

적조방제용 황토살포의 효과분석 및 개선방안에 관한 연구

2004. 12

류정곤 · 황기형 · 김귀영 · 김숙양 · 박영태



보고서 집필 내역

◆ 연구책임자

- 류 정 곤 : 제1장, 제2장, 제5장, 제6장

◆ 연 구 진

- 황 기 형 : 제4장

◆ 외부 집필진

- 김귀영(국립수산과학원 수산연구관) : 제2장, 제3장, 제5장
- 김숙양(국립수산과학원 수산연구사) : 제2장, 제3장, 제5장
- 박영태(국립수산과학원 수산연구사) : 제2장, 제3장, 제5장

산·학·연·정 연구자문위원

◆ 김 학 균(국립수산과학원 (전)해양환경부장)

◆ 양 금 철(해양수산부 사무관)

머 리 말

1990년대 이후 적조현상은 광역화, 장기화, 고밀도화되고 있으며, 수산물을 폐사시킬 수 있는 유해적조의 발생 빈도가 증가하고 있다. 즉 수산부문은 1995년에 최대 764억 원, 2003년도에 215억 원의 피해를 입는 등 그 피해액이 매년 수 십억 원에서 수 백억 원에 이르고 있다.

이러한 적조발생은 1980년대부터 점차 증가하기 시작하였는데, 공업화를 가장 큰 원인으로 보고 있다. 그 이유는 적조의 발생환경 조건에서 찾을 수 있다. 즉 적조는 반폐쇄성 해역 및 육상으로부터 공급되는 풍부한 영양염류, 광합성을 위한 충분한 일조량, 증식에 적당한 수온 등의 조건이 갖추어져야 발생하게 된다. 그런데 예나 지금이나 육상으로부터 공급되는 영양염류 외에는 적조발생환경이 크게 변화된 것이 없다. 다만 공업화, 도시화에 따라 육상으로부터 질소와 인이 다량 유입된 것이 가장 큰 원인이라고 볼 수밖에 없다. 따라서 적조로 인한 수산피해는 자연재해의 성격을 가지고 있지만, 근본적으로는 인위적인 해양환경의 변화에 기인하는 바가 크다고 할 수 있다.

적조로 인한 수산피해는 주로 연안의 양식업에서 발생하고 있다. 집중적으로 시설된 연안의 양식장에 적조가 발생하면 양식생물이 폐사하게 됨으로써 막대한 수산피해가 발생하게 된다. 따라서 우리나라에서는 1996년부터 시·도에서 적조방제용 황토를 살포하여 효과를 보게 되면서 1998년부터는 정부차원에서 적조방제 사업으로 황토살포 사업을 추진하고 있다.

그러나 이러한 적조방제용 황토살포에 대하여 최근 많은 논란이 제기되고 있다. 그 논란의 첫째는 황토살포의 자연과학적인 효과와 사회경제적 효과가 있는가 하는 것이다. 둘째는 황토살포로 인한 2차적인 해양생태계 파괴가 일어나지 않느냐는 것이다.

본 연구는 이러한 황토살포에 관한 논란을 자연과학 및 사회경제적으로 규명하고자 이루어진 것이다. 연구진은 우리나라에서 적조 및 황토살포에 관하여 가장 많은 연구를 수행한 국립수산과학원과 사회경제학을 연구하는 한국해양수산개발원의 연구원들로 구성하여 공동연구 형태로 추진되었다. 국립수산과학원에서는 황토살포의 구제율, 피해 정도 등 자연과학적인 황토살포의 효과를 분석하고, 한국해양수산개발원에서는 자연과학적인 황토살포의 효과를 기초로

편익 및 비용분석을 실시하였다. 연구기간이 단기간이라 황토살포의 긍정적 효과 및 부정적 효과를 모두 과학적으로 규명하는 데는 한계가 있었을 것이다. 그러나 그 동안 연구되어진 모든 연구자료를 취합하여 이를 분석하고, 개선방안을 도출하는 데 본 연구의 의의가 있다고 할 수 있을 것이다.

나아가서 향후 황토살포를 포함한 다양한 적조방제기술 개발을 수행함에 있어서 어떻게 어떤 방향으로 기술 개발이 이뤄져야 할 것인가를 본 연구결과를 통해서 얻을 수 있을 것으로 여겨진다. 또한 본 연구에서 충분히 수행되지 못했던 간접적 영향에 대한 연구가 추후 이루어진다면 황토살포 등 많은 적조방제기술의 효과가 분명해질 것이고, 정책 및 사업의 효과 또한 제고될 것으로 생각된다.

이 보고서는 한국해양수산개발원 수산어촌연구센터 류정곤 연구위원, 황기형 연구위원과 국립수산과학원 김귀영 수산연구관, 김숙양 수산연구사, 박영태 수산연구사 등 5명이 공동으로 집필하였다. 그리고 연구수행 과정에 많은 조언을 해주신 국립수산과학원 김학균 (전)해양환경부장, 해양수산부 양금철 사무관 및 한국해양수산개발원 최성애 연구위원에게 필자를 대신하여 이 지면을 통해 감사를 드리고자 한다. 또한 설문조사에 응해주신 많은 어업인들에게도 감사를 드린다.

끝으로 이 보고서의 내용은 전적으로 필자들의 개인적인 의견이며, 한국해양수산개발원 및 국립수산과학원의 공식적인 견해가 아님을 밝혀 둔다.

2004년 12월

韓國海洋水產開發院
院 長 李 廷 旭

國立水產科學院
院 長 金 永 奎

목 차

〈요 약〉	i
제1장 서 론	1
1. 연구의 목적 및 필요성	1
2. 연구범위 및 방법	2
제2장 우리나라 적조 및 방제 실태분석	4
1. 적조발생 현황	4
1) 적조의 정의 / 4	
2) 발생수역에 따른 적조의 유형 / 5	
3) 타생물 배척, 독작용 유무 및 생물적 구조에 의한 유형 / 6	
2. 적조발생 원인생물 및 발생 개요	6
1) 적조발생 원인생물 / 6	
2) 우리나라의 적조발생 개요 / 7	
3. 적조로 인한 수산피해 실태	9
1) 수산피해 유형 / 9	
2) 수산피해 실태 / 10	
4. 적조저감 및 방제 실태	11
1) 적조방제 체제 / 11	
2) 적조저감기술 / 16	
3) 황토에 의한 적조방제 / 21	
제3장 황토살포의 자연과학적 영향분석	25
1. 해양생태계 및 수산생물에 미치는 영향	25
1) 저서 생태계에 미치는 영향 연구 / 25	

2) 양식생물에 대한 영향 / 45	
2. 우리나라 최대 적조 영향권 추정	59
1) 최대 적조발생 해역 / 59	
2) 황토살포시 시공간적 변화 조사 / 60	
3) 현장에서의 확산실험 / 61	
4) 실내에서의 확산실험 / 61	
5) 살포 후의 부유물질 회복력 파악 / 63	
3. 황토살포로 인한 적조 소멸 및 수산물 폐사 방지율 추정	63
1) 적조구제효율 / 63	
2) 황토의 폐사방지율 추정 / 64	
4. 요약 및 시사점	66
제4장 황토살포의 사회경제적 효과분석	67
1. 황토살포의 경제적 타당성분석	67
1) 분석의 전제 / 67	
2) 황토살포의 편익 및 비용 요소의 인식 / 68	
3) 추정방법 / 72	
4) 황토살포의 편익 및 비용 추정 / 78	
5) 경제적 타당성분석 결과 / 84	
2. 적조방제용 황토살포에 대한 어업인들의 의견조사	86
1) 조사개요 / 86	
2) 조사결과분석 / 87	
3. 요약 및 시사점	92
제5장 황토살포의 문제점 및 개선방안	94
1. 외국사례분석	94
1) 세계의 적조 동향 / 94	
2) 일본 / 95	

3) 미국 / 95	
2. 황토살포의 문제점	96
1) 적조발생 기작 규명 부족 / 96	
2) 황토살포가 생태계에 미치는 영향 / 96	
3) 황토 과다살포 및 비효율적 살포방식 / 97	
4) 대체기술개발의 부족 / 97	
5) 적조피해보상 / 98	
6) 황토관리 / 98	
3. 개선방안	99
1) 적조발생 기작 규명연구 / 99	
2) 해양생태계에 미치는 영향분석 / 100	
3) 고품질 황토살포 및 살포방식 개선 / 100	
4) 적조구제물질 및 장비 사용에 의한 구제 / 101	
5) 대체기술개발 / 102	
6) 황토관리 및 운영비 개선 / 102	
7) 적조피해보상제도 개선 / 103	
제6장 결론 및 정책건의	104
참고문헌	108
부록 : 적조방제용 황토살포에 관한 설문조사	113

표 목 차

<표 2-1> 연도별 적조발생 현황	8
<표 2-2> 연도별 적조발생 건수 및 피해 현황	10
<표 2-3> 해양오염방지계획 중 적조방지대책 및 투자 실적	11
<표 2-4> 적조의 대책	12
<표 2-5> 적조예보종류 및 발령기준	14
<표 2-6> 적조방제 장비 현황	15
<표 2-7> 연도별 적조피해 복구비	16
<표 2-8> 연도별 황토살포 실적	22
<표 2-9> 2004년 황토 구입 예산	22
<표 2-10> 2004년 황토 적치장 및 규모	23
<표 2-11> 적조생물 밀도별 시간별 구제효과	24
<표 3-1> 주요 저서생물의 종조성 및 생물의 생체량 (Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)	26
<표 3-2> 주요 저서생물의 밀도(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)	36
<표 3-3> 4월 중 사랑도 해역 퇴적물의 다모류 분포량	42
<표 3-4> 7월 중 사랑도 해역 퇴적물의 다모류 분포량	42
<표 3-5> 사랑도와 미조해역에서의 종속영양세균 수의 분포	44
<표 3-6> 사랑도와 미조해역에서의 황산염환원세균 수의 분포	45
<표 3-7> 황토살포에 따른 어미피조개 체성분분석	48
<표 3-8> 황토살포에 따른 굴의 체성분분석	49
<표 3-9> 분말황토 살포농도에 따른 어류치사	54
<표 3-10> 자연황토 살포농도에 따른 어류치사	54
<표 3-11> 자연황토살포 시험구에 노출된 어류 혈액의 pH 및 PO ₂ 변화	55
<표 3-12> 분말황토 농도에 따른 어류 혈액의 혈장이온농도 및 Cortisol 변화	56
<표 3-13> 각 처리구별 pH 및 광합성효율(Fv/Fm)	59
<표 3-14> 토취장에 따른 황토의 적조구제효율	64
<표 3-15> 적조생물 밀도별 시간 경과에 따른 구제효율	64

<표 3-16> C. polykrikoides 적조에 노출된 어류의 폐사율	65
<표 3-17> 자연황토 살포농도에 따른 어류치사	65
<표 4-1> 1995년과 2003년의 적조발생 상황 비교	74
<표 4-2> 주요 양식품종의 생산 추세	80
<표 4-3> 최근 연구에서 나타난 양식어종 수요의 가격 탄성치 추정결과	82
<표 4-4> 황토살포에 사용된 선박 및 장비의 임대료	84
<표 4-5> 적조방제용 황토살포의 경제적 타당성분석 결과	84
<표 4-6> 조사대상자의 종사 어업 및 지역별 분포	87
<표 4-7> 종사 어업별 적조가 어업에 미치는 영향에 대한 인식	88
<표 4-8> 거주지역에서의 황토살포 경험 여부에 따른 적조의 영향에 대한 인식	88
<표 4-9> 적조발생시 황토살포에 대한 찬성 여부	89
<표 4-10> 황토살포 경험자와 비경험자의 황토살포에 대한 입장	89
<표 4-11> 황토살포에 찬성하는 이유	90
<표 4-12> 황토살포에 반대하는 이유	91
<표 4-13> 황토살포 방법에 대한 인식	91
<표 4-14> 황토살포 개선방안에 대한 의견	92

그림 목 차

<그림 1-1>	연구 수행체계	3
<그림 2-1>	우리나라 연도별 적조발생 건수	7
<그림 2-2>	최근 유해적조의 발생해역	8
<그림 2-3>	우리나라 적조방제 추진체계도	13
<그림 2-4>	우리나라 적조방제 추진기관별 역할	14
<그림 2-5>	육상양식장용 적조경보기	20
<그림 2-6>	해상가두리용 적조경보기	21
<그림 2-7>	소형엔진식 황토살포기	24
<그림 3-1>	조사해역도(Mijo Bay in Namhaedo)	25
<그림 3-2>	월별 저서생물의 출현종 수, 밀도, 생체량 변화 (Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)	29
<그림 3-3>	정점별 저서생물의 종조성 변화 (Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)	31
<그림 3-4>	정점별 저서생물의 개체 수 변화 (Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)	33
<그림 3-5>	정점별 저서생물의 밀도 변화 (Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)	35
<그림 3-6>	월별 종 다양도(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)	38
<그림 3-7>	정점별 종 다양도 변화(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)	39
<그림 3-8>	조사 해역도(Sarangdo coastal areas in Tongyoung)	41
<그림 3-9>	황토살포가 피조개, 굴의 성장에 미치는 영향	46
<그림 3-10>	황토살포에 따른 피조개 헤모글로빈 변화	47
<그림 3-11>	황토살포에 따른 피조개 혈장 단백질 변화	48
<그림 3-12>	황토살포에 따른 굴과 피조개의 글리코겐 변화	50
<그림 3-13>	전복의 아가미 구조(자연황토 10g/L)	51
<그림 3-14>	전복의 아가미 구조(대조구)	51
<그림 3-15>	전복의 아가미 구조(적조 10,000 cells/mL+자연황토 10g/L)	52

<그림 3-16> 전복의 아가미 구조(적조 10,000 cells/mL)	52
<그림 3-17> 황토에 노출된 우렁쉥이 및 해삼의 24시간 경과 후 황토섭이량 및 회복실험 후의 황토잔량	57
<그림 3-18> 황토에 노출된 우렁쉥이, 성게, 해삼의 모습	58
<그림 3-19> 2003년 적조발생 범위	59
<그림 3-20> 황토살포 후 확산 및 침강량조사를 위한 침강트랩(sediment trap) ...	60
<그림 3-21> 현장에서의 황토확산범위	62
<그림 3-22> 이차원 수조에서의 유속별 침강률	62
<그림 3-23> 황토살포 후의 부유물질 회복률	63
<그림 4-1> 적조발생에 따른 생산자 및 소비자 잉여 변화	69
<그림 4-2> 적조발생에 따른 생산자 잉여 변화	70
<그림 4-3> 적조발생에 따른 양식수산물 공급곡선 변화	71
<그림 4-4> 1995년과 2003년 적조의 공간적 발생범위 비교	74
<그림 4-5> 적조발생에 따른 소비자 잉여 감소	77

<요 약>

제1장 서 론

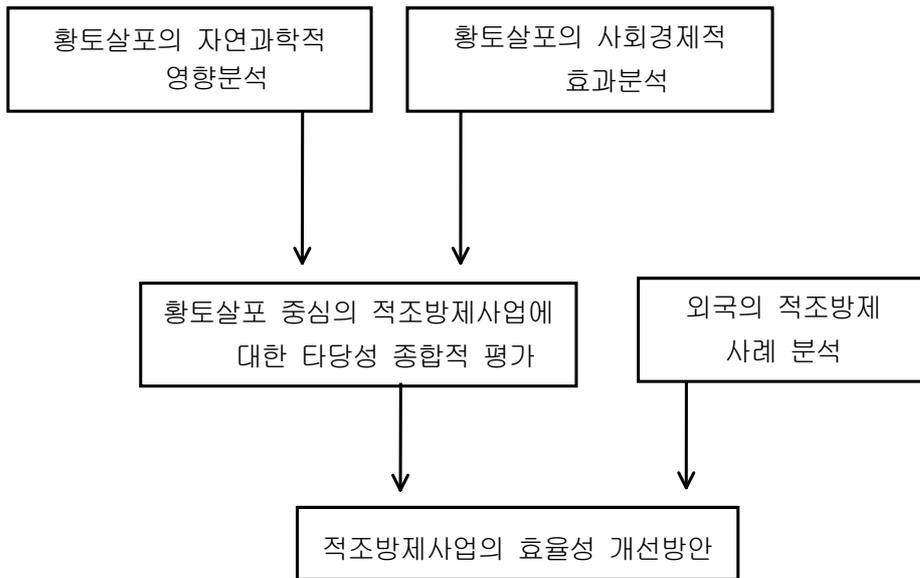
1. 연구의 목적 및 필요성

- 1990년대 이후 적조현상은 광역화, 장기화, 고밀도화되고 있으며, 수산물을 폐사시킬 수 있는 유해적조의 발생 빈도가 증가하고 있고 이로 인해 수산업이 입은 피해액은 1995년에 최대 764억 원, 2003년도에 215억 원에 달하는 등 피해액이 매년 수 십억 원에서 수 백억 원에 이르고 있음
- 따라서 1996년부터 시·도에서 적조피해를 줄이기 위해 황토를 살포하기 시작하여 1998년부터는 정부사업으로 황토살포 방제사업을 수행하고 있는데, 적조발생시 황토의 대규모 살포에 의해 방제 활동을 수행하는 나라는 우리나라가 유일함
- 황토살포가 적조구제에 효과가 있다고 알려져 있지만 이로 인해 해양생태계 및 수산생물에 영향을 줄 수 있고, 황토살포사업이 경제적으로 타당한지도 확실치 않다는 의구심이 최근 일어나고 있음
- 그러나 기존의 적조연구는 적조의 발생 원인, 확산 유형 및 적조방제 등 자연과학적인 연구가 대부분이었고, 황토살포로 단기적인 효과제고를 추구한 나머지 황토살포로 인한 해양생태 및 생물적 영향과 이로 인한 사회경제적인 효과를 종합적으로 분석한 연구는 미미한 실정임
- 따라서 본 연구는 황토살포의 영향을 자연과학과 사회경제적 관점에서 종합적으로 검토하여 적조방제용 황토살포사업의 타당성을 평가하고, 적조방제사업의 효율성을 높이기 위한 대안을 찾고자 하는 것임

2. 연구범위 및 방법

- 연구내용은 i) 우리나라 적조 발생 및 방제 실태분석, ii) 황토살포의 자연과학적 영향분석, iii) 황토살포의 사회경제적 효과분석, iv) 황토살포의 문제점 및 개선방안으로 구성됨
- 우리나라 적조 발생 및 방제 실태분석에서는 우리나라 적조생물 유형, 적조발생 유형 및 범위, 황토살포 등 적조방제 실태 그리고 적조로 인한 수산피해 유형 및 피해액 현황을 분석함
- 황토살포의 자연과학적 영향분석에서는 황토살포가 해양생태계 및 수산생물에 미치는 영향, 우리나라 최대 적조 영향권 추정 및 황토살포로 인한 적조 소멸과 수산물 폐사 방지율을 추정함
- 황토살포의 사회경제적 효과분석에서는 최대 적조 영향권 내 양식물 추정, 황토 미살포시 적조피해액 산출, 황토살포로 인한 사회적 편익 및 비용추정과 황토살포에 대한 어업인들의 설문조사를 실시함
- 황토살포의 문제점 및 개선방안에서는 적조방제와 관련한 외국사례분석, 황토살포의 문제점 도출 및 개선방안을 제시함
- 본 연구는 한국해양수산개발원과 국립수산과학원이 공동으로 추진하였으며, 한국해양수산개발원에서는 사회경제적 영향분석 및 개선방안, 국립수산과학원에서는 황토살포의 방제효율 및 자연과학적 영향분석을 실시함
- 우리나라 적조 양상 및 황토살포로 인한 자연과학적인 효과는 기존의 조사·연구자료를 총체적으로 수집하여 분석하였고, 최대 적조피해 영향권은 지금까지 발생한 적조 중 가장 영향이 컸던 연도의 적조를 기준으로 시뮬레이션을 통하여 추정함
- 사회경제적 분석은 황토살포로 인한 편익과 비용(황토구입, 장비 및 선박이용, 인건비, 운반비 등)을 산출하여 순편익을 계산하고, 편익/비용 비율분석을 수행함

○ 연구 수행체계는 다음과 같음



제2장 우리나라 적조 및 방제 실태분석

1. 적조발생 현황

- 적조생물이란 “다량의 현미경적 미생물이 일시적으로 한 곳의 바다에 출현해서 해수의 변색 및 어패류의 폐사를 일으키는 생물”이라고 정의함
- 적조(Red Tide)란 “해양에 서식하는 미생물(동물·식물 플랑크톤, 원생동물 및 박테리아)이 일시에 다량으로 증식되거나 또는 생물·물리적으로 집적되어 바닷물의 색깔을 변색시키고 해양생물에 나쁜 영향을 미치는 현상”이라고 정의함
- 우리나라에서 적조는 아주 오래 전부터 발생하였으나 1980년대부터 점차 증가하기 시작하였는데 공업화를 가장 큰 원인으로 보고 있음
 - 적조는 반폐쇄성 해역, 육상으로부터 공급되는 풍부한 영양염류, 광합

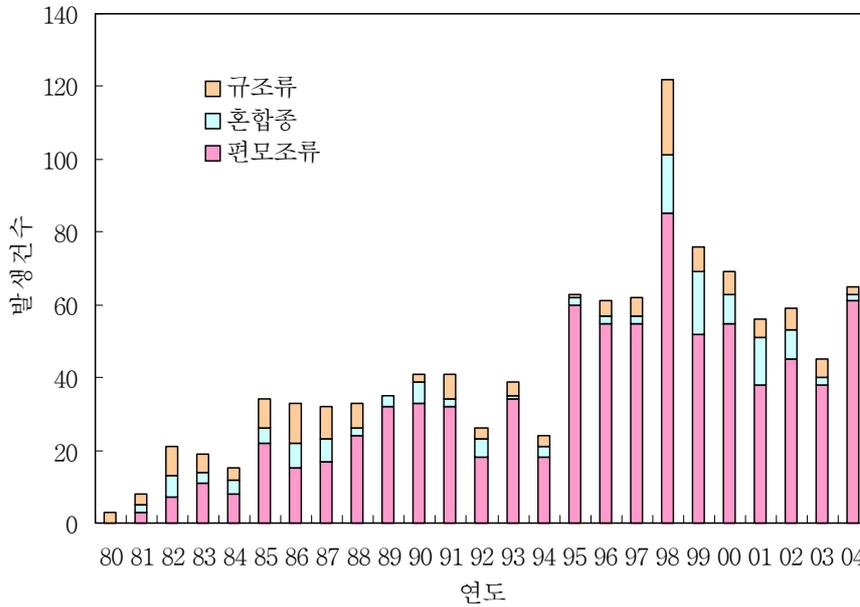
성을 위한 충분한 일조량, 증식에 적당한 수온 등의 조건이 갖추어져야 발생함

- 그런데 예나 지금이나 육상으로부터 공급되는 영양염류 외에는 적조발생 환경이 크게 변화된 것이 없고, 다만 공업화, 도시화에 따라 육상으로부터 질소와 인이 다량 유입된 것이 가장 큰 원인이라고 볼 수밖에 없음
- 적조의 원인생물에는 홍색유황세균이나 원생동물 외에도 남조, 은편모조, 와편모조, 규조, 참편모조, 황금색조, 착편모조, 유글레나조, 담녹조, 녹조의 10분류군에 속하는 다양한 조류가 알려져 있음
- 발생수역에 따른 적조의 유형은 내만 국지성 적조(embayment blooms), 연안성 적조(coastal blooms), 외양성 적조(oceanic type)로 구분함
- 타생물 배척작용만 동반하는 적조로는 동중국해 *Trichodesmium* 적조가 이에 해당하며 때에 따라 해안생물의 폐사를 일으킴. 적조의 생물적 구조에 따른 분류로는 단독우점종 적조와 우점종 혼합형 적조로 구분됨

2. 적조발생 원인생물 및 발생 개요

- 우리나라 적조는 대부분 식물성 플랑크톤에 의해 발생하고, 현재까지 조사결과 우리나라에서 적조를 일으키는 생물은 약 43종임
 - 4종은 담수 내지는 기수종이고 해산종으로는 규조류가 13종, 라피도조류가 3종 그리고 편모조류가 20종임. 특히 편모조류 중 3종은 수산생물을 직접적으로 죽일 수 있음
- 상습적으로 적조를 일으키는 원인생물은 규조류와 편모조류이며, 특히 우리나라에서 수산생물을 집적 죽일 수 있는 종은 *Gymnodinium mikimotoi*(1981년 처음 출현)과 *Cochlodinium polykrikoides*(1982년도부터 거의 매년 수산피해를 일으킴), *Gyrodinium sp.*(1992년 발생) 등임

- 연도별 적조발생 건수를 보면 1980년대까지는 주로 규조류에 의해 적조가 발생하였으나, 1982년도에는 규조류가 8건으로 38% 그리고 편모조류가 7건으로 33%였고 나머지는 혼합종에 의한 적조임



3. 적조로 인한 수산피해 실태

- 적조로 인한 피해는 크게 어패류의 대량폐사, 관광산업의 피해 및 심미적 피해로 나눌 수 있음
 - 어패류의 대량폐사는 어패류들이 먹이를 잡기 위하여 물을 빨아들이는 과정에서 유독성 적조생물을 흡수하여 독소에 중독됨으로써 폐사되거나, 적조생물이 대량 번식으로 영양염류를 다 써 버리고 해저에 가라앉은 후 이를 세균들이 분해하는 과정에서 산소를 소진하여 무산소 상태가 됨에 따라 어패류가 질식사하여 폐사하는 경우로 볼 수 있음
 - 대표적인 관광산업적 피해유형은 해수욕장 피해를 들 수 있으며, 심미적 피해는 적조발생으로 바다색이 변하고 악취가 남으로써 관광객들의 기분이 상하게 되는 것임

- 우리나라의 적조피해 집계는 1990년부터 기록이 남아 있음. 물론 그 이전에도 일부 적조로 인한 수산피해가 없지는 않았으나, 기록으로 남을 정도는 아니었음
- 그 동안 적조로 인하여 폐사한 어종은 조피볼락, 넙치, 동류, 농어, 방어 등 어류가 대부분이고, 패류로는 전복과 굴 그리고 기타수산동물인 우렁챙이(멍게)임
- 피해지역은 경남과 전남을 비롯한 남해안과 경북을 중심으로 한 동해안 일부지역이고, 특히 경남과 전남은 거의 매년 적조로 인한 피해가 발생하고 있는 지역임
- 1990년 이후 우리나라 적조발생 및 수산피해 현황은 다음과 같음

단위 : 건, 억 원, 천 마리, ha, 가구

구 분	발생건수	피해액	폐사량	피해면적	피해가구	피해지역
1990			49톤		27	경남
1992			11,213	162	255	경남
1993	38	84	3,333	219	168	경남
1994	29	5	97	1,215평	5	경남
1995	65	764	26,285	583.4	1,434	경남, 전남, 부산, 경북
1996	61	21	428	28.9	53	전남
1997	62	15	592			경남
1998	122	1.6	219			경남
1999	83	3.2	248			경남, 경북
2000	69	2.6	258			경남
2001	56	84	7,557			경남, 전남, 부산, 경북
2002	59	49	5,268	145	65	경남, 전남, 부산, 경북
2003	45	215	13,088	293	32.6	경남, 전남, 울산

4. 적조저감 및 방제 실태

- 적조의 대책은 크게 적조의 발생 자체를 방지하기 위한 예방조치와 일단 적조가 발생한 경우 그 피해를 가능한 한 줄이기 위한 치료 조치로

구분

- 우리나라의 적조방제 추진체계는 해양수산부를 중심으로 중앙적조대책 본부를 구성하고, 각 지자체에는 적조대책위원회, 유관기관 및 단체에는 적조대책반을 구성하며, 운용하고 있음
- 적조의 예찰은 국립수산과학원에서 3월부터 11월까지 전국 연안 해역 77개 정점을 지정하여 정기적으로 실시하며, 적조발생시 4단계로 적조를 예보하고 있음(적조출현, 적조주의보, 적조경보 및 적조해제)
- 적조방제를 위하여 방제선단을 구성·운영하고 있는데, 대상선박은 행정선, 방제선, 해경정, 군함 및 어선 등이 동원되고 있으며, 농어업재해 대책법에 의한 재해대책 명령서를 발부하여 방제인력 및 장비를 동원함
- 적조로 인하여 수산피해가 발생한 경우 복구사업비를 지원하고 있는데 1990년부터 2003년까지 직간접비용을 합하여 총 895억 8,200만 원이 지원됨
 - 직접비용은 이 중 80%인 717억 9,400만 원이며, 국고와 지방비로 지원된 금액은 390억 2,900만 원으로 이는 직간접비용 전체의 44%, 직접비용의 54%에 해당함
 - 간접비용은 영어자금, 이자감면, 학자금 지원 등으로 177억 8,800만 원이 지원됨
- 연안 양식장의 적조 발생을 억제하고, 발생된 적조를 제어하여 적조피해를 줄이기 위한 대책은 크게 2가지임
 - 적조에 대한 기초연구를 통하여 적조발생 예보기술을 개발하고 적조생물의 생리·생태를 규명하여 적조피해를 줄이는 것임
 - 적조피해 저감을 위한 간접적인 방법으로서 법적으로 해양오염을 규제하고 개선하는 방법, 적조발생시 적조를 피하여 이동하는 방법이 있음
- 적조구제방법은 생물학적 방법, 이화학적 방법, 물리적 구제방법이 있음
 - 생물학적인 방제기법은 해양생물 간의 상호작용을 이용한 방법으로서

적조생물의 포식자와 천적 미생물을 이용한 방법, 적조생물을 치사시키는 생리 활성물질을 해양생물에서 추출·합성 이용하는 방법, 영양 경쟁관계에 의한 저독성 적조유발방법 등

- 이화학적 방법은 적조생물을 파괴, 치사시키는 황산동, 수산화마그네슘 등의 화학약품을 살포하는 방법
 - 물리적 방법은 점토(황토)살포, 초음파 및 오존처리로 적조생물을 흡착·응집하거나, 가압 부상분리장치에 의해 적조생물을 회수하는 방법
- 황토를 이용한 적조구제원리는 적조발생시 황토를 뿌려 적조를 일으키는 조류의 먹이가 되는 인 성분을 황토 입자 사이의 공간이 흡착해 바다 속으로 가라앉도록 하는 것임
- 황토를 이용한 적조구제방법은 1996년부터 지방자치단체가 처음 사용하였고, 1998년부터는 정부와 지방자치단체가 50%씩 부담하여 실시함
- 1998년 이후 2003년까지의 황토살포량은 매년 증가추세이고 2004년 황토 구입량 및 구입예산은 총 228,000톤에 34억 2천만 원임
 - 연도별 황토살포 실적은 다음과 같음

단위 : 톤

연 도	시 도 별					
	계	부 산	울 산	전 남	경 북	경 남
1998	72,162			36,220		35,942
1999	137,351	4,100	414	48,864	3,350	80,623
2000	75,207			17,149		58,058
2001	144,118	5,152	3,727	26,014	20,029	88,596
2002	173,348	1,348	1,231	42,122	11,886	116,761
2003	221,628	1,067	2,943	67,113	17,727	132,778

- 적조농도별 황토의 적조구제효율은 적조생물이 저농도일 때에도 구제효율이 높았으며 적조생물의 밀도가 높을수록 구제효율이 높음. 또한 50 μm 이하로 분쇄한 황토가 자연상태의 황토에 비하여 구제효율은 다소 높음

