ZrO ₂ (지루코늄염)		-	0.0072
Cu (구리)		-	-
Pb (납)		-	-
Zn (아연)		-	-
Cd (카드뮴)		-	-
Y ₂ O ₃ (이도리움염)		-	0.0019
합 계 (%)		100.0	100.0
주 성분		칼슘(CaO)	칼슘(CaO)
MgO(산화마그네슘)함량		10.4	11.9
1.0% 용액의 pH		11.98(살포 직후, 10톤/ha)	11.98(살포 직후, 10톤/ha)
0.1% 용액의 pH		10.30(살포 3분 후, 1톤/ha)	10.30(살포 3분 후, 1톤/ha)

주 ; 국립수산과학원의 성분분석 결과는 “민간개발 적조구제 물질의 기초 현장실험”을 2003년 9월 6일에 실시하고 실험결과를 통보받은 내용(문서번호 유해53520-568, 시행일 2003. 12. 26) 중 현장실험에 사용했던 적조 구제물질의 성분 분석 결과임.
; 한국기기유화시험연구원(서울시 강남구 신사동 587-10)의 성분분석 결과는 2005년 11월 21일 통보 받은 내용임.

<표 2-29> 시험어장에 적용한 어장환경개선 방법

어촌계	어장환경개선 방법	적용방법	비고
파도	모래살포+객토	모래살포: 깊이 5cm 객토: 깊이 15cm, 모래살포 후 24~48시간 후	
	모래살포+저질개선제+객토	모래살포: 깊이 5cm 저질개선제: 1pH/t/0.1ha, 모래살포 후 간조시 객토: 15cm, 모래살포 후 24~48시간 후	
송현	모래살포+객토	모래살포: 깊이 5cm 객토: 깊이 15cm, 모래살포 후 24~48시간 후	
신덕	모래살포+저질개선제+객토	모래살포: 깊이 5cm 저질개선제: 1pH/t/0.1ha, 모래살포 후 간조시 객토: 15cm, 모래살포 후 24~48시간 후	
법산	경운	경운: 15cm	
학암포	저질개선제+객토	저질개선제: 1pH/t/0.1ha, 모래살포 후 간조시 객토: 15cm, 저질개선제 살포후 즉시	

5. 국내외 연구동향

연안역은 접근의 용이성과 높은 생산성으로 과거부터 인간의 활동이 가장 활발하여 육상기인 오염물질과 선박기인 오염물질의 유입이 쉽게 이루어지고 있다. 지속적인 오염원의 유입과 증가하는 부하량은 부영양화 및 어장노화를 촉진시키고, 연안퇴적물에 축적되 해양생태계가 회복하기 힘든 환경으로 변화시키며, 연안수질의 악화는 물론 저서생태계 파괴의 직접적 원인을 제공하고 있다(이 등, 2004). 특히, 1980년대 이후 경제발달에 따라 유류소비가 증가하여 국내 유입되는 원유는 기하급수적으로 늘어났다. 대부분의 원유가 해상을 통해 유입되었으며 이에 따라 원유유출에 의한 사고 역시 증가하였다. 국가적 시책에 따라 안전교육과 방제대책이 실시되어 매년 감소하고 있으나 유류유출사고는 씨프린스호, 허베이스피리트호와 같이 막대한 국가적 손실을 초래한다. 해양에서 기름이 유출되면 수 mm 두께의 유막을 형성하고 해수면 표면에 퍼져 나가면서 휘발성 성분들은 유출이후 빨리 대기 중으로 휘발하게 된다(Cormack, 1999). 예를 들어 Exxon Valdez 호 사건으로 누출된 유류 35,000톤 중 적어도 30% 이상이, 240,000톤이 유출된 Amoco Cadiz 사건의 40% 정도가 대기 중으로 휘발되었다고 추정되었다(Kingston, 2002; Spies, 2007). 따라서, 유류유출사고는 해양환경 뿐만 아니라 대기 및 생태계에 지대한 영향을 미친다.

최근 선진국에서는 유류유출에 대한 방제를 위해 물리(경작, 준설 등)·화학적(유처리제 등) 대책 및 생물학적 대책에 많은 연구를 진행하고 있다. 물리·화학적 방제 대책은 국내에 많은 부분 들어와 시행되고 있으나 화학적 방제방법은 2차적 생태파괴의 문제를 야기할 수 있으므로 사용이 제제되고 있다. Swannell 등(1996)에 의하면 생물정화기술은 물리적·화학적 유류제거방법에 비해 자연환경에 미치는 영향이 매우 적으며 유류의 자연분해과정을 촉진시키는 것으로 평가하고 있다. 현재도 물리·생물학적 방법에 대한 연구는 지속적으로 추진되고 있으며 미국의 200 여개 이상의 회사와 다른 국가의 수 많은 기관이 생물처리 제품과 용역을 발전시키고 상품화하고 있다(Albert et al., 1992; Ebuehi et al., 1997; Venosa and Zhu, 2003; Atlas, 1995). 이 중 유럽의 선두위치에 있는 회사는 Umweltschutz Nord, Contra Con, TAUW Milieu, Delft Geotechnics, Bio Tal 등이 알려져 있으며, 캐나다에는 Grace Dearbom과 Beak Consultants가 있다. 우리나라 역시 G7 과제의 일환으로 유류분해 미생물을 이용한 생물학적 정화 방법에 연구를 추진하고 있다.

연안생태계와 해양환경개선을 위해 우리나라에서는 최초로 2,111 m³의 오염 퇴적물을 1989년부터 1994년까지 준설하였고, 준설에 따른 모니터링 데이터 및 준설 이후 데이터가 조사·분석되었으며, 준설해역의 퇴적물 오염도 변화가 파악되었다(마산시, 1988). 이후 오염지역의 해양생물자원과 생산성을 향상하고, 환경을 회복하기 위해 마산만 준설사업 및 하수처리장 가동에 따른 진해만의 수질변동(윤과 이, 2004), 연안해역 오염퇴적물개선을 위한 준설판단지수(Dredging Index, DI) 개발(이 등, 2004), 퇴적물 준설에 따른 수환경 영향 예측 모의(안 등, 2005), 피조개 양식어장의 개토효과 연구(농림부, 1998) 등 준설과 객토에 관한 연구가 진행되었으나 대부분 준설에 대한 연구였다. 또한, 먹이연쇄 생물축적 모형을 이용한 잔류유류오염물질의 생태위해성평가(황과 권, 2009), 유류오염지역의 생태복원(성과 이, 2008), 연안어장 준설퇴적물을 이용한 *Cochlodinium polykrikoides* 제거(선 등, 2010) 등 생태복원과 생물학적 연구 등 연안환경개선을 위한 다각적인 연구가 진행되었으나, 해역별 특성과 유류유출과 같은 급진적 오염, 장기적 생태모니터링은 미약한 상태이다. 현재 국가 및 지자체 등 연안환경개선을 위한 준설, 경운, 객토, 모래살포, 투석 및 저질개선제 살포 등 환경개선 사업을 실시하고 있으나, 보다 효율적인 개선을 위해서는 해양환경에 따른 적절한 방법이 요구된다.

<표 2-30> 유류오염지역의 정화기술 현황(성과 이, 2008)

일반적인 유류오염도양의 정화방법 (물리, 화학, 생물학적 방법)	해안지역의 유류오염 제거방법 2)
<ul style="list-style-type: none"> • 원위치 (In-situ) or 현장처리 (on-site) <ul style="list-style-type: none"> • Soil Vapor Extraction (도양증기추출법) • Bioventing • Soil Washing (도양 세척법) • Natural Attenuation (자연정화) • Bioattenuation • Surfactant/Cosolvents Application (계면활성제 적용) • Landfarming (토지경작) • Bioremediation/Phytoremediation(생물식물 정화) • 현장외처리 (Ex-situ) <ul style="list-style-type: none"> • 열탈착, 바이오필터, 소각 등 	<ul style="list-style-type: none"> • No Action /Natural Recovery • Manual Removal (수작업제거) • Passive Collection (흡착포, 흡착분, 흡착물 등) • Debris Removal (오염잔해 제거)/ Cutting Vegetation (오염식물제거) • Trenching (도랑파기) • Sediment Removal/Tilling (퇴적물 제거/경작) • Washing (세척) <ul style="list-style-type: none"> • Ambient-Water Flooding (주변해수를 이용한 세척) • Ambient-Water/Low &High Pressure Washing (주변해수를 이용한 저압세척) • Warm-Water/ Moderate-to-High Pressure Washing (온수를 이용한 고압세척) • Hot-Water/High-Pressure Washing (열수를 이용한 고압세척) • Vacuum (진공수거) • Sediment Reworking (오염퇴적물 이동) • Sediment Removal, Cleansing, and Replacement (세척 후 원위치) • Chemical Oil Stabilization/Chemical Protection/Cleaning of Beaches (화학품을 이용한 안정화/해안보호/세척) • In Situ Burning of Shoreline (현장연소) • Nutrient Enhancement (영양물질 주입) • Microbial Addition (유류분해 미생물 주입)

제 3장. 식물플랑크톤

1. 서 론

해양생태계에서 식물플랑크톤은 해양생태계에서 태양에너지 합성으로 영위하는 광합성 생물로서 연안해역의 먹이 사슬의 근간을 이루는 일차 생산자이다. 해양식물플랑크톤 군집은 해수에 용존 된 무기 물질을 영양원으로 하기 때문에 육지 부에서 유입되는 각종 물질의 존재량에 지배 될 수 있고 연안해역의 해양환경변화에 쉽게 적응하여, 해양생태계 변화의 시발점을 형성하기도 하는 생물군이다. 이와 같은 이유에서 연안해역의 해양환경 변화를 발생 시킬 수 있는 대규모 매립, 공장 건설 및 가동, 온배수 발생등과 같은 해양환경의 변화를 유발하는 각종 공사나 사업에 의한 해양환경 및 생태계의 변화를 예측 하는 경우 필연적으로 이용되는 자료 항목이기도 하다. 즉, 해양 생태계의 가장 하부 영양단계를 구성하는 식물플랑크톤은 수중 생태계의 구조와 기능을 파악하는데 기초 자료를 제공하고 있어 해양 환경에 대한 올바른 평가와 이해를 위해 이들에 대한 연구는 필수적으로 선행되어야 한다.

조사해역인 태안반도에 위치한 근소만은 전형적인 반폐쇄적 만으로 수심이 상대적으로 얕고, 조석 간만의 차가 큰 해역이다. 또한 인근해역은 저서패류의 양식이 활발히 이루어져 어민들의 소득 증대에 큰 기여를 하고 있다. 그러나 2007년 허베이스피리트 유류 유출사고로 인하여 유류오염에 심각하게 노출되었으며, 그로 인해 막대한 피해를 입은 해역이기도 하다.

본 조사에서는 유류오염이후 유류피해어장에 대한 어장복원모델 개발을 위한 기초연구 일환으로 식물플랑크톤의 군집분포 및 출현특성에 대하여 조사하였다.

2. 재료 및 방법

해양의 표영생태계 구성 생물종 하나인 식물플랑크톤 군집 내용을 파악하기 위한 현장조사는 <표 3-1>과 같은 일정으로 4계절에 걸쳐 근소만 일원에서 총 14개 정점과 의항에 3개의 대조구를 선정하여 실시하였다(그림 3-1). 또한 예비 조사시 실시하였던 대조구 2곳의 경우 본 보고서에서 제외하였다.

식물플랑크톤의 표본 채집과 검경 시료는 Van Dorn 채수기로 표층해수를 채수하여 300ml용 폴리에틸렌 표본병에 넣어 중성포르마린으로 최종농도가 0.4%되도록 현장에서 고정하였다(Thronsen, 1978). 고정된 표본은 실험실로 운반한 이후 고정 해수시료 250ml를 취하여 공경(pore size)이 5.0 μ m, 직경이 47mm인 박막여과지(Membrane filter)가 장착된 플라스틱 여과기를 이용하여, 자연낙하방법에 의하여 최종농도가 5.0ml되도록 농축하여 검경 시료로 사용하였다(飯塚, 1986). 정성 및 정량분석을 위해 농축한 시료는 검경전에 균일하게 희석한 후 시료 0.1ml를 Pippetman 이용하여 Sedgwick Rafter Chamber의 계수판에 넣고 광학현미경(Nikon)을 이용하여 종의동정과 계수를 실시하였다.

현존량은 계수한 후 해수의 단위체적당 세포수를 출현한 식물플랑크톤의 현존량으로 환산하였다. 종의 분류 및 동정은 Cupp (1943), Dodge (1982), 山路 (1991), Chihara and Murano (1997) 및 Tomas (1997)등의도감 및 분류문헌을 참고하였으며, 종의 분류체계는 주로 Chihara and Murano (1997)와 Tomas (1997)에 따랐다.

또한 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤 개체수를 대상으로 각 정점간 유사도를 비교 분석하기 위하여 Bray-Curtis의 유사도지수를 구하였으며, 중간 심한 밀도차이에 의한 자료의 편중을 피하고 대상자료의 분포를 정규화하기 위하여 모든 자료는 대수변환 [$\log(x+1)$]한 자료를 이용하였다.

<표 3-1> 식물플랑크톤 현장조사 일정 및 조사정점 수

계절	조사일시	조사정점		비고
		실험구	대조구	
여름	2010. 08.	14	5	예비조사 2곳포함
가을	2010. 11.	14	3	
겨울	2011. 02.	14	3	
봄	2011. 04.	14	3	

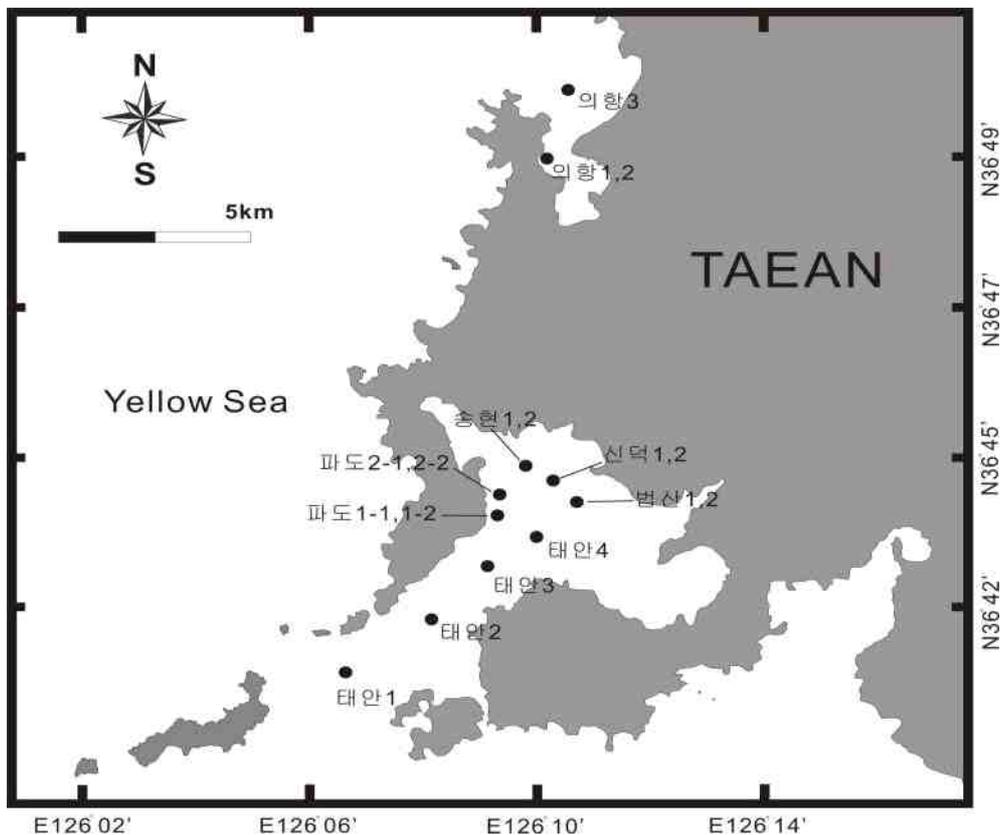


그림 3-1. 어장환경개선 프로그램 식물플랑크톤 조사지역.

3. 결과

3.1. 종조성

여름철(2010년 8월) 조사해역에서 동정된 식물플랑크톤은 총 20속 33종이 출현하였으며, 이 중 규조류가 16속 28종으로 총 출현종 수의 84.8%를 차지하며, 가장 다양하게 출현하였으며, 와편모조류가 15.2%의 출현을 보였다(표 3-2 ; 그림 3-2). 또한 총 출현종수에 많은 기여를 한 속을 살펴보면, *Chaetoceros* (8종)에 속하는 종들의 출현이 비교적 많았다.

가을철(2010년 11월) 조사해역에서 동정된 식물플랑크톤은 총 21속 38종이 출현하였으며, 이 중 규조류가 18속 35종으로 총 출현종 수의 92.1%를 차지하며, 가장 다양하게 출현하였으며, 와편모조류가 3속 3종으로 7.9%의 출현을 보였다(표 3-2 ; 그림 3-2). 또한 총 출현종수에 많은 기여를 한 속을 살펴보면, *Chaetoceros* (9종)와 *Nitzschia* (4종)에 속하는 종들의 출현이 비교적 많았다.

겨울철(2011년 2월) 조사해역에서 동정된 식물플랑크톤은 총 23속 41종이 출현하였으며, 이 중 규조류가 20속 38종으로 총 출현종 수의 92.7%를 차지하며, 가장 다양하게 출현하였으며, 와편모조류가 7.3%의 출현을 보였다(표 3-2 ; 그림 3-2). 또한 총 출현종수에 많은 기여를 한 속을 살펴보면, *Chaetoceros* (10종)와 *Nitzschia* (4종)에 속하는 종들의 출현이 비교적 많았다.

봄철(2011년 4월) 조사해역에서 동정된 식물플랑크톤은 총 16속 43종이 출현하였으며, 이 중 규조류가 16속 43종의 출현을 보였다(표 3-2 ; 그림 3-2) 또한 총 출현종수에 많은 기여를 한 속을 살펴보면, *Chaetoceros* (13종)와 *Nitzschia* (8종)에 속하는 종들의 출현이 비교적 많았다.

<표 3-2> 조사해역에서 출현한 종조성 및 구성비

계 절 분류군	2010. 08. (여름)			2010. 10. (가을)			2011. 02. (겨울)			2011. 04. (봄)		
	속	종	출현율 (%)	속	종	출현율 (%)	속	종	출현율 (%)	속	종	출현율 (%)
Diatoms (규조류)	16	28	84.8	18	35	92.1	20	38	92.7	16	43	100
Dinoflagellates (와편모조류)	4	5	15.2	3	3	7.9	3	3	7.3	-	-	-
합 계	20	33	100	21	38	100	23	41	100	16	43	100

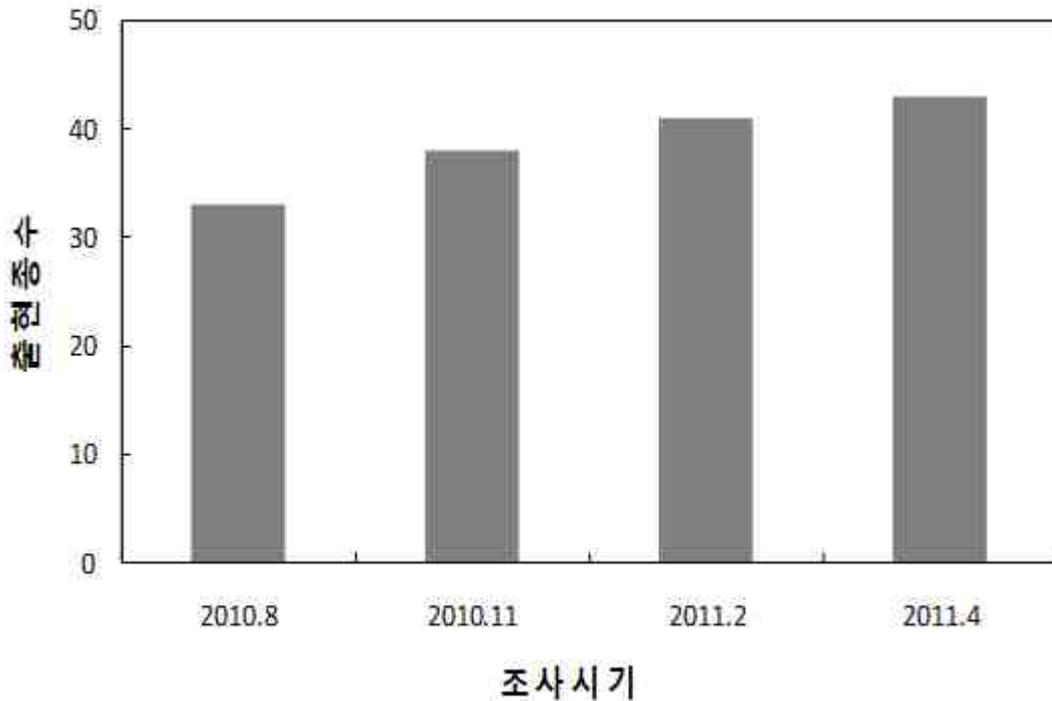


그림 3-2. 조사시기에 따른 식물플랑크톤 출현종 수 변화.

3.2. 현존량

여름철(2010년 8월) 조사해역에서 식물플랑크톤의 현존량은 429~356,332 cells/l로 나타났다. 정점간 현존량을 비교해 보면 송현 1 정점에서 가장 높게 나타났고, 의항 3 정점에서 가장 낮은 현존량을 보였다(그림 3-3).

가을철(2010년 11월) 조사해역에서 식물플랑크톤의 현존량은 41,720~125,960 cells/l로 나타났다. 정점간 현존량을 비교해 보면 신덕 1 정점에서 가장 높게 나타났고, 의항 2 정점에서 가장 낮은 현존량을 보였다(그림 3-4).

겨울철(2011년 2월) 조사해역에서 식물플랑크톤의 현존량은 63,030~351,519 cells/l로 나타났다. 정점간 현존량을 비교해 보면 법산 2 정점에서 가장 높게 나타났고, 의항 3 정점에서 가장 낮은 현존량을 보였다(그림 3-5).

봄철(2011년 4월) 조사해역에서 식물플랑크톤의 현존량은 71,260~328,200 cells/l로 나타났다. 정점간 현존량을 비교해 보면 태안 2 정점에서 가장 높게 나타났고, 의항 3 정점에서 가장 낮은 현존량을 보였다(그림 3-6).

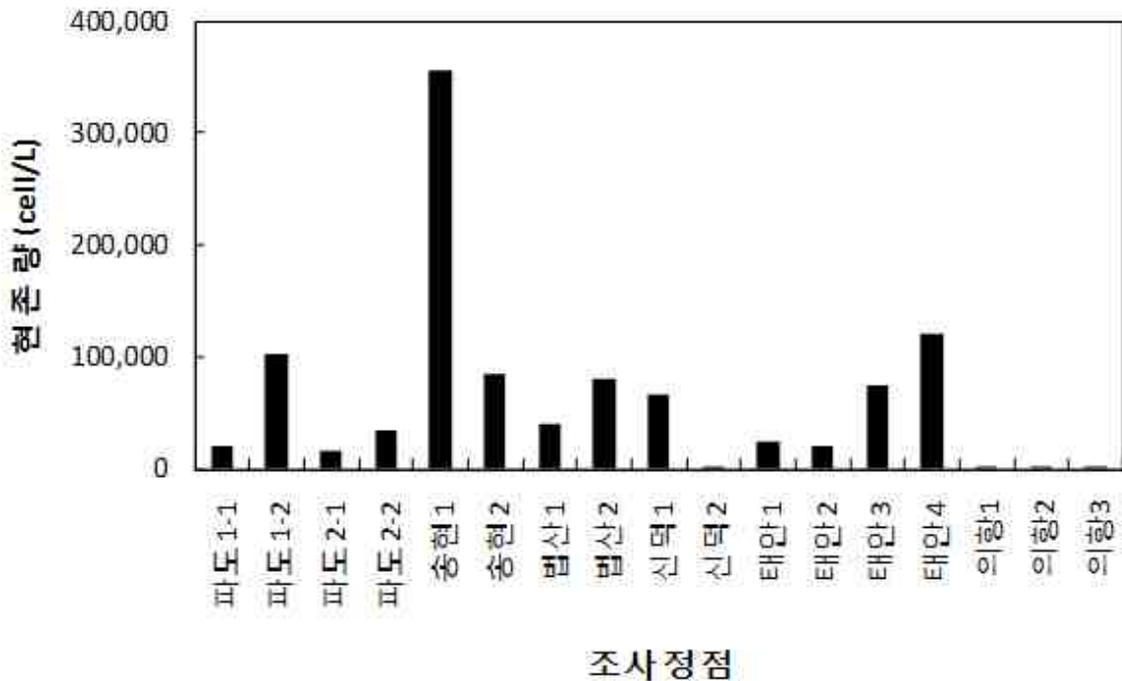


그림 3-3. 여름철(2010년 8월) 정점간 현존량.

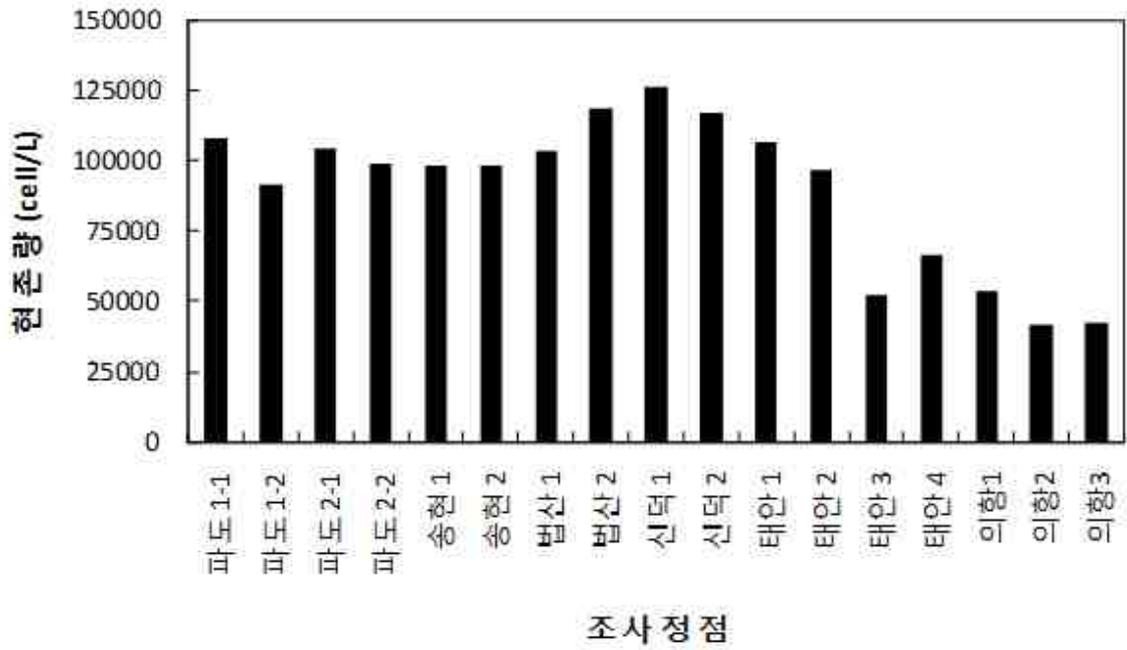


그림 3-4. 가을철(2010년 11월) 정점간 현존량.

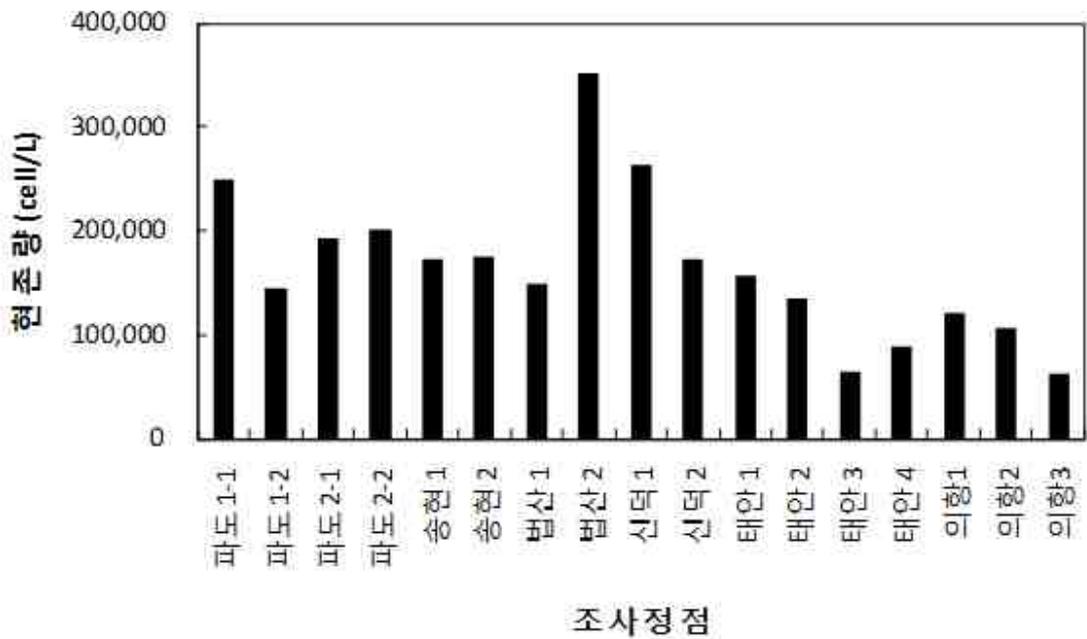


그림 3-5. 겨울철(2011년 2월) 정점간 현존량.

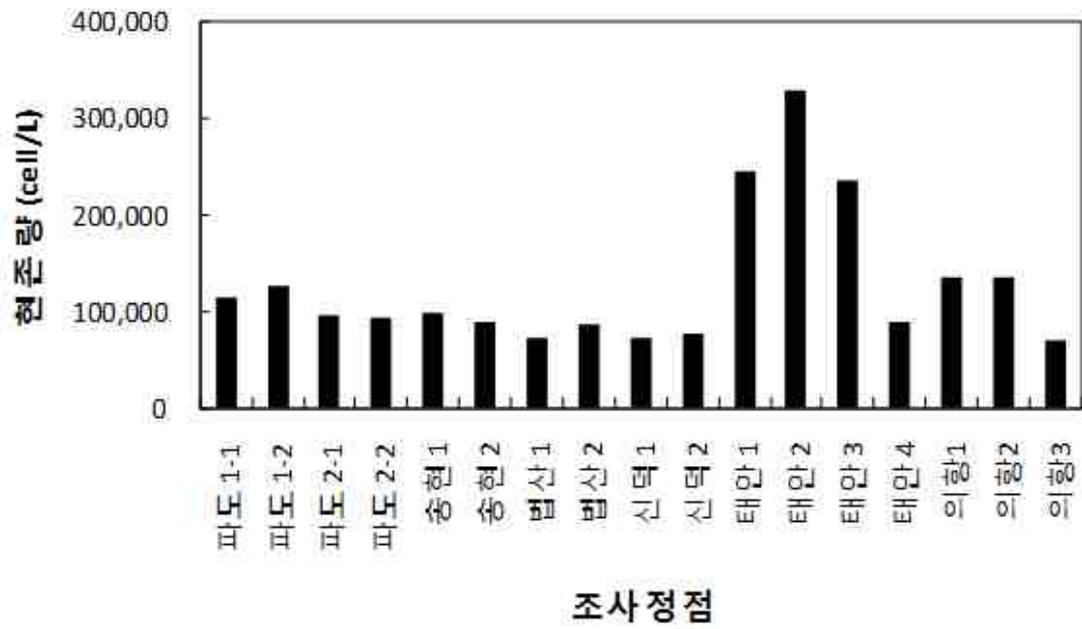


그림 3-6. 봄철(2011년 4월) 정점간 현존량.

3.3. 생태지수

여름철(2010년 8월) 조사해역에서 생태지수를 살펴보면 종다양도지수의 경우 0.88 (태안 4)~1.98 (의항 1)로 나타났으며, 균등도지수의 경우 0.33 (태안 4)~0.93 (의항 3)으로 나타났다. 풍부도지수의 경우 0.69 (태안 1)~1.43 (태안 3)으로 나타났으며, 대조구인 의항 인근해역에서 종다양도지수와 균등도지수가 실험구인 내만해역보다 높게 나타났다<표 3-3>.

가을철(2010년 11월) 조사해역에서 생태지수를 살펴보면 종다양도지수의 경우 2.43 (태안 3)~2.82 (의항 1)로 나타났으며, 균등도의 경우 0.78 (신덕 2)~0.89 (의항 1)로 나타났다. 풍부도지수의 경우 1.73 (태안 1)~2.63 (의항 3)으로 나타났으며, 대조구인 의항에서 높은 생태지수를 나타내어 여름철과 유사한 양상을 보였다<표 3-4>.

겨울철(2011년 2월) 조사해역에서 생태지수를 살펴보면 종다양도지수의 경우 2.38 (법산 2)~2.96 (파도 2-1)로 나타났으며, 균등도의 경우 0.75 (법산 2)~0.88 (의항 3)로 나타났다. 풍부도지수의 경우 1.74 (송현 1)~2.62 (파도 2-2)로 나타났다<표 3-5>.

봄철(2011년 4월) 조사해역에서 생태지수를 살펴보면 종다양도지수의 경우 0.74 (송현 2)~2.22 (의항 1)로 나타났으며, 균등도의 경우 0.31 (송현 2)~0.72 (의항 1)로 나타났다. 풍부도지수의 경우 0.78 (신덕 1)~1.95 (의항 2)로 나타났으며, 대조구인 의항 인근해역에서 생태지수가 높게 나타났다<표 3-6>.

<표 3-3> 여름철(2010년 8월) 정점별 생태지수

정점 \ 생태지수	항 목		
	종다양도	균등도	풍부도
파도 1-1	1.16	0.53	0.81
파도 1-2	0.98	0.45	0.69
파도 2-1	1.22	0.55	0.83
파도 2-2	1.04	0.42	1.05
송 현 1	1.33	0.51	1.02
송 현 2	1.34	0.58	0.79
법 산 1	1.55	0.71	0.75
법 산 2	1.23	0.53	0.80
신 덕 1	1.20	0.52	0.81
신 덕 2	1.56	0.65	1.37
태 안 1	1.22	0.59	0.69
태 안 2	1.17	0.53	0.81
태 안 3	1.24	0.42	1.43
태 안 4	0.88	0.33	1.11
의 향 1	1.98	0.86	1.14
의 향 2	1.76	0.85	0.97
의 향 3	1.94	0.93	1.16
최 대 값	1.98	0.93	1.43
최 소 값	0.88	0.33	0.69
평 균 값	1.34	0.59	0.95

<표 3-4> 가을철(2010년 11월) 정점별 생태지수

정점	생태지수	항 목		
		종다양도	균등도	풍부도
파도 1-1		2.74	0.83	2.24
파도 1-2		2.65	0.80	2.28
파도 2-1		2.79	0.83	2.42
파도 2-2		2.78	0.82	2.44
송 현 1		2.63	0.83	2.00
송 현 2		2.54	0.80	2.00
법 산 1		2.62	0.80	2.17
법 산 2		2.57	0.79	2.14
신 덕 1		2.60	0.80	2.13
신 덕 2		2.60	0.78	2.31
태 안 1		2.50	0.82	1.73
태 안 2		2.59	0.85	1.74
태 안 3		2.43	0.81	1.75
태 안 4		2.65	0.82	2.16
의 향 1		2.82	0.89	2.11
의 향 2		2.76	0.87	2.16
의 향 3		2.75	0.82	2.63
최 대 값		2.82	0.89	2.63
최 소 값		2.43	0.78	1.73
평 균 값		2.65	0.82	2.14

<표 3-5> 겨울철(2012년 2월) 정점별 생태지수

정점	생태지수	항 목		
		종다양도	균등도	풍부도
파도 1-1		2.64	0.78	2.25
파도 1-2		2.88	0.86	2.36
파도 2-1		2.96	0.86	2.47
파도 2-2		2.82	0.81	2.62
송 현 1		2.62	0.85	1.74
송 현 2		2.64	0.83	1.91
법 산 1		2.73	0.85	2.04
법 산 2		2.38	0.75	1.80
신 덕 1		2.79	0.87	1.92
신 덕 2		2.66	0.84	1.91
태 안 1		2.76	0.85	2.09
태 안 2		2.70	0.86	1.86
태 안 3		2.58	0.85	1.80
태 안 4		2.70	0.84	2.11
의 향 1		2.89	0.87	2.31
의 향 2		2.82	0.87	2.16
의 향 3		2.92	0.88	2.44
최 대 값		2.96	0.88	2.62
최 소 값		2.38	0.75	1.74
평 균 값		2.73	0.84	2.11

<표 3-6> 봄철(2011년 4월) 정점별 생태지수

정점	생태지수	항 목		
		종다양도	균등도	풍부도
파도 1-1		1.38	0.71	0.80
파도 1-2		1.21	0.62	0.79
파도 2-1		1.28	0.55	1.00
파도 2-2		1.10	0.50	0.96
송 현 1		0.80	0.32	1.08
송 현 2		0.74	0.30	1.08
법 산 1		0.84	0.36	0.90
법 산 2		0.84	0.35	0.95
신 덕 1		0.88	0.40	0.78
신 덕 2		1.10	0.48	0.85
태 안 1		1.31	0.50	1.05
태 안 2		1.33	0.47	1.26
태 안 3		1.37	0.54	0.97
태 안 4		1.14	0.48	0.88
의 향 1		2.22	0.72	1.78
의 향 2		2.17	0.68	1.95
의 향 3		1.94	0.67	1.52
최 대 값		2.22	0.72	1.95
최 소 값		0.74	0.30	0.78
평 균 값		1.27	0.51	1.09

3.4. 계절별 집괴분석

조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 계절별 현존량을 정점별로 집괴분석한 결과 여름철 조사결과 3개의 정점군으로 구분되었으며, A정점군은 *Chaetoceros costatus*, *C. curvisetus*, *C. decipiens*, *C. didymus*가 영향을 미쳤으며, B정점군은 태안 3, 송현 1, 태안 4로 *C. costatus*, *C. curvisetus*, *Skeletonema costatum*이 영향을 미치는 것으로 나타났다. C정점군은 의항 1, 의항 2로 *C. curvisetus*, *C. decipiens*가 영향을 미쳤으며, D정점군은 신덕 2, 의항 3으로 *C. costatus*, *S. costatum*이 영향을 미쳤다(그림 3-7).

가을철에는 3개의 정점군으로 나누어졌으며, A정점군은 파도 2-1, 파도 2-2, 파도 1-1, 파도 1-2, 법산 1, 법산 2, 신덕 1, 신덕 2로 *Bellerophoca malleus*, *C. affinis*, 가 영향을 미쳤으며, B정점군은 태안 4, 의항 3, 태안 3, 의항 1, 의항 2로 *Nitzschia iongissima*가 영향을 미쳤으며, C정점군은 송현 1, 송현 2, 태안 1, 태안 2로 *C. didymus*, *C. affinis*가 영향을 미쳤다(그림 3-8).

겨울철 조사결과 3개의 정점군으로 나누어졌으며, A정점군은 태안 4, 태안 3, 의항 3으로 *N. iongissima*와 *C. affinis*가 영향을 미쳤으며, B정점군은 법산 1, 법산 2로 *B. malleus*가 독립적으로 영향을 미친 것으로 나타났다. C정점군은 파도 2-2, 파도 2-1, 파도 1-1, 파도 1-2, 태안 1, 의항 1, 의항 2로 *C. affinis*와 *C. didymus*가 영향을 미쳤다(그림 3-9).

봄철 조사결과 4개의 정점군으로 나누어졌으며, A정점군은 태안 1, 태안 2, 의항 1, 의항 2로 *N. seriata*가 영향을 미쳤으며, B정점군은 태안 4, 태안 3, 의항 3으로 *N. sigma*와 *C. costatus*가 영향을 미쳤으며, C정점군은 파도 1-1, 파도 1-2로 *C. compressus*, *C. lorenianus*가 영향을 미쳤으며, D정점군은 *N. seriata*와 *C. costatus*가 영향을 미쳤다(그림 3-10)

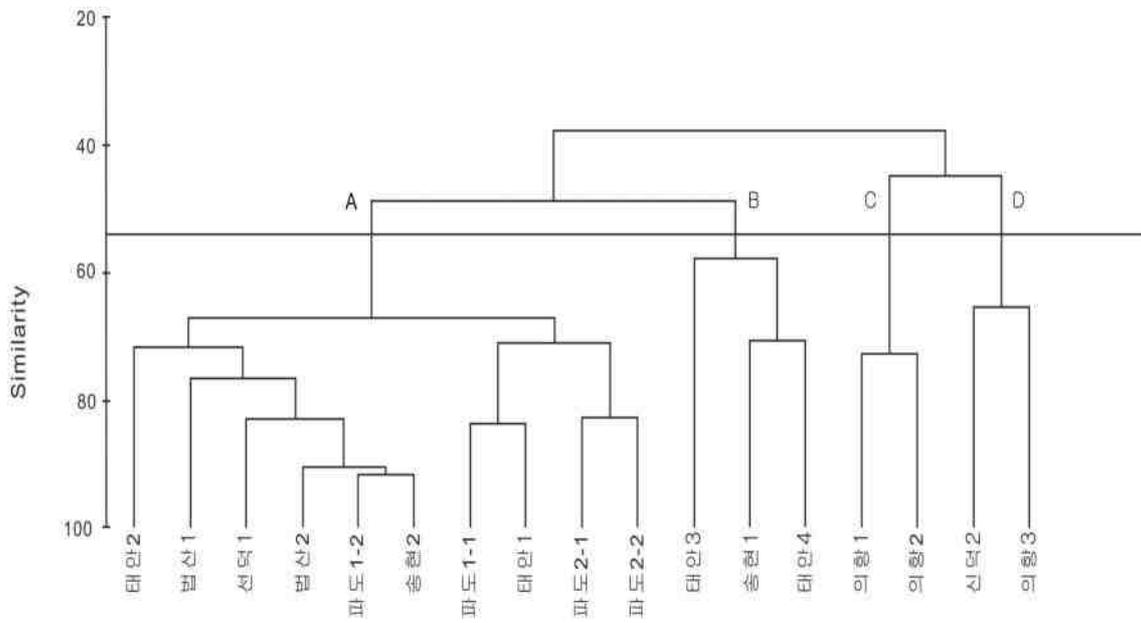


그림 3-7. 여름철 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 현존량에 따른 정점별 집괴분석.

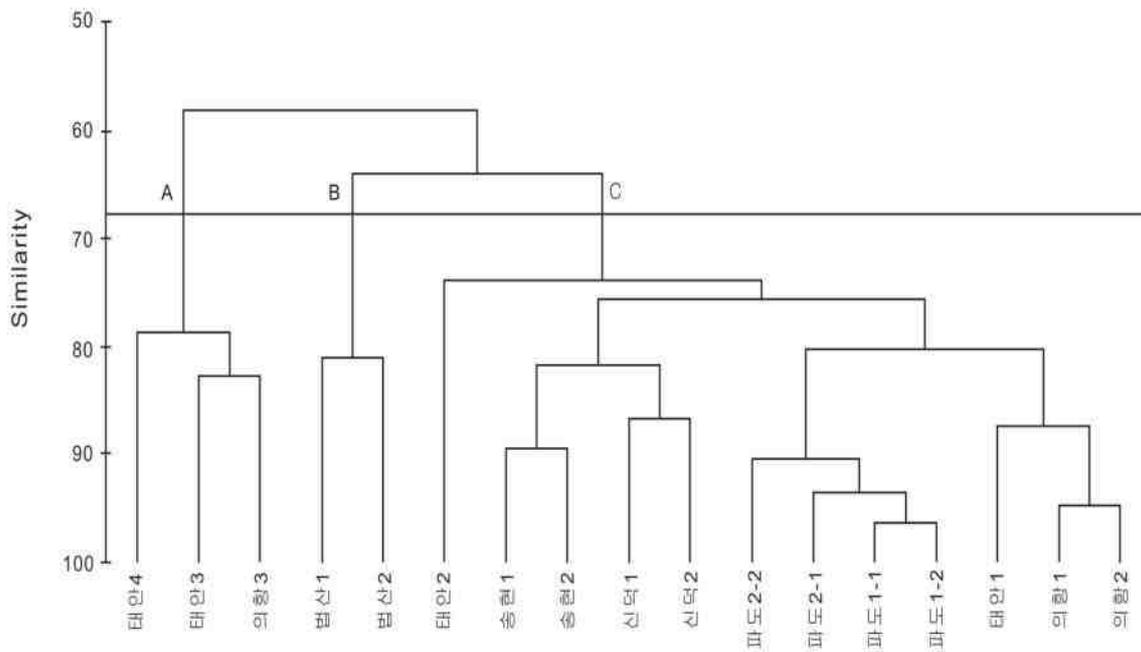


그림 3-8. 가을철 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 현존량에 따른 정점별 집괴분석.

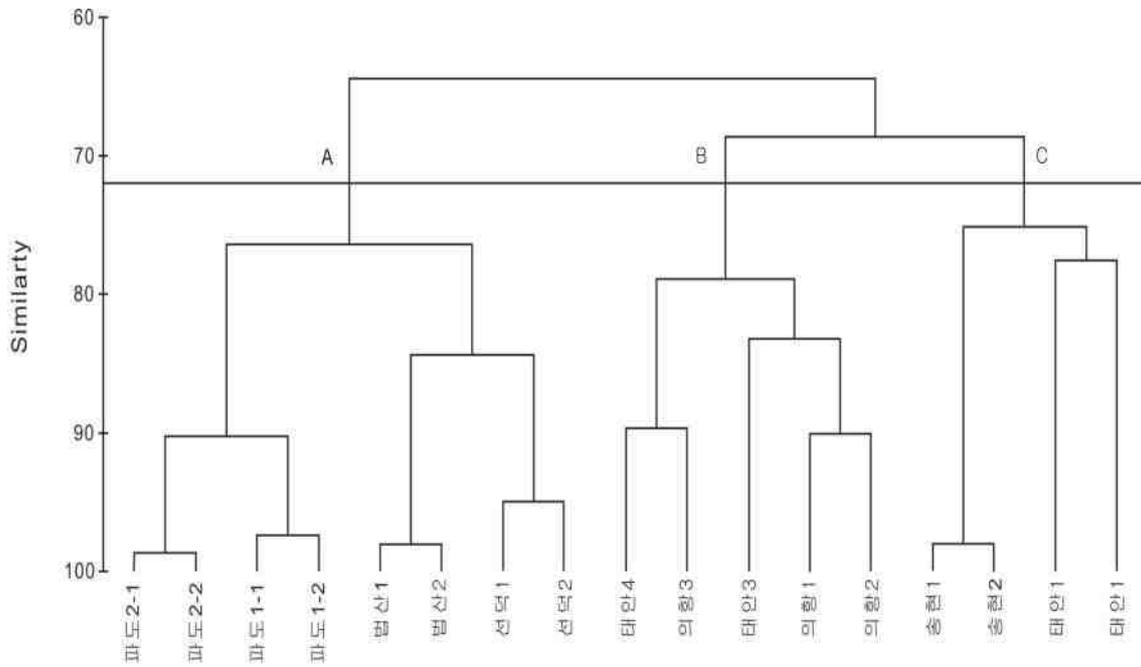


그림 3-9. 겨울철 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 현존량에 따른 정점별 집괴분석.

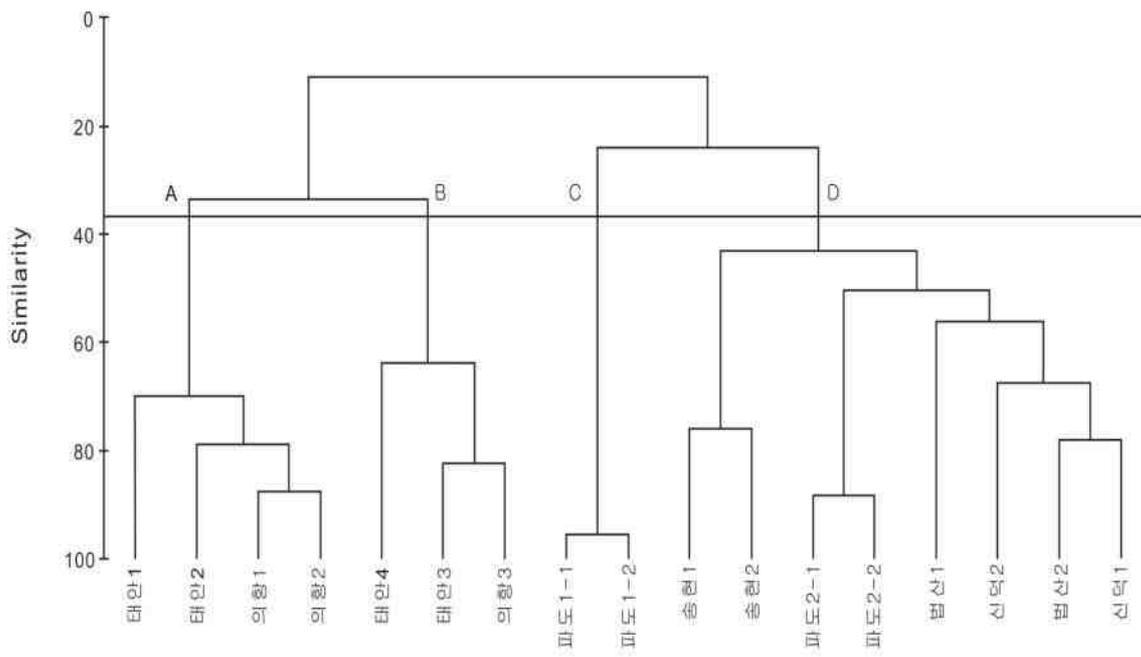


그림 3-10. 봄철 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 현존량에 따른 정점별 집괴분석.

제 4장. 동물플랑크톤

1. 서론

해양생태계에서 동물플랑크톤은 기초생산자로서 대표되는 식물플랑크톤을 먹이로 하여 보다 상위 영양단계인 어패류, 어류 등에 에너지를 전달하는 중간 고리로서 중요한 역할을 수행한다. 그러나, 동물플랑크톤 중에는 식물플랑크톤을 주 먹이로 하는 입자식자 이외에도 해파리류 같은 전형적인 육식자와 중간식자들도 함께 포함되어 있어, 동물플랑크톤 군집구조는 보다 복잡한 양상을 나타내고 있다. 이러한 복잡한 군집구조는 동물플랑크톤 서식지 환경에 따라 커다란 차이를 나타낸다.

태안반도에 위치한 근소만은 반폐쇄적 형태의 만으로 수심이 매우 얇고, 조석간만의 차가 커 표층과 저층간의 수직혼합이 활발한 곳으로 부유현탁물질로 인한 투명도 낮게 나타나는 곳이다. 이러한 환경적 특징으로 인해 일찍부터 바지락 양식의 어민들의 주요 소득원으로서 역할을 하여 왔다. 그러나 조사해역은 2007년 태안 만리포 해수욕장 북서쪽 10km해역에서 일어난 기름유출사고로 인하여 유류오염에 의해 심각하게 노출되었다.

본 조사는 이러한 유류오염이후 어장환경개선 프로그램 개발을 통한 양식환경 개선을 위한 기초자료의 일환으로 동물플랑크톤 종조성 및 군집구조를 분석하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

동물플랑크톤 채집은 근소만에 총 14개 정점(실험구 만 내측 10개; 대조구 만 외측 4개)과 의항에 총 3개 정점(대조구)을 선정하여 2010년 7월, 8월, 11월과 2011년 2월, 4월, 총 5회 실시하였다(그림 4-1). 2007년 7월 사전조사 후 대조구를 근소만 외측에 대조구 4개 정점을 추가 설정하여 시행하였기 때문에 본 결과에서는 사전조사 자료는 보고서에서 제외시켰다. 동물플랑크톤은 망목 100 μ m와 200 μ m 두 종류의 NORPAC네트(망구 45cm)를 이용하여 채집을 하였으나, 망목 200 μ m의 네트는 주 장미로 사용된 100 μ m에 채집된 동물플랑크톤 종조성과 생물량의 비교 자료로 활용하였다. 채집된 시료는 즉시 선상에서 중성포르말린을 사용하여 5%가 되도록 고정하였으며, 정량분석을 위하여 네트 망구에 유속계(General Oceanics)를 부착하여 여과 해수량을 측정하였다. 종조성 및 개체수의 조사에 시료의 분할이 필요할 때는 Folsom식 분할기를 이용하여 1/2-1/32 까지 분할 후, Bogorov식 계수판에서 해부현미경 (Nikon SMZ 1000)을 사용하여 요각류는 가능한 종 수준까지 동정하였으며, 요각류를 제외한 분류군은 목(order) 수준까지 분류 계수하였다. 요각류를 대상으로 종을 동정하는 과정에서 보다 세밀한 관찰이 필요한 경우는 동정에 필요한 부속지를 해부하여 고배율 광학현미경(Nikon ECLIPSE 80i) 하에서 관찰하였다. 종동정은 Kim(1985), Kang(1992), Chihara and Murano(1997) 등을 참고하였다. 동물플랑크톤 현존량은 망구에 부착된 여수계로부터 여수량을 환산하여 1 m^3 당 개체수 (indiv./ m^3)로 표시하였다.

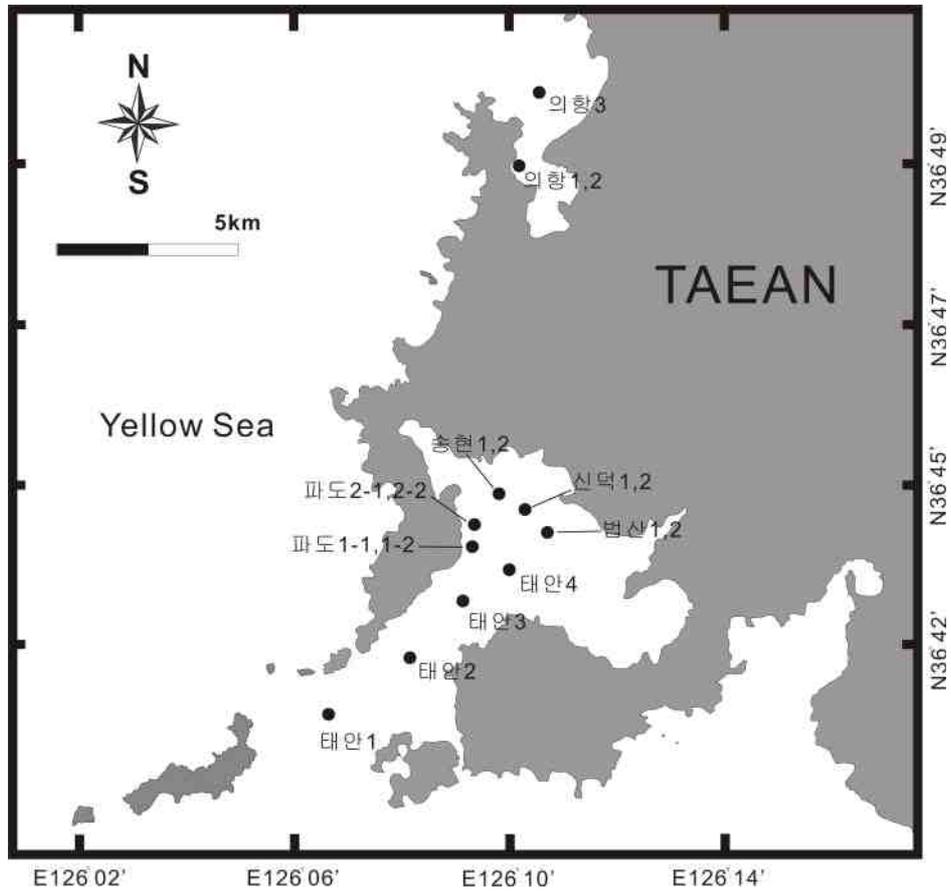


그림 4-1. 어장환경개선 프로그램 동물플랑크톤 조사지역.

3. 결 과

3.1. 하계

3.1.1. 동물플랑크톤 주요 분류군의 출현 비율(100 μ m)

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤의 주요 분류군은 요각류, 각 종 유생류(따개비류, 복족류, 이매패류, 불가사리류, 갯지렁이류), 야광충, 미충류, 화살벌레류, 해파리류 순으로 나타났다.

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤 중 요각류가 48.5(실험구 외측, 태안4) ~ 98.8 % (실험구 내측, 신덕2)으로 최우점 분류군으로, 각 종 유생류가 0.4(실험구 내측, 송현1) ~ 36.6 %(실험구 외측, 태안4)으로 차우점 분류군을 나타내었으며, 야광충, 미충류, 화살벌레류, 해파리류는 실험구 내측에서 3 % 미만으로 낮았다 (그림 4-2).

3.1.2. 동물플랑크톤 주요 분류군의 출현 비율(200 μ m)

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤의 주요 분류군은 요각류, 각 종 유생류(따개비류, 복족류, 이매패류, 불가사리류, 갯지렁이류), 야광충, 미충류, 화살벌레류, 해파리류 순으로 망목 100 μ m의 결과와 유사하였다.

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤 출현 비율 또한 요각류가 22.0(대조구 의항) ~ 97.9 %(실험구 신덕)으로 최우점 분류군으로, 각 종 유생류가 1.7(실험구 신덕) ~ 44.2 % (실험구 파도2)으로 차우점 분류군으로, 야광충, 미충류, 화살벌레류, 해파리류는 실험구 의항을 제외하곤 7%미만으로 나타나, 망목 100 μ m의 동물플랑크톤 네트로 채집된 결과와 유사하였다 (그림 4-3).

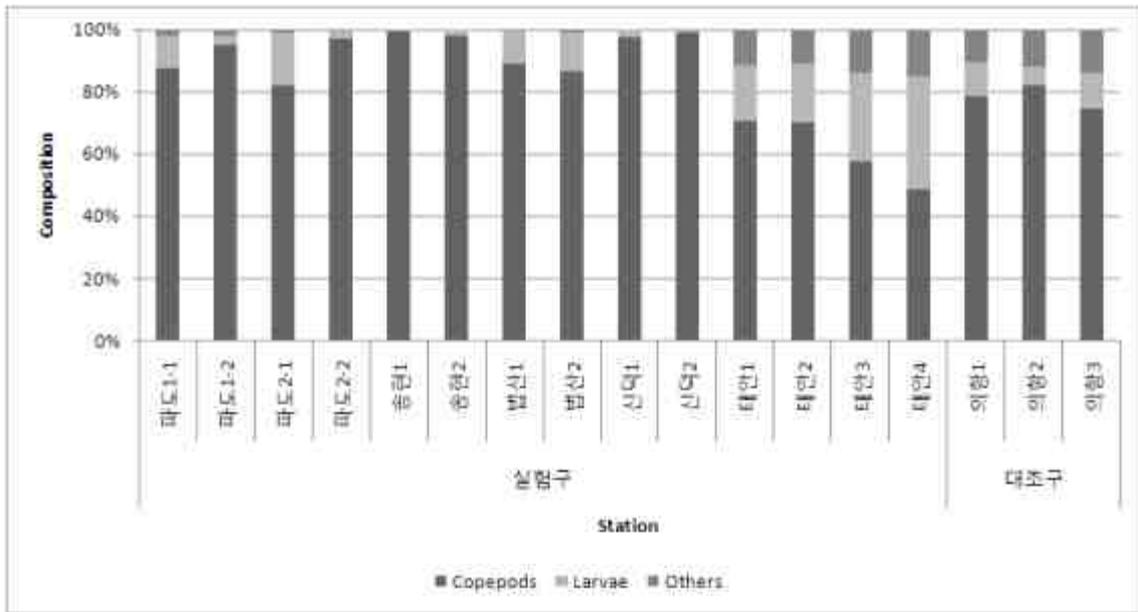


그림 4-2. 하계 조사해역에 출현하는 망목 100µm 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.

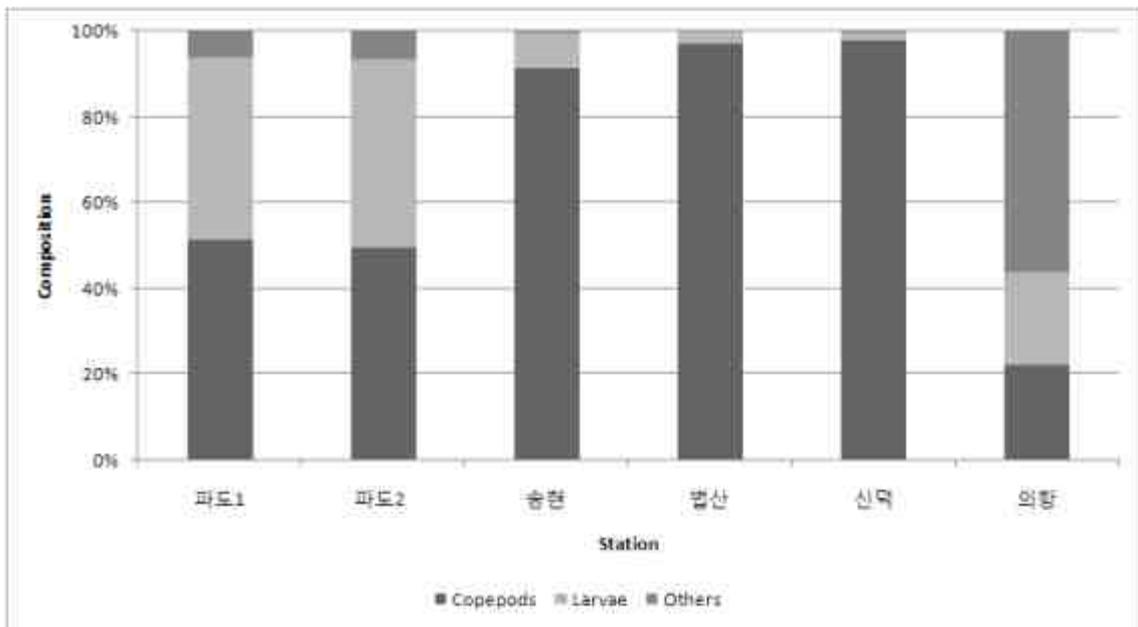


그림 4-3. 하계 조사해역에 출현하는 망목 200µm 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.

3.1.3. 동물플랑크톤 종조성 및 현존량(100 μ m)

조사해역의 출현개체수는 3,117.4 (실험구 외측, 태안3) ~ 12,0035.2 indiv./m³(실험구 내측, 법산1)(평균 3,6491.2 indiv./m³)으로, 실험구 외측과 대조구 정점보다는 실험구 내측에서 높게 나타났다. 총 출현 분류군수는 30개로 송현 2와 신덕 1에서 가장 적은 분류군 수(분류군 수 15개)를 파도 1, 2에서 가장 높은 분류군 수를 보였다(분류군 수 24)(그림 4-4). 종 다양도 지수는 0.58(실험구 내측, 파도2-2) ~ 2.37(실험구 외측, 태안3)(평균 1.37)으로, 대체적으로 실험구 외측과 대조구에서 실험구 내측보다는 높게 나타났다. 종 균등도 지수는 0.19(실험구 내측, 파도2-2) ~ 0.81(실험구 외측, 태안2)(평균 0.47)으로, 종 다양성 지수와 마찬가지로 실험구 외측과 대조구에서 실험구 내측보다는 높게 나타났다(그림 4-6).

3.1.4. 동물플랑크톤 종조성 및 현존량(200 μ m)

조사해역의 출현개체수는 848.7(대조구 의항) ~ 12025.2 indiv./m³(실험구 신덕)(평균 5787.5 indiv./m³)으로, 대체적으로 대조구에서 낮게 나타났다. 총 분류군수는 28개로 신덕에서 가장 적은 14개를, 파도 1에서 가장 많은 22개 분류군수를 나타냈다(그림 4-5). 종 다양도 지수는 0.91(실험구 신덕) 20 ~ 1.97(실험구 파도2)(평균 1.48)으로 나타났다. 종 균등도 지수는 0.34(실험구 신덕) ~ 0.65(실험구 파도2)(평균 0.51)으로 나타났다(그림 4-7). 출현개체수와 출현 분류군 수는 100 μ m 동물플랑크톤 넷 시료에 비해 낮은 반면에, 종 다양도 지수와 종 균등도 지수는 다소 높았다.

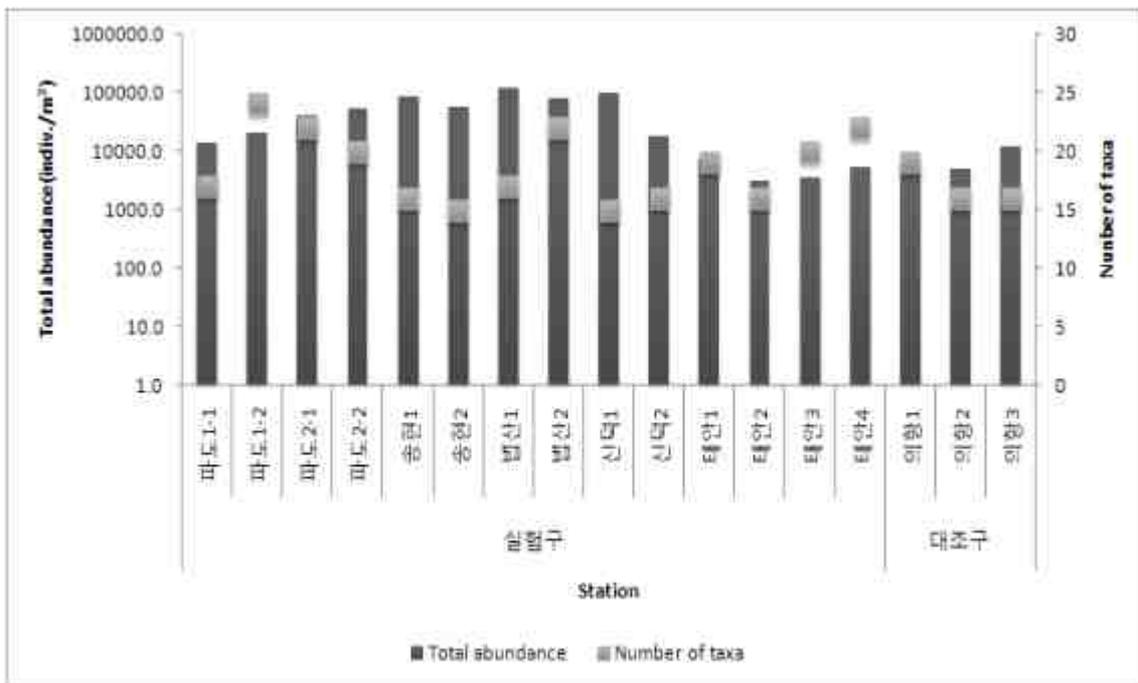


그림 4-4. 하계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수 (100µm).

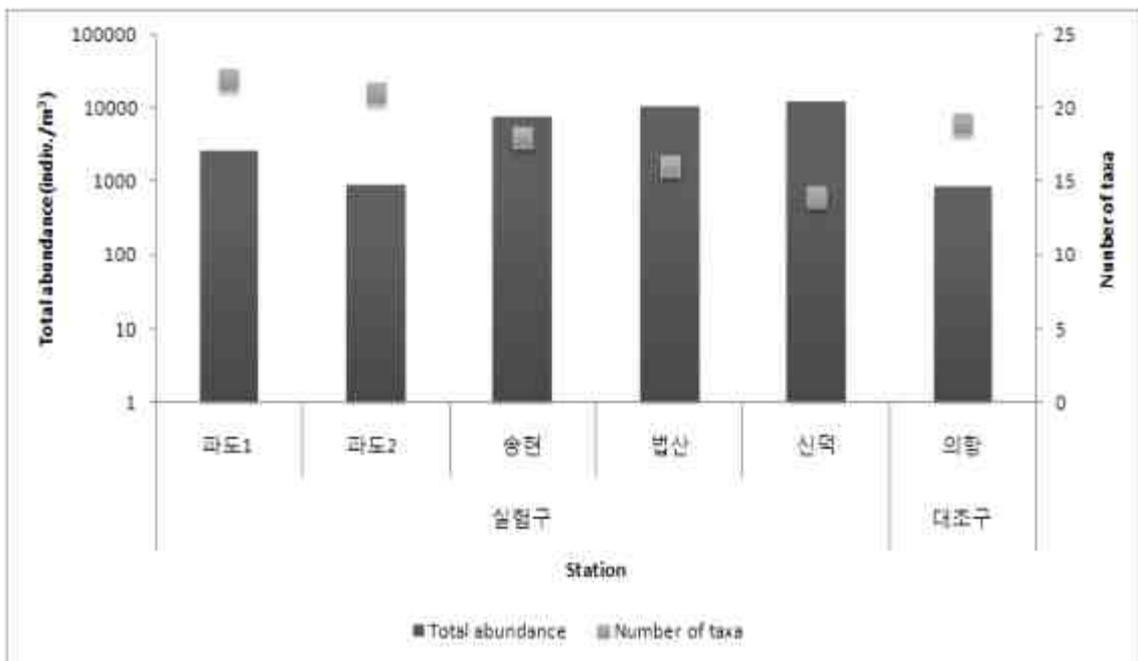


그림 4-5. 하계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수 (200µm).

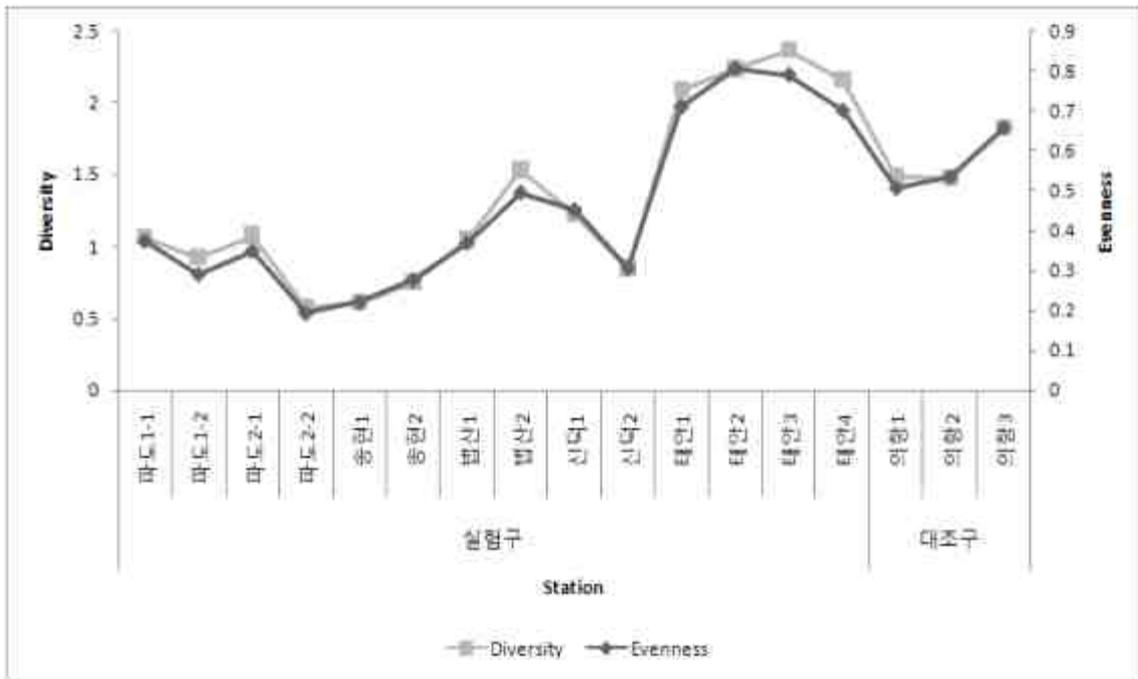


그림 4-6. 하계 조사해역의 생태지수 (100µm).

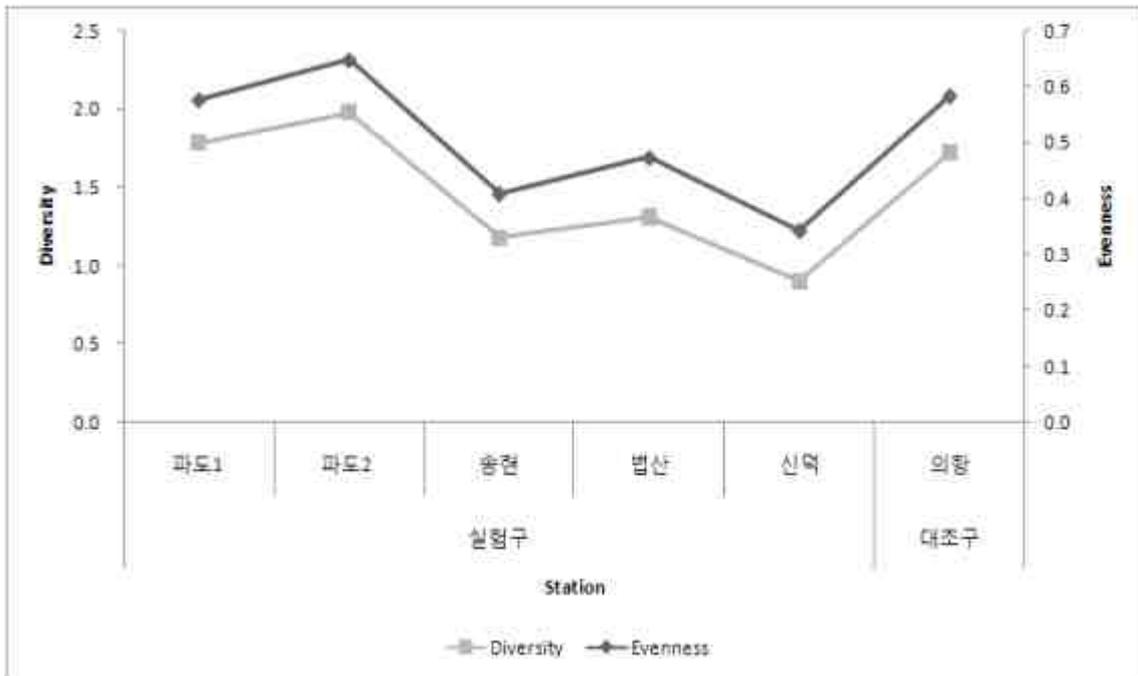


그림 4-7. 하계 조사해역의 생태지수 (200µm).

3.1.5. 집괴분석

조사정점 사이의 유사성을 비교하기 위해 조사해역에 출현한 동물플랑크톤 개체수를 자연 log 변환 후, bray-curtis similarity를 구하여 집괴분석을 실시하였다. 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트로 채집 시 하계의 집괴분석 결과를 보면 유사도 74 % 로 2개의 정점군으로 나뉘어졌다. 각 정점군에 영향을 미치는 동물플랑크톤을 보면 A정점군에서 *Paracalanus parvus* s. l., *Corycaeus affinis*, Copepod nauplius, *Oikopleura dioica*, Cirriped larvae 으로, B정점군은 Copepoda nauplius, *Acartia* copepodites, *Oithona* spp. 으로 구성되었고, 태안 4는 독립적으로 나타났으며, Copepod nauplius, Gastropod larvae, Cirriped larvae, *Noctiluca scintillans*, *Oikopleura dioica* 으로 구성되어 출현하였다(그림 4-8).

망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트로 채집 시 하계의 집괴분석 결과를 보면 유사도 64 % 로 1개의 정점군으로 나뉘었고, 대조구인 의항은 독립적인 성향을 보였다. 정점군에 영향을 미치는 동물플랑크톤은 *Acartia* copepodites, *Acartia ohtsukai*, Cirriped larvae으로 구성되었고, 의항은 *Noctiluca scintillans*, Cirriped larvae, *Paracalanus parvus* s. l., *Corycaeus affinis*으로 구성되어 독립적인 성향을 보였다(그림 4-9).

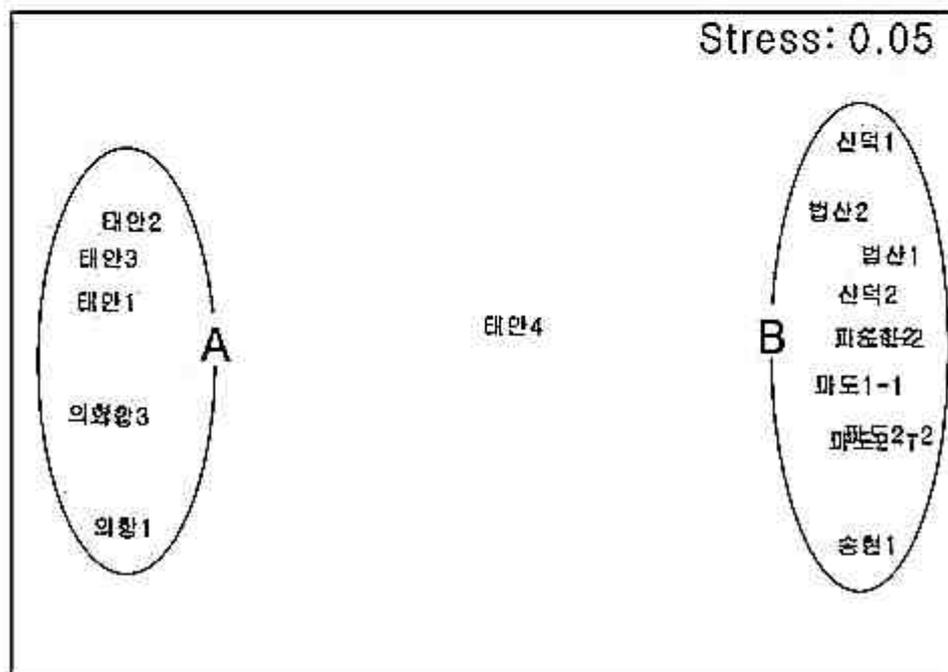
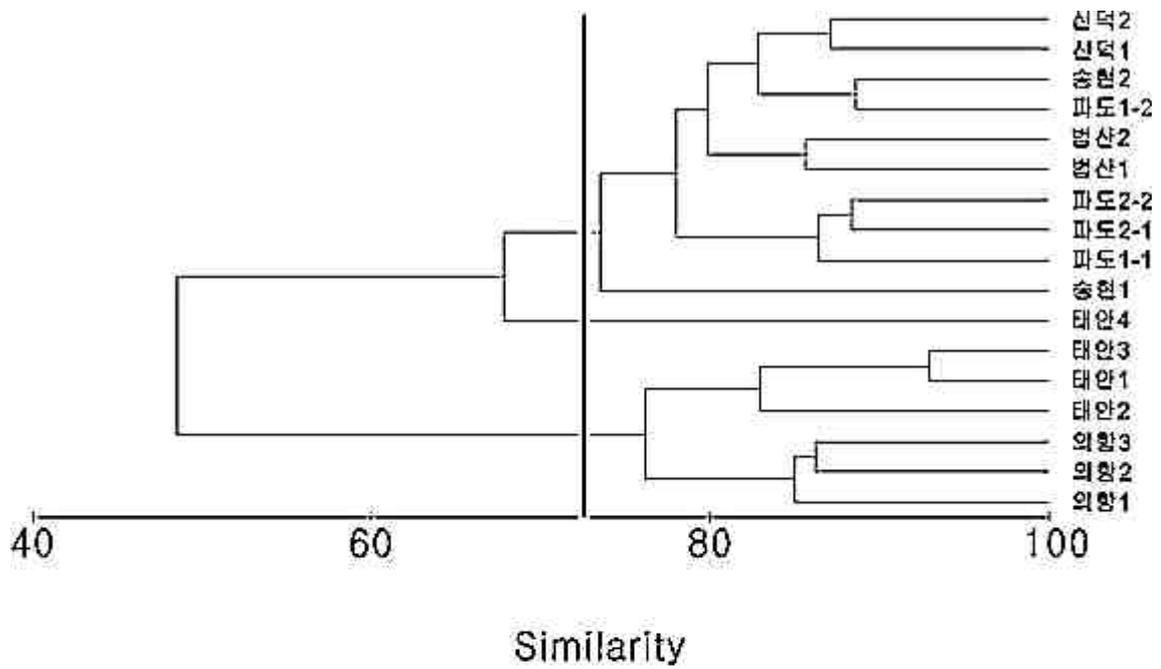


그림 4-8. 하계 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거한 집괴분석.