황토처리 후 시간 적조생물 밀도(cells/mL)	살포직후	30분	60분
100~500	40~50%	74~76%	80~83%
500~1,000	50~55%	76~78%	85~88%
1,000~3,000	55~65%	74~85%	84~92%

제3장 황토살포의 자연과학적 영향분석

1. 해양생태계 및 수산생물에 미치는 영향

- 저서생태계에 미치는 영향을 평가하기 위하여 남해군 미조, 통영시 사랑도 해역을 대상으로 조사함. 조사항목은 저서동물의 종조성, 밀도 및 생체량, 시간에 따른 저서동물의 변동, 정점별 저서동물의 시간적 변동, 우점종의 출현과 분포, 군집구조 등임
 - 황토를 살포한 해역과 황토를 살포하지 않은 해역을 비교한 결과 저서생물상의 변화는 시기별 차이가 있었으나 미살포해역과 저서생물의 출현종수 및 밀도 등에는 차이가 없었음
 - 퇴적층에 서식하는 일반 박테리아와 오염지표가 되는 박테리아의 개체수도 황토 미살포구와 차이가 없었음
- 양식생물에 대한 영향은 어류(참돔, 쥐치, 넙치, 조피볼락), 패류(피조개, 굴, 전복), 해조류(김)를 대상으로 생존실험을 실시함
 - 어류 생존시험결과 황토를 살포한 해역에서도 장기간 생존하여 영향이 없는 것으로 평가됨
 - 패류에 미치는 영향을 분석한 결과 황토살포구의 패류가 오히려 미살포구에 비해 생존율이 높아 황토살포가 패류에 좋은 영향을 미치는 것으로 평가됨
 - 해조류에 미치는 영향은 황토 0.5% 살포구와 미살포구 간에 있어 해조류의 광합성 효율에는 차이가 없었으나, 황토 1% 살포구에서는 효

율이 조금 낮아졌음. 그러나 황토는 살포 후 1시간 이내에 침강되므로 빛 투과 감소에 따른 해조류에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단됨

- 아울러 황토살포가 패류(피조개)에 헤모글로빈과 혈장단백질 상승을 유도하여 오히려 생존율이 증가하였으며, 스쿠티카 등의 어류 기생충을 박멸하는 좋은 효과도 나타났음

2. 우리나라 최대 적조 영향권 추정

- 우리나라 유해적조 최대 발생해역의 범위는 2003년에 발생한 적조를 근거로 추정함
 - 2003년 8월 13일 전남 붓돌바다와 남해도 동부해역에서 최초 발생하여 10월 13일 소멸되어 62일간 지속
 - 범위는 전남 진도군에서 남해안과 동해안 강릉시까지 발생하였으며, 최대밀도는 남해 미조해역에서 48,000cells/mL이었음
- 황토영향권을 추정하기 위하여 실 해역에서 황토살포 지점, 20m, 50m, 100m, 200m 간격으로 sediment trap을 설치하여 침강량과 확산정도를 조사함



- 경남 거제시 장목면에서 황토를 살포하여 현장조사한 결과, 살포장소를 기점으로 하여 50m 이내에서 거의 가라앉았음

- 황토살포 후의 부유물질 회복력을 추정하기 위하여 실내에서 깊이 2m 지름 25cm의 원통관을 이용하여 실험함
 - 실험결과 황토살포 20분 이내에 90% 이상이 회복되는 것으로 나타나, 혼탁에 의한 빛 투과 감소가 광합성에 미치는 영향은 아주 미미한 것으로 평가됨

3. 황토살포로 인한 적조 소멸 및 수산물 폐사 방지율 추정

- 황토의 적조구제 효율을 추정하기 위해 적조발생해역에 실제 사용했던 황토 5종에 대한 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides* 구제효과를 실험
 - 실내실험결과 황토살포 60분 뒤 월성, 통영, 경주 내남면, 전북 부안산이 80% 이상 효과가 나타낸 반면 경주 양남면산은 32%의 아주 낮은 구제효율을 보임
 - 자연황토는 토취장(구성성분의 차이)에 따라 효율에 많은 차이를 보였고, 2003년 하계 통영의 적조발생해역에 살포한 황토의 현장 적조생물 구제효율은 살포 10분 후 74%이었음
- 적조생물 밀도별 구제효율조사를 행한 결과 자연황토에 대한 적조구제 효율은 적조생물 밀도가 높을수록 시간이 경과될수록 구제효율이 높았음
 - 특히 적조생물의 밀도가 아주 낮은 100cells/mL에서도 60분 경과 뒤 구제효율이 70% 이상의 구제효율을 보였음
- 황토살포로 인한 양식어류의 폐사방지율을 추정하기 위하여 금년도 조기 적조소멸로 현장에서 실험을 하지 못하고 실내에서 실험함
 - 적조발생시 쥐치는 적조생물 3,000cells/mL에서 6시간 후 30% 폐사, 참돔은 10시간 후 20% 폐사, 넙치는 8,000cells/mL 이상에서 폐사함
 - 그러나 적조생물 3,000cells/mL의 농도에 자연황토 10g/L를 살포한 결과 참돔, 쥐치, 넙치 모두 폐사가 전혀 일어나지 않음
 - 따라서 실내실험의 결과로 3,000cells/mL 농도의 적조생물 유입시 쥐치와 참돔의 경우 황토에 의한 폐사방지율은 100%로 유추가능함

제4장 황토살포의 사회경제적 효과분석

1. 황토살포의 경제적 타당성 분석

- 적조방제용 황토살포의 경제적 효과는 사회적 관점에서 평가하였고, 비용/편익분석 방법을 사용함
- 편익비용분석의 전제
 - 황토살포의 편익은 '유해 적조 발생시 황토살포로 인해 예방되는 수산 피해'로 정의하였으며, 이는 황토살포로 인해 회피된 생산자 및 소비자 잉여의 감소분을 추정함으로써 측정됨
 - 비용은 황토살포에 소요된 직접적인 비용을 계산함
 - 황토살포 편익 추정을 위한 비교대상 연도는 근래에 들어 적조발생의 공간적 범위가 가장 크고 그에 따른 대규모 피해가 발생하였던 1995년과 2003년을 대상으로 함
- 편익비용분석을 위한 가정
 - 양식생산시설은 1995년부터 2003년까지 5.75배 증가함
 - 유해적조의 양식생물에 대한 실제적 피해 범위는 2003년이 1995년에 비해 0.14~0.69배에 불과함(보수적 가정)
 - 폐사어류의 개체당 중량은 70g~100g, 양식어류 수요의 가격에 대한 탄성치는 0.85~1.2로 추정
 - 황토살포가 해양생태계 및 수산생물에 미치는 2차적 영향은 기존의 현장실험에서 확인되지 않음에 따라 비용 요소에서 제외함
- 황토살포의 경제적 효과분석 결과
 - 유해적조의 실제 피해범위와 폐사어류 중량, 가격탄력성에 따라 5개의 시나리오를 설정하고 편익을 추정한 결과 총편익은 118억 원에서 916억 원에 달하는 것으로 나타남
 - 황토살포의 연간 총비용은 118억 원으로, 총편익에서 총비용을 공제한 순편익은 0억~798억 원이고, 편익/비용 비율은 1.00~7.74로 평가됨
 - 순편익이 0억 원인 경우는 유해적조의 실제 피해범위가 1995년의

0.14배에 불과하고 폐사어류 중량도 70g에 불과하며 가격탄력성은 1.2로 가정한 대단히 보수적인 시나리오에 따른 것임

- 즉 대단히 부정적인 시나리오를 제외한 모든 경우에 있어서 순편익 +로 나타나고 있어서 경제적으로 볼 때 황토살포의 효과는 매우 긍정적이라고 평가할 수 있음

구 분		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3	시나리오 4	시나리오 5
가 정	1995년 대비 2003년 생산시설규모(배)	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75
	1995년 대비 양식어류 폐사 정도(배)	0.69	0.35	0.35	0.35	0.14
	폐사어류 개체당 중량(그램/미)	100	100	70	70	100
	양식어류의 가격탄력성	0.85	0.85	0.85	1.20	0.85
황토살포에 따른총편익(억 원)		916	411	263	262	118
생산자 잉여 변화(억 원)		-7	-36	-30	54	-647
소비자 잉여 변화(억 원)		923	447	293	208	765
황토살포 비용(억 원)		118	118	118	118	118
황토살포에 따른 순편익(억 원)		798	292	145	144	0
편익-비용 비율(배)		7.74	3.47	2.22	2.21	1.00

2. 적조방제용 황토살포에 대한 어업인들의 의견조사

- 황토살포에 대한 찬성 및 반대의 입장에 있는 어업인 집단의 분포를 확인하고 그 이유를 파악하기 위하여 어업인을 대상으로 한 설문조사를 실시
 - 조사대상자는 종사 어업의 유형과 거주 지역을 고려하여 무작위로 98명을 추출하였으며, 조사대상자 중 거주하는 어촌지역에서 황토살포를 실제로 경험한 비율은 46%임
- 황토살포에 반대하는 어업인 집단 존재 확인
 - 전체 응답자의 57%가 적조발생시 황토살포에 대해 찬성 의사를 표시하였고, 20%는 유보적인 입장을, 22%는 반대 입장을 표명함
 - 그러나 황토살포에 찬성하는 어업인들도 황토살포의 효과에 대해 아직

- 확신하고 있지 않았음
- 또 황토살포에 반대하는 어업인들은 그 이유로서 대부분 황토살포의 2차적 영향에 대한 우려를 지적하였음
- 현행 황토살포 방식에 문제 인식
 - 현재의 황토살포 방법에 대해 응답자의 2/3가 ‘문제가 있으므로 개선되어야 한다’고 답하였음
 - 즉 대다수의 어업인들은 황토살포에 대한 찬성 여부를 떠나 그 방법에 문제가 있다고 인식하고 있음
 - 응답자의 38%는 황토살포 이전에 연구기관 등에서 황토살포의 효과와 영향에 대해 규명해 줄 것을 요구했으며, 응답자의 60% 이상이 황토의 과다 살포를 우려하였음
- 황토살포의 효과 및 영향에 대한 과학적 규명 시급
 - 설사 황토살포의 전체적인 경제적 타당성이 입증된다 하더라도 황토살포로 인해 피해를 입고 있거나 피해를 입고 있다고 생각하는 일부 집단이 존재한다면, 후생경제학적 관점에서는 적조방제용 황토살포가 반드시 사회의 후생수준을 증진시켰다고 말할 수는 없음
 - 본 설문조사를 통해 상대적으로 소수이기는 하지만 황토살포에 반대하는 어업인 집단의 존재가 분명히 확인되었으므로, 적조방제용 황토살포에 관한 사회적 합의를 도출하기 위해서는 무엇보다도 황토살포의 적조방제 효과와 2차적 영향이 명백하게 규명되어야 할 것임

제5장 황토살포의 문제점 및 개선방안

1. 외국사례분석

- 세계적으로 적조발생은 확대되고 있고, 적조생물 종류가 다양해지고 유독종의 발생이 많아지고 있음
- 일본은 적조방제를 위하여 점토살포를 개인사업자 중심으로 실시한 적

- 이 있으나 정부차원에서 대량 살포는 이루어지지 않음
- 양식업자 중심으로 스스로 실시하고 있고, 정부는 화학약품, 초음파, 해면회수, 응집흡착제에 의한 적조생물 구제기술연구에 투자
 - 미국에서는 1950년대 말 적조구제를 위한 황산동을 살포하였으나 환경 오염문제가 발생하여 어떠한 물질도 적조구제를 위하여 바다에 살포하지 못하고 있는 실정임
 - 이후 1970년대까지 화학물질을 이용한 물질개발이 있었으나 성공을 거두지 못했고, 1990년대에는 천적을 이용한 생물학적 방법이 고안되었으나 생태계에 미치는 영향으로 인하여 실용화가 이루어지지 않은 상황

2. 황토살포의 문제점

- 황토살포의 문제점은 크게 적조발생 기작(메커니즘), 황토살포의 생태계 영향, 과다살포 및 비효율적 살포방식, 대체기술 부족, 적조피해보상제도, 황토관리상의 문제점 등을 지적할 수 있음
- 적조발생 기작을 정확히 알지 못한 상태에서는 그에 적합한 구제 및 저감기술을 개발할 수 없음
- 황토살포로 인하여 해양 생태계 및 수산생물에 악영향을 미칠 수 있다는 지적이 많으나, 아직 이에 대한 정확한 조사가 미진한 상태임
- 황토의 적정 살포량은 m^2 당 100~400g으로 권고하고 있지만 현실은 이보다 훨씬 많은 황토를 살포하여 황토자원 낭비뿐만 아니라 수동으로 살포함으로써 비용을 증가시키고 있음
- 현재 우리나라에서 적조방제기술이 개발되었거나 개발 중인 것은 황토를 제외하고 약 15여 종 정도가 있는데, 대부분 기술적으로는 가능하나 현장에서 대량의 적조를 방제하기에는 한계가 있고, 경제적 측면에서 많은 비용이 소요되는 단점이 있어 실용화가 이루어지지 못하고 있음

- 우리나라는 적조피해를 자연재해로 인정하여 정부에서 직접 피해보상을 함으로써 많은 사회적 비용이 발생하고, 보상과정에서 불법이 야기되며, 많은 집단민원이 발생하는 등 사회적으로도 바람직스럽지 못한 현상들이 매년 되풀이되고 있음

3. 개선방안

- 적조발생 기작 규명 연구방향
 - 해수유동을 포함한 환경 조건(수온, 염분, 일조량, 영양염류, 클로로필 등)들에 대한 체계적인 조사와 분석 실시를 기본으로 해류의 이동과 적조발생과의 관계 검증이 필요
 - 적조 생물들이 어디에서 어떠한 경로를 통해서 특정해역에 유입되는지를 규명
 - 적조가 짧은 시간에 개체 수 증식이 가능한지에 대한 기작 규명
 - 적조생물들의 이동·확산과정에서 나타나는 수평/수직적인 이동 규명
 - 적조 발생해역과 이동·확산의 경우 규명
- 해양생태계에 미치는 영향분석
 - 현장에서 다양한 형태의 영향을 추적 조사하고 분석하여 해양생태계에 미치는 황토살포의 영향을 규명
- 고품질 황토살포 및 살포방식 개선
 - 황토살포량을 줄일 수 있는 고효율 황토 개발 및 황토 이외의 친환경적 고효율 적조방제 물질 개발
 - 황토살포 명예감시원제 도입
 - 관 주도가 아닌 어업인 주도 살포체제로 전환
 - 과학적이고도 기계화된 살포방식으로 전환
 - 폐사한 어류를 신속히 제거할 수 있는 자동 흡입장치의 개발
- 적조구제물질 및 장비 사용에 의한 구제
 - 적조구제물질·장비의 사용에 관한 기준에 근거한 구제물질 및 장비를 사용토록 하고, 평가항목 및 기준 강화

- 적조방제 대체기술 개발
 - 대체기술의 기본조건은 구제율, 안정성 및 경제성에 있으므로 이에 근거한 실용성 있는 기술개발 유도 필요
 - 업계에 전적으로 의존하는 형태를 지양하고 정부 지원에 의한 기술개발 추진
- 황토관리 및 운영비 개선
 - 적조방제 황토살포는 황토의 구입에서부터 운반, 살포라는 3단계 과정을 거치기 때문에 크게 황토구입비와 운영비로 구분하여야 함
- 적조피해보상제도 개선
 - 적조피해보상을 정부가 아닌 보험성격의 공제조합 등에서 담당하고, 중앙정부와 자치단체에서는 어업인이 공제조합에 가입할 수 있도록 그 비용을 부담하는 형태로 개선

제6장 결론 및 정책건의

- 적조라는 현상은 자연적 요인에 의해 일어나는 현상으로 이 지구상 바다 어디서든지 적조는 발생할 수 있고 현재도 발생하고 있음
- 그러나 이러한 적조를 발생시키는 요인 중 자연적 요인의 큰 변화가 없어도 최근 들어 부쩍 증가하게 된 데에는 산업화, 도시화 및 인구밀집 등으로 인하여 육상에서 다량의 영양분이 바다로 유입되기 때문임
- 우리나라에서 적조문제가 중요하게 다루어지는 이유는 적조발생 수역이 주로 수많은 양식어장이 존재하는 내만 및 연안으로서 수산피해를 발생 시키기 때문임
- 이에 대한 대책으로 황토를 살포하고 있으며 황토살포의 효과는 상당한 반면 해양생태계 및 수산생물에 미치는 2차적 영향은 거의 없는 것으로 평가됨. 특히 경제적인 평가결과도 대단히 긍정적임

○ 정책건의

- 황토살포가 해양생태계에 미치는 영향을 철저히 규명
- 적조를 발생시킬 수 있는 육상기인 오염원을 철저히 차단
- 적조에 대한 보다 근원적인 연구가 필요
- 어업인들이나 국민들에게 적조에 대한 정확한 지식 전달 및 홍보
- 현재의 황토살포 방식 개선

제 1 장 서 론

1. 연구의 목적 및 필요성

1990년대 이후 적조현상은 광역화, 장기화, 고밀도화되고 있으며, 수산물을 폐사시킬 수 있는 유해적조의 발생 빈도가 증가하고 있다. 적조로 인한 피해는 주로 수산양식에서 나타나고 있는데, 1995년에 최대 764억 원, 2003년도에 215억 원의 피해를 입는 등 매년 수 십억 원에서 수 백억 원에 이르고 있다.

따라서 1996년부터 시·도에서 적조피해를 줄이기 위해 황토를 살포하기 시작하여 1998년부터는 정부사업으로 황토살포 방제사업을 수행해 오고 있다. 황토를 살포하여 적조를 방제하게 된 이유는 황토살포가 적조피해 경감에 효과가 있다는 연구결과가 미국, 일본 등에서 발표된 바 있고, 국내에서는 국립수산물품질관리원(현 국립수산물품질관리원)이 황토살포가 적조방제에 효과가 있음을 입증한 바 있기 때문이다. 그러나 적조발생시 황토의 대규모 살포에 의해 방제 활동을 수행하는 나라는 우리나라가 유일하며, 최근 이에 대하여 많은 논란이 일고 있다.

황토살포로 인하여 적조생물이 구제되는 효율은 황토살포 후 1시간 후 약 75~85%에 달하고 패류, 어류 등 해양생물의 생존에는 직접적 영향을 주지 않는다는 조사결과가 있다. 반면에 황토살포가 해양생태계에 장기적으로 부정적 영향을 줄 수 있다는 주장과 황토살포로 인해 얻어지는 피해방지에 비하여 살포비용이 클 수도 있다는 부정적 견해도 만만치 않은 상황이다. 즉 최근 황토살포가 단기적으로는 적조방제에 효과가 있지만, 장기적으로는 저질토를 산성화시킴으로써 적조 발생을 촉발시킨다는 연구결과가 발표된 바 있고, 황토살포에 따른 경제적 분석이 전혀 이뤄지지 않았다는 점도 지적되고 있다.

따라서 황토의 대규모 살포를 위주로 한 적조방제사업의 수행 여부는 황토살포에 따른 제반 비용과 해양생태계에 미치는 간접적 영향까지 포함하여 그 효과를 종합적으로 고려한 후에 결정하여야 한다는 주장이 설득력 있게 제기되고 있다.

본 연구의 특징은 기존의 적조방제 및 황토살포에 대한 사회과학적인 접근을 시도하였다는 것이다. 즉 기존의 적조에 대한 연구는 적조의 발생 원인, 확

산 유형 및 적조방제 등 자연과학적인 연구가 대부분이었다. 본 연구의 대상인 적조방제용 황토살포에 대해서도 황토살포로 인한 생물학적인 효과연구에 한정되어 있을 뿐만 아니라 사회경제적 효과는 추정된 바가 없는 실정이다. 더욱이 황토살포로 단기적인 효과제고를 추구한 나머지 황토살포로 인한 해양생태 및 생물적 영향과 이로 인한 사회경제적인 효과를 종합적으로 분석한 연구는 미미하다.

따라서 본 연구의 목적은 현장 실태 조사와 그 동안 이루어진 자연과학적 연구자료 등을 활용하여 황토살포의 효과를 사회경제적 관점에서 종합적으로 검토하여 적조방제용 황토살포사업의 타당성을 평가하고, 적조방제사업의 효율성을 높이기 위한 대안을 찾고자 하는 것이다.

2. 연구범위 및 방법

본 연구내용은 크게 4개 분야로 구성되었다. 첫째는 2장에서 우리나라 적조 발생 및 방제 실태를 분석하였다. 즉 적조생물 유형, 적조발생 유형 및 범위, 황토살포 등 적조방제 실태 그리고 적조로 인한 수산피해 유형 및 피해액 현황을 분석하였다.

둘째 3장에서는 황토살포의 자연과학적 영향을 분석하였다. 그 내용으로는 황토살포가 해양생태계 및 수산생물에 미치는 영향, 우리나라 최대 적조 영향권 추정 및 황토살포로 인한 적조 소멸과 수산물 폐사 방지율을 추정하는 것이다.

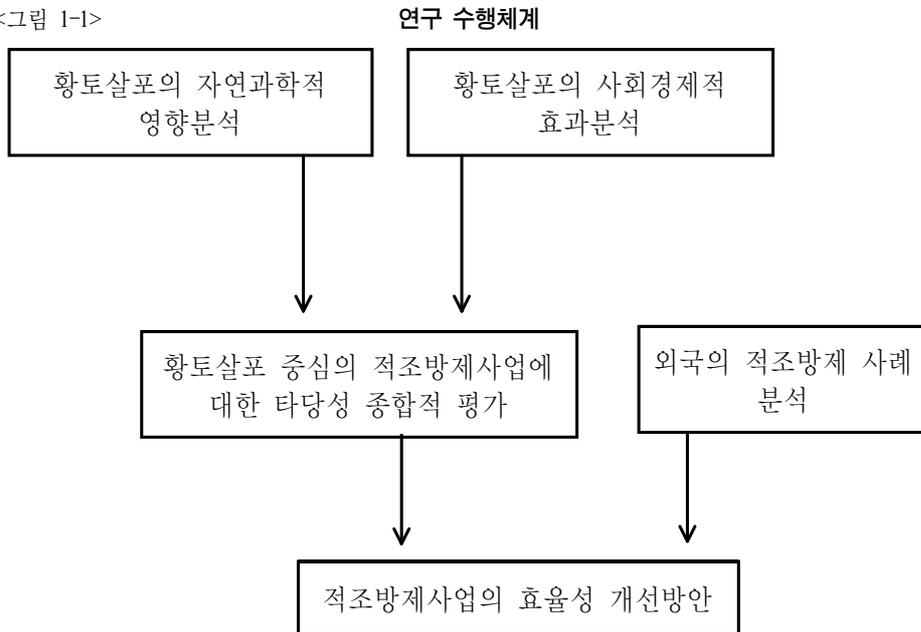
셋째 4장에서는 황토살포의 사회경제적 효과를 분석하는 것으로서 그 내용은 최대 적조 영향권 내 양식물 추정, 황토 미살포시 적조피해액 산출, 황토살포로 인한 수산피해 방지효과 추정 및 황토살포로 인한 사회적 비용 등을 추정하였다.

마지막으로 5장에서는 황토살포의 문제점을 분석하고 그 개선방안을 수립하는 것이다. 그 내용으로는 황토살포의 문제점분석, 적조방제와 관련한 외국사례분석 그리고 개선방안을 도출하였으며, 6장 결론에서는 정책적 건의를 제시하였다.

본 연구는 적조에 관한 한 우리나라 최고의 연구기관인 국립수산과학원과

공동으로 추진하였다. 즉 황토살포의 적조방제효율 및 해양생태계에 미치는 영향 등은 국립수산물과학원에서 수행하고, 사회경제적 효과분석 및 개선방안 도출 등은 한국해양수산개발원에서 수행하는 체제를 갖추었다(<그림 1-1> 참조).

<그림 1-1>



우리나라 적조 양상 및 황토살포로 인한 자연과학적인 효과는 기존의 조사·연구자료를 총체적으로 수집하여 분석하였고, 최대 적조피해 영향권은 국립수산물과학원에서, 지금까지 발생한 적조 중 가장 영향이 컸던 연도의 적조를 기준으로 시뮬레이션을 통하여 추정하였다. 다만 현장실험을 위하여 적조기에 표본해역을 선정하여 직접 현장조사를 실시하려 하였으나 금년에는 적조가 크게 성행하지 못하고 조기에 소멸되어 계획한 대로 현장실험이 이뤄지지 못했다.

황토살포로 인한 사회경제적 분석은 B/C분석을 기본으로 하되, 계량화가 곤란한 부분은 정성분석을 실시하였다. 황토살포로 인한 편익은 최대 적조피해 영향권 내 양식장의 양식물 폐사방지 효과와 자연생태계 내의 수산생물 폐사방지로 구분하여 추정하였다. 비용은 황토살포 직접비용(황토구입, 장비 및 선박이용, 인건비, 운반비 등)을 주로 계산하였고 간접비용(해양환경 및 수산생물에 미치는 영향)은 없는 것으로 가정하였다.

제 2 장 우리나라 적조 및 방제 실태분석

1. 적조발생 현황

1) 적조의 정의

적조생물이란 “다량의 현미경적 미생물이 일시적으로 한곳의 바다에 출현해서 해수의 변색을 나타내는 현상을 말하며 어패류의 폐사를 일으키는 생물”(Okamura, 1916) 이라고 정의하고 있다.

그러나 일반적으로 적조(Red Tide)란 해양에 서식하는 미생물(동물·식물 플랑크톤, 원생동물 및 박테리아)이 일시에 다량으로 증식되거나 또는 생물·물리적으로 집적되어 바닷물의 색깔을 변색시키고 해양생물에 나쁜 영향을 미치는 현상이라고 정의한다. 한편 농업재해대책법에서는 적조현상을 “바닷물에 부유생물이 급증하여 산소가 부족하게 되거나 독성을 발생하는 현상”이라고 정의하고 있다.

적조의 용어는 나라마다 다양하다. 즉 우리나라는 구죽물 및 적조(赤潮)라 부르고, 일본에서는 적조 및 수화(水華), 중국에서는 유해적조 또는 유해조화 등으로 불리우며, 구주에서는 Red Tide, Water Bloom 등이라 한다. 그러나 최근에는 수색을 변화시키지 않는 부유생물 밀도에서도 식중독 현상을 일으킴으로써 적조현상을 유해적조(Harmful Algal Blooms : HAB)라고 부는 것이 일반적인 추세이다.

이러한 적조가 발생하게 되는 이유는 플랑크톤의 대량 증식이라는 생물적 요인 이외에도 물리역학적 환경도 영향을 미치고 있다. 적조를 일으키는 원인 생물은 주로 식물 플랑크톤이며, 드물게는 세균류와 유모충류 그 밖의 동물 플랑크톤에 의한 것도 있다. 해양의 식물 플랑크톤의 주요 원인생물로는 규조류(diatoms, 珪藻)와 함께 편모조류(dinoflagellates, 鞭毛藻類)로서 이것들이 적조를 일으키는 주요 원인종이다.

이러한 적조가 우리나라에 나타난 기록은 삼국시대부터라고 할 수 있다. 즉 161년에 적조가 나타났다는 기록이 삼국사기에 수록되어 있고, 1398년에도 이

조실록에 경상도 고성현에 적조현상이 있었음을 기록하고 있다. 이러한 적조발생은 1980년대부터 점차 증가하기 시작하였는데 공업화를 가장 큰 원인으로 보고 있다. 그 이유는 적조의 발생환경 조건에서 찾을 수 있다. 즉 적조는 반폐쇄성 해역, 육상으로부터 공급되는 풍부한 영양염류, 광합성을 위한 충분한 일조량, 증식에 적당한 수온 등의 조건이 갖추어져야 발생하게 된다. 그런데 예나 지금이나 육상으로부터 공급되는 영양염류 외에는 적조발생 환경이 크게 변화된 것이 없다. 다만 공업화, 도시화에 따라 육상으로부터 질소와 인이 대량 유입된 것이 가장 큰 원인이라고 볼 수밖에 없고, 이러한 현상은 일본 등에서도 이미 확인되었다.

2) 발생수역에 따른 적조의 유형

적조는 식물 플랑크톤 등의 미소생물이 갑자기 이상 증식하여 일시에 대량으로 집적함으로써 해수의 색이 변하게 되는 현상을 말하는데, 원인생물에는 홍색유황세균이나 원생동물 외에도 남조, 은편모조, 와편모조, 규조, 참편모조, 황금색조, 착편모조, 유글레나조, 담녹조, 녹조의 10분류군에 속하는 다양한 조류가 알려져 있다.

발생수역에 따른 적조의 유형은 내만 국지성 적조(embayment blooms), 연안성 적조(coastal blooms), 외양성 적조(oceanic type)로 구분할 수 있다.

내만 국지성 적조(embayment blooms)는 방파제 내측, 항만구조물 부근 등 내만에서 적조가 발생하는 것으로, 공장폐수와 인구의 해안지대 집중으로 도시하수의 증가로 인하여 해안부근 해수의 유기오염이 심하기 때문이다. 즉 용존 유기물의 증가, 중금속류 용해 등이 적조발생을 용이하게 한다.

연안성 적조(coastal blooms)는 하구와 반폐쇄의 작은 만이나 외양에 면한 비교적 해수의 교환이 완만한 곳에서 발생하며 천해 증양식어장에 피해를 일으킨다. 최근에 부영양화형이 확대함에 따라 외양에 면한 연안수역에서도 발생하고 있다. 이곳에서는 시기적으로 용승 후 약층형성 혹은 수직혼합(convection)후 수직 안정도가 증대하는 봄에 잘 발생한다.

외양성 적조(oceanic type)는 해양의 용승이 일어나는 해역 혹은 지형적인 상승류가 존재하는 해역에서 발생하고 그 범위가 광대하다.

3) 타생물 배척, 독작용 유무 및 생물적 구조에 의한 유형

먼저 생물 폐사가 따르는 형은 내만 적조에서 많이 나타나는데, 타생물 배척(animal exclusion)이 따른다. 연안성 적조도 이 부류에 속한다.

또한 타생물 배척작용만 동반하는 형으로는 동중국해 *Trichodesmium* 적조가 이에 해당하며, 때에 따라 해안생물의 폐사를 일으킨다. 구조류에 의한 적조는 어류의 근접을 막고 배제하지만, 그 수괴 주변에서는 호어장이 형성되기도 하여 유익한 점이 존재한다.

한편 적조의 생물적 구조에 따른 분류로는 단독우점종 적조와 우점종 혼합형 적조로 구분된다. 단독우점종 적조(monospecific bloom)는 최근에 한 종의 와편모조류(dinoflagellate)에 의한 단독우점종 적조가 자주 출현하고 있으며 내만에서 자주 발생하는 야광충 적조도 이 범주에 속한다. 우점종 혼합형(bloom of mixture of species)은 구조류, 편모조류 또는 구조류와 편모조류가 혼합하여 적조를 일으킨다.

2. 적조발생 원인생물 및 발생 개요

1) 적조발생 원인생물

우리나라에서는 아직까지 혐기성 박테리아에 의한 적조 기록은 없고 주로 식물성 플랑크톤에 의한 적조가 일어나고 있으며 그 외 원생동물인 섬모충류 1종이 적조를 일으키고 있다. 현재까지의 조사결과 우리나라에서 적조를 일으키는 적조생물은 약 43종인데 이 중에서 4종은 담수 내지는 기수종이고 해산종으로는 구조류가 13종, 라피도조류가 3종 그리고 편모조류가 20종이며 특히 편모조류 중의 3종은 수산생물을 직접적으로 죽일 수 있다.