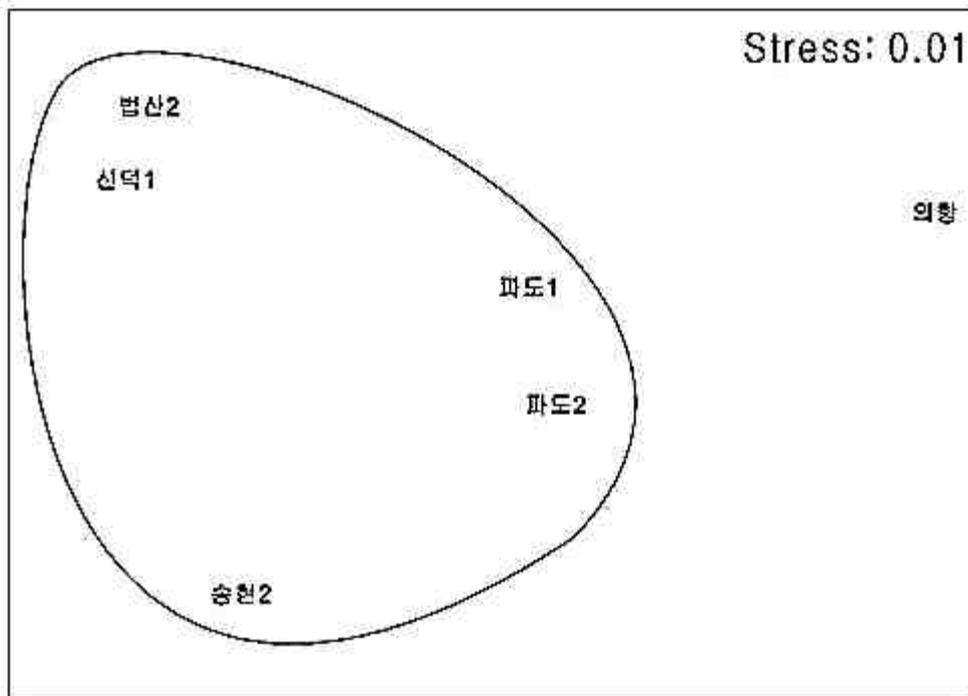
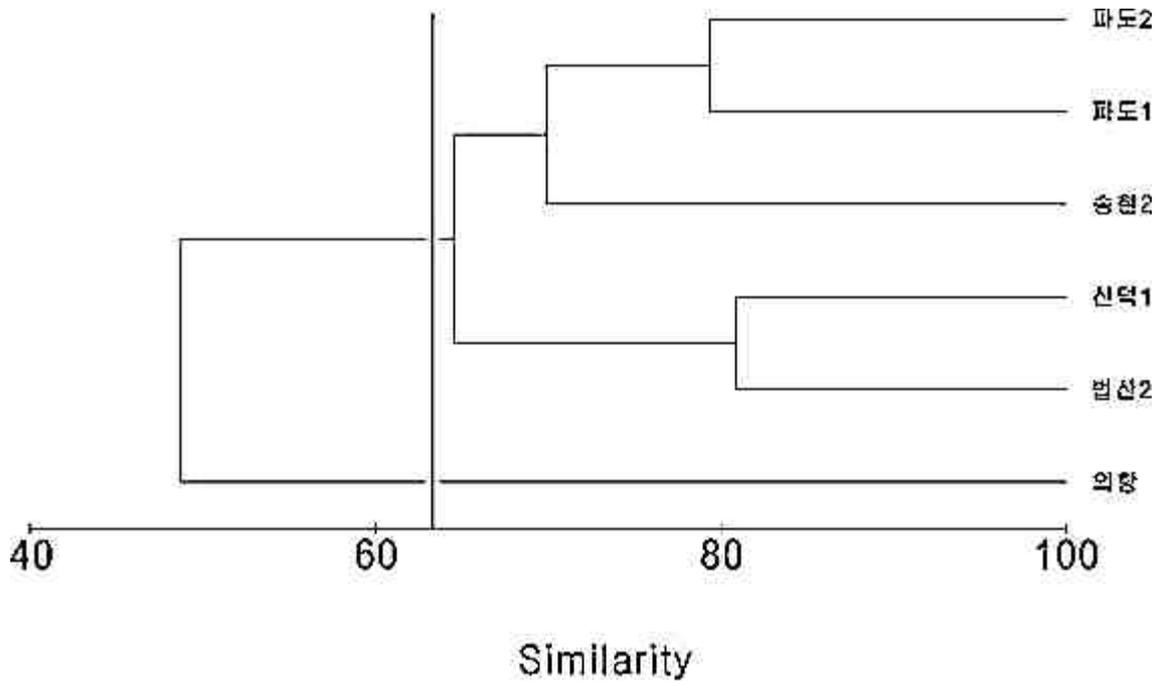


그림 4-9. 하계 망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거한 집괴분석.

3.2. 추계

3.2.1. 동물플랑크톤 주요 분류군의 출현 비율 (100 μ m)

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤의 주요 분류군은 요각류, 미충류, 야광충, 각 종 유생류(따개비류, 복족류, 이매패류, 불가사리류, 갯지렁이류), 화살벌레류, 해파리류 순으로 나타났다.

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤 중 요각류가 72.2(실험구 외측, 태안2) ~ 94.6 %(실험구 외측, 태안4)으로 최우점 분류군으로, 미충류가 1.8(실험구 내측, 신덕2) ~ 17.0 %(실험구 외측, 태안2)으로 차우점 분류군이었으나, 실험구인 태안 4와 대조구 의항3에서는 출현하지 않았다. 야광충이 0.1(실험구 내측, 송현2) ~ 13.7(실험구 내측, 신덕1)으로 나타났고, 실험구 내측 파도2-2에서는 출현하지 않았다. 각 종 유생류(따개비류, 복족류, 이매패류, 불가사리류, 갯지렁이류)가 0.9(실험구 내측, 신덕2) ~ 4.9(실험구 외측, 태안1)으로 나타났으며, 이외에 화살벌레류, 해파리류, 지각류는 낮은 출현 비율을 보였다(그림 4-10).

3.2.2. 동물플랑크톤 주요 분류군의 출현 비율(200 μ m)

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤의 주요 분류군은 요각류, 야광충, 각 종 유생류(따개비류, 복족류, 이매패류, 불가사리류, 갯지렁이류), 미충류, 화살벌레류, 해파리류 순으로, 망구직경 100 μ m의 동물동물플랑크톤 네트에 채집된 시료에서 차우점하는 분류군으로 출현하였던 미충류의 출현 비율이 다소 감소한 반면, 야광충의 출현 비율이 상대적으로 높게 나타났다.

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤 출현 비율을 보다 구체적으로 살펴 보면 요각류가 74.8(실험구 신덕) ~ 94.1 %(실험구 파도1)으로 최우점 분류군으로, 야광충이 3.4(실험구 파도2) ~ 17.5 %(실험구 법산)으로 차우점 분류군을, 각 종 유생류가 0.8(실험구 파도1) ~ 12.6 %(실험구 신덕)를 나타내었으며, 미충류, 화살벌레류, 해파리류는 2 % 미만으로 매우 낮은 출현 비율을 보였다(그림 4-11).

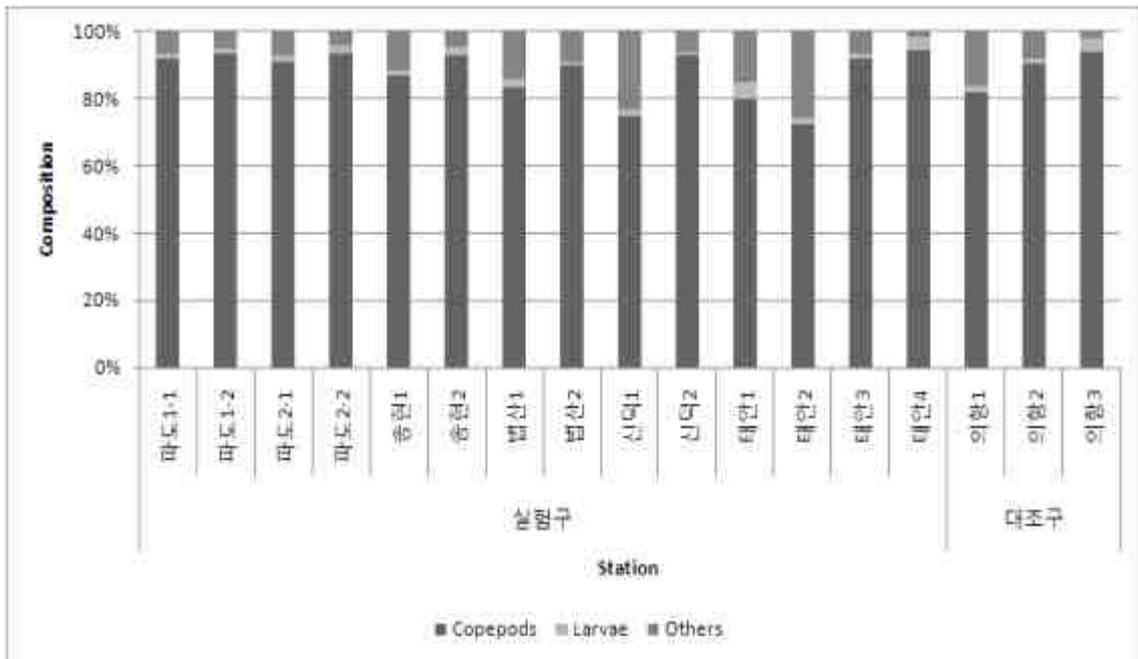


그림 4-10. 추계 조사해역에 출현하는 망목 100µm 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.

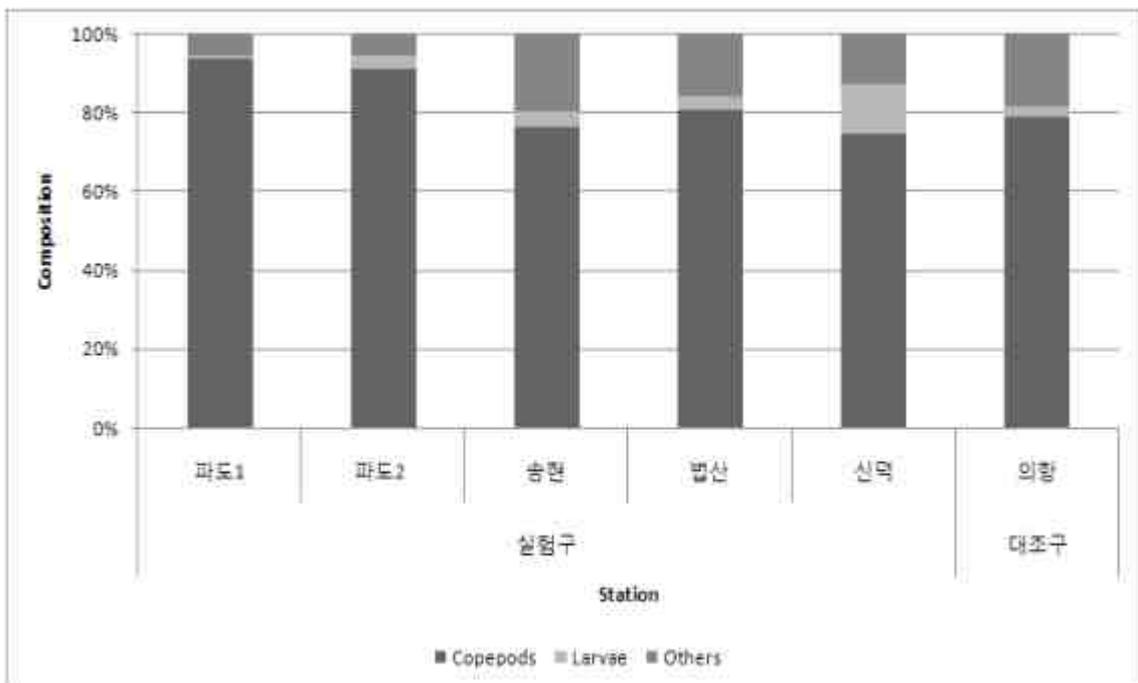


그림 4-11. 추계 조사해역에 출현하는 망목 200µm 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.

3.2.3. 동물플랑크톤 종조성 및 현존량(100 μ m)

조사해역의 출현개체수는 171.1(실험구 내측, 파도2-2) ~ 6238.7 indiv./m³(실험구 외측, 태안1)(평균 1210.5 indiv./m³)으로, 실험구 내측과 대조구 정정보다는 실험구 외측에서 다소 높게 나타났다. 총 분류군수는 30개로 파도 1-1에서 가장 적은 10개의 분류군이 출현한 반면, 실험구 외측이 태안 3에서 가장 높은 17개의 분류군이 출현 하였다(그림 4-12). 종 다양도 지수는 1.55(실험구 외측, 태안3) ~ 2.05(실험구 내측, 신덕1)(평균 1.80)으로 나타났다. 종 균등도 지수는 0.60(실험구 내측, 법산1) ~ 0.82(실험구 외측, 태안2)(평균 0.68)으로 나타났다(그림 4-14).

3.2.4. 동물플랑크톤 종조성 및 현존량 (200 μ m)

조사해역의 출현개체수는 69.1(실험구 파도2) ~ 304.6 indiv./m³(대조구 의항)(평균 184.5 indiv./m³)으로 실험구 보다는 대조구에서 높게 나타났다. 총 분류군수는 21개로 파도 1에서 10개로 가장 낮았으며, 파도 2, 법산, 신덕, 의항에서 13개로 가장 높았다(그림 4-13). 종 다양도 지수는 0.85(실험구 파도1) ~ 1.84(실험구 송현)(평균 1.52)으로 나타났다. 종 균등도 지수는 0.37(실험구 파도1) ~ 0.74(실험구 송현)(평균 0.60)으로 나타났다(그림 4-15). 하계와는 달리 출현개체수, 총 분류군 수, 종 다양도 지수, 종 균등도 지수 모두 망구직경 100 μ m 동물플랑크톤 네트에 의해 채집된 시료에 비해 낮게 나타났다.

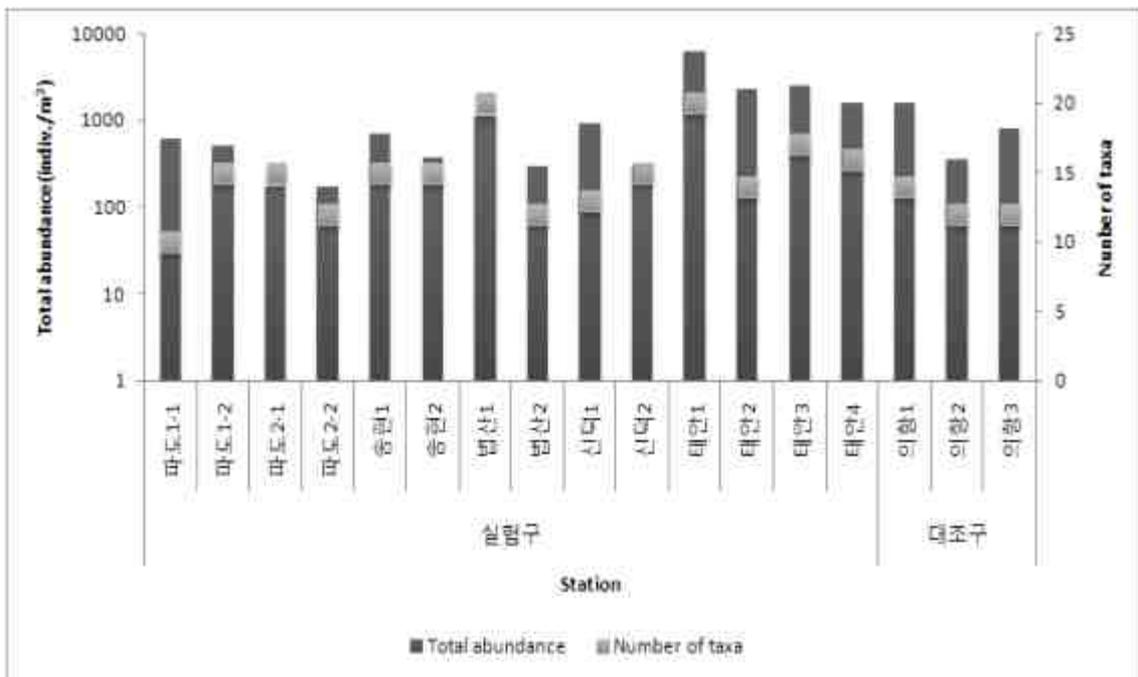


그림 4-12. 추계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수 (100µm).

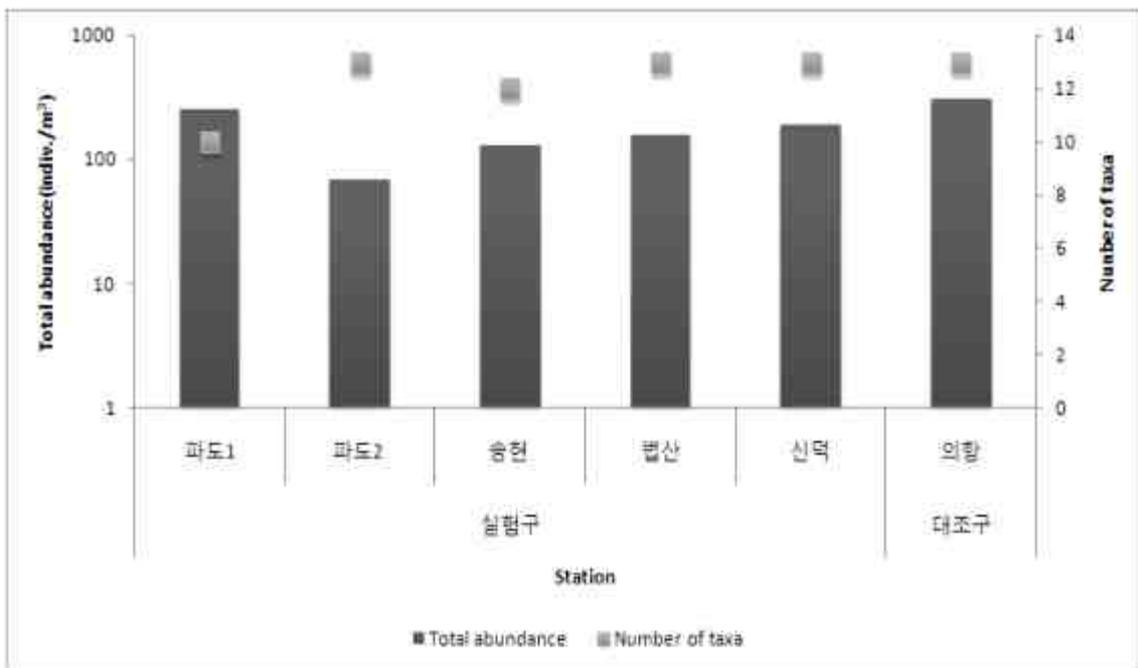


그림 4-13. 추계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수 (200µm).

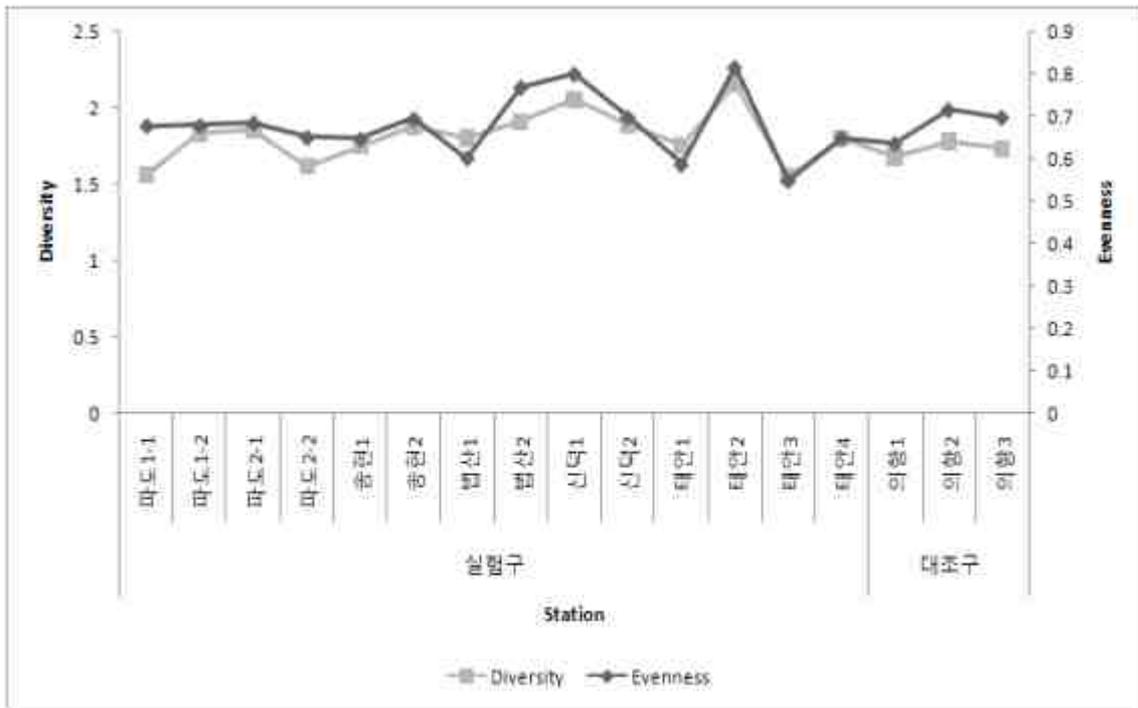


그림 4-14. 추계 동물플랑크톤의 생태지수(100 μ m).

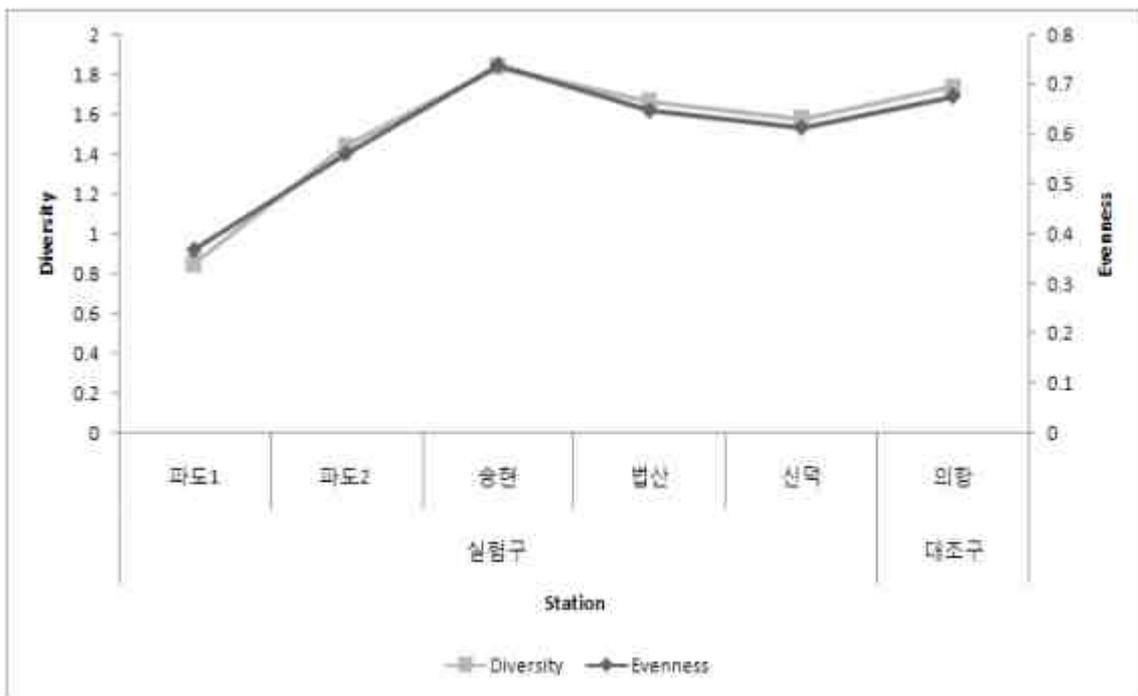


그림 4-15. 추계 동물플랑크톤의 생태지수 (100 μ m).

3.2.5. 집괴분석

조사정점 사이의 유사성을 비교하기 위해 조사해역에 출현한 동물플랑크톤 개체수를 자연 log 변환 후, bray-curtis similarity를 구하여 집괴분석을 실시하였다.

망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트로 채집 시 추계의 집괴분석 결과를 보면 유사도 77 % 로 1개의 정점군으로 나타났다. 정점군에 영향을 미치는 동물플랑크톤을 보면 *Paracalanus parvus* s. l., *Oithona* spp., *Oikopleura dioica*, *Acartia copepodites*, *Corycaeus affinis* 으로 구성되었다(그림 4-16).

망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트로 채집 시 추계의 집괴분석 결과를 보면 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트와 마찬가지로 유사도 77 %에서 1개의 정점군으로 나타났다. 그러나 정점군에 영향을 미치는 동물플랑크톤은 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트와 달리 *Paracalanus parvus* s. l., *Acartia copepodites*, *Corycaeus affinis*는 포함된 반면 *Noctiluca scintillans*, *Acartia hong*가 새롭게 포함되었으나, *Oikopleura dioica*는 제외되었다. 한편, 파도1은 *Paracalanus parvus* s. l., *Acartia copepodites* 가, 의항은 *Paracalanus parvus* s. l., *Noctiluca scintillans*, *Acartia hong*, *Corycaeus affinis* 가 각각 독립적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 4-17).

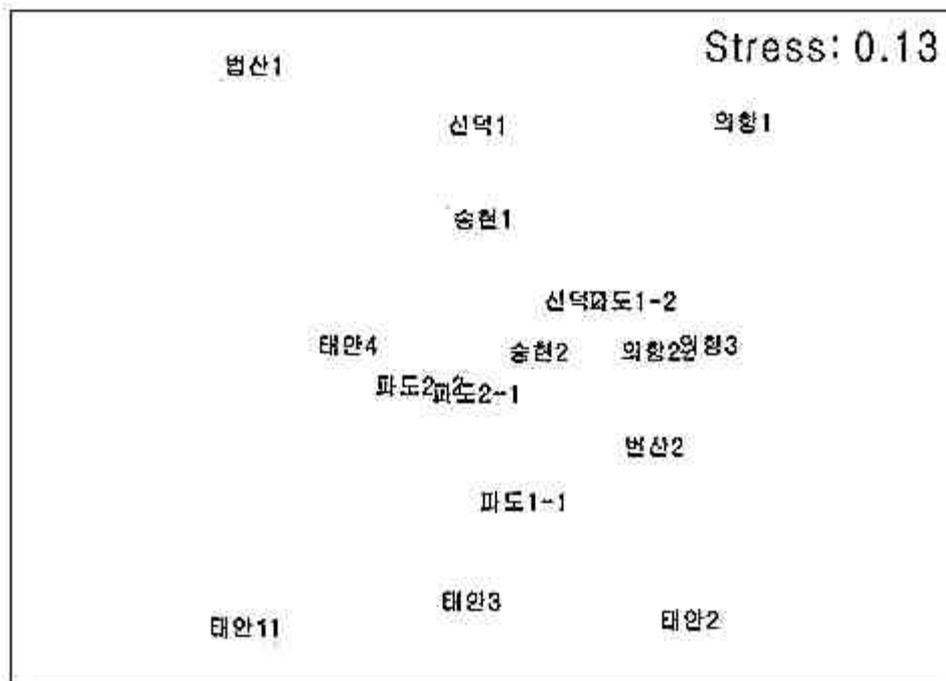
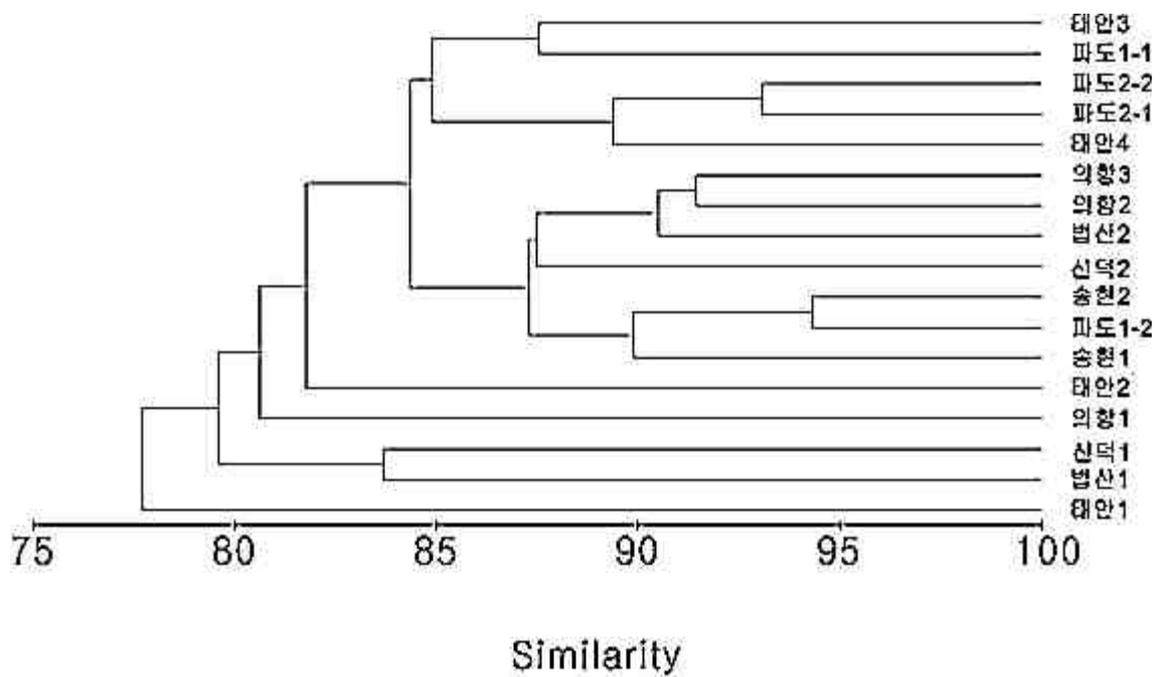


그림 4-16. 추계 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거한 집괴분석.

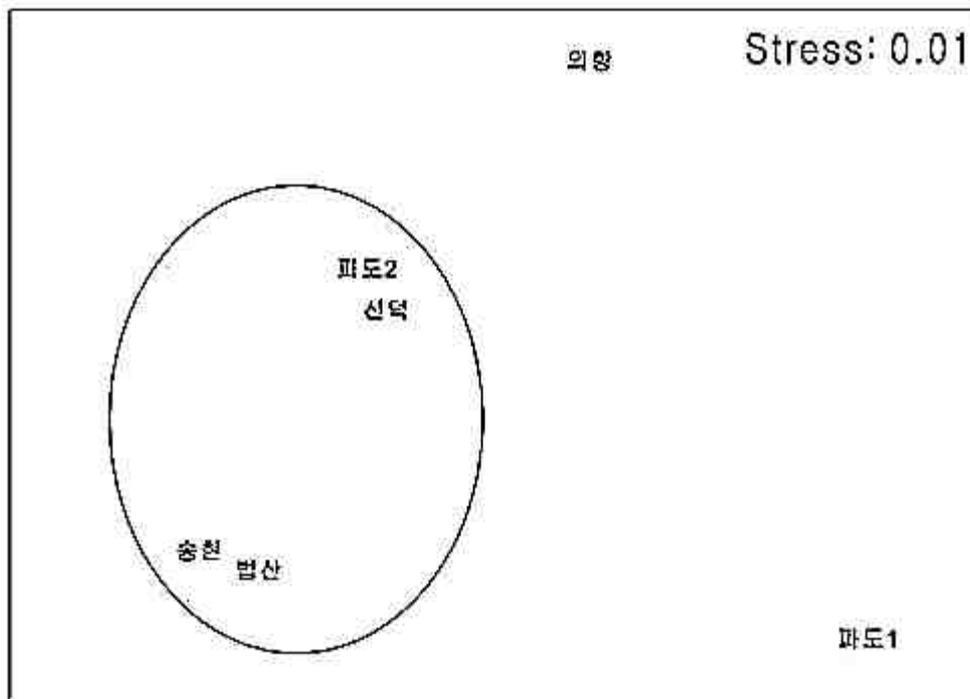
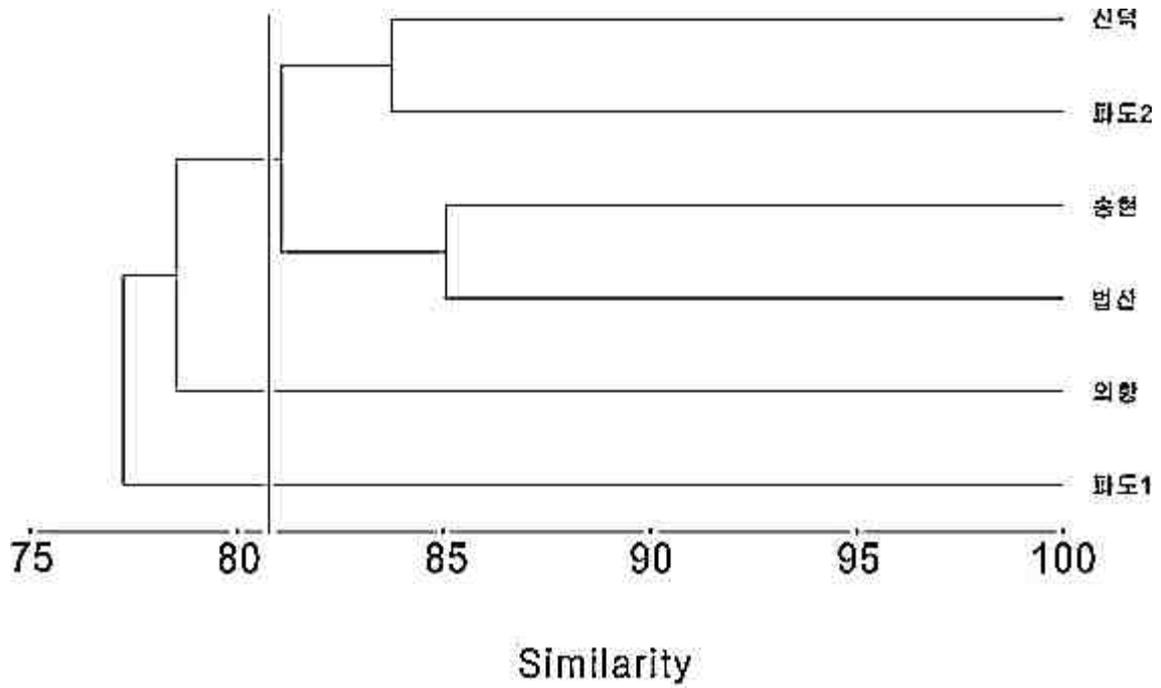


그림 4-17. 추계 망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거한 집괴분석.

3.3. 통계

3.3.1. 동물플랑크톤 주요 분류군의 출현 비율(100 μ m)

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤의 주요 분류군은 요각류, 야광충, 각 종 유생류(따개비류, 복족류, 이매패류, 불가사리류, 갯지렁이류), 화살벌레류 순으로 나타났다.

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤 중 요각류가 93.7(실험구 내측, 파도2-1) ~ 99.1 %(대조구, 의항2)으로 최우점 분류군으로 출현하였으나, 이외에 야광충, 각 종 유생류, 화살벌레류는 매우 낮은 출현 비율을 보였다(그림 4-18).

3.3.2. 동물플랑크톤 주요 분류군의 출현 비율 (200 μ m)

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤의 주요 분류군은 요각류, 야광충, 화살벌레류, 각 종 유생류(따개비류, 복족류, 이매패류, 불가사리류, 갯지렁이류) 순으로 나타났다.

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤 출현 비율은 요각류가 83.1(실험구 파도1) ~ 96.5 %(대조구 의항)으로 최우점 분류군으로, 야광충이 3.0(실험구 법산) ~ 14.5 % (실험구 파도1)으로 차우점 분류군으로 나타난 반면, 화살벌레류와 각 종 유생류는 매우 낮은 출현 비율을 보였다(그림 4-19).

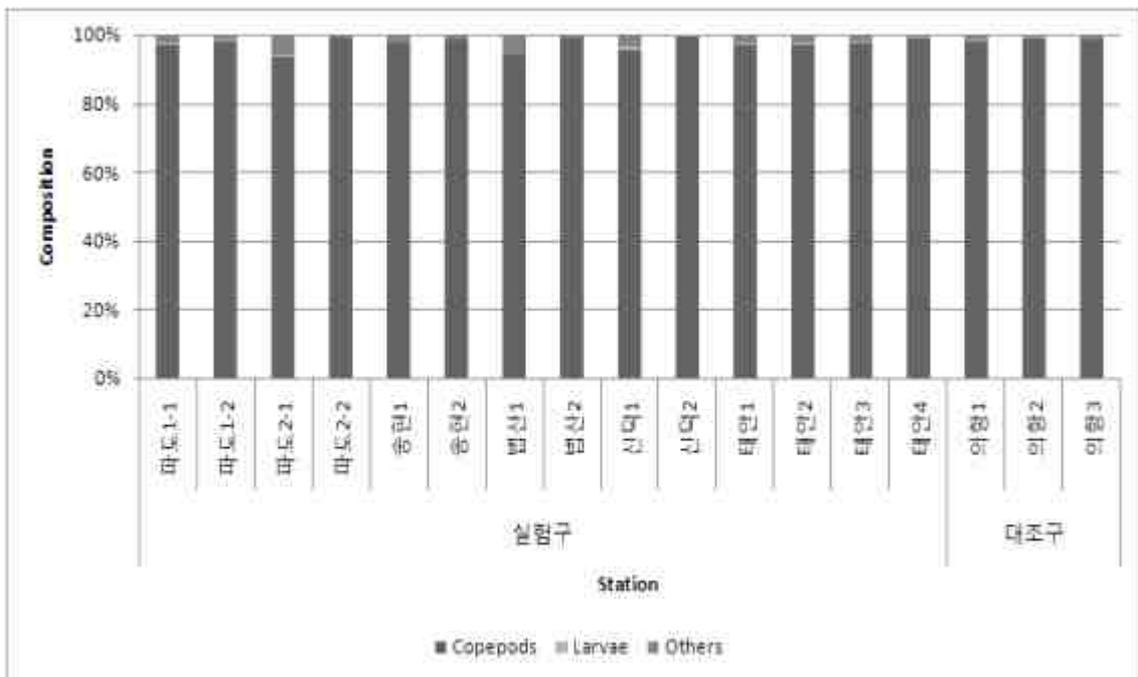


그림 4-18. 동계 조사해역에 출현하는 망목 100µm 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.

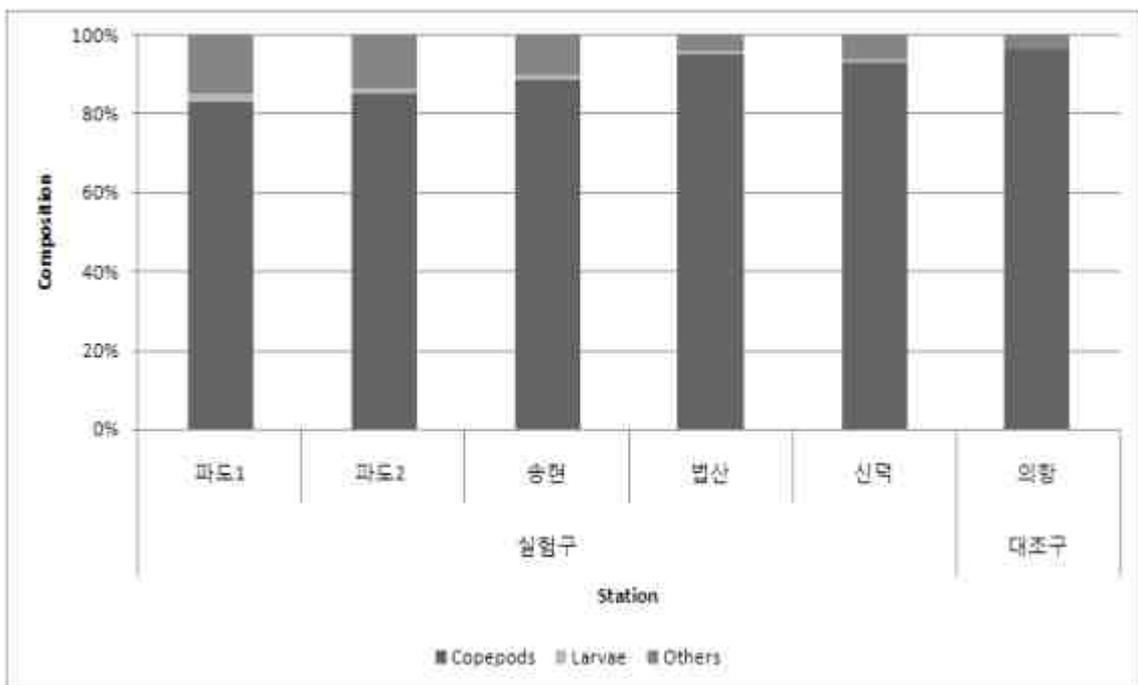


그림 4-19. 동계 조사해역에 출현하는 망목 200µm 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.

3.3.3. 동물플랑크톤 종조성 및 현존량(100 μ m)

조사해역의 출현개체수는 94.0(실험구 내측, 법산2) ~ 3690.6 indiv./m³(대조구, 의항1)(평균 981.6 indiv./m³)으로, 실험구 내외측 보다 대조구에서 높게 나타났다. 총 분류군수는 21개였으며, 송현 2, 법산 1, 신덕 2에서 최소인 10개 분류군이, 태안 1에서 최대인 17개의 분류군이 출현하였다(그림 4-20). 종 다양도 지수는 1.41(실험구 내측, 파도2-1) ~ 2.15(실험구 외측, 태안1)(평균 1.77)으로 나타났다. 종 균등도 지수는 0.51(실험구 내측, 법산1) ~ 0.88(실험구 태측, 신덕1)(평균 0.70)으로 나타났다(그림 4-22).

3.3.4. 동물플랑크톤 종조성 및 현존량 (200 μ m)

조사해역의 출현개체수는 36.6(실험구 법산) ~ 514.6 indiv./m³(대조구 의항)(평균 166.4 indiv./m³)으로 나타났다. 총 분류군수는 19개였으며, 법산에서 9개로 최소 값을 파도 1에서 12개로 최대 값을 보였다(그림 4-21). 종 다양도 지수는 1.82(실험구 신덕) ~ 2.09(실험구 파도2)(평균 1.93)으로 나타났다. 종 균등도 지수는 0.73(실험구 파도1) ~ 0.85(실험구 송현)(평균 0.79)으로 나타났다(그림 4-23). 하계와 마찬가지로 출현개체수와 분류군 수는 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에 비해 낮은 값을 보인 반면, 종 다양도 지수와 종 균등도 지수는 상대적으로 높았다.

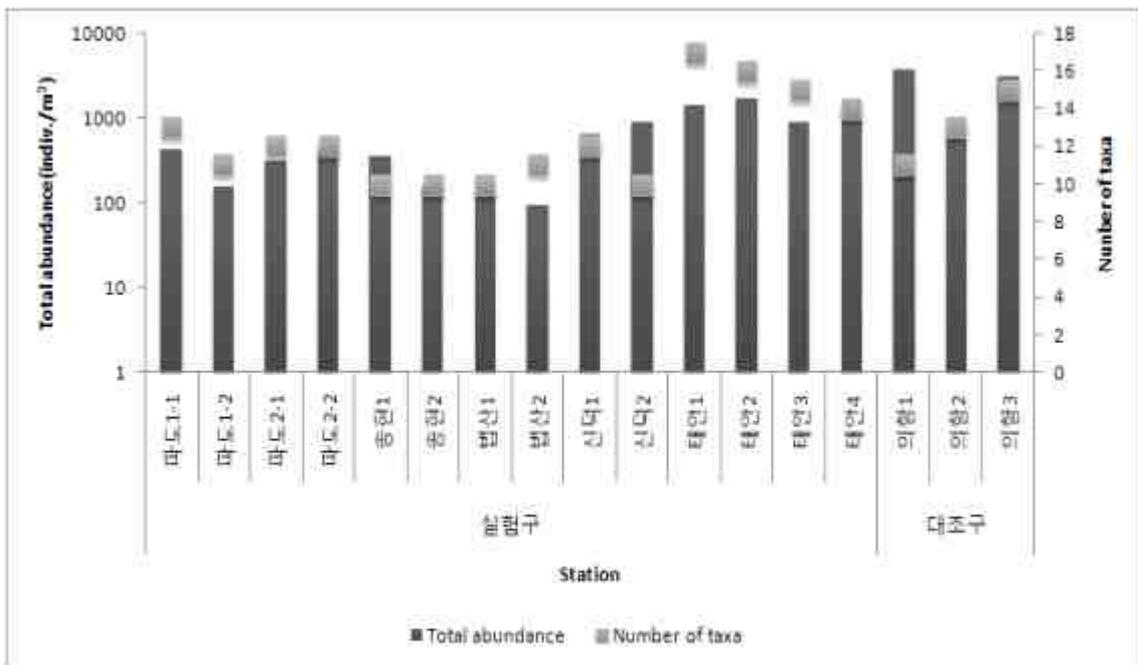


그림 4-20. 동계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수(100µm).

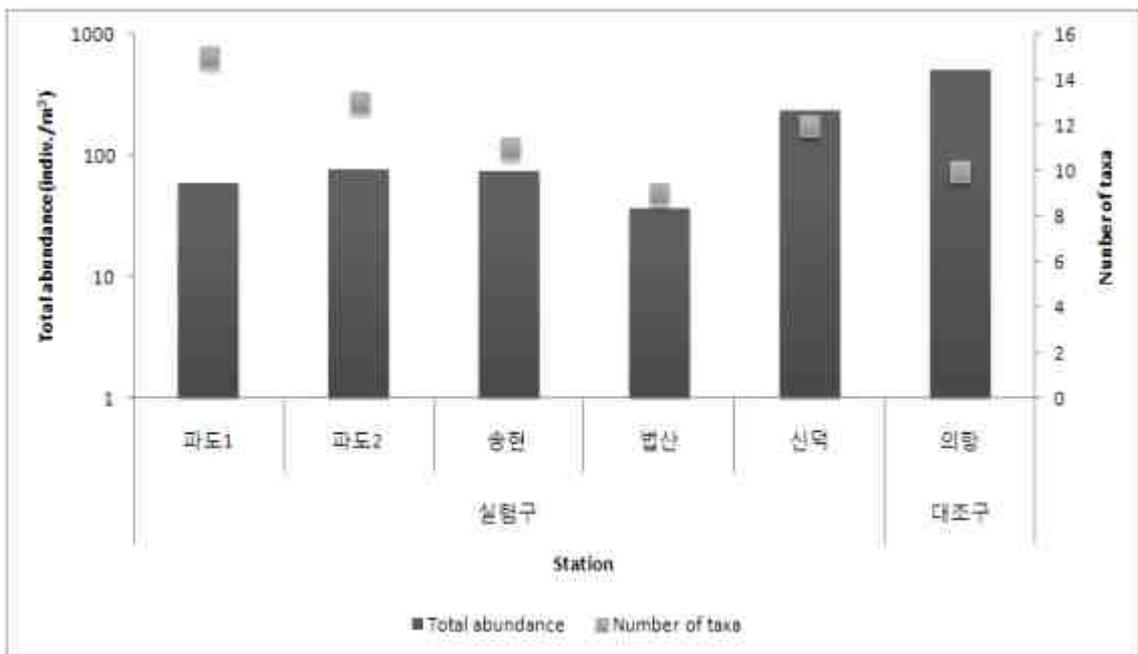


그림 4-21. 동계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수(200µm).

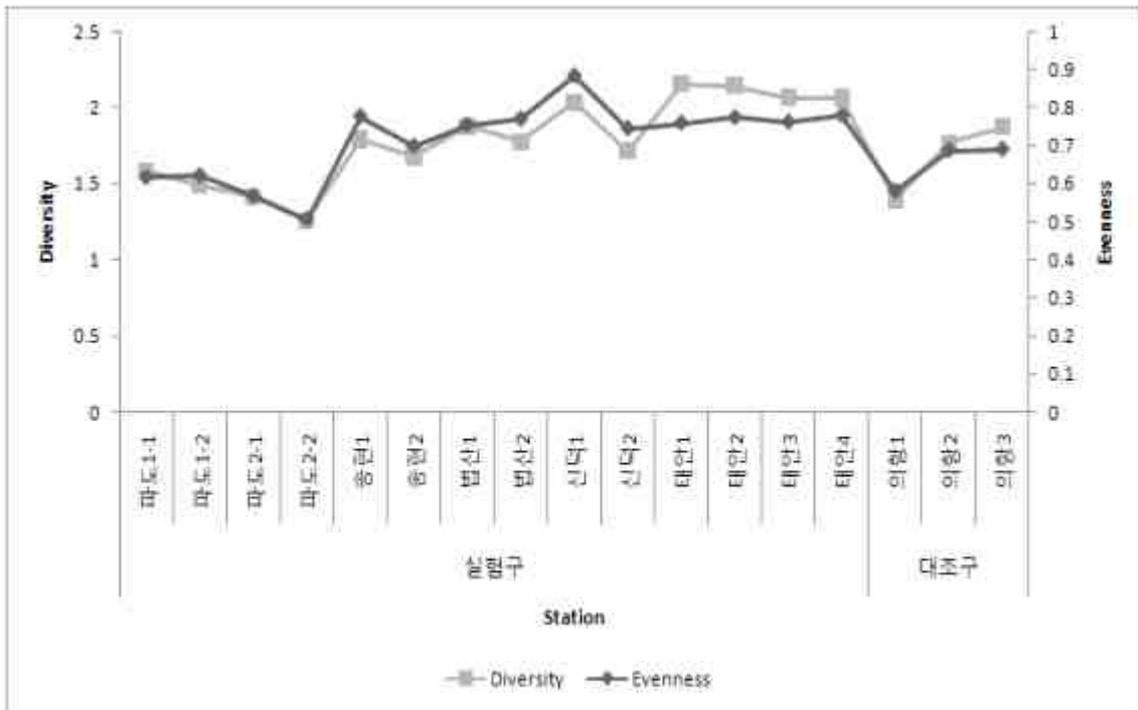


그림 4-22. 동계 조사해역의 생태지수(100µm).

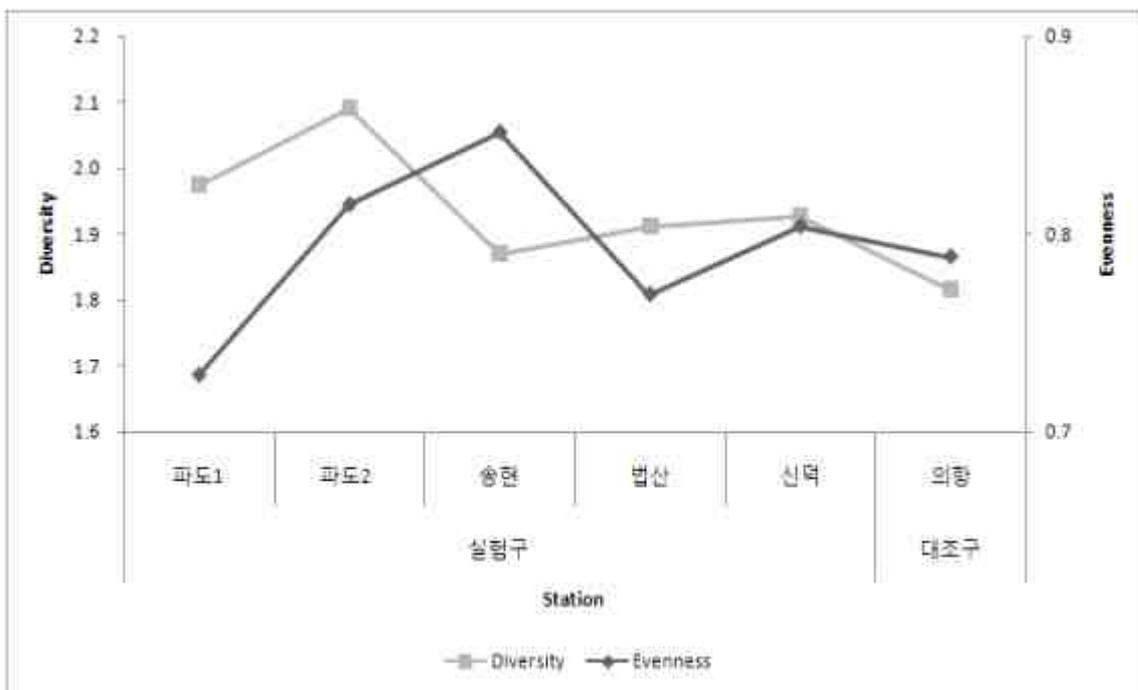


그림 4-23. 동계 조사해역의 생태지수(200µm).

3.3.5. 집괴분석

조사정점 사이의 유사성을 비교하기 위해 조사해역에 출현한 동물플랑크톤 개체수를 자연 log 변환 후, bray-curtis similarity를 구하여 집괴분석을 실시하였다. 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트로 채집시 동계의 집괴분석 결과를 보면 유사도 86 % 에서 3개의 정점군으로 나뉘어졌다. 각 정점군에 영향을 미치는 동물플랑크톤을 살펴 보면 A정점군에서 Copepod nauplius, *Paracalanus parvus* s. l., *Acartia hongii*, 미동정 harpacticoids, *Acartia copepodites*, *Oithona* spp. 으로 구성되었고, B정점군은 Copepod nauplius, *Oithona* spp., 미동정 harpacticoids, *Paracalanus parvus* s. l., *Acartia copepodites* 으로 구성되었고, C정점군은 Copepod nauplius, *Oithona* spp., *Corycaeus affinis*, 으로 구성되었고, 의항 1은 Copepod nauplius, *Acartia copepodites*, *Pavocalanus crassirostris*, *Corycaeus affinis*, *Paracalanus parvus* s. l. 으로 독립적으로 구성되어 출현하였다(그림 4-24).

망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트로 채집한 시료를 바탕으로 한 결과는 유사도 84 % 에서 1개의 정점군으로 나타났다. 정점군에 영향을 미치는 동물플랑크톤을 보면 *Acartia hongii*, *Acartia copepodites*, *Oithona* spp., *Paracalanus parvus* s. l, 으로 구성되었고, 파도 1은 *Oithona* spp., *Noctiluca scintillans*, *Corycaeus affinis*, *Acartia hongii* 으로 구성되어 독립적인 성향을 보였다(그림 4-25).

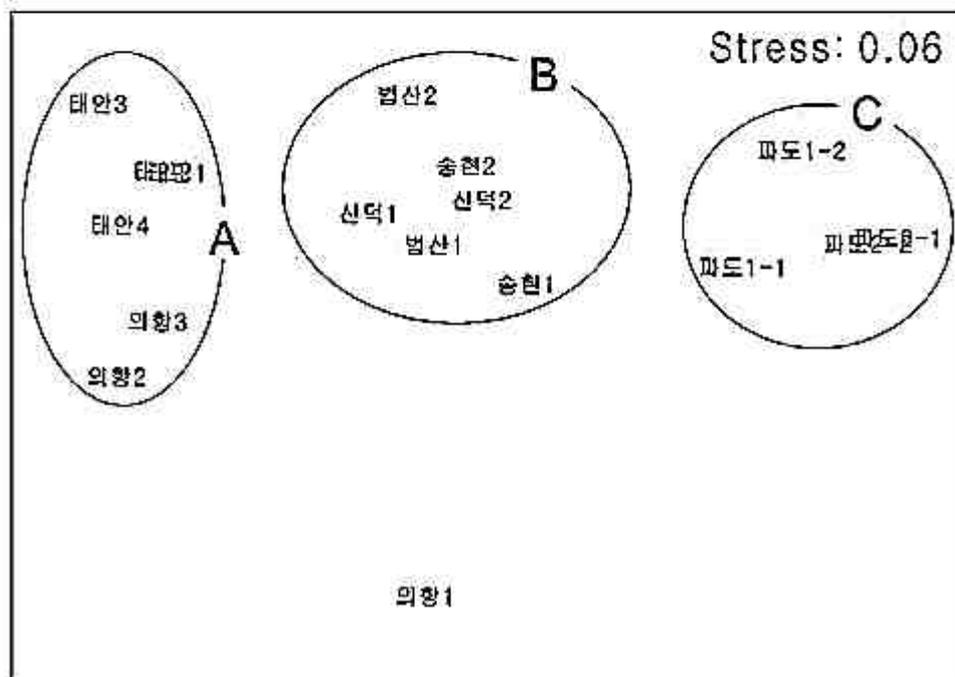
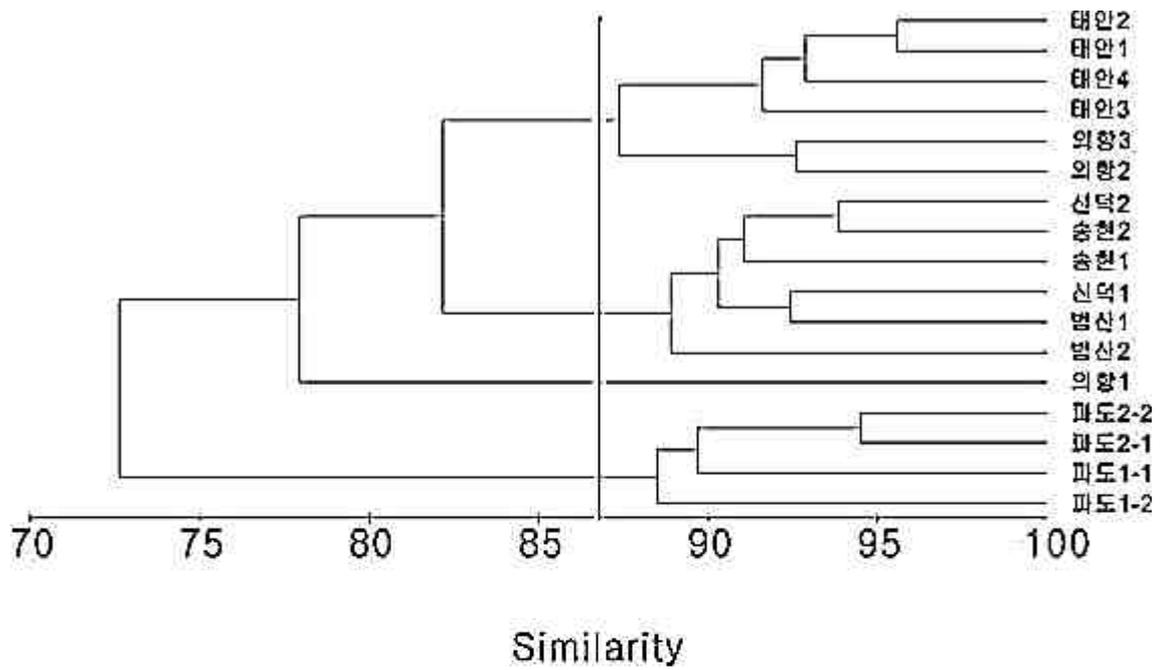


그림 4-24. 동계 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료에 근거한 집괴분석.

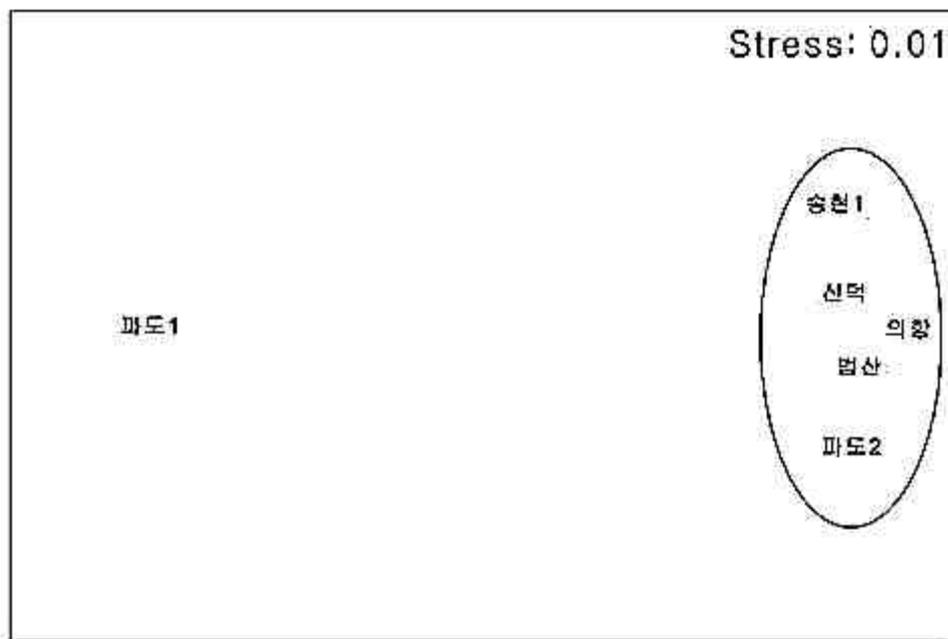
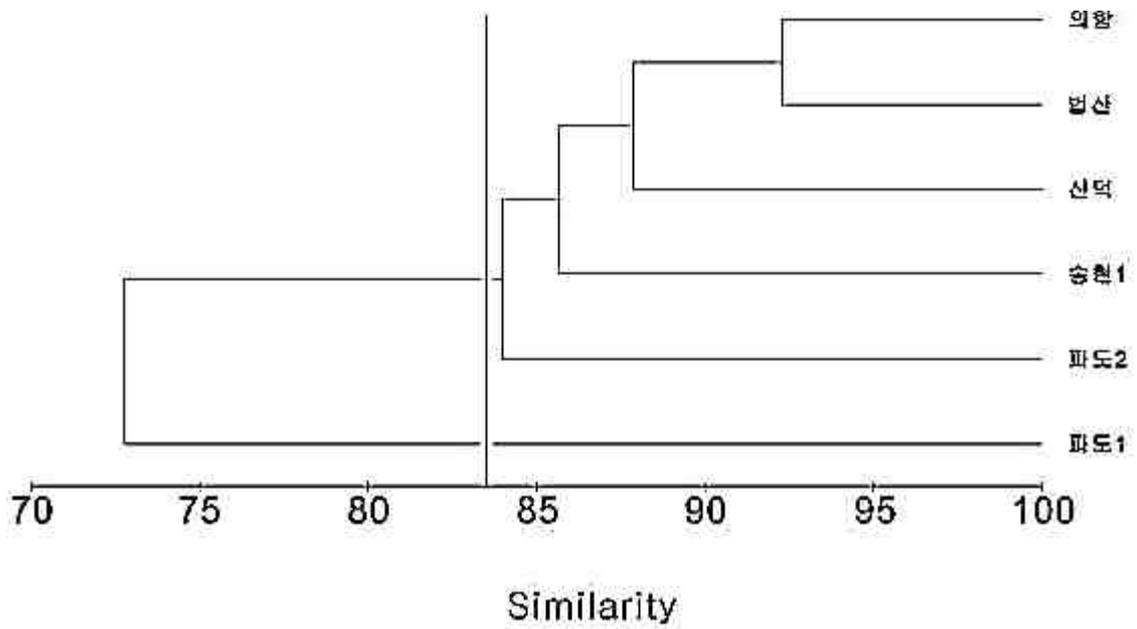


그림 4-25. 동계 망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료에 근거한 집괴분석.

3.4. 총계

3.4.1. 동물플랑크톤 주요 분류군의 출현 비율(100 μ m)

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤의 주요 분류군은 요각류, 야광충, 각 종 유생류(따개비류, 복족류, 이매패류, 불가사리류, 갯지렁이류), 화살벌레류 순으로 나타났다.

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤 중 요각류가 91.9(실험구 외측, 태안2) ~ 99.6 %(실험구 외측, 태안3)으로 최우점 분류군으로 출현한 반면, 야광충, 각 종 유생류, 화살벌레류는 매우 낮은 출현 비율을 보였다(그림 4-26).

3.4.2. 동물플랑크톤 주요 분류군의 출현 비율(200 μ m)

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤의 주요 분류군은 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에서 채집된 결과와 마찬가지로 요각류, 야광충, 각 종 유생류(따개비류, 복족류, 이매패류, 불가사리류, 갯지렁이류), 화살벌레류 순으로 나타났다.

조사해역에 출현하는 동물플랑크톤 중 요각류는 82.7(대조구 의항) ~ 95.5 % (실험구 신덕)으로 최우점 분류군으로, 야광충은 2.0(실험구 송현) ~ 16.7 %(대조구 의항)으로 차우점 분류군을 차지하였으나, 이외에 각 종 유생류와 화살벌레류는 매우 낮은 출현 비율로 나타났다(그림 4-27).

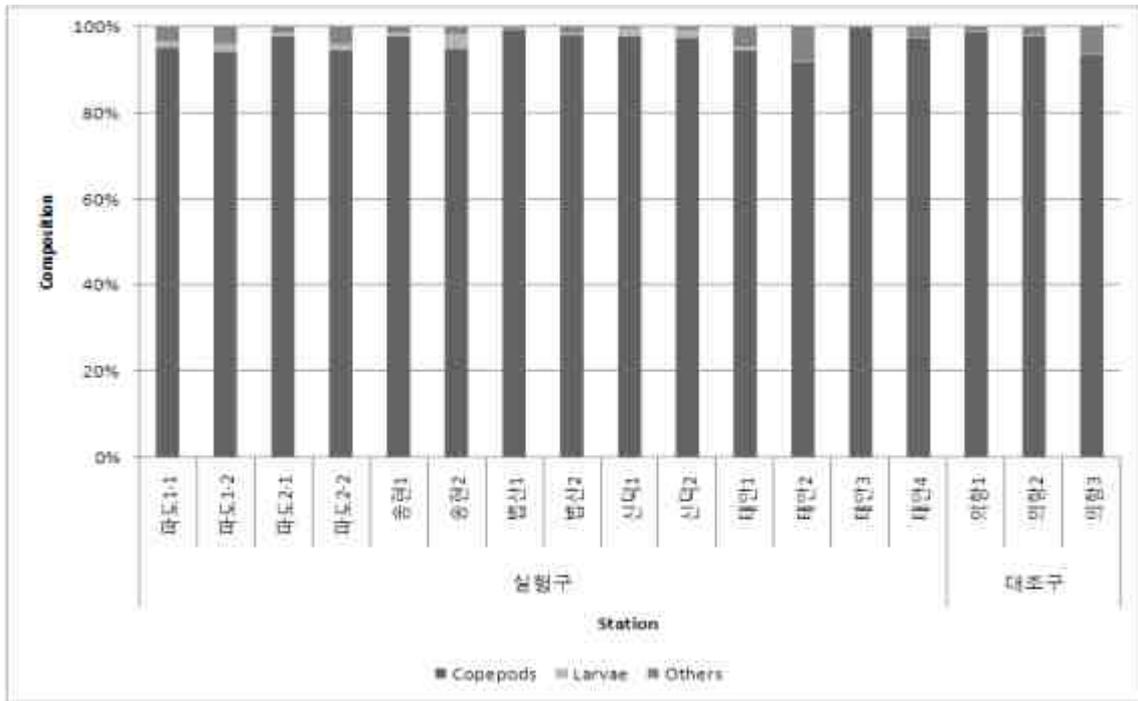


그림 4-26. 춘계 조사해역에 출현하는 망목 100µm 동물프랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.

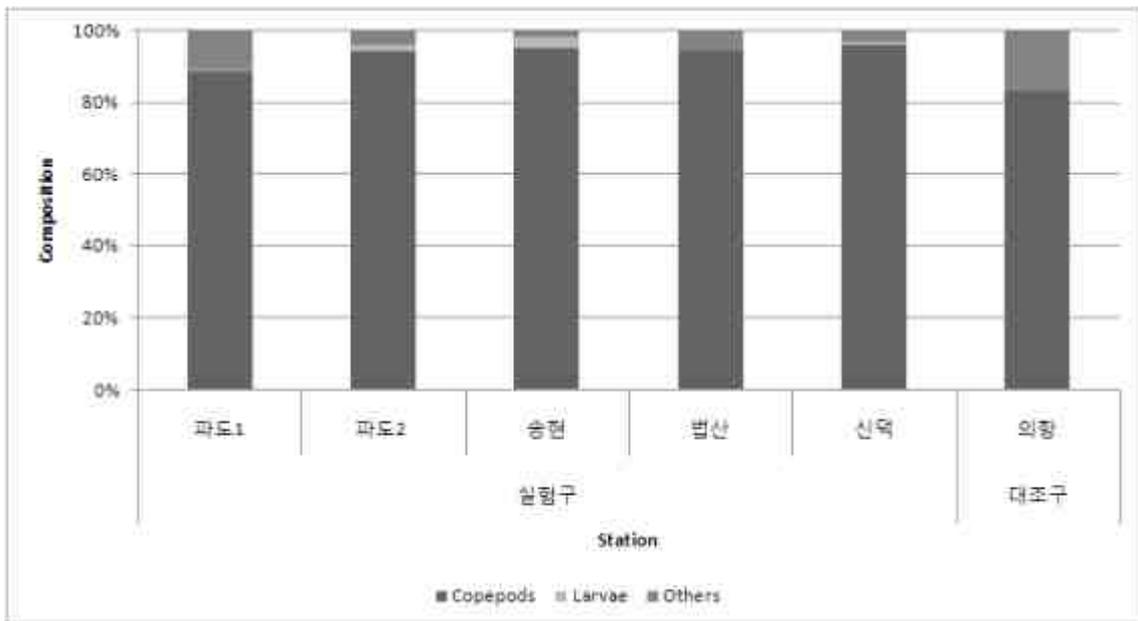


그림 4-27. 춘계 조사해역에 출현하는 망목 200µm 동물플랑크톤 네트에 채집된 주요 분류군의 출현 비율.

3.4.3. 동물플랑크톤 종조성 및 현존량(100 μ m)

조사해역의 출현개체수는 945.1(실험구 내측, 파도1-2) ~ 6176.4 indiv./m³(실험구 내측, 파도1-1)(평균 2345.3 indiv./m³)으로 만 안쪽에서 높았다. 총 분류군수는 26개였으며, 송현 1, 태안 3, 의항 3에서 11개의 최소 값을, 송현 2와 법산 1에서 18개의 최고 값을 보였다(그림 4-28). 종 다양도 지수는 0.94(대조구; 의항 1, 의항2) ~ 2.15 (실험구 외측, 태안1)(평균 1.42)으로 나타났다. 종 균등도 지수는 0.51(실험구 내측, 법산1) ~ 1.71(실험구; 송현2, 태안2)(평균 0.54)으로 나타났다(그림 4-30).

3.4.4. 동물플랑크톤 종조성 및 현존량(200 μ m)

조사해역의 출현개체수는 122.6(실험구 파도2) ~ 619.6 indiv./m³(실험구 법산)(평균 317.6 indiv./m³)으로 나타났다. 총 분류군수는 19개였으며, 송현과 신덕에서 11개로 최소 값을, 파도 1과 파도 2에서 13개의 최대 값을 보였다(그림 4-29). 종 다양도 지수는 1.21(실험구 신덕) ~ 1.69(대조구 의항)(평균 1.44)으로 나타났다. 종 균등도 지수는 0.50(실험구 신덕) ~ 0.68(대조구 의항)(평균 0.58)으로 나타났다(그림 4-31). 종 균등도 지수 만이 망구직경 100 μ m 동물플랑크톤 네트에서 채집된 값보다 높게 나타났다.

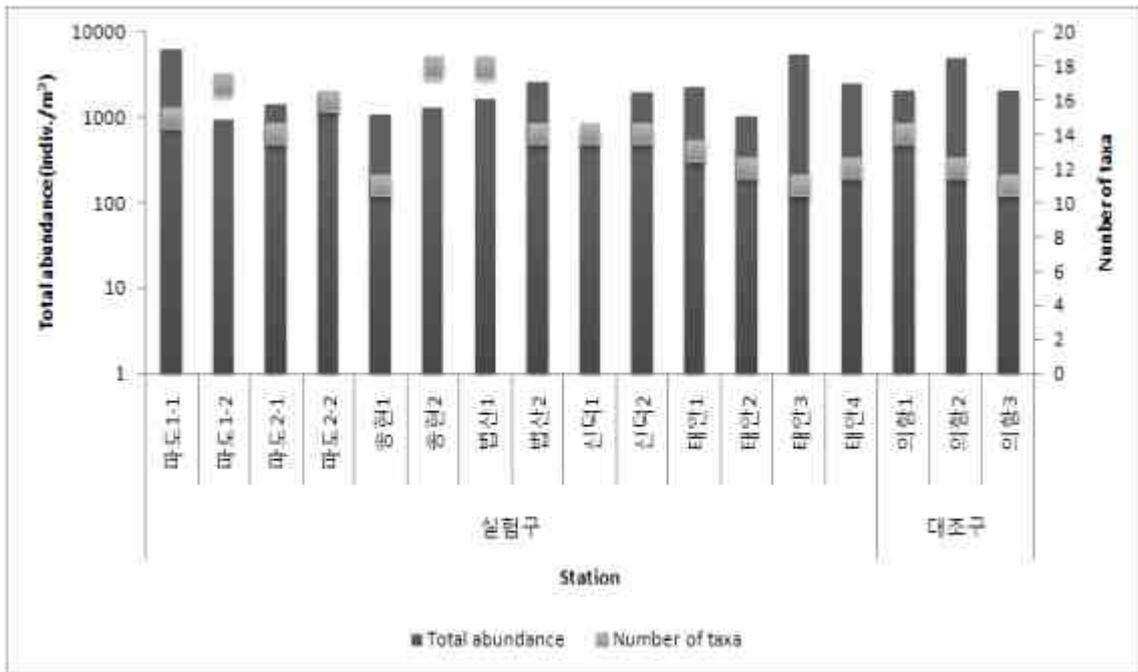


그림 4-28. 총계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수(100µm).

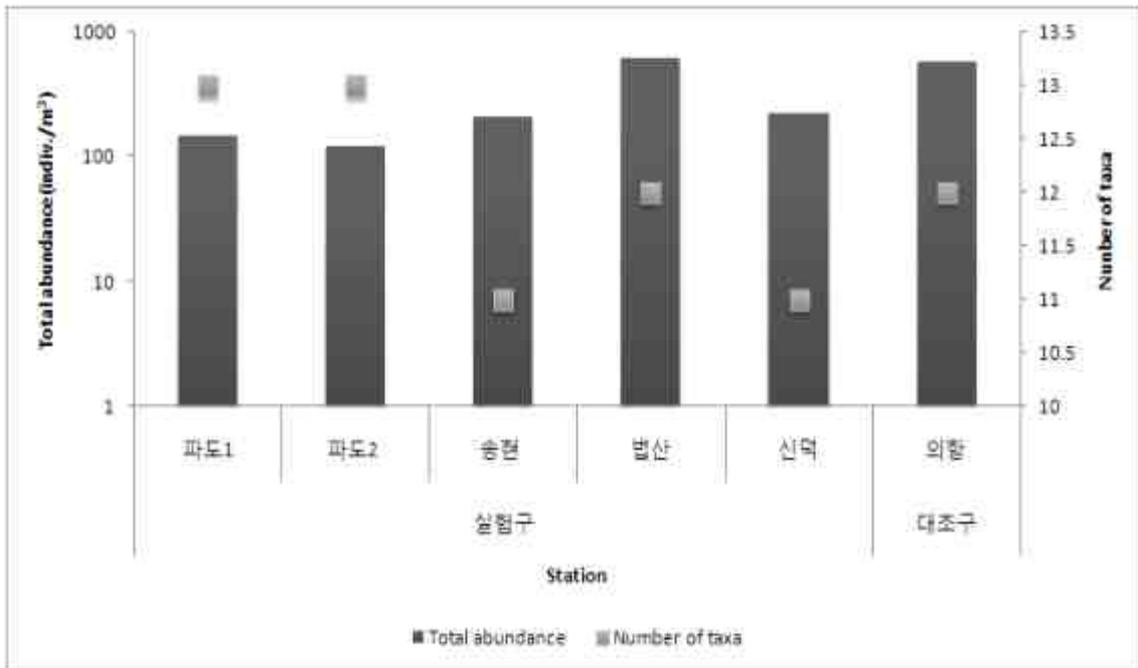


그림 4-29. 총계 조사해역의 동물플랑크톤 현존량 및 분류군수(200µm).