이들 적조생물 중 식물성 플랑크톤으로서 상습적으로 적조를 일으키는 원인생물은 구조류와 편모조류이다. 특히 우리나라 연안에서 수산생물을 집적 죽일 수 있는 아편모조류에 속하는 *Gymnodinium mikimotoi*란 종이 1981년도에 가장 먼저 출현하였고, *Cochlodinium polykrikoides*종은 1982년도부터 거의 매년 수산피해를 일으키고 있으며, 그리고 1992년도에는 *Gyrodinium sp.*라는 세계 신종이

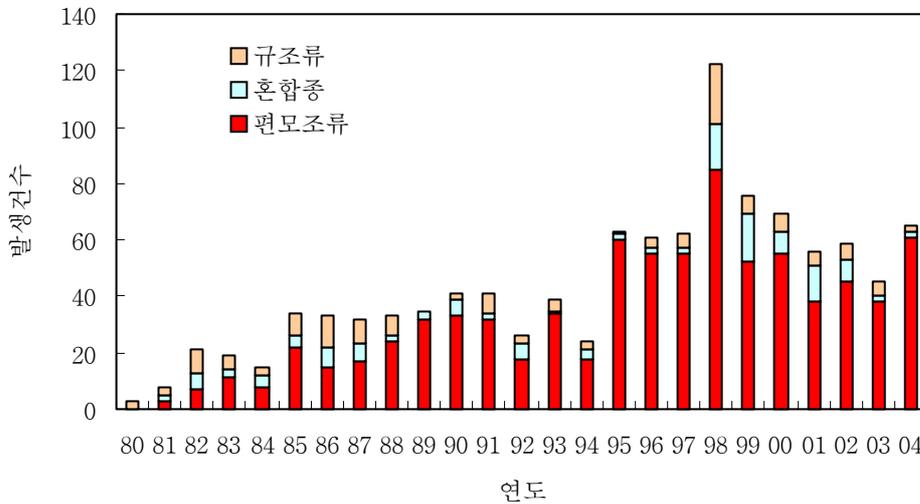
수산피해를 일으켰다.

2) 우리나라의 적조발생 개요

우리나라의 적조는 1980년대까지는 일부 폐쇄성 내만에서 소규모 국부적으로 발생하였으나, 1989년부터는 유해종 적조발생으로 어패류 양식장에서 대규모 수산피해가 발생하기 시작하였다.

<그림 2-1>에서 보는 바와 같이 연도별 적조발생 건수를 보면 1980년대까지는 주로 규조류에 의해 적조가 발생하였으나, 1982년도에는 규조류가 8건으로 38% 그리고 편모조류가 7건으로 33%였고 나머지는 혼합종에 의한 적조였다.

<그림 2-1> 우리나라 연도별 적조발생 건수



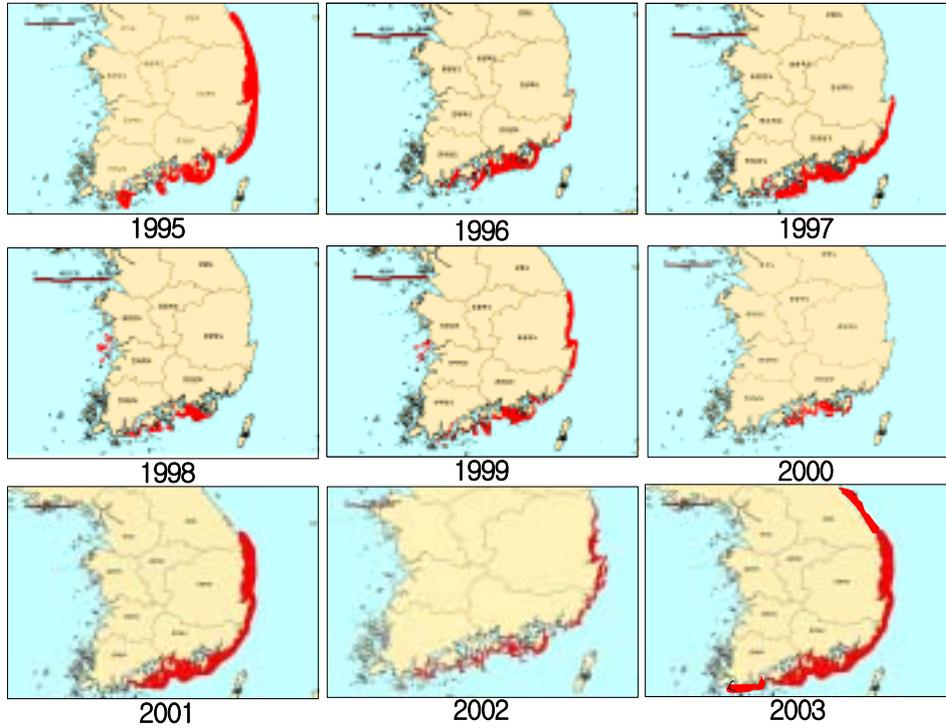
그러나 1985년도에는 규조류가 6건으로 17%, 편모조류가 22건으로 65%, 그리고 나머지 4건이 혼합종에 의한 적조였으며, 점차 편모조류의 발생건수와 점유비율이 증가하였고, 1995년도부터는 *Cochlodinium*에 의한 단독적조가 지속되고 있으며 장기화, 광역화의 특징을 갖고 있다(<그림 2-2> 참조).

적조로 인한 수산피해는 양식산업이 발달한 일본에서 1950년대부터 시작되었고 우리나라에서는 1970년 후반부터 발생하였다. 그러나 최근에는 중국, 노르웨이, 프랑스, 영국, 미국 및 캐나다 등 전 세계 연안에서 발생하고 있다. 비

교적 큰 피해는 1978년 및 1981년에 일어났으며 당시의 수산피해액은 각각 20억 원 내외였다.

<그림 2-2>

최근 유해적조의 발생해역



<표 2-1>

연도별 적조발생 현황

구분	최초 발생일	소멸일	지속 기간	최초 발생지역	발생범위	최고밀도 (개체/mL)
1995	8.29	10.23	55일	나로도 인근	완도~삼척	30천
1996	9.4	10.2	28일	나로도 인근	완도~경주	23천
1997	8.24	9.20	27일	나로도 인근	완도~포항	20천
1998	8.30	10.2	34일	나로도 인근	완도~거제	22천
1999	8.11	10.3	54일	나로도 인근	완도~울진	44천
2000	8.22	9.20	30일	돌산 동안, 남해도	여수~부산	15천
2001	8.14	9.24	42일	나로도, 돌산 동안	완도~강릉	29천
2002	8.2	9.27	57일	북돌바다, 돌산 동안	완도~울진	30천
2003	8.13	10.13	62일	외나로도, 남해도	완도~울진	48천

<표 2-1>에서와 같이 1995년 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 남해와 동해 연안에서 약 2개월간 가까이 지속되었다. 이후에도 유해적조의 출현빈도가 증가하고 적조발생 해역이 광역화됨으로써 수산피해도 거의 전연안에서 수시로 발생하여 지역경제에 심한 타격을 주고 있다.

게다가 유해적조의 직·간접적 피해영향을 받고 있는 대상해역들은 생산성이 높고, 시공간적으로 다양하게 이용되고 있는 연안해역들이어서 유해적조가 경제적으로 뿐만이 아니라 인간활동을 위축시키는 악재로서 작용하고 있다. 그러나 유해적조의 이동확산성, 발생예측 어려움, 해저 잠복성, 새로운 유해종의 출현, 시공간적 대규모 발전성, 적극적 대처수단의 미개발 등으로 인하여 문제 해결에 큰 어려움을 겪고 있다.

3. 적조로 인한 수산피해 실태

1) 수산피해 유형

적조로 인한 피해는 크게 어패류의 대량폐사, 관광산업의 피해 및 심미적 피해로 나눌 수 있다.

어패류의 대량폐사는 적조생물이 유독하나 무독하나에 따라 다를 수 있다. 유독성 적조생물일 경우에는 어패류들이 먹이를 잡기 위하여 물을 빨아들이는 과정에서 유독성 적조생물을 흡수하여 독소에 중독이 되고 결국 폐사되는 것이다. 무독성 적조생물일 경우에는 적조생물이 대량으로 번식한 뒤 질소, 인 등 영양염류를 다 써 버리면 일시에 죽어 해저에 가라앉게 된다. 이 때 세균들이 분해과정에서 산소를 모두 써버리면 결국 해저는 무산소 상태가 되고 운동성이 크게 떨어져 어패류가 질식사하여 폐사하는 것이다.

관광산업적 피해로 대표적인 것이 적조발생시 해수욕장을 폐쇄하는 사례이다. 적조는 주로 수온이 높고 바람이 세지 않은 늦봄과 여름에 많이 발생하게 되는데 이 때는 많은 관광객들이 해변을 찾아 해수욕을 즐기는 시기이나 적조로 인하여 해수욕을 즐길 수 없게 되어 해수욕장을 폐쇄하는 경우이다. 우리나라에서는 아직 그러한 사례가 없으나 미국, 스페인, 이탈리아 등에서는 적조로 인하여 해수욕장을 폐쇄함으로써 막대한 관광수입 감소피해를 본 경우도 있다.

마지막으로는 심미적 피해를 들 수 있다. 즉 적조가 발생하면 바다가 빨강계 변하고 심한 악취가 나므로 관광객들의 기분을 상하게 하여 심미적으로 가치를 상실하게 하는 피해가 있을 수 있다.

그러나 대부분의 적조피해는 수산양식에서 발생하게 된다. 즉 양식장에 적조가 밀려들어 양식 중인 수산물을 폐사시키는 경우가 대부분이다.

2) 수산피해 실태

우리나라의 적조피해 집계는 1990년부터 기록이 남아 있다. 물론 그 이전에도 일부 적조로 인한 수산피해가 없지는 않았으나, 기록으로 남을 정도는 아니었다고 할 수 있다.

<표 2-2>에서 보는 바와 같이 1995년은 우리나라에서 적조문제가 사회문제화될 만큼 많은 수산피해를 발생시킨 유사 이래 가장 대규모 적조였다고 할 수 있다. 그 피해규모를 보면 양식 중인 어류 및 패류 2,628만 5천 마리가 폐사하여 764억 원의 수산피해가 발생하였다. 그 이후 다소 소강상태를 보이다가 2003년에 다시 215억 원의 수산피해가 발생하였다.

<표 2-2>

연도별 적조발생 건수 및 피해 현황

단위 : 건, 억 원, 천 마리, ha, 가구

구 분	발생건수	피해액	폐사량	피해면적	피해가구	피해지역
1990			49톤		27	경남
1992			11,213	162	255	경남
1993	38	84	3,333	219	168	경남
1994	29	5	97	1,215평	5	경남
1995	65	764	26,285	583.4	1,434	경남, 전남, 부산, 경북
1996	61	21	428	28.9	53	전남
1997	62	15	592			경남
1998	122	1.6	219			경남
1999	83	3.2	248			경남, 경북
2000	69	2.6	258			경남
2001	56	84	7,557			경남, 전남, 부산, 경북
2002	59	49	5,268	145	65	경남, 전남, 부산, 경북
2003	45	215	13,088	293	32.6	경남, 전남, 울산

자료 : 해양수산부, 내부자료.

그 동안 적조로 인하여 폐사한 어종을 보면, 조피볼락, 넙치, 돔류, 농어, 방어 등 어류가 대부분이고, 패류로는 전복과 굴 그리고 기타수산동물인 우렁챙이(명게)가 폐사하였다.

피해지역은 경남과 전남을 비롯한 남해안과 경북을 중심으로 한 동해안 일부지역이다. 특히 경남과 전남은 거의 매년 적조로 인한 피해가 발생하고 있는 지역이라 할 수 있는데, 이 두 지역의 양식어업 면허 및 신고건수가 대부분임을 고려할 때 적조로 인한 피해의 가능성은 높을 수밖에 없음을 알 수 있다.

4. 적조저감 및 방제 실태

1) 적조방제 체제

적조에 대한 정부의 종합적인 대책이 수립된 것은 1995년 남해안에서 발생한 씨프린스 호의 해상 유류오염사고와 대규모 유해성 적조발생으로 인한 막대한 피해가 발생한 것이 계기가 되었다고 할 수 있다.

1995년 정부는 해양환경의 중요성을 인식하고 관련부처 합동으로 ‘해양오염방지 5개년 계획(1996~2000년)’을 수립하였다. 동 기간 동안 총 4조 3,390억 원을 지출하였고, 그 중 적조방지종합대책에는 1,774억 원으로 4.1% 정도가 지출되었다. 한편 이 때부터 국립수산과학원에 ‘적조상황실’을 설치·운영하는 등의 적극적 지원을 시작하게 되었다(<표 2-3> 참조).

<표 2-3>

해양오염방지계획 중 적조방지대책 및 투자 실적

단위 : 억 원

사업내용	계획(A)	투자실적						대비(B/A)
		계(B)	1996	1997	1998	1999	2000	
-합 계	1,774	1,364	171	247	250	281	414	76.9
-적조예찰 및 피해예방연구	54	34.8	12	12	6	2	2.8	64.4
-오염해역준설	719	240	4	24	14	41	157	33.3
-연안어장정화정비	977	964	150	208	196	187	223	98.7
-김양식어장무기산사용방지대책	-	93	-	-	31	31	31	-
-방치폐선처리 및 처리장 설치	20	30	4	3	3	20	-	150.0
-우량사료 개발보급	4	2.3	1	0.4	0.3	0.3	0.3	57.5

아울러 2001년부터 새롭게 해양환경보전 종합계획(2001~2005년)을 수립하여 추진 중인데, 총 예산투입규모 4조 4,607억 원 중 적조방지관련 예산은 오염해역준설, 연안어장 정화 등 4,700억 원 수준이다.

적조의 대책은 크게 적조의 발생 자체를 방지하기 위한 예방조치와 일단 적조가 발생한 경우 그 피해를 가능한 한 줄이기 위한 치료조치로 구분된다.

<표 2-4>에서 보는 바와 같이 발생방지 대책으로 과도한 부영양화 해소, 자극물질의 제거, 천해매립의 제한 등으로서 적조발생 요인 중 인간의 행위에 의한 요인을 줄이는 것이 되겠다. 피해방제 대책으로는 예고와 조기발견, 적조생물의 회수 및 폐사대책이 있을 수 있다.

<표 2-4>

적조의 대책

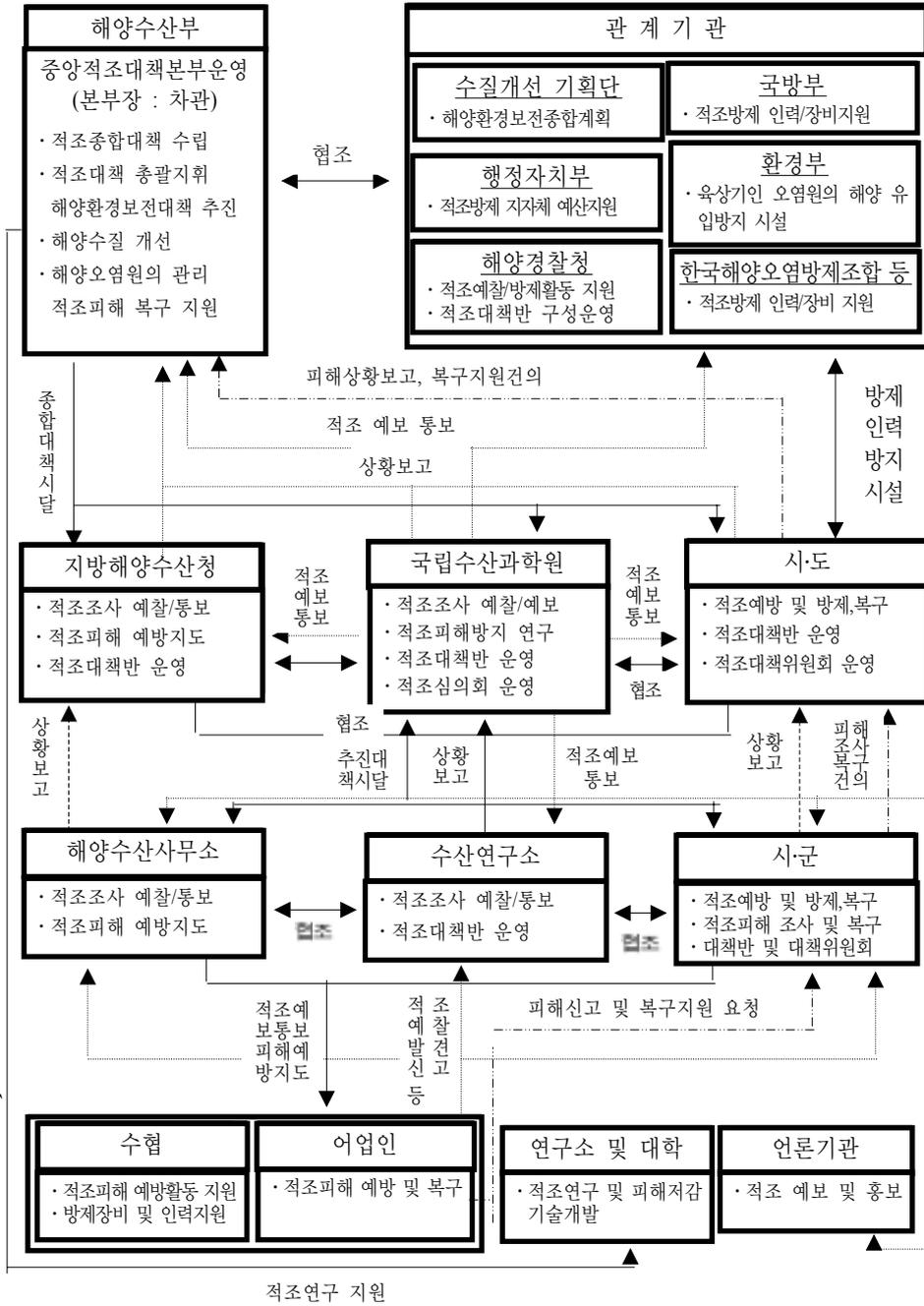
발생 방지	과도한 부영양화 해소	질소, 인의 부하규제와 유기오염니(有機汚染泥)의 제거
	자극물질의 제거	유기물 중금속 등. 수질, 저질의 정화
	천해매립의 제한	매립에 의한 정체 수역의 출현, 공사에 동반된 저니 교반에 의한 재용출, 새로운 부하의 유입 등의 방지
피해 방제	예고와 조기발견	발생기구의 해명, 감시·예보태세의 정비
	적조 생물의 회수	흡취, 파괴. 부작용에 주의
	폐사대책	피해기구의 해명, 차단, 도피, 양식기구의 개량

우리나라의 적조방제 추진체계는 <그림 2-3>과 같이 해양수산부를 중심으로 중앙적조대책본부를 구성하고, 각 지자체에는 적조대책위원회, 유관기관 및 단체에는 적조대책반을 구성하여 운용하고 있다. 각 기관의 역할은 <그림 2-4>와 같다.

적조의 예찰은 국립수산과학원에서 3월부터 11월까지 전국 연안 해역 77개 정점을 지정하여 정기적으로 적조를 예찰한다. 그리고 적조가 발생하면 국립수산과학원장이 적조를 예보하는데 <표 2-5>와 같이 4단계로 나누어 실시하고 있다. 즉 적조출현, 적조주의보, 적조경보 및 적조해제가 있는데 적조진행과 변화정보의 전파 및 어업피해 방지를 위해서는 적조속보를 발령할 수 있도록 되어 있다.

<그림 2-3>

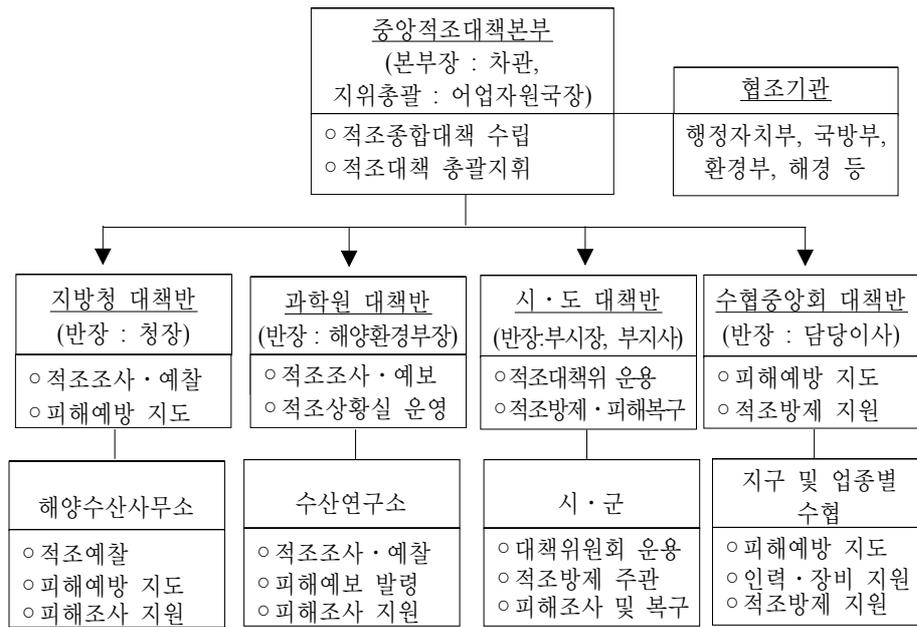
우리나라 적조방제 추진체계도



적조연구 지원

<그림 2-4>

우리나라 적조방제 추진기관별 역할



<표 2-5>

적조예보종류 및 발령기준

종 류	규 모	적조생물 밀도(개체/mL)	비 고
적 조 출 현		· 1개체 이상 출현시	· 행정기관 내부 간 출현사실 통보
적 조 주의보	반경 2~5km(12~79km ²)수역에 걸쳐 발생하고 어업피해가 우려될 때	· 편모조 : 종의 세포크기와 독성도에 따라 결정 - Chattonella sp. : 50이상 - Cochlodinium sp. : 300이상 - Gymnodinium sp. : 500이상 - Gymnodinium mikimotoi : 1,000이상 - 기타 편모조류 : 30,000이상 · 규조류 : 50,000이상 · 혼합형 : 편조가 50%이상인 때 40,000이상	· 국립수산과학원장은 적조생물 특성·해황에 따라 피해가 우려될 경우 적조 규모 및 밀도에 관계 없이 적조예보를 발령할 수 있음 · 적조규모와 밀도는 현지상황과 적조생물에 따라 변할 수 있음
적 조 경 보	반경 5km(79km ²)이상 수역에 걸쳐 발생하여 발생 위험이 크거나 상당한 어업피해가 예상될 때	· 편모조 : 종의 세포크기와 독성도에 따라 결정 - Chattonella sp. : 100이상 - Cochlodinium sp. : 1,000이상 - Gymnodinium sp. : 2,000이상 - Gymnodinium mikimotoi : 3,000이상 - 기타 편모조류 : 50,000이상 · 규조류 : 100,000이상 · 혼합형 : 편조가 50%이상 때 80,000이상	· 수과원장과 지방청장은 적조진행과 변화정보의 전파 및 어업피해 방지에 관한 조치가 필요할 때 적조속보를 발령할 수 있음
적 조 해 제	적조가 소멸되어 어업피해 위험이 없고 수질이 정상상태로 회복했을 때		· 추석 전후 등 연휴기간 해제 신중

한편 적조방제를 위하여 방제선단을 구성·운영하고 있는데, 대상선박은 행정선, 방제선, 해경정, 군함 및 어선 등이 동원된다. 또한 농어업재해대책법에 의한 재해대책 명령서를 발부하여 방제인력 및 장비를 동원하고 있다.

적조방제를 위한 장비는 시·도별로 보유하고 있는데 <표 2-6>에서 보는 바와 같이 전해수 황토살포기를 비롯하여, 적조제거기, 여과기, 산소공급기, 순환펌프 등 10여 개 이상의 장비가 있다. 지역별로 보면 어류양식 등 적조로 인하여 피해가 많이 발생하는 전남, 경남, 경북, 울산, 부산 등에 대부분 비치되어 있다.

한편 농어업재해대책법에 근거하여 적조로 인하여 수산피해가 발생한 경우 매년 복구사업비를 지원하고 있는데 그 현황은 <표 2-7>과 같다. 1990년부터 2003년까지 직간접비용을 합하여 총 895억 8,200만 원이 지원되었는데 직접비용은 이 중 80%인 717억 9,400만 원이다. 그리고 직접비용 중 국고와 지방비로 지원된 금액은 390억 2,900만 원으로 직간접비용 전체의 44%, 직접비용의 54%이다. 물론 이러한 비용은 앞서 본 피해액에 비해서는 작은 규모이나, 적조로 인하여 많은 사회적 비용이 지출되었음을 알 수 있다.

<표 2-6>

적조방제 장비 현황

구 분	전남	경북	경남	부산	울산	강원
전해수황토살포기		1				
비상발전기		27				
적조제거기	4	2	4	1		
적조경보기	10	1	4	5		
여과기	274	32		5	20	
산소공급기	12,005	220	603	3	30	
순환펌프	1,494	377	850	130	165	10
침전조	240	28	98			
양조기	1,297	585				
지하해수시설	34	4				
액화산소			424	70	90	
기 타	221		273	65	6	
합 계	15,579	1,277	2,256	279	311	10

자료 : 해양수산부, 『적조피해 및 예방사례집』, 2004. 6.

<표 2-7>

연도별 적조피해 복구비

단위 : 백만 원

구 분	합계	직접비용					간접비용			
		소계	국고	지방비	용자	자담	소계	영어 자금	이자 감면	학자금 면 제
합계	89,582	71,794	31,188	7,841	22,567	10,198	17,788	15,505	2,227	56
1990	146	12	8			4	134	120	12	2
1992	12,266	5,394	2,693	1,075		1,626	6,872	6,227	623	22
1993	3,742	1,371	677	266		428	2,371	2,081	280	10
1994	274	62	25	6	19	12	212	193	19	
1995	40,425	38,903	16,880	3,869	13,292	4,862	1,522	655	636	19
1996	746	661	289	66	225	81	85	77	8	
1997	182	172	85	17	51	19	10	10		
2001	11,245	8,141	3,580	820	2,765	976	3,104	2,910	192	2
2002	6,360	5,991	2,334	602	2,236	819	369	341	27	1
2003	14,196	11,143	4,617	1,120	3,979	1,427	3,053	2,891	162	

2) 적조저감기술

(1) 적조피해 저감대책기술

연안 양식장의 적조 발생을 억제하고, 발생된 적조를 제어하여 적조피해를 줄이기 위한 대책은 크게 2가지 측면에서 고찰·연구되고 있다.

첫째, 적조에 대한 기초연구를 통하여 적조발생 예보기술을 개발하고 적조생물의 생리·생태를 규명하는 일이다. 적조발생을 신속 정확히 예보하기 위해서는 수(水) 환경을 정확히 평가하고, 나아가 적조의 대량발생과 관련한 원인생물의 생리·생태적 특성이 파악되어야 한다.

둘째, 적조피해 저감방법은 간접적인 방법들로서는 법적으로 해양오염을 규제하고 개선하는 방법, 그리고 적조발생시 적조를 피하여 이동하는 방법 등을 들 수 있다. 법적인 규제는 '수질오염방지법', '해양오염방지법', '농약관리법' 등을 들 수 있고, 이 점을 국가적인 차원에서 강력히 규제할 경우 가능하다.

개선방법은 양식장의 수질과 저질을 개선하기 위하여 양식장의 자가오염을 최소화하고 경운과 객토를 행하여 수질과 저질을 개선하는 방법이다. 운작, 양식생물의 밀도조절, 어장의 안식년 등을 통한 어장 항상성이 유지되도록 하는 것도 좋은 방법이다. 또한 새로운 양식기법을 통한 간접적인 방법을 들 수도 있다.

예를 들면 복합양식의 개발을 통하여 수질과 저질을 안정시키며 biodeposit을 최소화하는 방법이나 또는 부영양화 수역에 해조류를 대량으로 배양함으로써 사전에 수질을 안정시키는 방법, 또 그 해역의 수질에 알맞은 양식생물을 개발함으로써 적조발생을 간접적으로 조절하고 적조발생시 피해 영향을 최소화할 수 있는 양식기법의 개발을 들 수 있다. 또한 적조발생시 가두리 양식장의 수평적 또는 수직적 이동의 방법 역시 간접적인 방법이 될 수 있으며 외해 양식기술 개발을 통하여 적조발생의 원인제공을 하지 않으며 또 적조발생시 피해로부터 해방될 수 있는 새로운 양식공학기법의 개발도 필요하다.

(2) 적조구제방법

① 생물학적 방법

생물학적인 방제기법은 해양생물 간의 상호작용을 이용한 방법으로서 적조생물의 포식자와 천적 미생물에 관한 연구가 대부분을 차지하나, 적조생물을 치사시키는 생리 활성물질을 해양생물에서 추출·합성하여 이용하거나, 영양경쟁관계에 의한 저독성 적조유발방법 등도 연구되고 있다.

가. 포식압을 이용한 적조생물 구제

해양생태계 내의 먹이연쇄에서 1차 생산자로서 작용하는 적조생물은 2차 생산자이며 1차 소비자인 동물성 플랑크톤에 의해 양적 변화의 제한을 받는다. 그러므로 식물성 플랑크톤에 대한 동물성 플랑크톤의 포식압 원리가 적조생물 구제기법의 하나로 제시되어 집중적인 연구대상이 되어 왔다. 특히 식물성 플랑크톤의 주요 포식자인 요각류와 섬모충류에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 결론적으로 적조생물에 대한 포식압의 영향은 잡식성 섭이자가 가장 큰 것으로 나타났으나, 현장적용이 가능한 실용적인 적조구제법으로 미약한 점이 많은 실정이다.

나. 해양세균에 의한 적조방제

동물성 플랑크톤의 포식압을 이용한 적조생물 제거는 동물성 플랑크톤을 대

량배양 하는 등 어려운 문제점이 많아, 최근에는 포식압의 원리와 적조생물의 천적미생물을 이용하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 미생물을 이용한 적조구제는 대상 적조생물에 대한 특이성이 높아 다른 생물에게 미치는 악영향을 최소화할 수 있어 환경의 악화를 방지할 수 있는 장점이 있다.

국립수산과학원에서는 적조생물 제어 미생물의 다양한 균주 확보와 적조생물 제어 미생물의 소멸 기작에 대한 이해, 적조생물 제어물질의 순수분리 및 구조분석, 그리고 이들 물질의 기작 연구 및 현장실험을 통하여 실용방법을 개발하였다. 그 결과 적조제어 미생물인 *Cytophaga* sp. 속 OT-1 균주는 적조생물인 *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* sp. *Heterosigma akashiwo* 및 *Cochlodinium polykrikoides*를 특이적으로 제어함을 알았고, 또한, *C. polykrikoides* 적조를 살상하는 2종의 세균을 분리 보고한 바 있다.

다. 적조생물을 치사시키는 물질에 의한 적조방제

일부 해조류나 어류 등의 해양생물체 내에서 추출한 생리활성물질은 적조생물의 물질대사 기능을 저해하는 효능이 탁월한 것으로 알려지고 있다. 이들 물질은 대량생산이 비교적 용이하면서도 다른 해양생물에는 해가 없기 때문에 대량 살포시 우려되는 생태계 교란문제를 해결할 수 있다. 예컨대, 해조인 큰실말에서 분리된 고급불포화지방산은 미량인 1ppm의 농도에서도 *Heterosigma*, *Chattonella*, *Alexandrium*을 1분 이내에 치사시키는 것으로 알려졌다. 또한 대형 해조류로부터 추출된 알긴산도 적조구제물질로 보고되고 있으나, 경제적 측면에서 현장적용이 어려운 실정이다.