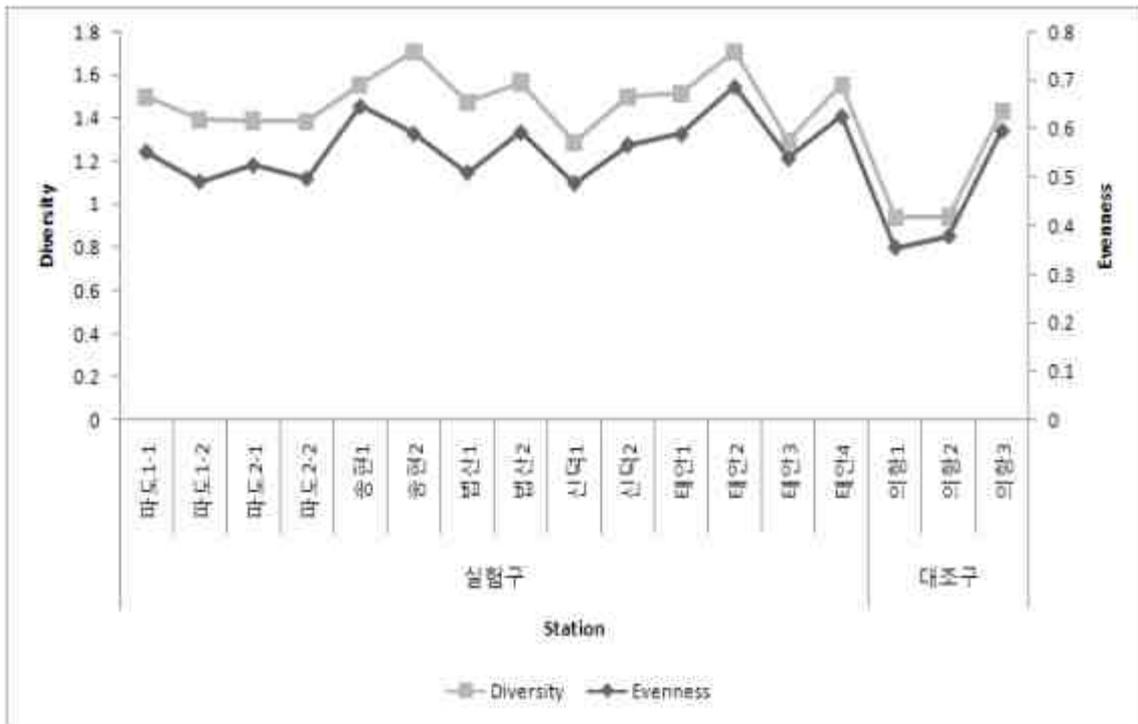


그림 4-30. 춘계 조사해역의 생태지수(100µm).

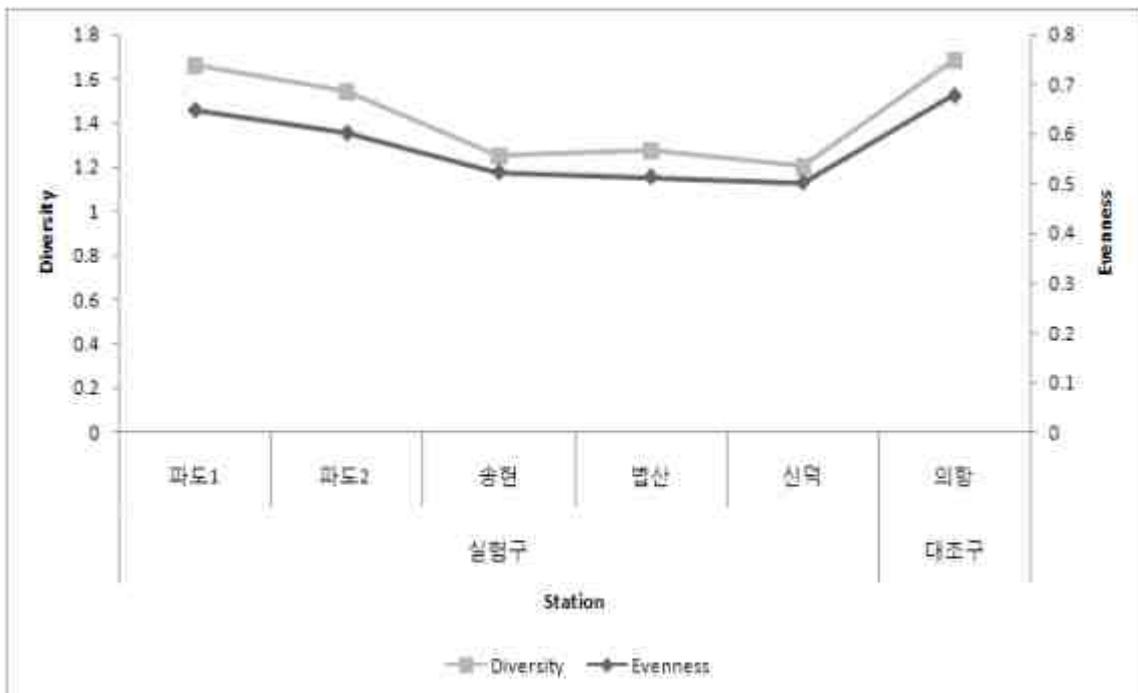


그림 4-31. 춘계 조사해역의 생태지수(200µm).

3.4.5. 집괴분석

조사정점 사이의 유사성을 비교하기 위해 조사해역에 출현한 동물플랑크톤 개체수를 자연 log 변환 후, bray-curtis similarity를 구하여 집괴분석을 실시하였다. 망구직경 100 μm 으로 채집 시 총계의 집괴분석 결과를 보면, 유사도 78 % 로 1개의 정점군으로 묶인다. 정점군에 영향을 미치는 동물플랑크톤을 보면 Copepod nauplius, *Acartia* copepodites, 미동정 harpacticoids 으로 구성된다(그림 4-32).

망구직경 200 μm 으로 채집 시 집괴분석 결과 또한 유사도 지수 84 % 로 1개의 정점군으로 묶인다. 정점군에 영향을 미치는 동물플랑크톤은 *Acartia* copepodites 이외에, *Acartia hongii*, *Noctiluca scintillans*가 망구직경 100 μm 동물플랑크톤 채집과 다르게 영향을 미친 반면, 의향은 위와는 다소 다르게 *Acartia* copepodites, *Noctiluca scintillans*, Copepod nauplius, *Pavocalanus crassirostris*가 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 4-33).

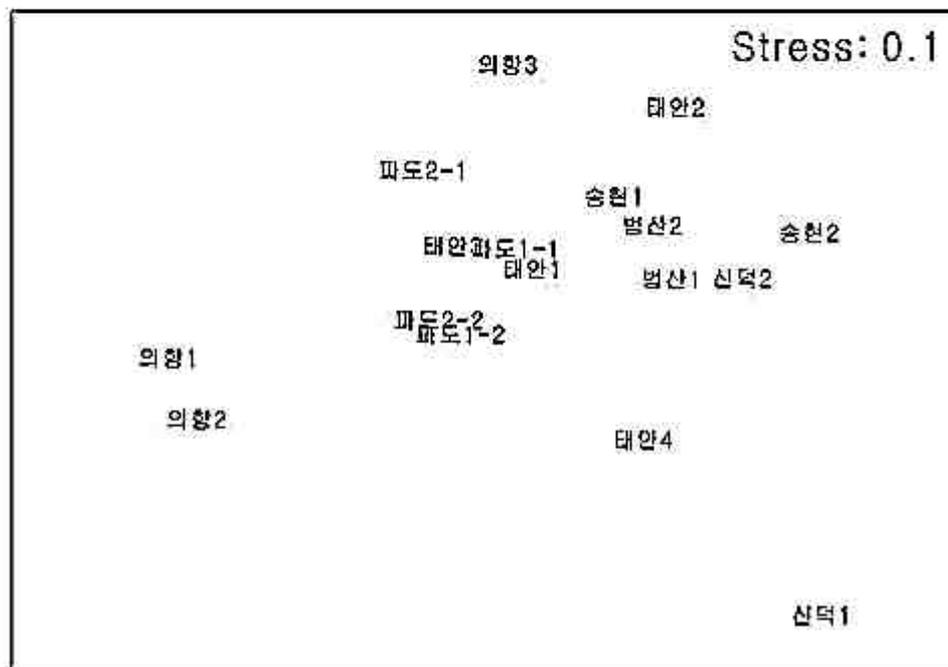
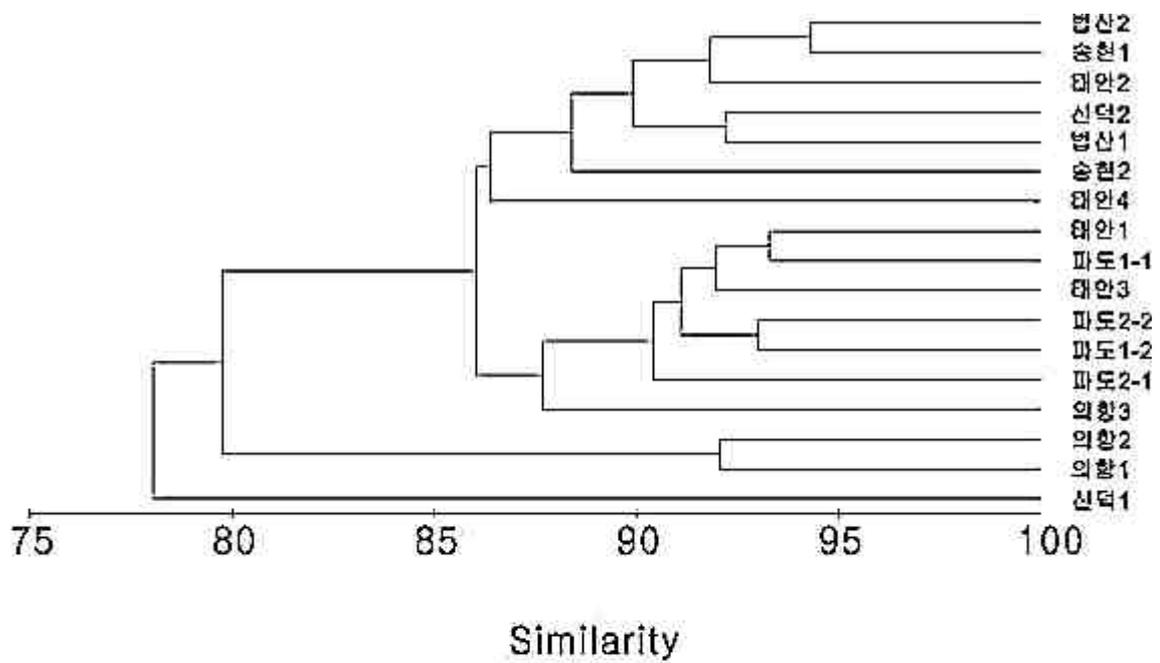


그림 4-32. 총계 망구직경 100 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거한 집괴분석.

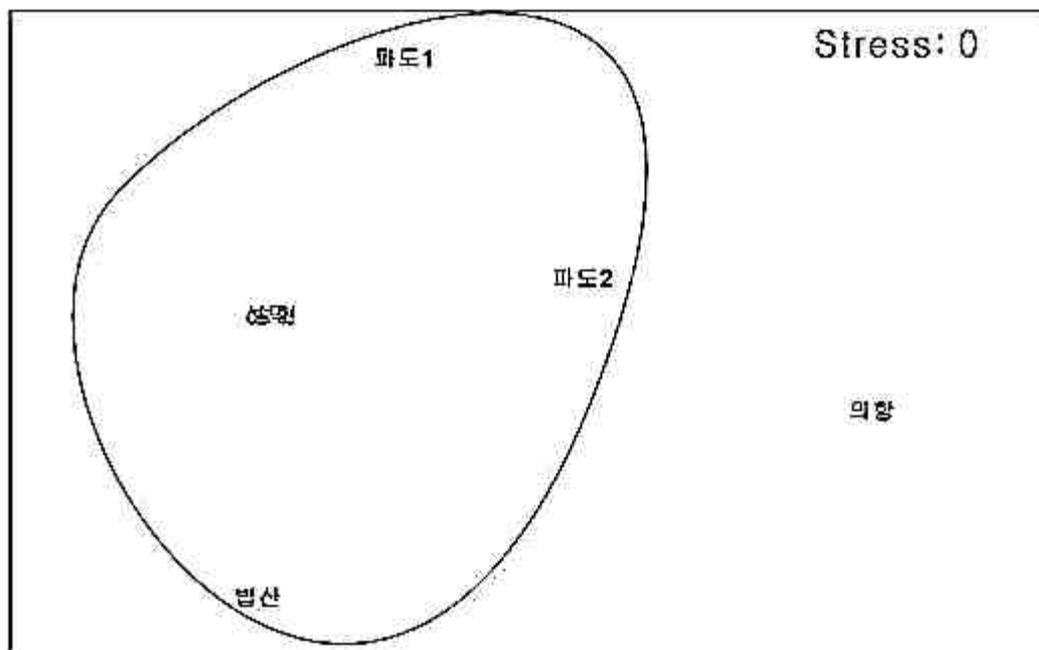
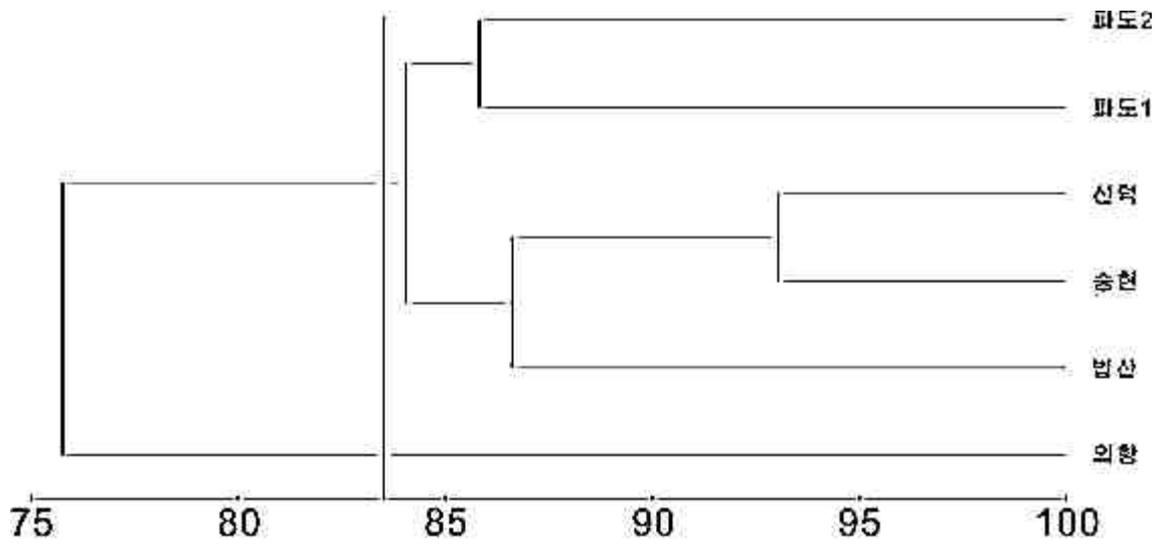


그림 4-33. 총계 망구직경 200 μ m의 동물플랑크톤 네트에 채집된 시료를 근거한 집괴분석.

3.5. 요약

2007년 허베이스릿호의 기름유출 이후, 어장환경개선프로그램 개발을 위한 동물플랑크톤 조사가 태안반도 근소만에서 실시되었다. 동물플랑크톤 채집은 망목 100 μm 와 200 μm 의 동물플랑크톤 네트(망구 45cm)를 이용하여 2010년 8월, 11월과 2011년 2월, 4월에 실시하였다. 요각류가 두 네트 모두에서 최우점 분류군인 반면, 야광충, 미충류, 화살벌레류, 해파리류, 각종 유생류 등이 시기를 달리하여 우점하였다. 총 출현개체수는 망구직경 100 μm 의 네트가 200 μm 네트에 비해 훨씬 높았으나, 총 출현 분류군수, 종 다양도 지수, 종 균등도 지수는 계절적으로 차이가 있었다. 그러나, 집괴분석 결과는 공간적으로 정점 사이에 높은 유사성을 보이는 것으로 나타났다.

제 5장. 저서생물

1. 서론

저서동물은 해양의 바닥에 서식하는 동물을 총칭하며, 대부분이 무척추동물로 구성되어 있고, 크기에 따라 초대형저서동물, 대형저서동물, 중형저서동물, 소형저서동물로 구분되어진다. 저서동물은 해양생태계 내에서 유용저어류나 무척추동물의 먹이생물로 중요한 부분을 차지하고 있어 먹이사슬이나 먹이망 등과 같은 해양생태계의 역학관계를 이해하기 위해서는 저서동물에 대한 조사가 반드시 수반되어야 한다(Daan, 1973; McIntyre, 1978). 특히, 저서동물은 저질 또는 유기입자를 섭식하여 퇴적물내의 화학적 특성을 변화시킴으로서 영양염 재순환에 중요한 매개자 역할을 하며(Bilyard, 1987) 또한, 이동력이 약하거나 정착성으로서 해양저서환경의 변화에 따라 이동하거나 도피가 불가능하여 오염에 따른 생태계 변화를 파악하는데 중요한 수단으로 이용될 수 있다(Pearson and Rosendberg, 1978).

태안반도에 위치한 근소만은 반폐쇄적 형태의 만으로 수심이 매우 얇고, 조석간만의 차가 커 마을어장 및 맨손어업으로 바지락 양식을 주로 행하였으며, 어민들의 주요 소득원으로 역할을 하여 왔다. 그러나 2007년 태안 유류 유출사고로 인하여 오염이 심화되어 이에 어장환경을 개선할 필요가 있다.

본 조사는 이러한 유류오염 또는 노화어장의 어장환경을 개선하고자 여러 방법에 따른 각 시험어장을 양식장환경개선에 기초자료를 제공하고자 저서동물의 종조성 및 군집구조를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지역

저서생물의 분포는 저질환경과 해역의 수심 및 노출시간 등 조건에 따라 다양하게 나타난다. 이에 어장환경개선 프로그램이 시행되는 시험어장의 개선효과를 비교하기 위해서는 시험어장 인근 또는 이와 비슷한 조건의 해역을 찾아 비교하여야 하기에 근소만 일대에 그림 5-1과 같이 근소만에 시험어장과 대조구를 포함한 7개 정점을 설정하여 조사하였으며, 동계 조사부터는 학ampo 어촌계 인근해역에 정점을 추가로 설정하여 조사하였다(그림 5-1; 표 5-1).

2.2. 저서생물 조사

본 조사의 채집은 조간대 저서생물상을 조사하였으며, 표층 퇴적물을 개량형 Grab(입구면적 $\approx 0.05\text{m}^2$)을 사용하여 저질을 채취한 후 1mm \times 1mm 망목크기의 체를 사용하여 체질하였으며, 체에 걸린 잔존물은 10% 중성포르말린으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 각 정점별 시료의 채집은 3회 이상 반복하였으며, 채집된 저서생물(1mm이상)은 현미경에서 종 수준까지 동정한 후 종별로 계수하였다.

저서동물 군집의 특성을 설명하는 생태지수로 종다양성지수(Shannon and Weaver, 1963), 종풍부도지수(Margalef, 1958), 종균등도지수(Pielou, 1966)를 정점별로 계산하였다. 군집분석에는 PRIMER V.5 통계 패키지를 사용하였으며, SIMPER(Similarity Percentages -Species Contribution)분석을 통해 군집분석에 의해 구분되어진 각 정점군간의 기여종(discriminating species)을 파악하였다.

종다양성지수 : $H' = -\sum P_i \times \ln(P_i)$

P_i : i번째 종의 점유율

종풍부도지수 : $R = (S - 1) / \ln(N)$

R : 풍부도

S : 전체종수

N : 총개체수

종균등도지수 : $J = H' / \ln(S)$ (Pielou, 1966)

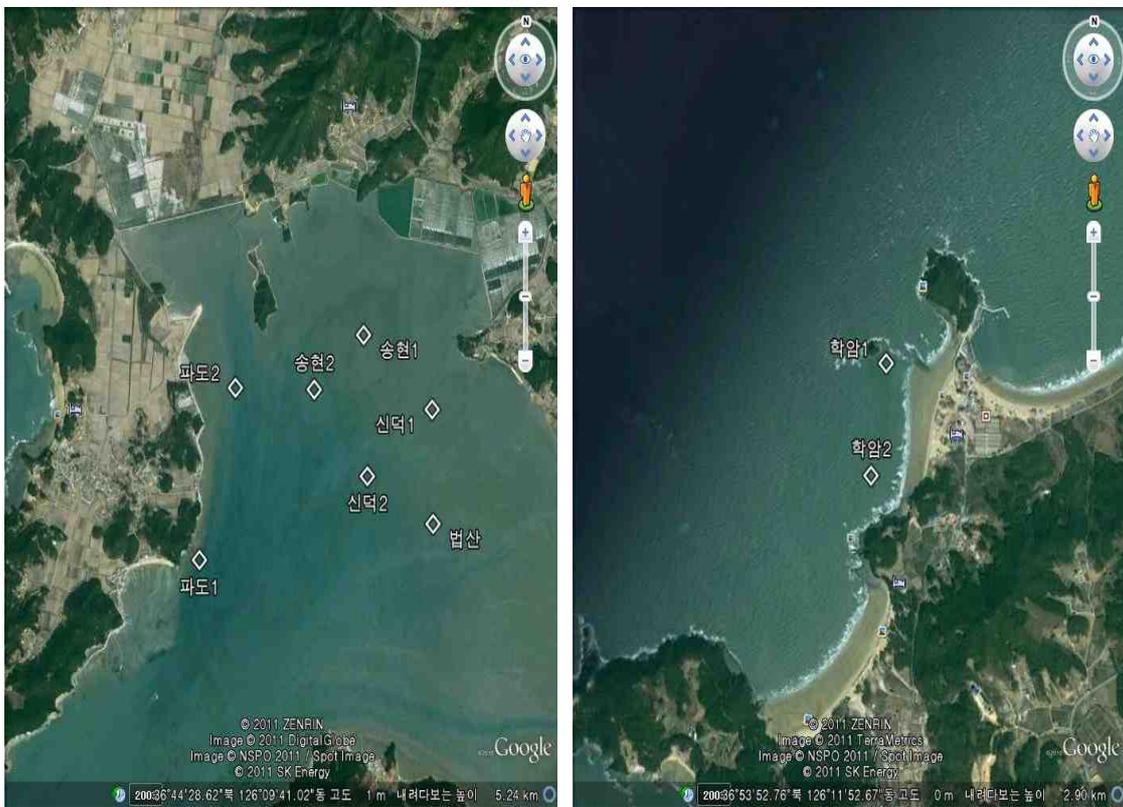


그림 5-1. 저서생물 조사정점도.

<표 5-1>조사지역의 GPS 위치

정점	위도	경도	비고
파도1	36°43'47.21"N	126° 9'6.03"E	
파도2	36°44'33.45"N	126° 9'20.31"E	
송현1	36°44'48.71"N	126°10'16.23"E	
송현2	36°44'33.66"N	126° 9'54.96"E	
신덕1	36°44'29.35"N	126°10'47.00"E	
신덕2	36°44'10.91"N	126°10'19.03"E	
법산	36°43'58.71"N	126°10'48.34"E	
학암1	36°53'59.45"N	126°12'01.18"E	2011년 동계 부터 추가
학암2	36°53'42.76"N	126°11'58.00"E	2011년 동계 부터 추가

3. 결과 및 고찰

3.1. 저서생물의 출현비율

태안군 근소만 인근 해역의 저서동물을 2010년 7월 조사한 결과 조사해역에 출현하는 주요 분류군은 갯지렁이류, 패류, 갑각류 순으로 나타났다. 조사지역에 출현하는 갯지렁이류는 57.14(정점 파도1)~77.78%(정점 송현1)으로 최우점 분류군으로 나타났으며, 패류와 갑각류는 0~28.57%로 차우점 하였다(그림 5-2).

2010년 10월 조사에서 역시 출현하는 저서동물의 주요 분류군은 갯지렁이류, 패류, 갑각류 순으로 나타났으며, 갯지렁이류 60.00(정점 신덕2)~87.50%(정점 신덕1)으로 최우점 분류군으로 나타났으며, 갑각류가 9.09~22.22%로 차우점 하였고, 패류가 0.00~33.33%였다(그림 5-3).

2011년 1월 조사에서 출현하는 저서동물의 분류군별 조성은 갯지렁이류가 50.00(정점 학암1)~80.00%(정점 송현1)으로 최우점 분류군으로 나타났으며, 패류가 10.00~30.00%로 차우점 하였고, 갑각류가 10.00~27.27%였다(그림 5-4). 또한, 2011년 4월 조사에서는 갯지렁이류 45.45(정점 학암1)~72.73%(정점 신덕2), 갑각류 9.09~30.00%, 패류는 9.09~27.27%였다(그림 5-5).

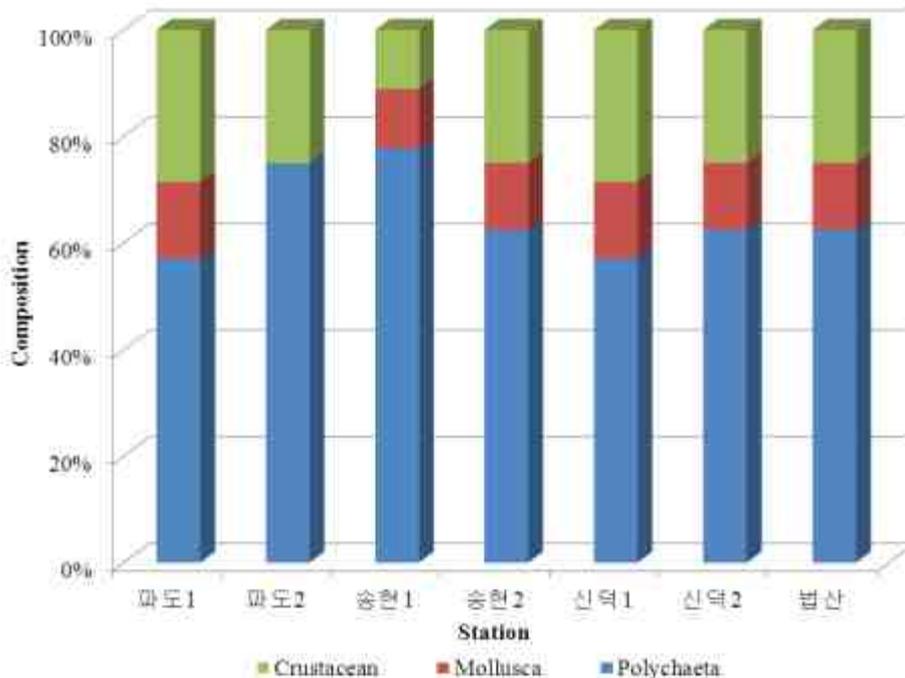


그림 5-2. 2010년 7월 조사해역에 출현하는 저서동물의 주요 분류군 비율.

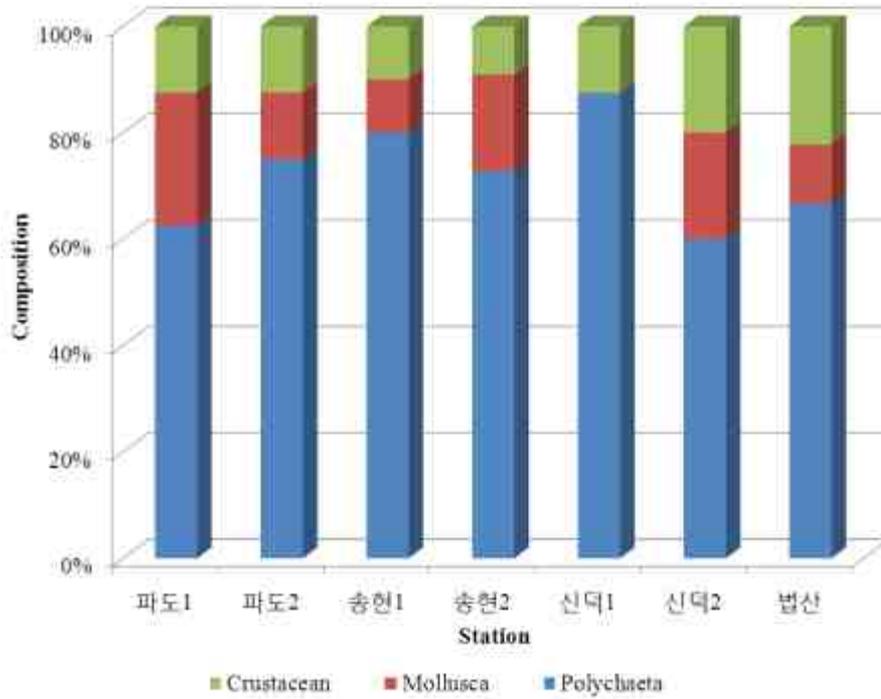


그림 5-3. 2010년 10월 조사해역에 출현하는 저서동물의 주요 분류군 비율.

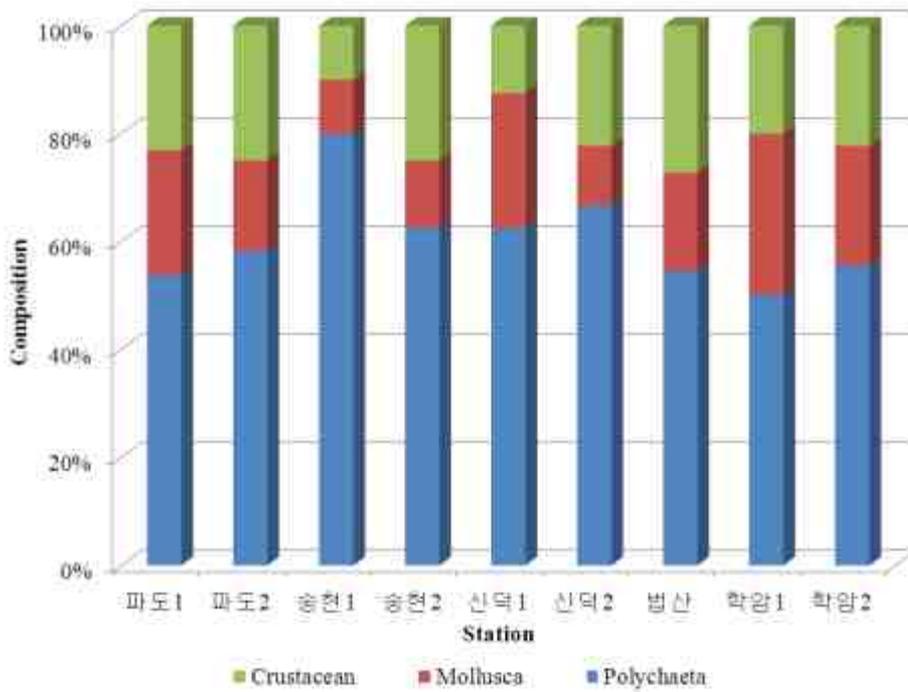


그림 5-4. 2011년 1월 조사해역에 출현하는 저서동물의 주요 분류군 비율.

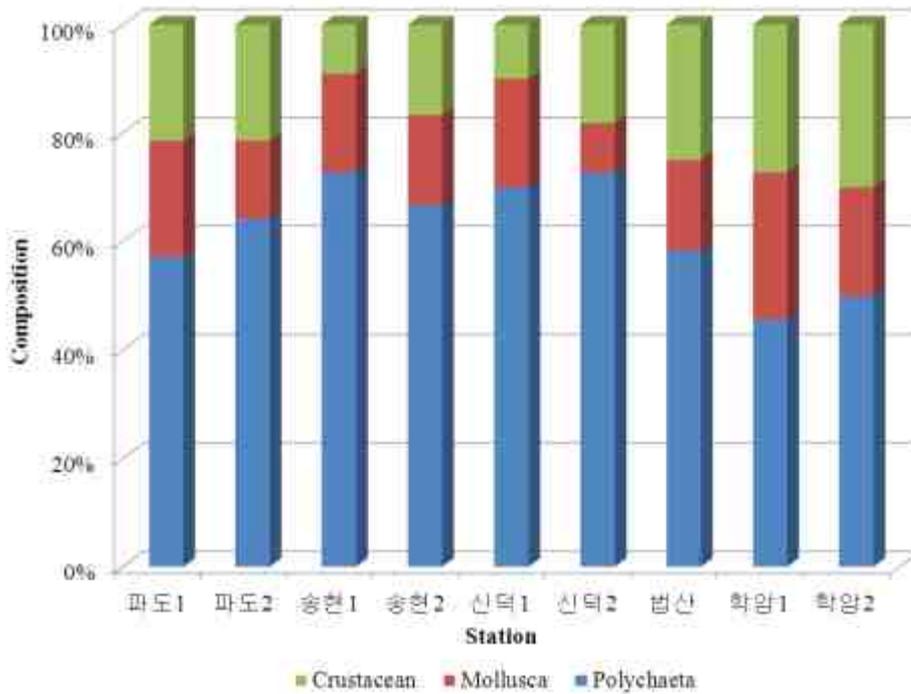


그림 5-5. 2011년 4월 조사해역에 출현하는 저서동물의 주요 분류군 비율.

3.2. 대형저서동물의 생태지수, 종조성 및 현존량

조사해역의 출현개체수는 2010년 7월 600(정점 파도2)~600 indiv./m²(법산)으로, 평균 375 indiv./m²였으며, 근소만 내측 법산어촌계 지역에서 높게 나타났다. 출현개체수는 정점 법산 다음으로 정점 파도1이 500 indiv./m², 정점 송현1 450 indiv./m²이었으며, 정점 파도2에서 200 indiv./m²으로 가장 낮았다. 조사해역의 총 출현 종수는 20종으로 갯지렁이류가 12종, 패류와 갑각류가 각각 4종이 출현하였으며, 정점 송현1에서 9종으로 가장 많이 출현하였고, 정점 파도2에서 4종으로 가장 낮았다. 정점 송현2와 정점 신덕2 및 법산은 각각 8종이 출현하였다(그림 5-6).

2010년 7월의 다양도지수는 1.074(정점 파도2)~2.081(정점 송현1)이었으며, 평균 1.738로 나타났다. 균등도지수는 0.766(정점 법산)~0.974(정점 신덕2)였으며, 평균 0.766이었고, 풍부도지수는 0.566(정점 파도2)~1.309(정점 송현1)로 평균 1.065였다. 다양도지수 및 출현개체수가 정점 파도2에서 가장 낮았으며, 정점 송현1이 출현종수 및 다양도지수가 가장 높았다(그림 5-7).

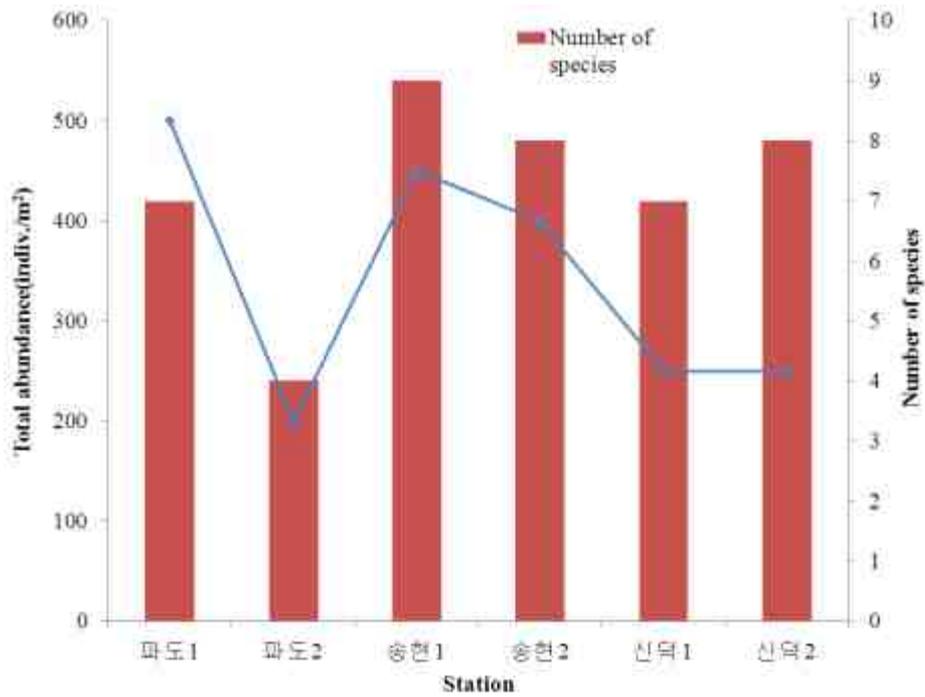


그림 5-6. 2010년 7월 저서동물의 정점별 현존량 및 출현종수.

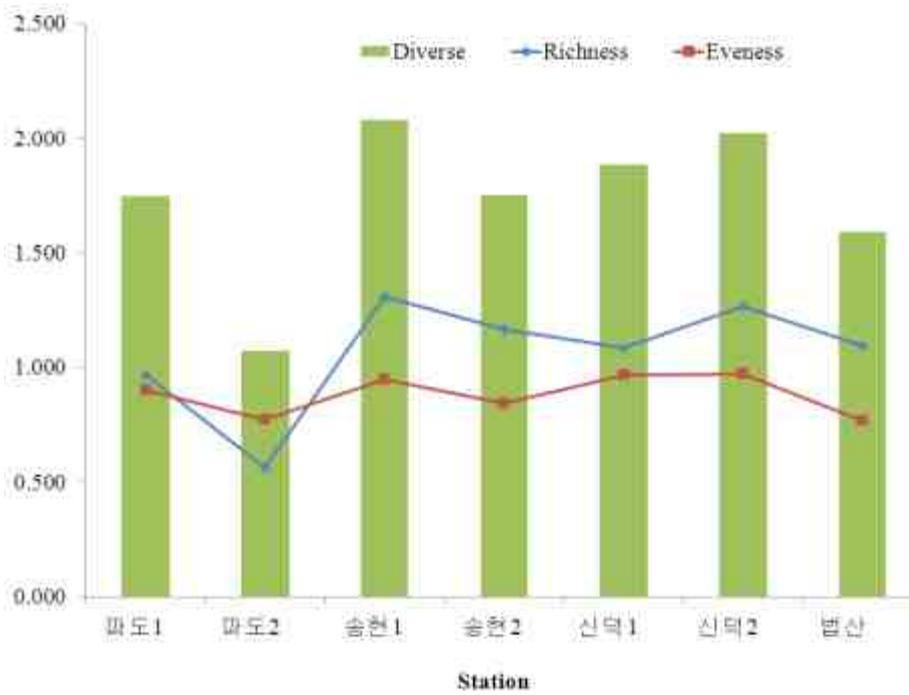


그림 5-7. 2010년 7월 조사해역의 생태지수.

조사해역의 출현개체수는 2010년 10월 250(정점 파도2)~625 indiv./m²(정점 법산)으로, 평균 353.57 indiv./m²였으며, 2010년 7월과 같은 경향을 보여 근소만 내측 법산어촌계 지역에서 높게 나타났다. 정점 법산 다음으로 출현개체수는 정점 송현1이 475 indiv./m², 정점 송현2 300 indiv./m²이었으며, 정점 파도2에서 250 indiv./m²으로 가장 낮았다. 조사해역의 총출현 종수는 7월 조사와 같은 20종으로 갯지렁이류가 12종, 패류와 갑각류가 각각 4종이 출현하였으며, 정점 송현2에서 11종으로 가장 많이 출현하였고, 정점 파도1, 파도2 및 정점 신덕1에서 8종으로 낮게 나타났다. 정점 송현1과 정점 법산은 각각 10종, 9종이 출현하였다(그림 5-8).

2010년 10월의 다양도지수는 1.698(정점 법산)~2.369(정점 송현2) 이었으며, 평균 2.060 으로 나타났다. 균등도지수는 0.773(정점 법산)~0.988(정점 송현2) 였으며, 평균 0.933이었고, 풍부도지수는 1.227(정점 파도1)~1.460(정점 송현1)로 평균 1.400였다. 정점 송현2에서 다양도 및 균등도지수가 가장 높았으며, 정점 법산이 가장 낮게 나타났다(그림 5-9).

조사해역의 출현개체수는 2011년 1월 300(정점 신덕1)~900 indiv./m²(정점 학암2)으로, 평균 536.11 indiv./m²였으며, 2010년 11월과는 달리 정점 신덕1에서 가장 낮은 출현개체수를 보였고, 추가 정점인 학암2에서 가장 높게 나타났다(그림 5-10). 정점 학암2 다음으로 역시 인근 정점인 학암1에서 700 indiv./m²로 높았으며, 정점 법산이 675 indiv./m²였다. 조사해역의 총출현 종수는 27종으로 갯지렁이류가 15종, 패류와 갑각류가 각각 6종이 출현하였으며, 정점 파도1에서 13종으로 가장 많이 출현하였고, 정점 송현2와 신덕1에서 8종으로 낮게 나타났다.

2011년 1월의 다양도지수는 0.894(정점 파도1)~2.346(정점 파도2)이었으며, 평균 1.940으로 나타났다. 균등도지수는 0.803(정점 법산)~0.958(정점 신덕1) 였으며, 평균 0.917이었고, 풍부도지수는 1.126(정점 송현2)~1.902(정점 파도1)로 평균 1.457였다(그림 5-11).

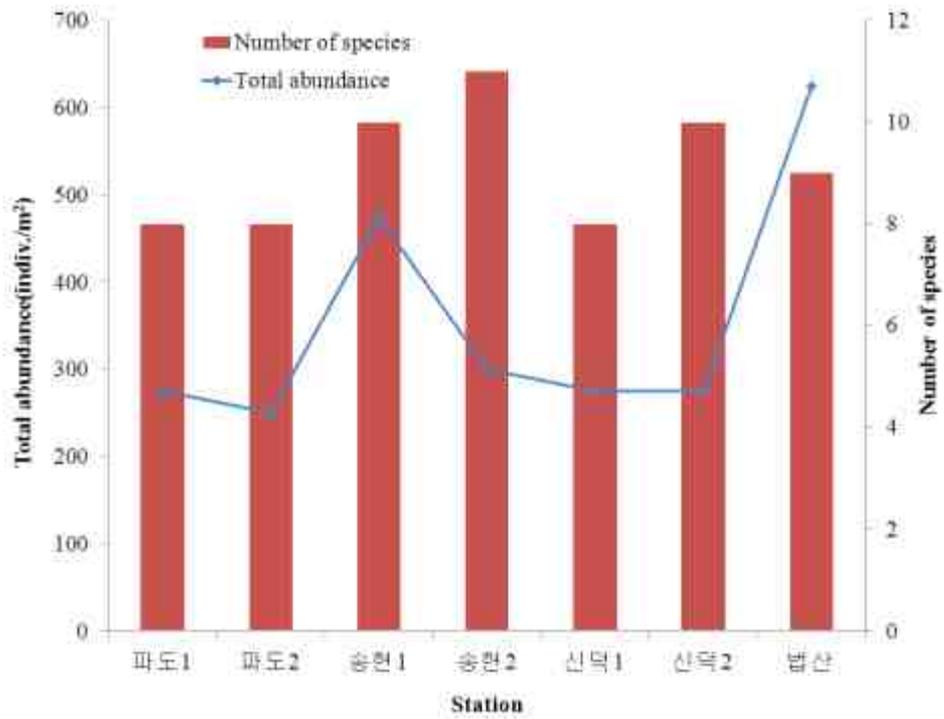


그림 5-8. 2010년 10월 저서동물의 정점별 현존량 및 출현종수.

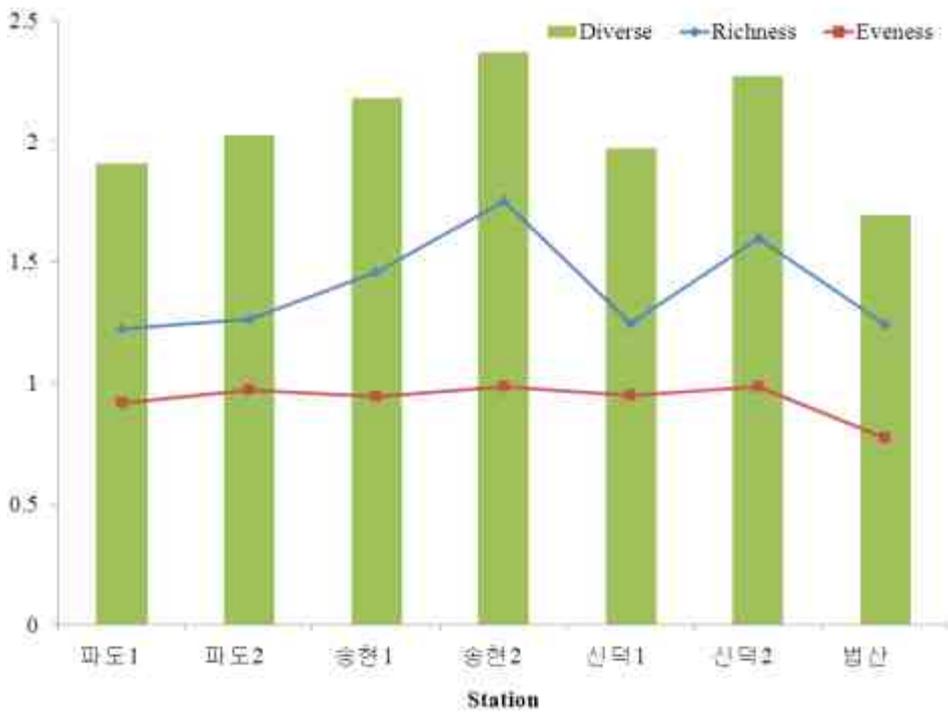


그림 5-9. 2010년 10월 조사해역의 생태지수.

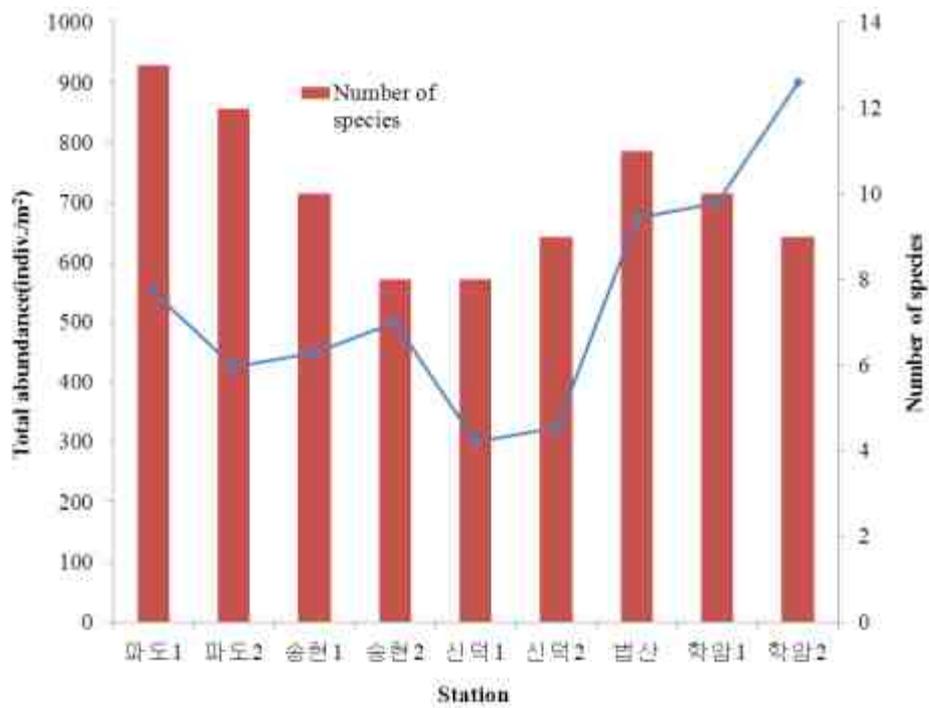


그림 5-10. 2011년 1월 저서동물의 정점별 현존량 및 출현종수.

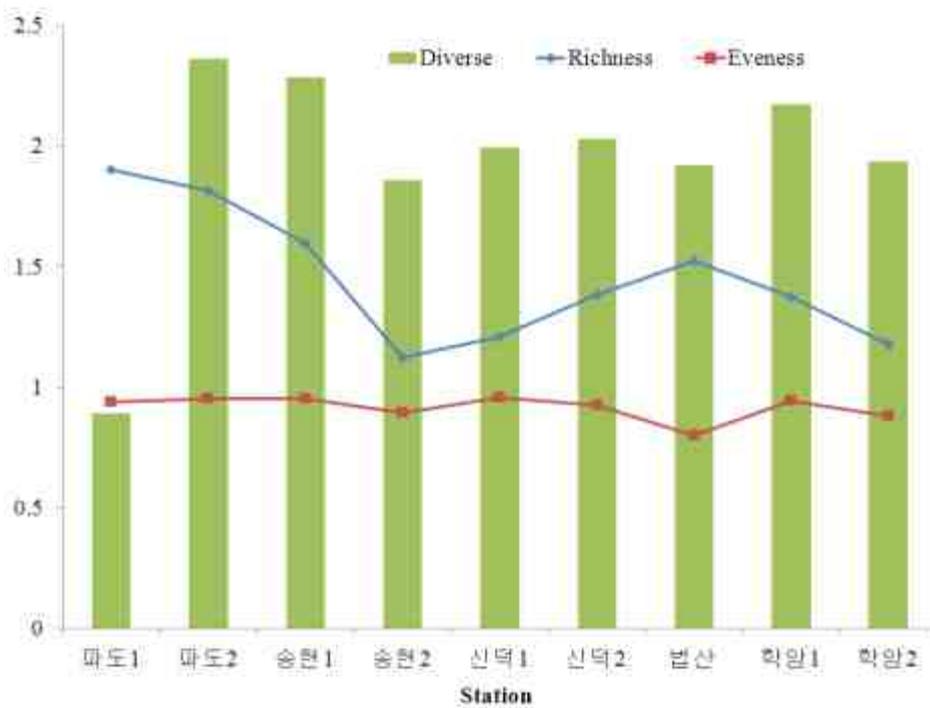


그림 5-11. 2011년 1월 조사해역의 생태지수.

조사해역의 출현개체수는 2011년 4월 250(정점 신덕1)~825(정점 학암2) indiv./m²으로, 평균 525 indiv./m²였으며, 2011년 1월과는 같은 경향을 보였다(그림 5-12). 정점 학암2 다음으로 역시 인근 정점인 학암1에서 775 indiv./m²로 높았으며, 정점 송현이 600 indiv./m²였다. 조사해역의 총출현 종수는 27종으로 갯지렁이류가 15종, 패류가 5종이었으며, 갑각류가 7종이 출현하였고, 정점 파도1과 파도2에서 14종으로 가장 많이 출현하였고, 정점 신덕1과 학암2에서 10종으로 낮게 나타났다.

2011년 4월의 다양도지수는 2.061(정점 학암2)~2.491(정점 파도2)이었으며, 평균 2.274로 나타났다. 균등도지수는 0.885(정점 법산)~0.975(정점 신덕1)였으며, 평균 0.932이었고, 풍부도지수는 1.340(정점 학암2)~2.076(정점 파도2)로 평균 1.678였다(그림 5-13).

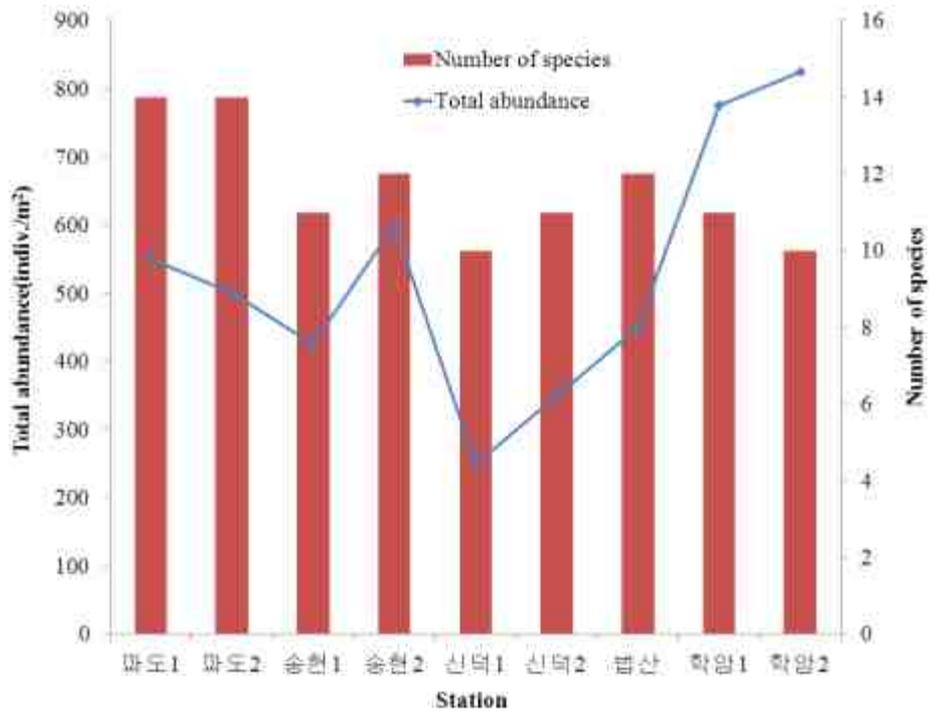


그림 5-12. 2011년 4월 저서동물의 정점별 현존량 및 출현종수.

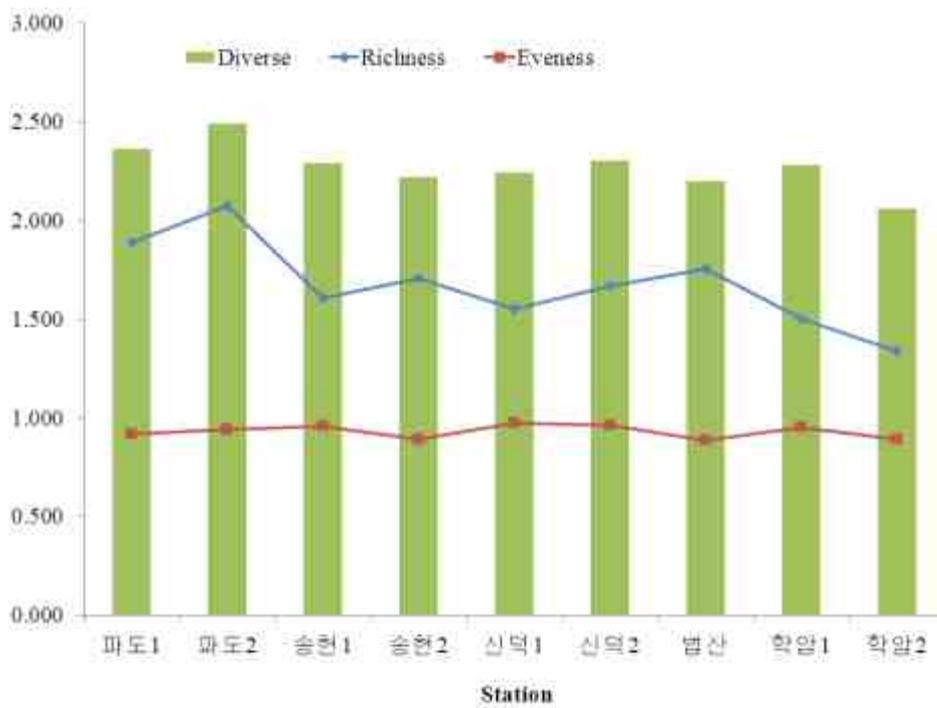


그림 5-13. 2011년 4월 조사해역의 생태지수.

3.3. 군집분석

조사정점 사이의 유사성을 비교하기 위해 조사해역에 출현한 저서동물의 개체수를 자연 log 변환 후, bray-curtis similarity를 구하여 집괴분석을 실시하였다. 2010년 7월의 집괴분석 결과를 보면, 유사도 58 % 로 정점 신덕1, 신덕2, 송현2가 하나의 1개의 정점군으로 묶이며, 다른 정점은 각각 독립적으로 나타났다. 정점군에 영향을 미치는 저서생물은 은갯지렁이, *Paralacydonia paradoxa*, 참송곳갯지렁이, *Lumbrineris japonica* 가 영향을 미쳤다(그림 5-14). 2010년 10월의 집괴분석 결과는 유사도 60%로 정점 파도1, 파도2, 신덕1, 신덕2, 송현2가 하나의 정점군으로 묶였으며, 정점 송현1과 법산은 각각 독립적으로 나타났다. 정점군에 영향을 미친 종은 2010년 7월과 같은 은갯지렁이, *Paralacydonia paradoxa*, 참송곳갯지렁이, *Lumbrineris japonica* 였으며, 외에 명주실타래갯지렁이, *Cirriformia tentaculata* 가 기여하였다(그림 5-15).

정점 학암1, 학암2가 추가된 2011년 1월 집괴분석 결과는 정점 학암1과 학암2가 묶였으며, 또한 파도1과 파도2가 묶여 2개의 정점군으로 나타났으며, 나머지 정점은 독립적으로 나타났다(그림 5-16). 정점 학암1과 학암2에 영향을 미친 종은 침보석요정갯지렁이, *Armandia lanceolata*, 서해비단고둥, *Umbonium thomasi* 그리고 파도가제더부사리조개, *Lasaea undulata* 가 영향을 미쳤으며, 정점 파도1과 파도2는 주름대나무갯지렁이, *Praxillella affinis*와 굴속살이게, *Pinnotheres sinensis* 가 영향을 미쳤다.

2011년 4월 정점에 따른 저서생물의 집괴분석결과는 저질입도가 같은 정점 학암1과 학암2가 그룹을 이루었으며, 파도1과 파도2, 송현1과 신덕1, 그리고 신덕2와 법산이 각각 그룹을 이루었다(그림 5-17). 정점 학암1과 학암2에 영향을 미친 종은 엽낭게, *Scopimera globosa*, *Iphinoe tenera*, 서해비단고둥, *Umbonium thomasi* 이었으며, 정점 파도1과 파도2에는 참송곳갯지렁이, *Lumbrineris japonica*, 주름대나무갯지렁이, *Praxillella affinis*, 굴속살이게, *Pinnotheres sinensis* 가 영향을 미쳤다. 또한, 정점 송현1과 신덕1의 그룹에 영향을 미친 종은 남방백금갯지렁이, *Nephtys polybranchia*, 삼각모자갯지렁이, *Scoloplos armiger* 가 기여하였으며, 정점 신덕2와 법산의 그룹에는 명주실타래갯지렁이, *Cirriformia tentaculata*, 민송참갯지렁이, *Nereis surugaense* 가 영향을 미쳤다.

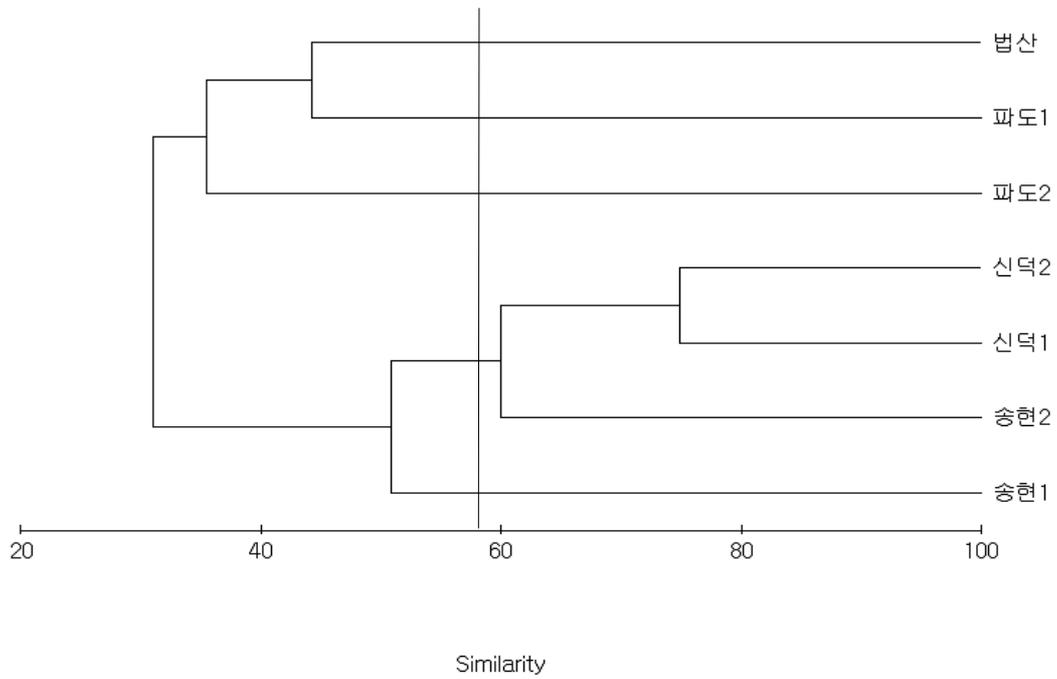


그림 5-14. 2010년 7월 출현한 현존량에 따른 정점별 집괴분석.

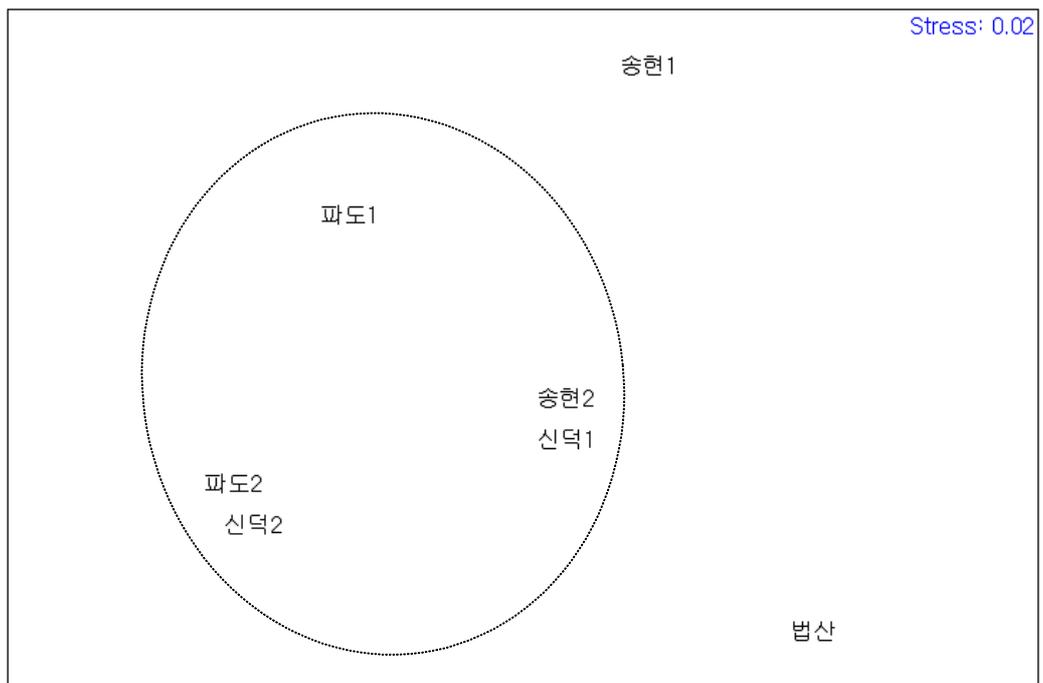
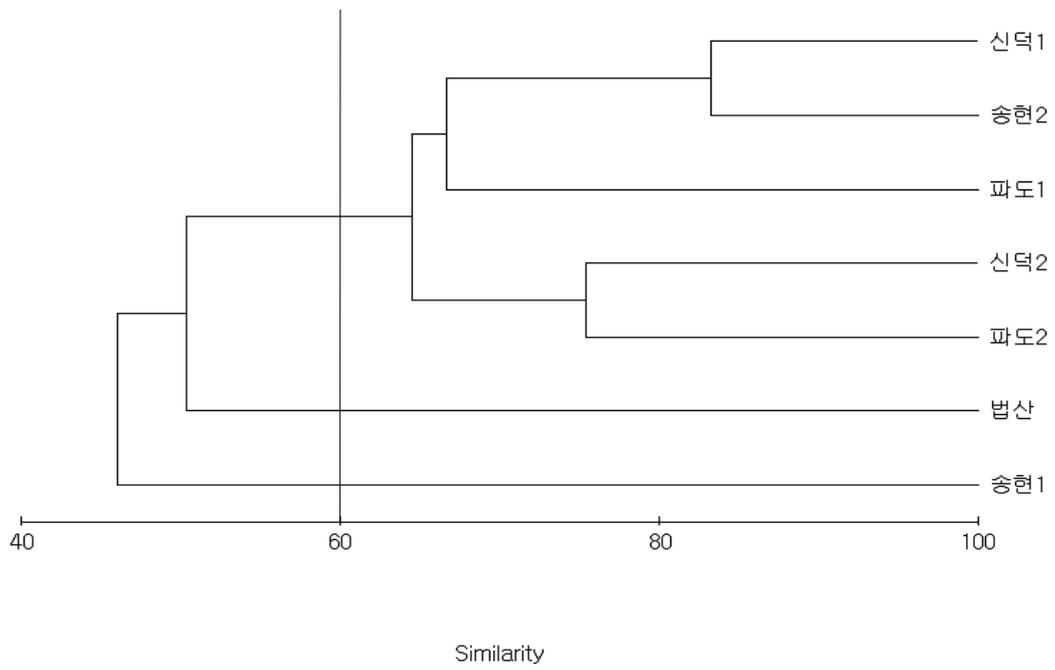


그림 5-15. 2010년 10월 출현한 현존량에 따른 정점별 집괴분석.

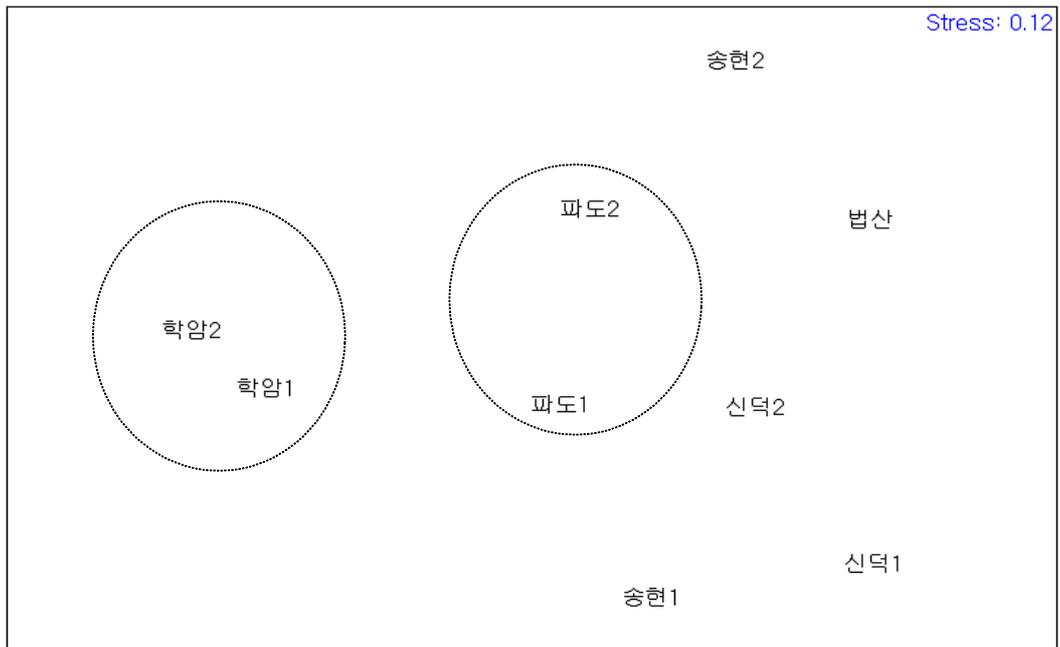
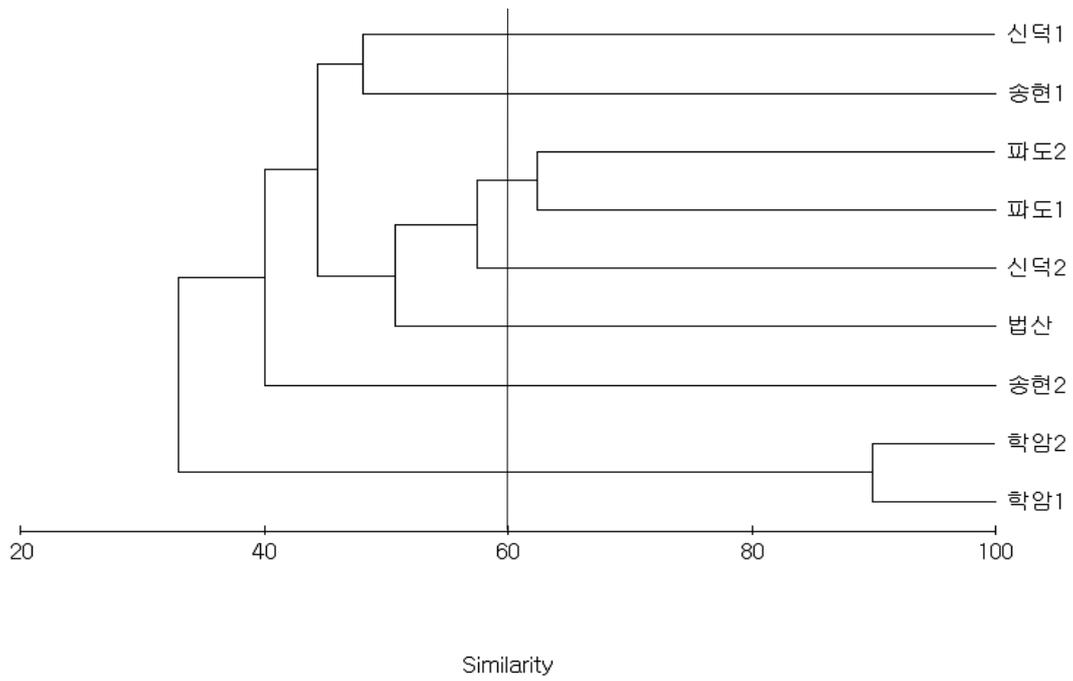


그림 5-16. 2011년 1월 출현한 현존량에 따른 정점별 집괴분석.

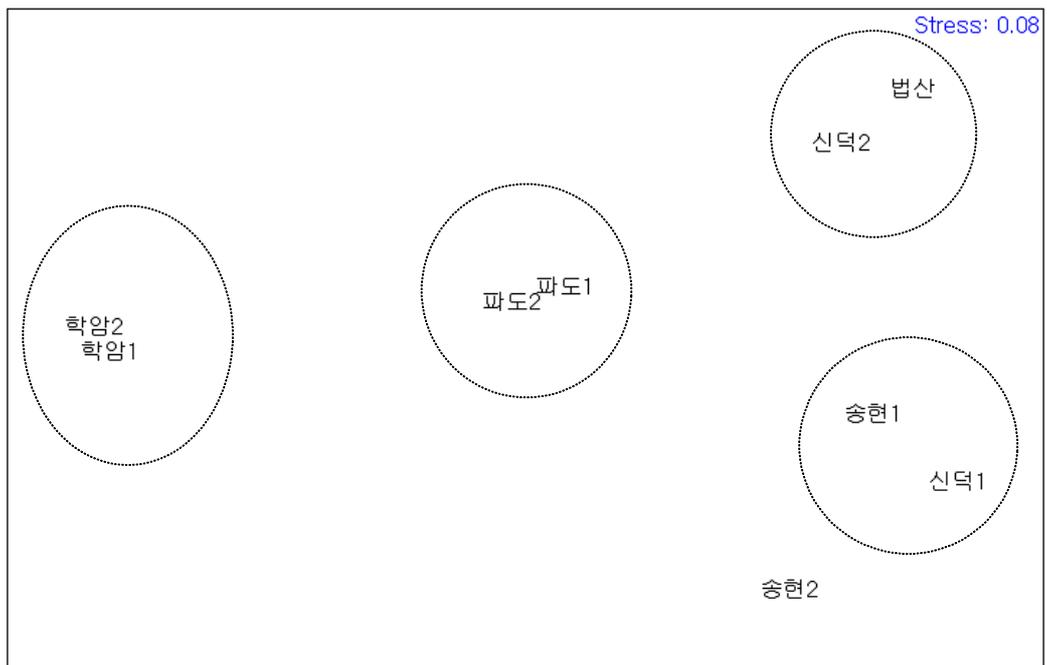
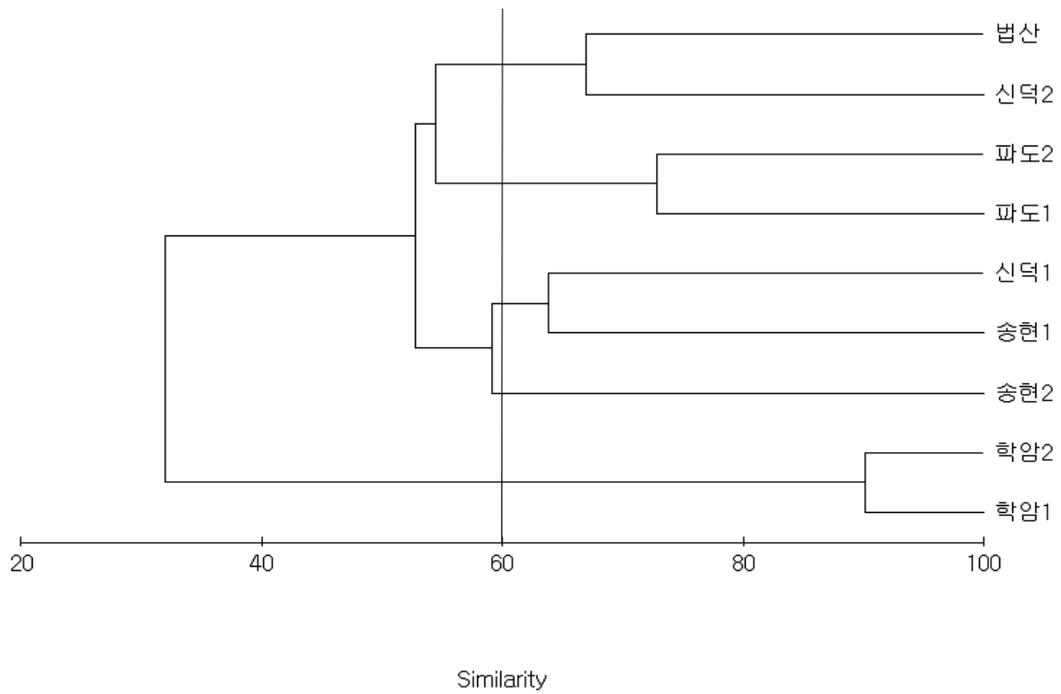


그림 5-17. 2011년 4월 출현한 현존량에 따른 정점별 집괴분석.

제 6장. 해양환경

1. 서론

화학조사의 목적은 환경중의 목적물질의 농도나 분포를 밝혀내는 것이다. 해당 물질의 농도를 알면 해양생물이 직접 받는 영향이나 일정 농도 이상의 분포를 나타내는 범위, 해당물질의 유입원과의 관계, 환경 중에서의 농도를 결정하는 인자의 규명, 농도나 분포의 예측 등에 필요한 자료를 취득할 수 있다.

환경 중에서의 물질의 농도는 일반적으로 인위적인 요인에 의하여 변동하기 쉬우며, 자연 상태의 농도에서 크게 벗어나지 않는 것이 바람직하다. 그러나, 인위적인 행위에 의하여 농도변화가 일어나는 경우에는 그 전후에 환경 중에서의 농도변화를 측정 및 예측하여 영향을 평가하고 그 행위의 영향의 정도를 판단할 필요가 있다.

본 조사는 어장환경개선 프로그램에 따른 해양수질 및 저질환경 변화를 파악하기 위하여 계절별 자료를 분석하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 조사항목 및 대상해역

2.1.1. 조사항목

태안 해역의 해양수질과 퇴적물을 대상으로 14개 항목에 대해 조사를 실시하였고 항목은 표 6-1과 같다.

2.1.2. 대상해역 및 조사지점

태안 해양환경 조사지점은 대조구인 정점 의항1, 의항2, 의항3을 포함한 총 17개 정점(그림 6-1~ 6-2)에서 실시되었다.

<표 6-1> 분석 항목 세부내용.

분 야	항 목	횟 수
해 수	Temp., Sal., pH, COD, SS, DO, DIN, DIP, TN, TP, Si(OH) ₄ -Si	4회
퇴적물	AVS, COD, IL, pH	4회

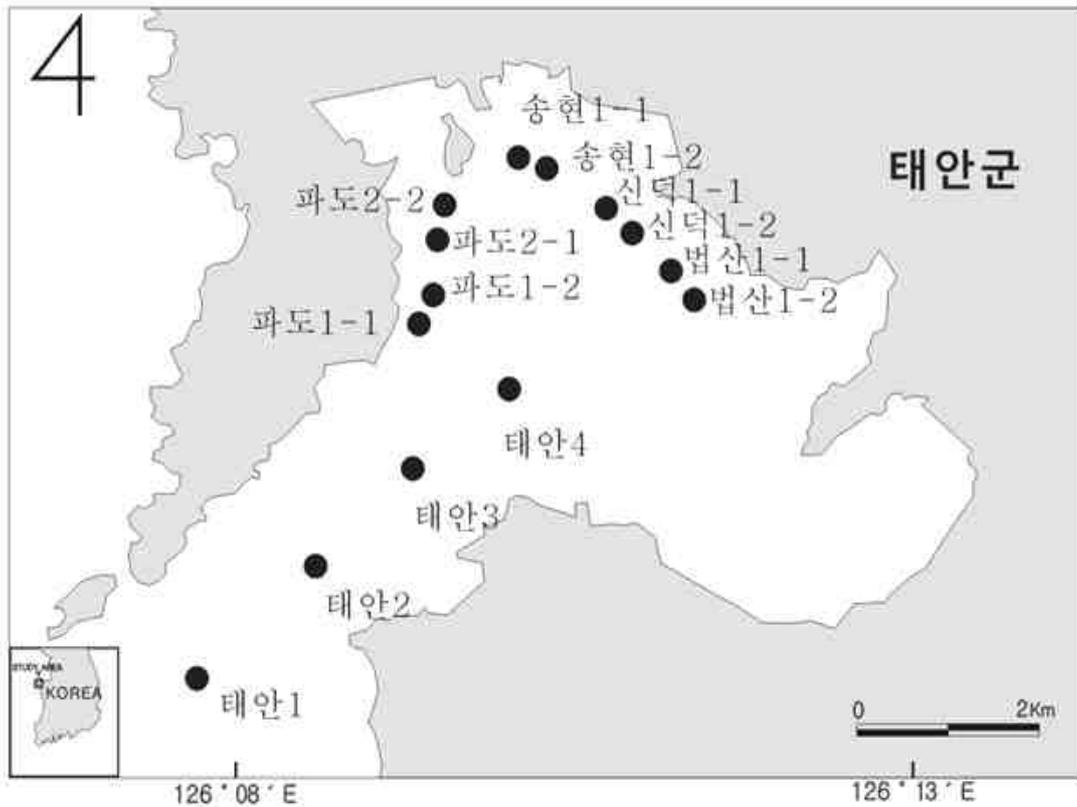


그림 6-1. 태안 조사지역 정점도.