라. 영양경쟁관계의 적조생물에 의한 유독성 적조발생 억제

영양경쟁관계에 있으면서 비교적 독성이 약한 적조종을 인위적으로 유발시켜, 용존 영양염류와 증식 촉진물질을 소비시킴으로써 유해성 적조발생을 억제시키는 환경제어방법이다.

② 이화학적 구제방법

적조생물을 파괴, 치사시키는 황산동, 수산화마그네슘 등의 화학약품을 살포하는 방법으로서 이들 구제효과가 있는 물질들을 연안해역에 투입, 또는 살포하였을 경우 장기적으로 해양생태계 및 수산생물에 피해를 주지 않고 환경변화(생태교란)를 초래하지 않아야만 한다. 또한, 산업적으로 이용하기 위해서는

대량생산과 사용·운송 및 취급이 용이하여야 하고 가격도 저렴하여야 한다.

③ 물리적 구제방법

점토(황토)살포, 초음파 및 오존처리 등이 개발되어 있으며, 적조생물을 흡착·응집시키는 방법 또는 가압 부상분리(여과 또는 원심분리) 장치에 의해 적조생물을 회수하는 방법이 있다.

(3) 적조 자동경보장치

적조발생시 종래의 방법들은 사람들의 인력에 의해 적조를 감시하고 채수한 시료를 현미경을 통해 목측에 의해 적조농도를 조사하여 적조경보를 발생하는 방법들을 사용하고 있어 적조발생에 적절하게 대처하지 못하였다.

본 장치는, 적조가 양식장 바로 근처 적당한 곳에 유입되었을 때 즉시 경보를 내릴 수 있도록 하여 양식어민에게 경광등, 무선표출 등에 의해 알림과 동시에 해수 유입을 차단할 수 있는 장치로 구성된 육상양식장의 적조경보장치 시스템 및 저층수 펌핑장치와 적조경보로 이루어진 해상양식장의 적조경보장치 시스템으로 이루어져 있다.

적조경보장치는 적조센서(클로로필, 탁도 등 적조의 양을 직·간접적으로 측정할 수 있는 클로로필 센스, 탁도계 등을 일컬음)로부터 측정된 적조농도가 전압으로 변환되어 적조경보시스템에 입력되며, 이 입력된 전압이 미리 조사에 의해 밝혀진 설정농도(적조경보 발령에 해당되는 적조농도)에 해당하는 전압을 초과할 경우, 경보를 발하게 되어 있다.

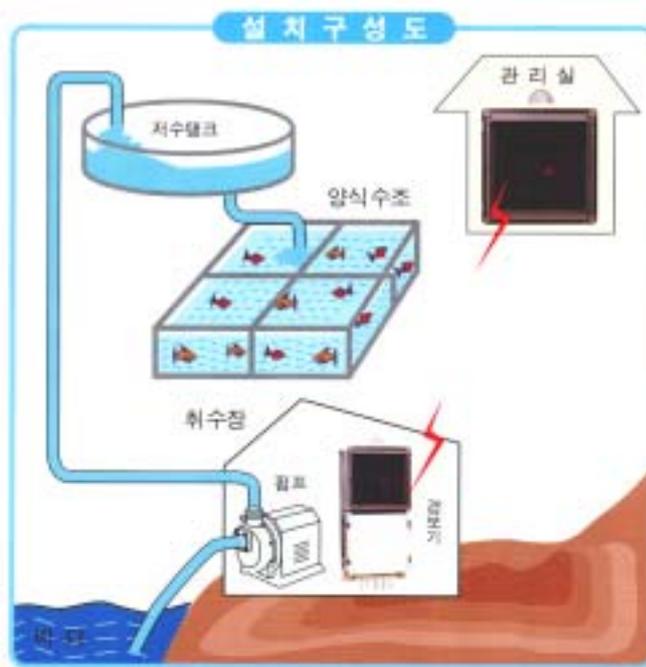
① 육상양식장용 적조경보기

육상 양식장용 적조경보장치의 구성도는 <그림 2-5>와 같다. 그림에서와 같이 적조경보기는 해수 취수장 부근에 설치되어 취수되는 해수의 이상유무를 판단하도록 되어 있으며, 동시에 관리실에 관리실용 경보수신기를 설치하여 취수장에서 해수에 대한 환경을 종합적으로 모니터링 및 컨트롤이 되도록 이루어져 있다.

즉 이상해수 유입시에는 해수펌프의 작동을 정지시키며 동시에 압축공기 또는 액화산소기, 보일러 등을 구동시켜 산소, 따뜻한 물 등을 발생시키고 이를 양식장 내 수조로 보내어 이미 취수된 해수를 되도록 장기간 사용할 수 있도록 함으로써 양식생물을 보호하도록 되어 있다.

<그림 2-5>

육상양식장용 적조경보기



② 해상가두리용 적조경보기

해상가두리용 적조경보기는 적조가 해상양식장 바로 근처 적당한 곳에 유입되었을 때 즉시 경보를 내릴수 있도록 하여 양식어민에게 알림과 동시에, 자동으로 저층의 깨끗한 해수를 펌프로 파이프를 통하여 적조가 밀집되어 있는 표층에 살포되도록 하여 적조농도를 희석시킴으로써 양식생물을 보호할 수 있도록 적조경보기와 저층수 펌핑 시스템으로 이루어져 있다. 즉 적조경보기를 해상가두리 양식장에 <그림 2-6>과 같이 설치하여 가두리 양식장 주변 해역 표층의 적당한 곳으로 가두리에 접하는 앞·뒤, 좌·우에 설치된 표층 해수 취수 파이프로부터 해수를 각각 취수하여 양식장 주변에 적조가 접근하는가를 계속 감지한다.

적조가 적정 농도 이상 접근시에는 적조경보기가 이를 감지하고 적조경보기 회로 내의 주변기기 구동회로를 작동시켜 가두리의 적당한 곳에 시설되어 있는 저층 해수 펌프를 기동시키면 적조생물이 없는 깨끗한 저층수를 펌핑하여 펌프에 부착된 분사구를 통해 가두리 내로 분사시킨다. 이로써 가두리 어장 내

에 유입된 적조농도를 희석시켜 양식생물이 보호되도록 이루어져 있다.

<그림 2-6>

해상가두리용 적조경보기



3) 황토에 의한 적조방제

(1) 황토살포의 배경과 실적

적조가 발생했을 때 황토를 뿌리는 이유는 황토 입자 사이의 빈 공간이 불순물, 오염물질을 흡착 분해해서 산소를 풍부하게 하고 원적외선을 방출하는데, 이는 적조를 일으키는 조류의 먹이가 되는 인 성분을 황토 입자 사이의 공간이 흡착해 바다 속으로 가라앉도록 하기 때문이다.

이러한 황토를 이용한 적조방제방법은 1996년부터 지방자치단체를 중심으로 사용되었다. 이후 1998년부터는 정부와 지방자치단체가 50%씩 부담하여 매년 황토를 살포하고 있다. 1998년 이후 2003년까지의 황토살포량은 <표 2-8>과 같

이 매년 증가추세에 있다. 한편 2004년 황토 구입량 및 구입예산을 보면 <표 2-9>와 같이 총 228,000톤에 34억 2천만 원이 소요될 것으로 예상되고 있다.

<표 2-8>

연도별 황토살포 실적

단위 : 톤

연 도	시 도 별					
	계	부 산	울 산	전 남	경 북	경 남
1998	72,162			36,220		35,942
1999	137,351	4,100	414	48,864	3,350	80,623
2000	75,207			17,149		58,058
2001	144,118	5,152	3,727	26,014	20,029	88,596
2002	173,348	1,348	1,231	42,122	11,886	116,761
2003	221,628	1,067	2,943	67,113	17,727	132,778

자료 : 해양수산부, 내부자료.

<표 2-9>

2004년 황토 구입 예산

단위 : 톤, 천 원

시도별	물량	사업비		
		합계	국고	지방비
합 계	228,000	3,420,000	1,710,000	1,710,000
부 산	4,000	60,000	30,000	30,000
울 산	4,000	60,000	30,000	30,000
강 원	1,000	15,000	7,500	7,500
전 남	34,000	510,000	255,000	255,000
경 북	35,000	525,000	262,500	262,500
경 남	83,000	1,245,000	622,500	622,500
해수부	67,000	1,005,000	502,000	502,000

자료 : 해양수산부, 『2004년도 적조피해 예방대책』, 2004. 2.

황토살포를 위해서는 황토를 구입하여 적조기에 대비해 일정한 장소에 야적해야 한다. 2004년 현재 황토 적치장은 전국에 88개소가 있다(<표 2-10> 참조).

또한 황토살포를 위해 선박과 굴삭기 및 인력이 대규모 동원되어야 한다. 2003년 적조방제를 위해 동원된 인력은 33,525명, 선박은 11,752척 그리고 굴삭기 등 장비가 2,417대 동원되었다. 따라서 이러한 인력, 선박, 장비, 황토구입비, 적치장 등은 모두 황토살포를 위해 소요되는 비용이다.

<표 2-10>

2004년 황토 적치장 및 규모

단위 : 개, 평, 톤

시도별	적치장 개소	면적	최대적재량
합계	88		
부산	1	100	5,000
울산	3	1,233	21,504
강원	6	1,250	2,300
전남	33	9,220	289,550
경북	20	2,842	
경남			

자료 : 해양수산부, 『적조피해 및 예방사례집』, 2004. 6.

(2) 황토의 적조생물 구제효과

황토의 주 구성성분인 규소, 알루미늄, 철 등의 금속화합물은 무기이온에 대한 강한 친화력 때문에 자연계와 수처리 공정에서 흡착제로 이용되고 있다. 그러나 황토의 토취장별로 이러한 금속화합물의 구성비에는 큰 차이가 있으며, 이에 따라 적조구제효율도 19~98%범위로서 큰 폭으로 변화되고 있다. 특히 알루미늄 및 철의 구성비가 높은 점토가 적조생물의 구제효율이 탁월하였다.

적조농도별 구제효율을 보면 <표 2-11>에서 보는 바와 같이 적조생물이 저농도일 때에도 황토를 살포할 경우 구제효율이 높았으며, 적조생물의 밀도가 높을수록 구제효율도 높았다.

황토입자크기별 적조생물 구제효율은 황토입자 50 μ m 이하에서 가장 구제효율이 높았고, 입자가 클수록 구제효율이 낮았으나 입자크기별로 그다지 큰 차이는 보이지 않았다. 자연황토의 경우 입자크기는 지역에 따라 다소 차이가 있었으며 50 μ m 이하의 입자가 16~29%범위였다. 50 μ m 이하로 분쇄한 황토가 자

연상태의 황토에 비하여 구제효율은 다소 높았으나 자연황토보다 분쇄경비 및 포장비용이 과다 소요되는 등 경제성 측면에서 문제가 예상된다.

<표 2-11> 적조생물 밀도별 시간별 구제효과

황토처리 후 시간 적조생물 밀도(cells/mL)	살포직후	30분	60분
100~500	40~50%	74~76%	80~83%
500~1,000	50~55%	76~78%	85~88%
1,000~3,000	55~65%	74~85%	84~92%

주 : 구제물질 투입량 10g/L

한편 황토살포의 효과를 높이기 위하여 황토살포기를 사용하고 있다. <그림 2-7>은 엔진식 황토살포기로서 황토를 보다 효율적으로 살포하기 위하여 개발한 것이다. 원리는 해수와 혼합된 황토를 회전축에 연결된 2~3개의 회전날이 고속회전에 의해 분쇄하는 방식으로 황토를 해수와 혼합, 분쇄 그리고 살포하는 3가지 기능을 동시 수행하도록 되어 있다.

<그림 2-7> 소형엔진식 황토살포기



제3장 황토살포의 지언과학적 영향분석

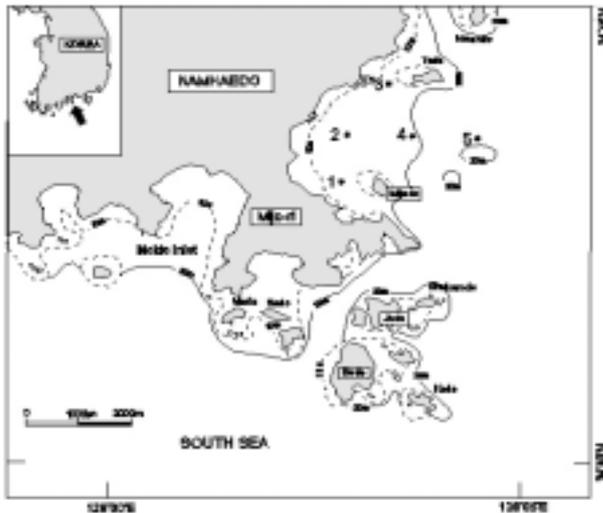
1. 해양생태계 및 수산생물에 미치는 영향

1) 저서 생태계에 미치는 영향 연구

(1) 남해 미조 연안해역

남해 미조 연안에 매년 적조가 발생하여 황토를 집중적으로 살포하는 해역 (<그림 3-1> 참조) 4곳과 황토가 살포되지 않았던 비교적 연안에서 바깥쪽에 대조구 1곳을 정하여 1999년 3월과 6월, 7월, 9월, 10월 및 12월, 2000년 2월, 4월, 6월, 8월, 9월 그리고 11월에 걸쳐 총 12회에 걸쳐 각각 조사한 2년간에 걸친 방대한 양의 시료를 모두 분석하였다.

<그림 3-1> 조사해역도(Mijo Bay in Namhaedo)



채집기는 van Veen grab(표면적 0.1m²)을 사용하여 각 정점에서 3회씩 해저 퇴적물을 인양하였다. 인양된 퇴적물은 선상에서 1mm 망목의 표준체를 사용하

여 체질하여 펄을 제거한 다음 잔존물을 표본병에 담고 중성포르말린으로 10% 되게 고정하여 실험실로 운반하였다. 실험실에서는 저서동물만을 분류군별로 선별하여 분류군별 습증량을 0.01g까지 측정하였으며, 종 수준까지 동정(同定)하고 종별 개체 수를 세었다.

개체 수 및 생체량 자료는 단위 면적(m²)당 수치로 환산하여 나타내었으며, 군집의 구조파악을 위하여 종 다양도(Shannon and Wiener, 1963)를 구하였다. 각 정점 간의 유사도 파악을 위한 집괴분석은 chord distance를 이용하였으며, 가중평균결합법을 사용하였다(Pieolu, 1984). 다변량분석을 위한 통계분석은 MVSP 3.1을 이용하였다. 이상의 각각의 방법으로 황토살포에 따른 저서생태계의 영향을 종합적으로 분석하였다.

① 저서동물의 종조성, 밀도 및 생체량

1999년 3월부터 2000년 11월까지의 12회의 조사기간 동안 총 246종의 저서동물이 출현하였으며, 밀도는 3,075개체/m²였다(<표 3-1> 참조). 이 가운데 가장 우점한 분류군은 다모류로서 119종이 출현하였으며 전체 출현종 수의 48.37%를 차지하였다. 갑각류는 52종이 출현하여 21.14%를, 연체동물은 47종이 출현하여 19.11%를 차지하였다. 밀도는 다모류가 2,914개체/m²로서 전체 밀도의 약 95%를 차지하여 극 우점하였다.

<표 3-1>

주요 저서생물의 종조성 및 생물의 생체량
(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)

Taxon	Number of species	Abundance (ind/m ²)	Biomass(g/m ²)
Polychaeta	119 (48.4%)	2,914 (94.8%)	46.75 (37.2%)
Mollusca	47 (19.1)	55 (1.8)	6.16 (4.9)
Crustacea	52 (21.1)	82 (2.6)	11.13 (8.9)
Echinodermata	13 (5.3)	12 (0.4)	56.94 (45.3)
others	15 (6.1)	12 (0.4)	4.66 (3.7)
Total	246 (100.0)	3,075 (100.0)	125.65 (100.0)

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

다모류 다음으로는 갑각류가 82개체/m²로서 우점하였으며, 연체동물은 55개

체/m²로서 약 2%를 차지하였다. 극피동물과 기타분류군은 12개체/m²였다. 생체량은 평균 125.65g/m²였으며, 이 가운데 극피동물의 생체량이 56.94g/m²로서 전체 생체량의 45%를 점유하였다. 또한 다모류는 46.75g/m²로서 전체 생체량의 37%를 차지하였으며, 갑각류는 11.13g/m²로서 약 9%를 차지하였다.

② 시간에 따른 저서동물의 변동

조사기간동안 출현한 저서동물의 출현종 수의 시간에 따른 변화를 보면 2000년 6월의 80종, 1999년 7월의 138종 범위였다(<그림 3-2> 참조). 조사개시월인 1999년 3월에는 106종의 저서동물이 출현하였으나, 점차 증가하여 같은 해 6월에는 119종이 출현하였다. 7월에는 전 조사기간 동안 가장 많은 출현종수를 보인 다음, 9월에는 98종으로 감소하였다. 그 후 2000년 6월에는 80종으로 가장 적은 종수를 보인 다음, 조사 종료시인 11월까지 90종 미만의 낮은 출현종수를 보였다. 다모류는 1999년 7월에 78종이 출현하여 상대적으로 가장 많았으며 같은 해 9월부터 조사종료시인 2000년 11월까지 51~60종의 범위에서 출현하였다. 연체동물은 1999년 7월에 22종이 출현하여 상대적으로 많았으나, 1999년 10월에는 6종만이 출현하여 가장 적은 출현종수를 나타냈다. 2000년 2월에 14종이 출현하여 약간 증가한 양상이었으나 조사 종료시까지 7~12종 범위에서 출현하였다. 갑각류는 1999년 3월부터 10월까지 20~22종 범위에서 출현하였으나 12월부터 15종 이하로 감소하였다. 그 후 2000년 9월과 11월에 각각 17종씩 출현하였다. 극피동물은 시기에 따라 2종에서 8종이 출현하였다.

또한 밀도의 경우, 출현종 수가 가장 많았던 1999년 7월에 1,953개체/m²로서 조사기간 동안 가장 낮은 밀도였다(<그림 3-2> 참조). 그 후 약 2,000개체/m² 이상의 밀도를 나타내다가 2000년 9월에는 7,642개체/m²로서 가장 밀도가 높았다. 2000년 4월, 6월 및 11월에도 평균 3,000개체/m² 이상의 밀도로서 높은 양상이었다. 분류군 가운데 다모류의 밀도가 특히 높아 전체 밀도의 약 95%를 점유하였는데, 1999년 6월의 1,678개체/m², 2000년 9월의 7,360개체/m²의 범위였다. 전반적으로 보아 2000년 4월과 6월, 그리고 11월에 3,000개체/m² 이상의 밀도를 나타내었다. 연체동물은 1999년 10월에 평균 18개체/m²가 출현하여 가장 낮은 밀도였으며, 2000년 9월에 평균 163개체/m²가 출현하여 높은 양상이었다. 특히 1999년 9월부터 2000년 8월까지 50개체/m² 미만의 낮은 밀도였다. 갑각류는 1999년 3월과 6월에는 100개체/m² 이상의 밀도였으나 이후 감소하여 7월

부터 2000년 11월 사이에는 46~92개체/m² 범위로서 낮은 밀도를 나타내었다. 극피동물은 1999년 7월에 26개체/m²가 출현하여 상대적으로 밀도가 높았으나, 그 밖의 기간 동안에는 20개체/m² 미만의 밀도였다.

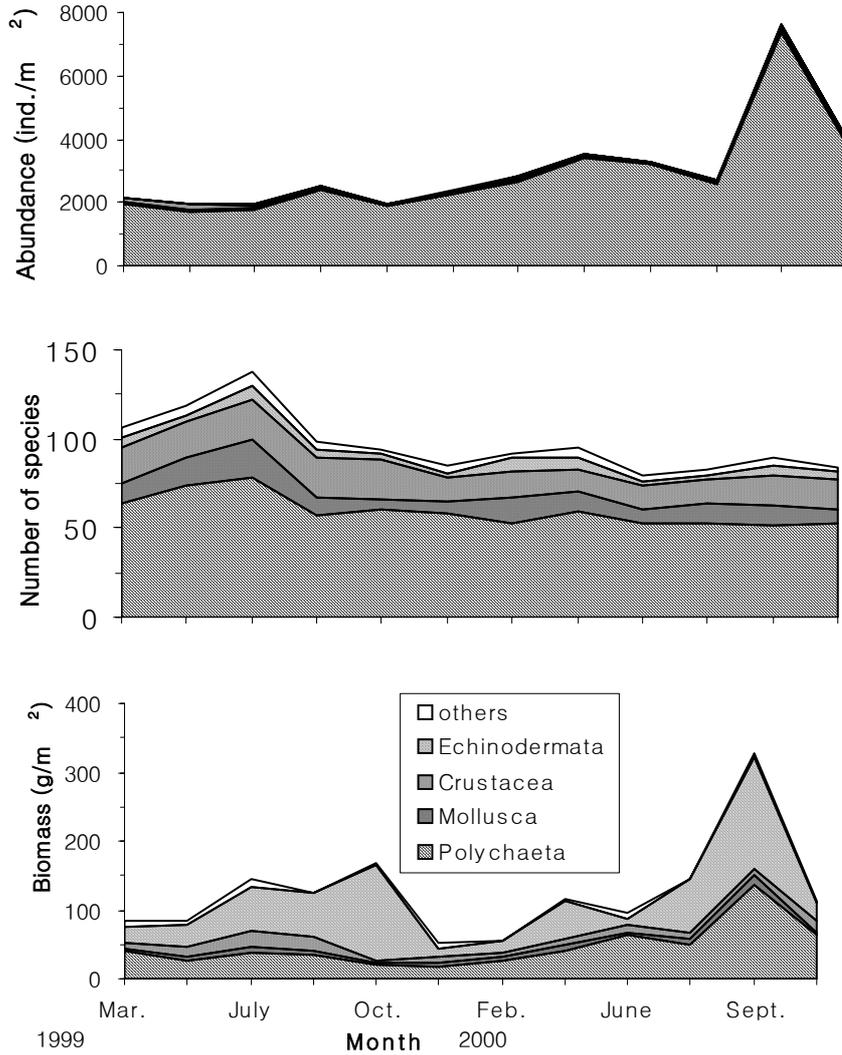
한편, 생체량은 조사개시월인 1999년 3월에 83.84g/m²로서 낮은 양상이었으나, 1999년 10월에는 167.40g/m²로 증가하였다(<그림 3-2> 참조). 그러나 같은 해 12월과 2000년 2월에는 약 50g/m²로 감소하였고, 이후 증가하는 양상을 보여 2000년 9월에는 326.85g/m²로 증가하여 최고 값을 나타내었다. 다모류는 1999년 12월에 18.70g/m²로서 가장 낮은 값을 보였으며, 2000년 9월에는 134.81g/m²로 가장 높은 값을 보임으로써 9월을 제외하고는 100g/m² 미만의 생체량을 나타내었다. 연체동물은 2000년 9월에는 15.50g/m²로서 가장 높은 값이었으며 11월에는 2.86g/m² 미만으로 가장 낮은 값이었다. 그 밖의 기간에는 10.0g/m² 미만의 낮은 생체량을 나타내었다. 갑각류는 1999년 7월에는 21.30g/m²로서 가장 높은 생체량을 나타내었으며 그 밖의 시기에는 20.0g/m² 미만의 생체량이었다. 특히 1999년 10월에서 이듬해 9월까지 사이에는 2000년 6월을 제외하고 약 10.0g/m² 미만의 생체량을 나타내었다. 한편 극피동물은 2000년 9월에 161.63g/m²로서 가장 높은 생체량을 보였으며, 2000년 6월에는 7.89g/m²로서 조사 기간 중 가장 낮은 값이었다. 또한 1999년 10월에 139.40g/m²이 출현한 것을 제외하고는 100.0g/m² 미만의 생체량을 나타내었다.

③ 각 정점별 저서동물의 시간적 변동

각 정점별 출현종 수의 변동을 보면 정점 1에서는 1999년 9월의 30종~2000년 4월의 48종 범위였으며 조사기간 동안 총 115종이 출현하였다(<그림 3-3> 참조). 1999년 12월부터 이듬해 4월까지의 40종 이상의 비교적 많은 종이 출현하였으나 그 밖의 기간에는 40종 미만의 종이 출현하였다. 다모류는 18~34종 범위였는데 여름철인 2000년 8월에 가장 적은 종 수를 보였으며 겨울철에는 다소 많은 종이 출현하였다. 연체동물은 1999년 3월과 10월에 1종이 출현하여 극히 적은 출현종 수였으며, 2000년 2월에는 10종이 출현하여 조사기간 중 가장 많은 종 수를 나타내었다. 그 밖의 기간에는 2~8종 범위의 종이 출현하였다. 갑각류는 전 조사기간 동안 4~8종 범위로서 10종 미만의 종이 출현하여 시기에 따른 큰 차이는 없었다. 극피동물은 정점에 따라 출현하지 않거나 1종만이 출현하였다.

<그림 3-2>

월별 저서생물의 출현종 수, 밀도, 생체량 변화
(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)



정점 2의 경우 조사기간 동안 총 105종이 출현하였다. 1999년 12월엔 28종이 출현하여 출현종 수가 가장 적었으며 1999년 6월에는 52종이 출현하여 가장 많았다(<그림 3-3> 참조). 또한 2000년 6월부터 11월까지 44~48종 범위의 출현을 보여 상대적으로 많은 종 수였다. 다모류는 1999년 12월에 17종이 출현하

여 가장 적었으나 전체적으로 24~35종 범위였다. 연체동물은 10종 미만의 출현종 수로서 낮은 양상이었다. 한편, 갑각류는 1999년 12월에 12종이 출현한 것을 제외하고는 2~9종 범위의 출현종 수였다. 극피동물과 기타 분류군은 조사기간에 따라 13종의 범위에서 출현하였다.

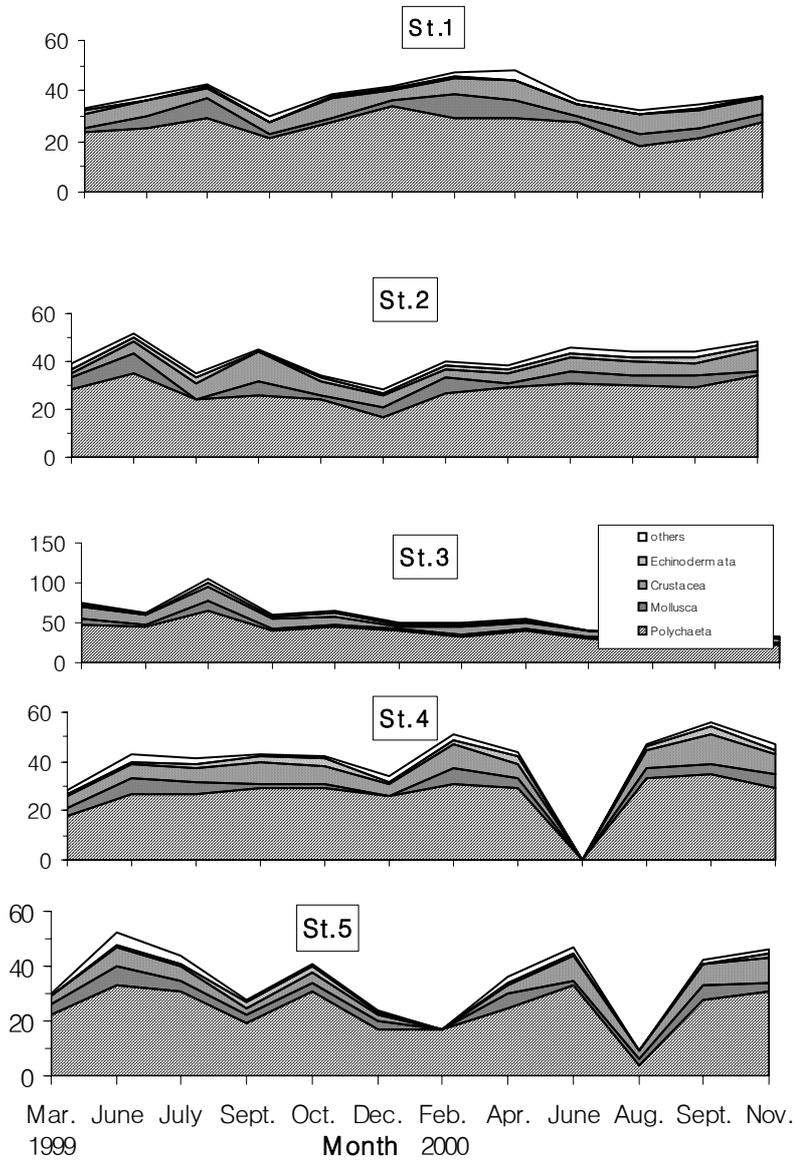
정점 3의 경우 조사기간 동안 총 189종이 출현하였다. 1999년 7월에 105종이 출현하여 전 조사기간 동안 전 정점 가운데 가장 많은 종이 출현하였다(<그림 3-3> 참조). 그러나 출현종 수가 지속적으로 감소하여 조사종료시인 2000년 11월에는 33종이 출현하였다. 이와 같은 출현종 수 감소는 다모류와 갑각류의 출현종 수 감소에 기인된다. 즉 다모류는 1999년 7월에 65종이 출현하였으나 점차 감소하여 2000년 9월과 11월에는 각각 22종씩 출현함으로써 크게 감소하였다. 연체동물도 1999년 7월에는 13종이었으나 그 후 출현종 수가 감소하여 2~5종 범위에서 출현하였다. 또한 갑각류는 1999년 3~10월 사이에는 10~16종 범위에서 출현하였으나 1999년 12월부터 이듬해 11월까지의 출현종수였다.

정점 4에서는 조사기간 동안 정점들 가운데 가장 많은 217종이 출현하였다. 1999년 3월에 28종이 출현하여 가장 적은 출현종 수를 나타내었으며, 2000년 9월에는 56종이 출현하여 상대적으로 출현종 수가 많았다(<그림 3-3> 참조). 정점 1과 2에 비해 출현종 수가 많았으나 정점 3보다는 적은 양상을 나타내었다. 다모류도 전 조사기간 동안 18~35종 범위의 출현이었으며 연체동물은 10종 미만의 출현종 수였다. 갑각류도 2000년 7월과 9월의 10종 및 12종을 제외하고는 5~9종 범위의 출현을 보였다. 또한 극피동물도 13종 범위에서 출현하였다.

가장 외해역에 위치한 정점 5의 경우 조사기간 동안 총 115종이 출현하였는데 정점 1과 유사하였다. 2000년 8월에는 9종만이 출현하였는데 이는 같은 시기에 30종 이상이 출현한 여타 정점들과 대비된다(<그림 3-3> 참조). 또한 2000년 2월에도 17종이 출현하였는데 같은 시기에 다른 정점들은 40종 이상이 출현하였다. 특히 2월의 경우 다모류만이 17종 출현하였을 뿐 다른 분류군들은 출현하지 않았다. 그러나 1999년 6월에는 52종이 출현하여 다른 정점들에서의 출현종 수와 유사하였다. 다모류는 2000년 8월에 4종이 출현하여 가장 적은 종수였으며, 1999년 6월과 2000년 6월에는 각각 33종이 출현하였다. 연체동물은 2~7종 범위였으며, 갑각류는 2~9종 범위에서 출현하였다.