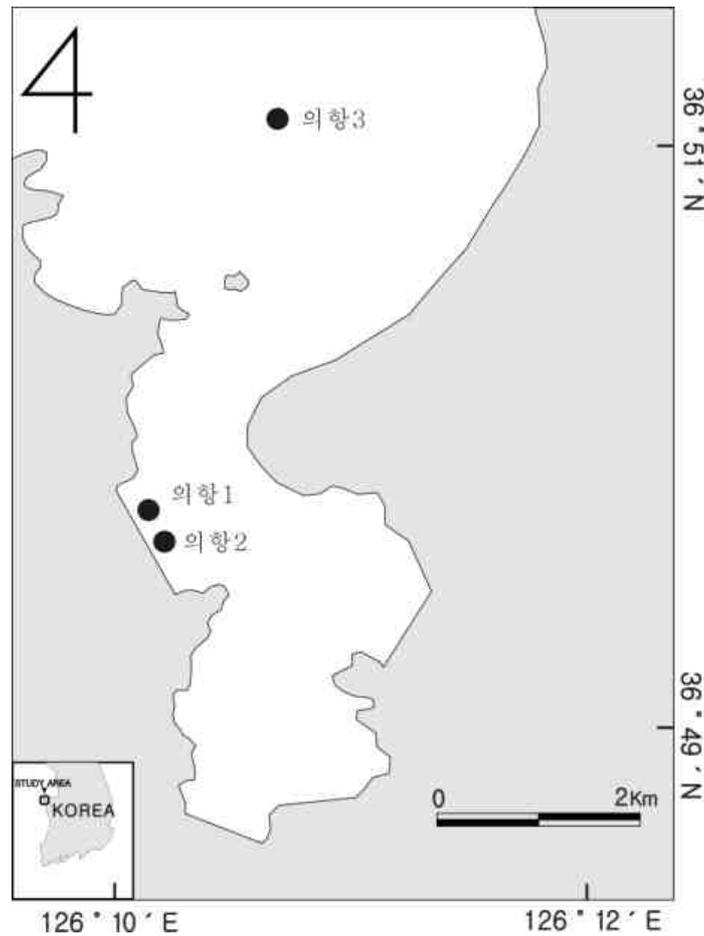


그림 6-2. 태안 조사지역 대조구 정점도.

2.2. 수질환경

태안 환경실태를 종합적으로 파악하기 위하여 2010년 7월에 12개 정점(대조구 2개 정점 포함)을 대상으로 사전 조사를 실시하였고, 본 조사는 17개 정점(대조구 3개 정점 포함)을 대상으로 2010년 9월, 11월과 2011년 2월, 4월에 조사를 실시하였다. 각 정점마다 표층수와 저층수를 Van Dorn 채수기를 사용하여 채수하였으며 채수한 시료는 실험실로 운반 후 즉시 분석하였다.

조사항목은 수온, 염분, pH, 부유물질(SS), 용존산소(DO), 화학적 산소요구량(COD)와 암모니아성 질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 아질산성 질소($\text{NO}_2^-\text{-N}$), 질산성 질소($\text{NO}_3^-\text{-N}$), 인산염 인($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), 규산성 규소($\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$), 총질소(T-N), 총인(T-P)에 대한 조사를 실시하였다. 각 항목별 분석은 해양환경공정시험기준(국토해양부, 2008), 水の分析(일본분석학회 북해도지부편, 1981), 해양관측지침(일본기상

협회, 1985), 신편수질오탁조사지침(일본수산자원보호협회, 1980)에 준하여 분석하였다.

2.2.1. pH, 수온, 염분

수온과 pH는 pH Meter(Thermo Orion 3 Star), 염분은 salinometer(YSI 3200)를 이용하여 현장에서 측정하였다.

2.2.2. 용존산소 (DO)

시수를 고무관을 통하여 용존 산소병에 기포가 생기지 않도록 주입시킨 후 산소 고정시약을 차례대로 주입하여 20여 회에 걸쳐 전도하여 산소를 고정시킨 후 산소병을 정치해서 침전이 모두 가라앉은 후에 (1+2)황산 1 mL를 산소병에 주입하여 흔들어서 침전을 완전히 용해시킨 후 삼각 플라스크에 용액을 모두 옮겨 넣은 후 티오황산나트륨(0.025N) 용액으로 적정하여 용액의 요오드 색깔이 옅은 황색이 되면 전분 지시약 1 mL를 넣고 생성된 청색이 없어지는 점까지 적정한다.

2.2.3. 부유물질 (SS)

일정량의 시수를 무게를 미리 알고 있는 유리섬유 여과지를 사용하여 여과해서 105~110 °C에서 4시간 이상 건조시킨 후 무게를 달아 여과 전후의 유리섬유 여과지의 무게차를 산출하여 부유 물질 양을 구한다.

2.2.4. 화학적 산소요구량 (COD)

시수를 정확히 50 mL 를 취해서 100 mL 삼각 플라스크에 담아 수산화나트륨 (20%)용액 1 mL 및 과망간산칼륨(0.2N)용액 5 mL을 가한 후 끓고 있는 물에 중탕을 하여 1시간 정도 분해시킨 후 KI(10%) 용액 1 mL를 넣어 방냉한다. 이후 황산(9N) 1 mL 넣어 요오드를 유리시킨 후, 티오황산나트륨(0.025N) 용액으로 전분을 지시약으로 해서 청색이 완전히 사라질 때까지 적정한다.

2.2.5 용존 무기질소 (Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN)

암모니아, 아질산 및 질산성 질소의 총합으로서 표시한다. 암모니아성 질소 (NH_4^+-N)는 인도페놀법, 아질산성 질소(NO_2^--N)는 디아조화법, 질산성 질소 (NO_3^--N)는 카드뮴-구리 칼럼 환원법을 이용하여 분석하였다.

2.2.6. 용존 무기인 (Dissolved Inorganic Phosphorus; DIP)

용존 무기인 형태의 인은 해역에서 인산의 형태(Phosphate-Phosphorus; $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$)로 존재하며, 인산을 아스코르빅산법에 의하여 분석하고 이 값을 DIP로 대치하였다. 이 원리는 몰리브덴산 염의 황산 용액을 가용성의 인산염 용액에 가하면, 인 몰리브덴 착체를 생성하며 이 착체를 환원하면 청색 물질로 되어 이의 흡광도를 약 30분 후에 파장 880nm에서 측정한다.

2.2.7. 규산성 규소 (Silicate-Silicon; $\text{Si}(\text{OH})_4-\text{Si}$)

몰리브덴산 나트륨을 이용하는 청색 비색법에 의하여었다. 이 원리는 pH 1.2 부근의 산성에서 규소는 몰리브덴산 암모늄과 반응하여 황색의 규소 몰리브덴산 착체를 형성한다. 이를 Aminonaphtholsulfanic acid로 환원시켜 청색의 규소몰리브덴산 착화합물을 형성시켜 이를 810nm 파장에서 비색 정량한다.

2.2.8 총질소 (T-N)와 총인 (T-P)

총질소와 총인은 알칼리성 과황산칼륨 산화에 의한 총질소·총인 동시 분석법으로 분석하였다. 시수 50 mL를 취해 100 mL용 분해병에 넣고 5 mL 산화제용액을 넣고 병마개를 닫은 후 고압증기 멸균기에 넣고 30분 가열 분해 산화 시킨 후에 총질소는 Cd-Cu 칼럼 환원법으로 비색정량 하였으며, 총인은 아스코르빈산 환원법으로 비색 정량한다.

2.3. 퇴적물 분석방법

대상 어장별 개선방법별 어장 퇴적물 개선효과를 파악하기 위하여 대상 어장과 대조지역에 대한 퇴적물 조사를 실시하였다. 사전 조사는 2010년 7월에 태안 해역의 10개 정점(그림 6-1)과 대조구 2개 정점(그림 6-2)을 대상으로 실시하였고, 본 조사는 2010년 9월과 11월, 2011년 2월과 4월에 태안 해역의 14개 정점(그림 6-1)과 대조구 3개 정점(그림 6-2)을 대상으로 저질 환경의 특성과 변화 정도를 파악하기 위하여 실시하였다.

해역 저층의 퇴적물은 반빈그랩(van Veen grab)을 이용하여 표층 퇴적물(2cm)을 채취하였으며, 드라이아이스를 채운 아이스박스에 보관하여 실험실로 운반 후 산취발성황화물(AVS)은 즉시 분석하였고, 다른 분석항목의 경우 분석 전까지 영하 -20℃로 냉동 보관하였다.

퇴적물 분석항목은 pH, 강열감량(IL), 화학적 산소요구량(COD), 산취발성황화물(AVS)을 분석하였다.

각 항목별 분석은 해양환경공정시험기준(국토해양부, 2008), 水の分析(일본분석학회 북해도지부편, 1981), 해양관측지침(일본기상협회, 1985), 신편수질오탁조사지침(일본수산자원보호협회, 1980)에 준하여 분석하였으며, 각각의 분석 항목별 분석방법의 개요는 다음과 같다.

2.3.1. 강열감량(Ignition Loss, IL)

강열감량(IL)은 건조시료 약 10g 을 도가니에 정확히 취하여 전기로를 이용하여 550℃에서 4시간 강열한다. 강열 후 데시케이터에서 약 1시간 방냉 후 실온으

로 생각되면 화학저울로 중량을 측정한 후 무게가 일정하게 될 때까지 가열, 방냉, 중량 측정을 반복한다. 결과는 채취한 시료에 대한 감량의 백분율(%)로 나타낸다.

2.3.2. 산취발성황화물(AVS)

산취발성황화물(AVS)은 황산 산성 하에서 황화수소를 추출시켜 검지관법으로 측정한다. 즉, 습시료 약 0.5~2g을 정확히 취한 후 소량의 증류수 (약 5 mL)로 가스 발생관에 옮긴다. 검지관을 가스 발생관 및 흡인 펌프에 연결하여, 가스 발생관에 (1+1)황산 2 mL를 가한다. 펌프를 작동하여 검지관의 변색위치가 멈출 때까지 조작을 반복하여 변색 층의 끝의 눈금을 읽는다.

2.3.3. 화학적 산소요구량(COD)

화학적 산소요구량(COD)은 습시료 약 1g 을 취하여 용량 300 mL의 삼각 플라스크에 소량의 증류수를 이용하여 옮기고 7.5N 수산화나트륨 용액 5 mL를 가하여 알칼리성으로 한 후 0.1N 과망간산칼륨 용액 100 mL를 정확히 가하여 충분히 교반한 후 끓고 있는 수용액 중에서 약 15분간 가열한다. 가열 후 즉시 0.1N 옥살산용액 1 mL 및 (3+7)황산 용액 1 mL를 정확히 가하여 교반한 후 과망간산칼륨의 색을 완전히 없애고, 실온까지 냉각한다. 삼각 플라스크내의 용액을 500 mL의 정용 플라스크에 증류수를 이용하여 완전히 옮겨 정용하여 충분히 혼합한 후 건조 여과지를 이용하여 여과한다. 여과액 100 mL를 정확히 삼각 플라스크에 취하여 0.1N 과망간산칼륨 용액 10 mL를 가하여 교반한 후 약 5분간 방치하고, 10 % 요오드화칼륨 용액 5 mL를 가하여 요오드를 유리시킨 후 0.1N 티오황산나트륨 용액으로 1 % 전분 용액을 지시약으로 무색으로 될 때까지 적정한다. 증류수 50 mL를 사용하여 같은 조작으로 Blank시험을 행한다.

2.3.4. 퇴적물 pH

표층 퇴적물 시료 5 g에 저층 해수시료 10 mL를 첨가하여 섞은 다음 5분간 정제시킨 후 상등액을 pH Meter(Thermo Orion 3 Star)를 이용하여 측정하였다.

3. 결 과

3.1. 해양수질

3.1.1. 수온(Temperature)

태안 조사시기별 수온의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 22.7~26.3(평균 24.3)℃를 나타내었고, 9월 표층에서는 25.9~29.7(평균 27.6)℃를 저층에서는 26.0~26.6(평균 26.2)℃를 나타내었고, 11월 표층에서는 10.4~12.7(평균 11.5)℃를 저층에서는 12.5~12.7(평균 12.6)℃를 나타냈으며, 2월 표층에서는 1.7~2.8(평균 2.2)℃를 나타내었고, 저층에서는 2.0~2.7(평균 2.4)℃를 나타내었고, 4월 표층에서는 5.6~9.5(평균 7.9)℃를 나타냈으며, 저층에서는 5.3~6.5(평균 5.8)℃를 나타내었다. 대조구는 7월에는 21.8~22.4(평균 22.1)℃를 나타냈으며, 9월에는 26.3~26.7(평균 26.50)℃를 나타냈으며, 11월에는 13.5~13.6(평균 13.5)℃를 나타냈으며, 2월에는 2.3~2.7(평균 2.6)℃를 나타내었고, 4월에는 5.5~5.9(평균 5.7)℃를 나타내었다.

태안 조사시기별 표층과 저층간의 평균 수온 차는 9월에 저층이 1.3℃ 높았고, 다른 월별에는 표층보다 저층이 약 0.5℃ 정도 높게 나타났다. 태안 대조구의 조사시기별 평균 수온 차는 11월, 2월을 제외하고는 대조구에서 다소 낮은 수온을 나타내었다.

3.1.2. 수소이온농도(pH)

태안 조사시기별 수소이온농도의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 7.97~8.08(평균 8.04)를 나타내었고, 9월 표층에서 7.97~8.23(평균 8.04)를 저층에서는 8.12~8.15(평균 8.14)를 나타내었으며, 11월 표층에서 8.11~8.19(평균 8.15)를 저층에서는 8.12~8.15(평균 8.14)를 나타내었고, 2월 표층에서 8.12~8.27(평균 8.22)를 저층에서는 8.12~8.22(평균 8.17)를 나타내었다. 4월 표층에서 7.87~8.06(평균 7.98)를 나타내었고, 저층에서는 7.86~7.90(평균 7.88)를 나타내었다. 대조구의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 8.09~8.12(평균 8.11), 9월에 7.98~8.14(평균 8.08), 11월에 8.12~8.15(평균 8.14), 2월에 8.12~8.22(평균 8.17), 4월에 7.86~7.92(평균 7.90)를 나타내었다.

수소이온농도를 월별 및 층별로 비교해 보면, 평균값은 동계에서 높게, 추계에서 낮은 값을 보였고, 층별로는 전 조사시기에서 표층과 저층에서 비슷한 농도를

보였다.

조사기간 동안 전 조사 해역에서 표 2.1에 나타난 해역 수질기준(국토해양부, 2008) 등급 I의 수질(참돔, 방어 및 미역 등 수산생물의 서식·양식 및 해수욕에 적합한 수질)을 보였다.

3.1.3. 염분(Salinity)

태안 조사시기별 염분의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 30.2~31.5(평균 30.8)psu를 나타내었고, 9월 표층에서 17.0~30.8(평균 24.6)psu를 저층에서는 30.2~30.9(평균 30.5)psu를 나타내었고, 11월 표층에서 32.9~33.3(평균 33.1)psu를 저층에서는 32.7~32.9(평균 32.8)psu를 나타냈으며, 2월 표층에서 32.1~32.7(평균 32.21)psu를 저층에서는 32.2~32.3(평균 32.2)psu를 나타내었고, 4월 표층에서 32.0~32.3(평균32.2)psu를 저층에서는 32.0~32.1(평균 32.0)psu를 나타내었다. 대조구의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 31.8~31.9(평균 31.9)psu를 나타내었고, 9월에서는 29.9~30.4(평균 30.1)psu를 나타내었고, 11월 표층에서는 32.4~32.5(평균 32.5)psu를 나타내었고, 2월 표층에서는 31.7~31.8(평균31.7)psu를 나타내었고, 4월표층에서는 32.0~32.1(평균 32.0)psu를 나타내었다. 태안과 대조구에서의 조사시기에 따른 염분의 변동 폭은 크지 않았으며, 9월에 잦은 강우로 인해 염분이 다른 월별에 비해 비교적 낮은 농도 분포를 보였다. 또한 태안과 대조구의 평균 염분 농도 차는 대조구에서 약 1.4psu 정도 높은 값을 보였다.

<표 6-2> 해역 수질기준(국토해양부, 2008).

등급	해역 환경 기준						
	수소이온 농도 (pH)	화학적 산소 요구량 (COD) (mg/L)	용존 산소량 (DO) (mg/L)	대장균 군수 (MPN/ 100ml)	용매추출 유분 (mg/L)	총질소 (mg/L)	총인 (mg/L)
I	7.8~8.3	1이하	7.5이상	1,000이하	0.01이하	0.3이하	0.03이하
II	6.5~8.5	2이하	5이상	1,000이하	0.01이하	0.6이하	0.05이하
III	6.5~8.5	4이하	2이상	-	-	1.0이하	0.09이하

3.1.4. 용존산소(DO)

해수 중의 용존산소(DO)는 대기에 의한 수온, 식물의 광합성, 동물의 호흡작용, 유기물의 분해 및 광합성 작용의 저해 등으로 인하여 변화가 일어난다. 오염이 많이 된 물일수록 많은 양의 산소를 소비하며, 자연적으로 산소전달 속도보다 소비속도가 빨라지며, 물속의 용존산소가 고갈되어 혐기성상태가 된다.

태안 조사시기별 용존산소의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 7.57~7.89(평균 7.77)mg/L를 나타내었고, 9월 표층에서는 6.7~9.75(평균 7.85)mg/L를, 저층에서는 6.99~7.23(평균 7.09)mg/L를 나타냈으며, 11월 표층에서 9.19~10.38(평균 9.74)mg/L를 저층에서는 9.09~9.25(평균 9.17)mg/L를 나타내었고, 2월 표층에서 13.4~15.18(평균 14.56)mg/L를, 저층에서는 13.27~14.72(평균 13.96)mg/L를 나타내었고, 4월 표층에서 10.26~11.11(평균 10.70)mg/L를 저층에서는 10.72~10.84(평균 10.77)mg/L로 나타내었다. 그리고 대조구는 7월에 7.82~7.86(평균 7.84)mg/L, 9월에서는 7.67~8.57(평균 8.04)mg/L, 11월에 8.82~9.04(평균 8.95)mg/L 그리고 2월에 13.59~14.02(평균 13.74)mg/L를, 4월에 10.31~10.82(평균 10.54)mg/L 나타내었다.

월별 수평분포를 보면(그림 6-3) 9월에는 송현 정점에서 높은 농도를 보였고, 11월과 2월은 내만에서 높은 농도를 보였고, 외해로 갈수록 낮아지는 분포를 보였고, 4월에는 10.7 mg/L 전후로 비슷한 수평분포를 보였다.

조사기간 중 용존산소(DO)는 9월 조사시기를 제외한 모든 조사시기에서 해역수질 기준(국토해양부, 2008) 등급 Ⅰ의 수질을 나타내었다.

3.1.5. 부유물질(SS)

태안 조사시기별 부유물질의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 13.1~26.4(평균 18.6)mg/L를 나타내었고, 9월 표층에서는 33.7~118.0(평균 50.7)mg/L를 저층에서는 34.1~38.4(평균 36.1)mg/L를 나타냈으며, 11월 표층에서 29.3~54.4(평균 39.3)mg/L를 저층에서는 32.7~32.9(평균 32.8)mg/L를 나타냈고, 2월 표층에서는 49.9~77.3(평균 65.2)mg/L를 저층에서는 64.3~103.3(평균 84.2)mg/L를 나타내었고, 4월 표층에서 18.3~65.6(평균 39.2)mg/L를, 저층에서는 30.3~63.1(평균 43.7)mg/L를 나타내었다. 대조구 표층해수는 7월에 18.7~19(평균 18.9)mg/L, 9월에는 42.1~46.1(평균 44.1)mg/L, 11월에는

47.7~51.3(평균 49.5)mg/L, 2월에는 50.7~86.1(평균 68.9)mg/L를 나타냈으며, 4월에는 20.0~42.9(평균 32.3)mg/L를 나타내었다(그림 6-4).

전반적으로 부유물질 농도범위는 2월에 가장 높은 농도를 보였고, 7월 에 가장 낮은 농도를 보였다. 태안과 대조구의 부유물질의 평균 농도는 9월을 제외한 다른 월별에서는 대조구에서 높은 농도를 나타내었다.

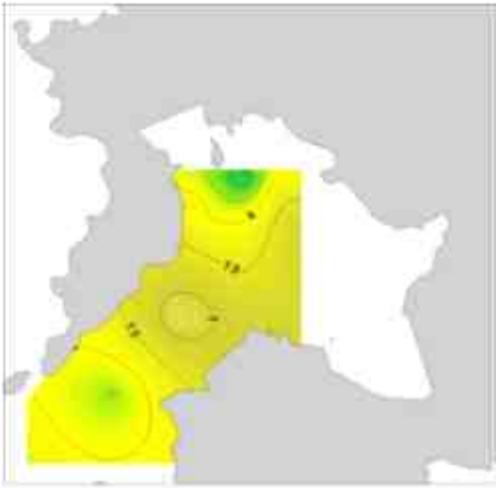


그림 6-3. 용존산소(DO, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)

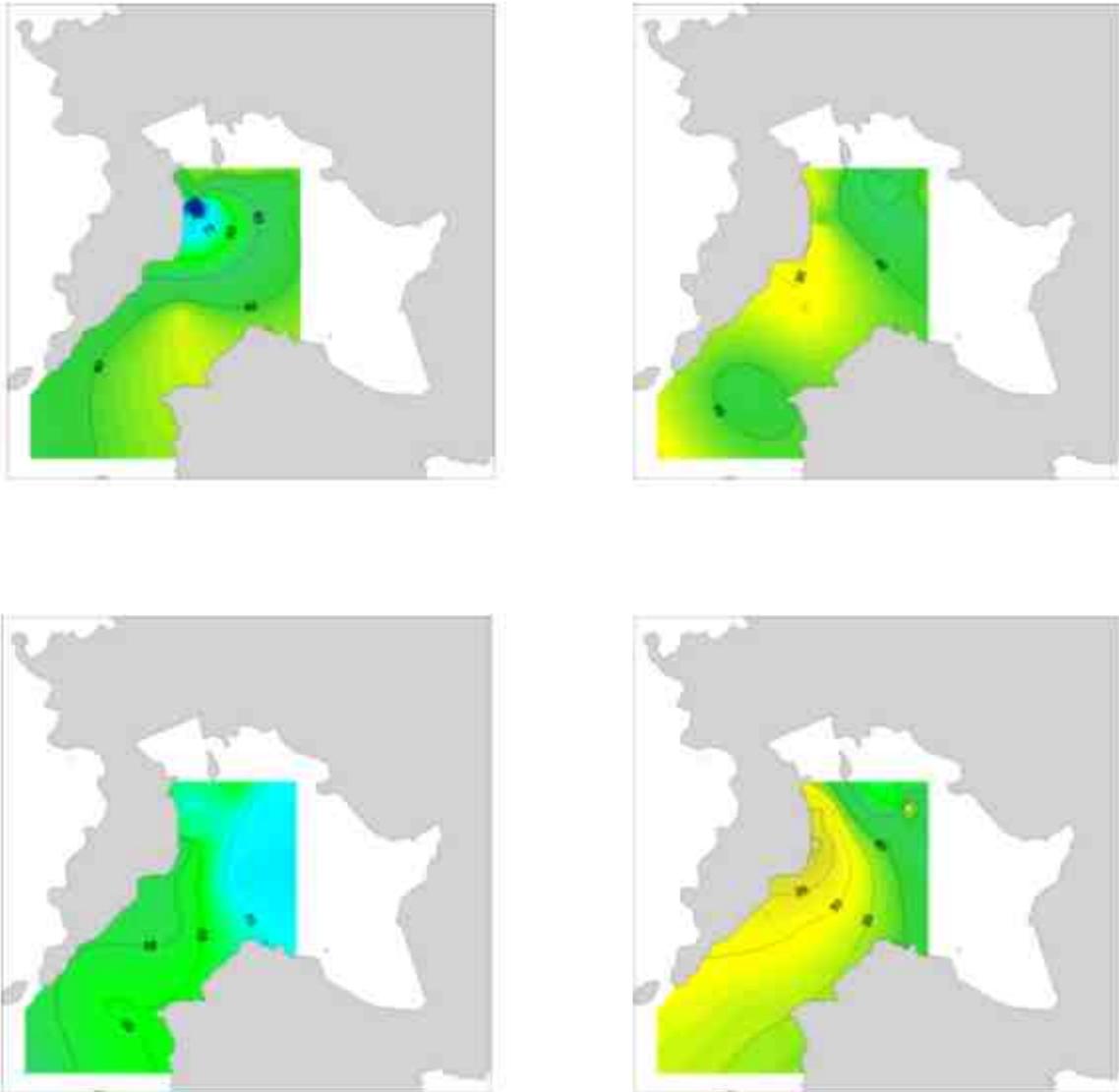


그림 6-4. 부유물질(SS, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)

3.1.6. 화학적 산소요구량(COD)

화학적 산소요구량(COD)은 수중의 유기물의 양을 나타내는 간접지표로서 해역의 수질기준 및 부영양화의 척도로 매우 중요하게 다루어지며, 수중의 유기물질을 산화제로 산화시켰을 때 소비되는 산화제의 양을 산소량으로 환산한 값이다.

태안 조사시기별 화학적 산소요구량의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 1.30~1.86(평균 1.59)mg/L를 나타내었고, 9월 표층에서는 0.44~2.80(평균 1.55)mg/L를 저층에서는 0.60~2.00(평균 1.13)mg/L를 나타냈으며, 11월 표층에서 0.51~1.47(평균 0.94)mg/L를 저층에서는 0.87~1.55(평균 1.12)mg/L를 나타내었고, 2월 표층에서 0.60~2.80(평균 1.46)mg/L를 저층에서는 1.24~1.76(평균 1.47)mg/L를 나타내었고, 4월 표층에서 1.00~2.15(평균 1.54)mg/L를 저층에서는 1.48~2.54(평균 1.87)mg/L를 나타내었다. 대조구 표층해수에서는 7월에 0.86~1.94(평균 1.40)mg/L, 9월에 0.80~1.24(평균 1.08)mg/L, 11월에 0.95~1.47(평균 1.28)mg/L 그리고 2월에는 2.04~2.84(평균 2.47)mg/L를 나타내었고, 4월 표층에서는 1.56~3.26(평균 2.25)mg/L를 나타내었다. 태안 조사시기 중 표층에서 화학적 산소요구량 농도의 평균값은 9월에 가장 높았으며, 11월에 가장 낮았다. 표층과 저층의 농도를 비교해 보면 2월을 제외한 다른 월별에서는 표층이 저층보다 낮은 농도를 보였다.

태안 해수 중 화학적 산소요구량의 월별 수평분포를 보면(그림 6-5), 9월의 표층에서는 만 내에서 1 mg/L 이상의 농도를 보였으며, 법산에서는 2 mg/L 이상의 수질 III등급을 보였다. 저층에서는 정점 태안3,태안4에서 비교적 낮은 농도를 보였고, 정점 태안1에서 2 mg/L의 농도로 상대적으로 다소 높은 농도를 보였다. 11월 표층에는 전체적으로 1 mg/L 이하의 수질 I 등급을 보였으나, 만 외해에 위치한 정점 태안1, 태안2 에서는 1 mg/L의 이상의 농도로 다른 정점보다 다소 높게 나타났으며, 저층에서는 1 mg/L 전후의 농도를 보였으나, 태안1 정점에서 다소 높게 나타났다. 해역 수질 기준 I~II의 등급을 보였다. 2월에는 대체로 1 mg/L 전후의 농도를 나타냈으며, 파도1과 법산 정점에서 다소 높은 농도를 나타냈다. 저층에서는 전체적으로 2 mg/L 이하의 농도로 II등급의 수질을 나타내었다. 4월에는 태안4에서 높은 농도를 나타내었으나 다른 정점에서는 2mg/L 이하의 농도로 나타나 II~III 등급의 수질을 보였다. 대조구는 대체로 높은 2 mg/L 이상의 농도로 나타내어 III 등급의 수질을 보였다.

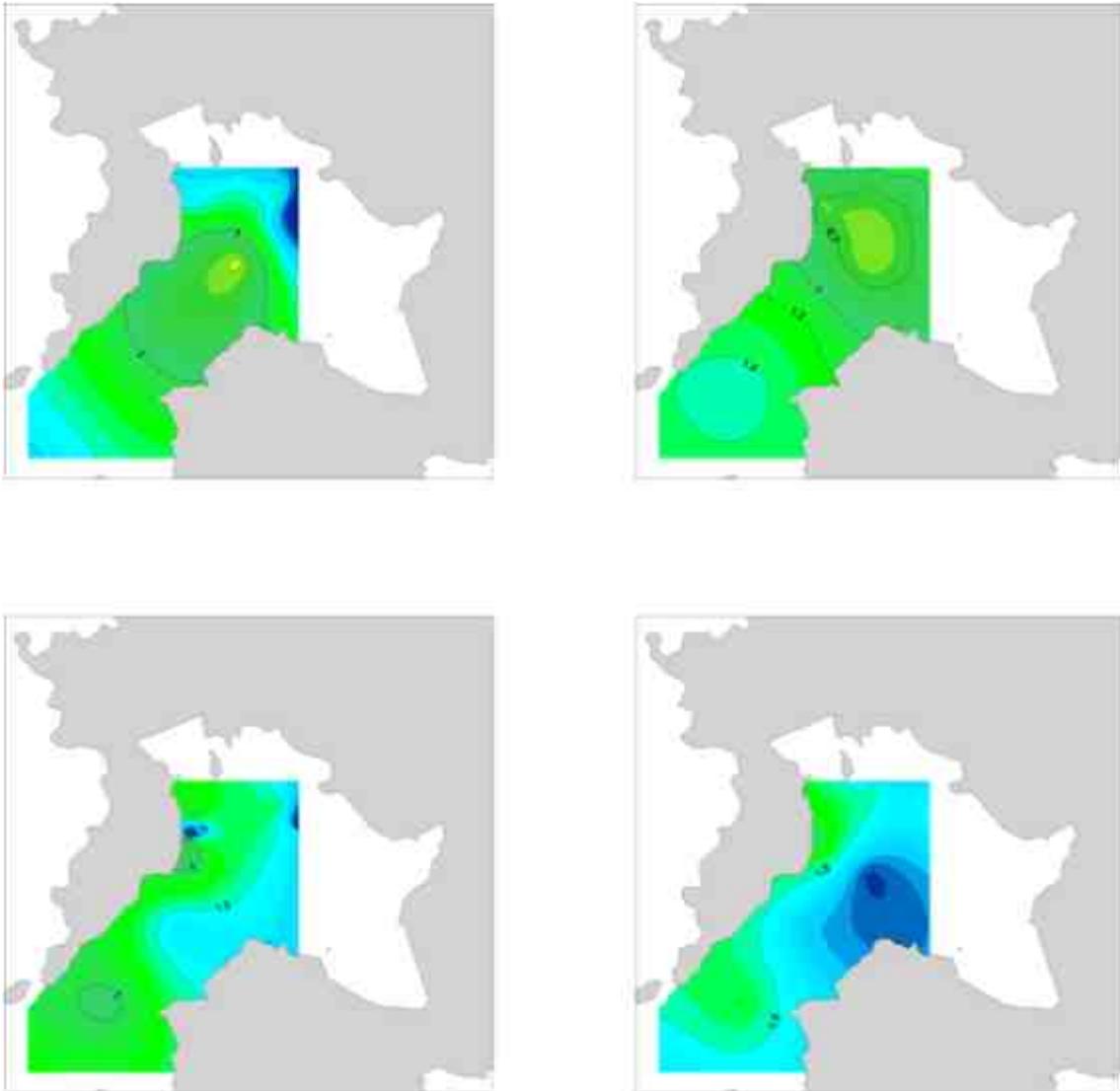


그림 6-5. 화학적 산소요구량(COD, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)

3.1.7. 용존 무기질소(DIN)

수질오염과 관련된 질소화합물은 암모니아(NH_3), 유기탄소(단백질, 아미노산과 요소 등), 아질산이온(NO_2^-), 질산이온(NO_3^-)의 네가지 형태로 분류할 수 있다. 이들 네가지 질소화합물들은 서로 밀접한 관계가 있는데, 유기 질소는 분해되어 암모니아가 되고 암모니아는 질산화 박테리아에 의해 아질산과 질산이온으로 산화되며, 이러한 무기 질소는 부영양화의 척도가 된다. DIN은 해수 중 함유된 질산염, 아질산염 그리고 암모니아로 구성되며 인, 규소와 함께 1차 생산자인 식물 플랑크톤의 필수 영양소이지만, 과도하게 존재하면 부영양화 현상 등의 악영향을 유발하기도 한다.

태안 조사시기별 용존 무기 질소의 월별 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서는 0.089~0.153(평균 0.112)mg/L를 나타냈으며, 9월 표층에서 0.010~0.047(평균 0.026)mg/L 나타내었고, 저층에서 0.007~0.008(평균 0.007) mg/L를 나타냈으며, 11월 표층에서 0.080~0.110(평균 0.091) mg/L를 나타내었고, 저층에서는 0.004~0.004(평균 0.004) mg/L를 나타내었고, 2월 표층에서 0.152~0.275(평균 0.194) mg/L를 나타냈으며, 저층에서 0.008~0.009(평균 0.009) mg/L를 나타내었고, 4월 표층에서 0.157~0.297(평균 0.206)mg/L, 저층에서 0.008~0.009(평균 0.009)mg/L로 나타내었다. 대조구 월별 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서는 0.077~0.268(평균 0.172)mg/L를 나타냈으며, 9월 표층에서는 0.01~0.044(평균 0.031)mg/L를 나타냈으며, 11월 표층에서는 0.116~0.126(평균 0.121)를 나타내었고, 2월 표층에서는 0.217~0.26(평균 0.239)mg/L를 나타냈으며, 4월 표층에서는 0.230~0.269(평균 0.250)mg/L를 나타내었다. 태안 조사기간 동안 용존 무기 질소의 월별 및 층별 분포를 비교해 보면, 4월에 가장 높은 농도를 9월에 가장 낮은 농도를 보였다. 태안 해수 중 DIN의 월별 수평분포를 보면(그림 6-6), 9월에는 다른 조사시기보다 낮은 농도를 나타내고 있으며, 11월에서도 비슷한 농도 분포를 보였다. 2월과 4월에는 파도에서 다른 정정보다 다소 높은 농도를 나타내고, 만 내부로 갈수록 점점 낮아지는 분포를 보였다.

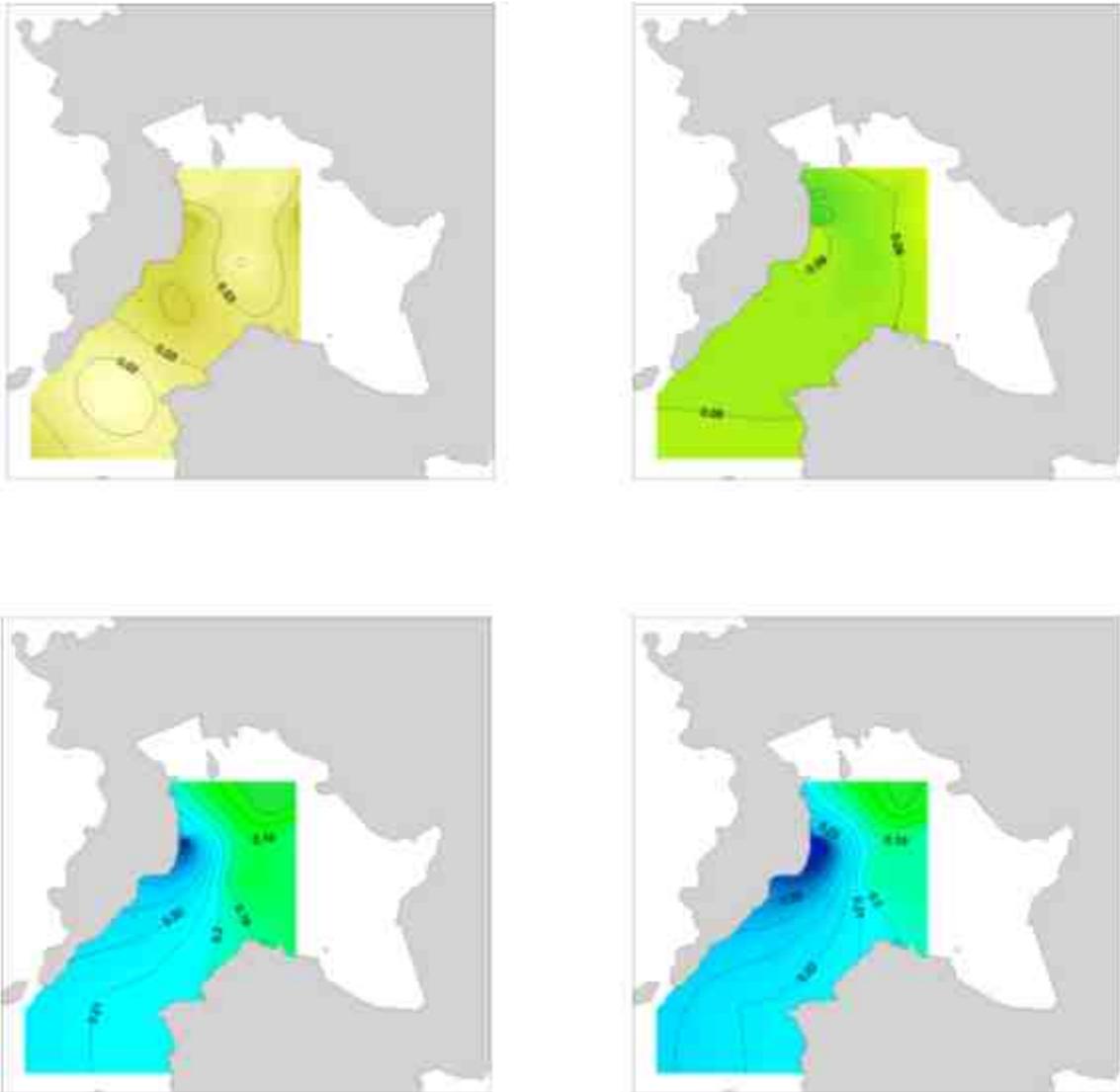


그림 6-6. 용존 무기질소(DIN, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하: 4월)

3.1.8 용존 무기인(DIP)

용존 무기인(DIP)은 질소와 함께 식물 플랑크톤의 필수 영양소로 해역에서 부족하기 쉬운 성분이나 질소와 더불어 과도하게 존재하면 부영양화 현상으로 인한 적조 등의 악영향을 유발하기도 한다.

태안 조사시기별 용존 무기 인의 월별 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 0.011~0.023(평균 0.022) mg/L,를 나타내었고, 9월 표층에서 0.003~0.036(평균 0.022) mg/L, 저층에서 0.005~0.007(평균 0.006) mg/L를 나타내었고, 11월 표층에서 0.017~0.032(평균 0.022) mg/L, 저층에서 0.02~0.021(평균 0.021) mg/L를 나타내었고, 2월 표층에서 0.018~0.027(평균 0.022) mg/L, 저층에서 0.025~0.027(평균 0.026) mg/L를 나타내었고, 4월 표층에서 0.007~0.025(평균 0.016)mg/L, 저층에서 0.025~0.027(평균0.026)mg/L로 나타내었다. 대조구 월별 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 0.009~0.010(평균 0.010)mg/L를 나타내었고, 9월 표층에서는 0.003~0.0013(평균 0.007)mg/L를 나타내었고, 11월 표층에서는 0.025~0.032(평균 0.029)mg/L를 나타내었고, 2월 표층에서는 0.026~0.029(평균 0.027)mg/L를 나타내었고, 4월 표층에서는 0.025~0.029(평균 0.027)mg/L를 나타내었다.

조사기간 동안 용존 무기인의 월별 및 층별 분포를 비교해 보면 4월에 다른 조사시기에 비해 낮은 평균 농도를 보였고, 층별로는 9월을 제외하고 저층이 표층보다 상대적으로 높은 농도를 나타내었다.

태안 해수 중 용존 무기인의 월별 수평분포를 보면(그림 6-7) 조사기간 중 9월을 제외한 다른 조사시기에서는 표층은 내만에서 외해로 갈수록 농도가 높아지는 경향을 보였고, 9월은 태안1에서 0.003 mg/L 내외의 낮은 농도를 보였으나 내만으로 갈수록 높은 농도를 보였다. 11월에서는 송현에서 다른 정정보다 다소 높게 나타났다. 2월과 4월에는 만 입구에서 다른 정정보다 다소 높은 농도를 나타내고, 만 내부로 갈수록 점점 낮아지는 분포를 보였다.

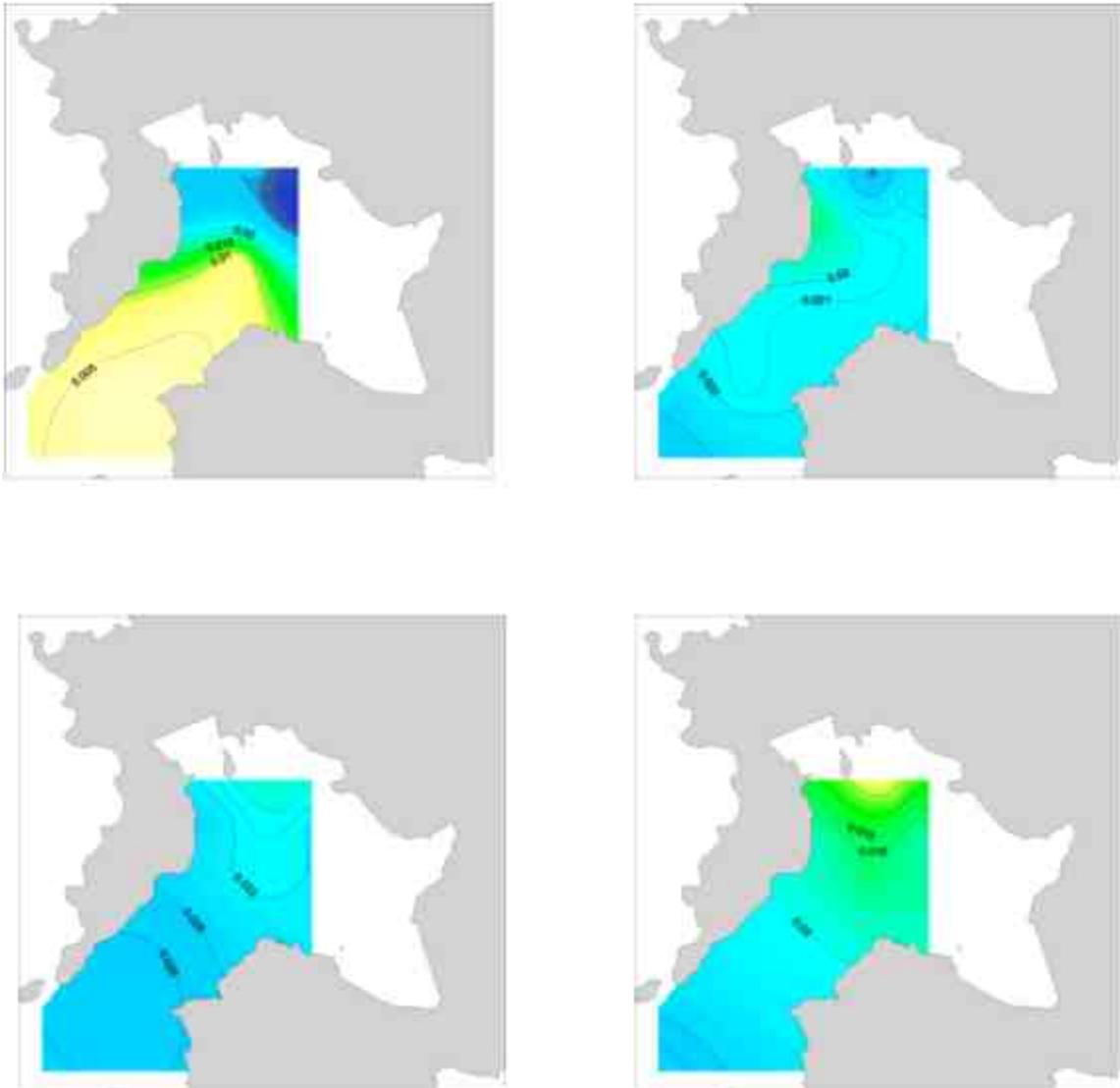


그림 6-7. 용존 무기인(DIP, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)

3.1.9 규산성 규소($\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$)

규산규소($\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$)는 용존 무기질소와 용존 무기인과 마찬가지로 중요한 영양염류로서 규조류의 무기성분의 SiO_4 가 60%를 차지하며, 방산총류, 규질 편모류 등의 골격구성성분의 기본 물질로서 4~5월에 발생하는 규조적조의 제한인자가 된다.

규산 규소의 월별 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 8.86~16.34(평균 12.10) $\mu\text{g-at./L}$ 를 나타냈고, 9월 표층에서 10.39~65.09(평균 36.79) $\mu\text{g-at./L}$, 저층에서 12~14.34(평균 12.8) $\mu\text{g-at./L}$ 를, 11월 표층에서 8.49~10.99(평균 9.48) $\mu\text{g-at./L}$ 를 나타냈고, 저층에서 9.34~9.69(평균 9.49) $\mu\text{g-at./L}$ 를 나타냈고, 2월 표층에서 11.56~13.31(평균 12.25) $\mu\text{g-at./L}$, 저층에서 12.31~12.42(평균 12.35) $\mu\text{g-at./L}$ 를 나타냈고, 4월 표층에서 7.58~10.35(평균 9.09) $\mu\text{g-at./L}$, 저층에서 7.75~8.82(평균 8.28) $\mu\text{g-at./L}$ 를 나타내었다.

태안 조사기간 동안 규산 규소의 월별 및 층별로 비교해 보면, 9월에서 가장 높은 농도를, 4월에서 가장 낮은 농도를 나타내었고, 층별로는 전 월별에서 표층이 다소 높은 농도를 나타냈다. 대조구는 9월에는 8.13~8.96(8.55) $\mu\text{g-at./L}$, 11월에 12.58~18.2(16.32) $\mu\text{g-at./L}$ 를 나타냈고, 2월에 12.31~12.42(12.35) $\mu\text{g-at./L}$ 를 나타냈으며, 4월에는 7.75~8.82(8.28) $\mu\text{g-at./L}$ 로 나타났다.

태안 해수 중 규산 규소의 월별 수평분포를 보면(그림 6-8) 조사기간 중 9월에는 송현 정점에서 다른 정점보다 다소 높은 농도를 나타냈으며, 만의 남부로 갈수록 감소하는 분포를 보였고, 11월에는 파도에서 다른 정점에 비해 다소 높게 나타났으며, 2월에는 법산 정점과 만 입구 정점에서 다른 정점에 비해 다소 높게 나타났고, 4월에는 파도에서 다른 정점에 비해 다소 높게 나타났다.

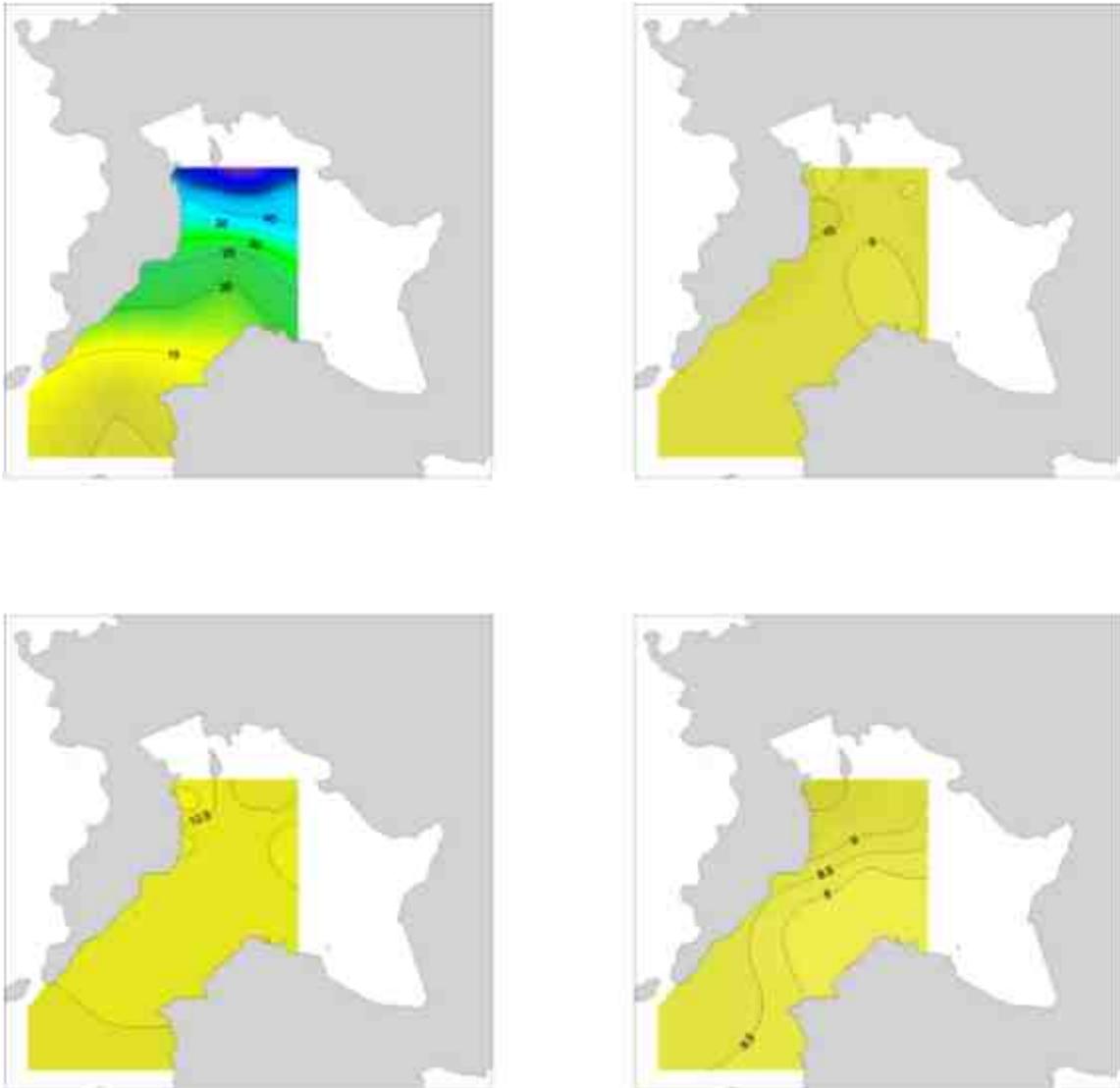


그림 6-8. 규산규소($\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$, $\mu\text{g-at./L}$)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)

3.1.10 총질소(T-N)

총질소(T-N)는 인과 함께 하천과 바다에 존재하는 생물체를 성장시키는 필수영양소로 활용할 뿐만 아니라 과다한 양이 존재할 경우 생물체의 과다 성장으로 적조 및 수질을 악화시키는 원인이 된다.

태안 조사시기별 총질소의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 0.476~0.817(평균 0.627)mg/L를 나타내었고, 9월 표층에서 0.214~0.848(평균 0.589)mg/L를, 저층에서는 0.300~0.497(평균 0.380)mg/L를 나타냈으며, 11월 표층에서 0.268~0.357(평균 0.306)mg/L를, 저층에서는 0.287~0.328(평균 0.301)mg/L를 나타내었고, 2월 표층에서는 0.247~0.434(평균 0.347)mg/L를 저층에서는 0.344~0.407(평균 0.369)mg/L를 나타내었다. 4월 표층에서 0.247~0.468(평균 0.352)mg/L, 저층에서 0.344~0.407(평균 0.369)mg/L로 나타내었다. 대조구는 7월에 0.695~0.731(평균 0.713)mg/L, 9월에 0.352~0.438(평균 0.404)mg/L, 11월에 0.299~0.406(평균 0.337)mg/L, 2월에는 0.468~0.514(평균 0.495)mg/L 4월에는 0.393~0.514(평균 0.469)mg/L를 나타내었다. 태안 조사시기 중 총 질소의 평균 농도는 7월과 9월이 유사한 농도를 보였고, 이외에 월별에서 유사한 농도를 나타냈다. 그리고 표층과 저층의 농도 차이를 보면, 9월에 표층이 저층 보다 높은 농도를 보였고, 다른 월별에서는 유사한 농도를 나타내었다. 대조구와 태안의 조사시기별 평균 농도는 9월을 제외한 모든 조사 시기에 태안보다 대조구에서 높은 평균값을 나타내었다. TN의 수평 분포를 보면(그림 6-9) 9월에서는 파도 정점에서 다소 높은 농도를 보였으며, 외해로 갈수록 농도가 낮아지는 경향을 나타냈으며, 해역수질 기준 III등급의 수질을 보였다, 11월에는 대부분 정점에서 대체로 0.3 mg/L 전후의 농도를 보였으나, 태안4에서 다른 정점에 비해 다소 높게 나타났다. 2월에는 서에서 동쪽으로 갈수록 농도가 낮아졌으며 파도 정점에서 다소 높게 나타나 해역수질 II등급인 0.3mg/L의 전후로 나타났다. 4월에는 0.3mg/L의 전후로 전체적으로 유사한 농도 분포를 나타냈고, 태안4에서 다소 높게 나타났다. 대조구 또한 0.4 mg/L이상으로 다소 높은 농도를 나타냈다.

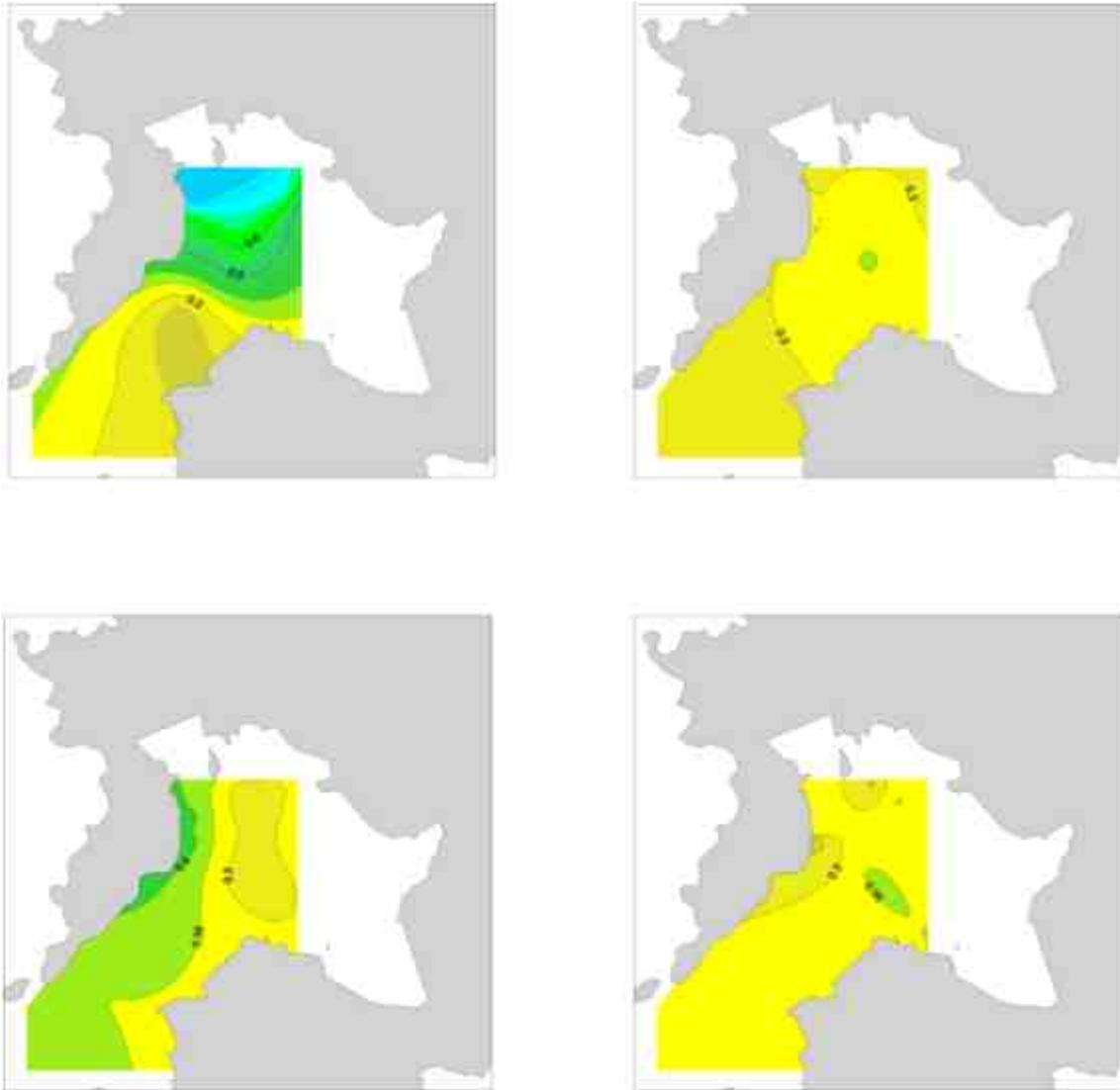


그림 6-9. 총질소(TN, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하: 4월)

3.1.11. 총인(T-P)

총인(T-P)은 용존, 입자형태 또는 무기, 유기형태 등 모든 인 화합물을 나타낸다. 해수의 인산염 농도는 바다 생산력의 제한 인자로 작용하여 플랑크톤 수의 증가를 억제함으로써 바다의 생산력을 규제하는 것으로 알려져 있다.

태안 조사시기별 총인의 분포범위와 평균값을 보면, 7월 표층에서 0.024~0.044(평균 0.037)mg/L를 나타내었고, 9월 표층에서는 0.016~0.072(평균 0.049)mg/L를 저층에서는 0.018~0.031(평균 0.024)mg/L를 나타냈으며, 11월 표층에서 0.047~0.060(평균 0.053)mg/L를 저층에서는 0.048~0.054(평균 0.051)mg/L를 나타내었고, 2월 표층에서는 0.021~0.050(평균 0.031)mg/L를 저층에서는 0.048~0.052(평균 0.050)mg/L를 나타내었고, 4월 표층에서 0.029~0.051(평균 0.036)mg/L를 나타내었다. 대조구는 7월에 0.050~0.063(평균 0.056)mg/L, 9월에 0.021~0.028(평균 0.025)mg/L, 11월에 0.053~0.061(평균 0.058)mg/L, 2월에 0.038~0.046(평균 0.042)mg/L를 나타내었다. 태안 조사시기 중 월별 농도분포를 보면, 11월 표층 분포범위와 평균값은 다른 월별에 비해 다소 높게 나타났으며, 7월에는 다른 월별에 비해 낮게 나타났다. 태안과 대조구의 조사시기별 평균값을 비교해 본 결과 9월을 제외한 다른 월별에서 대조구에서 비교적 높은 평균값을 보였다.

총인의 월별 수평 분포를 보면(그림 6-10) 9월에서는 파도와 송현에서 0.06mg/L 전후의 높은 농도를 나타내어 II~III등급의 수질을 보였고, 태안4에서 0.03mg/L이하의 농도를 나타내 I등급의 수질을 보였다. 11월에서는 대부분 정점에서 0.05 mg/L 전후의 농도를 보여 II등급의 수질을 보였다. 2월과 4월에는 0.03 mg/L 전후의 농도를 나타내어 I~II등급의 수질을 보였고, 외해로 갈수록 점차 농도가 높아지는 경향을 나타내었다.

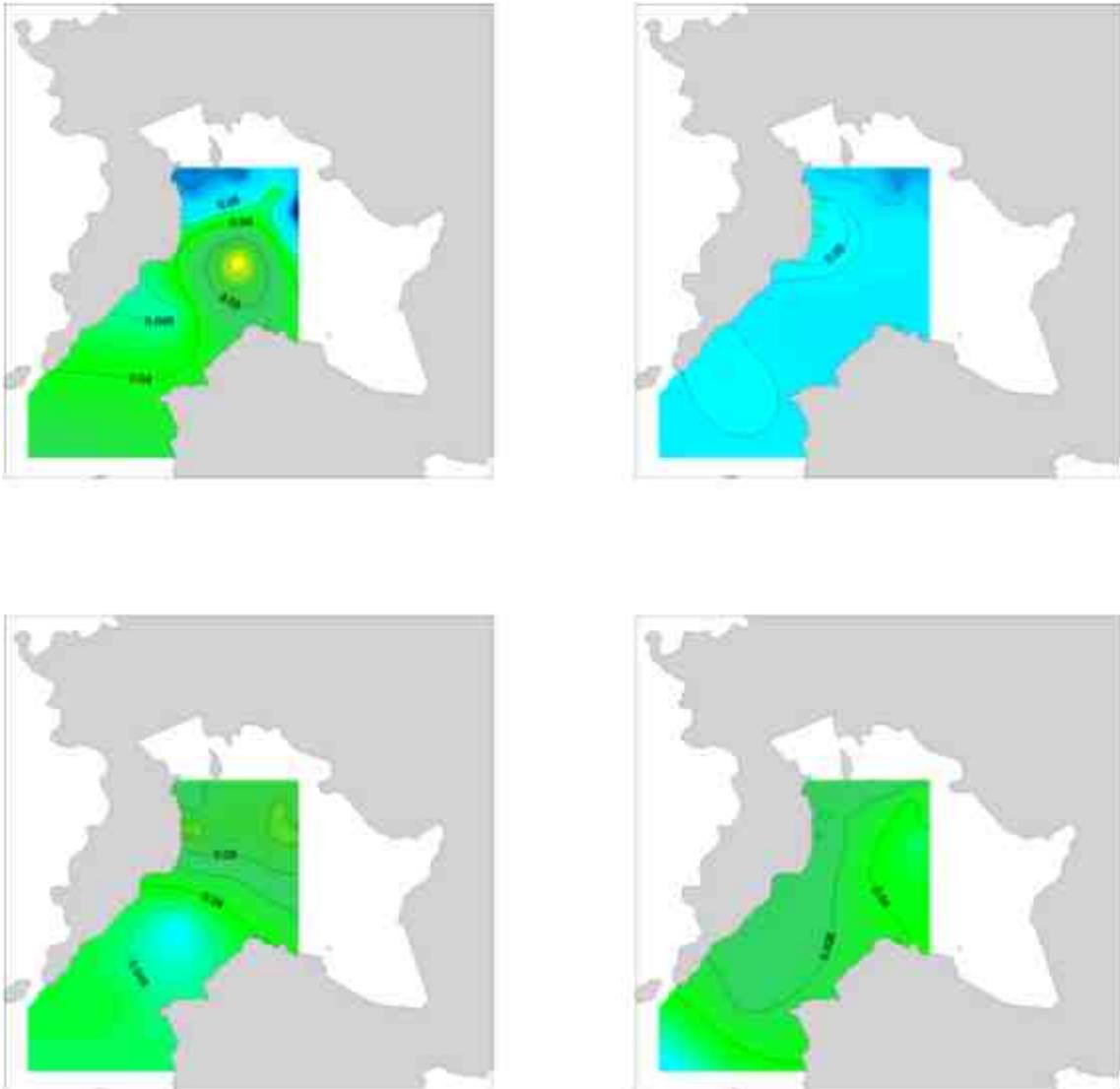


그림 6-10. 총인(TP, mg/L)의 월별 표층 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하: 4월)

3.2. 해양퇴적물

3.2.1 강열감량(IL)

유기물 함량의 간접적 지표를 나타내는 강열감량(IL)의 태안 조사시기별 분포범위와 평균값은 7월에 0.54~2.06(평균 1.07)%, 9월에 0.96~4.40(평균 2.02)%, 11월에 1.18~3.95(평균 2.03)% 그리고 2월에는 0.96~3.18(평균 1.97)%을 나타냈으며, 4월에는 0.89~3.01(평균 1.90)%를 나타냈다. 대조구는 7월에 1.46~2.79(평균 2.13)%, 9월에 2.38~6.28(평균 3.73)%, 11월에 2.32~5.97(평균 3.66)% 그리고 2월에 2.22~3.60(평균 2.96)%로 나타났으며, 4월에 2.14~3.28(2.68)%로 나타났다. 태안 조사시기 중 월별로는 9월에 가장 높은 분포범위와 평균함량을 보였으며, 7월에 가장 낮은 분포범위와 평균함량을 보였다. 대조구와 태안의 조사시기별 평균값을 비교해 보면, 모든 월별에 걸쳐 태안이 대조구에 비해 낮게 나타났다.

태안 조사시기 중 월별 수평분포를 보면(그림 6-11) 9월에는 만 입구에서 3% 이상의 비교적 높은 농도를 보였고, 만내로 갈수록 낮아지는 분포를 보였다. 11월에는 태안 4에서 3% 이상의 농도를 보였고, 나머지 정점에서는 그 이하의 농도를 나타내었다. 2월 4월에는 전 정점에서 3% 이하의 농도를 보였고, 만 입구 정점에서 낮은 분포를 나타내었다.

3.2.2 산취발성황화물(AVS)

유기성 오탁물이 해저 퇴적물로 침강하여 분해될 때 산소가 소비되고 환원상태로 되며, 황산염 환원세균의 증식에 따라 황화수소가 생성되고, 저질층의 금속 등과 결합하여 황화물이 증가한다. 황화물의 증가는 저질의 악화를 유발하며, 저서생물의 서식에 영향을 주며 조건에 따라서는 저질의 상층부의 수역의 산소부족과 같은 2차적 오염을 유발하기도 한다.

산취발성황화물(AVS)의 태안 조사시기별 분포범위와 평균값은 7월에는 0.0014~0.0213(평균 0.0059)mg/g-dry, 9월에는 0.0013~0.0792(평균 0.0249)mg/g-dry, 11월에는 0.0006~0.0733(평균 0.0168)mg/g-dry 그리고 2월에는 0.0011~0.0144(평균 0.0043)mg/g-dry를 나타냈으며, 4월에는 ND~0.0112(평균 0.0051)mg/g-dry을 나타내었다. 대조구에서는 7월에는 0.0053~0.0284(평균 0.0169)mg/g-dry, 9월에는 0.0150~0.4882(평균 0.1810)mg/g-dry, 11월에는 ND~0.2302(평균 0.0814)mg/g-dry, 2월에는 ND~0.0965(평균 0.0656)mg/g-dry

를 나타냈으며, 4월에는 0.0144~0.05678(평균 0.0298)mg/g-dry를 나타냈다. 태안 조사시기 중 9월에 상대적으로 가장 높은 분포범위와 평균값을 보였으며 2월에 상대적으로 가장 낮은 분포범위와 평균값을 나타내었다.

태안 조사시기 중 월별 수평분포를 보면(그림 6-12) 9월에는 태안1에서 가장 높은 농도를 나타내었고, 내만에서 외해로 갈수록 높아지는 분포 특성을 보였다. 11월에는 태안3에서 높은 농도를 나타냈으며 내만으로 갈수록 낮아지는 경향을 나타냈다. 2월 4월에서는 비슷한 농도를 나타냈고, 신덕에서 다른 정점에 비해 다소 높게 나타났다. 전 조사시기에 퇴적물의 수산용수기준치인 0.2 mg/g-dry(일본수산자원보호협회편, 2000) 이하의 농도를 나타내었다.

3.2.3 화학적 산소요구량(COD)

저질 중의 유기물 중 산화되기 쉬운 것의 양을 구하기 위하여 과망간산칼륨으로 산화시키고, 그 산소소비량을 화학적 산소요구량(COD)이라 한다. 저질 중에 유기물이 많아지면, 산소소비량이 많아져 오염의 지표로서 중요하게 이용되고 있다.

화학적 산소요구량(COD)의 태안 조사시기별 분포범위와 평균값은 7월에는 2.97~3.68(평균 3.31)mg/g-dry, 9월에는 3.29~14.73(평균 7.14)mg/g-dry, 11월에는 1.48~6.88(평균 3.29)mg/g-dry 그리고 2월에는 0.10~9.92(평균 3.68)mg/g-dry를 나타냈으며, 4월에서는 1.20~5.96(평균 2.68)mg/g-dry를 나타내었다. 대조구 7월에는 3.09~4.63(평균 3.86)mg/g-dry, 9월에는 4.23~11.22(평균 6.67)mg/g-dry, 11월에는 3.11~16.33(평균 7.53)mg/g-dry 그리고 2월에는 5.43~7.76(평균 6.94)mg/g-dry를 나타냈으며, 4월에 3.72~4.89(평균 4.36)mg/g-dry의 분포 범위를 보였다. 태안 조사시기 중 11월에 가장 높은 농도 범위와 평균값을 보였고, 다른 월별의 평균값은 유사한 농도를 나타냈다.

태안 조사시기 중 월별 수평분포를 보면(그림 6-13), 9월에서는 법산과 태안4에서 다른 정정보다 다소 높은 농도를 나타내고 있으며 동에서 서측으로 갈수록 낮아지는 경향을 보이고 있다. 11월에는 신덕과 태안3에서 다른 정점에 비해 다소 낮은 농도를 보이고 있으며, 태안1에서 다소 높게 나타났다. 2월에는 파도에서 다소 높은 농도를 보이고 있고 외해로 갈수록 낮아지는 분포를 보였다. 4월에는 파도와 법산에서 다른 정점에 비해 다소 높게 나타났으며, 신덕과 태안3에서 다소 낮은 농도 분포를 보이고 있다. 전 월별에서 퇴적물의 부영양화와 저질의 수산용

수 기준치를 나타내는 기준치인 20 mg/g-dry(일본수산자원보호협회편, 1998, 2000) 이하의 농도를 나타내었다.

개선 방법별 개선효과를 보기 위하여 유기물 농도의 간접적인 지표로 이용되고 있는 COD 농도에 대하여 개선 전후에 같은 정점에서 실시한 12개 정점(대조구 2개 정점 포함)에서 개선 전후의 퇴적물 환경을 비교하였다(그림 6-15, 그림 6-16).

개선방법을 실시하지 않은 대조구 어장(의항 1, 2)에서는 9월과 2월에 COD 농도가 증가하였으며 조사시기에 따fms 변동은 크지 않았다. 시험 어장인 파도와 법산 어장에서는 파도 1-2 정점에서 2월에 일시 증가하는 것을 제외하면 다소 개선되는 효과를 보였으나 나머지 정점에서는 개선 효과를 볼 수 없었다. 많은 강우의 영향을 받은 9월에 COD 농도가 증가하는 현상을 보였으며 동계인 2월에도 다소 높은 농도를 나타내었다. 그러나, 송현과 신덕 어장에서는 9월에 많은 강우의 영향으로 일시 증가한 것을 제외하면 2개 정점 모두 양호한 개선 효과를 보였으며 또한 그 효과가 4월까지 장기적으로 지속되고 있었다. 태안 어장 4개 정점에서의 개선 후의 COD의 농도변화를 보면 많은 강우의 영향을 받은 9월 조사에서 7.0 - 10.5mgO₂/g-dry 전후의 높은 농도를 보였으나, 그 후 큰 개선효과를 나타내어 약 7개월 후인 4월 조사에서는 약 1.2 - 4.7mgO₂/g-dry 전후의 농도로 크게 개선되는 양상을 보였다(부록 표 20 - 23).

3.2.4 퇴적물 pH

태안 조사시기별 퇴적물 pH의 분포범위와 평균값을 보면, 7월에는 7.64~7.89(평균 7.76)를 나타내었고, 9월에는 7.20~8.10(평균 7.84))를 나타내었고, 11월 7.83~8.19(평균 8.06)를 나타내었고, 2월 8.12~8.31(평균8.21)를 나타내었고, 4월 7.65~7.99(평균 7.85)를 나타내었다. 대조구의 분포범위와 평균값을 보면, 7월에는 7.58~7.59(평균 7.59)를 나타내었고, 9월에는 7.67~7.89(평균 7.78)를 나타내었고, 11월에는 7.92~8.08(평균 8.01)를 나타내었고, 2월에는 8.16~8.21(평균 8.19)를 나타내었고, 4월에는 7.90~7.90(평균 7.90)를 나타내었다.

태안 조사시기 중 월별 수평분포를 보면(그림 6-14), 9월에는 법산에서 다른 농도에 비해 다소 낮은 농도를 나타내었고, 11월에는 신덕2에서 높은 농도를 나타내었고, 태안4에서는 다른 정점에 비해 다소 낮은 농도를 나타내었다. 2월에는 다

른 월별에 비해 모든 정점에서 높게 나타났으며, 외해로 갈수록 농도가 높아지는 경향이 보였다. 4월에는 대체로 비슷한 농도를 나타내고 있으나 파도에서 다른 정점에 비해 다소 높게 나타났다.

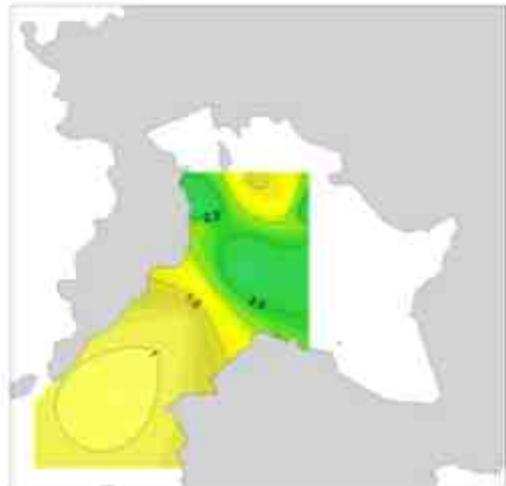
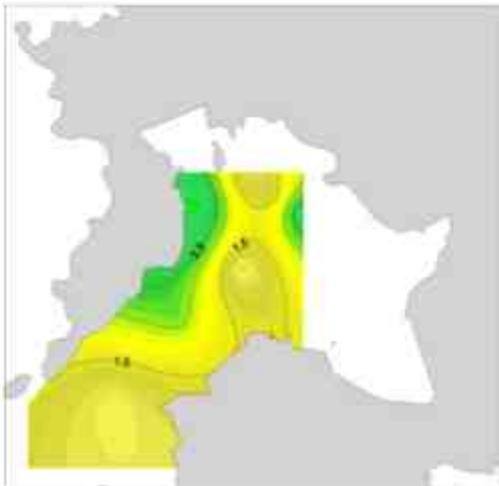
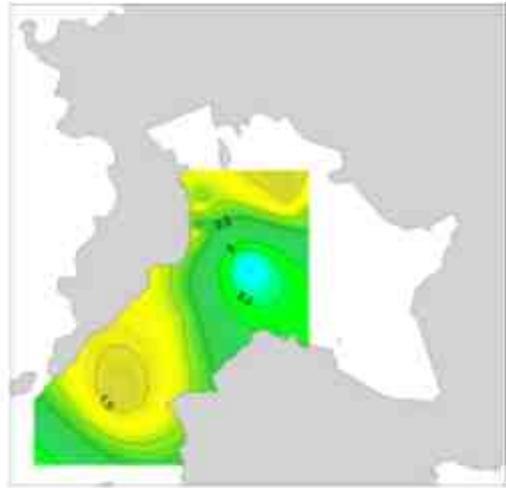
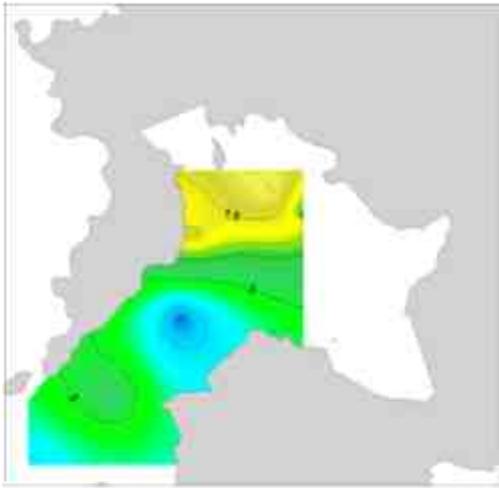


그림 6-11. 강열감량(IL, %)의 월별 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)

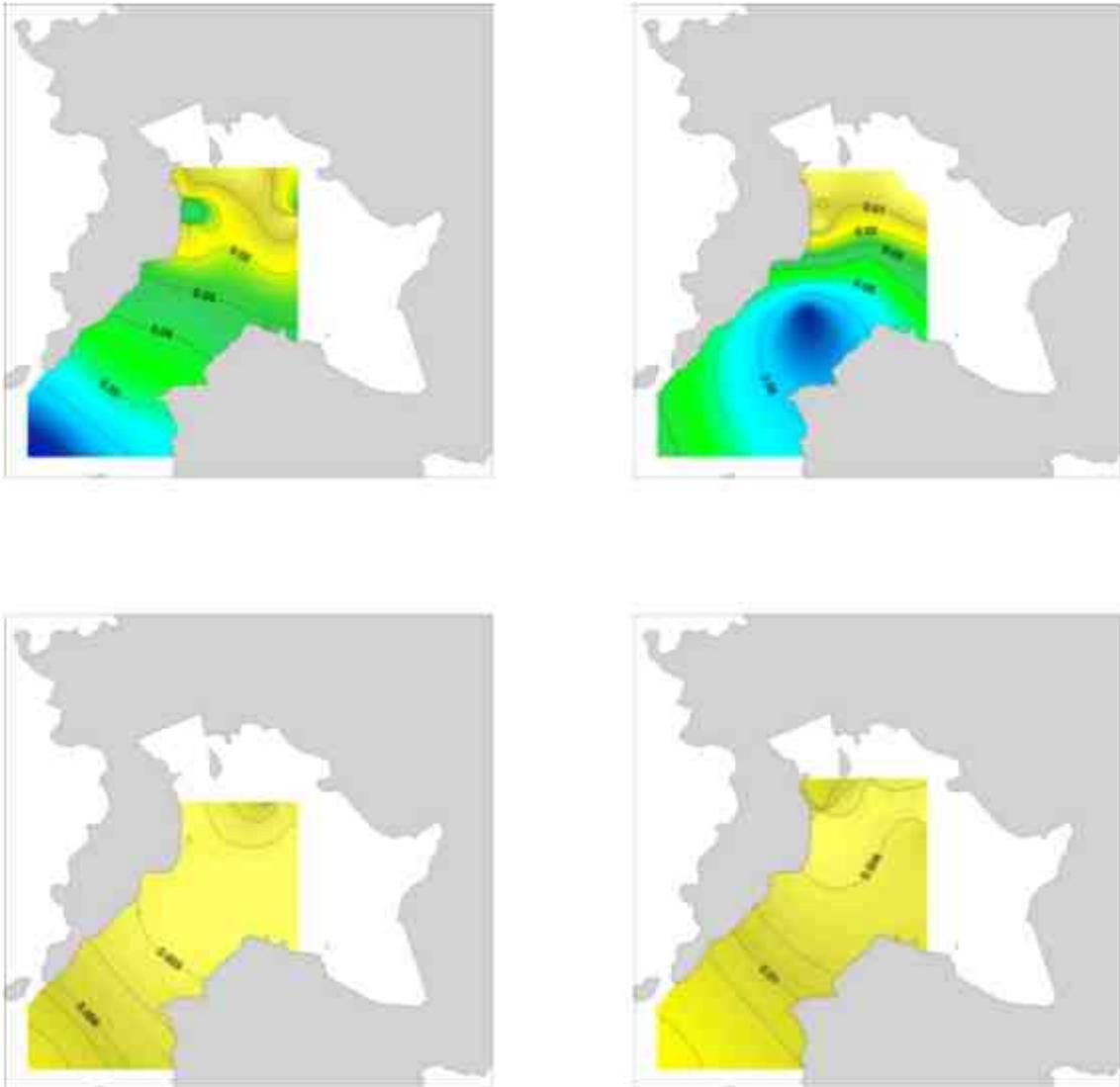


그림 6-12. 산취발성황화물(AVS, mg/g-dry)의 월별 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)

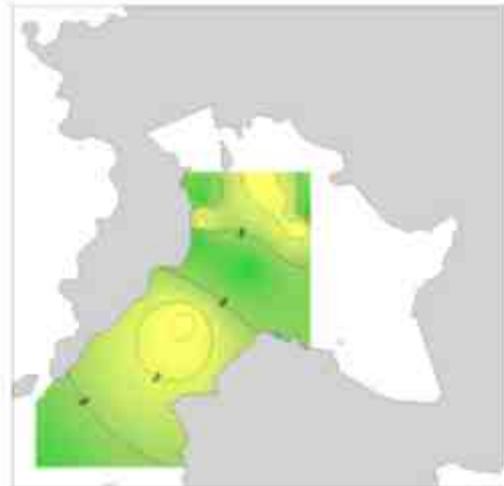
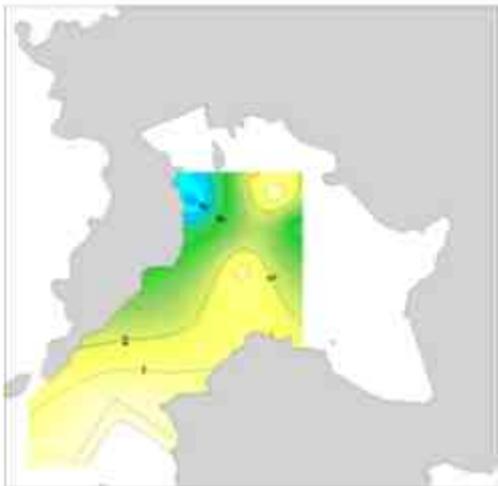
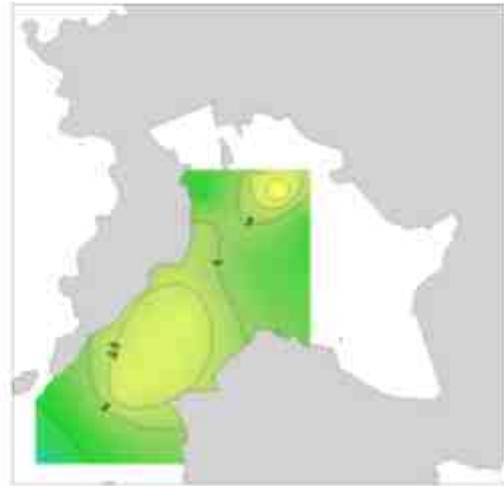
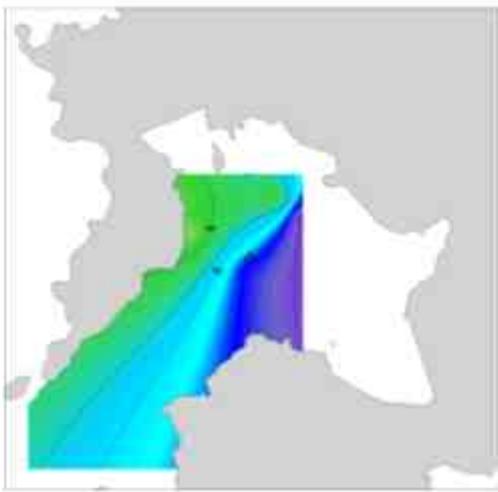


그림 6-13. 화학적 산소요구량(COD, mg/g-dry)의 월별 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)

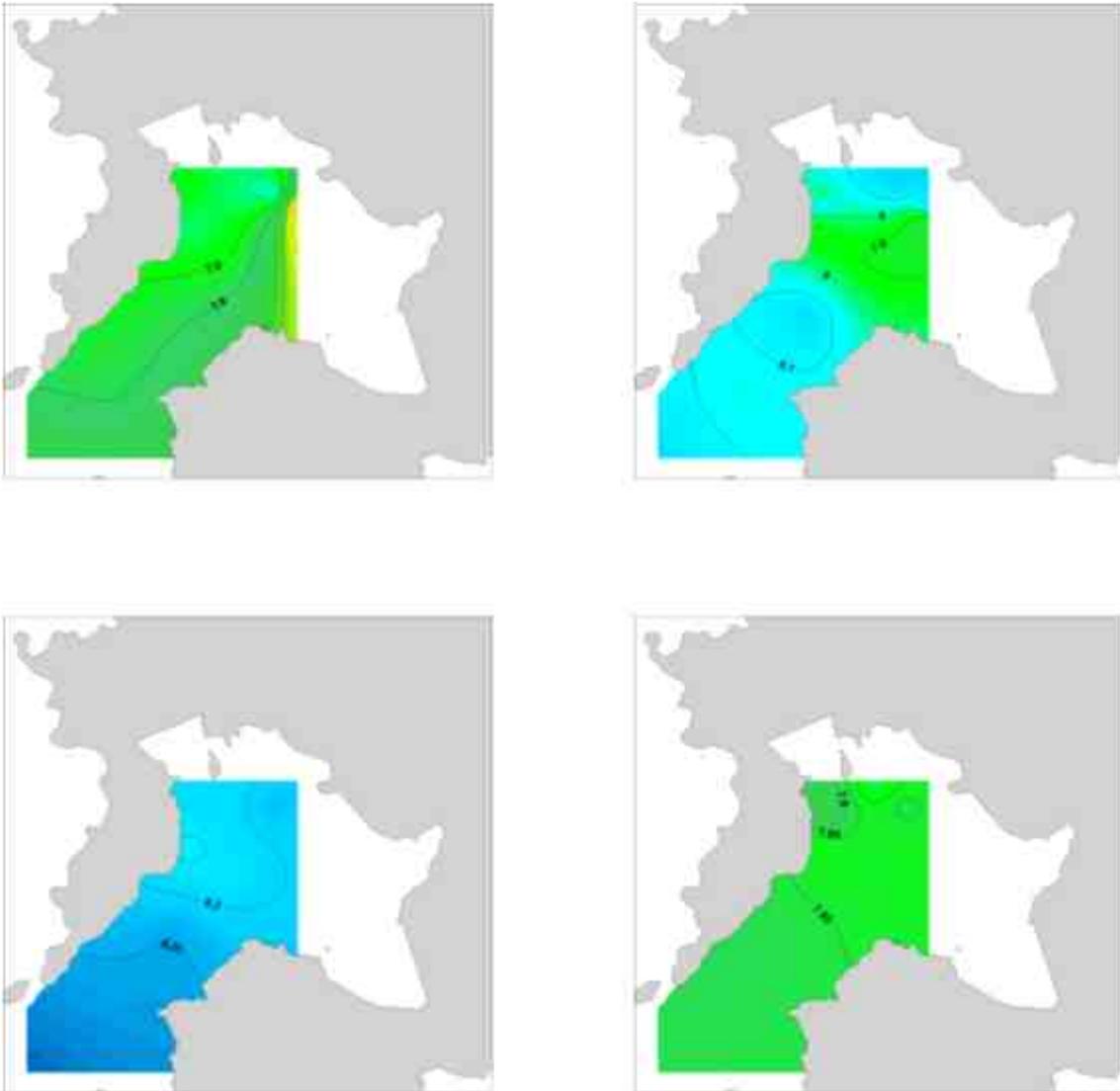


그림 6-14. pH의 월별 수평분포도. (좌상 : 9월, 우상 : 11월, 좌하 : 2월, 우하 : 4월)

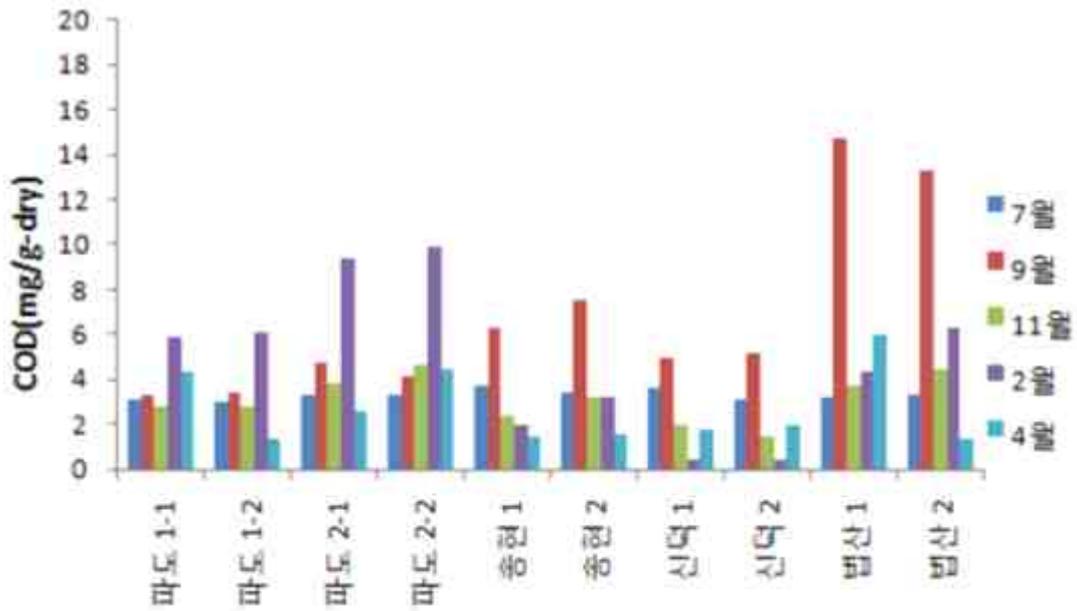


그림 6-15. 화학적 산소요구량(COD, mg/g-dry)의 정점별 분포도.

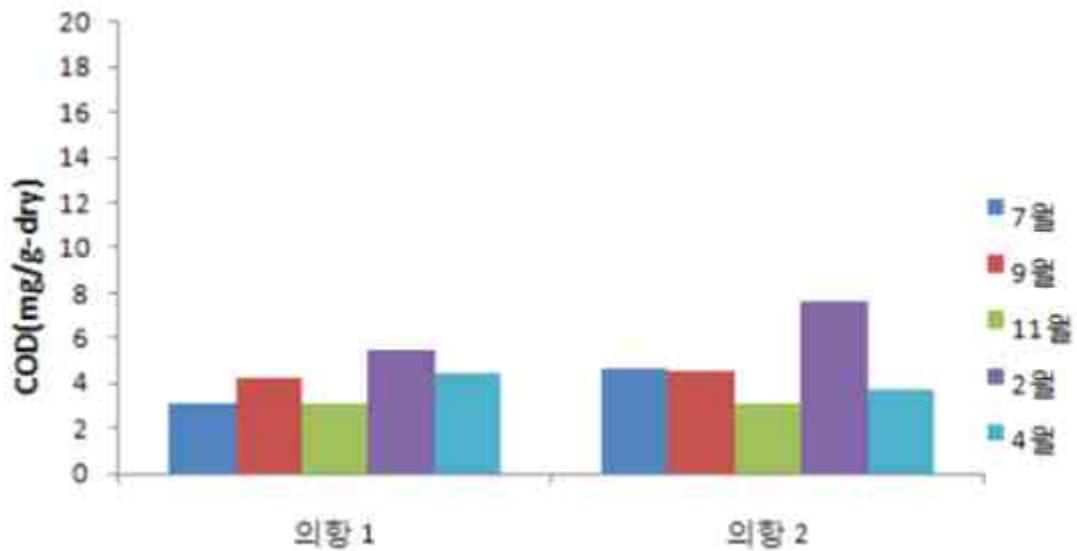


그림 6-16. 화학적 산소요구량(COD, mg/g-dry)의 대조구 정점별 분포도.

4. 소 결

해수 중 수소이온농도(pH)는 동계에서 상대적으로 높고 추계 낮은 농도를 나타내었으며, 층별로는 전 조사시기에서 표층과 저층에서 비슷한 농도를 보였다. 그리고 조사기간 동안 전 조사 해역에서 해역 수질기준 등급 Ⅰ을 보였다. 용존산소(DO)는 9월 조사시기를 제외한 모든 조사시기에서 해역수질기준 등급 Ⅰ의 수질을 나타내었다. 부유물질(SS) 농도범위는 2월에 가장 높은 농도를 보였고, 7월에 가장 낮은 농도를 보였다. 태안과 대조구의 부유물질의 평균 농도는 9월을 제외한 다른 월별에서는 대조구에서 높은 농도를 나타내었다. 화학적 산소요구량(COD)은 조사시기별로 2월에 가장 낮은 농도를 나타내었으며 4월에 가장 높은 농도범위를 나타내면서 해역수질기준의 Ⅰ~Ⅲ 등급을 나타내었으며, 대조구는 Ⅲ 등급을 나타내었다. 용존무기질소(DIN)는 조사시기별로 4월에 가장 높은 농도를 9월에 가장 낮은 농도를 나타내었고, 용존무기인(DIP)은 조사시기중 4월에 용존무기질소와 달리 가장 낮은 농도를 나타내었고 층별로는 9월을 제외하고는 저층이 표층보다 상대적으로 높은 농도를 나타내었다. 총질소(TN)의 농도범위는 조사시기 중 9월이 가장 높은 농도를 나타내었고 표층이 저층 보다 높은 농도를 나타내었다. 전반적으로 0.3mg/L 에서 0.6mg/L 전후를 나타내어 해양환경수질기준 등급 Ⅱ~Ⅲ등급에 해당되는 수질을 나타내었다. 총인(TP)은 조사시기 중 9월 표층에서 농도범위가 상대적으로 가장 높은 농도범위를 나타내었으며, 대부분 조사해역에서 0.5mg/L 전후의 농도를 보이고 있어 해양환경수질기준 등급 Ⅱ~Ⅲ에 해당되는 수질을 나타내었다.

해양퇴적물 중 유기물 함량의 간접적 지표인 강열감량(IL)은 조사시기 중 9월에 가장 높은 농도범위를 보였으며, 모든 조사시기에 걸쳐 대조구에서 다소 높은 농도를 나타내었다. 산취발성황화물(AVS)은 조사시기 중 9월에 상대적으로 가장 높은 농도분포를, 2월에 상대적으로 가장 낮은 분포범위와 평균값을 나타내었다. 그리고 해양퇴적물의 수산용수기준치인 0.2 mg/g-dry 이하의 농도를 나타내었다. 화학적산소요구량(COD)은 조사시기 중 11월에 가장 높은 농도범위와 평균값을 나타내었으며, 전 조사시기에서 농도범위는 퇴적물의 부영양화와 저질의 수산용수 기준치를 나타내는 기준치인 20 mg/g-dry(일본수산자원보호협회편, 1998, 2000) 이하의 농도를 나타내었다.

퇴적물의 pH 분포범위와 평균값을 보면, 7월에는 7.64~7.89(평균 7.76)를 나

타내었고, 9월에는 7.20~8.10(평균 7.84)을 나타내었고, 11월 7.83~8.19(평균 8.06)를 나타내었으며, 2월 8.12~8.31(평균8.21)를 나타내었고, 4월 7.65~7.99(평균 7.85)를 나타내었다.

일반적으로 해수의 pH에 따른 수질 및 저질 환경 변화와 해산생물의 생존과의 관계는 계절적인 영향을 받는 경우가 많으나, 본 연구지역의 퇴적물의 pH의 최저 수치를 보면 저질환경이 매우 악화된 상태로 파악되었으며, “pH에 따른 수질 및 저질 환경 변화와 해산생물의 생존과의 관계”는 <표 6-3>과 같이 정리 할 수 있다.

<표 6-3> 해수의 pH에 따른 수질 및 저질 환경 변화와 해산생물의 생존과의 관계도

<p>해수 pH 7.7~8.5에서 유용수산 생물이 잘 성장할 수 있음.</p> <p>해산생물의 생존한계 상한선 해산생물의 성장양호 상한선</p> <p>해산생물의 성장양호 하한선</p> <p>유용패류의 생존한계 하한선 황산염환원세균의 최적증식 상한선</p> <p>pH 7.00~7.60 = 혐기층(嫌忌層) 이동성 수중동물은 수중의 산소량이 부족해지면 도피하게 됨.</p> <p>해산생물의 생존한계 하한선</p> <p>pH가 7.0 이하로 낮아지면 魚類, 貝類 및 藻類가 全滅</p> <p>황산염환원세균의 최적증식 하한선</p> <p>해수 pH 7.60 이하에서는 유용패류는 살 수 없게 됨.</p>	<p>pH</p> <p>◆ pH 9.0 이상의 강알칼리성 환경으로 상승하는 원인이 강알칼리성 무기물질일 때; 저질 표면에 백화현상 생김(물; 청수현상).</p> <p>9.00</p> <p>8.50</p> <p>7.70 pH 7.70 이하 ⇒ 불가사리, 종말 및 민챙이 등이 산성저질에서 많이 번성함</p> <p>7.60 pH 7.60 이하 ⇒ 유용패류 전부폐사 저질에서 황화수소(H₂S)의 대량 발생 시작 pH 7.60 이하의 해수에서도 H₂S가 발생함.</p> <p>pH 7.0~7.60의 저질은 검은 색으로 변함.</p> <p>pH 7.60 이하에서는 저질로부터 N, P, Fe, Mn 등의 무기물질과 아민, 아미노산 등 유기물질의 용출이 많아져서 수질을 착색 오염시킴.</p> <p>7.00 pH 6.5~7.0 ⇒ 청조발생(물은 청수현상) 황화수소(H₂S)의 未解離로 강독성 발현. pH 7.0 이하의 물과 저질에서는 악취가 나고, 저질의 색은 심하게 검어짐.</p> <p>6.50 pH 6.50 이하에서는 세균을 비롯한 모든 수중생물이 생존할 수 없게 됨.</p> <p>◆ pH 7.0 이하의 산성 저질로 저하하는 원인이 강산성 무기물질일 때. 저질표면에 백화현상 발생(물은 청수현상).</p>
---	---

제 7장. 유류 및 중금속 분석

1. 조사의 배경 및 목적

전 세계적으로 매년 바다에 유출되는 기름은 약 250만 톤으로 추정되며, 이 가운데 유조선 사고로 인한 유출량은 평균 12만 톤/년인 것으로 알려져 있다. 우리나라에서도 최근 해상 유류오염사고가 급증하고 있는 추세이며 이로 인한 해양 생태계 및 어업활동의 피해는 엄청난 수준에 이르고 있다. 특히, 지난 1995년에는 전남 여수·여천 앞바다에서 호유해운 소속의 시프린스호 및 호남 사파이어호에 의한 해상 유류 유출사고가 발생한 바 있다.

2007년 12월 7일 오전 7시 30분 충남 태안군 만리포 북서방 5마일 해상에서 항해 중이던 흥공선적 14만6천 톤급 유조선 헤베이 스프리트호와 삼성중공업 소속 해상크레인을 적재한 1만1천800 톤급 부선이 충돌하면서 유조선 왼쪽 오일탱크 3개에 구멍이 나 1만5천 톤의 원유가 해양으로 유출됐다. 이번 사고는 인천대교 공사작업을 마친 해상크레인을 2척의 바지선을 이용, 경남 거제로 예인하던 중 한 척의 바지선 와이어가 끊어지면서 중심을 잃고 유조선과 충돌, 발생한 것으로 알려졌다.

이번 사고로 인한 원유 유출량은 국내 최악의 해양오염 사고였던 1995년 씨프린스호 사고 당시 원유와 연료유 5천35 톤이 유출됐던 것과 비교하면 3배 규모이다. 씨프린스호 사고는 1995년 7월 23일 전남 여수시 남면 소리도에서 유조선 씨프린스호(14만4천567 톤급)가 8만8천381 톤의 기름을 적재하고 운항 중 암초에 좌초되면서 원유 및 연료유 5천35 톤을 유출한 것이었다. 당시 사고로 여수 소리도에서 포항까지 230km, 부산 해역 해안 73km가 기름에 오염돼 어장과 양식장 피해가 443 억원에 달했고 기름 회수 작업도 다섯달 가까이나 걸렸다.

이상과 같은 일련의 해양 유류 오염사고는 누출된 기름 자체는 물론 이의 방제를 위해 대량으로 살포되는 유화제로 인하여 주변 생태계에 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 특히, 유류에 포함된 PAHs 등과 같은 독성성분들은 생체에 축적되기 쉽고 강한 독성을 유발하기 때문에 이들이 환경 내에 장기적으로 잔존하게 될 경우 생물체에 치명적인 영향을 미칠 수 있다.

본 연구의 일차적인 관심은 헤베이 스프리트호 사고 발생 후 약 3년이 경과된

사고해역 인근 태안의 신덕, 법산, 송현, 파도, 학암 등 총 5개 어촌계의 저질에 잔류하고 있는 타르 유래의 유해물질인 16PAHs 및 중금속을 분석하는데 있다(그림 7-1).

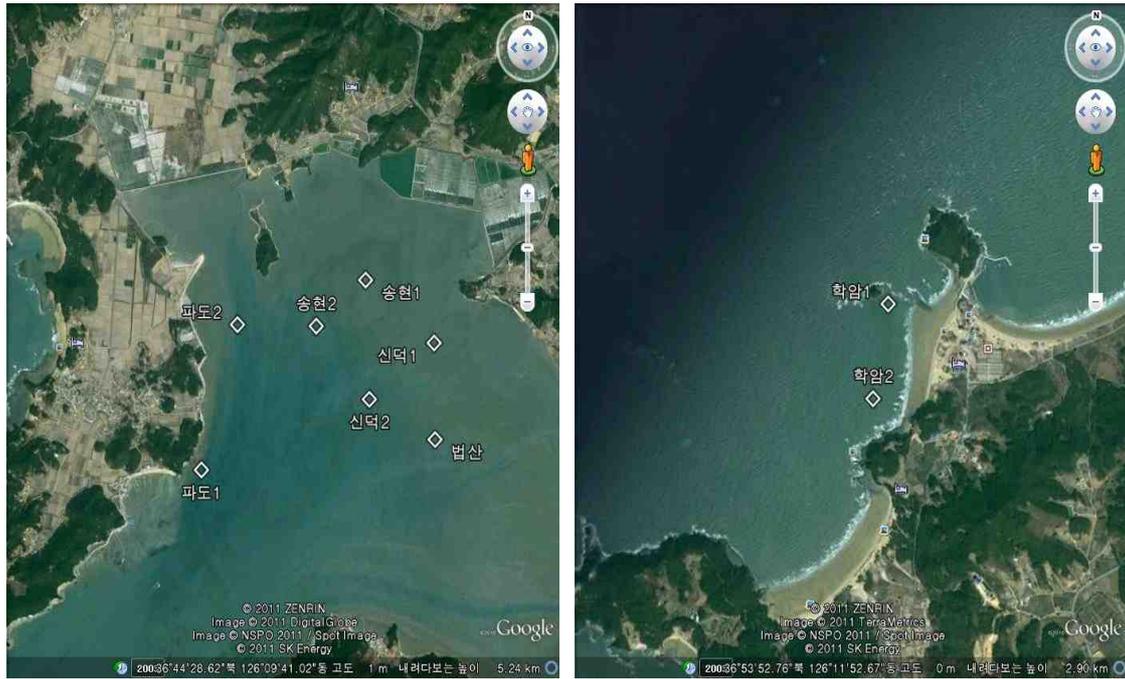


그림 7-1. 분석시료 채취지점.

2. 해양에서 석유의 변화 및 분해

해양에 유출한 석유의 초기단계에서 변화는 해면에서의 급격한 수평확산과 그 확산에 의해 촉진된 휘발성분의 증발 및 저비점성분의 해수중으로 용해이다. 이들의 변화에 의해 잔류중의 고비점성분량은 상대적으로 증가하여 점성이 확대한다. 이 단계에서는 파랑의 교반효과에 의해 석유와 해수가 혼합되어 기름-물 또는 물-기름의 에멀전을 형성한다. 한편, 해면을 표류하는 에멀전 또는 석유입자는 점토 황물이나 부유생물의 잔해파편등에 부착되어 해수보다 비중이 큰 응집입자를 형성하여 해면 밑에 침강한다.

이상의 과정에 있어서, 확산, 침강 등에 의한 물리작용과 관련하여 해양에 유출한 석유성분은 현저한 화학적 성상변화를 받는다는 것이 알려져 있다.

해면에 있어서 유출석유의 변화과정을 개괄한다면, 유출초기에 있어서 비교적 급격한 물리·화학적변화가 일어남에도 불구하고 최종적으로 분해하여 소멸하기까지 상당한 시간을 필요로 한다. 이것은 초기변화후의 잔류성분이 화학적으로 안정하기도 하지만, 분해의 촉진이 미생물의 활성에 의존하기 때문이다.

유출석유의 변화과정을 반응론적으로 본다면, 석유중의 탄화수소 중 촉매가 있는 파라핀 및 방향탄화수소는 용이하게 산화(atmospheric oxidation)되어 촉매가 존재하지 않더라도 유리기에서 자동산화가 연속적으로 진행된다. 하지만, 이 산화반응은 알킬퍼옥시기에 의한 탄화수소로부터 수소원자의 방출비율에 의해 제약을 받는다. 제3급의 C-H결합은 제1급 또는 제2급 C-H결합보다 약하므로, 제3급의 수소를 갖는 탄화수소(예로 이소알칸)는 가장 용이하게 산화된다. 테트라인이나 크멘과 같은 탄화수소는 그 알킬기가 공조안정화되어있지만 비교적 빨리 산화된다(Berridge et al., 1968).

이렇게 단순한 산화기구도 일광에 의한 광산화가 일어나는 것에 의해 또한 석유에 포함된 많은 금속이온에 의한 촉매작용 또는 조해작용에 의해 복잡한 기구가 된다. 바나듐과 같은 변가금속의 이온은 특히 액상에서 산화의 강력한 촉매가 되지만, 유황화합물은 설펍시드를 생성하므로 산화를 조해한다(Zobell, 1963).

이들 산화에 의해 생성하는 산, 알보닐화합물, 알콜, 과산화물, 설펍시드 등은 모두 수용성이어서 수중에서 용해한다. 동일하게 바나질포르피린과 과산화물과의 반응에서 생성하는 바나듐염과 같이 수용성금속염이 생성하면 석유로부터 금속이 소실된다(Beach & Shewmaker, 1966).

이들 산화반응이 계속적으로 진행하기 위해서는 적정반응속도가 부여되는 조건이어야 한다. 해수 1L 중에 8mg의 산소가 포함되면, 1ml 석유의 산화에 필요한 산소를 공급하기위해 4×10^5 L의 해수가 필요하다.

이상과 같이 반응이 복잡하고 석유조성의 경시변화에 의해 해면상에서의 석유의 산화비율은 큰 범위로 영향을 받는다고 말할 수 있다.

2.1. 석유의 확산

석유의 확산은 해양에서 석유의 최초변화로서 중요하다.

해양에서 석유확산은 상식적으로 풍향, 풍속, 파랑, 해류, 해안 및 해저지형등에 영향을 받고, 또한 석유의 종류, 유출조건등에 의해 차이를 나타낸다. 따라서, 유출유의 확산은 반드시 일정한 상태로 진행하는 것은 아니다.

소량의 석유가 수면에 유출된다면, 바깥쪽을 향해 확산하고 점성에 의해 제한을 받아 어떤 크기의 원형이 되어 안정한다. 석유의 유출로부터 그 단계까지를 초기확산이라 한다.

또한 대량의 석유가 해면에 유출한 경우, 초기의 중력불안정에 의해 큰 면적의 펼쳐짐은 아니지만, 급속한 확산이 예상된다. 하지만, 띠모양으로 표류하는 석유괴로부터 생기는 팻치는 꽤 장시간에 걸쳐 안정성이 있어 Torrey Canyon호 사건에서는 20일이상도 추적관찰되었다(Cooper, 1968). 이러한 팻치의 안정성은 석유의 종류나 유출량 및 해수와의 접촉에 의해 생기는 기름-물 또는 물-기름 등 에멀전 조성에 의해 차이가 있다(Berridge et al., 1968).

해면에 유출한 석유는 왕복운동으로서의 조류성분을 제외한 항류와 바람에 의해 생기는 표층류를 합하여 결정된다. 석유는 해면에 있어서 풍속의 3.4%~4.2%의 속도로 풍향과 같은 방향으로 이동한다고 알려져있다.

2.2. 석유성분의 용해

$C_1 \sim C_{10}$ 의 n-파라핀의 용해도에 대해서는 오랫동안 다수의 연구가 있어 (Claussen & Polglase, 1952; Morrison, 1952; Mcauliffe, 1966, 1969), 용해도의 대수는 n-파라핀의 탄소수 증가에 의해 직선적으로 저하하는 것이 알려져있다 (Hodgman, 1948). 또한 $C_{10} \sim C_{25}$ 의 n-파라핀은 담수에 대해서 $10^{-4} \sim 10^{-8} g \cdot m^{-3}$ 용해하여, C_{37} 이상이 되면 담수에 대해 $10^{-14} g \cdot m^{-3}$ 밖에 용해되지 않는다(Parkerr et

al., 1971). 따라서, 고비점유분의 탄화수소 용해도는 극히 작다고 생각되지만, 엄밀한 용해도에 대해서는 거의 알려진바 없다.

n-파라핀의 용해도는 이온강도가 다른 용매에 대해 각각 차이가 있어 담수와 해수에서의 용해도는 차이가 있다. 즉 C₁₂~C₂₆의 파라핀은 탄소수의 증가에 의해 또한 담수보다 해수에 있어서 용해도는 저하하는 경향이 확인되었다(Sutton & Calder, 1974).

해수중에 있어서 탄화수소의 농도와 해수에 대한 용해도를 비교하면 반드시 해수에 대한 용해도가 해수중의 탄화수소량을 한정하지 않게끔 생각된다. 해수중에 용해하고 있는 많은 종류의 탄화수소 용해도는 각각의 탄화수소 용해도는 아니므로 많은 종류의 탄화수소를 포함하는 해수에 있어서 각각의 탄화수소의 용해도를 구할 경우 이 점에 유의할 필요가 있다.

이상과 같이 n-파라핀의 용해도는 담수보다도 해수가 작지만, 이것은 수권에 있어서 n-파라핀의 거동에 중요한 의미를 가지고 있다. 예로, n-파라핀이 포화하고 있는 하천수가 해수에 유입하는 경우, 내만 또는 하구부근에서 염석의 현상에 의해 용해된 파라핀의 일부는 석출한다는 것을 시사한다. 석출한 n-파라핀은 수면으로 부상하여 용해상태와는 완전히 다른 조건에 의해 변화한다고 생각된다.

2.3. 석유의 침강

해수보다도 비중이 작은 유적 또는 유분이 해저에 침강하기 위해서는 이들 유적과 해수중의 현탁입자와의 사이에 1 μ m이하의 미립자가 압도적으로 많고 10³~10⁵개/ml로 분포한다. 이들의 현탁입자는 해수중에서 단독으로 분포하는 것만이 아니고, 입자상호가 응집하여 대형입자가 된 것도 많다.

해수중에 존재하는 현탁입자는 주로 플랑크톤의 사해파편 또는 점토물 등이 있어, 그 입경범위는 극히 넓고 따라서 침강속도에도 현저한 차이가 있다고 생각된다.

점토물로서 몬모리로나이트를 선택해 0mg부터 39.95mg까지를 800ml의 해수를 더해 원유를 일정량(약 40mg) 넣어 약 10분간 섞어 정치하여 침전물중의 원유량을 정량하였을 때와 800ml의 해수에 약 40mg의 몬모리로나이트를 넣어 4.25mg~29.52mg의 원유를 넣어 약 10분간 섞어 정치하여 침전물중의 원유량을 정량한 결과, 정량치에 다소의 변동이 보이지만, 전반적인 경향으로서 원유농도 및

몬모리오나이트 농도가 높은 경우에는 응집부착하여 침강하는 원유량은 많아지고, 역으로 원유첨가량의 저하에 따라 원유침강량은 급격히 감소하였다. 따라서 몬모리오나이트와 같은 점토물입자의 개재에 의해 유적의 흡착응집이 촉진되어 연직방향으로의 분산가능성이 있었다.

해수중의 석유침강량에 대해서는 가장 흥미있는 문제가 있지만, 유분유출시의 해면상태, 수온, 염분에 의한 해역의 밀도구조, 천연의 현탁입자의 상태, 해류 또는 과동확산계수등 많은 인자의 제약을 받아 양론적 일반화는 곤란하다.

2.4. 풍화에 의한 석유의 성상변화

해면에 유출한 석유는 파랑이나 풍우에 의한 풍화작용으로 화학적 또는 물리적 영향을 받아, 그 과정에서 석유중의 휘발성분이 증발함과 동시에 잔류는 산화되어 중합하기 때문에 일반적으로 잔류의 밀도가 높게 된다(Brunnock et al., 1968). 그러므로 해면을 표류하는 석유의 비중이나 점도는 유출전의 석유와 비교해 높다. 또한, 이렇게 변질한 석유에 의한 오염물로부터 회수유의 비중이나 점도도 유출전의 석유와 비교해 현저히 변화한다.

오염물로부터 회수유의 비중이나 점도증가의 이유가 주로 증발에 의한 것인 경우, 회수유와 석유의 증류잔유 각각을 기성상과 비교해 풍화전의 석유성상을 관찰하는 것이 가능하다(Duckworth, 1971).

이상과 같이 해면에 있어서 유출전의 성상은 반드시 유출이전과는 같지 않지만, 과거에 있어서 석유에 의한 해양오염의 상세한 조사가 적고, 해양에 유출한 전후의 석유성분의 상호관계도 충분히 판명하지 않았으므로, 석유의 종류 또는 유출후의 경과시간등의 정확한 판단이 곤란했다. 하지만, Torrey Canyon호 사건을 계기로 유출유가 받는 풍화의 영향 및 풍화와 함께하는 기성상의 변화등 연구가 진행되었다(Duckworth, 1971; Ehrhardt & Phillips, 1975). 오염검체중의 석유계화합물 중 n-파라핀의 검출은 오염판정에 적합하다(Brunnock et al., 1968).

2.5. 풍화석유 및 증류잔유의 성상

Torrey Canyon호 사건후에 채취한 각종 검체로부터 회수유의 성상에 있어서, 시료 TC/1은 아스팔트함량을 제외한 그 외의 성상은 210℃에서, 쿠웨이트원유를 증류하여 얻어진 잔류의 성상과 극히 잘 일치하고 있다. 이것은 원유의 약 25%가

증발에 의해 손실된 것을 시사한다.

2.6. 바나듐 및 니켈

석유중의 바나듐 및 니켈은 석유의 풍화에 따fms 증발손실에 의해 상대적인 증가가 확인된다. 검체유중의 바나듐 및 니켈량은 일정값이 되지않았으나, 각종 원유를 371℃로 증류하여 잔류의 바나듐량과 니켈량을 증류전의 원유와 비교하면 약 2배로 되었다(Brunnock et al., 1968). 따라서, 바나듐 및 니켈로 판명된 석유가 풍화한 경우, 풍화유의 바나듐 및 니켈을 정량하여 그 석유의 증발손실, 즉 풍화정도의 관찰이 가능하다.

하지만, 성상이 확실치 않은 석유가 풍화한 경우, 특히 해양에서의 표류유 또는 해안표착유등에 대해서 바나듐 및 니켈을 정량하여도 정량값은 일정하지 않다. 이렇게 바나듐 및 니켈이 일정하지 않은 이유는 유출유가 동종류더라도 해양에 있어서 풍화조건에 차이가 있기 때문일 것이다.

2.7. 아스팔트

바나듐 및 니켈과 유사하게 석유가 해양을 표류하는 초기단계에 있어서 증발하여 유실함과 동시에 상대적으로 아스팔트가 증가한다. 그러므로 석유의 풍화에 따른 아스팔트의 증가는 석유중의 증발량과 관련하여 증발이 많은 연료유에서는 증발이 적은 원유나 원유슬러지 등과 비교해 풍화에 의한 아스팔트량의 증가경향이 현저하다.

석유의 풍화과정에 있어서 아스팔트의 증가는 시간과 어느정도 관련하지만, 산지별 각종원유에 대해서 검토된 결과에 따르면, 풍화전의 아스팔트의 약 2배가 된다면 풍화시간이 연장되어도 그 이상으로 증가하지 않는다(Brunnock et al., 1968).

2.8. 유황

석유중의 유황은 풍화작용에 의해 노출전과 비교해 증가한다. 하지만, Torrey Canyon호 사건조사결과에서는 쿠웨이트원유를 210℃에서 증류하여 얻어진 잔류유황은 타검체 회수유의 유황보다 많고, 또한 또한 타검체 원유의 유황보다 적었다. 이 결과에 의하면, 바나듐 및 니켈, 아스팔트 등이 모두 원유의 함량보다 많

다는 결과와 달리, 유황화합물의 일부는 석유의 풍화과정에 있어서 어느 정도량이 손실되었다고 판단된다.

쿠웨이트원유를 371℃로 증류하여 얻어진 잔류의 유황도 오염검체로부터 회수유를 371℃로 증류하여 얻어진 잔류의 유황과 비교해 많다. 예로, 특정시료의 유황은 3.13%이지만, 이 검체의 회수유를 371℃로 증류한 잔류중의 유황은 3.88%이어서, 쿠웨이트원유를 371℃로 증류한 잔류의 유황 4.16%와 비교하면 적다. 이 결과에 따르면, 시료에서는 석유의 풍화과정에서 유황화합물의 일부는 손실되지만, 시료중에는 노출시간의 연장에 의해 손실되는 유황의 잔존이 시사되었다.

석유의 풍화에 따른 유황의 변화와 석유 점도와의 관계는 석유중의 유황증가와 함께 석유의 점도상승의 경향이 확인된다(Brunnock et al., 1968). 또한 쿠웨이트원유를 371℃에서 증류하여 얻어진 잔류와 오염검체로부터의 회수유를 371℃에서 증류하여 얻어진 잔류에 대해서 동일한 유황함량으로 점도를 비교하면 회수유의 증류잔유가 원유의 증류잔유보다 높다. 이 이유는 확실하지 않지만 쿠웨이트원유의 풍화과정에서 점도상승에 기여하는 인자의 생성, 또는 유황이외의 점도에 관계하는 성분의 증가등이 원인이 된다는 것도 고려된다.

2.9. n-파라핀

해수, 저질등의 석유오염지표로서 오염검체의 회수유로부터 n-파라핀을 가스크로마토그래피 등에 의해 검출하지만, n-파라핀이 석유에 의한 오염지표라고 하는 이유는 자연계에서의 분포가 한정되는 점 및 풍화작용에 대한 안정성 등 이다.

하지만, 적어도 해양유출직후부터 석유중의 저비점유분에 속하는 n-파라핀은 해수중에 용해되거나 증발에 의해 유실되므로, 석유에 의한 오염지표로서 C₂₄이상의 n-파라핀에 대한 검출이 필요하다.

Torrey Canyon호 사건 후, 오염검체로부터 회수유 및 쿠웨이트원유에 대해서 각각 371℃에서 증류잔유중의 n-파라핀을 가스크로마토그래피에 의해 검출한 결과(Brunnock et al., 1968), 각 시료에서 C₂₆이상의 n-파라핀 함량은 극히 잘 일치하고, 쿠웨이트 원유가 추정오염원인이라는 근거를 제시되었다.

풍화작용에 의해 손실되는 증발 및 용해를 고려하면 오염원인이 되는 석유의 종류를 추정하는 경우, 오염검체로부터의 회수유 및 대조가 되는 석유에 대해서 각각 343℃로 증류하여 얻어진 잔류의 성상을 비교한다. 또한 현저히 풍화작용을

받고있는 오염검체의 회수유는 371℃에서 증류하여 잔류에 대해 검토할 필요가 있다.

각종 원유를 343℃에서 증류하여 얻어진 잔류의 n-파라핀의 함량에서 쿠웨이트원유와 나이지리아원유 그리고 리비아원유와 나이지리아원유는 각각 n-파라핀함량이 비슷하다(Brunnock et al., 1968). 그 외, 사우디아라비아, 베네수엘라 등 27 종류의 원유에 대해서 n-파라핀함량별로 9그룹으로 분류된다.

쿠웨이트원유와 나이지리아원유, 리비아원유와 나이지리아원유에 대해서, 각각 343℃에서 증류잔류중의 n-파라핀함량을 탄소수별로 분류하면, 쿠웨이트원유와 나이지리아원유는 동일그룹에 속하고, 양쪽의 n-파라핀함량은 거의 유사하다(Brunnock et al., 1968). 또한, 리비아원유와 나이지리아원유도 유사하다. 하지만, 탄소수별로 n-파라핀함량을 비교하면 C₁₉~C₂₅는 쿠웨이트원유가 나이지리아원유보다 많고, C₂₆~C₃₄는 역으로 나이지리아원유가 쿠웨이트원유보다 많다. C₃₄~C₃₉는 양자모두 거의 같은 정도이다. 한편, 리비아원유와 나이지리아원유와의 비교에서는 C₁₉~C₂₇ 및 C₃₄~C₃₉는 리비아원유가 나이지리아원유보다 많고, C₂₇~C₃₄는 나이지리아원유가 리비아원유보다 많다.

이상과 같이 동일그룹으로 분류되어 343℃에서의 증류잔유의 n-파라핀함량이 거의 같은 각종 원유에서도 탄소수별 n-파라핀함량에 각각 차이가 있으므로 석유에 의한 오염검체로부터의 회수유에 대해 n-파라핀의 조성비를 구해 성상을 판명하는 원유와의 비교에 의해 오염의 원인인 석유의 추정이 가능하다.

해수 또는 저질에서 얻어진 n-파라핀조성의 패턴은 환경의 석유오염 경과시간을 암시하는 경우가 있다. 즉, 기술한 것처럼 석유의 해양유출초기단계에서 n-파라핀조성중의 저비점유분은 해수중에 용해 또는 대기로 증발하기 때문에 풍화된 오염검체로부터의 회수유에는 저비점유분에 속하는 n-파라핀은 검출되지않고 역으로 석유오염 진행중의 환경 또는 석유오염후의 경과일수가 적은 환경으로부터의 회수유에는 탄소가 적은 n-파라핀이 검출된다.

일본의 중유유출사고 후, 해상보안청에 의해 시료가 수집되어 가스크로마토그래피에 의한 시험이 실시되어 유출원유와의 비교에 의해 유출후의 경시변성이 조사되었다. 유출원유 및 해면표류유를 가스크로마토그래피에 의해 검색한 n-파라핀조성을 비교해보면 각 크로마토그래피는 양쪽 모두 유사한 패턴을 나타냈다. 하지만, C₁₃ 및 C₁₄의 n-파라핀 피크는 해상유출 후 약 40일에 휘발유실하고, C₁₅는

해상유출후 천천히 휘발유실하였으나 42일후에도 검출되는등 차이가 확인되었다. 이 결과로부터 전반적인 n-파라핀조성의 경시변화는 적다고 간주되고, 이것은 유출유가 저비점유분의 비교적 적은 C중유였던 것에 기인한다고 생각된다.

한편, 연안환경요인이 다른 가리비양식해역의 저질에 대해서 n-파라핀조성을 가스크로마토그래피로 검색한 결과, 인구 10만 이상의 도시인근 해역저질에서는 C₁₂보다 C₁₄에서 명확한 n-파라핀 피크가 검출되어 도시폐수, 항행선박등으로부터 유출유분에 의한 계속적 오염이 관찰된다. 이 검체는 이취가 있고 검체로부터 유분의 추출과정에서 고비점유분에 속하는 탄화수소의 석출이 인정되었다.

한편, 인구밀도가 낮은 어촌의 저질에서 n-파라핀조성의 패턴은 C₁₈~ C₂₃에 상당하는 피크가 검출되었지만, 피크로부터 판단되는 함량은 극히 적고 특히 C₁₈ 및 C₁₉에 대해서는 흔적정도라고 판단된다. C₁₇이하 탄소수의 n-파라핀은 전혀 검출되지 않았고, 풍화에 의해 저비점유분은 분명히 소실하여 저질이 과거에 석유오염되었다하여도 그 후 진행되는 오염은 없다고 생각된다.

이상과 같이, 해양에 있어서 석유의 물리화학적 변화는 차후 규명되어야하고 세부적인 변화는 불명한 점이 많고 석유중의 다중탄화수소 및 구성분의 풍화에 의한 변화기구도 해명되지 않은 부분이 많다.

3. 유류유출이 해양생물에 미치는 독성물질

유류 유출사고에 의한 수산생물의 오염은 바닷물에 용해되는 기름, 분산된 유류의 작은 방울, 유류의 피막 등에 노출됨으로서 발생한다. 유류의 성분을 크게 분류하면 유류의 주성분인 포화 탄화수소(saturated hydrocarbon)와 방향족 탄화수소(Aromatic hydrocarbon)로 분류할 수 있다. 방향족 탄화수소는 유류 중의 다른 성분보다 물에 더 잘 용해되어 수산생물은 이들 물질의 체내 축적에 의하여 오염되기 쉽다. 포화 탄화수소는 같은 분자량의 방향족 탄화수소에 비하여 물에 잘 녹지 않으며 휘발성이 강하다. 또한 이들 성분은 냄새나 맛도 없어 식품 오염에 대한 영향이 적다(Heras et al, 1992). 따라서 기름유출에 의한 환경과 식품에 가장 큰 영향을 미치는 유류 성분은 방향족 탄화수소이다.

방향족 탄화수소는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자이렌 등과 같이 방향족 고리를 하나만 갖는 단일 방향족 탄화수소가 있으며, 나프탈렌, 플루오렌, 안트라센 등과 같이 벤젠 고리를 2-3개 갖는 작은 분자량의 다핵 방향족 탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)와 벤젠 고리를 4-6개 갖는 큰 분자량의 다핵 방향족 탄화수소(PAHs)가 있다(<표 7-1>). 단일 방향족 탄화수소와 작은 분자량의 다핵 방향족 탄화수소는 물에 용해되는 유류 성분의 99%에 해당한다. 따라서 단일 방향족 탄화수소와 작은 분자량을 갖는 다핵 방향족 탄화수소는 유류 오염에서 수산생물에 치명적인 영향을 주는 성분이며 또한 독성이 강하여 발암물질로 알려져 있다.

척추동물과 무척추동물은 석유 성분을 생체 대사과정 중에 생체 물질로 변환시킬 수 있는 효소(mixed function oxygenase, MFO)를 갖고 있는 것으로 알려져 있으며(Meador et al. 1995), 특히 어류는 이 효소를 이용하여 석유에 함유된 PAHs를 빠르고 효과적으로 생화학적 변환이나 대사산물로 변환시켜 최종적으로 담즙으로 배출시킨다(Varanasi et al. 1989). 이들 대사물질은 어류를 섭취하는 사람들의 건강에 위험을 초래하지 않는다. 반면, 패류를 포함한 무척추동물은 석유화합물을 느리고 비효율적으로 대사함으로서 이들의 생체 내에 다양한 분자량의 PAHs가 고농도로 축적되는 경향이 있다(Law and Hellou, 1999).

척추동물의 PAHs 대사과정 중 형성되는 물질은 화학적으로 아주 높은 반응성 때문에 몇 종의 PAHs는 발암성 물질로 알려져 있으므로 생물체의 물질대사 능력은 해산물 식품의 안정성에 중요하다(ATSDR, 1995; Hellou, 1996). 인간은 종종

패류와 같은 무척추동물을 모두 섭취하는데 이는 결과적으로 무척추동물의 장기에 축적된 모든 탄화수소를 섭취하는 것과 같다. 반면 다른 척추동물과 같이 어류는 석유의 탄화수소를 빠르고 효율적으로 대사하여 가식부인 근육에는 극히 적은 농도의 대사물질이 남아 있어 이를 섭취하는 사람들의 건강에 거의 해롭지 않은 것으로 알려져 있다. 그러나, 어류의 근육에 비해 높은 농도로 PAHs가 축적되어 있는 간이나 쓸개 등을 섭취할 경우는 건강에 해롭다 (Yender et al., 2002).

따라서 유류유출의 오염 정도와 생태계의 위험도를 측정하고 식품으로서 해산물의 안정성을 평가하는 방법으로 어업생물 및 해양퇴적물의 PAHs를 분석하고자 한다. PAHs를 분석하는데 가장 널리 사용되는 방법으로는 가스크로마토그래피에 질량분석기가 장착된 GC/MS 분석장비이다. GC/MS의 방법은 개별적 PAH의 낮은 농도까지 분석할 수 있으며 석유의 채취 장소에 따른 PAHs 패턴도 분석하여 석유의 산지도 확인할 수 있다.

최근 고도의 경제성장과 더불어 산업의 발달로 각종 공해가 발생하고 공장폐수 및 생활하수에 의해 하천 및 연안해수의 오염은 날이 갈수록 심해지고 있다. 이러한 연안해수의 오염은 어패류를 통해 우리의 식생활로 연결되어지고 결국 중금속이나 잔류농약 등 오염물질을 섭취하게 됨으로써 인체는 오염물질에 노출되고 건강에 악영향을 가져오게 된다.

산업발달에 따라 환경오염뿐만 아니라 식품에서의 중금속 오염위험도 증가되고 있다. 오염된 물, 토양, 대기로부터 식품으로 이행되기도 하고 식품의 수확, 저장, 제조, 가공 및 조리, 포장 중에 오염되기도 한다(Tanaka et al., 1992; Reilly, 1991). 중금속은 환경오염이나 식품오염으로 체내로 들어와 축적되며 그 흡수량은 식품 종류와 개인의 건강상태 등에 따라 달라진다(Reilly, 1991). 중금속 중 납, 카드뮴, 수은은 자체독성이 있으면서 축적성도 있어 중추신경 및 신장독성을 나타내 심각한 위해를 끼칠 우려가 있다. 우리나라는 1970년대 이후 중화학공업을 기반으로 고도의 경제성장을 이루면서 수많은 공업단지가 건설되었는데 특히 원료와 제품의 수송, 공업용수의 공급 및 폐수배출 등이 비교적 용이한 연안지역을 중심으로 공업단지가 조성되었다. 이들 공업단지에서 배출되는 매연, 분진과 산업폐수는 공업단지 주변의 생태계를 변화시킬 수 있다(이 광우 등, 1982; Michael & McIntosh, 1991). 더욱이 해양오염은 해안에 서식하는 생태계에 직접적인 영향을 끼칠 수 있으며, 생태계에 영향을 끼치지 않는 상태에서도 오염물질은 어류 및 패

류에 축적되어 먹이사슬을 통하여 인체에 큰 영향을 끼치게 된다. 중금속은 그간의 역사적 사례에서 경험했듯이 그 오염의 피해와 휴유증이 크고 다양한 장기독성과 함께 발암성, 최기형성, 태아치사성 등을 야기하며(Goyer, 1996) 미량으로도 큰 위해성을 초래할 수 있음으로서 주변환경에 대한 오염평가에 있어 지속적인 주요 감시 대상물질이 되어왔다. 각종 산업활동에 수반하여 수계로 유입된 중금속은 복잡한 물리화학적 과정에 의해 퇴적물중에 유입되거나 수중 유기체에 흡수, 축적된다. 중금속등의 오염물질에 대한 수계 오염평가를 위해서는 일차적으로 환경수와 퇴적물등에 대한 직접적인 물리화학적 분석이 이루어지기보다 내실있는 오염수준평가와 함께 오염물질의 축적성과 생체에 미치는 영향에 대한 구체적인 오염정보를 함께 얻을 수 있다는 장점들로 인해 근래 대상지역내에 서식하는 지표생물을 이용하여 오염평가를 수행하는 생물모니터링에 대한 관심이 증가하여 왔다(Smith et al., 1984; Sadiq et al., 1996; Sures et al., 1997).

주기율표에서 105개의 원소 중 80개가 금속이며 그 중 30개의 금속은 독성작용이 있는 것으로 알려져 있고, 다중적인 영향을 가진 주요 독성금속으로는 As, Cr, Be, Ni, Cd, Pb, Hg이 있으며 인체에 필수적인 금속이지만 과량 노출 시 위해를 입을 수 있는 가능성을 가진 금속은 Co, Cr(III), Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Se, Zn이 있고 의학적 치료와 관계된 금속들이 Al, Bi, Ga, Au, Li, Pt와 그와 관련된 금속들 그 밖의 minor toxic metals로 분류된다(Goyer et al., 2001). 한편, 위와 같은 중금속들이라 할지라도 정상적인 환경아래 있는 토양, 하천수, 바닷물, 야생식물, 채소류, 과일류, 곡류 및 각종 동물이나 인체에도 항상 극소량씩 존재하며 어느 정도의 정상농도를 유지하고 있다. 그러나 농약, 산업폐기물, 폐수 등에서 새로이 형성된 오염 중금속들은 주변 환경에 골고루 분산되지 않고 동식물체나 어패류에 집중 축적되는 소위 생물농축현상을 일반적으로 수반하게 된다. 결국 이와 같은 동식물체나 어패류에 사람이 섭취할 때 인체 내에 축적되어 일본의 카드뮴과 수은에 의한 이타이이타이병이나 미나마타병 같은 심각한 만성중독을 일으키게 된다(Kim, 1985). 최근 수산물 중에 함유되어 있는 미량의 중금속 오염여부가 안전한 수산물을 소비자에게 공급해야 한다는 관점에서 사회적인 문제로 대두되고 있다. 식품 중 금속오염은 식품의 수확, 가공, 포장과정에서 우발적으로 일어나기도 하지만, 대부분 오염된 물과 토양, 대기, 또는 공업폐수 등의 오염이 심한 지역에서 생산되는 농·수산물 등에서 일어나고 있다(Reily, 1991). 특히 중금속은 저농도

일지라도 인간에게 심각한 위해를 끼칠 우려가 있고, 나아가 산업적으로도 경제적인 손실을 초래할 수 있다. 연안해역의 오염도를 측정하는 방법에는 해수, 해저퇴적물 또는 해역에서 서식하는 생물을 이용하는 방법 등 크게 세가지로 구분할 수 있다. 해안의 오염유무를 판별하기 위해서는 연안의 오염현황을 조사하여야 하며, 오염방지 및 처리방안을 강구하기 위한 기초조사 연구가 필요하다.

미국에서는 1976년에 Massed Water Program이 시작되어 전국연안의 담치나 굴등을 오염지표생물로 이용하여 어패류중의 중금속, PCB, 초우라늄원소등에 대한 오염도를 측정해 오고 있다. Kawai 등(1984)은 해수와 플랑크톤의 중금속함량을 측정한 결과 해수에서의 중금속함량은 Hg<Cd<Pb<Cu, Cr<Ni<Zn<Mn<Fe 순이었으며, 플랑크톤 체내에서는 Ni과 Mn을 제외하고 Hg<Cd<Ni, Cr, Pb<Cu<Zn<Mn<Fe 순으로 해수중의 중금속농도와 일치한다고 보고하였다. 황 등(1993)은 자라만, 사랑도, 미륵도 일원의 해수와 패류에 대한 중금속함량 분석결과 두 해안지역에서 서식하는 어패류라도 종의 차이에 따라 중금속 간에 차이를 보일 수 있다고 하였다.

<표 7-1> 방향족 탄화수소의 이름과 벤젠 고리수에 따른 분자량(Sauer와 Boebm, 1995에서 인용)

PAHs	약자	벤젠 고리수	분자량
Naphthalene	N	2	Low
C1Naphthalene	N1	2	Low
C2Naphthalene	N2	2	Low
C3Naphthalene	N3	2	Low
C4Naphthalene	N4	2	Low
Biphenyl	BI	2	Low
Fluorene	F	2	Low
C1Fluorene	F1	2	Low
C2Fluorene	F2	2	Low
C3Fluorene	F3	2	Low
Acenaphthylene	AC	3	Low
Acenaphthene	CE	3	Low
Dibenzothiophene	D	3	Low
C3Dibenzothiophene	D3	3	Low
Anthracene	A	3	Low
Phenanthrene	P	3	Low
C1Phenanthrene/Anthracene	P/A1	3	Low
C2Phenanthrene/Anthracene	P/A2	3	Low
C3Phenanthrene/Anthracene	P/A3	3	Low
Napththobenzothiophene	NBT	3	Low
C1Napththobenzothiophene	NBT1	3	Low
C3Napththobenzothiophene	NBT3	3	Low
Fluoranthene	FL	4	High
Pyrene	PY	4	High
C1Pyrene	PY1	4	High
C2Pyrene	PY2	4	High
Benzo[a]Anthracene	BA	4	High
Chrysene	C	4	High
C1Chrysene	C1	4	High
C2Chrysene	C2	4	High
C3Chrysene	C3	4	High
C4Chrysene	C4	4	High
Benzo[b]Fluoranthene	BB	5	High
Benzo[k]Fluoranthene	BK	5	High
Benzo[e]Pyrene	BEP	5	High
Benzo[a]Pyrene	BAP	5	High
Dibenzo[a,h]anthracene	DA	5	High
Indeno[1,2,3-cd]Pyrene	IP	6	High
Benzo[g,h,i]perylene	DP	6	High

4. 환경개선 방법별 대상어장의 PAHs 및 중금속 분석

어업생물에서 분석한 PAHs 화합물은 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency, EPA)에서 우선적 오염물질로 선정된 16개 PAHs 화합물로서 분자량 128의 저분자량 PAHs 화합물인 Naphthalene(Nap), Acenaphthylene(Acpy), Acenaphthene(Acp), Fluorene(Flu), Phenanthrene(Pha), Anthracene(Ant), Fluoranthene(Flua), Pyrene(Pyr), Chrysene(Chr), Benzo[a]anthracene(BaA), Benzo[b]fluoranthene(BbF), Benzo[k]fluoranthene(BkF), Benzo[a]pyrene(BaP), Indeno[1,2,3-CD]pyrene(InP), Dibenz[a,h]anthracene(BahA)과 분자량 276인 고분자량 PAHs 화합물인 Benzo[g,h,i]perylene(BghP)을 대상으로 하였다(그림 7-2). 16 PAHs의 물리화학적 특징을 <표 7-2>에 표시하였다.

4.1. 시료채취방법 및 보관

조사 대상 지역은 헤베이 스프리트호 사고해역 인근 태안의 신덕, 법산, 송현, 파도, 학암 등 총 5개 어촌계의 저질을 대상으로 했다.

조사대상해역의 어업생물에서 PAHs 화합물 및 중금속 분석을 위한 시료는 채집 즉시 미리 준비한 시료 용기에 넣은 후 드라이아이스로 냉동 보관 하여 실험실에 옮긴 후 즉시 -85°C 심온동결고에 냉동 보관하면서 분석하였다. 시료를 담기 위한 용기는 경질유리병으로 현장 채취 전 실험실에서 증류수와 순수이온수로 세척한 후, 잠재적 오염을 막기 위해 실험실에서 강열화로에서 약 400°C 에서 3시간 이상 가열하여 준비하였다. 시료채취는 태안지역 각 어촌계의 저질을 대상으로 채취하였다(그림 7-1).

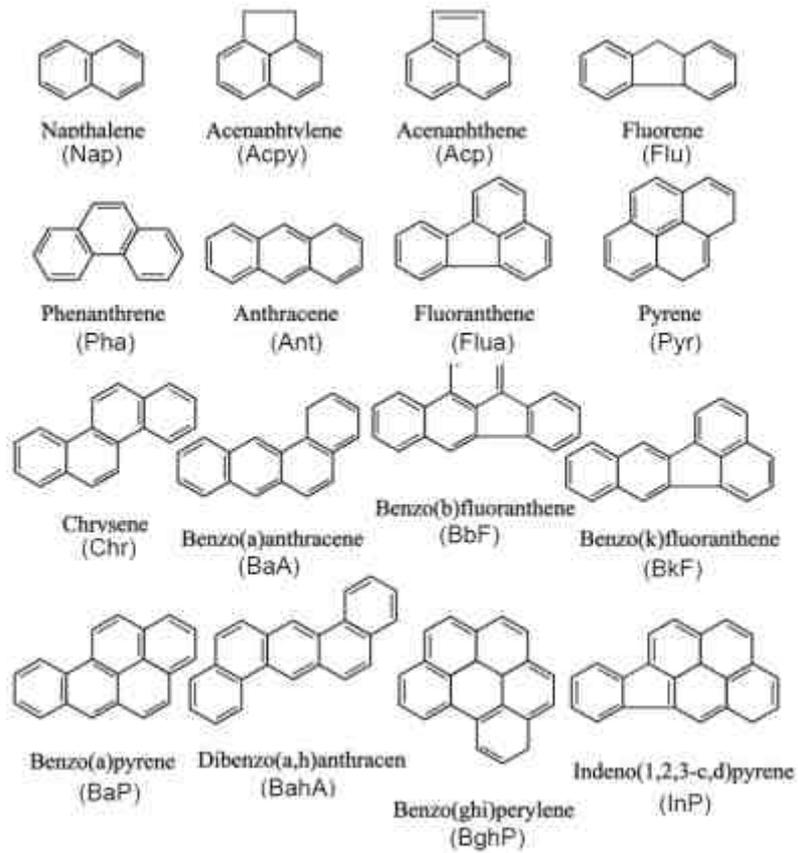


그림 7-2. 대상어장에서 분석한 16 PAHs 분자구조.

<표 7-2> 16 PAHs의 물리 및 화학적 특징

PAHs	Mol. Formula	Mol. Wt.(g)	Melting Point(°C)	Boiling Point	Water Solubility at 25°C (mg/L)	Vapor Pressure (mmHg)	Log K _{ow} ^a at 25°C	Log K _{oc} ^b at 25°C
Nap	C ₈ H ₁₆	128.2	80.26	217.9	31.5	7.1×10 ⁻²	3.37	3.11
Acpy	C ₁₂ H ₈	152.2	91.8	280	3.93	6.7×10 ⁻³	4.07	3.75
Acp	C ₁₂ H ₁₀	154.2	93.4	279	3.88	2.2×10 ⁻³	3.92	3.79
Flu	C ₁₃ H ₁₀	166.2	114.77	295	1.90	6.0×10 ⁻⁴	4.18	3.95
Pha	C ₁₄ H ₁₀	178.2	99.24	340	1.65	1.2×10 ⁻⁴	4.46	4.36
Ant	C ₁₄ H ₁₀	178.2	215.76	339.9	0.075	6.0×10 ⁻⁶	4.63	4.42
Flua	C ₁₆ H ₁₀	202.3	110.19	384	0.240	9.2×10 ⁻⁶	4.85	4.81
Pyr	C ₁₆ H ₁₀	202.1	150.62	404	0.136	4.5×10 ⁻⁶	4.90	4.92
BaA	C ₁₈ H ₁₂	228.3	160.5	438	0.011	2.1×10 ⁻⁷	5.61	5.62
Chr	C ₁₈ H ₁₂	228.3	255.5	448	0.0016	6.4×10 ⁻⁹	5.73	5.74
BbF	C ₂₀ H ₁₂	252.3	168	481	0.0015	5.0×10 ⁻⁷	5.78	5.91
BkF	C ₂₀ H ₁₂	252.3	217	480	0.0008	9.6×10 ⁻¹¹	5.94	5.99
BaP	C ₂₀ H ₁₂	252.3	181.1	495	0.004	5.6×10 ⁻⁹	6.31	6.04
InP	C ₂₂ H ₁₂	276.3	162	534	0.00019	5.4×10 ⁻¹⁰	6.72	6.80
DahA	C ₂₂ H ₁₄	278.3	269.5	524	0.00056	9.6×10 ⁻¹⁰	6.88	6.76
BghP	C ₂₂ H ₁₂	276.4	272.5	525	0.000137	1.0×10 ⁻¹⁰	7.04	6.93

^a K_{ow}= octanol/water partition coefficient;

^b K_{oc}= partitioning coefficient for organic carbon

Nap ; Naphthalene, Acpy ; Acenaphthylene, Acp ; Acenaphthene, Flu ; Fluorene, Pha ; Phenanthrene, Ant ; Anthracene, Flua ; Fluoranthene, Pyr ; Pyrene, BaA ; Benzo[a]anthracene, Chr ; Chrysene, BbF ; Benzo[b]fluoranthene, BkF ; Benzo[k]fluoranthene, BaP ; Benzo[a]pyrene, InP ; Indeno(1,2,3-CD)pyrene, DahA ; Dibenz(a,h)anthracene, BghP ; Benzo[ghi]perylenez

4.2. 전처리 방법

어업생물의 PAHs 화합물 및 중금속 분석을 위한 전처리방법은 해양환경공정시험방법에 준하여 분석하였다(해양수산부, 2005). 추출에 이용된 유기용매는 잔류농약 분석용 등급(Pesticide grade)인 아세톤(acetone), 헥산(hexane) 및 디클로메탄(dichloromethane)을 사용하였고, 추출하기 전에 모든 초자기구는 증류수와 순수이온수로 세척한 후 잠재적 오염이 될 만한 것들을 제거하기 위해서 400℃ 이상의 강열에서 3시간 이상 가열하였다.

추출에 이용된 방법은 속슬렛 추출방법(soxhlet extraction method)으로 어업생물과 같은 고형물에서 비휘발성이나 반휘발성 유기화합물을 추출하기 위한 방법이다. 생물시료 약 10g을 취하여 무수황산나트륨(anhydrous sodium sulfate) 약 30g을 가하여 수분을 제거하고, 이를 막자사발로 갈아 균질화 하였다.

균질화한 시료를 셀룰로스(cellulose) 재질인 원통형 여과지(Thimble Filters)에 담고, 2ppm 농도의 내부 표준물질 naphthalene-d8, acenaphthene-d10, phenanthrene-d10, chrysene-d12, perylene-d12 100 μ l를 첨가하였다(<표 7-3>).

해양퇴적물 시료와 내부 표준물질이 담겨진 원통형 여과지를 속슬렛 추출장치에 담고, Acetone : Hexane (1:1, v/v) 혼합 유기용매 150ml를 이용하여 1회 용매 순환속도가 4~6분이 되도록 속슬렛 추출장치 온도를 맞추고 4시간 이상 추출했다. 속슬렛 추출장치로 추출된 혼합 유기용매 전량을 200ml 라운드 플라스크(round flask)에 옮겨 수욕상태(약 30℃)에서 회전식 증발농축기(rotary evaporator)로 약 1~2ml까지 농축하고, 이를 3회에 걸쳐 Hexane을 이용하여 대체하였다. 농축된 용액을 실리카겔 칼럼(Silica gel column)으로 clean-up 하였다.

Clean-up을 하기 전, 130℃에서 15시간 이상 활성화시킨 실리카겔을 준비하여 내경 10mm, 길이가 250mm인 크로마토그래피 칼럼(chromatography column)에 약 10g을 충전시키고, 상층에 무수황산나트륨(anhydrous sodium sulfate)을 1~2cm 충전한 칼럼을 준비했다. 충전한 칼럼에 dichloromethane : hexane (2:3, v/v) 혼합 유기용매 25ml를 흘려 용리시킨 다음 용출된 용액 25ml를 배형 플라스크에 담아 회전식 증발농축기(rotary evaporator)를 이용하여 1ml가 될 때까지 농축했다. 농축된 용액은 시험관에 옮겨 담은 후, GC-MS(gas chromatography-mass spectrometry)를 이용하여 검출하였다(그림 7-3).

한편, 중금속분석에 사용된 유도결합플라즈마 질량분석기는 아르곤 가스를 이용하여 10,000K 정도의 온도에서 생성된 플라즈마에서 방출되는 양이온들을 질량 분석기를 이용하여 정량적으로 분석하는 기기이다. 이는 극미량까지 검출이 가능하고 다원소를 동시에 분석할 수 있는 장점이 있다.

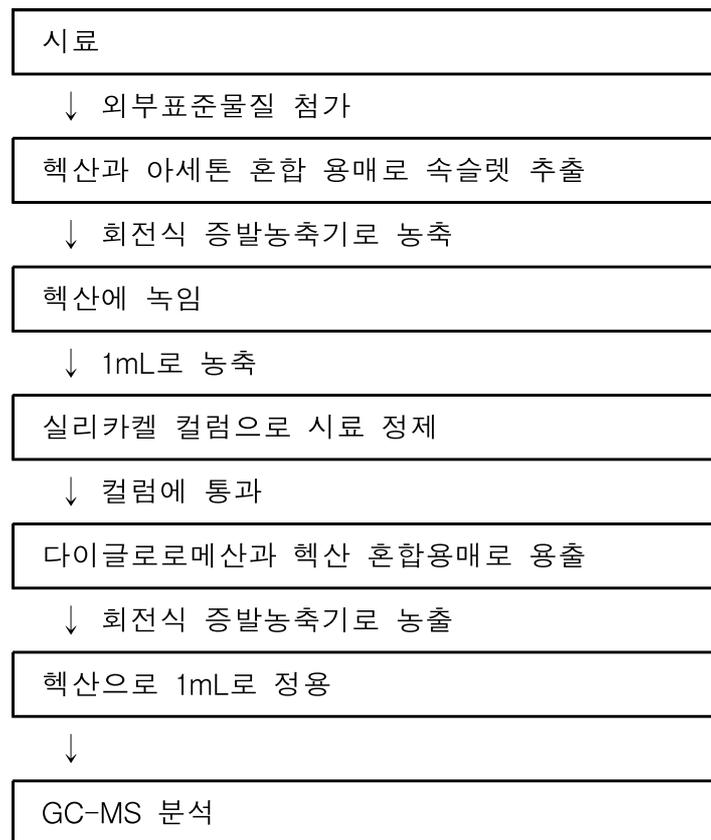


그림 7-3. 저질의 16 PAHs 분석공정 도해도.

<표 7-3> PAHs의 분석에 사용된 내부표준물질과 그 순도 및 농도

화합물	정량이온	머무름시간	농도(ppb)
Naphthalene(d8, 98%)	136.00	6.735	0.20
2-Fluorobiphenyl (98%)	172.00	9.326	0.20
Acenaphthene(d10, 98%)	164.00	10.946	0.20
Phenanthrene(d10, 98%)	188.00	14.648	0.20
Chrysene(d12, 98%)	240.00	21.451	0.20
Perylene(d12, 98%)	264.00	26.559	0.20

- (1) 기기 ICPM-8500/Shimadzu/Japan
- (2) 플라즈마 Unit RF Power 1.2(Kw)
Coolant Gas Flow Rate 7.0 L/min
Plasma Gas Flow Rate 1.50 L/min
Carrier Gas Flow Rate 0.56 L/min
- (3) 플라즈마 Torch Sampling Depth 5 (mm)
Sampling Interface Cu



그림 7-4. 저질의 중금속 분석공정 도해도.

4.3. PAHs 분리방법

PAHs 화합물을 검출하기 위한 기기는 GC(gas chromatography)-MS (mass spectrometry)로 GC와 MS를 연결하여 미지의 오염화합물을 검출하고 확인하는 것뿐만 아니라, 정량화하는데 높은 감도와 선택성을 가지고 있어 분석에 많이 이용된다. 본 분석에 있어서, 어업생물의 체내 16 PAHs 화합물을 검출하기 위한 기기는 GC-MS(Model GCMS QP-2010, Shimadzu)를 이용하였다. 16 PAHs에 대한 자세한 GC-MS 분석조건은 <표 7-4>에 표시하였다. 칼럼(column)은 모세관 칼럼(capillary column, DB-5, J&W)을 사용하였으며, 칼럼(내경 0.25mm, 필름두께 0.25 μ m, 길이 30m)은 5% phenyl, 95% methyl polysiloxane이 충전되어 있는 것을 사용하였다. 칼럼 승온 조건은 처음 80 $^{\circ}$ C에서 1분 동안 머무르게 하였고, 이후 1분당 10 $^{\circ}$ C씩 올려 275 $^{\circ}$ C까지 올린 후 25분간 머무르게 하였다. 시료 주입방법은 비분할 주입법(splitless mode)으로 하였고, 운반기체는 헬륨(He, 99.999%)을 이용하여, 분당 1.3mL로 흘려주었다.

4.4. 정량방법

분리된 16 PAHs를 검출하는 방법으로 특정 질량을 갖는 이온만을 선택하여 검출하는 방법인 SIM(selected ion monitoring) mode를 사용하였다. <표 7-5>에 16 PAHs의 검출에 이용된 개별 PAHs에 대한 모니터링 이온분자량을 표시하였다. 시료 각 성분의 머무름 시간과 피크의 면적을 내부표준물질(naphthalene-d8, acenaphthene-d10, phenanthrene-d10, chrysene-d12, perylene-d12, <표 7-3>)의 면적과 비교하여 정성분석 및 정량분석을 행하였다. 검량선의 기울기와 검량선의 상관계수를 다음에 표시하였으며 각 성분에 대한 농도계산은 분석 대상 물질의 peak와 검량선, 내부표준물질의 농도, 내부표준물질의 peak 면적 등을 이용하여 다음과 같이 산출하였다.

$$\text{검출농도} = \frac{\text{분석대상물질의 peak 면적}}{\text{검량선의 기울기}} \times \frac{\text{내부표준물질의 농도}}{\text{내부표준물질의 peak 면적}}$$

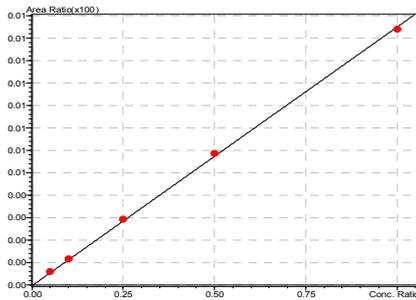
<표 7-4> 어업생물의 체내 16 PAHs를 분석하기 위한 GC-MS 조건

Item	Condition
Detector	Shimadzu GC-MS (Model GC-MS QP-2010)
Column	Capillary column DB-5 (J&W Scientific Inc.) 30m×0.25mm I.D. 0.25 μ m film thickness (5% phenyl, 95% methyl polysiloxane)
Injector type	Splitless
Carrier gas	He 99.999%
Carrier gas pressure	19.5 kPa
Injector temperature	250 $^{\circ}$ C
Interface temperature	280 $^{\circ}$ C
Initial temperature	80 $^{\circ}$ C(1min)
Temperature rate	10 $^{\circ}$ C/min
Final Temperature	275 $^{\circ}$ C(25min)

<표 7-5> 16 PAHs 다환 방향족 탄화수소 분석 모니터링 이온분자량

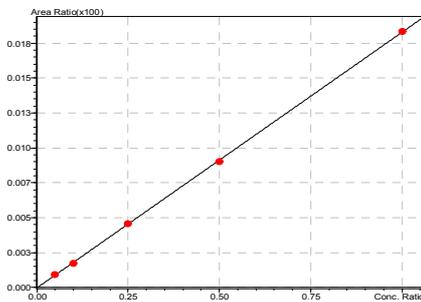
다환 방향족 탄화수소류		분석 모니터링 이온분자량	
		M	M+1
1	Naphthalene	128.00	129.00
2	Acenaphthylene	152.00	153.00
3	Acenaphthene	154.00	155.00
4	Fluorene	166.00	167.00
5	Phenanthrene	178.00	179.00
6	Anthracene	178.00	179.00
7	Fluoranthene	202.00	203.00
8	Pyrene	202.00	203.00
9	Benzo[a]anthracene	228.00	229.00
10	Chrysene	228.00	229.00
11	Benzo[b]fluoranthene	252.00	253.00
12	Benzo[k]fluoranthene	252.00	253.00
13	Benzo[a]pyrene	252.00	253.00
14	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	276.00	277.00
15	Dibenzo[a,h]anthracene	278.00	279.00
16	Benzo[g,h,i]perylene	276.00	277.00

(1) Naphthalene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



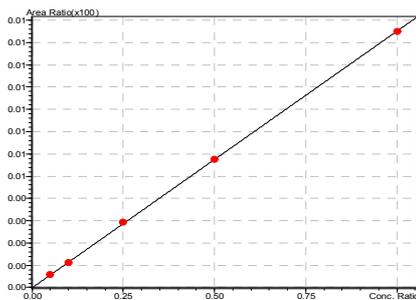
$Y = 1.150491X + 0.0$	Mean RF : 1.183994
$R^2 = 0.9997694$	RF SD : 0.0315268
$R = 0.9998847$	RF % RSD : 2.662754

(2) Acenaphthylene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



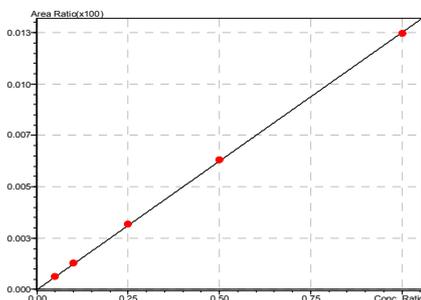
$Y = 1.830761X + 0.0$	Mean RF : 1.826325
$R^2 = 0.9998908$	RF SD : 0.0423859
$R = 0.9999454$	RF %RSD : 2.320832

(3) Acenaphthene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



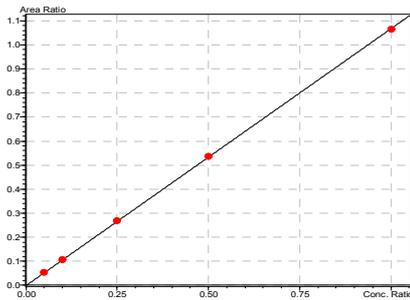
$Y = 1.151821X + 0.0$	Mean RF : 1.160802
$R^2 = 0.9999528$	RF SD : 0.0310225
$R = 0.9999764$	RF %RSD : 2.672503

(4) Fluorene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



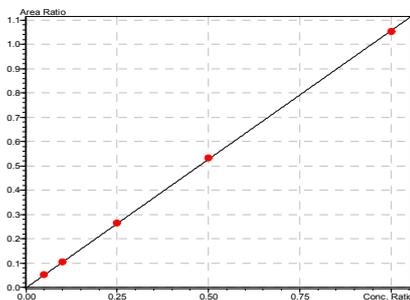
$Y = 1.251999X + 0.0$	Mean RF : 1.274655
$R^2 = 0.9999825$	RF SD : 0.0235857
$R = 0.9999913$	RF %RSD : 1.850361

(5) Phenanthrene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



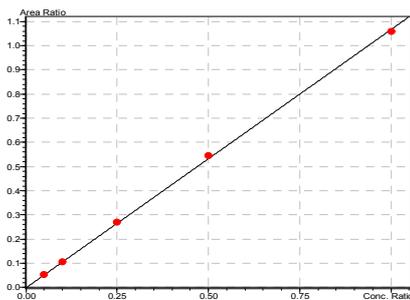
$Y = 1.068017X + 0.0$	Mean RF : 1.079201
$R^2 = 0.9999921$	RF SD : 0.0121671
$R = 0.9999961$	RF %RSD : 1.127419

(6) Anthracene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



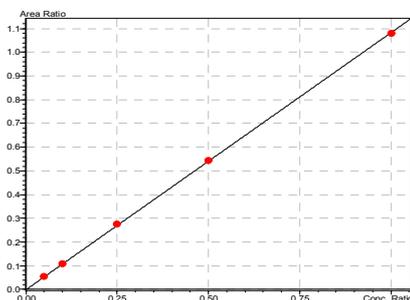
$Y = 1.057005X + 0.0$	Mean RF : 1.064046
$R^2 = 0.9999562$	RF SD : 0.0122733
$R = 0.9999781$	RF %RSD : 1.153450

(7) Fluoranthene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



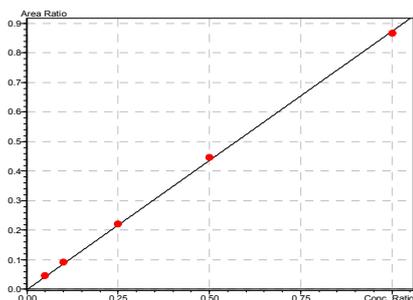
$Y = 1.067985X + 0.0$	Mean RF : 1.078227
$R^2 = 0.9997311$	RF SD : 0.0123740
$R = 0.9998655$	RF %RSD : 1.147625

(8) Pyrene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



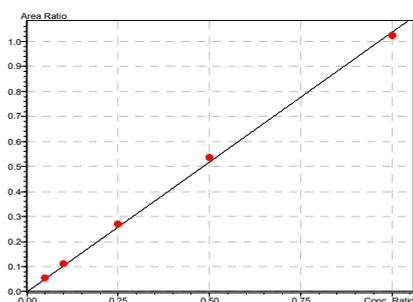
$Y = 1.083436X + 0.0$	Mean RF : 1.097475
$R^2 = 0.9999854$	RF SD : 0.0144182
$R = 0.9999927$	RF %RSD : 1.313765

(9) Benzo[a]anthrene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



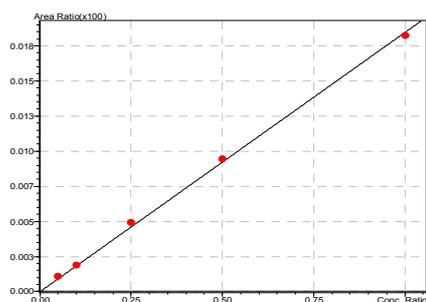
$Y = 0.8739933X + 0.0$	Mean RF : 0.8976414
$R^2 = 0.9998171$	RF SD : 0.0224209
$R = 0.9999085$	RF %RSD : 2.497762

(10) Chrysene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



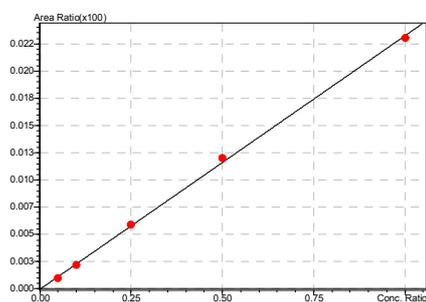
$Y = 1.038031X + 0.0$	Mean RF : 1.077362
$R^2 = 0.9994125$	RF SD : 0.0344687
$R = 0.9997062$	RF %RSD : 3.199361

(11) Benzo[b]fluoranthene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



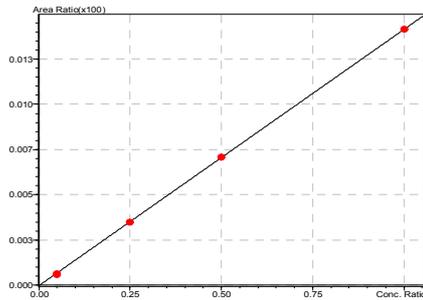
$Y = 1.847286X + 0.0$	Mean RF : 1.944811
$R^2 = 0.9994846$	RF SD : 0.1256582
$R = 0.9997423$	RF %RSD : 6.461203

(12) Benzo[k]fluoranthene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



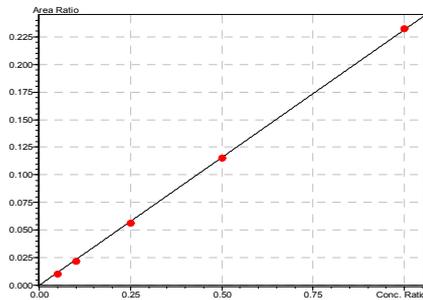
$Y = 2.327154X + 0.0$	Mean RF : 2.254686
$R^2 = 0.9992948$	RF SD : 0.1620383
$R = 0.9996473$	RF %RSD : 7.186735

(13) Benzo[a]pyrene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



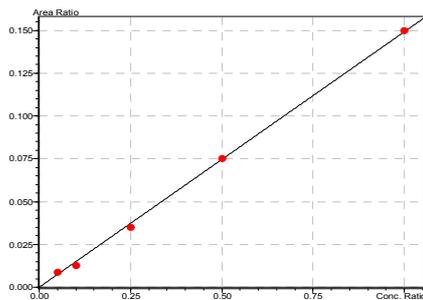
$Y = 1.415677X + 0.0$	Mean RF : 1.332043
$R^2 = 0.9999663$	RF SD : 0.1139301
$R = 0.9999831$	RF %RSD : 8.553030

(14) Indeno(1,2,3-CD)pyrene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



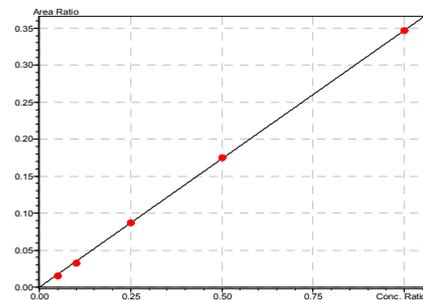
$Y = 0.2314228X + 0.0$	Mean RF : 0.2222654
$R^2 = 0.9999944$	RF SD : 0.0114194
$R = 0.9999972$	RF %RSD : 5.137746

(15) dibenz(a,h)anthracene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



$Y = 0.1492179X + 0.0$	Mean RF : 0.1480725
$R^2 = 0.9992769$	RF SD : 0.0170806
$R = 0.9996384$	RF %RSD : 11.53528

(16) benzo[ghi]perylene 검량선, 검량선 기울기 및 검량선의 상관계수



$Y = 0.3469721X + 0.0$	Mean RF : 0.3350143
$R^2 = 0.9999128$	RF SD : 0.0186198
$R = 0.9999564$	RF %RSD : 5.557900

4.5. 표기방법

앞서 언급된 바와 같이 다환 방향족 탄화수소류(Polycyclic Aromatic hydrocarbons, PAHs)는 2개 이상의 벤젠고리가 선형으로 각을 지어 있거나 밀집된 구조로 이루어져 있는 유기화합물로서 동종 화합물이 수백 종에 이르고 있다(Pelkonene and Nebet, 1982; Gelboin, 1980). 독성이 주로 알려진 화합물은 benzo(a)pyrene[B(a)P] 외 50종으로 밝혀졌고, 특히 benzo(a)pyrene, benzo(a)anthracene, dibenzo(a,h)anthracene, chrysene 등은 유전독성과 발암성을 나타낸다고 알려져 있다(DHHS, 1995). 이 중 benzo(a)pyrene은 PAHs 화합물 중 가장 많은 연구가 수행된 물질로서, PAHs 화합물의 대표 물질로 고려되고 있으며, 쥐, 햄스터, 토끼, 오리, 개, 원숭이 등을 포함한 다수의 동물 종에서 태아독성, 최기형성, 돌연변이성을 나타냈다(American conference, 1991). USEPA(1992)의 발암성 등급에 따르면 benzo(a)anthracene, benzo(a)pyrene, dibenzo(a,h)anthracene, benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, chrysene, indeno(1, 2, 3-c, d)pyrene은 group B2(인간의 발암 가능성 물질)로 분류되어 있다(IARC, 1983).