<그림 3-3>

정점별 저서생물의 종조성 변화
(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)



한편 각 정점별 밀도의 변동을 보면, 정점 1의 경우 1999년 3월부터 10월까지 4,000개체/m² 미만의 밀도였으나, 그 이후 4,000개체/m² 이상의 밀도를 나

타내었다(<그림 3-3> 참조). 특히 2000년 9월에는 약 14,000개체/m²의 밀도로 출현하였다. 각 시기별 다모류가 출현한 밀도도 전반적인 저서동물의 출현밀도와 유사한 양상이었다. 특히 9월에는 다모류만 14,000개체/m²의 높은 밀도를 보여주었다. 그러나 연체동물과 갑각류는 100개체/m² 미만의 낮은 밀도였다.

정점 2에서는 1999년 12월에 432개체/m²로서 상대적으로 낮은 밀도였으며 2000년 2월부터 밀도가 증가하기 시작하여 2,000개체/m² 이상의 밀도를 나타내었다(<그림 3-4> 참조). 2000년 9월에는 4,049개체/m²가 출현하여 상대적으로 높은 밀도였다. 다모류는 겨울철인 1992년 12월과 2000년 2월에는 낮은 밀도였으나 그 후 증가하여 2,000개체/m² 이상의 밀도를 나타내었다. 연체동물은 1999년 6월에 386개체/m²로서 높은 밀도였으나 그 밖의 시기는 100개체/m² 미만의 밀도였다. 그러나 갑각류는 6월에 400개체/m² 이상의 밀도로서 비교적 높았으며 겨울철인 12월과 2월에도 높게 나타났다.

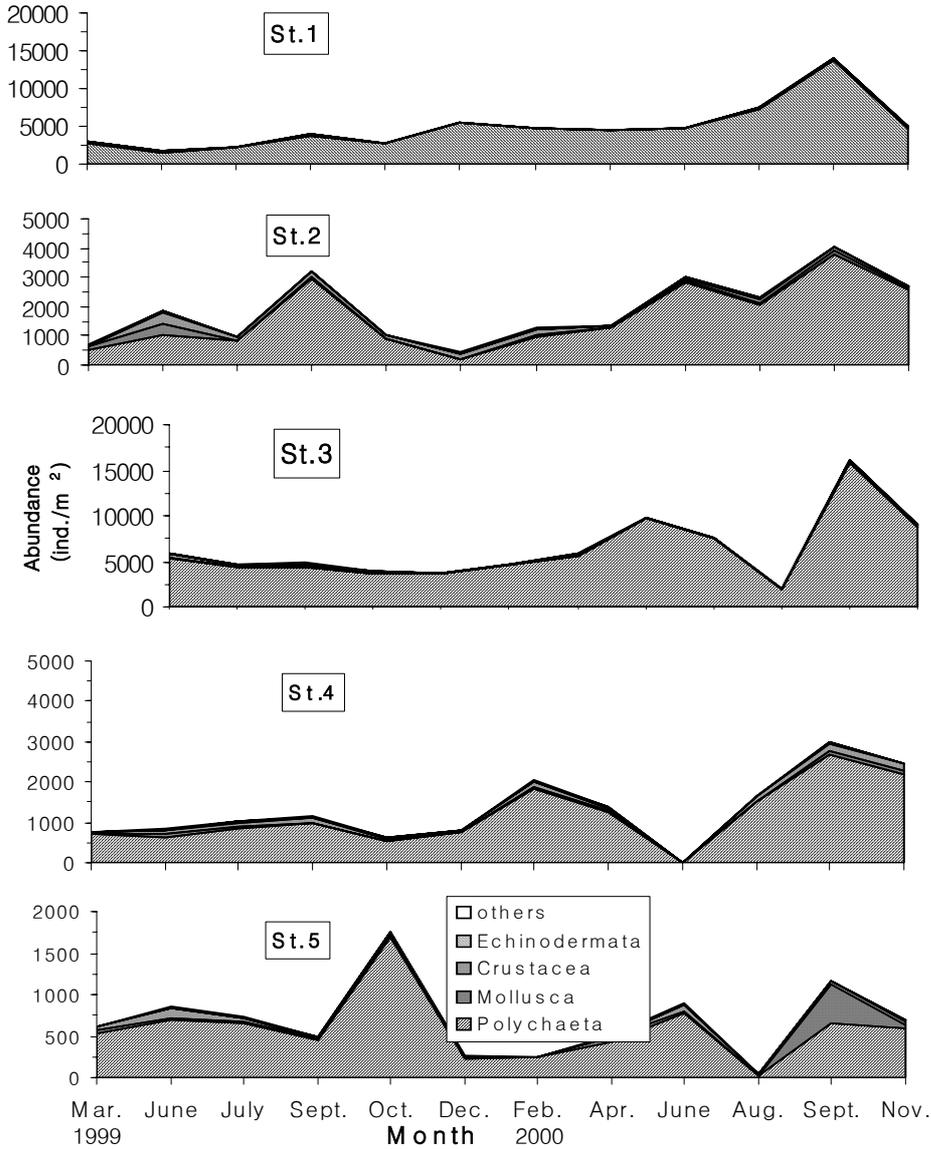
정점 3에서는 다른 정점에 비해 특히 밀도가 높은 것이 특징이었다. 2000년 8월을 제외하고는 전 조사 시기에 걸쳐 3,000개체/m² 이상의 밀도였으며 2000년 9월에는 약 16,000개체/m²가 출현하였다(<그림 3-4> 참조). 다모류의 밀도가 특히 높아 3,000개체/m² 이상의 밀도로 출현하였으며, 2000년 9월에는 15,866개체/m²가 출현하였다. 그러나 연체동물은 1999년 7월에 166개체/m²가 출현한 것을 제외하고는 100개체/m² 미만의 밀도였다. 갑각류도 조사 초기에는 밀도가 높았으나 1999년 9월 이후에는 100개체/m² 미만의 밀도였다. 극피동물은 전 조사기간에 걸쳐 100개체/m² 미만의 낮은 밀도였다.

정점 4에서는 1999년 10월의 617개체/m²~2000년 9월의 2,993개체/m² 범위로서 조사기간 동안 밀도가 증가하는 양상이었다(<그림 3-4> 참조). 다모류의 밀도도 1999년 12월까지의 1,000개체/m² 미만이었으나, 2000년 2월부터 1,000개체/m² 이상의 밀도를 나타내었다. 그러나 연체동물과 갑각류의 밀도는 조사시기에 따라 큰 변화가 없었다. 즉, 연체동물은 1999년 9월의 7개체/m²~2000년 11월의 79개체/m² 범위였으며, 갑각류는 1999년 12월의 26개체/m²~2000년 9월의 198개체/m² 범위였다.

정점 5에서는 다른 정점에 비해 밀도가 상대적으로 낮아 가을철인 1999년 10월과 2000년 9월을 제외하고는 1,000개체/m² 미만의 밀도였다(<그림 3-4> 참조). 겨울철에는 500개체/m² 미만의 밀도였으며, 특히 2000년 8월에는 40개체/m²만이 출현하여 극히 낮은 밀도였다.

<그림 3-4>

정점별 저서생물의 개체 수 변화
(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)



한편, 각 정점별 생체량의 변동을 보면 <그림 3-5>와 같다. 정점 1에서는 2000년 8월과 9월에 100g/m² 이상의 생체량이었으나 그 밖의 조사 시기에는 100g/m² 미만의 생체량을 보였다. 다모류 생체량은 2000년 9월을 제외하고는

모두 $100\text{g}/\text{m}^2$ 미만이었으며 연체동물은 1999년 7월의 $19.44\text{g}/\text{m}^2$ 을 제외하고는 $10\text{g}/\text{m}^2$ 미만의 낮은 값이었다. 한편 갑각류는 전반적으로 $10\text{g}/\text{m}^2$ 미만의 생체량을 보이고 있으며 1999년 6월에 $31.19\text{g}/\text{m}^2$ 로서 가장 높은 값을 나타냈다.

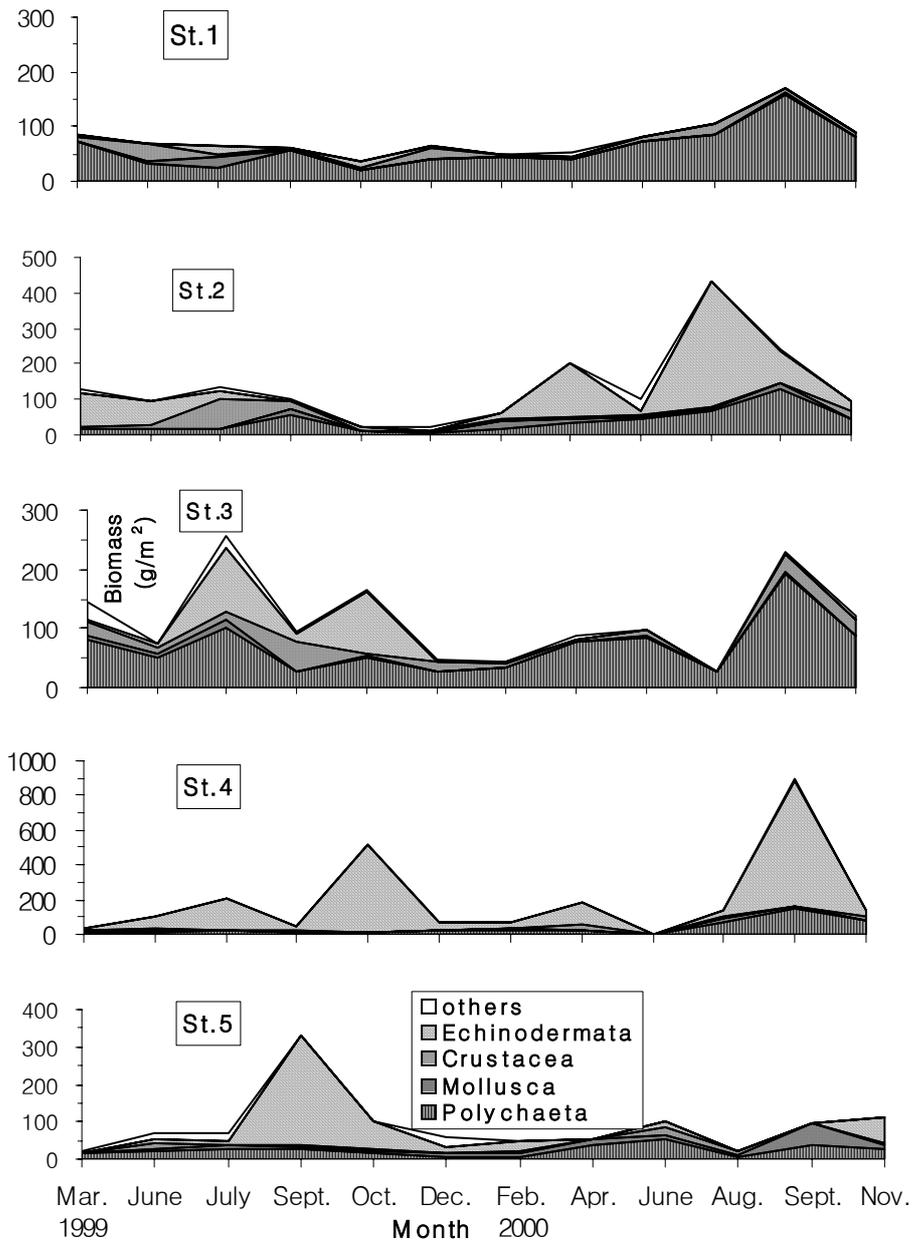
정점 2에서는 전 조사기간을 통해 정점 1보다 높은 생체량을 나타내었다. 특히 2000년 8월에는 $433.13\text{g}/\text{m}^2$ 이 출현하여 가장 높은 생체량을 보였는데 극피동물이 $356.60\text{g}/\text{m}^2$ 이었다(<그림 3-5> 참조). 또한 2000년 4월에는 $204.30\text{g}/\text{m}^2$ 이 출현하였는데 극피동물의 생체량이 높은 반면, 9월에는 $242.62\text{g}/\text{m}^2$ 가 출현하였으나 다모류의 생체량 비율이 높았다. 상대적으로 가장 낮은 생체량을 나타내는 시기는 1999년 10월과 12월로서 약 $20\text{g}/\text{m}^2$ 이 출현하였다. 이 때에는 각 분류군 모두 $10\text{g}/\text{m}^2$ 미만의 낮은 생체량을 보였다. 연체동물은 각 조사시기마다 $30\text{g}/\text{m}^2$ 미만의 생체량을 나타내었으며 갑각류도 1999년 7월에 $83.03\text{g}/\text{m}^2$ 이 출현한 것을 제외하고는 $30\text{g}/\text{m}^2$ 미만의 생체량이었다.

정점 3에서는 1999년 7월에 $255.19\text{g}/\text{m}^2$ 이 출현하여 상대적으로 높은 생체량이었는데 다모류와 극피동물이 $100\text{g}/\text{m}^2$ 이상씩 출현하였다(<그림 3-5> 참조). 그 후 1999년 12월부터 $100\text{g}/\text{m}^2$ 미만의 생체량을 나타내다가 2000년 8월에는 $27.06\text{g}/\text{m}^2$ 로서 가장 낮은 값을 나타내었다. 다모류는 2000년 8월에는 $25.54\text{g}/\text{m}^2$ 로서 가장 낮은 값이었으며 2000년 9월에 $193.58\text{g}/\text{m}^2$ 로서 가장 많은 생체량이었다. 연체동물은 7월을 제외하고는 $10\text{g}/\text{m}^2$ 미만의 생체량이었으며 1999년 12월부터 $1\text{g}/\text{m}^2$ 미만의 생체량이었다. 갑각류는 1999년 9월에 $50.33\text{g}/\text{m}^2$ 로서 조사기간 동안 상대적으로 높은 생체량이었으나 그 밖의 시기는 $40\text{g}/\text{m}^2$ 미만의 생체량을 나타내었다.

정점 4는 1999년 10월과 2000년 9월에 각각 $512.49\text{g}/\text{m}^2$ 및 $897.01\text{g}/\text{m}^2$ 가 출현하였는데 극피동물의 생체량 비율이 각각 80% 이상을 차지하였다(<그림 3-5> 참조). 또한 1999년 7월과 2000년 4월에도 극피동물의 비율이 70% 이상을 차지하였으며, 조사기간 동안 연체동물이나 갑각류 생체량 점유율은 낮았다.

정점 5에서 1999년 9월에 $329.57\text{g}/\text{m}^2$ 로서 가장 높은 생체량을 나타내었는데 극피동물의 생체량이 약 90%를 차지하였다(<그림 3-5> 참조). 1999년 3월에는 평균 $18.91\text{g}/\text{m}^2$ 로서 조사기간 중 가장 낮은 생체량이었으며, 2000년 8월에도 $20.89\text{g}/\text{m}^2$ 로서 비교적 낮은 생체량을 나타내었다.

<그림 3-5> 정점별 저서생물의 밀도 변화(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)



다모류는 2000년 6월에 52.07g/m²이 출현하여 높은 생체량을 나타내었으나 그 밖의 조사시기에는 3.33~37.65g/m²의 범위였다. 연체동물은 2000년 9월에

58.05g/m²로서 상대적으로 높았으나, 그 밖의 시기에는 2.64~15.21g/m²의 범위였다. 갑각류도 2000년 6월에 21.85g/m²로서 상대적으로 높은 생체량이었으나 조사기간 동안 0.4315.38g/m²의 범위였다.

④ 우점종의 출현과 분포

조사기간 동안 출현한 종 가운데 18종의 밀도가 전체 출현밀도의 90% 이상을 차지하였다(<표 3-2> 참조). 이 가운데 다모류가 16종으로 대부분을 차지하였으며, 갑각류 1종 및 이매패류 1종으로 구성되어 있었다.

<표 3-2> 주요 저서생물의 밀도(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)

Species name / Station	Abundance (ind./m ²)	occurring frequency	%	cum %
<i>Tharyx multifilis</i> (p)	1801±2488	54	57.60	57.60
<i>Lumbrineris longifolia</i> (p)	414±610	50	13.24	70.84
<i>Magelona japonica</i> (p)	120±94	58	3.84	74.68
<i>Chaetozone</i> sp. (p)	83±99	53	2.65	77.33
<i>Heteromastus filiformis</i> (p)	75±77	55	2.41	79.74
<i>Glycera chirori</i> (p)	44±31	58	1.40	81.14
<i>Mediomastus californiensis</i> (p)	34±38	53	1.09	82.23
<i>Sigambra tentaculata</i> (p)	34±31	53	1.08	83.31
<i>Eriopisella sechellensis</i> (c)	32±62	34	1.01	84.32
<i>Theora fragilis</i> (b)	30±61	46	0.95	85.27
<i>Glycinde gurjanovae</i> (p)	27±28	51	0.87	86.15
<i>Sternaspis scutata</i> (p)	25±27	43	0.81	86.95
<i>Melinna elisabethae</i> (p)	23±69	17	0.75	87.70
<i>Chaetozone spinosa</i> (p)	19±24	44	0.61	88.31
<i>Nephtys oligobranchia</i> (p)	18±21	52	0.59	88.90
<i>Paraprionspio pinnata</i> (p)	18±19	53	0.56	89.46
<i>Notomastus latericeous</i> (p)	16±20	45	0.52	89.99
<i>Tharyx</i> sp. A (p)	13±28	25	0.42	90.40

주 : p: polychaetes, b: bivalves, c: crustaceans
 자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

가장 우점한 종은 다모류인 *Tharyx multifilis*로서 평균 밀도는 1,801개체/m²였으며 전체 밀도의 57.6%를 점유하였다. 이 종은 정점 3에서 밀도가 가장 높아 3,926개체/m²였으며, 정점 1에서도 전 조사기간 동안 평균 3,642개체/m²의 밀도였다. 특히 2000년 9월에 정점 3에서는 11,722개체/m²가 출현하였으며, 정점 1에서도 11,075개체/m²가 출현하여 조사기간 중 가장 높은 밀도였다. 그러나 외해역으로 갈수록 밀도가 감소하여 정점 4와 5에서는 각각 338개체/m² 및 126개체/m²의 밀도였다.

두 번째 우점한 종은 다모류의 *Lumbrineris longifolia*로서 조사기간 동안 평균 밀도는 414개체/m²였으며 전체 밀도의 13.2%를 점유하였다. 이 종도 정점 3에서 평균 1,182개체/m²로서 다른 정점에 비해 밀도가 가장 높았으며, 정점 1에서도 703개체/m²로서 밀도가 높았다. 그러나 비교적 외해역에 위치한 정점 4와 5에서는 각각 33개체/m² 및 18개체/m²로서 상대적으로 낮은 밀도였다.

세 번째 우점종으로서 다모류의 *Magelona japonica*로서 조사기간 동안의 평균 밀도는 120개체/m²였으며, 전체 밀도의 3.8%를 점유하였다. 이 종은 정점 4에서 256개체/m²로서 다른 정점에 비해 상대적으로 높은 밀도였으며 정점 2에서도 117개체/m²로서 비교적 높은 양상이었다. 그러나 *T. multifilis* 및 *L. longifolia*의 밀도가 높았던 정점 1과 3에서는 각각 45개체/m² 및 73개체/m²로서 상대적으로 가장 낮은 밀도를 보였다.

또한 *Chaetozone* sp.는 네 번째 우점종으로서 전 조사기간 동안 평균 83개체/m²의 밀도였다. 전체 밀도에서 차지하는 비율은 2.6%였으며, 정점 2와 4에서 각각 135개체/m² 및 127개체/m²로서 높은 양상이었으며 정점 1과 3에서는 낮은 밀도였다. 또한 외해역에 위치한 정점 5에서는 23개체/m²로서 가장 낮은 밀도를 나타내었다. 한편, 다모류인 *Heteromastus filiformis*는 평균 75개체/m²의 밀도로서 전체 밀도의 2.4%를 차지하였다. 따라서 이들 5종의 밀도가 전체 밀도의 약 80%를 차지하였다. 이 종은 정점 4에서 181개체/m²로서 상대적으로 가장 높은 밀도를 나타내었으며 여타 정점들은 46~64개체/m²의 밀도로 낮은 양상이었다.

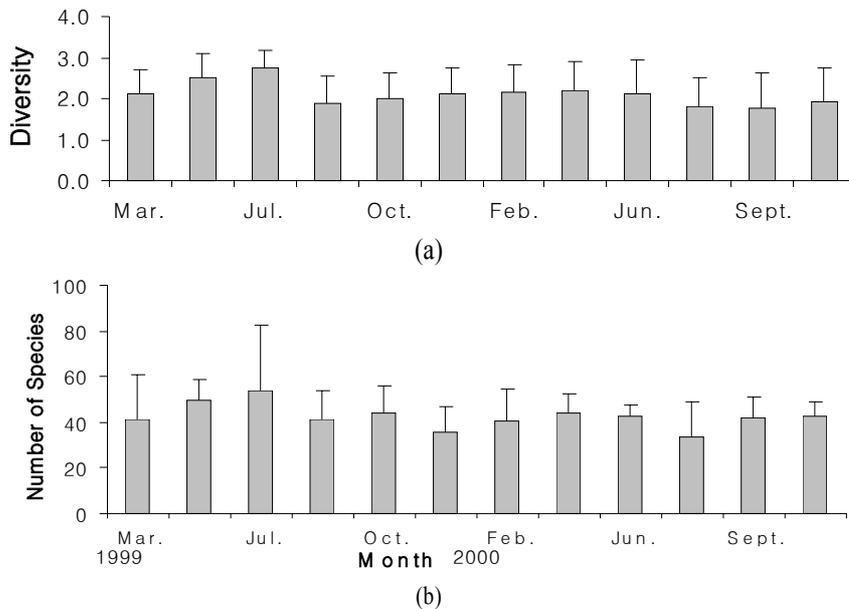
⑤ 군집구조

조사기간 동안 종 다양도는 2000년 9월의 1.77에서 1999년 7월의 2.75 범위였다. 전체적으로 보아 2000년 8월 이전에는 다양도가 2.0 이상으로서 상대적

으로 높았으나 8월부터 2.0 이하로 감소된 양상이었다(<그림 3-6> 참조).

정점 1의 경우 평균 1.29로서 1999년 7월에는 다른 조사시기에 비해 상대적으로 높은 반면 ($H'=2.06$), 전 조사기간에 걸쳐 2.0 미만의 낮은 다양도를 보이고 있다(<그림 3-6> 참조). 특히 2000년 8월과 9월에는 각각 0.74 및 0.77로서 낮은 값이었다.

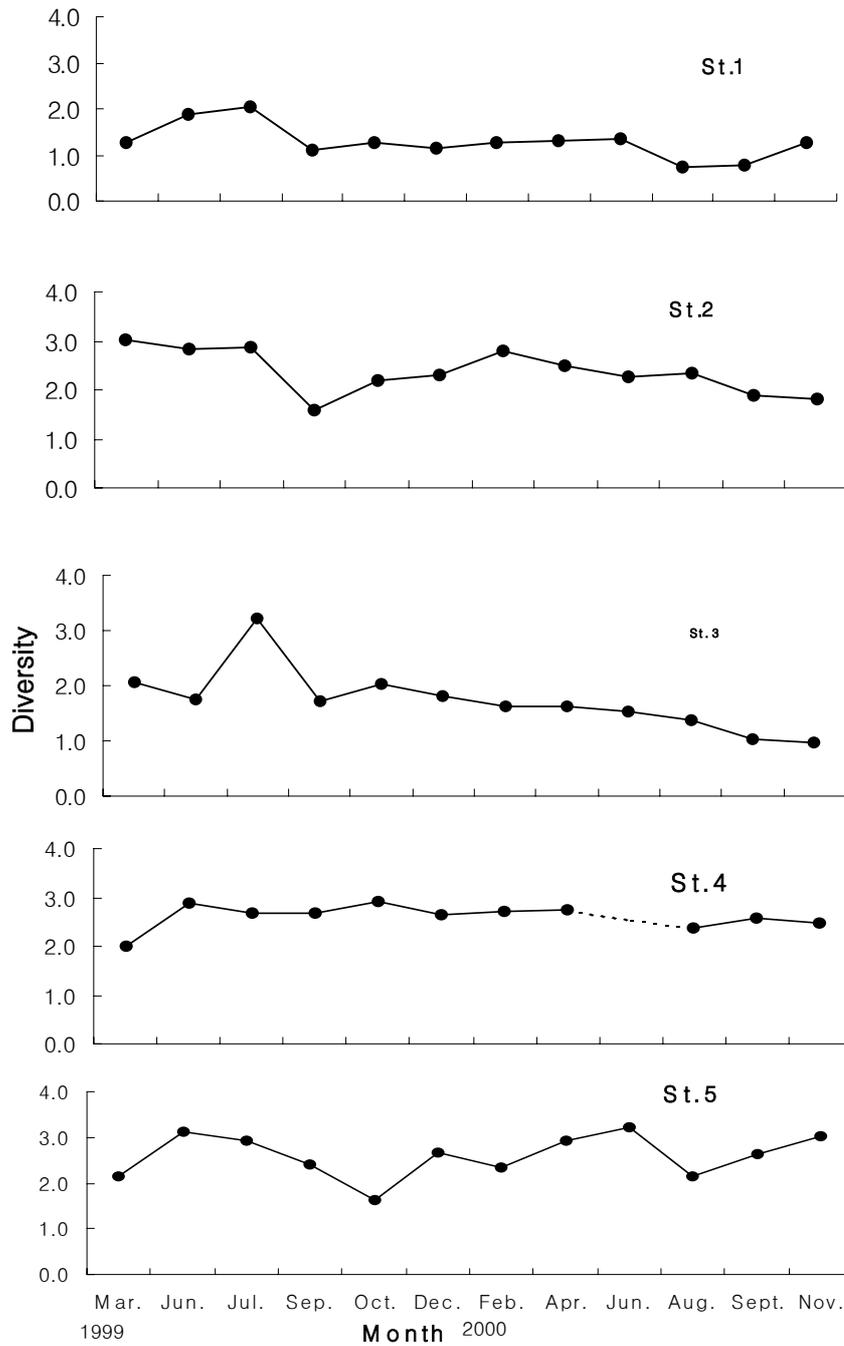
<그림 3-6> 월별 종 다양도(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)



정점 2에서는 평균 다양도가 2.36으로서 정점 1과 3보다는 높았으나 정점 4와 5보다는 낮았다. 1999년 3월에는 상대적으로 높은 다양도를 나타내었으며 ($H'=3.02$), 그 밖의 기간에도 대체로 2.0 이상의 다양도를 나타내었다. 그러나 2000년 9월과 11월에는 각각 1.89 및 1.82로서 상대적으로 낮은 값을 나타내었다(<그림 3-7> 참조).

정점 3에서는 평균 다양도가 1.73으로서 정점 1보다는 높았지만 다른 정점들보다는 낮은 값이었다. 1999년 7월에는 비교적 높은 다양도를 나타내었으나 ($H'=3.21$), 그 밖의 시기는 대체로 0.96-2.03 범위의 다양도를 나타내었다. 특히 1999년 10월에는 2.03을 나타낸 이후, 2000년 11월까지 지속적으로 감소하는 양상을 나타내었다(<그림 3-7> 참조).

<그림 3-7> 정점별 종 다양도 변화(Mijo Bay, Mar. 1999~Nov. 2000)



정점 4에서는 다양도가 2.60으로서 정점 5와 동일하였다. 1999년 3월에는 1.99를 나타낸 것을 제외하고는 전 조사기간 동안 2.37~2.90으로서 비교적 높은 값이면서 균일한 값을 나타내었다.

한편 정점 5는 다양도가 평균 2.60으로서 정점들 가운데 가장 높은 값이었다. 2000년 6월에는 3.23으로서 전 조사기간 중 가장 높은 값이었다. 가을철인 1999년 10월에는 1.62로서 낮은 다양도를 나타내었으나 그 밖의 기간에는 2.0 이상의 다양도를 나타내었다.

(2) 통영 사랑도 해역

대규모 적조 발생시 적조구제용으로 살포되는 황토가 해양 생태계에 미치는 영향을 평가하기 위하여 2000년도부터 다양한 분야의 연구들을 수행하여 오고 있다. 즉, 저서생태계에 미치는 영향에 대해서는 황토가 집중 살포되는 남해도 미조 해역의 저서 생물체의 군집구조를 조사하여 평가하였으며, 수산생물에 미치는 영향은 황토의 어패류에 대한 유해성 평가로, 해조류에 대해서는 황토에 노출된 김의 생리활성을 측정하여 평가하였다. 지금까지 얻어진 결과들은 적조구제용으로 살포되는 황토가 저서생태계를 비롯한 해양 생물체에 특별히 부정적인 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 그러나, 장기간의 황토살포는 해양 저서생태계에 긍정적 또는 부정적 영향을 초래할 수도 있기에, 저서생태계에 미치는 영향 평가를 지속적으로 수행할 필요성이 제기되고 있다. 이에 본 연구에서는 남해 미조 해역이 아닌 곳으로서 적조발생시 황토를 대량 살포하는 통영 사랑도 해역을 대상으로 하여 저서생물의 군집구조를 조사하고, 황토가 퇴적물에 미치는 영향을 조사하였다.

① 저서생물 종조성 및 밀도, 생체량

조사해역은 <그림 3-8>과 같이 통영 사랑도 해역으로, 매년 적조가 발생하여 황토를 집중적으로 살포하는 해역 4곳과 황토가 살포되지 않았던 반대편 연안에 대조구 1곳을 정하여 황토를 살포하기 전의 4, 7월과 적조발생 중에 황토를 집중 살포할 때의 9월, 그리고 적조가 소멸하고 나서의 10월 등 4회 조사하여 분석하였다.

채집기는 van Veen grab (표면적 0.1m²)을 사용하여 각 정점에서 3회씩 해저 퇴적물을 인양하였다. 인양된 퇴적물은 선상에서 1mm 망목의 표준체를 사용하

여 채질하여 펄을 제거한 다음 잔존물을 표본병에 담고 중성포르말린으로 10% 되게 고정하여 실험실로 운반하였다. 저서동물만을 분류군별로 선별하여 분류군별 습중량을 0.01g까지 측정하였으며, 종 수준까지 동정하였다. 각 조사 시기별 주요 우점종을 선별하였으며, 공간분포 양상을 파악하고자 하였다.

개체 수 및 생체량 자료는 단위 면적(m²)당 수치로 환산하여 나타내었으며, 군집의 구조파악을 위하여 종 다양도(Shannon and Wiener, 1963)를 구하고자 하였다. 각 정점 간의 유사도 파악을 위한 집괴분석은 chord distance를 이용하며, 가중평균결합법을 사용한다(Picolu, 1984). 다변량분석을 위한 통계분석은 MVSP 3.1을 이용한다. 이상의 각각의 방법으로 황토살포에 따른 저서생태계의 영향을 종합적으로 분석하고자 한다.

<그림 3-8> 조사 해역도(Sarangdo coastal areas in Tongyeong)



② 저서생물 군집 조사

적조발생시 황토를 대량 살포하는 통영 사량도 해역의 퇴적물을 4·7·9·10월 4회 채집하여 저서생물상을 분석하고자 하였다. 그 중 먼저 분석이 완료된 4월 및 7월 중의 퇴적물에서는 다모류가 주종을 이루었으며, 전년도에 황토를 집중 살포한 정점 1, 4에서는 대조구의 정점보다도 다모류의 종류가 다양하게 분포하고 있었다(<표 3-3>, <표 3-4> 참조). 한편, 9·10월 채집된 퇴적물은

현재 분석 중에 있으며, 전체 저서생태계의 군집구조 등의 분석자료는 다음 보고서에 반영할 예정이다.