많은 종의 PAHs가 유류에 존재하고 있으나(<표 7-1>), 이들에 대한 독성이 benzo(a)pyrene같이 잘 밝혀져 있지 않다. 일부 PAHs가 <표 7-6>과 같이 benzo(a)pyrene에 대한 상대적 독성계수(toxic equivalency factors, TEFs) 연구에 의해 밝혀졌다. PAHs는 석유에 함유되어 있을뿐만 아니라 불완전 연소에 의해 발생되어 <표 7-7>과 같이 식품에서도 다량 발견된다. PAHs에 의한 식품의 오염도를 표시하거나 독성 등가량(Toxic Equivalents, TEQs)으로 표시된다. 총 PAHs의 오염도는 대상 식품의 개별 PAH를 분석하여 이를 합한 양이 총 PAHs 함량이며, 독성 등가량은 분석한 개별 PAH에 Nisbet & Lagoy의 상대 PAHs 독성값(<표 7-6>)을 곱한 총합이 독성 등가량이다. Dibenzo[a,h]anthracene을 제외한 대부분의 PAHs가 Benzo[a]pyrene에 대한 상대독성이 0.1 이하이기 때문에 일반적으로 총 PAHs 함량보다 독성 등가량이 작다. 본 분석에 있어서 어업생물에 잔류하는 PAHs는 습식중량으로 산출하여 개별 PAH 함량, 총 PAHs 함량, 그리고 독성 등가량을 표시하였다.

<표 7-6> 16 PAHs의 상대적 독성 (Yender, et al., 2002에서 인용)

상대 PAHs 독성					
Compound	ICF/EPA ^a	USEPA _b	FDA ^c	CA EPA ^d	Nisbet & Lagoy ^e
Benzo[a]pyrene[B(a)P]	1.0	1.0	1.00	1.00	1
Dibenzo[a,h]anthracene	1.11	1.0	1.05	0.36	5
Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	0.232	0.1	0.25	0.10	0.1
Pyrene	0.081		0.13*		0.001
Benzo[b]fluoranthene	0.140	0.1	0.11	0.10	0.1
Benzo[k]fluoranthene	0.066	0.01	0.07	0.10	0.1
Benzo[g,h,i]pyrylene	0.022		0.03		0.01
Fluoranthene			0.02*		0.001
Benz[a]anthracene	0.145	0.1	0.014	0.10	0.1
Chrysene	0.0044	0.001	0.013	0.01	0.01
Anthanthrene	0.320**				
Benzo[j]fluoranthene	0.061				
Benzo[e]pyrene	0.004				
Cyclopentadieno[c,d]-pyrene	0.023				
Anthracene					0.01
Acenaphthene					0.001
Acenaphthylene					0.001
Fluorene					0.001
2-Methylnaphthalene					0.001
Naphthalene					0.001
Phenanthrene					0.001

^a ICF-Clements Associates (1988).

** Identified in Nisbet and LaGoy (1992) as anthracene.

^b U.S. Environmental Protection Agency (1993).

^c U.S. Food and Drug Administration, Contaminants Standards Monitoring and Programs Branch, Center for Food Safety and Applied Nutrition (Bolger et al. 1996)

* Division of Mathematics, Center for Food Safety and Applied Nutrition.

^d California Environmental Protection Agency (1997).

^e Nisbet and LaGoy (1992).

5. 결과

<표 7-7>. 시설물 설치 전 법산어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	TEQ
1	Naphthalene	22045	1.2125	5.6678	0.0057
2	Acenaphthylene	ND	1.7265	0.0000	0.0000
3	Acenaphthene	863	1.2547	0.1051	0.0001
4	Fluorene	2324	1.2319	0.2882	0.0003
5	Phenanthrene	5203	1.1458	0.3467	0.0003
6	Anthracene	ND	1.1368	0.0000	0.0000
7	Fluoranthene	5616	1.3693	0.3132	0.0003
8	Pyrene	ND	1.2295	0.0000	0.0000
9	Benzo[a]anthracene	ND	0.9458	0.0000	0.0000
10	Chrysene	23563	0.9560	1.9956	0.0200
11	Benzo[b]fluoranthene	19841	2.1465	4.9552	0.4955
12	Benzo[k]fluoranthene	2421	2.2316	0.5816	0.0582
13	Benzo[a]pyrene	ND	1.1857	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	72	0.7856	0.0491	0.0049
15	Dibenz[a,h]anthracene	ND	0.6040	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	41	0.6363	0.0345	0.0003
	SUM	81989	19.7985	14.3372	0.5856

ND: 불검출

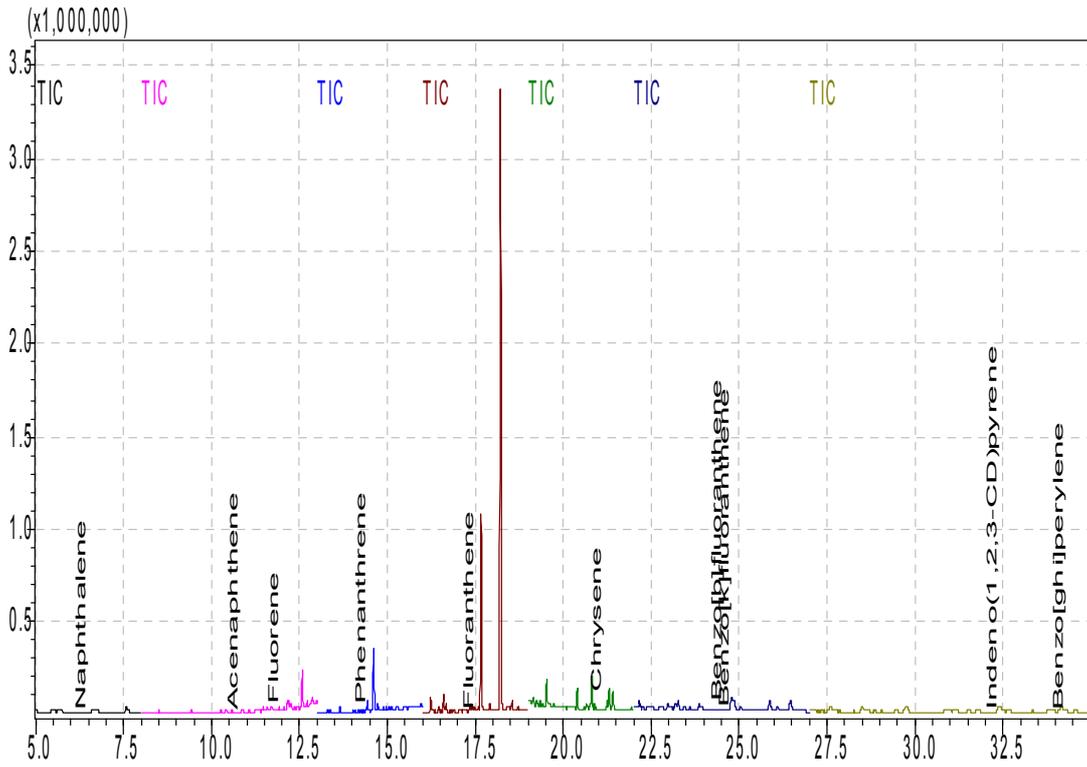


그림 7-5. 시설물 설치 전 법산 어장 저질의 16PAHs 분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.

<표 7-8> 시설물 설치 전 송현어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	TEQ
1	Naphthalene	142	1.2125	4.3149	0.0043
2	Acenaphthylene	ND	1.7265	0.0000	0.0000
3	Acenaphthene	8045	1.2547	5.5387	0.0055
4	Fluorene	ND	1.2319	0.0000	0.0000
5	Phenanthrene	49731	1.1458	10.9040	0.0109
6	Anthracene	ND	1.1368	0.0000	0.0000
7	Fluoranthene	12037	1.3693	2.2086	0.0022
8	Pyrene	ND	1.2295	0.0000	0.0000
9	Benzo[a]anthracene	ND	0.9458	0.0000	0.0000
10	Chrysene	1297	0.9560	0.3025	0.0030
11	Benzo[b]fluoranthene	20160	2.1465	12.9285	1.2929
12	Benzo[k]fluoranthene	1553	2.2316	0.9580	0.0958
13	Benzo[a]pyrene	ND	1.1857	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	ND	0.7856	0.0000	0.0000
15	Dibenz[a,h]anthracene	ND	0.6040	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	ND	0.6363	0.0000	0.0000
	SUM	92965	19.7985	37.1552	1.4146

ND: 불검출

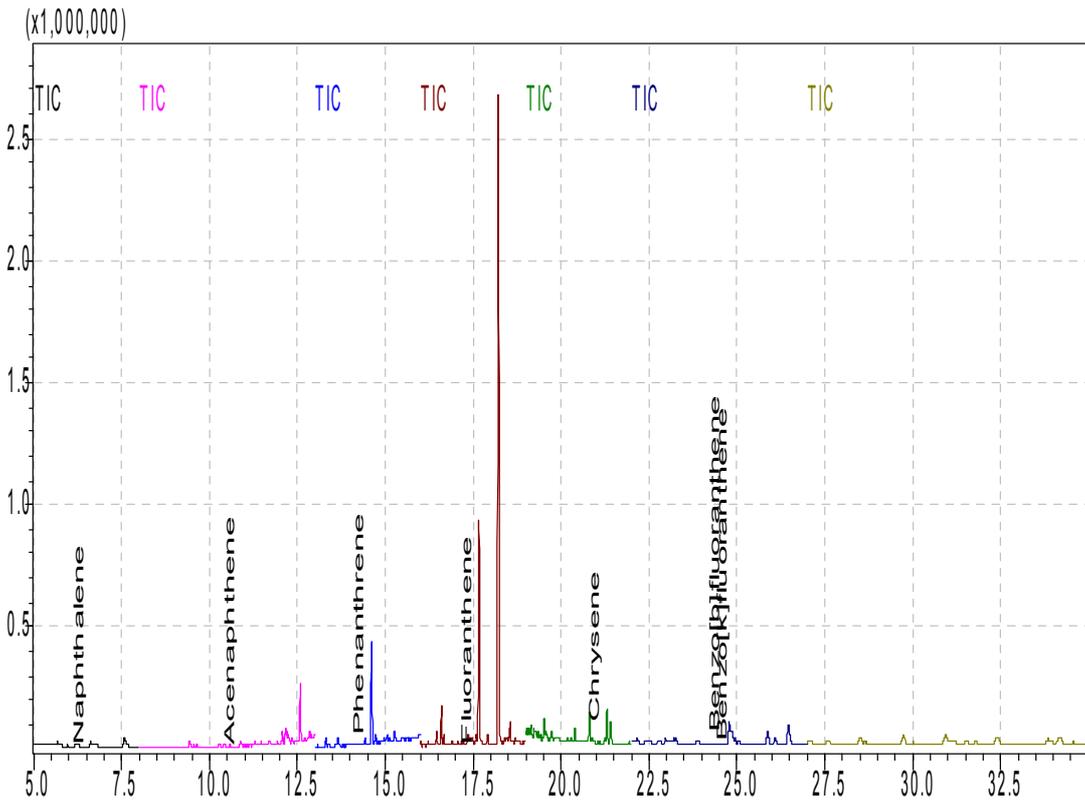


그림 7-6. 시설물 설치 전 송현 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.

<표 7-9> 시설물 설치 전 신덕어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	TEQ
1	Naphthalene	26759	1.2125	6.9853	0.0070
2	Acenaphthylene	ND	1.7265	0.0000	0.0000
3	Acenaphthene	1640	1.2547	0.2565	0.0003
4	Fluorene	1260	1.2319	0.2007	0.0002
5	Phenanthrene	41541	1.1458	2.7851	0.0028
6	Anthracene	ND	1.1368	0.0000	0.0000
7	Fluoranthene	ND	1.3693	0.0000	0.0000
8	Pyrene	ND	1.2295	0.0000	0.0000
9	Benzo[a]anthracene	10906	0.9458	0.8370	0.0837
10	Chrysene	ND	0.9560	0.0000	0.0000
11	Benzo[b]fluoranthene	13157	2.1465	2.4988	0.2499
12	Benzo[k]fluoranthene	ND	2.2316	0.0000	0.0000
13	Benzo[a]pyrene	ND	1.1857	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	ND	0.7856	0.0000	0.0000
15	Dibenz[a,h]anthracene	ND	0.6040	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	ND	0.6363	0.0000	0.0000
	SUM	95263	19.7985	13.5634	0.3438

ND: 불검출

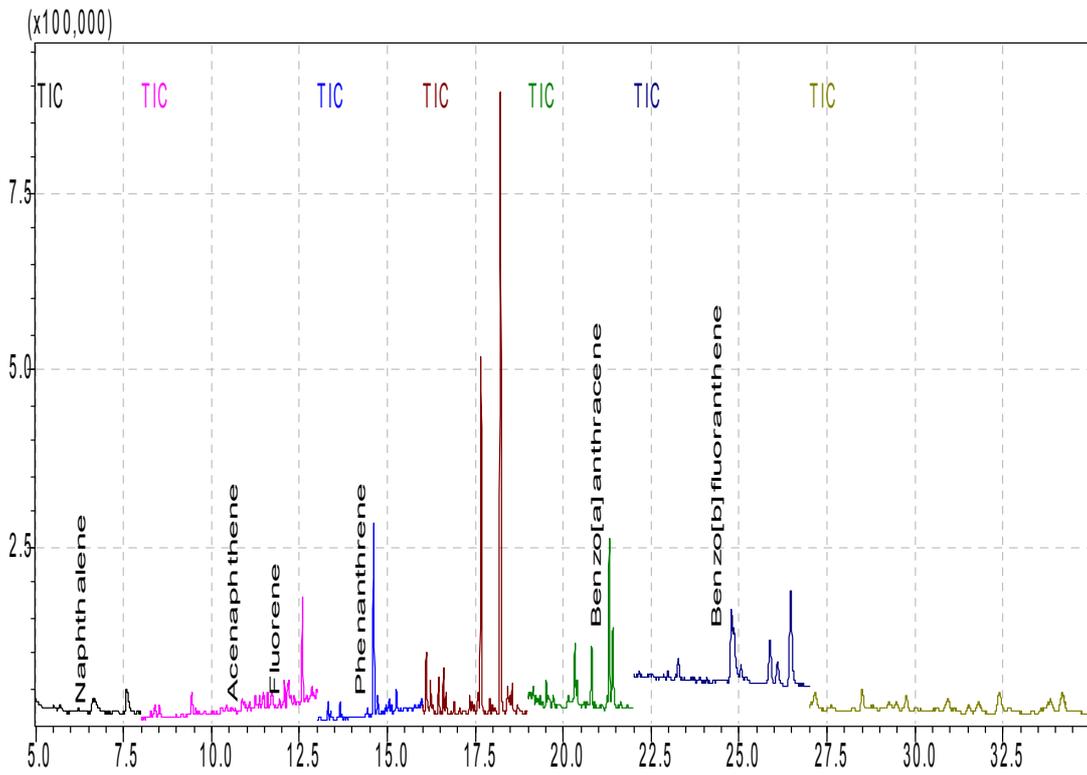


그림 7-7. 시설물 설치 전 신덕 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.

<표 7-10> 시설물 설치 전 파도 어장 저질에 잔존하는 16 PAHs 농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	TEQ
1	Naphthalene	ND	1.2125	0.0000	0.0000
2	Acenaphthylene	ND	1.7265	0.0000	0.0000
3	Acenaphthene	ND	1.2547	0.0000	0.0000
4	Fluorene	18142	1.2319	9.5187	0.0095
5	Phenanthrene	ND	1.1458	0.0000	0.0000
6	Anthracene	ND	1.1368	0.0000	0.0000
7	Fluoranthene	2197	1.3693	0.3018	0.0003
8	Pyrene	2427	1.2295	0.3713	0.0004
9	Benzo[a]anthracene	35602	0.9458	6.7347	0.6735
10	Chrysene	ND	0.9560	0.0000	0.0000
11	Benzo[b]fluoranthene	18021	2.1465	8.0501	0.8050
12	Benzo[k]fluoranthene	60761	2.2316	26.1077	2.6108
13	Benzo[a]pyrene	ND	1.1857	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	434	0.7856	0.5297	0.0530
15	Dibenz[a,h]anthracene	ND	0.6040	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	ND	0.6363	0.0000	0.0000
	SUM	137584	19.7985	51.6139	4.1524

ND: 불검출

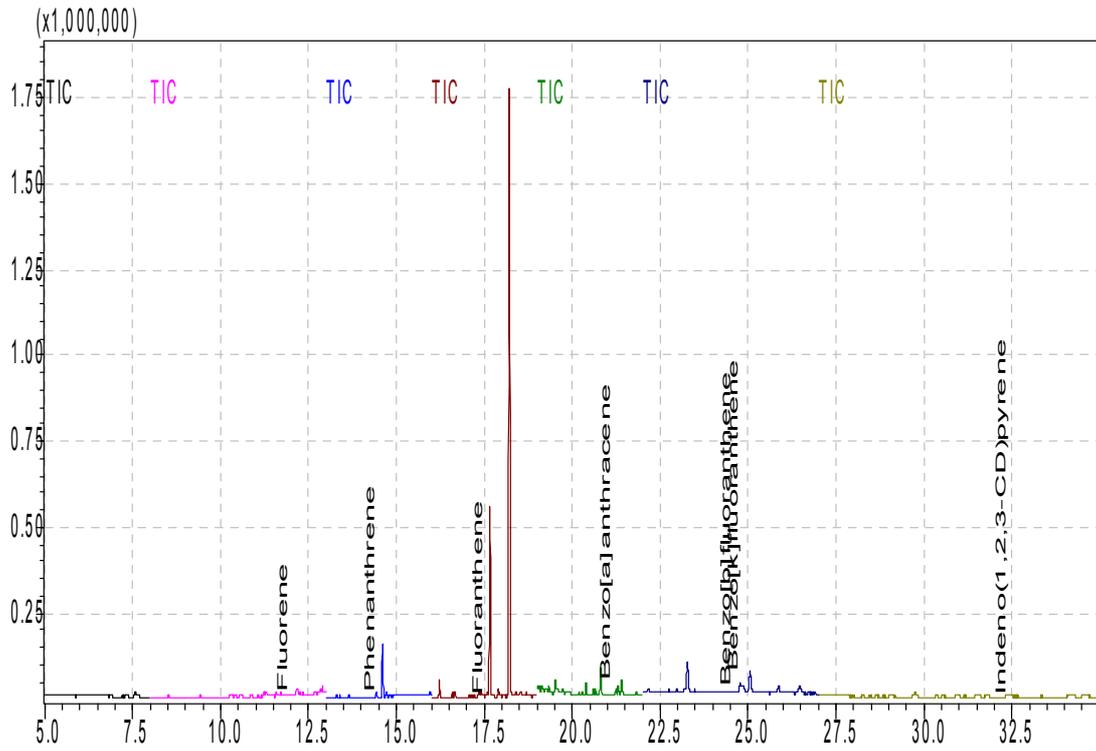


그림 7-8. 시설물 설치 전 파도 어장 저질의 16 PAHs 분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.

<표 7-11> 시설물 설치 전 학암 어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs (μ g/kg)	TEQ
1	Naphthalene	1274775	1.1452	35.5728	0.0356
2	Acenaphthylene	3766	1.8864	0.0782	0.0001
3	Acenaphthene	12919	1.1518	0.3681	0.0004
4	Fluorene	10950	1.3265	0.3179	0.0003
5	Phenanthrene	6430	1.1253	0.1089	0.0001
6	Anthracene	15204	1.1023	0.2589	0.0026
7	Fluoranthene	6391	1.0231	0.0907	0.0001
8	Pyrene	8719	1.0231	0.1377	0.0001
9	Benzo[a]anthracene	90	0.9012	0.0015	0.0002
10	Chrysene	171	1.0568	0.0028	0.0000
11	Benzo[b]fluoranthene	5562	1.7568	0.1146	0.0115
12	Benzo[k]fluoranthene	107	2.2356	0.0021	0.0002
13	Benzo[a]pyrene	0	1.3569	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	0	0.6569	0.0000	0.0000
15	Dibenz[a,h]anthracene	0	0.5832	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	0	0.6526	0.0000	0.0000
	SUM	1345084	18.9837	37.0543	0.0511

- ND: not detected

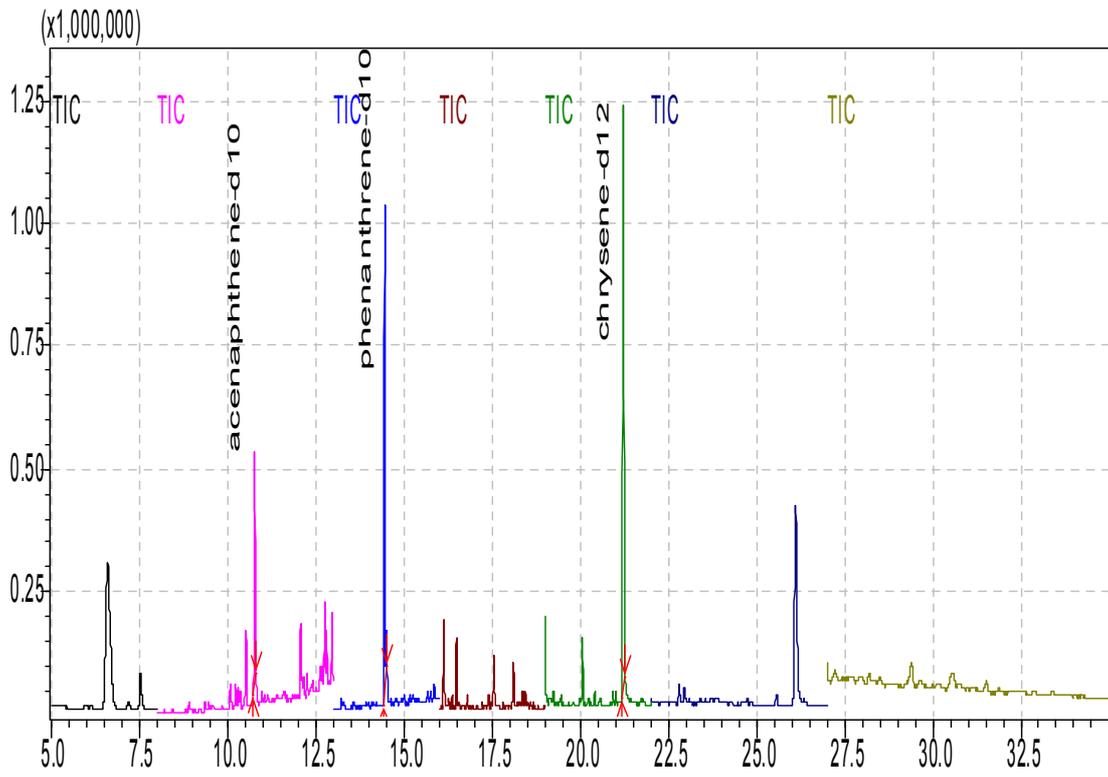


그림 7-9. 시설을 설치 전 학암 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.

<표 7-12> 시설물 설치 후 법산 어장에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	TEQ
1	Naphthalene	122	1.1452	0.0033	0.0000
2	Acenaphthylene	2444	1.8864	0.0609	0.0001
3	Acenaphthene	7236	1.1518	0.2476	0.0002
4	Fluorene	12414	1.3265	0.4328	0.0004
5	Phenanthrene	4144	1.1253	0.0840	0.0001
6	Anthracene	71384	1.1023	1.4549	0.0145
7	Fluoranthene	169183	1.0231	2.8731	0.0029
8	Pyrene	35983	1.0231	0.6802	0.0007
9	Benzo[a]anthracene	63255	0.9012	1.1986	0.1199
10	Chrysene	63255	1.0568	1.1811	0.0118
11	Benzo[b]fluoranthene	117523	1.7568	1.9158	0.1916
12	Benzo[k]fluoranthene	113699	2.2356	1.7826	0.1783
13	Benzo[a]pyrene	0	1.3569	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	0	0.6569	0.0000	0.0000
15	Dibenz[a,h]anthracene	0	0.5832	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	0	0.6526	0.0000	0.0000
	SUM	660,642	18.9837	11.9151	0.5204

- ND: not detected

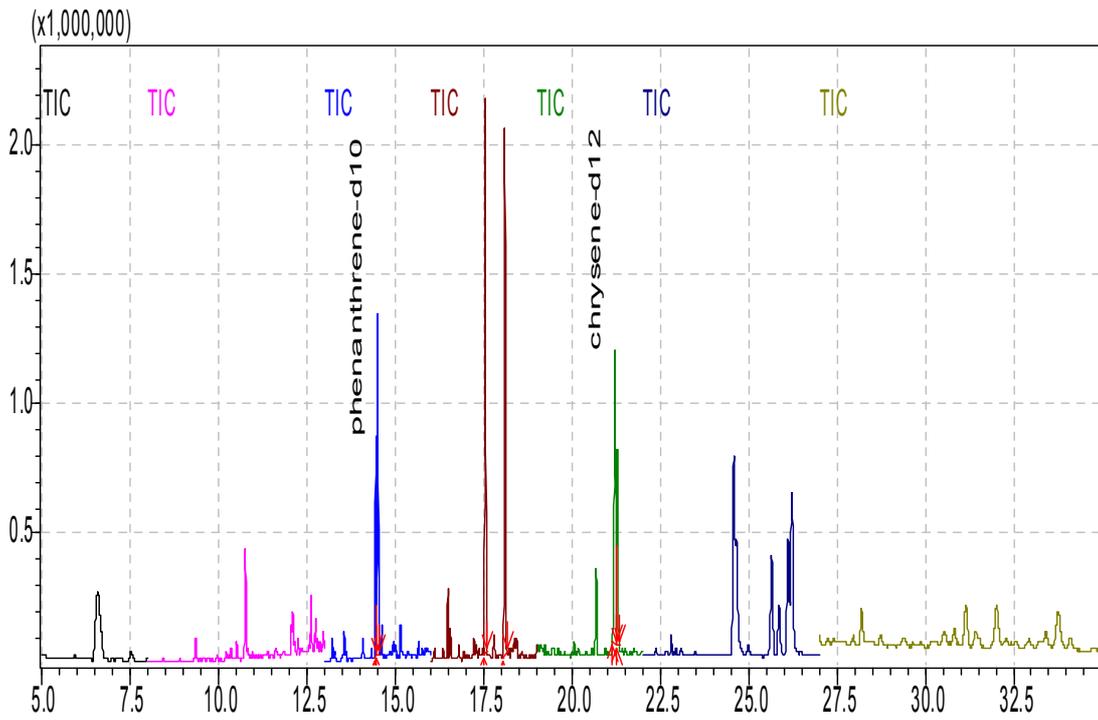


그림 7-10. 시설물 설치 후 법산어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.

<표 7-13> 시설물 설치 후 송현 어장 저질에 잔존하는 16PAHs 농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs (μ g/kg)	TEQ
1	Naphthalene	1213177	1.1452	23.1278	0.0231
2	Acenaphthylene	940	1.8864	0.0189	0.0000
3	Acenaphthene	4508	1.1518	0.1244	0.0001
4	Fluorene	9879	1.3265	0.2777	0.0003
5	Phenanthrene	6929	1.1253	0.1213	0.0001
6	Anthracene	71087	1.1023	1.2502	0.0125
7	Fluoranthene	91842	1.0231	1.3459	0.0013
8	Pyrene	29569	1.0231	0.4824	0.0005
9	Benzo[a]anthracene	1373	0.9012	0.0233	0.0023
10	Chrysene	17672	1.0568	0.2958	0.0030
11	Benzo[b]fluoranthene	41621	1.7568	0.6190	0.0619
12	Benzo[k]fluoranthene	50522	2.2356	0.7226	0.0723
13	Benzo[a]pyrene	0	1.3569	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	0	0.6569	0.0000	0.0000
15	Dibenz[a,h]anthracene	0	0.5832	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	0	0.6526	0.0000	0.0000
	SUM	1539119	18.9837	28.4093	0.1775

- ND: not detected

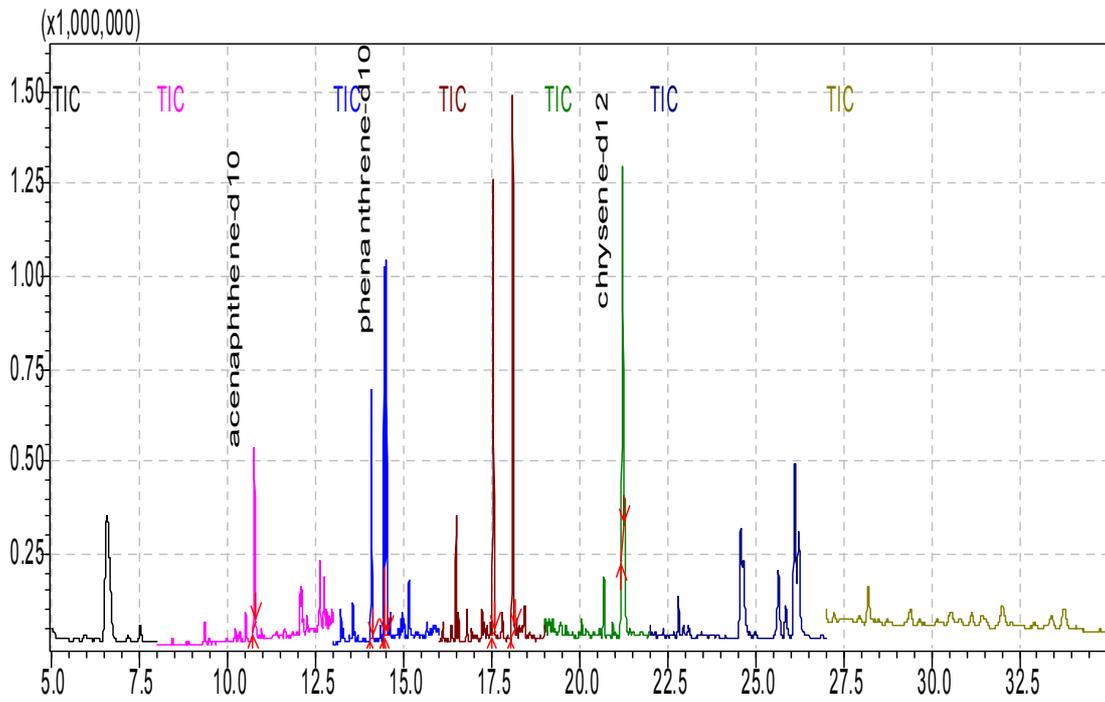


그림 7-11. 시설물 설치 후 송현 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.

<표 7-14> 시설물 설치 후 신덕 어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	TEQ
1	Naphthalene	66	1.1452	0.0184	0.0000
2	Acenaphthylene	151	1.8864	0.0056	0.0000
3	Acenaphthene	7452	1.1518	0.3774	0.0004
4	Fluorene	12365	1.3265	0.6381	0.0006
5	Phenanthrene	51408	1.1253	0.9235	0.0009
6	Anthracene	95377	1.1023	1.7219	0.0172
7	Fluoranthene	174628	1.0231	2.6270	0.0026
8	Pyrene	56954	1.0231	0.9537	0.0010
9	Benzo[a]anthracene	340	0.9012	0.0052	0.0005
10	Chrysene	62030	1.0568	0.9323	0.0093
11	Benzo[b]fluoranthene	127936	1.7568	1.4624	0.1462
12	Benzo[k]fluoranthene	123947	2.2356	1.3626	0.1363
13	Benzo[a]pyrene	0	1.3569	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	0	0.6569	0.0000	0.0000
15	Dibenz[a,h]anthracene	0	0.5832	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	0	0.6526	0.0000	0.0000
	SUM	712,654	18.9837	11.0280	0.3151

- ND: not detected

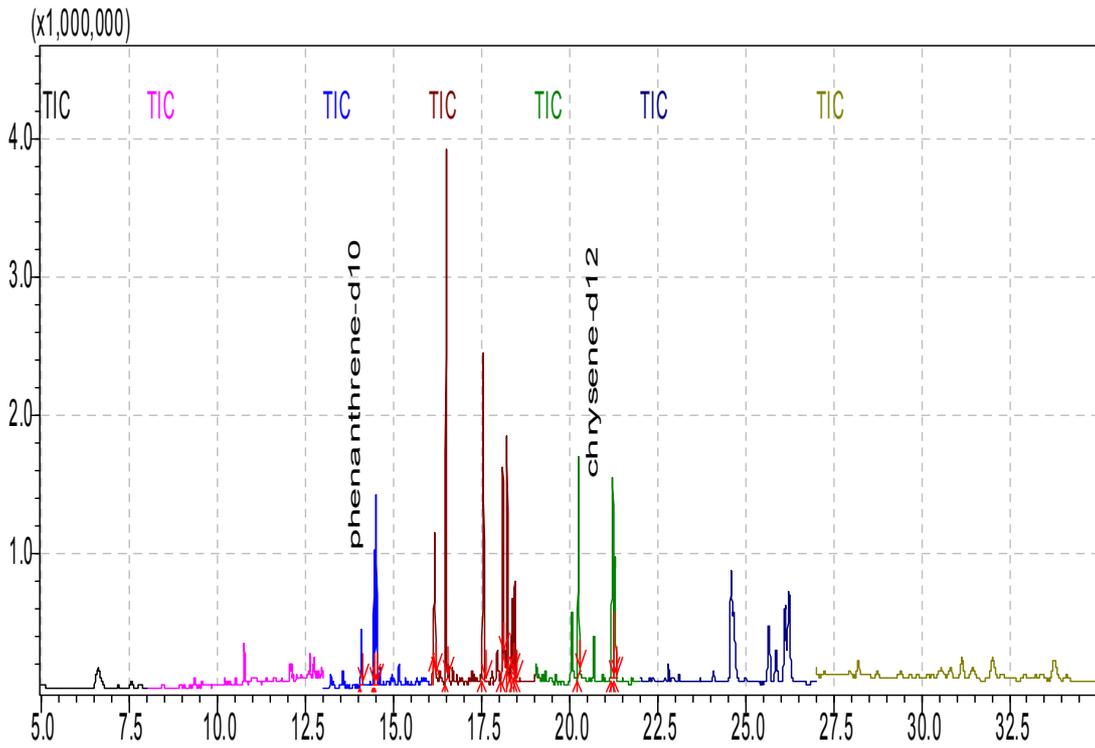


그림 7-12. 시설물 설치 후 신덕 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램.

<표 7-15> 시설물 설치 후 파도 어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs (μ g/kg)	TEQ
1	Naphthalene	1274775	1.1452	35.5728	0.0356
2	Acenaphthylene	3766	1.8864	0.0782	0.0001
3	Acenaphthene	12919	1.1518	0.3681	0.0004
4	Fluorene	10950	1.3265	0.3179	0.0003
5	Phenanthrene	6430	1.1253	0.1089	0.0001
6	Anthracene	15204	1.1023	0.2589	0.0026
7	Fluoranthene	6391	1.0231	0.0907	0.0001
8	Pyrene	8719	1.0231	0.1377	0.0001
9	Benzo[a]anthracene	90	0.9012	0.0015	0.0002
10	Chrysene	171	1.0568	0.0028	0.0000
11	Benzo[b]fluoranthene	5562	1.7568	0.1146	0.0115
12	Benzo[k]fluoranthene	107	2.2356	0.0021	0.0002
13	Benzo[a]pyrene	0	1.3569	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	0	0.6569	0.0000	0.0000
15	Dibenz[a,h]anthracene	0	0.5832	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	0	0.6526	0.0000	0.0000
	SUM	1345084	18.9837	37.0543	0.0511

- ND: not detected

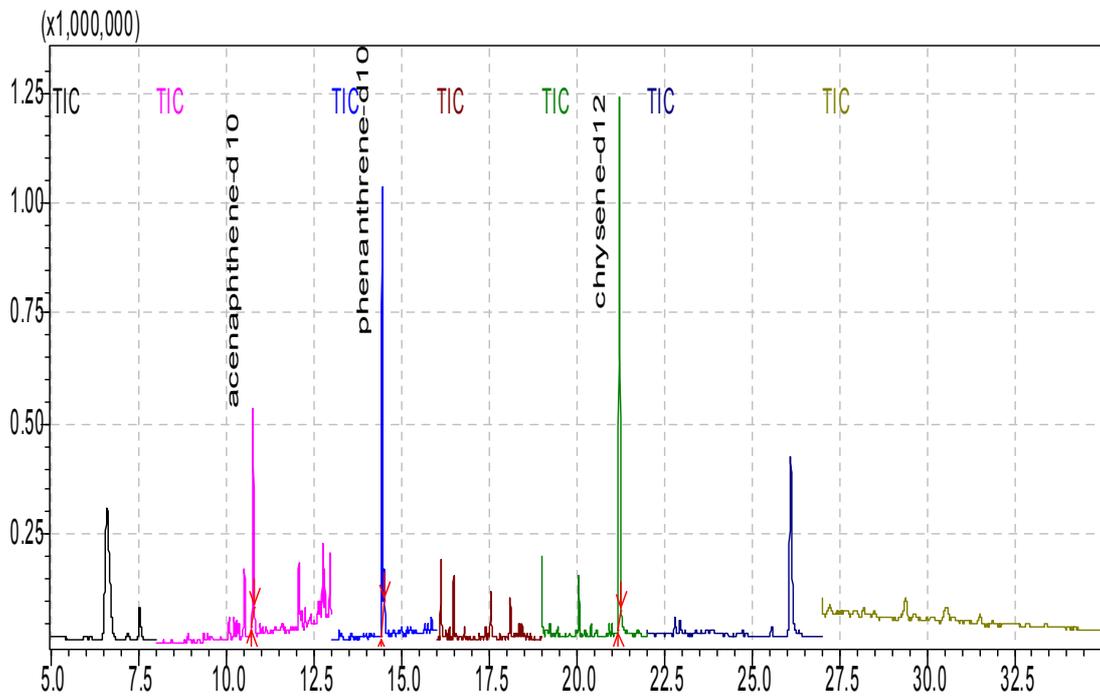


그림 7-13. 시설물 설치 후 파도 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램

<표 7-16> 시설물 설치 후 학암 어장 저질에 잔존하는 16PAHs농도와 TEQ 값

	Compounds	Area	Standard slop	16PAHs ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	TEQ
1	Naphthalene	32	1.1452	0.0011	0.0000
2	Acenaphthylene	402	1.8864	0.0095	0.0000
3	Acenaphthene	6810	1.1518	0.2205	0.0002
4	Fluorene	8480	1.3265	0.2797	0.0003
5	Phenanthrene	6564	1.1253	0.1288	0.0001
6	Anthracene	12986	1.1023	0.2561	0.0026
7	Fluoranthene	5338	1.0231	0.0877	0.0001
8	Pyrene	5974	1.0231	0.1093	0.0001
9	Benzo[a]anthracene	385	0.9012	0.0075	0.0007
10	Chrysene	98	1.0568	0.0019	0.0000
11	Benzo[b]fluoranthene	2148	1.7568	0.0399	0.0040
12	Benzo[k]fluoranthene	332	2.2356	0.0059	0.0006
13	Benzo[a]pyrene	0	1.3569	0.0000	0.0000
14	Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	0	0.6569	0.0000	0.0000
15	Dibenz[a,h]anthracene	0	0.5832	0.0000	0.0000
16	Benzo[g,h,i]perylene	0	0.6526	0.0000	0.0000
	SUM	49549	18.9837	26.6551	0.0541

- ND: not detected

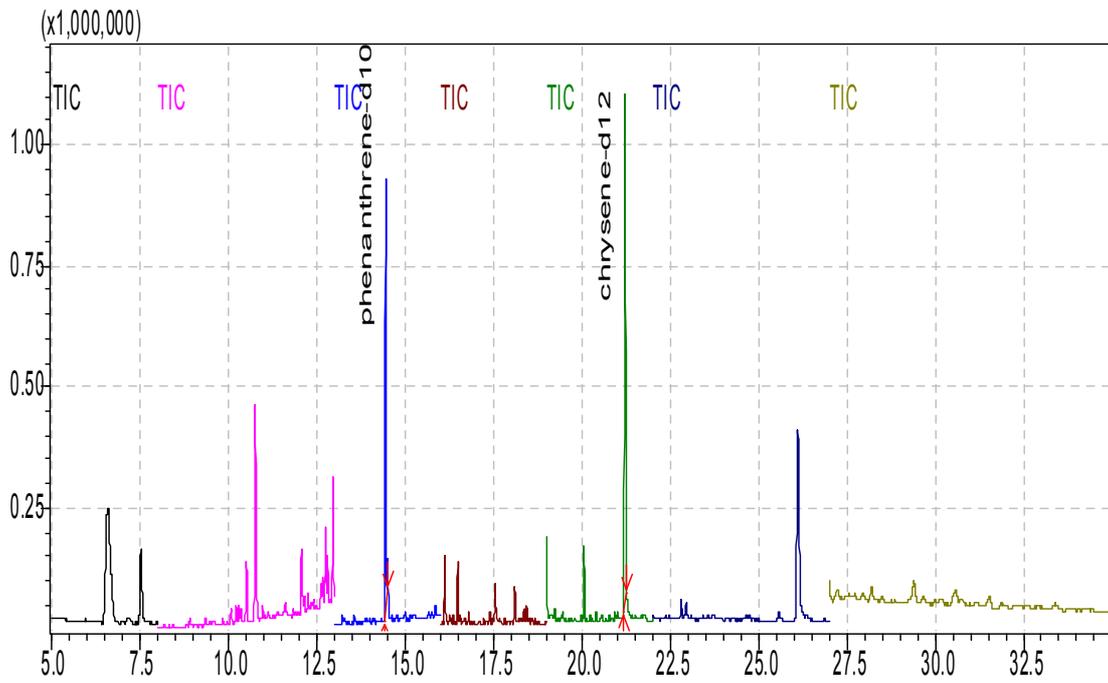


그림 7-14. 시설물 설치 후 학암 어장 저질의 16PAHs분석 GC/MS 총 이온 크로마토그램



그림 7-15.시설물 설치 전 각 어장의 16PAHs농도(ppb)와 TEQ 값.



그림 7-16.시설물 설치 후 각 어장의 16PAHs농도(ppb)와 TEQ 값.

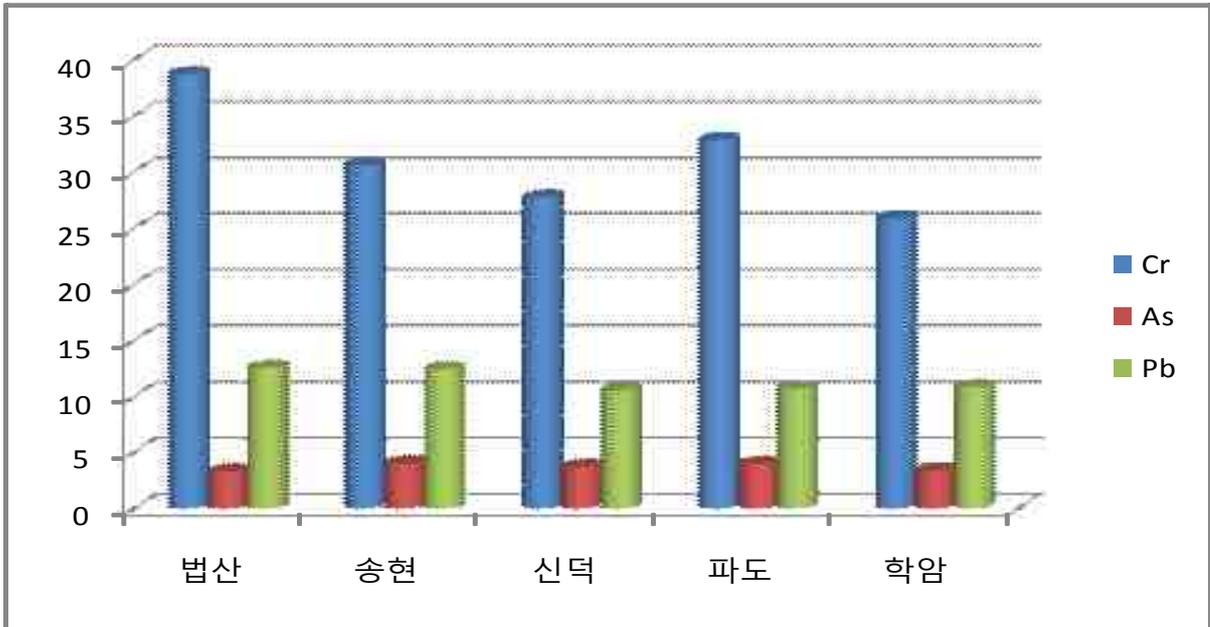


그림 7-17.시설물 설치 전 각 어장의 중금속 농도(ppm) 값.

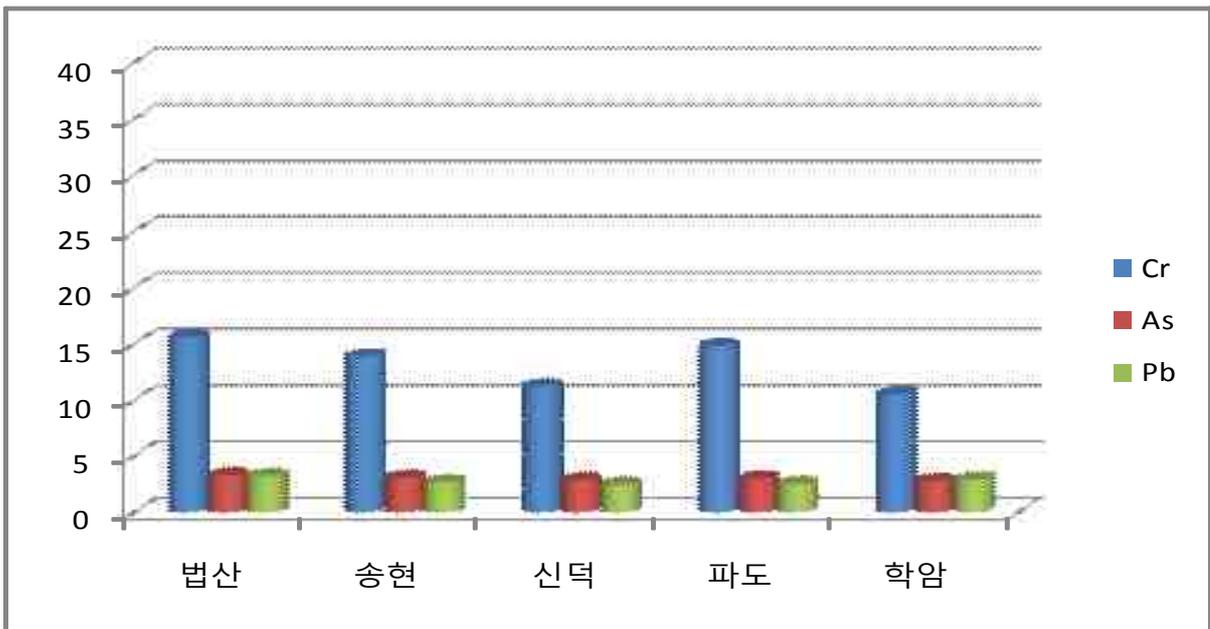


그림 7-18.시설물 설치 후 각 어장의 중금속 농도(ppm) 값.

6. 요약

본 조사에서 분석된 어장의 저질시료 16 PAHs 함량은 시설물 설치 전에는 13.56 ~ 51.61 ppb를 나타내었고 시설물 설치 후에는 11.03 ~ 37.05 ppb를 나타내 시설물 설치 후 전반적으로 16 PAHs 함량이 감소되는 경향을 보였다. 또한, 그 농도가 지역 특이적으로 크게 다르게 나타났다. 본 결과와 유사하게 태안의 가의도, 길음이, 고장동, 신진도, 안기리, 용신, 소근·의항2구, 팔봉 어촌계의 생물에서도 지역에 따라 16 PAHs 함량의 수십~수백 배 농도차가 확인되었다(부경대, 2009).

본 분석결과에서 나타난 16 PAHs 및 TEQ 함량의 차이는 사고당시 해당어장의 초기유류오염 정도의 차이에 따른 것과 본 조사가 사고 직후가 아닌 사고 후 약 29개월부터 착수되어 이 기간 동안에 지역별 방제활동 등의 영향으로 인해 본 조사의 농도수준이 확실적인 해당어장의 오염정도를 판단할 수 있는 기준으로 판단하기는 어려우나, 일반적으로 석유계에서 유출된 기름은 벤젠 고리의 일부가 치환된 형태로 존재하는 경우가 많은데, 이러한 형태는 PAHs가 석유로부터 유래되었다는 것을 나타낸다. 특히 원유에는 pyrene, chrysene, benzo[a]yrene과 같이 고분자량을 갖는 PAHs가 매우 낮은 농도로 존재하는데 고분자량의 PAHs는 주로 연소와 관련하여 발생하기 때문이다(Kingston, 2002). 유류유출사고 후 3년이 경과한 저질시료에서 PAHs 함량이 기준치 이하로 탐지되었다는 것은 지역별 방제활동에 의해 연안의 잔존유가 상당량 제거되었고 유화제로 바닥에 가라앉은 허베이 스피리트호 유류유출사고의 잔존유는 지속적으로 환경적 요인에 의해 자연분해되었다는 것을 의미한다.

본 조사팀의 물리 시뮬레이션 조사에 따르면 유류유출 후 20 ~ 30일이 경과하면 본 조사 대상지역인 태안의 모든 어촌계 및 이곳에 서식하는 생물이 유류오염에 노출된다는 점이 확인되었다. 본 조사에 앞서 시행된 선행조사에 따르면 서해안의 생태계 및 생물에서 탐지되는 유류는 허베이스피리트호에서 유출된 것임을 이종지수(C2D/C2P vs C3D/C3P) 및 유지문을 통해 증명되었다(국토해양부, 2009). 또한, 원유에는 바나듐(V), 니켈(Ni), 알루미늄(Al) 등 중금속도 함유되어 있다는 것이 밝혀져 있으나(국토해양부, 2009), 현재에는 거의 잔존하지 않는 정도로 확인되었다.

어류의 경우 이동성과 더불어 석유 성분을 생체 대사과정 중에 생체 물질로 변

환시킬 수 있는 효소(mixed function oxynase, MFO)를 이용해 석유에 함유된 PAHs를 빠르고 효과적으로 생화학적 변환이나 대사산물로 변환시켜 최종적으로 담즙으로 배출시키는 반면(Varanasi et al., 1989), 패류를 포함한 무척추동물은 석유화합물을 느리고 비효율적으로 대사함으로서 생체내의 다양한 분자량의 PAHs가 고농도로 축적된다(Law and Hellou, 1999). 어류 체내에서 상대적으로 분해가 빠르며, 갑각류, 패류로 갈수록 분해 능력이 떨어져 체내 잔류기간이 길어지는 사실은 본 분석자료에서도 확인되었고, 아울러 생물의 대사능력으로 인하여 체내 잔류 PAHs 농도가 빠르게 감소한 것으로 판단된다.

제 8장. 양식장 환경 개선방법별 효과 조사

1. 연구개요

연안에 서식하고 있는 바지락이 대량 폐사할 경우 어민 경제에 심각한 영향을 줄 수 있다. 바지락 폐사에 대한 생태학적, 병리학적, 어장 환경에 대한 조사가 이루어진 바 있으나 현재까지의 연구 성과는 미약한 실정이다. 바지락의 폐사 원인은 유기물 부하의 증대, 연안토목공사에 의한 물리적 환경변화, 유류 피해, 빈산소, 황화수소, 부유토사, 바지락포자충, *Perkinsus sp.* 등의 여러 요인에 의해 발생되고 있다.

본 연구에서는 유류피해 및 노화 어장에 대한 양식장 환경 개선방법별 효과조사(생산성)를 실시하여 어장환경 개선 프로그램 개발에 기초적 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 조사방법

본 조사는 각 양식장 어장의 환경을 경운, 객토, 저질개선제 등을 이용하여 각각의 방법을 복합적으로 구분하여 어장별로 개선한 후 단위 면적당 일정한 치패를 살포한 후 연구어장의 환경 개선 방법별 분기별 성장도와 밀도, 생존율을 분석하여 자원량을 파악하였다.

파도어촌계는 우선적으로 지원하여 2010년 11월 바지락 종패(평균각장 11.43 mm)를 단위면적당 약 200개체를 살포하였으며, 타 연구어장은 어촌계 협의과정 후 2011년 5월에 평균각장 24.84mm의 바지락 종패를 파도어촌계와 동일하게 단위면적당 약 200개체 살포하여 성장과 생존율을 조사하였다.

현장조사는 간조시에 연성저질에 서식하는 바지락을 총 10개 정점에서 조사하였고, 채집은 방형구(100cm×100cm)를 사용하여 조사하였다.

분포, 서식면적 및 현존량을 파악하기 위하여 정점에서 무작위 층별 채집법(Elliott, 1983)을 이용하였다. 각 정점의 크기는 1㎡로 설정하고, 선택된 정점에서 출현한 개체를 전량 채집하였다.

표본의 처리는 현장과 실험실에서 vernier calipers로 각장, 각고, 각폭을 0.1mm

단위까지 측정하고, 종량은 0.1g 단위까지 측정하였다. 단위면적(m²)당 개체수와 습중량을 측정하여 평균 밀도를 구하였고, 종 단위까지 동정·계수한 자료를 사용하였다.

2.1. 현존자원량 추정

2.1.1. 자원량의 변동

수산동물의 양식어업에서 수산생물이 t_r 세에 종묘로서 어장에 이식과정을 거쳐 성장한 후 t 세가 되었을 때의 현존량을 B_t , 생존개체수를 N_t , 생존개체의 평균체중을 W_t 라 하면,

$$B_t = N_t \cdot W_t \quad (8.1)$$

이 된다.

어장에 이식된 수산생물은 수확되기까지 나이를 먹음에 따라 다른 동물의 식해, 부적환경 등의 자연요인에 의하여 사망하므로 생존개체수는 감소하고, 한편 살아남는 개체는 성장에 의하여 그 체중이 증가한다. 따라서 B_t 를 구하려면 어장에서 관리기간의 경과에 따라 N_t 와 W_t 의 변화를 알아야 한다.

먼저 N_t 에 대하여 보면 살아있는 개체는 많으면 많을수록 단위시간에는 죽는 개체수도 많을 것이므로, t 시간이 경과에 따라 기하급수적으로 감소한다고 가정할 수 있다. 따라서, 양성기간에 있어서 순간자연사망계수를 M 이라 하면,

$$\frac{dN_t}{dt} = -M \cdot N_t \quad (8.2)$$

의 식이 성립된다. 종묘이식 개체수를 N_r 이라 하면, t_r 세에 이식된 종묘가 t 세가 되었을 때의 생존개체수 N_t 는

$$N_t = N_r \cdot e^{-M \cdot (t - t_r)} \quad (8.3)$$

이 된다.

다음 W_t 는 앞에서 설명한 von Bertalanffy(1938)의 성장식을 사용할 수 있다.

$$W_t = W_\infty \cdot (1 - 2^{-K(t-t_0)})^3 \quad (8.4)$$

이상과 같이 연령의 증가에 따른 N_t 와 W_t 의 변화를 나타내는 식 (8.3)과 식 (8.4)를 식 (8.1)에 대입하면

$$B_t = N_r \cdot W_\infty e^{-M(t-t_r)} \cdot (1 - e^{-K(t-t_0)})^3 \quad (8.5)$$

이 된다.

2.1.2. 평균연간생산량의 산정

양식어업에서의 평균연간생산량은 양식생물자원이 수확연령에 도달하면 일시에 수확을 하게 되는 수확량을 의미한다. 수확연령을 t_c 라 하고, t_c 세에 도달한 생존개체수를 모두 수확한다면 수확량 B_c 는 식 (8.5)에 의하여

$$B_c = N_r \cdot W_\infty \cdot e^{-M(t_c-t_r)} \cdot (1 - e^{-K(t_c-t_0)})^3 \quad (8.6)$$

이 식을 다르게 표현하면

$$B_c = B_r \cdot e^{-M(t_c-t_r)} \cdot \frac{W_c}{W_r} \quad (\because B_r = N_r \cdot W_r)$$

이 된다.

여기서 B_r 은 종묘의 이식량이며, W_r 과 W_c 는 각각 이식종묘 및 수확개체의 평균체중을 가리킨다. 식 (8.6)에서 B_c 는 수확량을 종량으로 추정할 것이다. 만약, 수확량을 개체수 N_c 로 추정한다면 식 (8.3)에 의거하여

$$N_c = N_r \cdot e^{-M(t_c-t_r)} \quad (8.7)$$

이 된다. 평균연간생산량 Y 는 양성기간을 ϕ 년이라 하여

$$Y = \frac{B_c}{\Psi} \quad (8.8)$$

$$Y = \frac{N_c}{\Psi} \quad (8.9)$$

에 의하여 추정하였다.

2.1.3. 피라미터의 추정

연간어업생산량을 추정하기 위하여는 양식 대상생물의 중요이식마리수 N_r , 중요연령 t_r , 수확연령 t_c , 순간자연사망계수 M 및 von Bertalanffy의 성장피라미터 (K, W_∞, t_0) 를 알아야 한다.

1) 중요이식마리수 (N_r)

중요이식마리수는 먼저 어업자가 제시하는 중요이식실적과 증빙자료를 검토하여 추정한다. 어업자가 제시한 중요이식마리수를 N_r 이라 하면, 피해사고가 없이 정상적으로 관리될 경우에 이로부터 예상되는 t 세의 현종량 N_t' 은

$$N_t' = N_r' \cdot e^{-M(t-t_r)} \quad (8.10)$$

가 된다. 만약 어업자가 중요이식종량 B_r' 을 제시한 경우는

$$N_r' = \frac{B_r'}{W_r} \quad (8.11)$$

에 의해 중요이식의 개체수를 환산한다. 그리고 이식면적을 A 라 하면 t 세가 되었을 때의 이식밀도 d_t' 는

$$d_t' = \frac{N_t'}{A} \quad (8.12)$$

가 된다. 한편, 조사자가 양식어장에서 n개의 조사정점을 설정하여 방형구법으로 실시한 이식밀도의 평균치와 표준오차를 각각 d_t 및 s_t 라 하면, 귀무가설을 ‘보고된 종묘이식밀도는 현장조사에 의한 종묘이식밀도와 같다’고 세우고 다음과 같이 Student's t-test에 의해 검정을 실시한다. 즉,

$$t_s = \frac{d_t - d_t'}{S_t} \quad (8.13)$$

식 (8.12)에 의거하여 t_s 를 계산한 결과, $\text{abs}(t_s) < t_{0.05, n-1}$ 이면 어업자의 주장은 기각될 수 없으며, 어업자의 주장을 인정한다. 그러나, $\text{abs}(t_s) < t_{0.05, n-1}$ 이면, 5%의 유의수준에서 “종묘이식마리수는 N_r '이다” 라고 하는 검정가설(즉, 어업자의 주장)을 기각하고 “종묘이식마리수는 N_r '에 못 미친다”라고 하는 검정가설(즉, 어업자의 주장)을 기각하고 “종묘이식마리수는 N_r '에 못 미친다”라고 하는 대립가설을 채택하여 다음의 식에 의하여 종묘이식개체수 N_r 또는 종묘이식중량 B_r 을 추정하였다.

$$N_r = d_t e^{M(t-t_r)} \cdot A \quad (8.14a)$$

$$B_r = d_t e^{M(t-t_r)} \cdot A \cdot W_r \quad (8.14b)$$

2) 종묘연령(t_r)

이식종묘의 연령 t_r 은 어업자가 제시하는 종묘표본 또는 어업실적조사에서 이식종묘의 크기를 확인하여 추정하였다. 종묘의 길이 l_r 로부터 종묘연령은

$$t_r = t_0 - \frac{1}{K} \ln \frac{L_\infty - l_r}{L_\infty} \quad (8.15)$$

에 의하여 추정하였다.

3) 수확연령 (t_c)

어업실적조사에서 관리기간 λ 를 확인하고, 확인된 관리기간을 이미 추정된 종묘연령에 가산함으로써 수확연령을 추정하였다.

4) 성장파라미터

성장파라미터는 연령별 체장이나 체중자료를 이용하여 Walford(1946) 정차도법에 의하여 추정하였다(장, 1991).

5) 순간자연사망계수 (M)

순간자연사망계수는 자료의 이용가능도에 따라 다양한 방법을 이용하여 추정할 수 있다. 예로, 성장계수 K 와 최고연령을 알 수 있을 경우에는, Alverson and Carney(1975) 방법을 사용하여 구할 수 있다. 순간자연사망계수는 장기간에 걸친 어업실적에 의거하여서도 추정될 수 있다. 즉, 평균종묘이식마리수 N_r 와 평균성체 수확개체수 N_c 를 확인하여

$$M = \frac{\ln \overline{N_r} / \overline{N_c}}{t_c - t_r} \quad (8.16)$$

에 의하여 추정이 가능하다. 그리고, 종묘이식 후 또는 조사개시 후 채취가 시작되기 직후까지 일정 시간간격을 두고 단위면적당 생존수를 정확하게 확인할 수 있는 경우에는, $N_t = N_o e^{-(M+F)t}$ 로부터 유도되는 다음의 식

$$\ln N_t = \ln N_r - M \cdot (t - t_r) \quad (8.17)$$

에 의거하여 $(t-t_r)$ 과 $\ln N_r$ 간의 직선회귀식을 최소자승법으로 구해서 그 기울기의 절대치를 순간자연사망계수로 추정하였다. 생산주기 (양성기간)는 다음과 같이 추정하였다.

$$\phi = t_c - t_r \quad (8.18)$$

따라서 조사지역내 패류의 현존량을 추정하기 위해 채취 정점별로 서식면적 (m^2)를 구한 후 정점별 평균 개체수 밀도에 서식면적을 곱하여 전체 개체수를 추정하였고, 이 개체수에 평균중량을 곱하여 자원량을 추정하였다. 즉, [자원량 = (평균 개체수 밀도 \times 서식면적) \times 개체 평균중량 또는 자원량 = 서식면적(m^2) \times m^2 당 평균중량]. 이다.

3. 조사 결과

본 조사는 연구어장의 환경 개선방법별 현존량 및 성장도, 생존율을 파악하기 위하여 유용생물의 생태, 단위면적당 생산량, 생존율 등을 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같았다.

3.1. 바지락(*Tapes philippinarum*)의 일반 생태

3.1.1. 바지락 양식의 역사

바지락 양식은 경기도 연안의 간석지에서 1912년 시작했다고 알려져 있다. 그 후 1918년에는 굴과 혼합하여 수면적 257,225㎡에 양식을 실시하였다. 우리나라에서 생산되고 있는 바지락류에 속하는 종류로 바지락(*Tapes philippinarum*)과 가는줄바지락(*Tapes variegata*)의 두 종이 있는데, 이들은 구별하지 않고 같이 취급되고 있다(류, 1995).

바지락 양식 생산량은 1932년에 2.8톤, 1942년에 355.6톤으로 1930년까지는 그 생산량이 아주 미비하였으나, 그 이후 생산량은 점점 증가하는 추세를 보여 1962년에는 2,800톤이던 것이 1964년까지 급격히 그 양식고가 증가되어, 1990년에는 최대치를 기록하였으나 최근에는 감소하여 15,000톤 내외의 생산량을 보였다. 바지락은 패류 중에서는 굴과 담치류 다음으로 그 양식 생산량이 많다. 바지락은 국내에서 일반적으로 소비되는 것 외에, 최근에 와서는 통조림 원료로서 그 수요가 급격히 증가되고 있다. 특히 새우 양식에 있어서 사료로 많이 이용되고 있기 때문에, 앞으로 새우 양식의 발달에도 중요한 역할을 담당할 것이다.

3.1.2. 종류와 분포

베누스류(Veneridae)에 속하는 종류 수는 세계적으로 56종이 알려져 있는데, 우리나라에서는 22종이 분포하고 있는 것으로 알려져 있다. 바지락속(*Tapes*)에는 바지락(*T. philippinarum*)과 가는줄바지락(*Tapes variegata*)의 두 종이 속해 있다(류, 1995).

바지락은 가는줄바지락에 비해 다소 대형인 편이고, 패각 바깥쪽이나 안쪽의 색채도 약간 다르며 방사능과 성장맥이 교차해서 만드는 포목상(布目床)도 조금씩 다르다. 그러나, 바지락류는 형태적 변이가 심하기 때문에, 이와 같은 몇 가지로서 쉽게 종을 구별할 수는 없다.

한편, 입수관과 출수관의 분지 상태인 수관의 모양이나 입수관 구연부에 있는 촉수의 구조는 명확히 다르다. 바지락은 촉수의 돌기가 없이 간단하고 가는줄바지락은 분지한 돌기가 있어 복잡한데, 이것은 이들이 서식하고 있는 환경조건을 반영한다. 바지락은 내만성인데 비해, 가는줄바지락은 외해의 영향을 많이 받는 곳에 주로 많이 살고 있다. 따라서 가는줄바지락은 해수의 유동이 많은 곳에서도 모래나 기타 부유물이 입수관 안으로 해수와 함께 섞여 들어가는 것을 막는데 아주 잘 적응되어 있다.

바지락은 우리나라의 전 해안에 분포하고 있으나 서해안에 특히 많다. 분포는 간석지의 지반이 비교적 높은 데서부터 수심이 10여 m 되는 데까지 살고 있다.

3.1.3. 생태

가. 성숙과 방란·방정

바지락의 성숙은 수온에 따라서 좌우되기 때문에 서식하는 장소에 따라 달라진다. 서해안에서는 6월 중순부터 9월경이고, 성기는 7~8월이다. 남해안에서는 5월 하순에서부터 11월 상순이고, 6월 중순부터 8월 하순이 성기로서, 최초의 방란·방정시에 대부분이 방란·방정을 마친다.

일반적으로 방란·방정은 남쪽보다는 북쪽으로 갈수록 짧고 최초의 방란·방정 시기가 늦어진다. 성숙하는 최소 성체의 크기는 북쪽의 평안도 연안산은 큰 편이고 남해안산은 작은편이다. 성숙한 어미의 생식소 색은 다른 종류에서 보는 바와 같이 명확하지는 않으나, 수컷의 생식소는 다소 광택이 있고, 암컷의 생식소는 다소 황갈색의 반점이 있어서 암수의 구별은 가능하다.

나. 발생과 치패

바지락의 발생은 수온 22℃인 경우 수정한 후 5시간만에 섬모가 생겨 회전 운동이 시작되고, 수정 후 10시간이면 담륜자 유생으로 된다. 수정 후 22시간 경과하면 몸에 패각이 완성되어 D형 유생으로 된다. 수온이 21~23℃일 때 수정 후 2~3주가 지나면 각장 200~230 μ m(각고 190~220 μ m)가 되어 부유 생활을 마치고 저서 생활로 들어간다(吉田, 1935).

저서생활로 들어가면 가느다란 족사로 모래나 다른 고형물에 일시적으로 부착한다. 이러한 족사는 성장함에 따라 차차 퇴하 되지만, 때때로 각장이 30mm이상

되는 것도 죽사으로써 다른 물질에 부착해 있는 것을 볼 수 있다. 해수의 유동이 심한 곳일수록 대형 개체가 되더라도 죽사으로써 부착 생활을 하는 경우가 많으며, 해수의 유동이 적은 곳이면 각장 9mm정도의 크기일 때부터 그 기능이 없어진다(吉田, 1953).

저서생활로 들어간 치패는 저질의 지반 변동으로 저질에 묻혀 폐사하는 경우도 있지만, 간석지에서는 여름철 고온과 저질의 호흡량에 영향을 크게 받는다.

치패의 발생량이 많았던 경우에는 m^2 당 62만 개체나 되는 예도 있다. 그러나 일반적으로 1년 후에는 그 서식량은 3%로 급격히 줄어든다.

다. 성장과 이동

바지락 치패의 초기 성장은 각장 0.22mm정도로서 부유 생활을 마친 치패는 20일이 경과한 후 0.45mm, 한 달이 경과한 후는 0.86~0.89mm로 된다. 곳에 따라서는 봄에 초기 치패가 바닥에 모이는 양이 아주 적은데, 대량으로 발생한 경우라도 곧 소실해 버린다.

가을 치패는 다음 해 3월까지의 성장이 아주 늦지만, 3월 이후에 다시 성장이 아주 빨라지다가 6월 이후에는 다소 늦어진다.

즉, 착저한 다음 4개월 후인 4월 상순에 평균 각장이 1mm이던 것이 6개월 후에는 10mm로 되고, 만 1년 뒤에는 27mm로 된다.

이상의 결과들을 종합해 보면, 늦가을에 발생한 치패는 겨울에는 성장이 거의 정지되고, 이듬해 봄까지는 성장이 늦기 때문에 봄에 발생한 치패 중에서 성장이 빠른 것과는 크기로 구별하기 힘들다. 바지락은 양성장에 표지 방류해서 40일이 지난 다음 조사함 결과로는 거의 이동하지 않고, 각장 5mm정도 되는 치패는 활발한 운동을 하나 1개월 간에 직선 거리로 6m정도 이동하였다(吉田, 1967). 이와 같이 바지락은 비이동성 동물이라는 것을 알 수 있다.

라. 환경에 대한 저항성

바지락은 온도에 대한 저항성이 강해서 고온인 37.5℃, 40℃, 42℃ 및 44℃에서의 평균 생존 시간은 각각 10.4시간, 5.3시간, 1.5시간 및 0.6시간이고(각장 0.20~0.23mm의 초기 치패는 37℃에서 2~8시간, 40℃에서 1~4시간), 저온인 경우에는 치사 온도가 -2℃이하이다.

이와 같이 지반이 높은 간석지 외의 일반 서식장에 있어서는 수온에 제약을 받는 일은 없다고 할 수 있다. 또, 먹이섭취에 관계하는 아가미 섬모 운동은 23℃에 가장 왕성하고 0℃와 36℃에서 정지한다. 해수 비중이 1.018~1.027 사이에 있어서는 생존에 아무런 이상이 없으며, 담수 중에서도 폐각해서 2~3일 정도는 생존한다(각장 0.2~1.0mm인 초기 치패는 1~8시간만에 죽는다). 또, 계속 담수 중에 있다 하더라도 하루 사이에 짧은 시간만 해수 중에 넣었다 옮기면 생존에 큰 장애는 없었다.

일반 서식장에서는 태풍, 기타 이상 시기 외에는 염분에 따라 생존에 제약을 받는 일은 없다고 할 수 있다. 그러나 서식장의 지반이 불안정한 곳은 바지락이 오래 살 수 없다. 저질의 입자 조성은 패각의 형태에 영향을 미치고, 저질이 흑색인 환원층에 사는 바지락은 조가비의 색깔이 달라지며, 또 저질의 단단하기는 바지락의 잠입 깊이에 관계된다. 간출 시간이 대체로 1~5시간 정도 되는 장소에 바지락의 치패나 성패가 많고, 5시간 이상 되는 곳에서도 알맞은 수분량만 있으면 지장이 없다. 일반적으로 노출 시간이 3~5시간 이상이 되면 성장이나 육질의 비만이 나빠진다. 용존산소의 결핍에 대한 저항성은 상당히 강해서 l 당 1 ml 이상 되는 해수 중에서는 이상 없이 살 수 있고, l 당 0.5 ml 이하인 상태가 계속되면 4~5일 후에 장애가 일어나고 약 10일이 지나면 폐사한다(류, 1995).

마. 서식장

바지락의 치패가 많이 발생하는 곳은 하천수의 유입으로 인한 육수의 영향을 받는 간석지를 중심으로 한 수역이다. 일반적으로 발생장은 해수의 유동이 지나치게 심하지 않고 지형적, 해황적으로 해수가 정체하기 쉬운 곳으로서 개흙질이 적은 곳이다.

노출 시간이 5시간 이상 되는 지반이 높은 곳은 특수한 경우를 제외하면 발생치패량이 아주 적다. 치패는 하구 가까운 곳에 많이 발생하지만, 이와 같은 곳은 지반 변동이 일어나기 쉬운 곳이다. 따라서 치패가 많이 발생한다 하더라도 대부분의 경우 1년 후에는 그 서식량이 급격히 줄어든다. 이 때문에 대량 발생한 치패를 서식하기에 알맞은 곳으로 옮겨 주는 것이 필요하다.