<표 3-3> 4월 중 사랑도 해역 퇴적물의 다모류 분포량

Station	대표종	전체 출현종 수	밀도(ind/m ²)
1	<i>Chaetozone spinosa</i> <i>Lumbrineris longiforia</i> <i>Timarete antarctica</i> <i>Acrocirrus validus</i>	16	1,686
2	<i>Chaetozone spinosa</i> <i>Timarete antarctica</i> <i>Lumbrineris longiforia</i>	16	882
3	<i>Chaetozone spinosa</i> <i>Lumbrineris longiforia</i> <i>Timarete antarctica</i>	15	477
4	<i>Polyoptalmus pictus</i> <i>Travisia pupa</i>	7	51
5	<i>Chaetozone spinosa</i>	5	170

자료 : 국립수산과학원, 『사업보고서』, 2002.

<표 3-4> 7월 중 사랑도 해역 퇴적물의 다모류 분포량

Station	대표종	전체 출현종 수	밀도(ind/m ²)
1	<i>Chaetozone spinosa</i> <i>Lumbrineris longiforia</i> <i>Timarete antarctica</i> <i>Acrocirrus validus</i>	17	1,470
2	<i>Chaetozone spinosa</i> <i>Timarete antarctica</i> <i>Lumbrineris longiforia</i>	16	813
3	<i>Chaetozone spinosa</i> <i>Lumbrineris longiforia</i> <i>Timarete antarctica</i> <i>Natomastus latericens</i>	14	760
4	<i>Polyoptalmus pictus</i> <i>Chaetozone spinosa</i>	13	78
5	<i>Chaetozone spinosa</i> <i>Timarete antarctica</i>	11	87

자료 : 국립수산과학원, 『사업보고서』, 2002.

③ 해양세균조사

해양생태계에 서식하는 미생물은 유기물의 분해 및 재합성 기능을 수행하여 물질순환에 기여하며, 용존된 유기물을 생체 내에 흡수하여 영양단계가 더 높은 생물에게 에너지를 공급하는 중요한 생산자의 역할을 한다(Reinheimer, 1991). 황산염환원세균은 황화수소를 생산하여 직접적으로 저층의 어패류에 독성물질이 될 뿐 아니라 용존산소의 소모, 환원상태의 촉진, 청조(靑潮)의 발생원인 등으로 수계환경에 악영향을 미친다. 한편 종속영양세균과 황산염환원세균을 조사하는 것은, 해양자생 및 육지로부터 유입되는 유기물의 변동과 밀접한 관계가 있으므로 유기물오염에 의한 환경상태를 파악하는 데 좋은 지표가 되기 때문이다. 황토살포가 해양미생물에 미치는 영향을 알아보기 위하여 사랑도와 미조해역 퇴적물 표층의 종속영양세균과 황산염환원세균 수를 조사하였다.

종속영양세균은 개량형 Zobell 2216E 배지(門田과 多賀, 1985)에서 평판배양법(Buck and Cleverdon, 1960)으로 20℃에서 2주간 배양하여 출현한 균락을 colony forming units(CFU)로 계수하였다. 황산염환원세균은 lactate를 기질로 하는 배지(畑, 1990)로 MPN법으로 배양 계수하였다. 환원제(0.01% sodium molybdate)를 첨가한 희석수(3% NaCl)로 퇴적물을 단계별 희석하여 5portion법으로 시료를 접종한 후 멸균 액체파라핀으로 배지의 상등부를 채운 다음 마개를 하여 27℃, 암소에서 2주간 배양 한 후 검은 색을 보이는 시험관을 양성으로 판정하여 MPN법으로 산정하였다.

유해적조 발생기간 동안 황토살포가 다량 이루어지는 사랑도와 미조 주변해역에서 종속영양세균과 황산염환원세균을 조사한 결과를 <표 3-5>와 <표 3-6>에 나타내었다.

종속영양세균은 4월에 사랑도해역에서 황토의 입자가 약간 남아 있는 정점 2에서 4.5×10^6 cells/dry g으로 황토를 살포하지 않은 대조구인 정점 5의 2.6×10^6 cells/dry g와 비슷한 분포를 보여 주었고, 미조해역도 황토입자가 남아 있는 정점 2와 황토를 살포하지 않은 대조구인 정점 5와 큰 차이가 없었다. 5월에는 사랑도해역의 퇴적물표층은 $2.4 \times 10^6 \sim 1.6 \times 10^7$ cells/dry g의 범위로 황토입자가 약간 남아 있는 정점 2와 3은 4.9×10^6 cells/dry g, 6.2×10^6 cells/dry g으로 대조구인 정점 5와 큰 차이가 없었다. 미조해역은 $2.1 \times 10^6 \sim 8.5 \times 10^6$ cells/dry g의 범위로 정점 간 차이가 없었으며 황토입자가 남아 있는 정점 2는 6.6×10^6 cells/dry

g으로 대조구 정점 5와 유사한 분포였다. 황토살포가 진행 중인 8월에는 사랑도해역의 퇴적물표층은 $1.6 \times 10^6 \sim 7.5 \times 10^6$ cells/dry g의 범위로 황토살포해역과 대조구 간에 큰 차이가 없었으며, 미조해역의 퇴적물표층도 $5.3 \times 10^6 \sim 4.2 \times 10^7$ cells/dry g의 범위로 황토살포해역과 대조구 간에 큰 차이가 없었다. 황토살포가 끝난 후 약 1개월이 경과한 10월에는 사랑도해역의 퇴적물표층은 $9.1 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6$ cells/dry g의 범위로 황토살포해역과 대조구 간에 큰 차이가 없었으며, 미조해역의 퇴적물표층도 $2.9 \times 10^6 \sim 5.2 \times 10^6$ cells/dry g의 범위로 황토살포해역과 대조구 간에 큰 차이가 없었다.

<표 3-5>

사랑도와 미조해역에서의 증속영양세균 수의 분포

단위 : cells/dry g

정점	4월	5월	8월	10월	
사랑	1	-	1.6×10^7	7.5×10^6	1.7×10^6
	2	4.5×10^6	4.9×10^6	3.3×10^6	1.1×10^6
	3	-	6.2×10^6	1.6×10^6	9.1×10^5
	4	-	2.4×10^6	2.6×10^6	1.8×10^6
	5	2.6×10^6	2.6×10^6	4.0×10^6	1.3×10^6
미조	1	-	2.1×10^6	1.3×10^7	5.2×10^6
	2	1.35×10^7	6.6×10^6	5.3×10^6	2.9×10^6
	3	-	8.5×10^6	4.2×10^7	5.0×10^6
	4	-	2.4×10^6	1.6×10^7	4.8×10^6
	5	3.0×10^7	5.5×10^6	3.9×10^7	3.5×10^6

자료 : 국립수산과학원, 『사업보고서』, 2003.

황산염환원세균은 4월에 사랑도의 정점 2에서 1.3×10^5 cells/dry g으로 대조구인 정점 5의 1.3×10^5 cells/dry g와 비슷한 분포를 보여 주었고, 미조해역도 정점 2가 1.3×10^5 cells/dry g으로 대조구인 정점 5의 9.6×10^4 cells/dry g와 큰 차이가 없었다. 5월에는 사랑도해역의 퇴적물표층은 $2.3 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^5$ cells/dry g의 범위로 황토입자가 남아 있는 정점 2와 3은 1.1×10^5 cells/dry g, 2.3×10^4 cells/dry g으로 대조구인 정점 5에 비하여 큰 차이가 없었다. 미조해역은 $1.7 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^5$ cells/dry g의 범위로 육상의 영향을 많이 받는 정점 1이 높았으나, 황토살포해역과 대조구 간에는 큰 차이가 없었다. 8월에는 사랑도해역의 퇴적물표층은 $5.0 \times 10^5 \sim$

2.5×10⁶cells/dry g의 범위였으며, 황토살포해역과 대조구인 정점 5와는 큰 차이가 없었다. 미조해역도 1.2×10⁶~6.2×10⁶cells/dry g의 범위로 황토살포해역과 대조구 간에는 큰 차이가 없었다. 황토살포가 끝난 후 약 1개월이 경과한 10월에는 사랑도 해역의 퇴적물표층은 2.6×10⁴~6.4×10⁵cells/dry g의 범위였으며, 황토살포해역과 대조구인 정점 5와는 큰 차이가 없었다. 미조해역도 3.7×10⁵~3.7×10⁶cells/dry g의 범위로 황토살포해역과 대조구 간에는 큰 차이가 없었으며 육상의 영향을 많이 받는 정점 1이 높았다.

유해적조 고밀도 발생해역으로 다량의 황토가 살포된 통영 사랑도와 남해 미조해역에서 황토살포가 해양중속영양세균과 황산염환원세균의 개체 수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 황토를 살포한 해역의 퇴적물과 살포하지 않은 대조해역의 퇴적물을 조사한 결과 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

<표 3-6> 사랑도와 미조해역에서의 황산염환원세균 수의 분포

단위 : cells/dry g

정점	4월	5월	8월	10월
사랑	1		2.7×10 ⁴	2.4×10 ⁶
	2	1.3×10 ⁵	1.1×10 ⁵	5.0×10 ⁵
	3		2.3×10 ⁴	2.5×10 ⁶
	4		4.1×10 ⁴	1.8×10 ⁶
	5	1.3×10 ⁵	1.1×10 ⁵	2.4×10 ⁶
미조	1		1.3×10 ⁵	6.2×10 ⁶
	2	1.3×10 ⁵	1.7×10 ⁴	1.2×10 ⁶
	3		3.8×10 ⁴	5.0×10 ⁶
	4		4.2×10 ⁴	6.2×10 ⁶
	5	9.6×10 ⁴	4.1×10 ⁴	4.3×10 ⁶

자료 : 국립수산과학원, 『사업보고서』, 2003.

2) 양식생물에 대한 영향

(1) 피조개와 굴 및 전복에 미치는 영향

① 어미피조개 · 피조개 치패 · 어미굴에 미치는 영향

Cochlodinium polykrikoides 발생시 황토살포는 적조생물을 흡착 침강시켜 제

거시적인 효과가 있는 것으로 알려져 있고(石原 등, 1982; 代田, 1987). 또한 황토객토는 어미피조개의 성장에 효과가 있는 것으로 알려져 있다(최 등 1998, 전 등 1995). 따라서 황토살포가 어미피조개, 피조개 치패, 어미굴에 미치는 영향을 조사한 생존율은 <그림 3-9>에 나타내었다.

<그림 3-9> 황토살포가 피조개, 굴의 성장에 미치는 영향

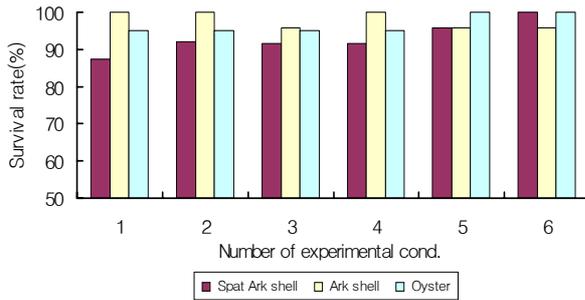


Fig.1. The survival rate(%) of bivalves at the different experimental conditions for 45 days.
 1. Experiment condition 2. Loess (40g/l)
 3. *Chochlodinium* (3000cells/ml)
 4. Loess(20g/l) + *Chochlodinium* (3000cells/ml)
 5. Loess(40g/l) + *Chochlodinium* (3000cells/ml)
 6. Loess(60g/l) + *Chochlodinium* (3000cells/ml)

생존율은 어미피조개, 어미굴은 전 실험기간 동안 모든 시험구에서 95%이상으로 나타났고, 피조개 치패의 경우는 황토살포구가 92.1%로서 대조구(황토 미살포구)의 88%에 비하여 높았다. 김 등(1999)의 어미굴과 진주담치에 대한 *Cochlodinium polykrikoides* 독성실험의 결과와도 유사한 결과를 보였다. 어미피조개의 건강도를 측정하기 위하여 적혈구 속에 포함되어 있는 철을 함유하는 색소와 단백질의 화합물로서 동물의 호흡시 산소의 운반자 역할을 하는 피조개 헤모글로빈 농도의 변화는 <그림 3-10>에 나타내었다.

어미피조개를 10일 간격으로 총 4회 조사한 결과 1차(실험전 피조개 어미) 농도는 37.57g/100ml로 나타났고, 2차, 3차시에는 전시험구의 농도값이 1차보다 낮았으나 경과일수가 지날수록 헤모글로빈 농도가 증가하였으며, 최종 4차 측정시에는 1차 측정치보다 높은 값을 보였고, 실험구별 농도 변화는 황토살포구

가 52.066.9g/100ml로 적조생물구 45.8g/100ml, 대조구 55.70/ml보다 다소 높았다. 황토 미살포구보다 다소 높은 값을 나타내어, 최 등(1998)의 연구결과인 황토미 객토구 32.91g/100ml, 황토객토구 41.91g/ml과 유사한 경향을 보였으나 객토구가 상대적으로 활력이 양호한 상태였다. 본 실험의 결과가 다소 높은 값을 보인 것은 사육조건 중의 먹이공급, 황토객토량 등에 기인한 것으로 생각된다.

<그림 3-10> 황토살포에 따른 피조개 헤모글로빈 변화

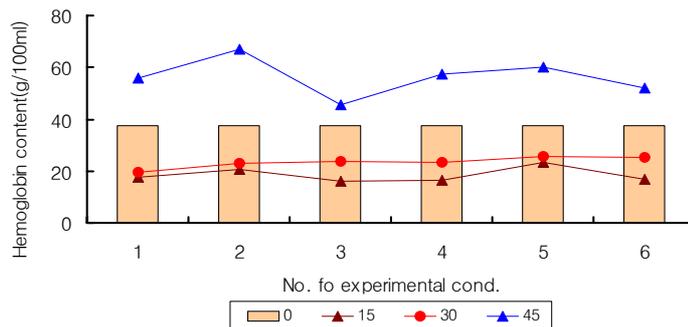


Fig. 2. Variation of hemoglobin content in the Ark shell, *S. broughtonii* at the different experimental conditions for 45 days.

어미피조개의 혈장단백질 변화의 결과는 <그림 3-11>에 나타내었다. 대조구는 15.0g/dL로 나타내었나 황토살포구가 16.217.0g/dL로 다소 높았고, 활력도 황토살포구가 양호한 상태였다. 어미피조개 체성분 분석의 결과는 <표 3-7>과 같다. 대조구와 성분별로 비슷한 값을 보였으나, 황토 40g/L구의 조지방 값이 높았고, 황토 60g/L+ 적조생물구에서 조단백질의 값이 다소 높았으나 시험구 간 큰 차이를 보이지 않았다($P>0.05$). 어미굴 체성분분석 결과는 <표 3-8>에 나타낸 바와 같이 황토(40g/L)투입구의 조지방의 값이 다소 높았으나 시험구 간 큰 차이는 없었다($P>0.05$).

<그림 3-11>

황토살포에 따른 피조개 혈장 단백질 변화

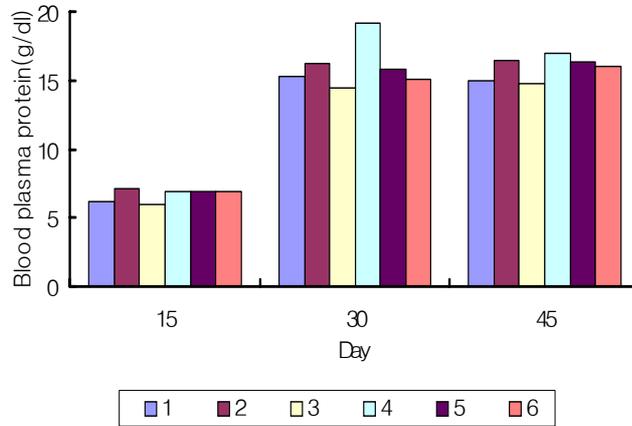


Fig.3. Variation of blood plasma protin content in the Ark shell, *S. broughtonii* at the different experimetal conditions for 45 days.

- 1. Experment condition
- 2. Loess (40g/l)
- 3. *Chochlodinium* (2000cells/ml)
- 4. Loess(20g/l) + *Chochlodinium* (3000cells/ml)
- 5. Loess(40g/l) + *Chochlodinium* (3000cells/ml)
- 6. Loess(60g/l) + *Chochlodinium* (3000cells/ml)

<표 3-7>

황토살포에 따른 어미피조개 체성분분석

	Moisture	Protein	Fat	Ash
Initial	80.80a	13.85a	0.72a	2.14a
Final				
1	81.91a	12.49a	0.47a	2.22a
2	81.03a	12.59a	0.96a	2.77a
3	80.82a	13.08a	0.74a	3.02a
4	79.58a	12.90a	0.70a	2.44a
5	80.62a	13.70a	0.50a	2.46a
6	80.81a	14.45a	0.71a	2.41a

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

<표 3-8>

황토살포에 따른 굴의 체성분분석

Ex. conditions	Moisture	Protein	Fat	Ash
Initial	81.05a	9.82a	1.48a	2.10a
Final				
1	82.07a	9.84a	1.40a	2.14a
2	81.68a	9.07a	1.72a	2.43a
3	80.31a	9.03a	1.44a	2.09a
4	79.56a	10.96a	1.71a	2.52a
5	80.54a	9.78a	1.43a	3.25a
6	83.06a	8.90a	1.20a	3.03a

주 : 1) Values (mean±s.d of three replications) in the same column not sharing a common superscript are significantly ($P<0.05$)

1. Control condition 2. Clay (40g/L) 3. Cochlodinium polykrikoides(3,000cells/mL)
4. Clay (20g/L)+Cochlodinium polykrikoides(3,000cells/mL)
5. Clay (40g/L)+Cochlodinium polykrikoides(3,000cells/mL)
6. Clay (60g/L)+Cochlodinium polykrikoides(3,000cells/mL)

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

어미굴, 어미피조개의 글리코젠(<그림 3-12> 참조) 변화는 적조생물구보다 황토가 투입된 모든 시험구에서 다소 높은 값을 나타내었으나, 시험구 간 큰 차이는 없었다. 위의 결과로 볼 때 적조생물 발생시 어미피조개, 어미굴, 피조개 치패를 대상으로는 황토를 살포하여 줌으로써 적조생물을 구제함과 동시에 서식환경의 개선으로 인한 활력 증가 효과가 있을 것으로 판단된다.

② 황토살포가 전복 치패에 미치는 영향

전복 치패의 생존율은 100%를 나타내어 적조생물 3,000cells/ml 농도와 황토살포 농도 60g/ml 이하에서는 전복 치패의 생존에 직접적인 영향을 주지 않는 것으로 추정되며, 장내용물의 관찰 결과도 적조생물 시험구를 제외한 전 시험구에서 전복 치패의 장에서 황토살포 후 즉시 섭취가 관찰되었으나, 회복시험 48시간 후 장내용물 관찰시 황토가 전량 배설되었음이 관찰되었다. 위의 결과로 볼 때 황토를 전복 치패가 섭취하여도 황토 그 자체가 전복의 생리에 영향을 주지는 않는 것으로 생각된다. 아가미 미세구조의 관찰 결과는 <그림 3-13> ~ <그림 3-16>에 나타내었다.

<그림 3-12>

황토살포에 따른 굴과 피조개의 글리코겐 변화

A.

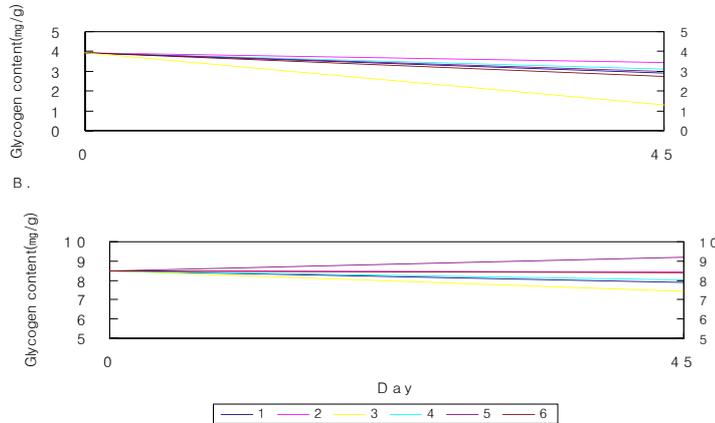


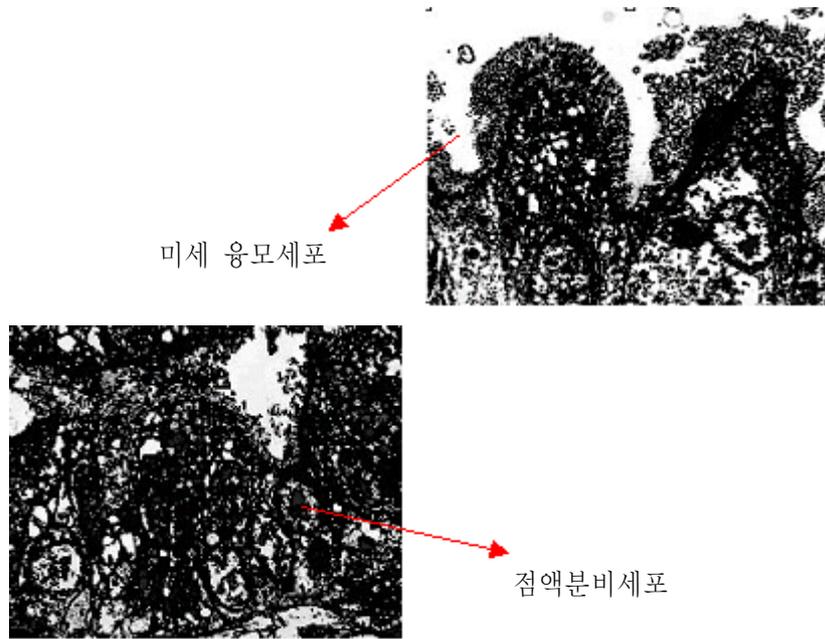
Fig. 4. Variation of glycogen content in the edible meat of Ark shell (A) and Oyster (B) at the different experiment conditions for 45 days.
 1. Experiment condition 2. Loess (40g/l)
 3. *Chochlo dinium* (2000 cells/ml)
 4. Loess (20g/l) + *Chochlo dinium* (3000 cells/ml)
 5. Loess (40g/l) + *Chochlo dinium* (3000 cells/ml)
 6. Loess (60g/l) + *Chochlo dinium* (3000 cells/ml)

자연황토 및 분말황토(0.5g/L, 1g/L, 3g/L, 5g/L, 10g/L), 적조생물 *C. polykrikoides* 1,000cells/L 시험구는 대조구의 아가미와 차이가 없었으며, 적조생물 *C. polykrikoides* 5,000cells, 10,000cells, 5,000cells+자연황토 10g/L, 적조생물 5,000cells/L+분말황토 10g/L, 적조생물 10,000cells/L+자연황토 10g/L, 10,000cells/L 분말황토 10g/L 시험구는 대조구에 비해 아가미의 미세용모의 일부 탈락과 점액분비 세포의 감소가 관찰되었다.

전복 치패의 아가미회복실험은 시험 10일 후 적조 5,000cells/L, 10,000cells/L, 5,000cells/L+자연황토 10g/L, 적조생물 5,000cells/L+분말황토 10g/L, 적조생물 10,000cells/L+자연황토 10g/L, 10,000cells/L+분말황토 10g/L 시험구의 전복 치패 아가미 미세용모의 완전회복이 이루어져 정상 아가미 구조와 차이가 없었다. 위의 결과로 볼 때 적조생물 *C. polykrikoides* 5,000cells/ml 농도 이상에서는 아가미가 부분적으로 미미한 영향을 받는 것으로 생각되며, 사육환경조건의 개선 시, 10일 후에는 정상적인 전복 치패의 아가미 구조와 차이가 없이 회복되는 것으로 나타나, 적조발생시 황토를 직접적으로 전복 치패에 살포하여도 생존에는 별다른 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

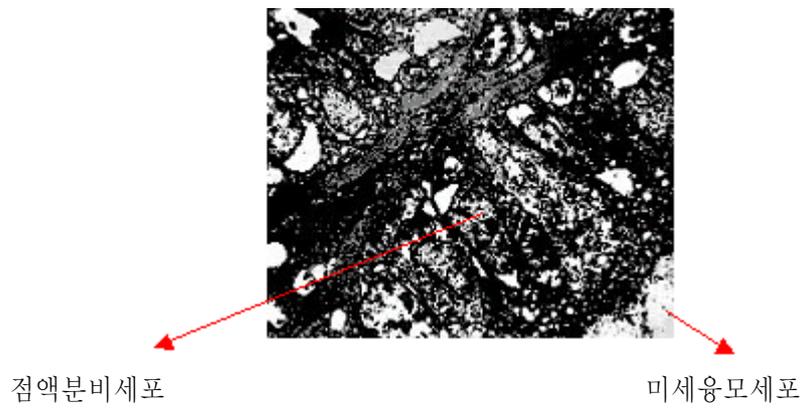
<그림 3-13>

전복의 아가미 구조(자연황토 10g/L)

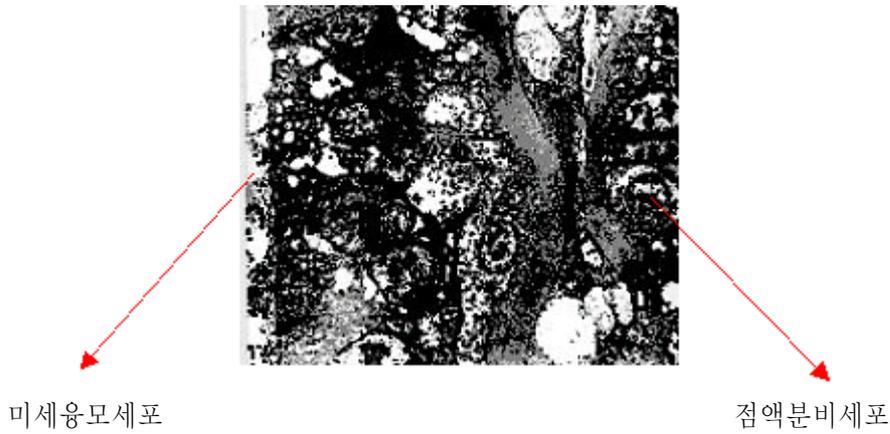


<그림 3-14>

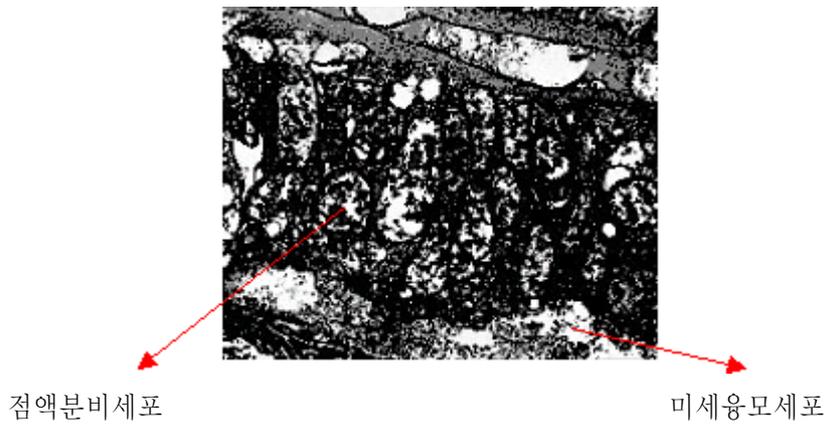
전복의 아가미 구조(대조구)



<그림 3-15> 전복의 아가미 구조(적조 10,000cells/mL+자연황토 10g/L)



<그림 3-16> 전복의 아가미 구조(적조 10,000cells/mL)



(2) 양식어류의 영향 연구

공시생물은 넙치(전장 2,530cm), 쥐치(전장 17cm 내외), 참돔(전장 2,530cm)을 선정하였으며, 황토살포농도는 분말황토 1050g/L, *C. polykrikoides* 3.000cells/mL+분말황토 10g의 농도구간 및 자연황토 1050g/L, *C. polykrikoides* 3.000cells/mL+자연황토 10g의 농도구간으로 조절하여, 황토가 계속 혼합이 되어 일정 황토농

도가 유지되도록 하면서 실험을 행하였다.

① 양식어류의 유해성

<표 3-9>에서 참돔과 쥐치의 경우 폐사를 일으키는 분말황토살포 농도는 10g/L 정도로 나타났다. 이에 반하여 <표 3-10>의 자연황토에 있어서는 10g/L의 권장살포 농도에서 폐사가 전혀 일어나지 않았다. 이는 분말황토가 자연황토에 비하여 어류의 폐사 확률이 높다는 것을 나타낸다.

적조생물에 참돔, 쥐치를 투입하고 분말황토를 살포하였을 경우 <표 3-8>에서 어류 생존율이 분말황토(10g/L) 단독 투입시험구보다 높았으며, 이는 적조생물과 분말황토가 결합하여 황토자체의 어류 아가미에 대한 흡착력이 떨어져 어류의 호흡장애 영향을 감소시킨 결과로 사료된다. 이상 시험 어류 중 황토살포에 대한 민감도는 참돔> 쥐치> 넙치 순으로 나타났으며, 활동성인 어류(참돔, 쥐치)가 저착성 어류(넙치)등에 비하여 황토살포에 민감함을 알 수가 있다.

그리고 적조방제시의 적조구제효율은 분말황토가 약 10% 내외로 높으나 어류생존에 미치는 영향으로 보아 적조방제에 분말황토를 사용하는 것은 주의할 필요가 있다는 것을 알 수 있었으며, 적조구제 효율조사에서 10g/L까지는 구제효율이 직선으로 증가하다가 그 이상 농도에서는 구제효율이 그다지 상승하지 않는 연구결과를 통해 적조구제효율은 10g/L 정도가 가장 효과적이라고 할 수 있다.

② 어류 혈액 성분에 미치는 영향

황토살포 시험구에 노출된 어류의 혈액 성분을 대조구와 비교 조사하였으며, 측정방법은 혈액분석기(Sthprofile 5, Nova Co.) 및 화학분석법으로 pH, PO₂, 헤모글로빈(hemoglobin), 헤마토크릿(hematocrit)¹⁾, 전해질이온(Na⁺, K⁺, Cl⁻, Ca⁺), 코르티솔(Cortisol)²⁾에 대하여 분석하였다. 먼저 자연황토를 살포한 시험구에 대한 pH 분석결과 참돔, 쥐치, 넙치의 대조구가 pH가 7.0~7.07을 보였고, 전 시험구간에서 대조구와 별다른 차이를 보이지 않고 있다. 그리고, PO₂는 각 어종의 대조구와 비교하여 별다른 차이를 보이지 않았다.

그러나 분말황토를 살포한 경우 <표 3-11>과 같이 헤모글로빈, 헤마토크릿의

1) 혈액중에 적혈구가 차지하는 비율을 나타내는 값.

2) 호르몬의 일종으로서 스트레스를 평가하는 인자.

수치도 대조구에 비해 떨어짐을 알 수가 있다. <표 3-9>의 어류 폐사율을 보면 분말황토의 각종 수치가 자연황토에 비해 더 높을 것으로 사료된다.