성패의 서식 적지는 앞에서 언급한 바지락의 생태 및 환경에 대한 저항성으로부터 다음과 같은 점들을 들 수 있다. 육수의 영향을 받는 파도가 조용한 내만으

로서 태풍, 홍수 등에 의한 지반 변동이 거의 없는 곳이 알맞은 장소이다. 또한 썰물시 2~3시간 노출되는 곳부터 수심 3~4m 사이로서 지반이 안정되어 있으며 해수의 유통이 좋고 환원층의 발달이 적으며 먹이생물이 많은 곳이다. 이와 같은 곳은 성장이 빠른 장형의 바지락을 양식 생산할 수 있다.

우리나라에 있어서 바지락이 많이 생산되는 곳은 전라도, 충남, 황해도 및 평안도 등 서해안이며, 전국 양식고의 약 90% 이상을 차지한다. 최근에는 연안역의 매립과 간척에 따라 양식장이 많이 사라지고 있으나, 전라북도의 곰소만에서는 대규모 바지락 양식이 개흙질 및 저질 등과 더불어 지반의 변동이 있는지의 여부, 지반이 높은 곳은 간척지의 흡수량 등에 따라 양식장으로서의 가치가 달라진다.

북쪽의 평안도 관포에서는 한 겨울에 간조 때 노출된 다음 간척지가 얼어 저질이 바지락과 함께 만조가 되면서 수면에 떠오르는 경우가 있어 피해가 심하다고 알려져 있다.

3.1.4. 종묘생산

가. 채묘

바지락은 유생시기 때 부유 생활을 마친 다음 바닥에 착저 할 때는 족사로 부착 생활을 하다가 잠입 생활로 들어간다. 그러나 부착 생활 기간 동안은 저면의 모래에 아주 작은 족사로 부착하고 몸을 지지하는데, 이 족사의 부착력이 약하기 때문에 부착기에 부착시켜 채묘 한다는 것은 불가능하다.

자연에 있어서 치패가 많이 발생하는 곳은 방파제 부근이나 하구의 삼각주 또는 간척지의 쇄발 부근 등과 같이 와류가 생기거나 흐름이 완만한 곳이다. 조선 총독부 수산시험장에서는 해수의 흐름이 빠르고 지반이 불안정한 곳에다 나뭇가지, 목책, 암석, 시멘트 블록 등을 설치하여 심한 해수의 흐름을 완화시켜서 바지락 채묘를 시험했다(太田, 1946).

해수의 흐름을 조절해 주는 방법으로는 제방식, 쇄꽃이식 등 여러 가지가 있지만, 현실적으로 가장 쉽게 많이 사용하는 것은 쇄꽃이식이다. 바지락 채묘는 부착기에 부착시켜 채묘 할 수 없기 때문에 치패가 바닥에 모일 수 있도록 도와주고, 그들의 유실을 방지해서 치패를 생산해야 한다.

간척지에 나뭇가지나 대나무 등을 세워 주거나 기타 방법으로 해수의 흐름을 완만하게 조절해 주어 치패들을 많이 바닥에 가라앉혀 채묘하는 것을 완류식 채묘

라한다. 완류식 패묘의 효과는 성숙 부유 유생의 수를 비롯하여 지형이나 해황에 따라서 다르지만, 일반적인 경우 그 발생량은 완류식 시설을 하지 않은 대조구에 비해 1.5~15배나 많은 것으로 알려져 있다.

나. 치패의 관리

치패가 많이 발생하는 곳은 일반적으로 하구 가까이인데, 이러한 곳의 지반은 변동하기 쉬운 곳이다. 지반 변동이 심한 곳은 바지락이 발생한다 하더라도 곧 많은 양이 폐사하게 된다. 즉, m^2 당 수십만 개체 이상 발생되었다 하더라도 1년 후에는 얼마 남지 않는다(생존율 약 3%).

그러므로 바닥에 모인 치패의 유실을 방지하는 문제는 종묘 생산에 있어서 대단히 중요하다. 그래서 대량 발생한 치패를 옮기는 장소는 무엇보다도 지반의 변동이 없는 안전한 곳이어야 하고, 언제나 해수 중에 잠기는 곳으로서 수심이 10m 이상 깊은 곳이나 간석지와 같은 곳이라도 간출한 다음 해수가 괴어 있는 곳 등이다. 개흙질이 많은 곳은 성장 과정 중에 지반 변동, 기타 원인으로 폐사율이 높기 때문에 좋지 않다.

모래나 조가비 등이 차지하는 비율이 40% 이상 되는 곳은 치패가 족사로 부착해서 정상적인 생육을 한다. 개흙질이 많은 곳에다 치패를 옮겨야 할 경우에는 모래를 살포해야 한다. 바닥에 부착된 치패를 이식해서 관리할 경우, 그 밀도가 지나치게 크면 성장에 좋지 않기 때문에 m^2 당 5,000~10,000개체 정도가 알맞다. 종묘로서는 장형인 것이 좋기 때문에 치패를 잘 관리해서 이와 같은 형태를 만들어야 한다.

치패 관리에 있어서는 중요한 것은 식해동물인 물새무리, 어류, 게류, 고동류 및 불가사리 등에 의한 피해를 막는 일이다.

3.1.5. 양성

바지락의 양성법은 바닥 양성으로서, 알맞은 양성장에 종묘를 방양해서 수확시까지 양성 관리하는 일이 중요하다.

가. 종묘의 양성

종묘는 될 수 있는 대로 장형을 골라야만 방양한 후에 성장이 빠르다. 종묘의 크기는 작은 것일수록 성장이 빠르는데, 각장이 15~22 mm 내외인 것이 알맞다. 치패는 활발한 운동을 하기 때문에 너무 작은 것은 좋지 않고, 각장이 15mm 이상 되면 거의 이동하기 때문에 종묘로서 알맞다. 양성장, 즉 종묘 방양 장소는 간출 시간이 짧을수록 성장할 수 있는 시간이 길기 때문에, 간출되지 않는 곳을 중심으로 하는 것이 좋다. 종묘를 방양하는 시기는 성장이 시작되는 봄이 가장 좋으나 경우에 따라서는 가을에 할 수도 있다. 방양에 사용할 종묘를 원거리 운송할 때에는 기온이 10~15℃ 되는 때가 알맞다.

종묘를 양 성장에 방양하는 방법에는 석시법과 조시법등이 있는데, 석시법은 간출된 다음 종묘를 방양하는 방법으로서 고르고 정확하게 방양할 수 있으나 일손이 많이 들고, 조시법은 만조시의 정조시에 배를 사용하여 종묘를 방양하는 방법으로 아주 편리하지만 뜻대로 고르게 방양할 수 없다.

이와 같은 장단점을 고려해서 만조시에 배를 사용하여 군데군데 종묘를 운반해 두었다가 간출한 다음 종묘를 방양하는 것이 편리할 것이다. 종묘의 방양 밀도는 양 성장의 조건에 따라서 다르나 m^2 당 1~3ℓ 내외의 밀도로 방양하면, 만 1년이 지나면 각장은 1.5~2.4배, 중량 4.2~20.2배로 되어 수확할 수 있는 크기로 성장한다. 만약 m^2 당 3ℓ 이상 방양하게 되면, 패각은 후단부가 굽어지고 성장이 나쁘며 생존율이 낮아진다.

나. 치패의 염분에 따른 생존율 및 잠사능력

바지락 인공종묘의 양식 산업화를 위해서는 인공 생산된 치패의 수송과 살포방법에 관한 연구가 산업화에 앞서 필수적으로 수행되어야 하는 중요한 기술들이다.

인공종묘로 생산된 평균 각장 $2.9 \pm 0.5\text{mm}$ 의 치패를 염분내성 실험 결과, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 및 40psu에서 사육 5일째 생존율은 각각 8.3, 68.0, 95.3, 98.0 97.0 및 92.3%로 나타났으며 5psu에서는 전량 폐사를 한다.

치패 크기별 잠입시험 결과, 치패의 크기가 클수록 노출시간과 높은 기온에 대한 내성이 강한 경향을 보였고, 생존율도 높게 나타났다.

3.2. 연구어장의 환경 개선방법별 성장도

본 조사에서 선정된 바지락의 경우 상기에서도 언급한 바와 같이 어민 소득에 가장 광범위하게 알려져 있고, 광온성과 광염성으로 환경에도 매우 강한 종 중 하나이다.

따라서 본 조사에서는 과거 바지락이 서식하였으며, 유류피해 어장 및 노후화된 어장을 중심으로 환경 개선방법별 바지락의 성장도 및 생존율을 조사하여 개선 효과를 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같았다.

3.2.1. 모래살포 후 객토

저질에서 5cm 높이로 모래살포 후 객토를 실시한 송현 어촌계에 평균각장 24.83mm의 바지락을 단위면적당 200개체를 살포하였으며, 살포 후 2개월 후 성장률은 각장이 20.70%, 중량이 121.43%의 증가율을 보였고, 파도어촌계의 경우 각장이 6.87%, 중량이 4.13%의 성장률을 나타내었다(그림 8-1).

3.2.2. 경운

연구어장 중 자연상태의 저질을 뒤엎는 경운만으로 어장을 개선시킨 법산어촌계의 경우 살포한 바지락의 성장률이 각장의 경우 25.94%, 전중량은 97.37%를 나타내었다(그림 8-2).

3.2.3. 저질개선제 살포 후 객토

유류피해가 가장 많이 피해를 받은 학암포 어촌계의 경우 저질 상태가 모래질이었으나, 바지락이 분포하지 않은 지역으로 저질개선제를 살포한 후 객토를 한 성장률의 결과 각장이 11.32%, 전중량이 56.02%를 나타내었다(그림 8-3).

3.2.4. 모래 및 저질개선제 살포 후 객토

신덕어촌계 및 파도어촌계에 모래 및 저질개선제 살포 후 객토한 연구어장에 투여된 바지락의 성장율은 신덕의 경우 각장이 27.79%, 중량이 17.67%를 나타내었고, 파도리의 경우 각장이 12.98%, 중량의 경우 14.56%의 성장률을 나타내었다(그림 8-4).



그림 8-1. 모래살포 후 객토어장 바지락의 성장(mm; g).



그림 8-2. 경운어장 바지락 성장도(mm; g).



그림 8-3. 모저질개선제 살포 후 객토어장 바지락 성장도(mm; g).



그림 8-4. 모래 및 저질개선제 살포 후 객토어장 바지락 성장도(mm; g).

3.3. 연구어장의 바지락 생존율 및 분포밀도

본 조사에 있어서 연구어장의 현존량을 파악하기 위하여 상기에서 언급한 수식을 이용하였고, 연구어장별 단위면적당 각각 약 200개체씩 살포를 하였으며, 그 결과 각 연구어장의 생존율 및 분포밀도는 다음과 같았다.

3.3.1. 모래살포 후 객토

모래살포 후 객토한 연구어장의 경우 평균 생존율이 15.2%로 조사되었고, 개체당 평균 중량은 5.89g이었으며, 정점별 바지락의 분포밀도는 <표 8-1>과 같았다.

3.3.2. 경운

법산어촌계의 경우 기존어장을 경운만 한 후 연구어장의 바지락을 살포하였으며, 평균 생존율은 8.7%로 다소 낮았고, 개체당 평균 중량은 5.52g이었다.

또한 연구어장의 정점별 바지락의 분포밀도는 <표 8-2>와 같았다.

3.3.3. 모래 및 저질개선제 살포 후 객토

모래 및 저질개선제 살포 후 객토한 연구어장은 신덕과 파도어촌계였으며, 생존율은 신덕이 23.9%였고, 파도어촌계가 13.7%로 조사되었으며, 정점별 바지락의 분포밀도는 <표 8-3>과 같았다.

3.3.4. 저질개선제 살포 후 객토

저질개선제 살포 후 객토한 연구어장의 생존율은 20.8%였고, 개체당 평균 중량은 4.37g이었으며, 정점별 바지락의 분포밀도는 <표 8-4>과 같았다.

따라서 본 조사에 있어서 환경개선방법별 생존율을 분석해 볼 때 모래와 저질개선제를 살포한 후 객토를 하는 것이 가장 생존율이 높은 것으로 분석되었다(그림 8-5).

<표 8-1> 모래살포 후 객토한 연구어장의 정점별 바지락 분포밀도

연구어장	정점	분포밀도			비고
		개체수 (개체/m ²)	개체당 중량 (g/개체)	총중량 (g/m ²)	
송현어촌계	1	35	6.49	227.15	
	2	28	5.65	158.20	
	3	39	4.71	183.69	
	4	24	6.20	148.80	
	5	26	6.42	166.92	
평균		30.40	5.89	179.06	생존율 (15.2%)

<표 8-2> 경운 후 연구어장의 정점별 바지락 분포밀도

연구어장	정점	분포밀도			비고
		개체수 (개체/m ²)	개체당 중량 (g/개체)	총중량 (g/m ²)	
법산어촌계	1	15	5.39	80.85	
	2	19	5.25	99.75	
	3	18	5.35	96.30	
	4	17	7.19	123.93	
	5	18	4.40	79.2	
평균		17.40	5.52	96.01	생존율 (8.7%)

<표 8-3> 모래 및 저질개선제 살포 후 객토한 연구어장의 정점별 바지락 분포밀도

연구어장	정점	분포밀도			비고
		개체수 (개체/m ²)	개체당 중량 (g/개체)	총중량 (g/m ²)	
신덕어촌계	1	45	5.40	243.00	
	2	59	4.86	286.74	
	3	38	5.99	227.62	
	4	47	5.89	276.83	
	5	50	6.32	316.00	
평균		47.80	5.69	270.04	생존율 (23.9%)
파도 어촌계	1	25	17.72	443.00	
	2	29	11.82	342.78	
	3	32	15.15	484.80	
	4	26	12.87	334.62	
	5	25	18.01	450.25	
평균		27.40	15.11	411.09	생존율 (13.7%)

<표 8-4> 저질개선제 살포 후 객토한 연구어장의 정점별 바지락 분포밀도

연구어장	정점	분포밀도			비고
		개체수 (개체/m ²)	개체당 중량 (g/개체)	총중량 (g/m ²)	
학암포 어촌계	1	42	4.68	196.56	
	2	40	3.88	155.20	
	3	42	4.71	197.82	
	4	38	4.01	152.38	
	5	46	4.59	211.14	
평균		41.60	4.37	182.62	생존율 (20.8%)

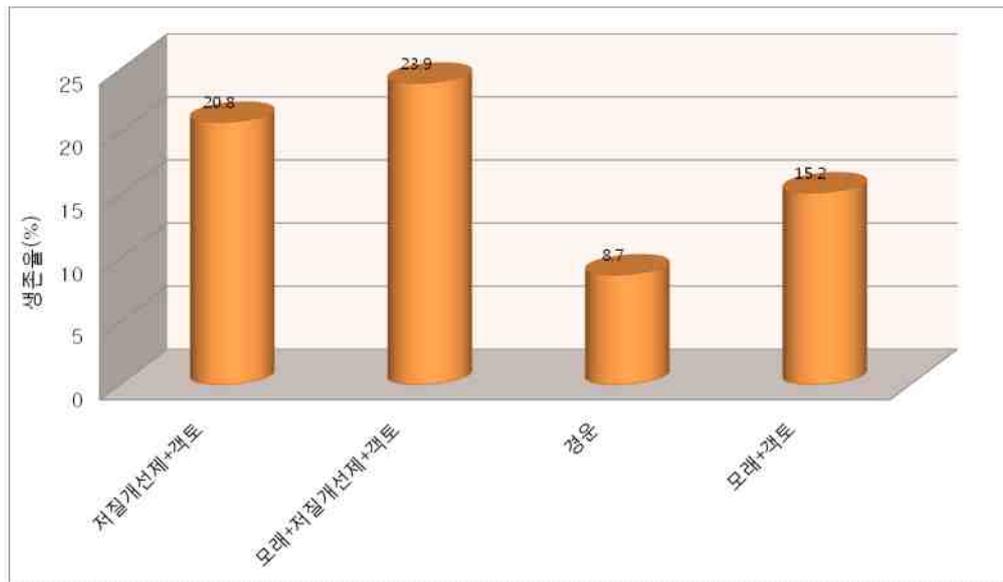


그림 8-5. 환경개선방법별 생존율(%).

3.4. 현존량 추정

본 조사는 연구어장의 환경개선 방법별로 상기에서 언급한 방법에 따라 현존량을 추정하였으며, 그 결과는 <표 8-5>와 같았다.

따라서 환경개선 방법별 현존량을 분석해 볼 때 모래 및 저질개선제 살포 후 객토 한 어장에서 현존량이 가장 많은 것으로 파악되었으며, 다음으로 모래살포 후 객토하는 것과 저질개선제 살포 후 객토하는 것이 생산성이 높은 것으로 분석되었다.

<표 8-5> 환경개선 방법별 현존량 추정

구 분	개체수 (개체/m ²)	개체당 중량 (g/개체)	총중량 (g/m ²)	면적 (m ²)	현존량 (kg)
모래살포 +객토	30.40	5.89	179.06	10,000	1,790.60
경운	17.40	5.52	96.01	10,000	960.10
모래살포 +저질개선제 + 객토	47.80	5.69	270.04	10,000	2,700.40
저질개선제 +객토	41.60	4.37	182.62	10,000	1,826.20

제 9장. 사회·경제적 효과 분석

1. 분석 개요

1.1. 분석의 목적 및 필요성

어장환경개선 사업과 같은 공공투자사업에 대한 효과를 사회경제적으로 평가한다는 것은 투자사업으로 인한 경제적 효과가 얼마인지를 측정하는 것이며, 사회적 긍정적 효과가 어느 정도인지를 측정하는 것이다.

최근 국가공공투자사업의 효과적인 운영 및 향후 사업촉진 방향에 대한 정책입안자들의 올바른 의사결정이 매우 중요하게 되고 있다.

기획예산처는 일정규모이상의 대형 국책사업(SOC 관련)에 대한 예비타당성 조사 제도를 도입하여 국가 대형사업을 사전 평가하고 있으며, 최근 관련 부처는 실용화를 목적으로 하는 국가사업에 대한 기술적·경제적·정책적 타당성을 종합적으로 검토하고 있는 실정이다.

경제적인 효과를 측정하는 것은 대부분 금액으로 환산하여 정량적 분석이 가능하지만, 사회적인 긍정적 효과의 경우는 금액으로 환산하기 곤란하여 대부분 정성적 분석에서 그치는 경우가 많다.

어장환경개선 사업은 현재 국가주도 아래 각 지역을 대상으로 지속적으로 추진되고 있으나 효과에 대한 분석은 현재 미흡한 상황이며, 이에 대한 선행연구를 검토하여도 국내에서 정량적으로 분석된 사례가 거의 없는 실정이다. 또한, 현재 주로 시행 중인 경운, 객토, 모래살포, 저질 개선제 살포 등 어장환경개선 방안에 대한 표준화가 미흡하며, 각 방안별 효과의 비교연구가 전무하다. 본 연구에서는 개선방안별 사회·경제적 효과를 객관적으로 산출하여, 각 방안별로 경제적효과를 비교분석하여 효율적인 개선방안을 제시하고자 한다. 이는 정부에서 어장환경개선 사업을 추진하는데 있어서 표준화된 어장환경개선 프로그램의 개발에 대한 기초자료로 제공이 가능하다.

<표 9-1> 분석 필요성 및 목적

구 분	내 용
필요성	<ul style="list-style-type: none"> - 어장환경개선 사업과 같은 공공투자사업에 대한 효과적인 운영 및 향후 사업추진 방향에 대한 정책입안자들 관심증대 - 어장환경개선 사업에 대한 경제적 효과분석 미흡 - 어장환경개선 방안으로 시행 중인 경운, 객토, 모래살포, 저질 개선제 살포 등에 경제적 효과 검토 필요
목 적	<ul style="list-style-type: none"> - 어장환경개선 프로그램별 사회·경제적 효과 분석을 통한 사업의 타당성을 검토 - 어장환경개선 사업의 지속적 추진을 위한 기초자료로써 각 개선 방안의 효과 비교분석 실시

1.2. 분석 대상 및 주요내용

본 연구의 분석대상은 어장환경개선 프로그램별 시험조사를 실시한 지역이 되며, 개선방법별로 구별하면 ‘모래살포 + 객토’, ‘경운’, ‘모래살포 + 저질개선제 + 객토’, ‘저질개선제 + 객토’의 총 4가지 유형이다.

대상지역은 충남지역 일대 어촌계가 포함되며 송현, 법산, 신덕, 파도, 학암포 어촌계에서 시험사업이 실시되었다.

<표 9-2> 분석 대상지역 및 개선방법

개선 방법	대상지역	대상면적
모래살포 + 객토	송현어촌계, 파도어촌계	4ha
경운	법산어촌계	6ha
모래살포 + 저질개선제 + 객토	신덕어촌계, 파도어촌계	4ha
저질개선제 + 객토	학암포어촌계	4ha

2. 사회·경제적 효과분석 이론 검토

2.1. 이론적 배경

2.1.1. 경제효과 타당성 분석 기법

경제성 분석은 분석을 시행하는 시점을 기준년도로 하여 장래에 발생하는 모든 편익과 비용을 추정하는 것이 일반적이다. 다시 말해서 장래에 발생하는 편익과 비용의 규모를 모두 기준년도 시점의 불변가격으로 추정하는 것이라 할 수 있다.

전통적으로 국가공공사업 투자의 가부를 결정하기 위한 분석방법으로는 순현재가법(NPV: net present value method)이 가장 널리 사용되어 왔으며,²⁾ 또한 내부수익률법(IRR: internal rate of return:) 및 편익-비용 비율법(benefit-cost ratio)도 사업의 경제성 분석에 있어 보조적으로 사용되고 있다. NPV법은 한 사업에 대한 투자의 의사결정 뿐만 아니라 상호 독립적인 투자안들의 우선순위를 결정할 때나 상호배타적인 투자안들 중에서 선택할 때 주주의 부를 극대화시키는 투자안을 선택하도록 만드는 유일한 자본예산기법이라 할 수 있다.

분석방법은 쉽게 말해 사업으로 인하여 기대되는 미래현금흐름을 적절한 사회적할인율에 대하여 현재가치(discounted net cash flow)화 하는 것이라 할 수 있으며, 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{TB_t - TC_t}{(1+r)^t} - I_0$$

T = 특정기간

r = 사회적할인율

TB = 총수입

TC = 총비용

I = 초기투자비용

NPV법에서 사업에 대한 투자결정기준은 NPV>0 일 경우 투자안을 채택하며, NPV<0 이면 투자안을 기각하는 것이 합리적이다.

내부수익률법은 어떤 투자안의 미래 발생할 현금흐름의 NPV를 '0'이 되게 하는 할인율을 도출하여 이 값에 의하여 투자의 결정에 반영하는 방법으로, 장점으로는

²⁾ Fong et al., 2005; Kam et al., 2003; Sottorio, 2002; Jolly and Clonts, 1997; Shang, 1990

NPV와 관계가 밀접하고 대개 동일한 의사결정을 가져오며, 이해하기 쉽고 의사소통이 편리한 장점을 가지고 있다. 그러나 비정상적 현금흐름의 경우 복수의 값이 존재할 가능성이 있으며 상호배타적인 투자안의 비교시 투자순위의 의사결정이 잘못될 가능성이 있다는 단점을 가지고 있음. 내부수익률법을 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{TR_t - TC_t}{(1 + IRR)^t} - I_0$$

여기서 투자결정기준은 $IRR > \text{요구수익률}$ 일 경우 투자안을 채택하며, $IRR < \text{요구수익률}$ 이면 투자안을 기각하는 것이 합리적이다.

편익-비용 비율법(benefit-cost ratio) 은 수익성지수와 유사한 개념이지만, 수익성지수는 순현재가치(= 현금유입액의 현재-현금유출액의 현재)를 최초투자비용(I_0)으로 나눈 것인 반면에, 편익-비용 비율법은 미래 현금유입액의 현재를 현금유출액의 현재로 나눈 것이라 할 수 있다. 따라서 편익-비용 비율법의 투자결정기준은 이 비율이 1 이상일 경우 채택, 1보다 작을 경우 기각하는 것이다. 이 기법의 장단점은 수익성지수와 유사하다고 할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\text{B/C Ratio} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{TR_t}{(1+r)^t}}{\left(\sum_{t=1}^n \frac{TC_t}{(1+r)^t} + I_0 \right)}$$

위에서 언급한 여러 가지 경제적 타당성 평가분석기법들 중에서 순현재가치법(NPV)이 개념적으로 자본예산편성을 위한 최선의 기법이라 할 수 있다.

그러나 현실적으로 여러 기법의 사용하는 이유는 투자결정이 미래의 불확실성 하에서 이루어지기 때문에 여러 기법을 적용하는 것이다.

최근에는 내부수익률법(internal rate of return: IRR)과 순현재가치법(NPV)이 가장 널리 사용되고 있는 실정이다.

이러한 경제성 분석 기법의 특징을 간단하게 요약하면 다음 표와 같이 나타낼 수 있다.

<표 9-3> 경제성 분석 방법별 특징

분석기법	판단	장점	단점
편익비용 비율 (B/C R)	$B/C \geq 1$	- 이해용이, 사업규모 고려 가능	- 상호배타적 대안선택의 오류발생 가능
순현재가치 (NPV)	$NPB \geq 0$	- 대안 선택시 명확한 기준 제시 - 장래발생편익의 현재가치 제시 - 한계 순현재가치 고려 - 타 분석에 이용가능	- 이해의 어려움 - 대안 우선순위 결정시 오류발생 가능
내부수익률 (IRR)	$IRR \geq r$	- 사업의 수익성 측정 가능 - 타 대안과 비교가 용이 - 평가과정과 결과 이해가 용이	- 사업의 절대적 규모 고려하지 않음 - 몇 개의 내부수익률이 동시에 도출될 가능성 내재

자료 : 한국개발연구원, 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정보완 연구(제4판)

2.1.2. 편익과 비용 측정

비용-편익분석에서 편익이란 기본적으로 소비를 증가시키는 효과를 말한다. 왜냐하면 소비가 모든 경제활동의 목적이고 생산의 목적이기 때문이다. 직접 소비를 증가시키지 않은 기초시설에 대한 투자도 간접적으로 국민의 미래 소비를 증가시키기 때문에 편익으로 간주해야 한다.

어떤 사업의 비용이란 이 사업으로 인해서 포기된 편익을 말한다. 경제학에서 말하는 비용이란 늘 기회비용을 의미한다. 따라서 비용과 편익은 부호만 다를 뿐 내용은 동일하다. 그러나 이런 기회비용의 계산이 사실상 불가능하기 때문에 관례상 사업의 수행에 소요되는 경비를 비용으로 간주한다.

편익의 판별에 있어서는 유무검증과 전후검증의 두 가지 방법을 통해서 수행이 되고 있다.

유무검증은 편익-비용분석시에 사업을 수행할 경우(with the project)와 수행하지 않을 경우(without the project)의 차이에 의거 파악하는 증분적 현금흐름(incremental cash flow)원칙을 기준으로 한다.

여기서 현금흐름의 증분(incremental cash flows)이란 어떤 기업이나 사업에

대해 투자안이 있는 경우(with project)의 미래 현금흐름과 투자안이 없는 경우(without project)의 미래 현금흐름간의 차이로서 투자안의 채택여부는 그 투자안에서 발생하는 현금흐름의 증분만을 고려하면 되는데 이를 독립기업의 원칙(stand-alone principle)이라 부른다.

이를 감안하여 유무검증에서 순현금흐름(net cash flows: NCF)은 아래의 식과 같이 설명 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &= NB_t^w - NB_t^{wo} = (TR_t^w - TC_t^w) - (TR_t^{wo} - TC_t^{wo}) \\
 &= (PQ_t^w - FC - v_t^w Q_t^w) - (PQ_t^{wo} - FC - v_t^{wo} Q_t^{wo}) \\
 &= P(Q_t^w - Q_t^{wo}) - v_t^w (Q_t^w - Q_t^{wo}) + (v_t^w - v_t^{wo}) Q_t^{wo}
 \end{aligned}$$

전후검증은 사업을 수행하기 전(before the project)과 수행하기 후(after the project)의 차이에 의거한 편익-비용을 파악하는 기준으로, 전후검증에 의한 편익과 비용의 판별은 평가오류를 초래할 수 있기 때문에 진정한 기회비용을 고려할 수 있는 유무검증에 의한 편익과 비용을 판별하는 것이 바람직 하다.

2.1.3. 할인율 및 평가기간 선정

가. 사회적 할인율 적용

각종 자원의 가치평가를 위해서는 미래 현금흐름을 현재가치로 환산할 필요가 있는데 미래현금흐름을 할인하는 적절한 할인율을 결정하는 것은 매우 어려운 과제중의 하나이다. 왜냐하면 할인율은 가치를 평가하고자 하는 사업의 특성, 목적에 따라 할인율의 결정요인과 그 수준이 다양하고 불확실하기 때문이다.

완전자본시장에서의 할인율은 사회적 시간선호율, 민간부문의 한계투자 수익률, 공공부문의 기회비용, 소비자 이자율, 생산자 이자율 및 시장이자율 등이 모두 동일하지만, 시장의 불완전성과 위험도의 상이성 등으로 인해 할인율의 수준은 각기 다르다. 따라서 할인율은 평가하고자 하는 사업이 어떤 사업을 희생 혹은 대체한 것이냐에 따라 결정되어야 할 것이다.

사회적 할인율의 적정수준에 대한 견해는 예산제약이 강할 때(특히 긴출재정시)에는 높은 사회적 할인율 수준이 바람직하다고 일반적으로 주장한다. 이는 자원이 희소할수록 사람들은 미래에 발생할 편익들보다 현재 편익을 더 강하게 선호

할 것이기 때문이다.

사회적 할인율의 적정수준에 대한 여러 견해들이 존재한다. 아래표은 할인율의 적정수준에 대한 견해를 나타내고 있다.

<표 9-4> 할인율의 적정수준에 대한 견해

높은 할인율 선호 견해	낮은 할인율 선호 견해
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 공공사업의 경우 일반적으로 예산 제약 하에 미래의 편익을 위해 투자하는 것이기 때문에 이의 타당성을 평가하는데 있어서는 높은 할인율 적용이 바람직함 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 대규모사업의 경우 일반적인 비용·편익 분석은 전체 경제효과를 측정할 수 없으므로 낮은 할인율 적용이 바람직함 ▪ 높은 할인율은 SOC와 같은 장기사업의 시행을 어렵게 하고, 분석자로 하여금 편익을 과대추정하게 만드는 요인이 됨

사회적 할인율과 관련한 선행연구를 살펴보면, 국내에는 약 5.5%~8.5%의 다양한 할인율을 적용하고 있다.

<표 9-5> 국내 공공투자사업 사회적 할인율

구 분	사업의 성격	적용 사회적 할인율
KDI, 공공투자사업 경제성분석	도로, 철도, 항만, 공항 등 일반공공투자 사업	7.5%
	수자원개발, 환경시설, 낙후지역 개발 등의 사업	5.5%
KMI	인공어초 경제성 분석	8.5%

외국의 경우 사회적 할인율은 우리나라에 비해 대체로 낮은 수준이다. 특히 선진국의 경우에는 일찍부터 국가 전체 공공프로젝트에 적용할 사회적 할인율 수준에 대한 합의를 이끌어내고 이를 사용해 오고 있다. 이에 비해 우리나라는 그러한 사회적 합의나 일반적 기준 없이 각 시기별 또는 사업유형별로 사회적 할인율을 적용해 오고 있는 실정이다.

<표 9-6> 국외 공공투자사업 사회적 할인율

구분	구분	이유 및 근거	사회적할인율
미국	OMB의 Circular A-94(1992)	민간투자의 세전 한계수익률과 일치값	7%
	CBO, GAO	국채이자율을 이용해 할인하는 방법 채택	3.5%
	Mn/DOT지침(2001)	30년 공채의 실질이자율	3.5%
영국	HM treasury(1997)	세전 장기자본비용 및 시간선호율 및 PFI의 운영측면을 고려	6%
	HM treasury(2003)	30년 이내의 장기투자사업	3.5%
		30년 이상 75년 이내 사업	3.0%

본 연구에서는 할인율의 경우, 어장환경개선사업이 유류피해어장의 어업인 소득안정대책 및 낙후지역 개발 등의 사업임을 고려하여 5.5%의 할인율을 적용하여 효과분석을 실시하였다.

나. 평가기간 결정

경제성 분석은 분석을 시행하는 시점을 기준년도로 하여 장래에 발생하는 모든 편익과 비용을 추정하는 것이 일반적이다. 다시 말해서 장래에 발생하는 편익과 비용의 규모를 모두 기준년도 시점의 불변가격으로 추정하는 것이라 할 수 있다.

경제적 편익과 비용이 발생할 기간을 추정하는데 있어서 중요한 요소는 주요시설 및 장비에 대한 경제적 내용년수라고 할 수 있다. 일반적으로 경제적 비용은 초기에 발생하지만, 경제적 편익은 장기에 걸쳐 발생하기 때문에 분석기간을 어떻

게 하느냐에 따라 미래에 발생할 편익에 대한 현재가치에 크게 영향을 미칠 수 있다. 3)

어장환경개선 사업으로의 경제적 편익과 비용이 발생하는 기간에 대해서는 기존 연구된 사례가 없기 때문에 본 분석에서는 어업인과 전문가 설문을 통하여 사업의 효과가 유지되는 기간을 추정하였다.

사업효과 지속기간에 대한 전문가 및 어업인 설문 결과를 살펴보면 사업의 효과는 약 4년에서 7년 이상까지 발생할 것으로 인식하고 있으며, 사업 후 5년까지 효과가 발생할 것이라는 응답이 59.5%로 가장 많았으며, 그 다음으로 사업 후 6년까지가 21.6% 순으로 나타났다.

사업의 효과 발생시기는 사업 후 1년 후부터 발생할 하는 것으로 분석되며, 사업효과가 최대가 되는 시기는 사업 후 3년이 경과 했을 경우라 조사되었다.

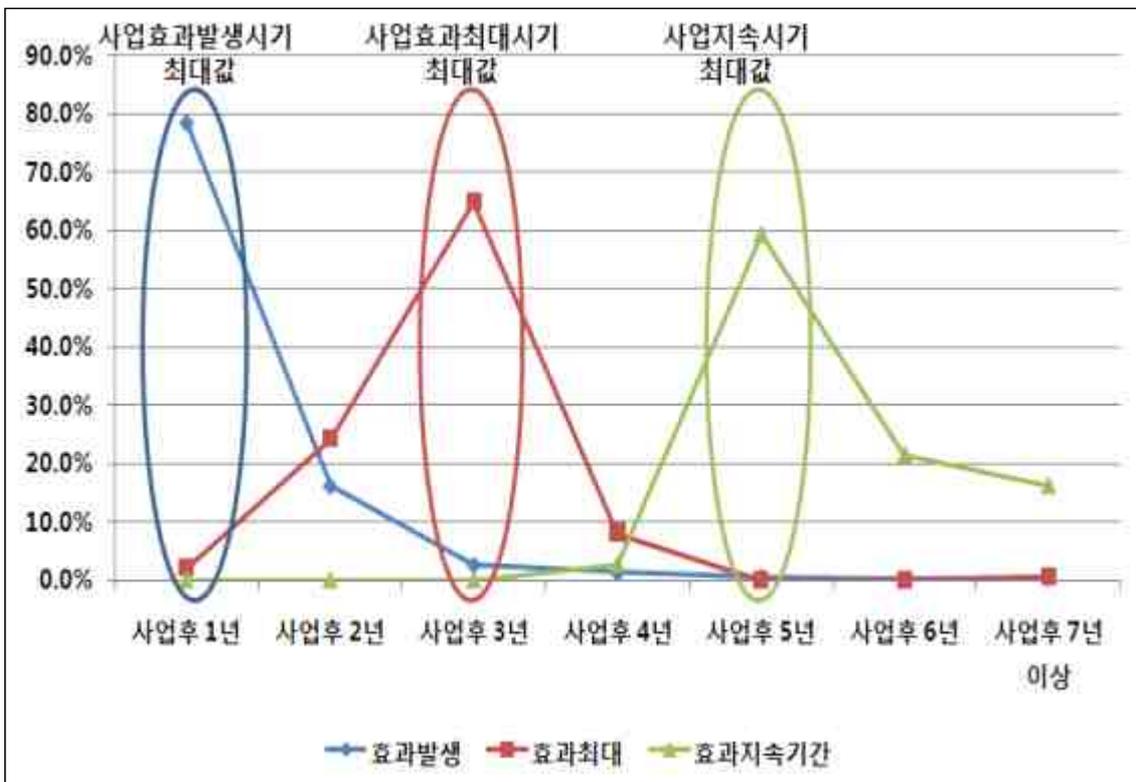


그림 9-1. 사업의 효과 발생·지속기간 설문 결과.

3) 부경대학교, 통영바다목장사업 경제성평가, 2007

본 분석에서는 설문조사를 근거로 어장환경 개선사업의 효과는 사업 후 1년 이후부터 발생하는 것으로 가정을 하였으며, 사업의 효과 지속기간은 5년을 적용하였다. 앞서 언급하였던 바와 같이 사업효과 지속기간을 늘일수록 사업의 경제적 효과는 높아지게 되며, 이는 사업의 경제적 효과를 추정하는데 있어서 편익을 과대추정하는 오류를 가지게 되므로, 동 연구에서는 소극적인 적용을 통해 사업 평가에 있어 객관성을 높였다.

3. 편익과 비용 항목추정

3.1. 사업의 경제적 편익 분류

경제적 편익은 추진할 사업의 연관성에 따라 크게 직접편익과 간접편익이 있으며, 편익에 대한 화폐화 가능성에 따라 계량화할 수 있는 편익과 계량화할 수 없는 편익 또는 유형적 편익과 무형적 편익으로 구분할 수 있다. 따라서 편익의 인과관계를 분석하여 중복반영(double counting)이나 누락되는 평가항목이나 규모에 유의하여야 한다.

직접편익은 크게 수산물생산량 증가에 의한 어업인 소득증가효과, 환경개선에 따른 생산된 수산물 안전성 증가로 인한 소비선호 증가효과(어류소비자의 효용증대효과) 및 어획생산성증가에 따른 어획비용의 감소효과로 구분할 수 있다. 이에 대한 간접편익은 관광객의 효용증대효과, 연구개발효과 등 생산유발효과, 고용유발효과 및 생태계회복효과 등을 들 수 있다.

여기에서 생산량 증가에 따른 어업인 소득증가 및 어업비용 감소효과와 관광증가효과를 경제적 편익에 포함하여 분석하였다.

수산물 소비회복효과와 같은 경우 ADIS모델 등을 통하여 수산물 수요함수를 추정하여 계량적으로 추정이 가능하나 현재 사업 대상지역이 넓지 않으며, 일부지역의 효과로 인해 국민의 수산물 전체에 대한 소비 및 소비선호 증가는 어려울 것으로 판단되어 분석에서 제외하였다.

또한, 생태계안정, 생물다양성 등 환경보존효과는 비사용가치로 경제성에 포함할 경우 효과의 과대평가가 사료되므로 제외하였다.

<표 9-7> 어장환경 개선사업의 경제적 편익 분류

경제적 편익	경제활동	가치분류	가치평가방법	적용
수산물 생산량 증가효과	-어획량 증가 어업인 소득 상승 -생산성증가 어업비용 감소	사용가치 (직접편익)	○ 추정: 수산물 생산자수산물생산함수 잉여 증가분	적용
수산물 소비회복 효과	-수산물 소비증가 -수산물 안전성증가에 의한 소비선호 증가	사용가치 (직접편익)	○ 수산물 수요함수 추정 : 수산물 소비자잉여증가분 (ADIS모델)	미적용
관광 증가효과	-쾌적성 증가 -낚시, 갯벌체험 등 관광 여건 증가	사용가치 (간접편익)	○ 관광수요함수추정 : 관광소비자 잉여증가분 (TCM,CVM)	적용
생태 및 환경보존 효과	-존재가치/선택가치/유산 가치 -생태 환경고유가치 (먹이사슬, 생태계 안정, 생물다양성)	비사용가치 (간접편익)	○ CVM/CAM	미적용

3.2. 직접편익 추정

3.2.1. 직접효과 이론적 배경

어장환경개선사업의 직접효과는 크게 생산자잉여증가효과와 소비자잉여증가효과로 나눌 수 있다. 생산자잉여증가효과는 어획량증가에 의한 어업인 순소득상승효과와 생산성증가에 따른 어획비용감소효과로 구분할 수 있다.

생산자잉여증가효과를 추정하기 위한 생산비용함수는 생산함수를 근거로 하여 도출되는 파생적 함수(derived function)이다. 이 생산비용함수는 여러 가지 수준의 생산량을 효율적으로 생산하는 최소비용함수를 말하는 것이다.

완전경쟁시장하에서의 단기공급곡선은 평균가변비용의 최저점 이상의 한계비용(marginal cost)곡선으로 비용함수를 생산량에 의해 미분한 함수를 말한다. 이와 같은 공급함수는 기술수준, 생산요소의 가격, 해당재화의 가격, 다른 재화의 가격 및 공급자의 예측들의 함수인데, 이상의 여러 가지 요인 중에서 해당재화의 가격은 공급량의 변동(changes in quantity supplied)에 영향을 주고, 나머지 다른 요인들은 공급의 변동(changes in supply)에 영향을 주어 공급곡선 자체를 이동(shift)시킨다. 본 분석에서는 소비자잉여증가효과를 제외한 생산자잉여증가효과에 대하여 추정하였다.

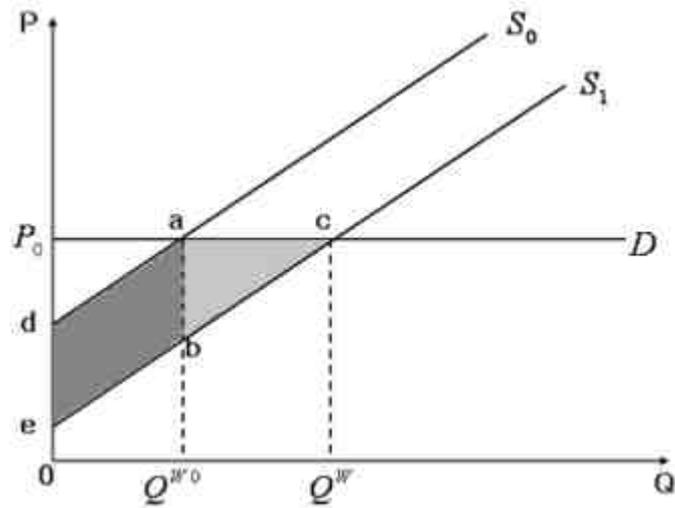


그림 9-2. 생산자잉여증가효과.

위 식에서 어획량증가에 의한 어업인 순수익상승효과와 생산성증가에 따른 어획비용감소효과를 분리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &= \sum_i NB_{ti}^w - NB_{ti}^{wo} = \sum_i (TR_{ti}^w - TC_{ti}^w) - (TR_{ti}^{wo} - TC_{ti}^{wo}) \\
 &= \sum_i (PQ_{ti}^w - FC - v_{ti}^w Q_{ti}^w) - (PQ_{ti}^{wo} - FC - v_{ti}^{wo} Q_{ti}^{wo}) \\
 &= \sum_i \{P(Q_{ti}^w - Q_{ti}^{wo}) - v_{ti}^w (Q_{ti}^w - Q_{ti}^{wo})\} + \sum_i (v_{ti}^{wo} - v_{ti}^w) Q_{ti}^{wo} \\
 &= \sum_i (P_i - v_{ti}^w)(Q_{ti}^w - Q_{ti}^{wo}) + \sum_i (v_{ti}^{wo} - v_{ti}^w) Q_{ti}^{wo}
 \end{aligned}$$

여기서, NB = 순어업편익

TR = 총어업수익

TC = 총어업비용

FC = 총고정비

P = 생산물의 판매가격

Q = 생산물의 어획량

v = 평균어업변동비용

w = 사업수행의 경우

w_0 = 사업미수행의 경우

t = 발생시점

i = 어종(바지락)

위 식에서 어획량증가에 의한 어민 순소득상승효과와 생산성증가에 따른 어획비용감소효과를 분리하면 다음과 같다.

$$\text{어획량증가에 의한 어업인 순소득상승효과} = \sum_i (P_i - v_{ti}^w)(Q_{ti}^w - Q_{ti}^{w_0})$$

$$\text{생산성증가에 따른 어획비용감소효과} = \sum_i (v_{ti}^{w_0} - v_{ti}^w)Q_{ti}^{w_0}$$

3.2.2. 직접효과 추정

가. 가격

직접효과를 추정하기 위해 시험어장에서 생산되는 수산물의 가격 추정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 통계자료를 근거로 판매가격을 추정하였다.

시험어장의 생산물은 바지락으로 최근 3년간 충남지역 산지 평균가격을 근거로 판매가격을 1kg 당 1,930원으로 산정하여 분석을 실시하였다.

<표 9-8> 생산물의 단위당 가격 추정

구분	2008년	2009년	2010년	3년 평균
바지락 가격 (원/kg)	1,845.5	2,021.4	1,924.3	1,930.4

자료 : 통계청, 어업생산통계(충남지역), 각 년도

나. 어획량

어장환경개선 사업으로 인한 생산량의 증가는 각 어장환경개선 프로그램별로 구분하여 도출하였다.

생산량 증가효과는 앞서 도출된 현존량 추정 자료 사용하였으며, 사업이 없는 경우(With out the project)의 생산량은 0 으로 가정(신규어장에 자원조성 실험)하였다.

또한, 어획량은 현존량의 100%를 다 이용하기에는 어렵기 때문에 자연적 상태에서는 생물경제모델의 MSY 또는 MEY수준의 어획량 적용해야 하나 동 분석에서는 2년 마다 자원조성을 위해 신규로 증파살포를 하는 것으로 가정을 하였기 때문에 현존량의 약 90%를 어획하는 것으로 적용하였다.

어획량은 사업후 1차년도부터 발생하여 단계적 증가로 3년치에 최대로 가정하였으며, 1차년도에 최대치의 50%, 2차년도 최대치의 70%, 3차년도 이후 생산 감소하는 것으로 보았다.

<표 9-9> 어장환경개선 프로그램별 자원량 자료

구 분	개체수 (개체/m ²)	개체당 중량 (g/개체)	총중량 (g/m ²)	면적 (m ²)	현존량 (kg)
모래살포 +객토	30.40	5.89	179.06	10,000	1,790.60
경운	17.40	5.52	96.01	10,000	960.10
모래살포 +저질개선제+ 객토	47.80	5.69	270.04	10,000	2,700.40
저질개선제+객토	41.60	4.37	182.62	10,000	1,826.20

주) 평가항목의 구분은 프로그램별 실험결과치를 활용한 것임

3) 어업경비의 추정

비용행태란 비용에 영향을 미치는 여러 가지 요인의 변화에 따른 비용의 반응 양상을 말한다. 어업경비에 영향을 미치는 요인으로는 어획노력량(조업시간, 조업 방법 등), 자원량 및 어획량 등을 들 수 있다. 비용함수를 추정하는 방법에는 여러 가지 방법이 있을 수 있지만, 본 연구에서는 인근 바지락양식을 하고 있는 마을어장을 대상(11개소)으로 어업경비자료를 이용하여 단위당 평균어업변동비가 총어획량의 증가에 따라 감소하는 비용행태(nonlinear cost behavior)를 가지는 것으로 가정하였다.

실제 1ha 당 바지락의 생산량의 변화 뿐만 아니라 어장의 규모의 변화에 따라서도 그 생산비용의 변화가 있는 것으로 조사되었으나 분석의 편의를 위해 단위당 생산량의 변화만을 고려하였다. 초기투자비용은 사업비용으로 계산하였으며, 자세한 사항은 아래표와 같이 나타낼 수 있다.

<표 9-10> 생산량에 따른 생산비용의 변화

1 ha당 바지락 생산량	500kg 미만	500kg ~700kg	700kg ~900kg	1000kg ~1500kg	1500kg 이상
수익대비 생산비용 평균	36.21%	31.83%	23.05%	14.98%	11.48%

자료 : 조사대상 인근지역(충남 11개소) 바지락양식 마을어장 어업경비실태 조사 결과

<표 9-11> 초기투자비용 추정

(단위 : 원)

구 분	어장환경개선 내용	종패구입비용	총비용
모래살포 + 객토	모래 구입비, 모래 살포선박 사용료, 모래 살포 후 경운선박 사용료, 모래 현장운반 및 살포 바지선 사용료 모래 살포 보조인부 사용료 종패 현장 운반선 사용료 종패 살포인부 노임	2,376,000	22,726,000
경운	경운써레 제작비 경운선박 사용료 종패 현장 운반선 사용료 종패 살포인부 노임	3,564,000	12,364,000
모래살포 + 저질개선제 + 객토	모래 구입비, 모래 살포선박 사용료 ,모래 살포 후 경운선박 사용료, 모래 현장운반 및 살포 바지선 사용료 모래 살포 보조인부 사용료 저질개선제 구입비 저질개선제 운반비 저질개선제 살포선박 사용료 저질개선제 살포 후 경운선박 사용료 저질개선제 현장운반 바지선 사용료 저질개선제 바지선 하적용 카크레인 사용료 종패 현장 운반선 사용료 종패 살포인부 노임	2,376,000	37,356,000
저질개선제 + 객토	저질개선제 구입비 저질개선제 운반비 저질개선제 살포선박 사용료 저질개선제 살포 후 경운선박 사용료 저질개선제 현장운반 바지선 사용료 저질개선제 바지선 하적용 카크레인 사용료 종패 현장 운반선 사용료 종패 살포인부 노임	2,376,000	26,356,000

3.3. 간접편익 추정

여장환경개선 사업의 간접편익을 추정하기 위해서는 사업에 의해서 증분된 (incremental) 잉여부분만을 고려하여야 한다. 사업대상 지역은 갯벌어장으로 갯벌 체험관광, 시각관광 등의 관광객이 유입된다.

그러나 간접편익을 추정하기 위해서 직접적인 사업으로 인한 증분을 추정하기 위하여 관광객 설문조사를 통하여 실시하였다.

<표 9-12> 초기투자비용 추정

구분	추정치	비고
인근지역 연평균 관광객 수	12,000명 ~ 15,000명	인근주민 면담조사
1회 관광기간의 방문 비중	4.43%	관광객 설문조사 결과
사업대상 지역 방문 비중	5.51%	
환경개선사업으로 인한 관광회수 증가율	0.258회	

3.3.1. 간접편익 추정 모형

1) 포아송모형(Poisson Model)

포아송 모형은 가산자료의 회귀 분석이나 범주형 자료를 분석하기 위해 일반적으로 이용되는 모형으로 무작위적이고 독립적으로 사건이 발생할 때 일정한 시간 또는 공간 내에서 '0'을 포함한 사건 발생횟수와 이에 따른 확률분포를 의미한다. 즉, 포아송 분포는 특정시간 동안 특정 사상이 발생했던 평균을 근거로 하여 특정 사상의 발생횟수에 대한 확률을 나타내 주는 분포이다. 포아송 분포는 다음의 두 가지 가정을 한다. 첫째, 단위시간 내의 사건의 발생확률은 동일하며 시간에 따라 변하지 않아야한다. 둘째, 분포의 평균과 분산이 같은 등산포(equi-disersion)를 가정한다. 특정시간 동안 특정사상이 발생했던 평균을 근거로 하여 특정사상의 발생횟수에 대한 포아송분포의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$\Pr(Y_i = k | X_i) = \frac{e^{-\lambda_i} \lambda_i^k}{k!}, k = 0, 1, 2, \dots$$

위 식에서 $\Pr(Y_i = k | X_i)$ Y_i 는 i 번째 응답을, k_i 는 Y_i 가 취할 수 있는 비음정수 값으로써 활어소비횟수를, λ_i 는 추정되어야 하는 포아송 파라미터로서 활어 소비 발생횟수의 평균과 분산을 나타낸다. 을 회귀식 형태로 확장하면 다음과 같다.

$$\ln \lambda_i = X_i \beta$$

$$\lambda_i = \exp(X_i \beta)$$

위의 식에서 X_i 는 측정된 변수의 벡터를, β 또한 벡터로서 추정되어야 할 미지의 파라미터를 나타낸다. 지수 형태를 취함으로써 적절한 분포를 위해 요구되는 λ_i 의 비음조건이 유지 될 수 있다.

또한 가정에 의해 분포의 평균과 분산은 다음과 같이 도출된다.

$$E(Y_i | X_i) = \lambda_i = \text{var}(Y_i | X_i)$$

2) 음이항모형(Negative Binomial Model)

포아송 모형은 가산자료의 분석에 일반적으로 사용되는 모형이기는 하지만 동질적인 특성을 가진 자료나 평균과 분산이 같은 자료에만 적용될 수 있다(Green, 2000). 현실의 자료는 분산이 평균을 초과하는 이른바 과산포가 나타나는 경우가 많기 때문에 평균과 분산이 동일하다는 포아송 모형의 가정이 비현실적이어서 실제적인 응용에 있어 모형 측정의 효율성이 감소되며, 모델적용과 결과 해석 및 계수에 대한 통계적 검정의 신뢰성에 문제가 발생한다. 따라서 과산포가 발생하는 상황에서 포아송 모형을 사용하면 문제가 발생하므로 이때는 포아송 분포를 이용하지 말아야 한다.

과산포 문제는 일반적으로 가산자료에 있어 관찰되지 않은 이질성이 존재하거나 또는 영('0')의 빈도가 과다할 경우 발생한다(Cameron & Trivedi, 1996). 특히 현실상의 수요모형에서는 조건부 분산이 평균을 초과하는 과산포 문제가 자주 나타나기 때문에 포아송 분포를 적용하기 어려운 점이 많다. 따라서 가산자료의 과산포 문제가 발생하는 경우, 가산자료를 모형화하기 위해서는 보다 일반화된 모형

으로서 음이항 모형이 자주 사용되고 있다.

음이항 모형은 포아송 파라미터에 오차항을 결합시킴으로써 구축된다.

$$\lambda = E(Y_i | X_i, \varepsilon_i) = \lambda_i \varepsilon_i$$

위의 식에서 λ_i 는 포아송 파라미터를, ε_i 는 오차항을 의미한다. 따라서 음이항 모형의 확률밀도 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr(Y_i = k | X_i) = \frac{T(k + \alpha^{-1})}{T(k + 1)T(\alpha^{-1})} (\alpha\lambda_i)^k [1 + \alpha\lambda_i]^{-(k + \alpha^{-1})}, k = 0, 1, 2, \dots$$

식(7)에서 α 는 과산포 모수로서 모형 내에서 독립변수의 계수와 함께 추정된다. 음이항 모형의 평균은 다음의 식과 같이, 분산은 아래 식(9)과 같이 나타나게 된다.

$$E(Y_i | X_i) = \lambda_i$$

$$\text{Var}(Y_i | X_i) = \lambda_i(1 + \alpha\lambda_i)$$

위 식에서 α 는 과산포 파라미터로서 모형 내에서 독립변수의 계수와 함께 추정되는데, α 가 영(0)이면 과산포가 존재하지 않으므로 포아송 모형이 사용 가능하게 되지만 $\alpha > 0$ 일 경우 분산이 평균(λ_i)를 초과하게 되므로 과산포를 허용하는 모형을 얻게 된다. 따라서 α 가 0이 아닌 경우에는 과산포가 존재하므로 포아송 모형의 사용은 불가능하게 되고, 음이항 분포의 사용이 보다 적합하게 된다. Cameron & Trivedi(1986)은 가산자료의 과산포 검정을 위한 다양한 방법을 제시하였다.

3) 여행자비용법(TCM)

여행비용법(travel cost method:TCM)은 시장기구가 존재하지 않는 자연자원의 가치를 평가하는 가장 대표적인 방법으로 비시장재인 관광지 또는 문화유적지 등의 자연자원의 가치를 그 자연재화와 관련되어 있는 시장에서의 소비행위에 연관

시켜 간접적으로 측정하는 것이다.

여행비용법의 연혁을 살펴보면 이 방법은 1947년 미국 국립공원국(National Park service)이 국립공원에서 창출해내는 경제적 가치를 측정할 수 있는 경제적인 이론을 찾는 것이 발단이 되어 경제학자인 헤롤드 호텔링(Harold Hoteling)이 미국 국립공원 국장에게 보낸 편지에서 그 기원을 찾을 수 있다. 그 이후에 우드와 트라이스(Wood & Trice, 1958) 그리고 특히 클로슨과 크네치(Clawson & Knetsch, 1966) 등에 의하여 여행비용법의 이론 및 적용은 큰 발전을 가지고 왔다.

여행비용법(TCM)은 종속변수에 따라 크게 지역여행 비용법(Zonal Travel Cost Method)과 개인여행 비용법(Individual Travel Cost Method)으로 구별 할 수 있다.

개인여행비용법은 통계적 효율성이나 개인행동을 모형화하는데 있어서의 이론적 일관성, 임의의 지역구분으로 인해 발생하는 편의회피 등의 장점이 있으며 또한 정수(integer)이며 0에서 절단된 형태의 자료특성을 갖는 개인 여행수요를 다룰 수 있는 통계적인 방법들을 이용할 수 있게 됨으로써 최근에는 개인수요모형을 많이 사용하고 있다(Creel & Loomis(1990); Yen & Adamowicz(1993))

위에서 언급한 개인여행비용법(ITCM)의 몇 가지 장점으로 인하여 최근 외국의 경우 지역 여행비용법보다는 개인여행비용법을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

특정 기간동안의 방문 수요는 여행비용, 관광지 특성 그리고 소득, 교육 등의 사회경제적 변수에 영향을 받는다. 따라서 일반적인 여행비용모형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y=f(X,\phi,\epsilon)$$

Y는 해당 관광지로의 여행횟수를 나타내는 종속변수(1*n 벡터)이고, X는 앞서 언급한 독립변수들의 행렬이다. 또한 ϕ 는 파라메타 벡터(vector)이고 ϵ 오차항을 나타내는 벡터이다.

나. 간접편익 조사방법 및 조사현황

어장환경개선 사업으로 인한 자원증가 및 환경성의 증가는 방문객 및 갯벌체험객의 증가라는 간접적 효과를 가져 올 것으로 사료된다. 실제적으로 동 사업의 특징이 과거 이용되지 않았던 어장에 대한 환경개선임을 고려할 때 향후 잠재적 관광객의 잉여증가 부분은 사업의 중요한 효과라 할 수 있다.

공공사업을 통한 환경자연자원의 변화에 대한 편익은 그 재화의 공급의 구체적 변화에서 합법적으로 발생할 모든 편익, 즉 총가치를 포함하여야 한다. 이와 같이 재화에 따른 총가치의 특성 및 종류를 명확히 식별함으로써 편익가치를 측정할 적합한 방법이 선택될 수 있다. 그러나 환경재는 시장에서 거래되지 않는 비시장재화이므로 그 가치에 대한 정보를 얻기 힘든 경우가 대부분이며 따라서 환경재가 제공하는 환경서비스의 경우 재산권이나 시장이 존재하지 않기 때문에 통상적인 방법으로는 이들의 가치를 측정하기는 어려움이 있다. 그러나 환경재는 경제주체에게 효용이나 이윤을 향유하도록 하므로 가치가 있으며, 이에 따른 잠재가격은 존재함은 분명하다(유동운, 1992).

본 연구에서는 관광에 대한 효용의 추정방법으로는 인근지역 관광객의 개인적 설문조사를 통한 여행비용모형(TCM)을 사용하였다.

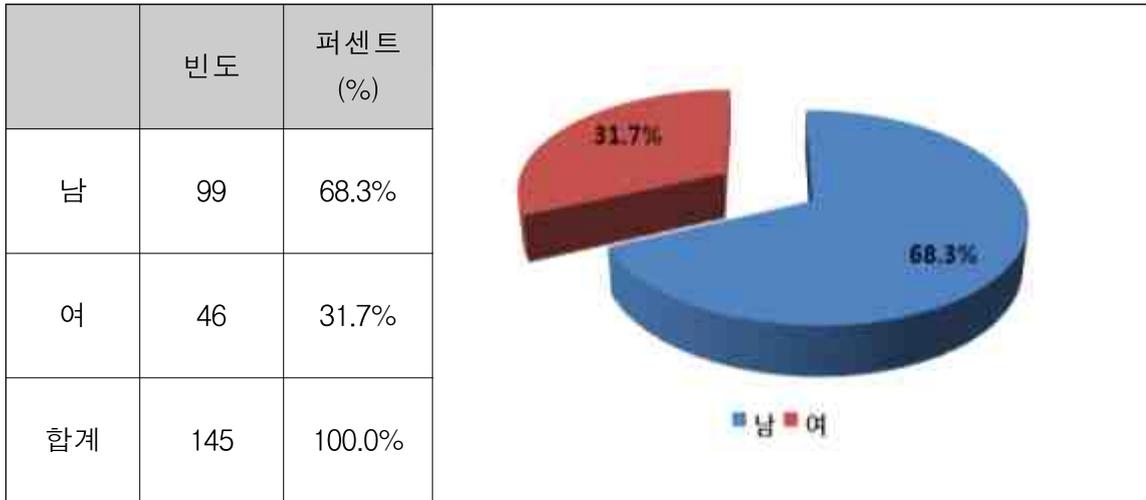
설문조사는 사전에 교육을 한 현지조사원을 통해 1:1 면접 설문조사를 실시하였다. 회수된 관광객의 유효표본 설문지는 153부로 설문응답이 불성실한 8개의 표본은 분석에서 제외되어 145개의 표본에 대하여 분석되었다.

설문조사지의 질문내용은 성별, 연령, 현거주지, 월평균소득, 학력, 가족원수 등의 인구통계학적 자료 및 개인만족도, 관광 소요 비용, 복수관광 유무, 어장환경 개선에 따른 방문 증감 연간 방문 횟수 등의 항목으로 구성되었다.

설문응답자의 성비를 보면 남성이 99명(68.3%), 여성이 46명(31.7%)로 남성 관광객이 많은 것으로 나타났다.

연령구조는 20대가 가장 많으며 그 다음으로 30대, 40대 순으로 나타났다.

<표 9-13> 응답자의 성비구조



<표 9-14> 응답자의 연령구조



응답자의 연간 해당지역 방문횟수를 살펴보면 2회정도 방문하는 응답이 30.3% 가장 많았으며, 연간 1~3회 정도 해당지역을 방문하는 것으로 나타났다. 연간 해당지역의 방문에 대한 비중을 보면 약 4.4% 정도로 분석되었다.

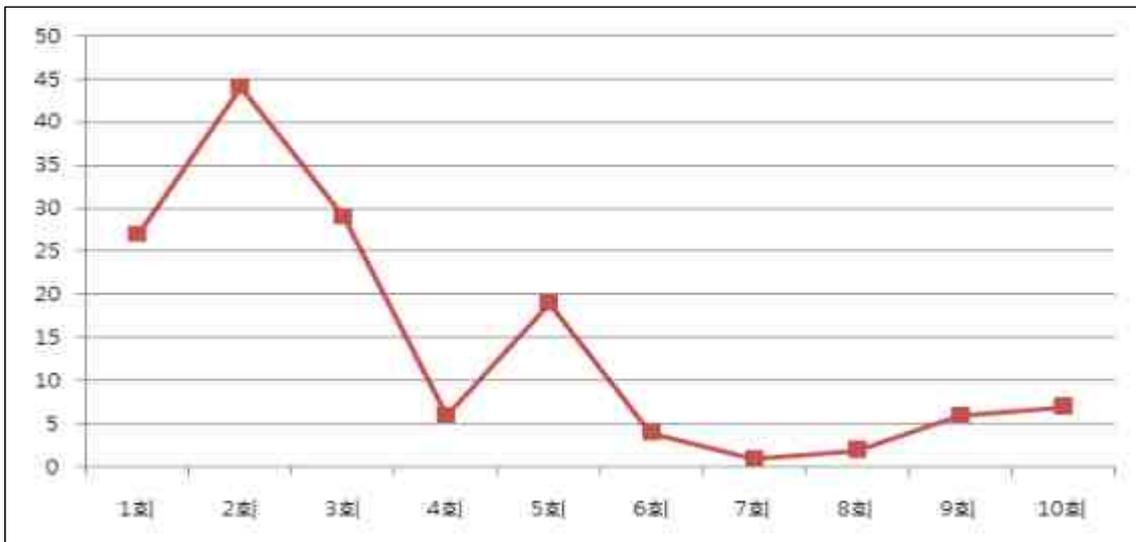


그림 9-2. 응답자의 연간 해당 지역 방문횟수.

지역에 대한 응답자 만족도를 살펴보면 결관의 보통이상이라고 응답한 비중이 약 60% 이상이며 이 중 경관 및 자원량(채취량)에 대해서 만족도가 높은 것으로 파악되었다.

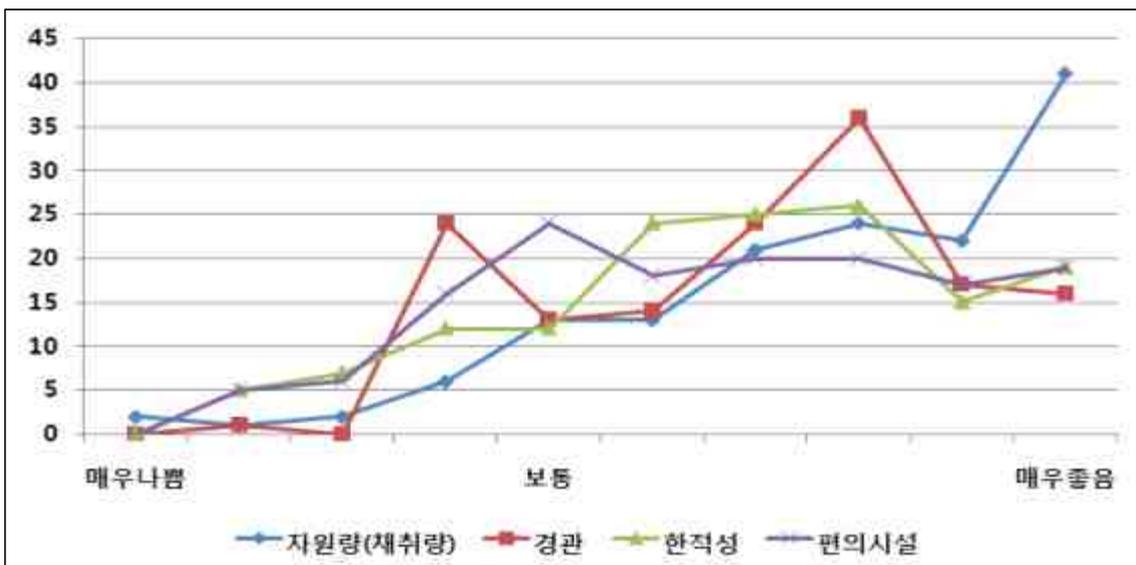


그림 9-3 사업지역 응답자 만족도.

다. 간접편익 추정 결과

간접편익의 추정은 종속변수 1년간 인근지역 관광횟수로 독립변수는 소득, 비

용(여행비용+ 기회비용), 환경변화에 인식도, 방문 요인만족도(경관, 한적도)으로 분석하였다.

추정된 모형의 통계적 유의도를 살펴보기 위해 '모든 추정계수는 0이다'라는 귀무가설을 상정하면 다음과 같이 우도비 통계량(LR)을 구성할 수 있다.

$$LR = -2(\ln L_0 - \ln L_T)$$

여기서 $\ln L_0$ 는 상수항을 제외한 모든 추정계수가 0이라는 귀무가설하에서 추정된 결과로부터의 로그우도함수값을 의미하며, $\ln L_T$ 는 원래의 추정결과로부터의 로그우도함수값을 의미한다.

모든 추정계수가 0이라는 귀무가설 하에서 계산된 LR-통계량에 대한 p-값이 0.000인 것으로 보아 유의수준 1%에서 이 귀무가설은 여유있게 기각이 되며, 추정된 모형은 모두 통계적으로 유의하다는 것을 볼 수 있다.

<표 9-15> 간접편의 추정 실증분석 결과

변수명	절단된 음이항모형
상수항	1.542 (.0853)***
환경변화 인식	0.1057 (.0325)*
연간소득	0.00051 (.0002)***
경관 및 한적도	0.01275 (.00538)**
여행비용	-0.00001613 (0.000023)***
Alpha	0.50214 (.02286)***
Log likelihood	-1432.3
Likelihood Ratio	3213.04***

주 : 괄호안은 표준오차를 나타냄. ***, **, 및 *는 각기 1%, 5%, 및 10%에서 통계적으로 유의한 것을 나타냄

α 값이 1%에서 통계적으로 유의하게 나타나 $\alpha=0$ 는 기각되므로 과산포가 존재

하는 것으로 나타난다. 따라서 평균과 분산이 동일하지 않기 때문에 포아송 모형은 적절하지 않으며 음이항모형을 이용하는 것이 적절하다.

Hellerstein과 Mendelsohn(1993)은 가산자료의 모형으로부터 추정된 수요곡선으로부터 소비자잉여, 즉 경제적 가치를 추정할 수 있는 방법을 소개하였다. 수요 모형의 소비자잉여(CS=Consumer Surplus)는 다음의 식을 통하여 추정할 수 있다.

$$E(CS) = \frac{E(y_i|x_i)}{-\beta_p} = \frac{\hat{\lambda}_i}{-\beta_p}$$

여기서 $\hat{\lambda}_i$ 는 평균방문횟수, β_p 는 관광경비의 추정계수를 나타낸다. 따라서 1회 방문당 소비자잉여는 단순히 $1/-\beta_p$ 로 나타낼 수 있다.

이를 통해 어장환경개선지역의 방문객의 1회당 경제적 가치를 추정해보면 약 61,996원으로 추정된다.

퇴적물의 준설 및 어장환경개선과 같은 환경자연자원(공공재)의 공급에 대한 간접편익에 대한 추정은 활발히 이루어지지 못한 실정이며, 본 연구와 유사한 사업으로는 한국해양연구원(2007)⁴⁾의 선행연구를 들 수 있다. 해안지역의 오염수중 퇴적물에 대한 경제적 가치 중 간접효과인 관광 증가효과를 ZTCM을 이용하여 분석하였으며, 여수선소지역의 사례분석에서는 1인당 관광편익은 약 190,769원으로 추정되었다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 추정된 61,996원 보다 높으며, 모형 설정에 있어서 ITCM과 ZTCM의 추정방법의 상의함과 분석에 사용된 설문조사에 있어서 지역 방문객의 특성차이에 기인하는 것으로 사료된다.

4) 한국해양연구원, '해양오염퇴적물 조사, 정화복원체계 구축(III) 2007

4. 프로그램별 경제성 분석 결과

4.1. 경제성 분석 결과

4.1.1 경운

연구어장 중 경운만으로 어장을 개선시킨 법산 어촌계의 경우 총 대상면적은 6ha 이며, 초기사업의 투자비용은 12,364천원 이다.

경제적 타당성 분석결과는 NPV가 2,605,082원, IRR이 12.9%, B/C ratio이 1.092로 사업의 경제성이 있는 것으로 나타났다.

<표 9-16> ‘경운’ 유형 경제적 타당성 분석결과

년 도	비용(천원)			편익(천원)			순편익 (천원)
	초기비용	운영 및 생산비용	총비용	직접편익	간접편익	총편익	
0	12,364	0	12,364	0	0	0	-12,364
1	0	1,812	1,812	5,003	469	5,472	3,660
2	0	5,793	5,793	7,004	469	7,473	1,680
3	0	3,623	3,623	10,006	469	10,475	6,851
4	0	5,793	5,793	7,004	469	7,473	1,680
5	0	1,812	1,812	5,003	469	5,472	3,660

	NPV	IRR	B/C ratio
값	2,605,082원	12.9%	1.092
경제적 타당성	≥0	≥ 사회적할인율(5.5%)	≥1
	경제성이 있는 것으로 판단		

4.1.2. 모래살포 + 객토

모래살포 후 객토를 실시한 송현 어촌계 및 파도어촌계의 현존량은 1ha 당 1,790 kg으로 유형별로는 3번째 수준이며, 사업을 위한 초기투자 비용은 22,726 천원으로 나타났다. 경운만 하는 경우에 비하여 사업의 투자비용이 높으며, 현존량도 높은 것으로 조사되었다.

경제적 타당성 분석결과는 NPV가 5,429,031원, IRR이 13.7%, B/C ratio이 1.166로 나타났다.

이는 NPV가 0보다 높으며, IRR은 분석에 사용된 사회적할인율인 5.5%보다 높고, B/C ratio도 1보다 커 사업의 경제성이 있는 것으로 분석된다.

<표 9-17> ‘모래살포 + 객토’ 유형 경제적 타당성 분석결과

년 도	비용(천원)			편익(천원)			순편익 (천원)
	초기비용	운영 및 생산비용	총비용	직접편익	간접편익	총편익	
0	22,726	0	22,726	0	0	0	-22,726
1	0	1,434	1,434	6,221	469	6,689	5,255
2	0	3,680	3,680	8,709	469	9,177	5,497
3	0	1,429	1,429	12,441	469	12,910	11,481
4	0	3,680	3,680	8,709	469	9,177	5,497
5	0	1,434	1,434	6,221	469	6,689	5,255

	NPV	IRR	B/C ratio
값	5,429,031	13.7%	1.166
경제적 타당성	≥0	≥ 사회적할인율(5.5%)	≥1
	경제성이 있는 것으로 판단		

4.1.3. 모래살포 + 저질개선제 + 객토

모래 및 저질개선제 살포 후 객토한 연구어장은 신덕과 파도어촌계였으며 현존량은 1ha 당 2,700.40 kg으로 유형별로 보았을 때 가장 높은 것으로 나타났으며, 경운만 하였을 경우의 약 2.8배 정도 이다.

사업을 위한 초기투자 비용은 37,356천원으로 각 개선 프로그램 중 가장 높은 투자비용을 가지는 것으로 분석된다.

경제적 타당성 분석결과는 NPV가 8,227,518원, IRR이 13.1%, B/C ratio이 1.171로 나타났다. 이는 NPV 및 B/C ratio에 비추어 보았을 때 경제성이 가장 좋을 수 있다.

이는 NPV가 0보다 높으며, IRR은 분석에 사용된 사회적할인율인 5.5%보다 높고, B/C ratio도 1보다 커 사업의 경제성이 있는 것으로 분석된다.

<표 9-18> ‘모래살포 + 저질개선제 + 객토’ 유형 경제적 타당성 분석결과

년 도	비용(천원)			편익(천원)			순편익 (천원)
	초기비용	운영 및 생산비용	총비용	직접편익	간접편익	총편익	
0	37,356	0	37,356	0	0	0	-37,356
1	0	1,405	1,405	9,381	469	9,850	8,445
2	0	3,884	3,884	13,134	469	13,602	9,718
3	0	2,155	2,155	18,762	469	19,231	17,076
4	0	3,884	3,884	13,134	469	13,602	9,718
5	0	1,405	1,405	9,381	469	9,850	8,445

	NPV	IRR	B/C ratio
값	8,227,518원	13.1%	1.171
경제적 타당성	≥0	≥ 사회적할인율(5.5%)	≥1
	경제성이 있는 것으로 판단		

4.1.4. 저질개선제 + 객토

저질개선제 살포 후 객토한 연구어장은 학암포어촌계로 현존량은 1ha 당 1,826.20 kg으로 유형별로 보았을 때 두 번째로 높다. 이는 경운만 할 경우의 약 2 배 정도 이다.

사업을 위한 초기투자 비용은 26,356천원이다.

경제적 타당성 분석결과는 NPV가 2,399,595원, IRR이 8.7%, B/C ratio이 1.066로 나타났다. 이는 NPV 및 B/C ratio에 비추어 보았을 때 경제성이 가장 좋을 수 있다.

이는 NPV가 0보다 높으며, IRR은 분석에 사용된 사회적할인율인 5.5%보다 높고, B/C ratio도 1보다 커 사업의 경제성이 있는 것으로 분석된다.

<표 9-19> ‘저질개선제 + 객토’ 유형 경제적 타당성 분석결과

년 도	비용(천원)			편익(천원)			순편익 (천원)
	초기비용	운영 및 생산비용	총비용	직접편익	간접편익	총편익	
0	26,356	0	26,356	0	0	0	-26,356
1	0	1,463	1,463	6,344	469	6,813	5,350
2	0	3,706	3,706	8,882	469	9,350	5,644
3	0	1,457	1,457	12,688	469	13,157	11,700
4	0	3,706	3,706	8,882	469	9,350	5,644
5	0	1,463	1,463	6,344	469	6,813	5,350

	NPV	IRR	B/C ratio
값	2,399,595원	8.7%	1.066
경제적 타당성	≥ 0	≥ 사회적할인율(5.5%)	≥ 1
	경제성이 있는 것으로 판단		

4.2. 개선 프로그램별 효과 비교분석

앞서 현존량 분석량과 초기투자비용과의 관계를 살펴보면 양의 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다. 즉 현존량을 높이기 위한 개선 방법일수록 사업에 투자되는 비용이 높은 것이다.

어장환경개선 프로그램별 경제적 효과를 비교해보면 모든 방법에서 경제성이 있는 것으로 분석되어 사업의 타당성을 가지는 것으로 나타났다.

프로그램별로 경제성을 보여주는 수치인 NPV 및 B/C ratio 값을 살펴보면 현존량과 초기투자비용이 가장 높은 ‘모래살포 + 저질개선제 + 객토’의 유형에서 값이 가장 높아 투입비용이 높은 반면, 사업으로 인한 편익의 규모도 크기 때문에 경제성이 가장 높은 것으로 파악된다.

그러나, ‘저질개선제 + 객토’의 경우에는 사업으로 인한 현존량과 초기투자비용은 2번째이나 사업의 경제성이 제일 낮은 것으로 분석되었다.

이는 사업으로 인한 초기투자비용이 상대적으로 높은 반면 생산량의 증가는 비용의 투입만큼 높지 않기 때문에 발생하는 것으로 파악된다. 결국 이 유형의 개선 프로그램은 경제적 효율성이 상대적으로 낮다.

<표 9-20> 프로그램별 경제적효과 비교분석결과

	경운	모래살포 +객토	모래살포 +저질개선제+ 객토	저질개선제+객 토
1ha당 현존량	960.1	1,790.60	2,700.40	1,826.20
1ha당 초기투자비용	2,060,667	5,681,500	9,339,000	6,589,000
NPV	2,605,082원	5,429,031원	8,227,518원	2,399,595원
IRR	0.129	0.137	0.131	0.087
B/C ratio	1.092	1.166	1.171	1.066

제 10장. 종합결론

1. 기초생물량

태안반도에 과거 유류피해 및 노후한 어장에 시험어장을 지정하고 환경개선을 실시하였다. 환경개선을 실시한 시험어장에 대하여 계절별 기초생물량을 조사한 결과 식물플랑크톤 현존량은 하계(2010년 8월)에 429~356,332 cell/l, 추계(2010년 11월) 41,720~125,960 cells/l, 동계(2011년 2월) 63,030~351,519 cells/l, 춘계(2011년 4월) 71,260~328,200 cells/l로 점차 증가하였으며, 계절별로 송현 1, 신덕 1, 법산 2, 태안 2 정점에서 높게 출현하였다. 반면 대조구로 지정한 의항 어촌계 지역이 조사기간 동안 모두 낮게 나타났다. 종 다양도 지수, 종 균등도 지수는 계절 및 정점별로 차이를 보였다.