<표 3-9> 분말황토 살포농도에 따른 어류치사

구 분	황토살포농도	치사율(%) 24h	치사율(%) 48h	첫 치사시간 (h)
	적조생물+황토			
참 돔	10g/L	10	10	12
	3.000cells/mL+10g/L	0	-	-
쥐 치	10g/L	20	20	20
	3.000cells/mL+10g/L	0	-	-
넙 치	10g/L	0	-	-
	3.000cells/mL+10g/L	0	-	-
대조구(전 어종)	0	0	-	-

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

<표 3-10> 자연황토 살포농도에 따른 어류치사

구 분	황토살포농도	치사율(%) 24h	치사율(%) 48h	첫 치사시간 h
	적조생물+황토			
참 돔	10g/L	0	-	-
	3.000cells/mL+10g/L	0	-	-
쥐 치	10g/L	0	-	-
	3.000cells/mL+10g/L	0	-	-
넙 치	10g/L	0	-	-
	3.000cells/mL+10g/L	0	-	-
대조구(전 어종)	0	0	-	-

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

이상의 경우에서 10g/L의 적정 자연황토를 살포하였을 경우에는 대조구와 비교하여 별문제가 없었으나, 분말황토의 경우는 황토의 분말이 아가미에 과다 흡착, 호흡에 지장을 일으켜 혈액의 산소분압이 떨어지고 동시에 혈액이 산성

화되며, 헤모글로빈, 헤마토크릿의 수치도 떨어져 어류가 폐사하는 것으로 사료된다. 그러나, 적조생물구에 어류를 투입하고 여기에 황토를 살포한 시험구의 경우는 적정 살포구 및 대조구와 별다른 차이를 보이지 않았다.

<표 3-11> 자연황토살포 시험구에 노출된 어류 혈액의 pH 및 PO₂ 변화

구 분	황토 및 적조 살포 농도	48h노출 후 (pH / PO ₂)	폐사어류 (pH / PO ₂)
참돔	대조구	7.07 / 68.2	
	10g/L	7.10 / 71.6	-
	3.000cells/mL+10g/L	7.00 / 69.3	-
쥐치	대조구	7.02 / 59.3	
	10g/L	7.07 / 58.6	-
	3.000cells/mL+10g/L	7.05 / 60.5	-
넙치	대조구	7.00 / 62.4	
	10g/L	7.03 / 58.3	-
	3.000cells/mL+10g/L	7.03 / 60.1	-

주 : PO₂ 단위 : mmHg

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

이는 황토에 의해 적조생물이 치사 파괴되어 적조생물 자체가 어류의 호흡에는 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 사료되나, 코르티졸 농도 수치는 10g/L 적정살포구에 비해 높은 값을 보였고, 참돔의 경우 특히 높은 값을 보였다.

이는 황토만을 살포하였을 경우는 스트레스를 적게 받으나 적조생물이 투입되면 많은 스트레스를 받고 특히 참돔의 경우가 가장 민감하다는 것을 나타낸다. 이와 같이 어류의 스트레스에 대한 생리적 반응을 나타내는 코르티졸 농도 변화는 시험구가 대조구에 비해 높은 농도임을 알 수가 있었다. 그외 <표 3-12>에서 혈장(plasma) 이온 농도변화에는 큰 차이가 없었고, Na⁺, Ca⁺ 이온농도가 어류 모두 다소 증가하는 경향을 보였다.

(3) 우렁쉥이 및 기타 유용생물 영향

적조구제용 황토가 수산생물에 미치는 영향을 어패류를 대상으로 평가하여,

특별한 영향이 없음을 이미 보고하였으며, 본 연구에서는 우렁쟁이, 해삼, 성게에 미치는 황토의 영향을 평가하고자 한다. 공시생물체는 우렁쟁이(평균 체장 : 7cm), 해삼(평균체장 : 8cm), 성게(평균체장 : 10cm)이며, 인근 어장에서 구입하여 여과 해수에 48시간 적응시킨 후 실험에 이용하였다. 황토살포 농도는 1%, 2%, 3%였고, 수산생물체를 지속적으로 황토에 노출시키기 위해 산소 기포를 발생시켰다. 각각의 실험구에 공시생물 30개체씩을 투입하여 폐사 여부를 관찰하였으며, 노출 시간별 생물체의 황토 섭취량과 회복 과정에서의 황토 배출 여부를 조사하였다.

<표 3-12> 분말황토 농도에 따른 어류 혈액의 혈장이온농도 및 Cortisol 변화

구 분	황토 및 적조 살포농도	48h노출 후 Cortisol	48h노출 후 Na ⁺ , K ⁺ , Cl ⁻ , Ca ⁺	Hb	Hct
참 돔	대조구	4.19	170.0/6.2/142.0/10.7	11.4	62.0
	10g/L	4.42	175.0/5.10/150.0/9.1	10.2	58.0
	3.000cells/mL+ 10g/L	7.27	179.0/5.8/150.0/10.0	9.1	60.0
쥐 치	대조구	37.03	177.0/6.0/149.0/12.6	8.9	42.0
	10g/L	39.2	181.0/9.2/150.0/11.4	9.0	40.0
	3.000cells/mL+ 10g/L	40.2	180.0/8.9/152.0/12.1	8.8	40.4
넙 치	대조구	3.55	159.0/5.1/135.0/11.5	7.9	46.0
	10g/L	3.64	168.0/3.7/142.0/12.5	7.2	43.1
	3.000cells/mL+ 10g/L	4.01	166.4/3.8/139.4/12.3	7.4	45.2

주 : 단위 : Cortisol(ug/dL); Na⁺,mEq/L; K⁺,mEq/L; Cl⁻,mEq/L; Ca⁺, mg/dL; Hemoglobin(g/dL); Hematocrit(%)

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

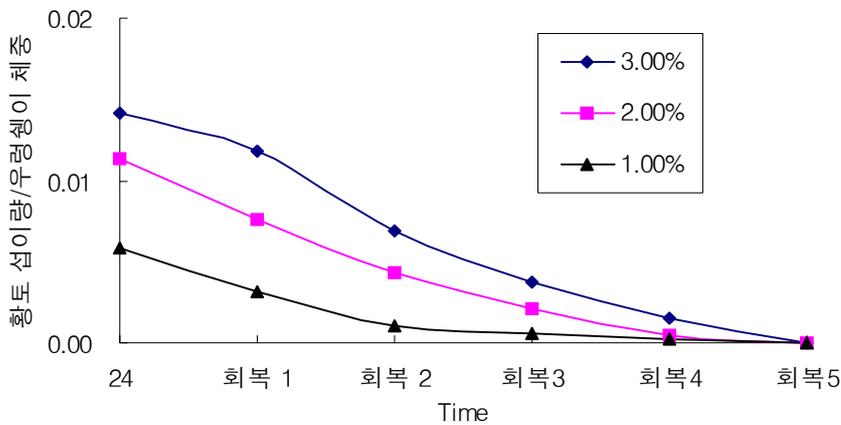
우렁쟁이, 해삼, 성게는 전 실험기간 동안 모든 시험구에서 100%의 생존율을 보였다. 생물별 24시간 노출 후의 황토섭취량과 회복실험을 행하여 시간경과에 따른 생물별 황토 잔유량을 측정하였다.

<그림 3-17>의 결과에서 시간 경과에 따른 생물 내 황토 잔유량이 우렁쟁이는 5시간 후, 해삼은 4시간 후 전량 배출되었음을 알 수가 있었다. 그리고, 우렁쟁이와 해삼은 황토를 섭취하였으나, 성게는 내용물 조사에서 전혀 황토를

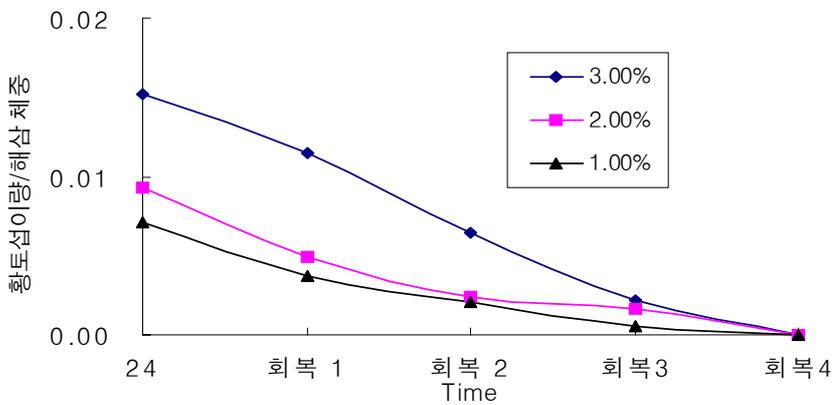
섞이지 않았다. <그림 3-18>에 각 생물들의 장 내용물에 황토가 섞이된 모습을 나타내었다. 사진의 표시 부분들이 섞이 또는 생물내에 잔류되어 있는 황토의 모습이다.

이상의 결과에서 우렁쟁이, 해삼, 성게는 황토 권장살포량인 1%(10g/L)의 23배의 농도에서도 황토의 영향을 받지 않음을 알 수가 있었다. 즉, 적조구제시 살포되는 황토는 우렁쟁이 및 성게, 해삼에는 어떠한 영향도 미치지 않는 것으로 여겨졌다. 특히 실험환경은 황토를 계속 부유시킨 상태에서 생물을 24시간 노출시켰기 때문에 자연상태에서는 이와 같은 극한상태는 거의 없다고 할 수 있다.

<그림 3-17> 황토에 노출된 우렁쟁이 및 해삼의 24시간 경과 후 황토섞이량 및 회복실험 후의 황토잔량



(a) 우렁쟁이의 황토섞이량 및 회복실험 후의 황토잔량



(b) 해삼의 황토섞이량 및 회복실험 후의 황토잔량

<그림 3-18>

황토에 노출된 우렁쉥이, 성게, 해삼의 모습



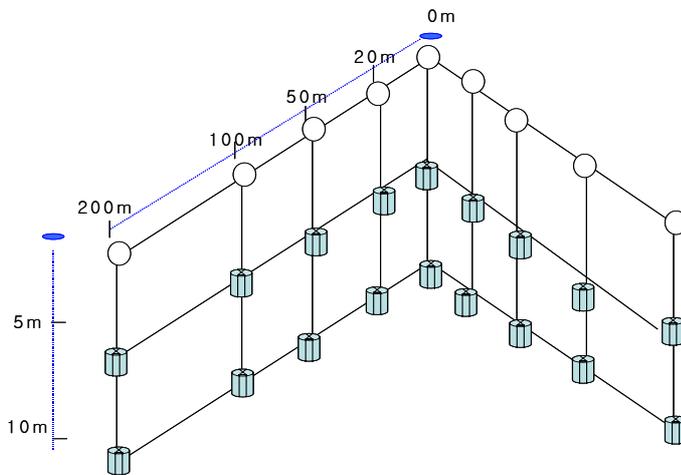
(4) 김의 성장 및 광합성 작용에 미치는 영향

길이 510mm 크기의 모무늬돌김 엽체를 선택하여, 1L 해수에 엽체를 10개씩 넣고 황토 농도별로 처리한 후 기포를 주입하여 2일 후 PEA(Plant Efficiency Analyser)를 이용하여 F_v/F_m 를 측정함으로써 광합성효율을 조사하였으며, 그 결과를 <표 3-13>에 나타내었다. 광합성효율(F_v/F_m)이 황토 처리 2일 후에 황토 처리구가 대조구에 비하여 약간 높게 나타났다.

2) 황토살포시 시공간적 변화 조사

황토살포 후 황토의 확산 범위 및 침강량 조사로 황토영향권을 추정하기 위하여 <그림 3-20>과 같이 해역에서 황토살포 지점 20m, 50m, 100m, 200m 간격으로 침강트랩(sediment trap)을 설치하여 침강량과 확산정도를 조사하였고, 또한 실내에서 침강 정도를 파악하기 위하여 원통관(깊이 2.5m, 지름 25cm)을 이용하여 침강속도를 조사하였다. 유속별 확산 및 침강 속도 등을 파악하기 위하여 정방형 2차원 실내 수조에 간이 트랩을 설치하여 탁도 및 침강량 실험을 실시하였다.

<그림 3-20> 황토살포 후 확산 및 침강량조사를 위한 침강트랩(sediment trap)



해양에서 입자성 및 부유성물질은 조류, 해류, 등의 수리학적 요인과 입도, 비중 등의 물리적 특성에 따라 그 거동양상이 다르게 된다. 부유상태로 이동하는 세립질 물질은 입자 사이에 작용하는 소성(塑性)과 점착성으로 입자 간의 상호결합을 통해 입자덩어리를 형성하며 침전되는 특성을 갖는다. 플럭 형성은 단순히 입자크기에 따라서만 결정되는 것은 아니며 일차적으로 부유물질 내 점토광물의 함량과 그 점토광물의 결합력에 기인하고 그 외에 여러 가지 환경 요인에 따라 변화한다(McCave, 1983). 즉, 염분, 부유물질의 농도, 수리에너지의 세기, pH, 온도 등의 물리·화학적 요인과 부유물질의 입도(粒度)구성, 광물학적 성분 등의 퇴적물의 물성에 따라 여러 가지 복합적인 요인의 영향을 받는다.

면서 진행된다(추 1993).

부유물질과 입자물질의 응집 및 침전과정에 대한 정확한 이해를 위해서는 해양에서 발생할 수 있는 여러 환경요인의 변화에 따른 한계 전단응력(剪斷應力)³⁾의 변화, 입자 간의 결합과정, 침전속도의 변화 그리고 침전 및 퇴적조건 등과 같은 보다 정확한 현상학적인 이해와 정량적인 상관관계 추정에 대한 연구들이 요구되지만, 아직은 미흡한 상태이다(추 1999). 본 연구는 천연황토를 이용하여 현장에서의 확산범위 파악과 실내에서는 2m 깊이의 원통관을 이용한 침강실험 및 이차원수조를 이용한 유속별 확산범위를 파악하여 황토살포에 의한 침전 및 확산 특성을 규명하고자 하였다.

3) 현장에서의 확산실험

황토살포현장에서의 확산속도를 파악하기 위하여 경남 거제시 장목면에서 황토를 살포하여 현장조사를 하였다. 현장의 조건은 수심 10~12m였으며 황토를 살포하는 곳을 기점으로 하여 20m, 50m, 100m, 200m까지 침강트랩을 표층에서 5m, 10m 두 층으로 나누어 설치하였다. 또한 조석이 바뀌는 것을 감안하여 6시간 후 트랩을 들어올려 각 거리에서의 수심별 부유물질량을 측정하였다.

조사 결과 <그림 3-21>과 같이 살포장소를 기점으로 하여 50m 이내에서 거의 가라앉는 것으로 나타났다(이 때의 유속은 6cm/sec였음). 단, 200m 지점에서 부유물질량이 다시 높아진 것은 트랩 설치시간이 길어짐에 따른 해양의 여러 부유입자들의 침강에 의한 것으로 판단되다.

4) 실내에서의 확산실험

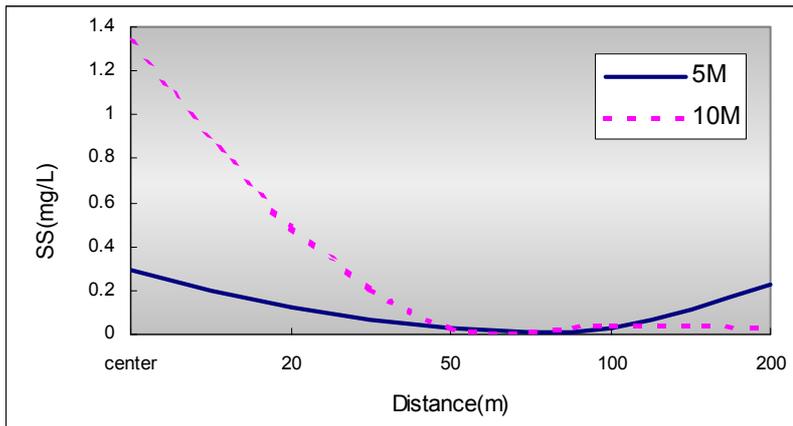
실험은 길이 20m, 높이 1.2m의 이차원수조에서 유속을 달리하여(10cm/sec, 20cm/sec, 30cm/sec) 간에 트랩을 설치하여 각 거리에서의 부유물질량을 측정하였다. 단 유속별로 1회전 하는 지점에서 정지하여 바로 트랩을 건져 올렸다. 유속을 10cm/sec로 하였을 경우 <그림 3-22>와 같이 1.5m 이내에서 80%가 침강되었으나, 유속을 증가하여 20cm/sec, 30cm/sec로 한 경우에는 살포지점에서

3) 물질을 분리시켰을 때 서로 응집하려는 힘을 말함.

1.5m까지는 유속에 의하여 그대로 부유하다가 1.5m 지점에서 최고의 침강률을 보였다. 한편 2m 지점에서는 약 60%의 침강률을 보이다가 10m 지점에서는 10cm/sec에서는 거의 95%가 침강되었으나, 20cm/sec, 30cm/sec에서는 각각 81%, 62%의 침강률을 보였다. 우리나라 남해안의 여름철 평균 유속이 20~40cm/sec임을 감안하여 볼 때 조석 등의 영향에 따라 다를 수 있지만 10m 범위 내에 약 80%가 침강되는 것으로 판단된다.

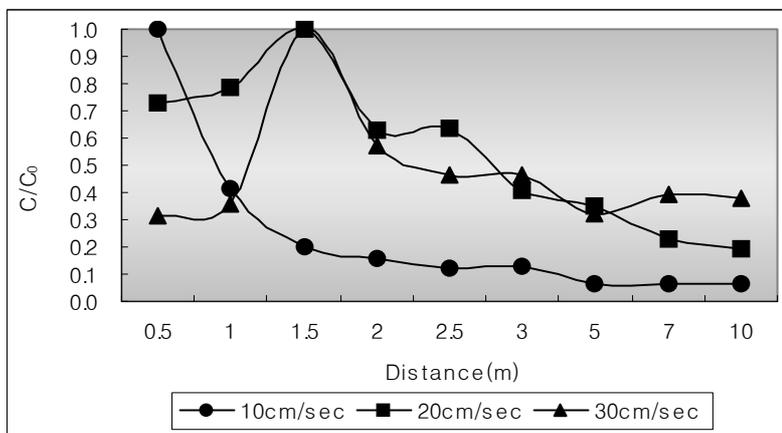
<그림 3-21>

현장에서의 황토확산범위



<그림 3-22>

이차원 수조에서의 유속별 침강률

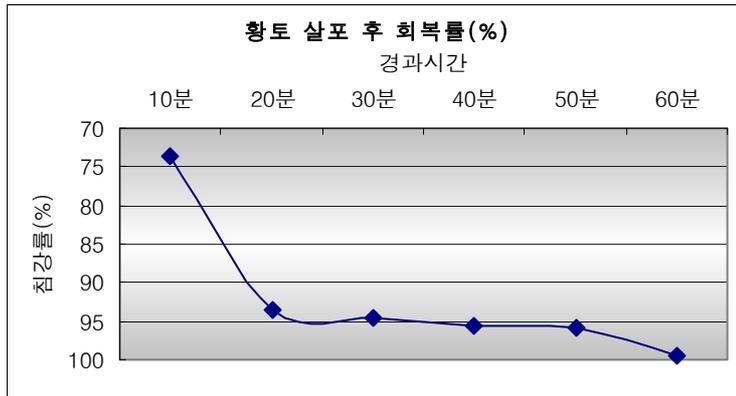


5) 살포 후의 부유물질 회복력 파악

실내에서 깊이 2m 지름 25cm의 원통관을 이용하여 황토를 살포한 후의 부유물질 농도를 측정하여 해양에서의 여름철 해조류 등에 영향을 미칠 수 있는 인자인 부유물질 농도를 측정하여 회복력을 파악하였다. 그 결과 <그림 3-23>과 같이 20분 이내에 90% 이상이 회복되는 것으로 나타나, 혼탁에 의한 빛 투과 감소가 광합성에 미치는 영향은 아주 미미한 것으로 나타났다.

<그림 3-23>

황토살포 후의 부유물질 회복률



3. 황토살포로 인한 적조 소멸 및 수산물 폐사 방지율 추정

1) 적조구제효율

적조발생해역에 실제 사용했던 황토 5종에 대한 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides* 구제효과실험을 실내에서 행한 결과를 <표 3-14>에 나타내었다. 살포 60분 뒤 월성, 통영, 경주 내남면, 전북 부안산이 80% 이상 효과가 나타났으며, 경주 내남면산은 97%의 높은 구제효율을 보인 반면에 경주 양남면산은 32%의 아주 낮은 구제효율을 보였다. 이와 같이 자연황토는 토취장(구성성분의 차이)에 따라 효율에 많은 차이를 보였다. 2003년 하계 통영의 적조발생해역에 살포한 황토의 현장 적조생물 구제효율은 살포 10분 후 74%이었다.

<표 3-14>

토취장에 따른 황토의 적조구제효율

단위 : %

구 분	구제효율(%)	비 고
월성 원전지	82	
통영 산양면	85	
경주 양남면	32	
경주 내남면	97	
전북 군산	72	
전북 부안	94	

주 : 60분 경과 후 적조구제효율이고 황토농도는 10g/L임.

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

이들 시료 중 통영 산양면산 황토를 택하여 적조생물 밀도별 구제효율조사를 행한 결과를 <표 3-15>에 나타내었다. 결과에 의하면 자연황토에 대한 적조구제효율은 적조생물 밀도가 높을수록 시간이 경과될수록 구제효율이 높게 나타났다. 특히 적조생물의 밀도가 아주 낮은 100cells/mL에서도 60분 경과 뒤 70% 이상의 구제효율을 보였다.

<표 3-15>

적조생물 밀도별 시간 경과에 따른 구제효율

단위 : %

경과시간	적조생물 밀도(cells/mL)						
	100	500	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000
10분	40	50	50	55	60	65	69
30분	70	72	67	71	75	79	82
60분	75	80	77	79	81	83	85

주 : 황토농도는 10g/L임.

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

2) 황토의 폐사방지율 추정

보다 정확한 황토에 의한 폐사방지율을 구하기 위해서는 실제 현장에서 적조유입시 적조생물 농도 및 다른 어종에 대한 조사자료가 필요하나 현장에서의 실험에 대한 어려움으로 실내 실험자료를 이용하여 추정하였다.

<표 3-16>을 보면 쥐치의 경우는 적조생물 3,000cells/mL에서 6시간 후 30%가 폐사하였고, 참돔의 경우 3,000cells/mL에서 10시간 후 20%가 폐사하였으며, 넙치의 경우 8,000cells/mL 이상에서 폐사하였다. <표 3-17>에서 참돔, 쥐치, 넙치에 대해 적조생물 3,000cells/mL의 농도에 자연황토 10g/L를 살포한바, 수산생물의 폐사가 전혀 일어나지 않았다. 따라서 실내실험의 결과로 3,000cells/mL 농도의 적조생물 유입시 쥐치와 참돔의 경우 황토에 의한 폐사방지율은 100%로 유추할 수 있다.

<표 3-16> C. polykrikoides 적조에 노출된 어류의 폐사율

어 종	적조농도 (cells mL ⁻¹)	치사율(%)	첫 치사 시간(h)
쥐 치	8,000	100	2
	5,000	100	3.5
	3,000	30	6
	1,000	0	-
참 돔	8,000	100	2
	5,000	60	3
	3,000	20	10
넙 치	8,000	30	12
	5,000	0	-

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

<표 3-17> 자연황토 살포농도에 따른 어류치사

어류	황토살포농도	치사율(%) 24h	치사율(%) 48h	첫 치사시간 h
	적조생물+황토			
참돔	10g/L	0	-	-
	3,000cells/mL+10g/L	0	-	-
쥐치	10g/L	0	-	-
	3,000cells/mL+10g/L	0	-	-
넙치	10g/L	0	-	-
	3,000cells/mL+10g/L	0	-	-
대조구 (전 어종)	0	0	-	-

자료 : 국립수산과학원, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.

4. 요약 및 시사점

황토살포에 대한 자연과학적 영향분석 결과는 해양생태계에 별다른 나쁜 영향을 미치지 않는 것으로 나타나고 있다.

다년간 황토를 살포한 남해 미조해역 등지에서의 저서생물상의 변화를 보면 시기별 차이는 있었으나 미살포해역과 저서생물의 출현종 수 및 밀도 등에 차이가 없었다.

퇴적층에 서식하는 일반 박테리아와 오염지표가 되는 박테리아의 개체 수도 황토 미살포구와 차이가 없었다.

어류에 미치는 영향은 참돔, 쥐치, 넙치, 조피볼락 등을 대상으로 황토살포 후 어류 생존시험 결과 장기간 생존하였고, 굴, 피조개 및 전복 치패 등을 대상으로 한 패류에 미치는 영향실험 결과 황토살포구의 패류가 오히려 미살포구에 비해 생존율이 높아 황토살포가 패류에 좋은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

해조류에 미치는 영향은 황토 0.5% 살포구와 미살포구 간에 있어 해조류의 광합성 효율에는 차이가 없었으나, 황토 1% 살포구에서는 효율이 조금 낮아졌다. 그러나 황토는 살포 후 1시간 이내에 침강되므로 빛 투과 감소에 따른 해조류에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

아울러 황토살포가 패류(피조개)의 헤모글로빈과 혈장단백질을 상승하게 하여 오히려 생존율이 증가하였으며, 스쿠티카 등의 어류 기생충을 박멸하는 효과도 나타났다.

제 4 장 황토살포의 사회경제적 효과분석

제4장에서는 황토살포의 경제적 타당성분석과 함께 적조방제용 황토살포에 대한 어업인들의 의견을 조사하여 분석하였다. 본 조사에서는 적조에 의해 피해를 입은 그룹과 적조에 의해 피해를 입지 않은 그룹으로 나누어, 황토살포의 효과와 간접적 영향에 대한 인식, 적조방제용 황토살포에 대한 찬반의견 등을 조사하였다. 사실 황토살포의 전체적인 편익이 비용보다 더 크다 하더라도 그로 인해 피해를 입은 집단이나 개인이 존재한다면, 이는 황토살포의 비용이 일부 외부화되었으며 사회적 관점에서 황토살포가 반드시 바람직하다고 단정할 수 없음을 의미하는 것이다.

1. 황토살포의 경제적 타당성분석

1) 분석의 전제

황토살포의 경제적 타당성을 분석하기 위하여 황토살포에 따른 전체 비용과 편익을 비교하는 비용편익분석법을 적용하였다. 비용편익분석은 어떤 문제에 대한 최적화의 해법은 제시하지 않지만, 여러 대안들 간의 비교를 가능하게 해준다. 따라서 단지 황토살포의 타당성만을 평가하는 데에는 비용편익분석법이 적합한 분석수단이 될 수 있다.

평가의 관점은 사적(private)인 관점이 아니라 사회적(social) 관점을 취했다. 평가에 있어서 어떠한 관점을 취하느냐에 따라 비용과 편익의 인식은 달라진다.

비용편익분석법에 따라 황토살포의 경제적 타당성을 평가하기 위해서는 먼저 비용과 편익 요소를 파악하여야 한다. 사회적 관점에서 비용편익분석을 수행하는 경우에는 비용, 편익 요소의 인식이 특히 중요하다. 사적 관점의 분석에서는 외부화되어 고려하지 않아도 될 요소들을 사회적 관점의 분석에서는

모두 고려하여야 하기 때문이다.

2) 황토살포의 편익 및 비용 요소의 인식

(1) 황토살포에 따른 편익 요소

황토살포에 따른 편익은 황토 미살포시 발생할 적조피해의 일부 및 전부를 방지하는 데서 발생한다. 다시 말해, 황토살포의 편익은 ‘회피된 적조발생에 따른 비용(avoided costs of harmful algal blooms)’이라 할 수 있다. 그러므로 황토발생의 편익을 인식하기 위해서는 적조에 따른 비용을 먼저 파악할 필요가 있다.

적조발생에 따른 피해를 경제학적 관점에서 파악한다면, 먼저 수산자원 폐사에 따른 수산업 종사자의 소득감소를 들 수 있는데, 이를 전체 수산물 시장 차원에서 본다면 생산자 잉여(producer surplus)의 감소로 이해할 수 있다. 현재 정부에서는 적조발생을 자연재해로 간주하여 이러한 생산자 잉여 감소에 대하여 부분적으로 보상해 주고 있다. 시장차원에서 본다면 적조발생으로 인해 소비자 잉여 역시 감소하게 된다. 전체 시장, 혹은 사회적 차원에서는 소비자 잉여의 감소 역시 적조발생에 따른 경제적 피해에 포함된다. 생산자 및 소비자 잉여의 감소는 실증적(positive) 관점에서의 경제적 피해라고 할 수 있다. 이러한 실증적 피해는 경제학적으로 계량화가 가능하다.

적조발생에 따라 규범적(normative) 관점에서의 피해도 발생한다. 예를 들어, 어업종사 가구의 평균소득은 농업종사 가구나 도시 근로자 가구에 비해 소득이 크게 떨어지는데,⁴⁾ 적조발생으로 인한 어가소득의 감소는 사회 전체의 소득분배 효율에 손실을 가져오는 것으로 인식할 수 있다. 그러나 이러한 규범적 피해는 재화 및 서비스의 사용과 관련되어 있지 않아 계량화하기가 매우 어렵다.

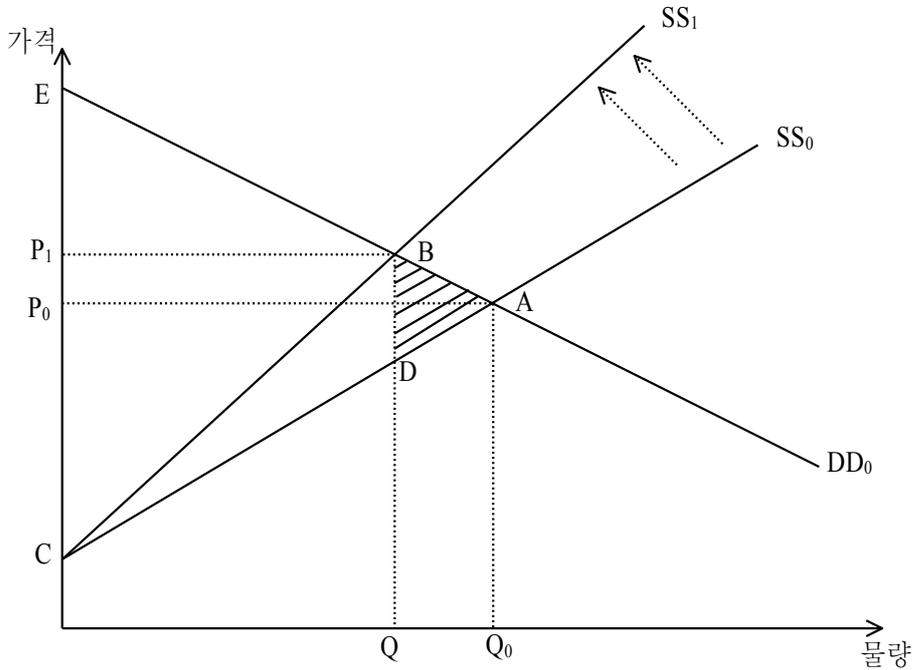
실증적 관점에서의 경제적 피해는 사용가치 감소만이 그 대상이 된다. 즉 사용가치에 영향을 주지 않는 그 밖의 모든 인식 가능한 피해는 피해로 인정되지 않는다. 본 연구에서는 실증경제학적 관점에서 계량화가 어려운 규범적 피

4) 2002년도 기준으로 어가소득은 평균 2,041만 원으로, 농가 평균소득의 89.1%, 도시근로자 가구 평균소득의 65%에 불과함.