동물플랑크톤은 기초생산자로 대표되는 식물플랑크톤을 먹이로 하여 상위 영양 단계로 전달하는 중간 고리로서 중요한 역할을 수행한다. 조사기간 동안 모든 지역에서 최우점 분류군은 요각류였으며, 하계에 출현개체수는 848.7(대조구 의항) ~ 12,025.2 indiv./m³(실험구 신덕)(평균 5,787.5 indiv./m³)(200 μ m NORPAC 네트)으로, 대체적으로 대조구에서 낮게 나타났다. 반면, 추계에는 69.1(실험구 파도2) ~ 304.6 indiv./m³(대조구 의항)(평균 184.5 indiv./m³)(200 μ m NORPAC 네트)으로 실험구 보다는 대조구에서 높게 나타났고, 동계 역시 36.6(실험구 법산) ~ 514.6 indiv./m³(대조구 의항)(평균 166.4 indiv./m³)으로 나타났다. 춘계조사에서는 122.6(실험구 파도2) ~ 619.6 indiv./m³(실험구 법산)(평균 317.6 indiv./m³)으로 조사되어 계절에 따른 변화가 높게 나타났다. 식물플랑크톤과 같이 종 다양도 지수, 종 균등도 지수는 계절적으로 차이를 보였으나 집괴분석 결과는 공간적으로 정점 사이에 높은 유사성을 보였다.

저서생물의 경우 조사기간 동안 계절별 차이는 있으나 갯지렁이류가 우점하여 나타났으며, 총출현종수는 하계와 추계조사에서 20종, 동계와 춘계조사에서 27종이 출현하였으며, 각 정점에 대한 군집분석 결과 저질의 성상에 따라 차이를 보였다. 하계조사에 정점군에 영향을 미치는 생물로 은갯지렁이, *Paralacydonia paradoxa*, 참송갯지렁이, *Lumbrineris japonica* 였으며, 하계에는 시설전으로 신덕2와 송현2가 정점군으로 묶이고 타 정점에서 각각 독립적으로 나타나 정점간

차이를 나타내었다. 반면 추계 조사에서는 파도1, 신덕 1, 신덕2, 송현2가 그룹을 이루었고, 하계조사와 같은 은갯지렁이, *Paralacydonia paradoxa*, 참송곳갯지렁이, *Lumbrineris japonica* 가 주요 기여종이었다. 이후 동계조사부터 정점 학암1, 학암2가 추가되었으나 학암1과 학암2는 근소만과 달리 외해의 영향을 받는 지역으로 사실로 이루어져 있어 생물상이 다르게 나타났다. 정점 학암1과 학암2는 같은 그룹으로 묶였으며, 주요 기여종은 엽낭게, *Scopimera globosa*, *Iphinoe tenera*, 서해비단고둥, *Umbonium thomasi* 이었으며, 반면, 근소만에 위치한 정점은 각각 외해의 영향을 받는 정점과 내만 정점으로 나뉘었고, 기여종 역시, 외해 영향을 받는 지역은 참송곳갯지렁이, *Lumbrineris japonica*, 주름대나무갯지렁이, *Praxillella affinis*, 굴속살이게, *Pinnotheres sinensis* 가, 내만의 정점은 남방백갯지렁이, *Nephtys polybranchia*, 삼각모자갯지렁이, *Scoloplos armiger*, 명주실타래갯지렁이, *Cirriformia tentaculata*, 민송참갯지렁이, *Nereis surugaense* 였다. 각 정점별 저서동물의 출현량은 출현종 및 계절별 차이는 있으나 대부분 증가하였다.

2. 해양환경

해수 중 수소이온농도(pH)는 동계에서 상대적으로 높고 추계 낮은 농도를 나타내었으며, 총별로는 표층과 저층에서 비슷한 농도를 보였고, 전 조사 해역에서 해역 수질기준 등급 I 을 나타내었으며, 용존산소(DO)는 9월 조사시기를 제외한 모든 조사시기에서 해역수질기준 등급 I 의 수질을 나타내었다. 부유물질(SS) 농도 범위는 2월에 가장 높은 농도를 보였고, 7월 에 가장 낮은 농도를 보였다. 태안과 대조구의 부유물질의 평균 농도는 9월을 제외한 다른 월별에서는 대조구에서 높은 농도를 나타내었고, 화학적 산소요구량(COD)은 조사시기별로 2월에 가장 낮은 농도를 나타내었으며 해역수질기준의 I ~III 등급을 나타내었으며, 대조구는 III 등급을 나타내었다. 용존무기질소(DIN)는 조사시기별로 4월에 가장 높은 농도를 9월에 가장 낮은 농도를 나타내었고, 용존무기인(DIP)은 조사시기중 4월에 용존무기질소와 달리 가장 낮은 농도를 나타내었고 총별로는 9월을 제외하고는 저층이 표층보다 상대적으로 높은 농도를 나타내었다. 총질소(TN)의 농도범위는 조사시기 중 9월이 가장 높은 농도를 나타내었고 표층이 저층 보다 높은 농도를 나타내었다. 전반적으로 0.3mg/L 에서 0.6mg/L 전후를 나타내어 해양환경수질기준 등급 II~III

등급에 해당되는 수질을 나타내었다. 총인(TP)은 조사시기 중 9월 표층에서 농도 범위가 상대적으로 가장 높은 농도범위를 나타내었으며, 대부분 조사해역에서 0.5mg/L 전후의 농도를 보이고 있어 해양환경수질기준 등급 II~III에 해당되는 수질을 나타내었다.

해양퇴적물 중 유기물 함량의 간접적 지표를 나타내는 강열감량(IL)은 조사시기 중 9월에 가장 높은 농도범위를 보였으며, 모든 조사시기에 걸쳐 대조구에서 다소 높은 농도를 나타내었으며, 산취발성황화물(AVS)은 조사시기 중 9월에 상대적으로 가장 높은 농도분포를, 2월에 상대적으로 가장 낮은 분포범위와 평균값을 나타내 해양퇴적물의 수산용수기준치인 0.2 mg/g-dry 이하의 농도를 나타내었다. 화학적 산소요구량(COD)은 조사시기 중 11월에 가장 높은 농도범위와 평균값을 나타내었으며, 전 조사시기에서 농도범위는 퇴적물의 부영양화와 저질의 수산용수 기준치를 나타내는 기준치인 20 mg/g-dry(일본수산자원보호협회편, 1998, 2000) 이하의 농도를 나타내었다.

퇴적물의 pH 분포범위와 평균값을 보면, 7월에는 7.64~7.89(평균 7.76)를 나타내었고, 9월에는 7.20~8.10(평균 7.84)을 나타내었고, 11월 7.83~8.19(평균 8.06)를 나타내었으며, 2월 8.12~8.31(평균8.21)를 나타내었고, 4월 7.65~7.99(평균 7.85)를 나타내었다.

3. 유류 및 중금속

시험어장의 저질시료 16 PAHs 함량은 시설물 설치 전에는 13.56 ~ 51.61 ppb를 나타내었고 시설물 설치 후에는 11.03 ~ 37.05 ppb를 나타내 시설물 설치 후 전반적으로 16 PAHs 함량이 감소되는 경향을 보였다. 또한, 그 농도가 지역 특이적으로 크게 다르게 나타났다. 본 결과와 유사하게 태안의 가의도, 길음이, 고장동, 신진도, 안기리, 용신, 소근·의항2구, 팔봉 어촌계의 생물에서도 지역에 따라 16 PAHs 함량의 수십~수백 배 농도차가 확인되었다(부경대, 2009).

본 분석결과에서 나타난 16 PAHs 및 TEQ 함량의 차이는 과거 허베이스피리트 호 사고당시 해당어장의 초기유류오염 정도의 차이에 따른 것과 본 조사가 사고 직후가 아닌 사고 후 약 29개월이 지나 착수되어 이 기간 동안에 지역별 방제활동 등의 영향으로 인해 본 조사의 농도수준이 획일적인 해당어장의 오염정도를 판단할 수 있는 기준으로 판단하기는 어려우나, 일반적으로 석유계에서 유출된 기름은

벤젠 고리의 일부가 치환된 형태로 존재하는 경우가 많은데, 이러한 형태는 PAHs가 석유로부터 유래되었다는 것을 나타낸다. 특히 원유에는 pyrene, chrysene, benzo[a]yrene과 같이 고분자량을 갖는 PAHs가 매우 낮은 농도로 존재하는데 고분자량의 PAHs는 주로 연소와 관련하여 발생하기 때문이다(Kingston, 2002). 유류유출사고 후 3년이 경과한 저질시료에서 PAHs 함량이 기준치 이하로 탐지되었다는 것은 지역별 방제활동에 의해 연안의 잔존유가 상당량 제거되었고 유화제로 바닥에 가라앉은 허베이 스피리트호 유류유출사고의 잔존유는 지속적으로 환경적 요인에 의해 자연분해되었다는 것을 의미한다.

본 조사에 앞서 시행된 선행조사에 따르면 서해안의 생태계 및 생물에서 탐지되는 유류는 허베이스피리트호에서 유출된 것임을 이종지수(C2D/C2P vs C3D/C3P) 및 유지문을 통해 증명되었다(국토해양부, 2009). 또한, 원유에는 바나듐(V), 니켈(Ni), 알루미늄(Al) 등 중금속도 함유되어 있다는 것이 밝혀져 있으나(국토해양부, 2009), 현재에는 거의 잔존하지 않는 정도로 확인되었다.

어류의 경우 이동성과 더불어 석유 성분을 생체 대사과정 중에 생체 물질로 변환시킬 수 있는 효소(mixed function oxynase, MFO)를 이용해 석유에 함유된 PAHs를 빠르고 효과적으로 생화학적 변환이나 대사산물로 변환시켜 최종적으로 담즙으로 배출시키는 반면(Varanasi et al., 1989), 패류를 포함한 무척추동물은 석유화합물을 느리고 비효율적으로 대사함으로서 생체내의 다양한 분자량의 PAHs가 고농도로 축적된다(Law and Hellou, 1999). 어류 체내에서 상대적으로 분해가 빠르며, 갑각류, 패류로 갈수록 분해 능력이 떨어져 체내 잔류기간이 길어지는 사실은 본 분석자료에서도 확인되었고, 아울러 생물의 대사능력으로 인하여 체내 잔류 PAHs 농도가 빠르게 감소한 것으로 판단된다.

4. 어장환경 개선방법별 효과 조사

어장환경 개선은 노후화된 어장 또는 급격한 오염으로 인해 황폐해진 어장을 개선하여 생산성을 높이고 수산생물이 서식하기 적합한 환경으로 만들어주는 것인데 이러한 방법은 과거부터 지속적으로 이루어져왔으나 이에 대한 객관적 자료가 마련되지 않았다.

본 연구에서는 모래살포, 객토, 경운, 저질개선제 등을 단독 또는 복합적으로 적용하여 각 어장에 적합한 환경개선 방법에 대한 효과를 밝히고자 어장환경개선

후 바지락 종패를 살포하여 생존율과 현존량을 조사하였다. 모든 시험어장의 저질은 5cm 깊이로 농업용 관리기를 이용하여 뒤엎었다. 이 후 파도어촌계를 제외하고 평균각장 24.83mm의 바지락 종패를 단위면적당 200개체씩 살포하였으며, 파도어촌계의 시험어장은 우선적으로 협의가 이루어져 2개의 시험어장을 확보였으며, 평균각장 25.42mm의 바지락 종패를 단위면적당 200개체씩 살포하여 성장과 생존율을 조사하였고, 각장에 대한 성장은 타 시험어장과 동일한 시기로 적용하였다.

각 시험어장별 바지락 종패의 성장도는 모래살포 후 객토를 실시한 송현어촌계 어장에서 각장과 중량이 각각 20.70%, 21.43% 증가하였고, 파도어촌계(1) 어장에서는 각장과 중량이 6.87%, 4.13%의 성장을 나타내었다. 경운만 실시한 법산어촌계 어장은 각장과 중량성장이 각각 25.94%, 97.37%였고, 저질개선제 살포 후 객토한 학암포 어촌계는 각장이 11.32%, 전중량이 56.02% 증가하였다. 모래 및 저질개선제 살포 후 객토한 신덕어촌계와 파도어촌계(2)의 바지락 종패 각장성장은 각각 27.79%, 12.98%였으며, 중량성장은 각각 17.67%, 14.56%로 나타났다.

시험어장의 바지락 종패 생존율과 분포밀도는 모래살포 후 객토를 실시한 어장에서 30.40개체/㎡로 15.2%의 생존율을 보였으며, 경운만을 실시한 어장에서는 17.40개체/㎡로 8.7%의 낮은 생존율을 나타내었다. 모래 및 저질개선제 살포 후 객토한 시험어장에서는 신덕어촌계에서 23.9%, 파도어촌계에서 13.7%의 생존율을 보였으며, 각각 47.80개체/㎡, 27.40개체/㎡로 가장 높았다. 저질개선제 살포 후 객토한 학암포어촌계는 41.60개체/㎡로 20.8%의 생존율을 나타내 동일기간에 생존율을 비교하면 모래와 저질개선제 살포후 객토한 시험어장이 가장 높았고, 저질개선제와 객토, 모래살포와 객토 순으로 생존율 나타내 모래살포가 기본으로 이루어지며 이에 저질개선제 또는 객토가 같이 이루어져야 효과적인 것으로 판단된다.

5. 사회·경제적 효과

전반적인 데이터를 분석한 결과 현존량 분석량과 초기투자비용과의 관계를 살펴보면 양의 상관관계를 가지는 것을 알 수 있으며, 이것은 현존량을 높이기 위한 개선 방법일수록 사업에 투자되는 비용이 높은 것이다.

어장환경개선 프로그램별 경제적 효과를 비교하면 모든 방법에서 경제성이 있는 것으로 분석되어 사업의 타당성을 가지는 것으로 나타났으며, 프로그램별로 경제성을 보여주는 수치인 NPV 및 B/C ratio 값을 살펴보면 현존량과 초기투자비용

이 가장 높은 ‘모래살포 +저질개선제+ 객토’의 유형에서 가장 높은 값이 나타나 투입비용은 높으나 사업으로 인한 편익의 규모도 크기 때문에 경제성이 가장 높은 것으로 파악된다.

반면, ‘저질개선제+객토’의 경우에는 사업으로 인한 현존량과 초기투자비용은 2 번째이나 사업의 경제성이 제일 낮은 것으로 분석되어 사업으로 인한 초기투자비용이 상대적으로 높은 반면 생산량의 증가는 비용의 투입만큼 높지 않기 때문에 발생하는 것으로 파악된다. 결국 이 유형의 개선 프로그램은 경제적 효율성이 상대적으로 낮다.

6. 결론

해양의 생산성은 육지에 비하여 높고, 활용도가 높아 보호하고 육성하여야 할 우리의 소중한 자원이다. 산업화와 도시화로 인해 하천과 바다는 오염이 되어가고, 증가하는 양식장은 연작으로 환경에 해가되고 있다. 이를 보호하기 위해 정부에서도 오염된 환경을 개선하기 위한 노력을 활발히 진행하고 있으며, 각 자율어장에 재원을 지원하고, 준설과 양식장의 규제, 오염물질에 대한 총량제 등 재정과 제도적 기반을 마련하고 있다. 현재 환경개선을 위해 시행하고 있는 모래살포, 객토, 경운 등 공공사업이 이루어지고 있으나 이에 대한 효과가 밝혀지지 않아 본 연구에서는 환경개선 방법에 따른 효과를 조사하였다.

기초생물량은 동·식물플랑크톤 및 저서생물에서 어장환경프로그램 전후로 증가하였고, 또한, 해양환경 역시 대조구 대비 개선되는 것으로 나타나 어장환경개선방법별 효과가 모두 나타나는 것으로 조사되었다. 반면, 동일한 조건으로 보기는 어려우나 인근한 시험어장에 살포한 바지락 종패의 생존율과 성장률에서는 모래살포와 객토, 모래살포와 저질개선제 및 객토한 시험어장에서 높은 생존율과 성장률을 나타내 각 어장환경개선 방법 중 효과가 높게 나타났다. 저질 성상이 사질인 학암포어촌계를 제외한 타 시험어장은 모두 펄이 많이 섞인 니사질로 모래가 살포된 시험어장에서 특히 높은 생존율을 보여 모래살포가 가장 기본적인 방법으로 판단된다. 이는 바지락 뿐만 아니라 이에 적응하여 서식하는 기타 해양생물의 종 및 현존량을 증가시켜 생태계 복원에 작용했다 판단된다. 또한, 경제적 효과에서도 역시 경운만 할 경우보다 모래살포가 포함된 개선방법에서 더 높은 효과를 나타내 모래살포가 가장 기본적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구결과를

종합하여 어장환경 개선을 위한 프로그램을 도식화하면 그림 10-1과 같았으며, 각 후보지별 어장환경 방법별 메뉴얼은 <표 10-1>과 같았다.

<표 10-1> 각 후보지별 어장환경 방법별 메뉴얼

어장개선방법	주요항목	추진 사항	비고
경운 (법산어촌계)	대상어장 환경상태 (개선전)	저질형성 파악: 니사질 퇴적물환경 파악: pH 7.65 유용생물 유무조사: 과거 바지락 서식 오염지표종 유무관계: 3종 파악	
	개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무 오염지표종 유무	
	투입물량 및 장비	농업용 관리기	
	개선방법 실시내용	관리기를 이용하여 15cm 경운	
	환경 등 변화상태	퇴적물 pH 7.8이상으로 상승	
	개선후 효과분석	바지락 살포 2개월 조사 후 생존율 8.7% 효과	
	기타 특이 사항	타 연구 지역 중 가장 생존율 저조	

<표 10-1> 계 속

어장개선방법	주요항목	추진 사항	비고
저질개선제+ 객토 (학암포 어촌계)	대상어장 환경상태 (개선전)	저질형성 파악: 사질 퇴적물환경 파악: pH 7.38 유용생물 유무조사: 과거 바지락 서식	
	개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무	
	투입물량 및 장비	저질개선제 0.62ton 투입 농업용 관리기	1ton/pH, 0.1/ha
	개선방법 실시내용	저질개선제 살포와 동시에 관리기를 이용하여 15cm 객토	
	환경 등 변화상태	퇴적물 pH 8.0이상으로 상승	
	개선 후 효과분석	바지락 살포 2개월 조사 후 생존율 20.8% 효과	
	기타 특이 사항	어장 개선전 조사에서는 바지락이 전 혀 채취되지 않았으나, 개선 후 타 지 역보다 환경변화가 가장 크게 바뀌면 바지락이 형성되고 있었음.	

<표 10-1> 계 속

어장개선방법	주요 항목	추진 사항	비고
모래 살포+객토 (송현형어촌계, 파도어촌계)	대상어장 환경상태 (개선전)	저질형성 파악: 사니질, 니사질 퇴적물환경 파악: pH 7.56 유용생물 유무조사: 과거 바지락 서식 오염지표종 유무관계: 2종	파도어촌계: 無 송현어촌계: 有
	개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무(비교 여부) 오염지표종 유무	파도어촌계: 니사질 송현어촌계: 사니질
	투입물량 및 장비	모래(2mm 기준) 50ton 농업용 관리기	500ton/ha
	개선방법 실시내용	모래(2mm 기준) 5cm두께 투입 후 농업용 관리기 이용하여 간조시 15cm 깊이로 객토	
	환경 등 변화상태	퇴적물 pH 7.8이상으로 상승	
	개선후 효과분석	바지락 살포 2개월 조사 후 생존율 15.2% 효과	
	기타 특이 사항	과거 바지락 서식의 유무와 관계없이 환경 개선후 살포시 생존 가능성 확인	

<표 10-1> 계 속

어장개선방법	주요항목	추진 사항	비고
모래살포+ 개선제+객토 (신덕어촌계, 파도어촌계)	대상어장 환경상태 (개선전)	저질형성 파악: 니사질 퇴적물환경 파악: pH 7.46 유용생물 유무조사: 과거 바지락 서식 오염지표종 유무관계: 1종 파악	
	개선방법 결정기준	적용저질: 니사질 또는 사니질, 사질 퇴적물 pH 7.8이하 유용생물 유무 오염지표종 유무	
	투입물량 및 장비	저질개선제 0.62ton 투입 모래(2~4mm 기준) 50ton 농업용 관리기	
	개선방법 실시내용	모래(2~4mm 기준) 50ton 살포 후 저 질개선제 0.62ton 투입과 동시에 관리 기를 이용하여 15cm 깊이로 객토	
	환경 등 변화상태	퇴적물 pH 7.8이상으로 상승	
	개선후 효과분석	바지락 살포 2개월 조사 후 생존율 23.9% 효과	
	기타 특이 사항	타 연구 지역 중 가장 높은 생존율	



그림 10-1. 어장환경개선 프로그램 모식도.

7. 연구의 한계점

본 연구는 오염, 훼손 및 노후화한 어장에 대한 효과적인 개선방법을 밝히기 위하여 농림수산식품부로부터 지원을 받아 연구를 수행하였다. 특히, 연구의 주요 과업이 유류로 인한 피해 어장에 대한 개선방법을 개발하는 것이었으며, 이를 위해 유류피해지역을 조사한 결과 전라남도 여수(씨프린스호, 1995년)와 충남 태안(허베이 스피리트호, 2007년) 중 가장 최근에 사고가 발생한 충남 태안 지역을 선정하여 실시하였으나 사고 당시 정부의 방제작업과 복원노력, 전국민 자원봉사로 환경복원이 상당히 진척되었고, 사고시점으로부터 3년 이상 경과하였으며, 사전조사에서도 저질 환경은 악화되어 있었으나 유장은 찾아보기 힘들었다. 실험실과 같이 인위적으로 환경을 조절할 수 없는 어장에 대한 조사로 인해 다양한 환경을 접목하기 어려웠다.

또한, 어촌계와 협의과정을 거치는 동안 환경개선 방법에 따른 우려로 환경개선 방법에 대한 제약이 따랐고, 특히, 지역적 특성과 특정 수산생물에 대한 집중도가 어촌사회에 뿌리 깊게 내려있어 바지락 외의 다른 수산생물을 실험 대상으로 하는 것에 매우 부정적이며 대상생물에 대한 다양성에 한계가 있었다. 향후 보다 심도 깊은 연구수행을 위하여 본 연구결과가 실질적으로 현장실험에 도움이 될 것으로 예상되며, 연구의 체계적이며 원활한 수행을 위하여 무엇보다 지역 어민의 적극적인 참여와 관심을 유도할 수 있도록 사회적 합의가 필요하다.

이와 더불어 환경개선 효과를 확인하기 위한 시험어장이 어가경제 향상과 관리 및 유지를 위해 어촌계 마을어장내에 위치함으로써 최소한의 면적으로 실험을 실시할 수밖에 없었으며, 1년이라는 단기간에 생태계 및 환경의 변화를 모니터링하기에는 다소 물리적 시간의 제약이 따랐다. 따라서, 어장환경개선을 실시한 시험어장에 대한 지속적인 관리와 장기간 모니터링이 반드시 요구된다.

8. 최종결론

◇ 본 연구는 노후, 훼손 및 오염된 어장에 대한 환경을 효과적으로 개선하여 생산성을 높이고 이후 어장환경개선 프로그램을 개발하기 위하여 수행되었으나 이미 노후화되고 오염된 어장에 대한 개선방법으로 모래살포만이 효과적이라는 의식이 지배적이었다.

◇ 이에 대한 여러 가지 어장환경개선 방법에 대한 신뢰를 얻는데 시간적 소모가 상당히 있었던바 본 자료를 활용하여 어장환경개선에 대한 홍보로 이용한다면 차후 어장환경개선과 같은 연구가 진행될 때 보다 객관적인 연구를 진행할 수 있을 것으로 생각된다.

◇ 또한, 어민대표들은 적용대상 수산생물의 다양성에 있어서 지역 어장의 주요 수산생물을 적용하길 바라였기에 바지락에 한하여 조사되어 바지락어장에 대한 어장환경개선 프로그램이라는 한계가 있었다.

◇ 기존 어장의 생산성을 고려하여 어민의 경제적, 사회적인 의도를 이해하고, 보다 생산성 있는 어장환경개선을 위해서는 다각적인 연구방법과 지역별 환경에 맞는 개선방법 등이 각 수산생물별로 다양한 어장에서 이루어져야한다고 생각된다.

◇ 어느 지역이든 물리·화학적 성상이 같은 지역은 존재하기 어렵고, 모든 어장에 일률적인 방식을 적용하는 것은 매우 비효율적이므로 노후 및 훼손 정도를 생물학적, 물리·화학적 방법에 따라 기준을 설정하고, 이를 대상생물에 따라 어장의 기준 또는 등급을 설정하고, 이에 따른 적절한 프로그램을 적용하는 것이 보다 효율적인 방법이 될 것이다.

◇ 이러한 방법적 논의는 우선 어장환경의 표준화를 정립하는 노력이 필요하며, 어장환경의 표준화를 위해 생산성이 높거나 낮은 어장, 노후, 훼손 및 오염된 어장의 기준을 마련하여야하며, 노후, 훼손 및 오염된 어장뿐만 아니라 생산성이 높은 어장에도 어장환경개선 방법을 적용하여 정도에 따른 프로그램의 적용의 차이 및 생산성을 유지할 수 있는 효과적인 방법을 구명하여야 하여야 한다.

◇ 본 연구 역시 각 어촌계별로 가장 노후 또는 오염된 어장의 환경을 조사하여 어장환경개선 방법을 적용하였으나 보다 효율적인 어장환경개선을 위해서는 각 어장의 환경조건에 적합한 단계별 적용기준(어장환경의 표준화)이 요구된다.

◇ 따라서, 보다 일반적이고 효율적인 어장환경개선 프로그램을 개발하기 위해서는 지역별, 품종별 서식환경의 표준화 사업이 선행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 강영실, 박주석, 이상석, 김학균, 이필용, 1996. 진해만 수질 환경과 동물플랑크톤 군집 및 요각류 분포 특성. 한수지, 29(2): 415~430.
- 강제원, 1966. 한국산 해조의 지리적 분포. 부산수대 연보, 7(1,2) : 1~136.
- 교육과학기술부, 2003, 수산양식(하). (주)두산.
- 국립수산진흥원. 1989. 어류 양식(넙치), 수산 기술지 22-1호, 63pp.
- 국토해양부(MLTM), 2008. 독도의 지속가능한 이용연구. BSPM46401-1960-1, 792pp.
- 권오길, 1990. 한국동식물도감 제32권 동물편. 국정교과서, 446pp.
- 권오길, 박갑만, 이준상, 1993. 원색 한국패류도감. 아카데미서적, 서울, 445pp
- 김대일, 윤양호, 1997. 식물플랑크톤 군집으로 본 초겨울 한국 남서해역의 환경특성. 여수수산대학교 수산과학 연구소 연구보고지.
- 김수암, 1991. 수산자원 평가론. 우성문화사, 서울, 175pp.
- 김용억·명정구·김영섭·한경호·강충배·김진구, 2001. 한국해산어류도감, 한글. 382pp.
- 김용억, 김용문, 김영섭, 1994. 한국근해 유용어류도감. 국립수산진흥원, 299pp.
- 김재선. 1999. 서해안 고속도로(군산-무안간)건설공사 사후 환경영향조사 용역 중

유진양만장의 어업피해 조사보고서. 군산대학교 수산과학연구소(1999. 4), 12~47.

김종례, 수산 동식물명 사전. 현대해양사, 1988.

김훈수, 이인규, 고철환, 1982. 한국연안해역의 저서동물 군집에 관한 연구.

농림부, 1998. 피조개 양식어장의 개토효과 연구. 199pp.

마산시, 1988. 마산만 정화사업 기본 및 실시 설계보고서 (기본설계편), 1-36.

명정구, 김병일, 이선명, 전길봉, 낚시춘추, 2009. 우리바다 어류도감. 예조원, 287pp.

서호영, 이인태, 윤양호, 최상덕, 이상노, 한명일, 김병섭, 강윤호, 이우범, 2002. 가막만에 출현하는 동물 플랑크톤의 종조성과 계절별 출현 양상. 한국환경생물학회지, 20(2):118-119.

선영철, 김명진, 송영채, 고성정, 황응주, 조규태, 2010. 연안어장 준설퇴적물을 이용한 *Cochlodinium polykrikoides* 제거. 대한환경공학회지, 32(1): 1221-1228.

성기준, 이석모, 2008. 유류오염지역의 생태복원. 대한환경공학회지. 특집: 121~127.

안재환, 김미경, 이미경, 2005. 퇴적물 준설에 따른 수환경 영향 예측 모의. 대한환경공학회지, 27(11): 1228-1237.

윤석진, 이인철, 2004. 마산만 준설사업 및 하수처리장 가동에 따른 진해만의 수질변동. 마산만 준설사업 및 하수처리장 가동에 따른 진해만의 수질변동.

한국해양공학회 학술대회지, 117-122.

유성규, 1995. 천해양식. 신흥출판사. 656pp.

유종생, 1976, 원색 한국패류도감. 일지사, 서울, 196pp

윤성규, 홍재상, 1995. 해양생물학 (저서생물). 아카데미 서적. 412pp.

윤양호, 1998a. 완도 신지연안해역 식물플랑크톤 군집구조 특성. 여수대 논문집, 12(2) : 651-664.

윤양호. 1992. 다변량해석에 의한 여수연안해역 식물플랑크톤 군집의 변동특성. 한국수질보전학회지. Vol.8, No.3.

임현식, 1993. 진해만의 저서동물에 대한 생태학적 연구. 부산수산대학교 박사학위 청구논문, 311pp.

이찬원, 권영택, 윤지훈, 2004. 연안해역 오염퇴적물개선을 위한 준설편단지수. 한국해양환경공학회지, 7(2): 70-74.

정문기, 1997. 한국어도보. 일지사, 727pp.

정원무, 박우선, 서경덕, 2001. 항내 준설에 의한 항만 공진의 저감 항내 준설에 의한 항만 공진의 저감, 한국해안해양공학회지, 13(2): 122-138.

정지안, 조은영, 차재훈, 김미경, 김기태, 2001. 울릉도·독도 근해의 환경요인에 따른 식물플랑크톤 군집 구조의 변화. 한국조류학회지, 16 : 325-335.

제종길, 1993. 한국주변해역의 연성저질에 서식하는 연체동물의 분포. 서울대학교 박사학위 청구논문, 296pp.

한국어구도감, 2002. 국립수산과학원, 579pp.

한국동물분류학회, 1997. 한국동물명집 (곤충제외). 아카데미서적, 488pp.

한국 해양연구소(1996): 한반도 주변 조석조화상수 자료집

한국해양연구소, 1997. 여수, 여천 유류오염 사고지역의 환경 현황조사 최종보고서. 1255pp.

해양수산부(MOMAF), 2001. 전국 연안의 지속성 유기오염물질 오염 실태 조사. BSPM00070-00- 1336-3, 530pp.

해양수산부(MOMAF), 2005. 유류오염 환경재해 평가기술 개발. BSPM162-00-1489-4, pp 191-234.

해양수산부. 1998. 해양환경분석공정시험법. 1998-4호. 317p.

해양수산부. 전남 다도해형 바다목장 기초조사 사업 보고서. 236~282.

홍재상, 1983. 바다-그 환경과 생물. 전파과학사, 338pp.

황상일, 권정환, 2009. 먹이연쇄 생물축적 모형을 이용한 잔류유류오염물질의 생태위해성평가. 대한환경공학회지, 31(11): 947-956.

有馬健二, 1973. 石灰等によるヒトデ類の驅除について, 北水試月報. Vol. 30 No. 11

芙蓉海洋開發株式會社, 1988. 石灰撒布による靑潮對策實驗結果報告書, 1988年10月

芙蓉海洋開發株式會社, 1989. 富營養化水域の石灰撒布による水質・底質淨化効果について, 1989年

岐阜縣公衆衛生検査センター(財), 1990. 三河湾蒲郡埠頭沖の地先地域における浚渫
前の石灰撒布効果について, 日本石灰工業組合. 1990年2月

岐阜縣公衆衛生検査センター(財), 1992. 三河湾蒲郡埠頭沖のヘドロに対する石灰撒
布効果試験, 日本石灰工業組合. 1992年4月

岐阜縣公衆衛生検査センター(財), 1992. 石灰による淡水域の環境改善に関する研究,
1992年4月

堀江 毅, 1988. 海域環境改善技術の動向, 1988年港灣技術振興會講演集

伊藤 隆・岩田壽夫, 1959. 陸水學雜誌, Vol. 20, No. 64

岩井重久, 1989. 石灰による兒島湖底質・水質改良に関する研究

岩下哲志・下元靖剛, 1991. 石灰系改善劑による閉鎖性海域の環境改善, 石膏と石灰,
No. 234

岩下哲志, 1991. 石灰系改善劑を用いた淡水域の環境改善における最近の動向, 石膏
と石灰, No. 234

川本信行 編, 1969. 水産學全集22, 養魚學總論. 恒星社厚生閣

小林泰一, 1970. 養魚學講座 第6巻 錦鯉. 綠書房

熊本縣水産試験場, 1983. 1982年度赤潮對策技術開發試験報告, 7-(2) -増殖制限因
子による赤潮發生防止-.1992年3月

松井 魁・角皆英明・青江 弘・大上皓久・稻葉 俊, 1971. 養魚學講座, 第7巻 鰻. 綠書房

大分縣水産試験場， 1980. 1979年度漁場富栄養化対策技術開発試験報告書
3-(2) 石灰年度漁場富栄養化対策技術開発試験報告書による底質改良試験，
1980年3月

大野正夫， 1988. 浦内の内湾における石灰撒布試験調査報告 石灰による水質・底質改
善試験報告書， 1988年3月

關 政夫， 1984. 養殖漁場における石灰撒布の方法と効果， 三重水技資料 1989年

下元靖剛， 1989. 高知縣における水質・底質改善研究， 石灰工業技術大會講演要旨

水産廳研究部漁場保全課・三重縣浜島水産試験場， 1982. 石灰による底質改良マニユア
ル 1982年3月

渡辺憲人・二重谷伸行(岐阜縣公害研究所)・山田雅英・加納芳直・船坂鏢三(岐阜縣公衆衛
生検査センター)， 1992. 石灰による海域環境の改善

山崎仲道， 1988. 被覆石灰層と海水/汚泥との相互作用に関する研究 石灰による水質・
底質改良試験報告書， 1988年3月

日本石灰工業組合， 1994. 水質・底質改善に関する石灰系改善剤及び改善方法の研究
開発， 8～10pp.

日本石灰工業組合， 1994. 石灰による海水域の環境改善 11～14pp.

日本水産學會， 1980. 赤潮-發生機構と対策， -赤潮生物の 増殖促進物質-日本水産學
シリス34券， 恒星社厚生閣， 25～37pp.

沖山宗雄， 1988. 日本産稚魚圖鑑. 日本東海大學出版社， 1154pp.

堀江毅(1982): 沿岸海域の水の流れと物質の擴散に関する研究. 運輸省港灣技術研究所.

中野猿人(1940): 潮汐學. 生産技術センター, 121~178.

日本水産資源保存協會, 1980. 新編水質汚濁調査指針.

日本水産資源保存協會, 2000. 水産用水基準.

日本分析學會(北海道地府編), 1981. 水の分析

日本氣象協會, 1985. 海洋觀測指點, 東京.

Aas, E., Baussant, T., Balk L., Liewenborg, B., Andersen, K.A., 2000. PAH metabolites in bile, cytochrome P4501A and DNA adducts as environmental risk parameters for chronic oil exposure: a laboratory experiment with Atlantic cod. *Aquatic Toxicology* 51 24125

Addison, R.F., 1984. Hepatic mixed function oxidase (MFO) induction in fish as a possible biological monitoring system. In "Contaminant Effects on Fisheries", (V. W. Cairns, P. V. Hodson, and J. O. Nriagu, Eds.), 52-60pp. Wiley, New York.

Addison R.F. and Payne, J.F., 1986. Assessment of hepatic mixed function oxidase induction in winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) as a marine petroleum pollution monitoring technique, with an Appendix describing practical field measurements of MFO activity. *Can. Technology Rept. Fish Aquatic Science*. no. 1505.

Addison R.F., Willis D.E. and Zinck M.E., 1994. Liver microsomal

mono-oxygenase induction in winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) from a gradient of PAH concentrations at Sydney Harbour, N.S. Marine Environmental Research 37, 283–296.

A. E. Ellis(1977) ; Stress and The Modulation of Defence Mechanism in Fish, STRESS AND FISH(A.D. Pickering ed. (1981), 155p.

Albert D. Venosa, John R. Haines, B. Loye Eberhart, 1992. Bioremediation Protocols: Screening of Bacterial Products for Their Crude Oil Biodegradation Effectiveness. Humana Press, 2: 47–58.

Atlas, R. M., 1995. Bioremediation of petroleum pollutants. International Biodeterioration & Biodegradation, 317–327.

Bence, A.E. and Burns, W.A. 1995. Fingerprinting hydrocarbons in the biological resources of the Exxon Valdez Oil Spill: Fate and Effects in Alaskan Waters. ASTM STP 1219, eds P. G. Wells, J. N. Butler and J. S. Hughes, 84–140pp. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

Carlson, E.A., Li, Y. and Zelikoff, J.P., 2004a. Benzo(a)pyrene-induced immunotoxicity in Japanese medaka (*Oryzias latipes*): relationship between lymphoid CYP1A activity and humoral immune suppression. Toxicology and Applied Pharmacology 201, 40–52.

Carlson, E.A., Li, Y., Zelikoff, J.T., 2004b. Suppressive effects of benzo(a)pyrene upon fish immune function: evolutionarily conserved cellular mechanism of immunotoxicity. Marine Environmental Research 58, 731–734.

Collier, T.K. and Varanasi, U., 1991. Hepatic activities of xenobiotic

metabolizing enzymes and biliary levels of xenobiotics in English sole (*Parophrys vetulus*) exposed to environmental contaminants. Archives Environmental Contamination and Toxicology 20, 462–473.

Cormack, D., 1999. Response to marine oil pollution—review and assessment, Kluwer Academic Publishers. 412pp.

CRRRC. 2007. Submerged Oil – State of the Practice and Research Needs. by the Coastal Response Research Center, Durham, New Hampshire, 29 pp +appendix.

Ebuehi, O. A. T., Abibo, I. B., Shekwolo, P. D., Sigismund, K. I., Adoki, A., Okoro, I. C., 2005. Remediation of crude oil contaminated soil by enhanced natural attenuation technique. J. Appl. Sci. Environ. Mgt., 9(1): 103–106.

Ellman, R.H., Groenink, C.L., Sandee, B. and Hummel, H., 1995. Response of the blue mussel *Mytilus edulis* L. Following exposure to PAH's or contaminated sediment. Marine Environmental Research 39, 169–173.

Faisal, M., Huggett, R., 1993. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on the lymphocyte mitogenic responses in spot, *Leiostomis xanthurus*. Marine Environmental Research. 35, 121–124.

Fernandez-Alvarez, P., Vila, J., Garrido-Fernandez, Grifoll, M., Lema, J.M., 2006. Trials of bioremediation on a beach affected by the heavy oil spill of the Prestige. Journal of Hazardous Materials B 137, 1523–1531.

Fingas, M. 2001. The basics of oil spill cleanup. Lewis Publishers. Boca Raton. pp. 31–38.

Goldberg, E. D., 1975. The Mussel Watch A first step in global marine monitoring. Marine Pollution Bulletin 6, 111.

Gómez, C.M., Campillo J.A., Benedicto, J., Fernández, Valdés, I. García, Sánchez., 2006. Monitoring biomarkers in fish (*Lepidorhombus boschii* and *Callionymus lyra*) from the northern Iberian shelf after the Prestige Oil spill. Marine Pollution Bulletin. 53, 305–314.

Guthrie F.E. and Perry J.J., 1980. Introduction to environmental toxicology. Elsevier North Holland Inc. 52 Vanderbilt avenue, New York, N.Y. 10017, 482pp.

His, E. Heyvang, I., Geffard, O. and Montaudouin, X., 1999. A comparison between oyster (*Crassostrea gigas*) and sea urchin (*Paracentrotus lividus*) larval bioassays for toxicological studies. Water Research, 33(7), 1706–1718.

Holladay, S.D., Smith, S.A., Besteman, E.G., Deyab, A.S.M.I., Gogal, R.M., Hrubec, T., Robertson, J.L. and Ahmed, S.A., 1998. Benzo(a)pyrene induced hypercellularity of the pronephros in tilapia is accompanied by alterations in stromal and parenchymal cells by enhanced immune cell apoptosis. Vet. Immunology Immunopathology 64. 69–82.

Jokuty, P., Whiticar, S., Wang, Z., Fingas, M., Fieldhouse, B., Lambert, P., and Mullen, J. 1999. Properties of crude oils and oil products. Manuscript report EE-165, Environmental Protection Service, Environment Canada, Ottawa, Ontario.

Jung J.H., Addison R.F. and Shim, W.J., 2007. Characterization of cholinesterases in marbled sole, *Limanda yokohamae*, and their inhibition in vitro by the fungicide iprobenfos. Marine Environmental Research 63, 471–478.

Jung, J.H., Kim, S.J., Lee, T.K., Shim, W.J., Woo, S. Kim, D.J., Han, C.H., 2008 Biomarker responses in caged rockfish (*Sebastes schlegelii*) from Masan Bay and Haegeumgang, South Korea. Marine Pollution Bulletin 57, 599–606.

Kang , J.J., Fang H.W., 1997, Polycyclic aromatic hydrocarbons inhibit the activity of acetylcholinesterase purified from electric eel. Biochemical and Biophysical Research Communications 238, 367–379.

Kingston, P. F., 2002. “Long-term environmental impact of oil spills,” *Spill Science & Technology Bulletin*, 7, 53–61.

Koba yashi, N., Okamura, H., 2004. Effects of heavy metals on sea urchin embryo development. Tracing the cause by the effects. Chemosphere 55, 1403–1412.

Khim , J.S., Lee, K.T., Kannan, K., Villeneuve, D.L., Giesy, J.P., Koh, C.H., 2001, Trace organic contaminants in sediment and water from Ulsan Bay and its vicinity, Korea. Archives Environmental Contamination and Toxicology 40, 141–150.

Kobayashi, N. and Hideo, O., 2004. Effects of heavy metals on sea urchin embryo development. 1.Tracing the cause by the effects, Chemosphere, 55, 1403–1412.

Lambert, P., 2003. A literature review of portable fluorescence-based oil-in-water monitors. *Journal of Hazardous Materials* 102, 39–55.

Lambert, P., Fingas, M., Goldthorp, M., 2000. An evaluation of field total petroleum hydrocarbon (TPH) systems. *Journal of Hazardous Materials* 2577, 1–17.

Lambert, P., Goldthorp, M., Fieldhouse, B., Wang, Z., Fingas, M., Pearson, L., Collazzi, E., 2003. Field fluorometers as dispersed oil-in-water monitors. *Journal of Hazardous Materials* 102, 57–79.

Law, R.J., Dawes, V.J., Woodhead, R.J., Mattiessen, P., 1997. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in seawater around England and Wales. *Marine Pollution Bulletin*, 34. 306–322.

Lehr, R.E. and Jerina, D.M., 1977. Metabolic activations of polycyclic hydrocarbons. *Archives of Toxicology*. 39, 1–6.

Michel, J. 2006. Assessment and recovery of submerged oil: Current state analysis. U.S. CoastGuard Research & Development Center, Groton, CT. 34 pp. + appendices.

Mora, P., Fournier, D., Narbonne, J.F., 1999. Cholinesterase from the marine mussels *Mytilus galloprovincialis* L. and *Mytilus edulus* L. from the freshwater bivalve *Corbicula fluminea* Muller. *Comparative Biochemistry and Physiology part C Pharmacology and Toxicology* 122, 353–361.

National Research Council (NRC). 2002. Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. National Academy Press. Washington, DC

NRC. 1999. Spills of nonfloating oils: Risk and responses. National Academy Press, Washington, DD. 88pp.

Owens, E. H., Sergy, G. A., Guenette, C. C., Prince, R. C., Lee, K., 2003. The reduction of stranded oil by in situ shoreline treatment options. Spill Science & Technology Bulletin, 8(3): 257–272.

Page, D., Boehm, P.D., Douglas, G.S. and Bence, A.E. 1995. Identification of hydrocarbon sources in the benthic sediments of Prince William Sound and the Gulf of Alaska Following the Exxon Valdez Oil Spill. In Exxon Valdez Oil Spill: Fate and Effects in Alaskan Waters, ASTM STP 1219, eds P. G. Well, J. N. Butler and J. S. Hughes, 41–83pp American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

Reynaud, S., Duchiron, C. and Deschaux, P., 2003. 3-Methylcholanthrene inhibits lymphocyte proliferation and increases intracellular calcium levels in common carp (*Cyprinus carpio L.*). Aquatic Toxicology 63, 319–331.

Reynaud, S., Duchiron, C. and Deschaux, P., 2004. 3-Methylcholanthrene induces lymphocyte and phagocyte apoptosis in common carp (*Cyprinus carpio L.*) in vitro. Aquatic Toxicology 66, 307–318.

Ronald W. Goege and Bruce A. Barton(1990) ; Organismic Indices and an Autopsy – Based Assesment as Indicators of Health and Condition of Fish, American Fisheries Society Symposium 8.

Sergy, G. A., Guenette, C. C., Owens, E. H., Prince, R. C., Lee, K., 2003. In-site treatment of oiled sediment shorelines. Spill Science & Technology Bulletin, 8(3): 237–244.

Shannon, C.e. and W. Weaver, 1963. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana. 117pp.

Simpson, E.H., 1949. Measurement of diversity. *Nature*, 163: 688.

Singer M.M., Aurand D., Bragin, G.E., Clark, J.R., Coelho, G.M., Sowby, M.L. and Tjeerdema, R.S., 2000. Standardization of the Preparation and Quantitation of Water-accommodated Fractions of Petroleum for Toxicity Testing. *Marine Pollution Bulletin* 40(11), 1007–1016.

Smith, D.A., Schurig, G.G., Smith, S.A. and Holladay, S.D., 1999. The hemolytic plaque-forming cell assay in tilapia(*Oreochromis niloticus*)exposed to benzoapyrene: enhanced or dispersed plaque formation depends on dosing schedule. *Toxicology Methods* 9, 57–70.

Spies, R. B., 2007. Long-term ecological change in the Northern gulf of Alaska, Elsevier. 608pp.

Springman, K.R., Short, J.W., Lindeberg, M,R,M Maselko, J.M., Khan, C., Hodson, P.V. and Rice, S. 2008. Semipermeable membrane devices link site-specific contaminants to effects: part I–Induction of CYP1A in rainbow trout from contaminants in Prince William Sound, Alaska. *Marine Environmental Research* 66, 477–486.

Swannell, R. P. J., Lee, K. and McDonagh, M., 1996. Field evaluations of marine oil spill bioremediation. *Microbiological Reviews*, 60(2): 342–365.

Thronsdon, J, 1978. Preservation and storage. In: *Phytoplankton manual*.

Sournia, A., ed., Unesco, Paris, pp. 69–74.

USEPA, 1994. Methods for assessing the toxicity of sediment-associated contaminants with estuarine and marine amphipods. United States Environmental Protection Agency. EPA/600/R-94/025. 140pp.

Varanasi, U., Reichert, WL, Eberhart, B-T.L. and Stein, J.E., 1989. Formation and persistence of benzo(a)pyrene-diolepoxide-DNA adducts in liver of English sole (*Parophrys vetulus*). *Chemico Biological Interaction* 69, 203–216.

Venosa, A. D. and Zhu, X., 2003. Biodegradation of crude oil contamination marine shorelines and freshwater wetlands. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(2), 162–178.

Wang Z. and Fingas M, 1995. Use of Methyl dibenzothiophenes as Markers for Differentiation and Source Identification of Crude and Weathered Oils, *Environ. Sci. Technol.*, 1995, 29 (11), 2842–2849.

White, K.L., 1986. An overview of immunotoxicology and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbon. *Environment Carcinogenesis Review*. 2, 163–202.

Yan, L.S., 1985. Study of the carcinogenic mechanism for polycyclic aromatic hydrocarbons- extracted bay region theory and its quantitative model. *Carcinogenesis*. 6, 1–6.

Yim, U.H., Hong, S.H., and Shim, W.J. 2007. Distribution and characteristics of PAHs in sediments from the marine environment of Korea. *Chemosphere*. 68: 85–92.

Zar, J.H., 1984. Biostatistical analysis. 2nd edition. Prentice-Hall International Inc. Engelwood Cliffs, NJ. 718 pp.

부 록

부록표 1. 표층해수 중 사전조사 수질분석 결과(2010. 07. 27)

Station	Temp.	pH	Sal.	SS	DO	COD
	℃		psu	(mg/L)		
과도 1-1	26.3	7.98	30.4	13.43	7.71	1.70
과도 1-2	26.2	7.99	30.5	19.71	7.88	1.54
과도 2-1	24.2	7.97	30.4	14.29	7.87	1.38
과도 2-2	23.9	8.01	30.6	24.86	7.84	1.82
송현 1	24.7	8.04	30.2	21.71	7.71	1.30
송현 2	24.5	8.05	30.3	26.43	7.62	1.62
신덕 1	23.7	8.07	31.0	15.43	7.57	1.86
신덕 2	23.9	8.08	31.1	13.14	7.78	1.42
법산 1	22.7	8.08	31.5	17.14	7.89	1.50
법산 2	22.7	8.08	31.5	19.86	7.80	1.74
의항 1	22.4	8.09	31.8	19.00	7.86	1.94
의항 2	21.8	8.12	31.9	18.71	7.82	0.86
Min	21.8	7.97	30.2	13.14	7.57	0.86
Max	26.3	8.12	31.9	26.43	7.89	1.94
Mean	23.9	8.05	30.9	18.64	7.78	1.56

부록표 2. 표층해수 중 사전조사 수질분석 결과(2010. 07. 27)

Station	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Si(OH) ₄ -Si	DIN	DIP	TN	TP
	(μg-at./L)				(mg/L)			
파도 1-1	2.21	0.47	5.24	7.91	0.111	0.023	0.851	0.044
파도 1-2	4.17	0.43	4.84	9.44	0.132	0.013	0.856	0.040
파도 2-1	2.79	0.40	4.62	7.80	0.109	0.011	0.733	0.041
파도 2-2	3.15	0.45	4.31	7.90	0.111	0.012	0.678	0.032
송현 1	5.42	0.53	5.00	10.95	0.153	0.018	0.554	0.034
송현 2	4.17	0.52	4.83	9.52	0.133	0.014	0.581	0.024
신덕 1	3.21	0.41	3.37	6.99	0.098	0.014	0.651	0.044
신덕 2	2.22	0.40	3.77	6.38	0.089	0.012	0.633	0.039
법산 1	3.09	0.37	3.08	6.53	0.091	0.012	0.534	0.033
법산 2	3.50	0.38	2.94	6.83	0.096	0.011	0.501	0.041
의항 1	1.71	0.40	3.41	5.52	0.08	0.010	0.766	0.063
의항 2	2.60	0.46	16.05	19.12	0.27	0.009	0.728	0.050
Min	1.71	0.37	2.94	5.52	0.077	0.009	0.501	0.024
Max	5.42	0.53	16.05	19.12	0.268	0.023	0.856	0.063
Mean	3.19	0.43	5.12	8.74	0.122	0.013	0.672	0.040

부록표 3. 표층해수 중 수질분석 결과(2010. 09. 04)

Station	Temp.	pH	Sal.	SS	DO	COD
	℃		psu	(mg/L)		
과도 1-1	28.3	8.02	24.9	77.83	7.65	1.20
과도 1-2	28.6	8.02	24.3	63.29	8.03	1.08
과도 2-1	28.3	8.02	23.6	118.00	7.68	1.76
과도 2-2	28.7	8.01	22.0	42.86	7.87	1.56
송현 1	28.4	8.08	17.0	37.14	9.75	1.68
송현 2	29.7	8.07	19.2	33.71	8.72	2.00
신덕 1	27.3	7.99	22.5	46.29	7.66	1.28
신덕 2	27.6	8.01	22.0	44.71	7.65	1.64
법산 1	27.0	7.97	25.3	40.86	7.34	2.80
법산 2	27.0	7.98	25.1	38.71	7.12	2.56
의항 1	26.3	8.08	30.4	42.14	7.90	1.20
의항 2	26.5	8.07	29.9	46.14	7.67	1.24
의항 3	26.7	8.08	30.0	44.00	8.57	0.80
태안1	26.3	7.98	30.8	44.57	7.61	1.76
태안2	25.9	8.23	30.1	38.00	8.54	1.24
태안3	26.3	8.11	28.6	33.71	6.70	0.68
태안4	26.3	8.10	28.4	49.86	7.59	0.44
Min	25.9	7.97	17.0	33.71	7.12	1.08
Max	29.7	8.08	30.4	118.00	9.75	2.80
Mean	27.4	8.03	23.9	49.52	7.92	1.67

부록표 4. 표층해수 중 수질분석 결과(2010. 09. 04)

Station	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Si(OH) ₄ -Si	DIN	DIP	TN	TP
	(μg-at./L)				(mg/L)			
파도 1-1	0.25	1.98	1.18	3.00	0.042	0.023	0.597	0.044
파도 1-2	0.34	1.51	1.50	3.35	0.047	0.024	0.548	0.050
파도 2-1	0.08	1.34	0.49	1.90	0.027	0.026	0.845	0.056
파도 2-2	0.17	1.38	0.02	1.57	0.022	0.029	0.818	0.060
송현 1	0.25	1.82	0.06	1.73	0.024	0.029	0.822	0.065
송현 2	0.09	1.82	0.07	1.60	0.022	0.023	0.848	0.056
신덕 1	0.11	1.63	0.18	1.37	0.019	0.034	0.759	0.040
신덕 2	0.19	1.46	0.14	1.47	0.021	0.031	0.722	0.047
법산 1	0.40	1.18	1.73	3.30	0.046	0.035	0.395	0.073
법산 2	0.11	1.36	1.54	3.00	0.042	0.036	0.454	0.063
의항 1	0.11	0.29	2.41	2.81	0.039	0.005	0.421	0.022
의항 2	0.24	0.36	0.10	0.70	0.010	0.013	0.438	0.027
의항 3	0.05	0.08	3.00	3.13	0.044	0.003	0.352	0.028
태안1	0.03	0.43	0.85	1.32	0.018	0.005	0.344	0.035
태안2	0.03	0.17	0.59	0.79	0.011	0.003	0.300	0.040
태안3	0.20	0.72	0.25	0.89	0.012	0.006	0.214	0.047
태안4	0.06	0.67	0.13	0.70	0.010	0.006	0.579	0.017
Min	0.08	0.29	0.02	0.70	0.010	0.003	0.395	0.022
Max	0.40	1.98	3.00	3.35	0.047	0.036	0.848	0.073
Mean	0.19	1.34	0.84	2.15	0.027	0.020	0.639	0.050

부록표 5. 저층해수 중 수질분석 결과(2010. 09. 04)

Station	Temp.	pH	Sal.	SS	DO	COD
	℃		psu	(mg/L)		
의항 3	27.0	8.08	30.9	38.71	8.57	0.72
태안1	26.6	7.98	30.9	35.71	7.23	2.00
태안2	26.0	8.14	30.5	34.14	6.99	0.80
태안3	26.1	8.13	30.2	38.43	7.06	0.60
Min	26.0	7.98	30.2	34.14	6.99	0.60
Max	27.0	8.14	30.9	38.71	8.57	2.00
Mean	26.4	8.08	30.6	36.75	7.46	1.03

부록표 6. 저층해수 중 수질분석 결과(2010. 09. 04)

Station	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Si(OH) ₄ -Si	DIN	DIP	TN	TP
	(μg-at./L)				(mg/L)			
의항 3	0.16	0.45	0.48	0.21	0.007	0.005	0.295	0.023
태안1	0.01	0.40	0.78	0.06	0.008	0.006	0.344	0.032
태안2	0.04	0.39	0.57	0.09	0.007	0.005	0.300	0.019
태안3	0.01	0.27	0.36	0.04	0.003	0.007	0.497	0.025
Min	0.01	0.27	0.36	0.04	0.007	0.005	0.295	0.019
Max	0.16	0.45	0.78	0.21	0.008	0.007	0.497	0.032
Mean	0.05	0.38	0.55	0.10	0.007	0.006	0.359	0.025

부록표 7. 표층해수 중 수질분석 결과(2010. 11. 18)

Station	Temp.	pH	Sal.	SS	DO	COD
	℃		psu	(mg/L)		
과도 1-1	11.7	8.15	32.9	30.00	9.25	0.83
과도 1-2	11.4	8.16	33.0	39.29	9.62	0.67
과도 2-1	11.2	8.15	33.0	34.43	9.58	0.59
과도 2-2	11.2	8.15	33.0	33.71	9.43	0.75
송현 1	10.7	8.19	33.2	52.57	9.85	0.79
송현 2	10.4	8.12	33.3	38.14	9.80	1.47
신덕 1	11.2	8.11	33.0	41.43	10.03	0.67
신덕 2	11.1	8.16	33.3	54.43	10.38	0.87
법산 1	11.1	8.17	33.2	37.43	10.25	1.11
법산 2	11.1	8.17	33.0	47.00	10.18	0.87
의항 1	13.5	8.13	32.5	51.29	9.00	1.47
의항 2	13.5	8.14	32.5	49.57	8.82	1.43
의항 3	13.6	8.14	32.4	47.71	9.04	0.95
태안1	12.7	8.11	33.1	29.29	9.19	1.35
태안2	12.6	8.14	32.9	44.29	9.78	1.47
태안3	12.6	8.17	32.9	29.86	9.26	1.19
태안4	11.7	8.19	32.9	38.29	9.77	0.51
Min	10.4	8.11	32.4	29.29	8.82	0.59
Max	13.6	8.19	33.3	54.43	10.38	1.47
Mean	11.8	8.15	32.9	41.10	9.60	0.96

부록표8. 표층해수 중 수질분석 결과(2010. 11. 18)

Station	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Si(OH) ₄ -Si	DIN	DIP	TN	TP
	(μg-at./L)				(mg/L)			
파도 1-1	0.32	0.49	5.25	6.07	0.085	0.017	0.295	0.053
파도 1-2	0.50	0.54	6.84	7.88	0.110	0.017	0.340	0.055
파도 2-1	0.44	0.54	5.89	6.87	0.096	0.018	0.329	0.052
파도 2-2	1.23	0.62	5.46	7.30	0.102	0.019	0.300	0.058
송현 1	0.58	0.53	5.17	6.29	0.088	0.032	0.335	0.061
송현 2	0.67	0.65	4.57	5.89	0.082	0.024	0.268	0.066
신덕 1	0.48	0.70	5.20	6.39	0.089	0.022	0.311	0.060
신덕 2	0.60	0.57	5.23	6.40	0.090	0.021	0.308	0.066
법산 1	0.48	0.65	4.57	5.71	0.080	0.025	0.282	0.063
법산 2	0.48	0.54	4.80	5.81	0.081	0.021	0.289	0.057
의항 1	0.52	0.49	7.29	8.30	0.116	0.025	0.406	0.067
의항 2	0.52	0.50	7.73	8.74	0.122	0.032	0.305	0.064
의항 3	0.41	0.53	8.04	8.98	0.126	0.028	0.299	0.059
태안1	0.48	0.61	5.28	6.37	0.089	0.028	0.273	0.058
태안2	0.36	0.50	5.60	6.46	0.090	0.021	0.273	0.056
태안3	0.40	0.58	5.61	6.58	0.092	0.022	0.316	0.059
태안4	0.87	0.57	5.39	6.82	0.095	0.020	0.357	0.058
Min	0.32	0.49	4.57	5.71	0.080	0.017	0.268	0.052
Max	1.23	0.70	7.73	8.74	0.126	0.032	0.406	0.067
Mean	0.57	0.57	5.67	6.80	0.096	0.023	0.314	0.060

부록표 9. 저층해수 중 수질분석 결과(2010. 11. 18)

Station	Temp.	pH	Sal.	SS	DO	COD
	℃		psu	(mg/L)		
의항 3	27.0	8.08	30.9	42.86	9.45	1.55
태안1	26.6	7.98	30.9	41.29	9.17	1.55
태안2	26.0	8.14	30.5	39.43	9.09	0.95
태안3	26.1	8.13	30.2	25.86	9.25	0.87
Min	26.0	7.98	30.2	25.86	9.09	0.87
Max	27.0	8.14	30.9	42.86	9.45	1.55
Mean	26.4	8.08	30.6	37.36	9.24	1.23

부록표 10. 저층해수 중 수질분석 결과(2010. 11. 18)

Station	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Si(OH) ₄ -Si	DIN	DIP	TN	TP
	(μg-at./L)				(mg/L)			
의항 3	0.58	0.49	8.05	0.37	0.004	0.031	0.292	0.053
태안1	0.48	0.50	5.55	0.26	0.004	0.021	0.289	0.060
태안2	0.49	0.52	5.92	0.28	0.004	0.020	0.287	0.053
태안3	0.45	0.56	5.57	0.27	0.005	0.021	0.328	0.056
Min	0.45	0.49	5.55	0.26	0.004	0.020	0.287	0.053
Max	0.58	0.56	8.05	0.37	0.004	0.031	0.328	0.060
Mean	0.50	0.52	6.27	0.29	0.004	0.023	0.299	0.056

부록표 11. 표층해수 중 수질분석 결과(2011. 02. 16)

Station	Temp.	pH	Sal.	SS	DO	COD
	℃		psu	(mg/L)		
과도 1-1	2.50	8.23	32.1	51.71	14.75	0.60
과도 1-2	2.51	8.22	32.1	67.14	14.63	2.80
과도 2-1	2.50	8.24	32.1	64.14	14.75	0.84
과도 2-2	2.30	8.22	32.2	69.57	14.6	1.16
송현 1	1.77	8.27	32.3	60.57	15.18	1.36
송현 2	1.78	8.27	32.3	63.00	15.08	1.48
신덕 1	1.81	8.25	32.2	69.86	14.73	1.24
신덕 2	1.81	8.26	32.2	76.29	14.99	1.44
법산 1	2.05	8.22	32.1	77.29	14.72	2.48
법산 2	2.26	8.22	32.1	74.57	14.72	1.72
의항 1	2.70	8.2	31.71	86.14	13.59	2.52
의항 2	2.64	8.24	31.7	50.71	13.62	2.04
의항 3	2.34	8.2	31.77	69.86	14.02	2.84
태안1	2.67	8.12	32.2	49.86	13.4	1.28
태안2	2.66	8.17	32.2	60.57	13.67	0.92
태안3	2.77	8.18	32.7	53.43	13.84	1.72
태안4	1.97	8.22	32.2	74.86	14.72	1.40
Min	1.77	8.12	31.7	49.86	13.4	0.60
Max	2.77	8.27	32.7	86.14	15.18	2.84
Mean	2.30	8.22	32.13	65.86	14.41	1.64

부록표 12. 표층해수 중 수질분석 결과(2011. 02.16)

Station	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Si(OH) ₄ -Si	DIN	DIP	TN	TP
	(μg-at./L)				(mg/L)			
파도 1-1	1.27	0.12	18.25	19.63	0.275	0.023	0.434	0.027
파도 1-2	0.15	0.14	15.27	15.55	0.218	0.024	0.403	0.021
파도 2-1	0.12	0.15	14.66	14.93	0.209	0.024	0.419	0.028
파도 2-2	0.18	0.12	14.09	14.39	0.201	0.023	0.396	0.032
송현 1	0.20	0.12	11.05	11.36	0.159	0.019	0.265	0.026
송현 2	0.21	0.11	10.74	11.05	0.155	0.018	0.351	0.028
신덕 1	0.25	0.15	10.43	10.84	0.152	0.020	0.287	0.022
신덕 2	0.22	0.15	10.53	10.90	0.153	0.019	0.247	0.029
법산 1	0.20	0.16	12.41	12.78	0.179	0.022	0.329	0.032
법산 2	0.17	0.18	13.10	13.45	0.188	0.022	0.332	0.022
의항 1	0.48	0.12	17.99	18.58	0.260	0.026	0.468	0.038
의항 2	0.14	0.12	16.85	17.11	0.240	0.026	0.514	0.041
의항 3	0.20	0.20	15.13	15.53	0.217	0.029	0.502	0.046
태안1	0.14	0.13	15.33	15.60	0.218	0.026	0.393	0.044
태안2	0.10	0.11	14.60	14.81	0.207	0.027	0.349	0.042
태안3	0.12	0.10	15.13	15.36	0.215	0.025	0.379	0.050
태안4	0.32	0.12	12.44	12.87	0.180	0.021	0.272	0.034
Min	0.10	0.10	10.43	10.84	0.152	0.018	0.247	0.021
Max	1.27	0.20	18.25	19.63	0.275	0.029	0.514	0.050
Mean	0.26	0.13	14.00	14.40	0.202	0.023	0.373	0.033

부록표 13. 저층해수 중 수질분석 결과(2011. 02. 16)

Station	Temp.	pH	Sal.	SS	DO	COD
	℃		psu	(mg/L)		
의항 3	2.3	8.15	31.7	69.29	13.79	3.12
태안1	2.7	8.12	32.2	103.29	13.27	1.76
태안2	2.7	8.17	32.3	64.29	13.90	1.40
태안3	2.0	8.22	32.2	85.00	14.72	1.24
Min	2.0	8.12	31.7	64.29	13.27	1.24
Max	2.7	8.22	32.3	103.29	14.72	3.12
Mean	2.4	8.17	32.1	80.46	13.92	1.88

부록표 14. 저층해수 중 수질분석 결과(2011. 02. 16)

Station	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Si(OH) ₄ -Si	DIN	DIP	TN	TP
	(μg-at./L)				(mg/L)			
의항 3	0.34	0.23	14.44	0.67	0.009	0.028	0.619	0.049
태안1	0.17	0.12	15.49	0.65	0.009	0.027	0.356	0.052
태안2	0.07	0.12	15.01	0.63	0.008	0.026	0.344	0.049
태안3	0.17	0.10	14.44	0.60	0.009	0.025	0.407	0.048
Min	0.07	0.10	14.44	0.60	0.008	0.025	0.344	0.048
Max	0.34	0.23	15.49	0.67	0.009	0.028	0.619	0.052
Mean	0.19	0.14	14.85	0.64	0.009	0.027	0.431	0.049

부록표 15. 표층해수 중 수질분석 결과(2011. 04. 20)

Station	Temp.	pH	Sal.	SS	DO	COD
	℃		psu	(mg/L)		
과도 1-1	8.5	7.99	32.2	18.29	10.72	1.00
과도 1-2	8.8	8.00	32.2	23.29	10.72	1.04
과도 2-1	7.6	7.98	32.1	25.14	10.78	1.28
과도 2-2	7.7	7.99	32.1	23.86	11.03	1.20
송현 1	9.3	8.06	32.3	63.29	11.11	1.48
송현 2	9.5	8.06	32.3	65.57	10.67	1.95
신덕 1	8.2	8.00	32.2	28.57	10.62	1.71
신덕 2	8.3	8.00	32.0	61.71	10.66	1.67
법산 1	7.5	7.96	32.2	57.29	10.60	1.48
법산 2	7.4	7.96	32.2	50.14	10.87	1.67
의항 1	6.0	7.92	32.0	33.86	10.26	1.56
의항 2	5.9	7.92	32.0	20.00	10.31	3.26
의항 3	5.6	7.91	32.0	42.86	10.48	1.95
태안1	5.5	7.86	32.1	34.00	10.82	1.71
태안2	5.6	7.87	32.0	33.86	10.72	1.28
태안3	7.9	7.90	32.1	30.43	10.63	1.87
태안4	7.9	7.96	32.2	33.71	10.47	2.15
Min	5.47	7.86	31.99	18.29	10.26	1.00
Max	9.45	8.06	32.30	65.57	11.11	3.26
Mean	7.48	7.96	32.12	37.99	10.67	1.66

부록표 16. 표층해수 중 수질분석 결과(2011. 04. 20)

Station	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Si(OH) ₄ -Si	DIN	DIP	TN	TP
	(μg-at./L)				(mg/L)			
파도 1-1	2.88	0.15	18.21	21.25	0.297	0.018	0.225	0.030
파도 1-2	1.99	0.19	15.22	17.40	0.244	0.018	0.327	0.029
파도 2-1	0.83	0.15	14.65	15.63	0.219	0.015	0.334	0.038
파도 2-2	0.95	0.15	14.06	15.16	0.212	0.016	0.336	0.033
송현 1	0.88	0.14	11.03	12.05	0.169	0.008	0.233	0.032
송현 2	0.83	0.15	10.69	11.68	0.163	0.007	0.296	0.029
신덕 1	0.71	0.16	10.43	11.30	0.158	0.015	0.312	0.043
신덕 2	0.52	0.16	10.52	11.20	0.157	0.012	0.366	0.037
법산 1	0.79	0.14	12.44	13.37	0.187	0.016	0.341	0.034
법산 2	0.68	0.15	13.13	13.96	0.195	0.018	0.317	0.044
의항 1	1.10	0.15	17.96	19.20	0.269	0.025	0.331	0.045
의항 2	1.03	0.16	16.81	18.00	0.252	0.026	0.323	0.041
의항 3	1.13	0.15	15.18	16.46	0.230	0.029	0.365	0.049
태안1	1.14	0.16	15.31	16.61	0.232	0.027	0.342	0.051
태안2	1.00	0.16	14.55	15.71	0.220	0.023	0.309	0.034
태안3	1.23	0.26	14.97	16.47	0.231	0.020	0.321	0.033
태안4	1.33	0.20	12.36	13.88	0.194	0.016	0.356	0.040
Min	0.52	0.14	10.43	11.20	0.157	0.007	0.225	0.029
Max	2.88	0.26	18.21	21.25	0.297	0.029	0.366	0.051
Mean	1.12	0.16	13.97	15.25	0.214	0.018	0.320	0.038

부록표 17. 저층해수 중 수질분석 결과(2011. 04. 20)

Station	Temp.	pH	Sal.	SS	DO	COD
	℃		psu	(mg/L)		
의항 3	5.6	7.92	32.0	48.71	10.49	1.91
태안1	5.3	7.86	32.1	37.86	10.76	1.60
태안2	5.6	7.87	32.0	30.29	10.84	3.41
태안3	6.5	7.90	32.0	63.14	10.72	2.54
Min	5.3	7.86	32.0	30.29	10.49	1.6
Max	6.5	7.92	32.1	63.14	10.84	3.4
Mean	5.8	7.89	32.0	45.00	10.70	2.4

부록표 18. 저층해수 중 수질분석 결과(2011. 04. 20)

Station	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Si(OH) ₄ -Si	DIN	DIP	TN	TP
	(μg-at./L)				(mg/L)			
의항 3	0.81	0.14	14.53	0.68	0.009	0.028	0.356	0.046
태안1	0.89	0.15	15.47	0.67	0.009	0.025	0.369	0.041
태안2	0.99	0.15	14.98	0.65	0.009	0.023	0.346	0.038
태안3	0.96	0.27	14.27	0.62	0.009	0.019	0.353	0.033
Min	0.81	0.14	14.27	0.62	0.009	0.019	0.346	0.033
Max	0.99	0.27	15.47	0.68	0.009	0.028	0.369	0.046
Mean	0.91	0.18	14.81	0.65	0.009	0.024	0.356	0.040

부록표 19. 해양 저질 분석 결과(2010. 07. 27)

Station	pH	함수율	IL	AVS	COD
		(%)		(mgS/g-dry)	(mgO ₂ /g-dry)
파도 1-1	7.78	26.55	0.82	0.005	3.08
파도 1-2	7.80	26.22	1.06	0.005	2.97
파도 2-1	7.69	27.79	0.54	0.003	3.29
파도 2-2	7.69	29.28	1.13	0.021	3.36
송현 1	7.88	32.35	1.45	0.003	3.68
송현 2	7.89	30.30	0.82	0.005	3.44
신덕 1	7.75	30.84	1.42	0.001	3.64
신덕 2	7.77	30.91	0.85	0.001	3.10
법산 1	7.64	32.60	2.06	0.003	3.16
법산 2	7.67	30.26	0.56	0.010	3.34
의항 1	7.59	32.08	1.46	0.028	3.09
의항 2	7.58	30.21	2.79	0.005	4.63
Min	7.58	26.22	0.54	0.001	2.97
Max	7.89	32.60	2.79	0.028	4.63
Mean	7.73	29.95	1.25	0.008	3.40

부록표 20. 해양 저질 분석 결과(2010. 09. 04)

Station	pH	함수율	IL	AVS	COD
		(%)		(mgS/g-dry)	(mgO ₂ /g-dry)
파도 1-1	7.99	20.46	1.13	0.009	3.29
파도 1-2	7.98	28.61	1.68	0.038	3.44
파도 2-1	7.95	28.30	1.66	0.039	4.77
파도 2-2	7.92	28.26	1.66	0.013	4.11
송현 1	7.98	25.42	1.07	0.003	6.34
송현 2	7.99	27.42	0.96	0.001	7.53
신덕 1	8.1	28.64	1.26	0.011	4.97
신덕 2	8.03	28.29	0.97	0.008	5.21
법산 1	7.2	36.30	2.51	0.036	14.73
법산 2	7.44	30.28	1.71	0.001	13.31
의항 1	7.67	32.80	2.38	0.040	4.23
의항 2	7.89	29.29	2.53	0.015	4.57
의항 3	7.79	57.09	6.28	0.488	11.22
태안1	7.7	39.85	3.99	0.079	6.84
태안2	7.82	39.04	2.61	0.049	7.45
태안3	7.82	36.84	4.40	0.038	7.55
태안4	7.88	31.38	2.60	0.023	10.48
Man	7.58	20.46	0.96	0.001	3.29
Max	7.89	57.09	6.28	0.488	14.73
Mean	7.73	32.25	2.32	0.052	7.06

부록표 21. 해양 저질 분석 결과(2010. 11. 18)

Station	pH	함수율	IL	AVS	COD
		(%)		(mgS/g-dry)	(mgO ₂ /g-dry)
파도 1-1	7.89	27.54	1.79	0.001	2.79
파도 1-2	7.96	31.52	2.46	0.003	2.80
파도 2-1	8.11	27.30	1.65	0.014	3.81
파도 2-2	7.99	31.39	2.16	0.004	4.66
송현 1	8.18	30.48	1.43	0.004	2.37
송현 2	8.14	29.17	1.41	ND	3.23
신덕 1	8.11	30.16	1.28	ND	2.02
신덕 2	8.19	24.04	1.39	0.001	1.48
법산 1	8.14	33.09	2.34	0.001	3.72
법산 2	7.83	29.70	2.01	0.004	4.39
의항 1	8.08	30.45	2.68	0.008	3.11
의항 2	7.92	31.24	2.32	0.006	3.14
의항 3	8.04	58.23	5.97	0.230	16.33
태안1	8.18	39.65	3.37	0.036	6.88
태안2	8.05	24.48	1.18	ND	2.10
태안3	8.18	33.11	2.04	0.073	2.11
태안4	7.89	44.41	3.95	0.043	3.74
Man	7.83	24.04	1.18	0.001	1.48
Max	8.19	58.23	5.97	0.230	16.33
Mean	8.05	32.70	2.32	0.031	4.04

부록표 22. 해양 저질 분석 결과(2011. 02. 16)

Station	pH	함수율	IL	AVS	COD
		(%)		(mgS/g-dry)	(mgO ₂ /g-dry)
파도 1-1	8.12	39.80	2.82	0.003	5.92
파도 1-2	8.16	36.72	2.52	0.002	6.07
파도 2-1	8.17	43.90	3.18	0.002	9.37
파도 2-2	8.18	39.92	2.99	0.002	9.92
송현 1	8.19	29.99	1.13	ND	1.96
송현 2	8.18	29.55	1.25	ND	3.18
신덕 1	8.24	29.15	1.67	0.006	0.44
신덕 2	8.23	29.67	1.37	0.011	0.39
법산 1	8.20	39.69	2.74	0.003	4.38
법산 2	8.21	30.85	2.44	0.002	6.30
의항 1	8.21	33.17	2.22	0.059	5.43
의항 2	8.20	34.04	3.05	0.042	7.65
의항 3	8.16	32.24	3.60	0.096	7.76
태안1	8.31	26.41	1.32	0.014	0.40
태안2	8.26	23.77	1.03	ND	0.10
태안3	8.25	21.00	2.10	0.001	2.37
태안4	8.17	16.50	0.96	0.001	0.66
Man	8.12	16.50	0.96	0.001	0.10
Max	8.31	43.90	3.60	0.096	9.92
Mean	8.20	31.55	2.14	0.017	4.25

부록표 23. 해양 저질 분석 결과(2011. 04. 20)

Station	pH	함수율	IL	AVS	COD
		(%)		(mgS/g-dry)	(mgO ₂ /g-dry)
파도 1-1	7.90	28.43	2.11	ND	4.35
파도 1-2	7.90	27.41	1.78	0.001	1.31
파도 2-1	7.66	37.21	3.01	0.003	2.64
파도 2-2	7.65	33.66	2.69	0.011	4.40
송현 1	7.99	30.67	1.30	0.003	1.49
송현 2	7.98	28.77	1.55	0.011	1.53
신덕 1	7.83	32.30	1.63	0.003	1.75
신덕 2	7.84	31.81	1.60	ND	1.94
법산 1	7.87	39.64	2.99	0.002	5.96
법산 2	7.89	28.44	2.09	0.008	1.32
의항 1	7.90	30.18	2.14	0.018	4.47
의항 2	7.90	41.88	3.28	0.057	3.72
의항 3	7.90	35.14	2.62	0.014	4.89
태안1	7.83	26.32	1.08	ND	2.61
태안2	7.82	21.41	0.89	ND	2.40
태안3	7.83	25.50	1.07	ND	1.20
태안4	7.88	32.44	2.81	ND	4.65
Man	7.65	21.41	0.89	0.001	1.20
Max	7.99	41.88	3.28	0.057	5.96
Mean	7.86	31.25	2.04	0.012	2.98



-저질개선제살포 및 경운-



-저질개선제살포 및 경운-



-저질개선제살포 및 경운-



-저질 환경조사-



-모래살포-



-모래살포-



-바지락 살포-



-개선 및 바지락 살포 후 생물조사-



-개선 및 바지락 살포 후 생물조사-



-개선 및 바지락 살포 후 생물조사-



-개선 및 바지락 살포 후 생물조사-



-어장 환경개선-



-어장 환경개선-



-어장 환경개선-



-어장 환경개선-



-어장 환경개선-



-저질 개선제 하역작업-



-저질 개선제 하역작업-



-저질채취-



-저질채취-