해는 분석대상에서 제외하였다. 즉, 적조방제용 황토살포의 편익을 추정함에 있어서 생산자 및 소비자 잉여의 변화만을 고려하였다. 이하에서는 적조발생에 따른 생산자 및 소비자 잉여의 변화에 대해 살펴보았다.

<그림 4-1>에서 적조발생에 따라 양식수산물의 일부가 폐사함으로써 양식수산물의 공급곡선은 SS_0 에서 SS_1 으로 좌측으로 회전하게 된다. 이에 따라 생산자 잉여는 CAP_0 에서 CBP_1 으로 변화하게 된다. 또 수산물 가격의 상승에 따라 소비자 잉여도 EAP_0 에서 EBP_1 으로 감소하게 된다. 이러한 잉여 감소에 따라 사회 전체적으로 발생하는 순손실(deadweight loss)은 빗금친 부분 ABD 에 해당한다.

<그림 4-1> 적조발생에 따른 생산자 및 소비자 잉여 변화



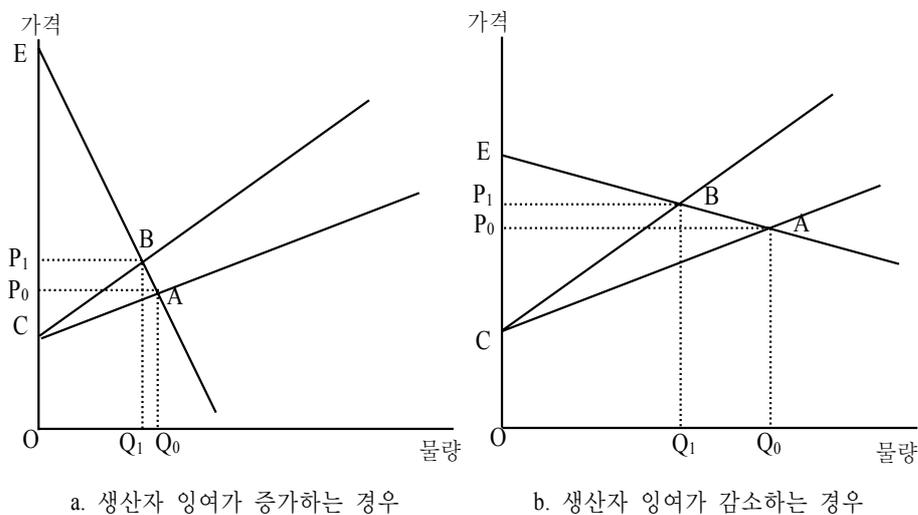
여기서 한 가지 주목할 점은 적조발생으로 인한 양식수산물의 폐사가 반드시 생산자의 전체적인 잉여를 감소시키는 결과를 가져오는 것은 아니라는 것이다. <그림 4-2a>의 경우는 적조발생으로 인해 시장의 전체적인 생산자 잉여

가 증가한 경우를 나타내고 있다. 이는 양식수산물 공급 축소로 인한 가격의 상승 폭이 소비량 감소 폭보다 크게 나타났기 때문이다. 반대로 <그림 4-2b>는 적조발생으로 인해 생산자 잉여가 줄어드는 경우를 나타내고 있다.

적조로 인한 전체적인 생산자 잉여의 증감은 양식수산물 수요의 가격에 대한 탄성치에 달려 있다. 만일 양식수산물의 수요가 가격에 대해 탄력적이라면 적조로 인한 양식수산물의 소비량 축소폭이 가격의 증가폭보다 크게 나타나므로 시장 전체의 생산자 잉여는 감소하게 된다. 반대로 양식수산물의 수요가 가격에 대해 비탄력적이라면 적조 발생시 시장의 전체적인 생산자 잉여는 오히려 증가하게 된다.

<그림 4-2>

적조발생에 따른 생산자 잉여 변화



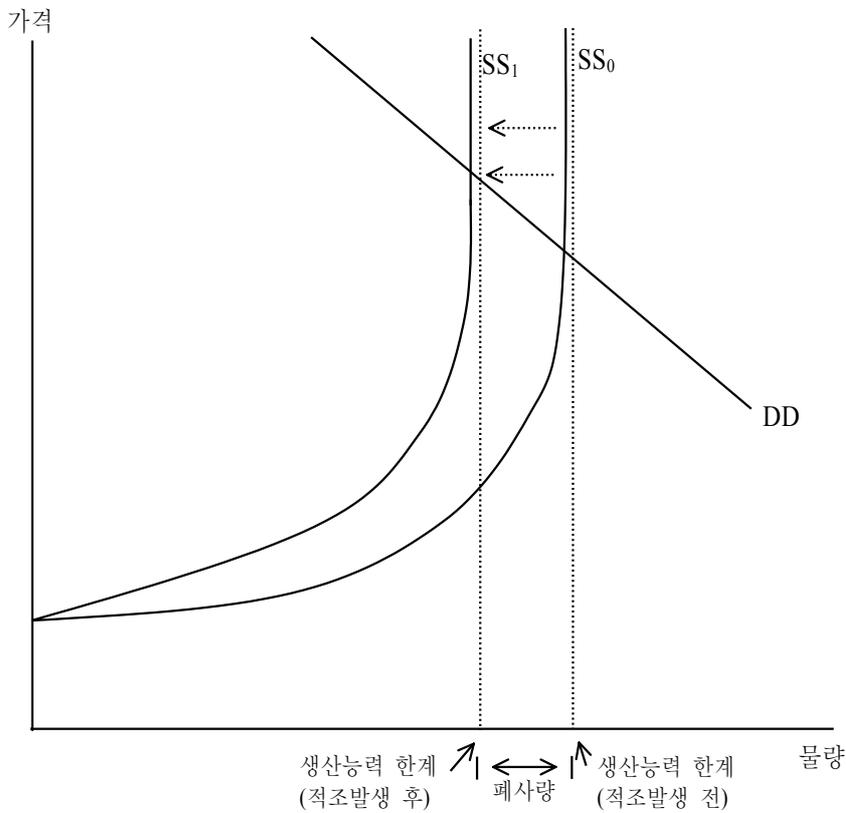
<그림 4-2b>에서 시장의 전체적인 생산자 잉여는 증가하지만, 개별 생산자나 특정 집단에 속한 생산자의 잉여는 감소할 수 있다. 즉 적조로 인해 생산물의 일부 혹은 전부가 폐사하여 생산에 부정적 영향을 받는 생산자의 경우에는 양식수산물의 시장가격 상승에도 불구하고 잉여가 크게 감소할 것이다. 그러나 적조에 영향을 받지 않은 다수 생산자의 잉여는 시장가격의 상승에 따라 증가함으로써 시장 전체의 생산자 잉여는 증가할 수 있는 것이다.

반면에 소비자 잉여는 적조가 발생하여 양식수산물의 공급이 줄어들 경우

탄성치와 상관없이 항상 감소하게 된다.

양식수산물의 단기 공급곡선은 <그림 4-1>과 <그림 4-2>에서 표시한 바와는 달리 실제로는 <그림 4-3>과 같이 우상향하다가 수직으로 상승하는 형태가 될 것으로 판단된다. 수직으로 상승하는 선은 단기적인 생산능력 한계(capacity barriers)로서, 단기적으로는 입식 물량에 따라 가격이 아무리 상승해도 공급량에 한계가 있음을 의미한다. <그림 4-3>에서 적조로 인해 양식수산물의 폐사가 발생할 경우 생산능력 한계는 좌측으로 이동하고, 공급곡선은 좌상으로 회전하게 될 것이다.

<그림 4-3> 적조발생에 따른 양식수산물 공급곡선 변화



(2) 황토살포에 따른 비용 요소

황토살포에 따른 비용은 직접적 비용과 간접적 비용으로 나누어진다. 직접적 비용은 황토살포 행위에 수반되는 제반비용으로서, 황토 채취비, 운반비, 장비 및 선박 이용료, 인건비 등이 포함된다. 간접비용은 해양 생태계 및 생물에 미치는 부정적 영향이다.

최근 일부 수산학자들에 의해 황토살포가 해양 생태계 및 생물에 부정적 영향을 준다는 주장이 제기되고 있다. 즉 황토살포로 인해 해저면에 점질막이 형성되고 산소공급이 차단됨으로써, 퇴적물 환경이 악화되고 해조류와 패류 등 저서생물이 폐사한다는 것이다. 또 황토 중에 포함된 철 성분은 적조 촉진물질이어서, 황토살포가 장기적으로는 적조발생을 오히려 조장하는 부작용을 초래할 수 있다는 점도 우려되고 있다. 이러한 황토살포의 간접적 영향은 실험실 규모의 시험으로는 확인할 수 있으나, 실제 해중에서 과학적 실험에 의해 확인되지는 않고 있다. 제3장에서 기술한 바와 같이, 국립수산과학원에 의한 현장 실험에서는 황토살포가 해양저서생물에 아무런 피해를 주지 않는 것으로 나타난 바 있다.

3) 추정방법

(1) 개요

황토살포에 따른 편익을 추정하기 위해서는 적조가 발생한 상황에서 황토살포가 양식수산물의 폐사율을 얼마나 줄일 수 있는가가 먼저 파악되어야 한다. 이를 위해서는 양식어업이 이루어지고 있는 현장에서 동일한 조건 하에 황토를 살포한 경우와 황토를 살포하지 않았을 경우의 양식수산물 폐사율을 비교하는 실험을 해야 한다. 그러나 이러한 실험은 현실적으로 가능하지 않다. 적조의 피해는 적조생물의 종류 및 밀도뿐만 아니라, 조류 속도와 방향 등에 따라 큰 차이가 나는데, 이러한 조건을 인위적으로 조작할 수가 없기 때문이다.

비록 이러한 실험은 불가능하다고 하더라도, 실제 적조가 발생했을 경우에 황토살포 지역과 비살포 지역에서의 양식수산물 폐사율과 적조의 시·공간적인 변동 상태를 비교할 수 있는 모니터링 자료가 축적되어 있다면, 황토살포의 편익을 과학적으로 추정하는 데에 크게 도움이 될 것이다. 그러나 국내뿐만 아

나라 외국에서도 이러한 자료는 존재하지 않는다.

본 연구에서는 실측이나 모니터링 자료를 바탕으로 황토살포의 편익을 직접적으로 측정하는 것은 불가능하므로, 과거 적조에 의한 양식수산물 피해액을 이용하여 편익을 간접적으로 추정하고자 하였다. 즉 유해적조 발생의 공간적 범위는 유사하지만, 황토를 살포하지 않았던 해와 황토를 살포하였던 해의 양식수산물의 피해액을 비교함으로써, 황토살포의 편익을 추정하는 것이다. 그 과정에서 양식시설 규모의 변화와 적조의 실제적인 피해 범위 및 정도의 차이를 고려해 주었다.

이러한 방법의 적용은 현장 실측 및 모니터링 자료가 부재한 상황에서 불가피하다고 할 수 있지만, 분석과정에서 오류 발생의 여지가 매우 크다고 할 수 있다. 왜냐하면 비록 거시적으로 보았을 때의 적조발생 범위는 유사하다 하더라도 양식시설이 설치되어 있는 연안 해역으로의 적조확산 정도 및 적조생물의 밀도는 크게 차이가 날 수 있는데, 양식수산물의 폐사율은 실제 이러한 요인들에 의해 좌우되기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 오류의 가능성에 대응하기 위하여, 적조의 실제적인 피해 범위 및 정도에 관한 여러 가지 가정을 세우고 각 가정에 대해 경제적 타당성을 분석하였다.⁵⁾

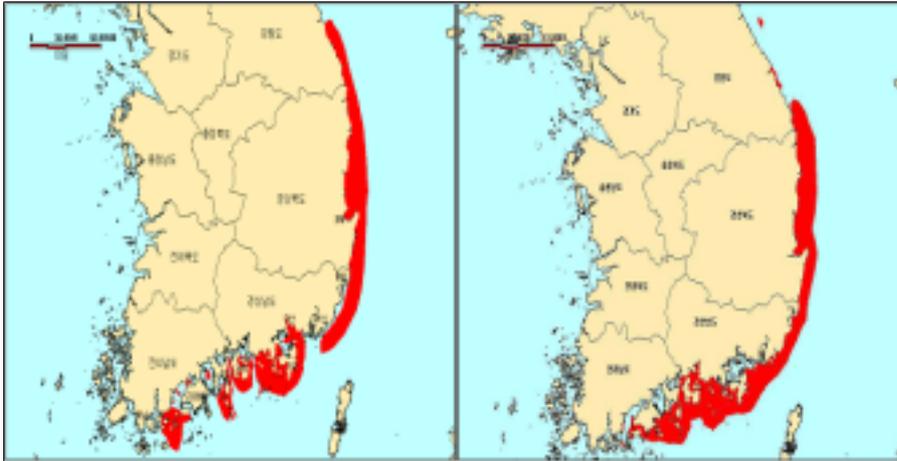
황토살포 편익 추정을 위한 비교대상 연도는 근래에 들어 적조발생의 공간적 범위가 가장 크고 그에 따른 대규모 피해가 발생하였던 1995년과 2003년을 선택하였다. 1995년도에는 사상 최대의 적조피해가 발생하였지만, 적조방제를 위한 황토살포는 이루어지지 않았다. 반면 2003년에는 유해적조가 광역화됨에 따라 어느 해보다도 많은 양의 황토가 살포되었다(제2장, <표 2-8> 참조). 피해 발생 범위와 기간은 2003년이 1995년에 비해 약간 넓게 나타나고 있지만, 적조 발생 건수는 1995년이 2003년에 비해 45% 정도 많다.

적조에 따른 수산생물 피해액은 1995년에 764억 원으로 사상 최대치를 기록하였다. 이는 모두 양식어류의 폐사에 따른 것이다. 2003년도에는 수산생물 전체 피해액이 215억 원에 달하였으며, 이 중 40% 이상이 양식 전복 폐사에 따른 것이다.⁶⁾

5) 따라서 본 연구의 의미는 황토살포의 경제적 효과를 계량적으로 측정한다기보다는, 단지 경제적 타당성 여부를 판단할 수 있는 하나의 근거(evidence)를 제시한다는 데에서 찾아야 할 것임.

6) 전복 양식은 1990년대에는 소규모로 이루어지다가 2000년대 들어 크게 활성화되었음.

<그림 4-4> 1995년과 2003년 적조의 공간적 발생범위 비교



<표 4-1> 1995년과 2003년의 적조발생 상황 비교

구분	1995년	2003년
발생기간	8월 29일~10월 23일 (55일)	8월 13일~10월 13일 (62일)
발생범위	전남 완도~강원 삼척	전남 진도~강원 강릉
발생건수	65	45
최고밀도(개체/ml)	30,000	48,000
폐사량(천미)	26,285	13,088
생물피해 내액(억 원)	764 (어류)	215 (어류 124, 전복 91)

자료 : 해양수산부, 내부자료, 2004.

(2) 편익추정방법

황토살포에 따른 편익은 황토 미살포시 적조발생으로 인해 감소되었을 생산자 및 소비자 잉여의 감소분 중 황토살포로 인해 실제로는 감소하지 않은 부분을 의미한다. 이를 측정하기 위해서는 먼저 황토 미살포시의 양식수산물 공급 감소량을 알아야 하고, 양식수산물의 공급 및 수요곡선도 추정되어야 할 것

이다. 그러나 실제로는 통계자료의 부족으로 인해 양식수산물의 공급곡선을 추정하기란 매우 어려운 일이다. 따라서 여기에서는 공급곡선의 추정 없이 적조에 따른 생산자 잉여의 변화를 추정할 수 있는 방법을 강구하였다.

먼저 적조로 인한 양식어류 폐사량이 시장 전체 유통량과 비교할 때 매우 적은 수준이어서, 적조 발생에도 불구하고 그 어류의 시장가격에는 변화가 없을 경우에는 소비자 잉여의 변화가 발생하지 않는다. 이 경우에는 양식수산물의 폐사에 따른 생산자의 판매손실의 합이 적조발생에 따른 비용이 된다. 이 중 황토살포에 따라 양식수산물 폐사량과 판매손실이 줄어들었다면, 그 줄어든만큼이 황토살포의 편익으로 간주된다.

만일 적조로 인한 양식수산물 폐사량이 그 시장가격에 영향을 줄 정도로 클 경우에는, 양식수산물의 공급량 감소에 따른 양식수산물의 가격 변화를 추정하여야 한다. 이를 위해서는 양식수산물 수요의 가격에 대한 탄성치를 추정하여야 한다. 만일 추정된 탄성치가 e 라고 한다면, 양식수산물의 가격 변화는 다음과 같이 추정된다.

$$\Delta P_0 = -(P^*/e) * (\Delta Q^*/Q^*) \dots\dots\dots (식 4-1)$$

(식 4-1)에서 ΔP_0 는 적조가 발생하지 않았을 경우의 양식수산물 가격과 적조발생시 황토살포가 이루어졌을 경우의 양식수산물 가격과의 차이를 의미한다. P^* 은 적조발생시 황토살포가 이루어졌을 경우의 양식수산물 가격이다. 또 ΔQ^* 는 황토살포에도 불구하고 적조에 따른 양식수산물 폐사량을, Q^* 는 적조발생시 황토살포가 이루어졌을 때의 양식수산물 생산량을 의미한다.

$$\Delta P_1 = -(P_0/e) * (\Delta Q/Q_0) \dots\dots\dots (식 4-2)$$

마찬가지로 (식 4-2)에서 ΔP_1 은 적조가 발생하지 않았을 경우의 양식수산물 가격과 적조발생에도 불구하고 황토를 살포하지 않았을 경우의 양식수산물 가격의 차이를 의미한다. P_0 은 적조가 발생하지 않았을 경우의 양식수산물 가격이다. 또 Q_0 는 적조가 발생하지 않았을 경우의 양식수산물 생산량이고, ΔQ 는 적조가 발생하지 않았을 경우의 양식수산물 생산량과 적조발생에도 불구하고

황토를 살포하지 않았을 경우의 양식수산물 생산량과의 차이를 의미한다.

만일 적조가 발생하여 황토를 살포하였다면, 그 해의 생산량 집계에 의해 Q^* 은 알려지고, 적조로 인한 양식수산물 폐사량을 조사하였다면 ΔQ^* 역시 알려진다. 또 P^* 은 양식수산물 가격의 시장거래가격을 조사함으로써 파악할 수 있다. 여기서 적조가 발생하지 않았을 경우의 양식수산물 생산량 Q_0 과 P_0 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$Q_0 = Q^* + \Delta Q^* \dots\dots\dots (\text{식 4-3})$$

$$P_0 = P^* + \Delta P_0 \dots\dots\dots (\text{식 4-4})$$

적조로 인한 생산자 잉여의 변화는 다음과 같이 추정한다.

$$\Delta S_p = -(Q_0 * P_0 - C_0) - (Q_1 * P_1 - C_1) \dots\dots\dots (\text{식 4-5})$$

(식 4-5)에서 C_0 는 적조 미발생시 양식수산물의 총생산비용이고, C_1 은 적조발생시 양식수산물의 총생산비용을 의미한다. C_0 와 C_1 은 큰 차이가 없을 것으로 판단되는데, 그 이유는 적조발생으로 인해 양식수산물의 일부가 폐사하더라도 그 시점까지 투입된 비용은 이미 지출되었으므로 동일하기 때문이다. 양식수산물 폐사 이후에는 변동비가 일부 줄어들겠지만, 그로 인한 연간 총생산비용의 차이는 크지 않을 것으로 판단된다. 따라서 분석 편의상 다음과 같이 가정하기로 한다.

$$C_0 = C_1 \dots\dots\dots (\text{식 4-6})$$

이러한 가정은 <그림 4-2>에서 사각형 Q_0ACO 와 사각형 Q_0BCO 의 면적이 같다고 보는 것이다. 이러한 가정에 의해 <식 4-6>은 다음과 같이 단순화할 수 있다.

$$\Delta S = -(Q_0 * P_0 - Q_1 * P_1) \dots\dots\dots (\text{식 4-7})$$

<그림 4-5>에 빗금친 부분으로 표시된 소비자 잉여의 변화는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\Delta S_c = -(Q_0 + Q_1) * \Delta P / 2 \dots\dots\dots (식 4-8)$$

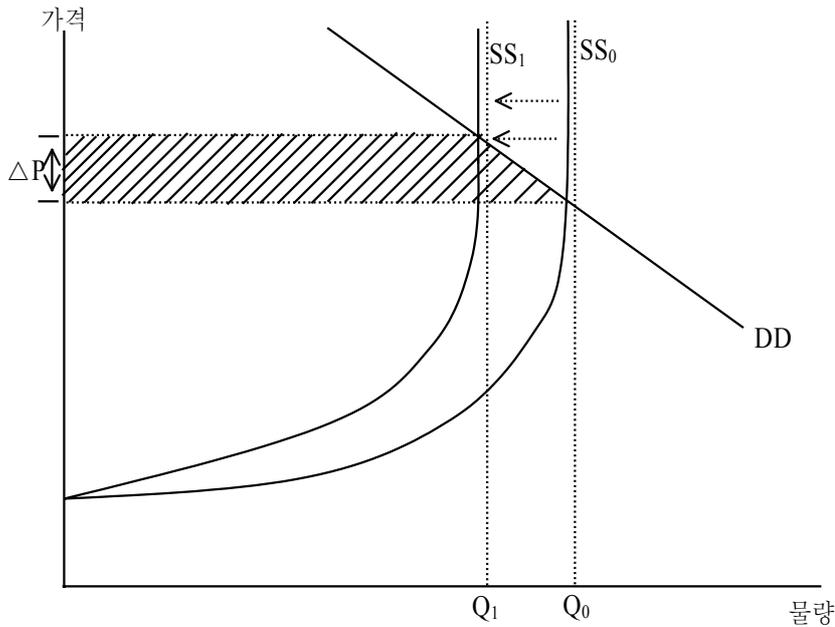
적조발생으로 인한 비용은 생산자 및 소비자 잉여의 변화를 합산하여 추정한다.

$$SC = \Delta S_p + \Delta S_c \dots\dots\dots (식 4-9)$$

이로부터 황토살포에 따른 편익을 도출하면 다음과 같다.

$$B = -SC * (\Delta Q - \Delta Q^*) / \Delta Q \dots\dots\dots (식 4-10)$$

<그림 4-5> 적조발생에 따른 소비자 잉여 감소



4) 황토살포의 편익 및 비용 추정

(1) 편익의 추정

앞에서 기술한 방법에 따라 황토살포의 편익을 계산하기 위해서는 황토 미살포시 적조로 인한 양식수산물의 공급 감소량과 양식수산물 수요의 가격에 대한 탄성치를 추정하고, 양식수산물의 가격에 관한 자료가 필요하다.

황토 미살포시 적조로 인한 양식수산물의 공급감소는 양식어류의 경우 2003년도를 기준으로 하되 호황토를 살포하지 않았던 1995년도의 사례와 비교하여 추정하였다. 그러나 전복의 경우에는 1995년도에는 소규모로 양식되었고 폐사량에 관한 자료도 존재하지 않아 황토 미살포시의 공급 감소량을 추정할 수가 없었다. 따라서 본 연구에서 황토살포의 경제적 타당성을 평가함에 있어서 전복의 폐사방지 효과는 고려하지 않기로 하였다. 이는 분명히 현실과 부합하지도 않고 황토살포의 경제적 효과를 과소 평가하게 만드는 요인이 되겠지만, 편익 추정에 따르는 여러 가지 불확실성 요인을 고려하여 최대한 보수적인 관점에서 경제적 타당성을 평가하기 위한 것이다.

해양수산부 집계자료에 따르면 1995년도 양식어류의 폐사량은 2,629만 미에 달하는 것으로 나타났다. 이를 중량으로 환산하기 위해서는 폐사된 수산물 개체의 평균 중량을 먼저 추정해야 한다. 생산현장에서 지도업무를 담당하는 수산 지도직 공무원에게 문의한 결과를 바탕으로 할 때, 대체적으로 폐사 어류의 평균 중량은 60~120g으로 추정된다고 한다. 이를 바탕으로 개체당 중량 0.1kg을 적용할 경우 1995년도 적조로 인해 폐사된 양식어류의 총 중량을 2,629톤으로 추정할 수 있다. 또 2003년도의 적조로 인한 양식어류 폐사량은 771톤으로 추정된다. 만일 2003년도에 유해적조가 발생하지 않았다면, 2003년도의 양식어류 생산량(Q_0)은 통계상에 나타난 생산량 72,393톤에 적조로 인한 양식어류 폐사량 771톤을 더한 73,164톤으로 추정된다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Q_0 = Q^* + \Delta Q^* = 72,393\text{톤} + 771\text{톤} = 73,164\text{톤} \dots\dots\dots (\text{식 4-11})$$

황토를 살포하지 않았을 경우 2003년도에 적조로 인한 양식수산물의 피해

정도가 1995년과 동일하다고 가정한다면, 사육 중이던 양식어류의 폐사 비율이 1995년과 2003년에 동일하게 나타나야 할 것이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta Q^{95}/S^{95} = \Delta Q^{2003}/S^{2003} \dots\dots\dots (\text{식 4-12})$$

따라서,

$$\Delta Q^{2003} = \Delta Q^{95} * (S^{2003}/S^{95}) \dots\dots\dots (\text{식 4-13})$$

여기서 ΔQ^{95} 는 1995년도의 적조발생에 따른 양식어류 폐사량, S^{95} 는 1995년도 적조발생 이전의 사육 중이던 양식어류 개체 수, ΔQ^{2003} 은 2003년도에 황토살포를 하지 않았을 경우의 적조에 따른 양식어류 폐사량, S^{2003} 은 2003년도 적조발생 이전의 사육 중이던 양식어류 개체 수를 나타낸다.

즉 황토를 살포하지 않았을 경우의 2003년도 양식어류 폐사량을 추정하기 위해서는 1995년과 2003년의 적조발생 이전에 사육 중인 양식어류의 개체 수를 각각 파악하거나, 아니면 그 비율을 알아야 한다. 양식어류의 개체 수는 최근 수 년간 해양수산부에 의해 비공식적으로 조사되고 있지만, 1995년도의 해당 자료는 존재하지 않는다. 따라서 적조발생 이전의 사육 중이던 양식어류 개체 수는 파악하기가 불가능하므로, 양식어류 생산통계를 이용하여 2003년과 1995년의 양식어류 개체 수 비율을 추정하기로 하였다. 이러한 과정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S^{2003}/S^{95} = P^{2003}/P^{95} \dots\dots\dots (\text{식 4-14})$$

(식 4-14)에서 P^{2003} 과 P^{95} 는 1995년과 2003년도의 양식어류 생산량을 나타낸다.

어업생산통계에 의하면 양식어류의 생산량은 1995년도 8,360톤에서 2003년 72,393톤으로 8년간 약 8.7배 증가한 것으로 나타난다. 그러나 이러한 어업생산통계를 바탕으로 사육 양식어류의 개체 수 비율을 추정할 경우 실제에 비해 과대평가될 가능성이 크다. 그 이유는 2003년도부터 어업생산통계 관련 업무가 통계청에서 해양수산부로 이관되면서 통계자료의 일관성에 이상이 있을 수 있

기 때문이다.7) 실제로 통계상에는 2003년도에 양식어류의 생산량이 2002년에 비해 크게 증가한 것으로 나타나고 있지만, 2002년도에는 중국산 저가 활어의 수입 급증으로 이미 어류양식 업계가 경영에 큰 어려움을 겪으면서 생산시설의 증가는 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

<표 4-2> 주요 양식품종의 생산 추세

구 분	1995	2000	2001	2002	2003
어류 소계	8,360	25,986	29,297	48,073	72,393
- 넙치류	6,733	14,127	16,426	23,348	34,533
- 농어	193	605	873	2,006	2,778
- 돔류	50	1,019	1,010	1,879	6,788
- 방어	159	494	95	186	114
- 불락류	1,159	8,698	9,330	16,636	23,938
전 복 류	61	20	29	85	1,065

자료 : 해양수산부, 『어업생산통계』, 각 연도.

양식어류의 사육기간(1~2년)을 감안하면 생산시설의 증가 없이도 전년도 입식량 증가에 의해 생산량이 늘어날 수는 있지만, 2001년도와 2002년도에 있었던 양식어류 가격의 침체현상을 고려하면 그 당시 입식량의 대폭적인 증가는 이루어지기 어려웠을 것으로 판단된다. 따라서 2003년도 양식어류 생산통계상에 나타난 연간 33%에 이르는 대폭적인 증가는 실제의 생산증가를 반영한다고 보기에는 무리가 있다.8) 즉 통계의 일관성 측면에서 2003년도 생산통계를 사용할 경우 1995년도 이후의 양식어류 생산량 증가가 과대평가될 가능성이 매우 높으며, 이를 이용할 경우 2003년도 황토 미살포시의 적조에 의한 양식어류 폐사량도 과도하게 추정될 소지가 크다.

7) 어업생산 관련 업무의 이관으로 양식어류 생산량 집계방법에 있어서 큰 변화가 있었던 것은 아님. 그러나 2003년도부터 지방해양수산청에 근무하는 어촌지도사가 생산량 조사 업무에 참여하였음.

8) 이는 2003년도 생산통계가 특별히 왜곡되었음을 의미하는 것은 아님. 사실 최근까지 양식어류 생산통계가 실제에 비해 지나치게 적게 집계되어 왔다고 지적하는 수산전문가들이 많았음. 이를 고려할 때 2003년도 생산통계는 그 전에 비해 오히려 실제 생산량에 더 근접하는 것으로 판단됨.

따라서 본 연구에서는 2002년도에 양식어류의 생산은 이미 포화된 것으로 보고, 2003년도 양식어류 생산량은 2002년도와 동일한 것으로 가정하였다. 이를 바탕으로 1995년도 이후 양식어류 생산량 증가율을 575%로 추정하였고, 양식어류의 사육 개체 수 증가도 이와 같은 비율로 이루어진 것으로 가정하였다.

또한 여기서 추가적으로 고려할 점은 1995년과 2003년의 적조발생의 공간적 범위가 유사하다고 하더라도, 유해적조의 발생빈도, 밀도, 확산 양태에 따라 1995년과 2003년의 적조에 의한 실제적인 양식수산물의 피해 범위와 정도는 차이가 날 수 있다는 점이다. 이러한 점을 고려하기 위하여 2003년도에 적조에 의한 실제적인 양식생물 피해 범위 및 정도는, 1995년과 2003년의 적조의 발생 건수의 비율대로 1995년도 적조의 69%정도에 불과하다고 가정하였다. 즉 황토살포를 포함한 제반 조건이 동일한 경우에 2003년도 적조에 의한 양식어류 폐사율이 1995년에 비해 30% 정도 적게 나타났을 것으로 가정하는 것이다. 이와 같이 2003년도의 적조에 의한 실제적인 피해 범위 및 정도를 축소 조정한 것은, 2003년도 적조에 의한 피해도 심각했지만 아직도 수산부문에서는 1995년도의 유해 적조의 발생규모가 사상 최대였던 것으로 기억되고 있기 때문이다. 또 이는 동시에 보수적인 관점에서 황토살포의 경제적 타당성을 분석하기 위한 것이기도 하다.

1995년과 2003년의 양식어류 생산량 비율과 적조의 실제적인 피해 범위 및 정도를 고려하여, 2003년도 황토를 살포하지 않았을 경우의 양식어류 폐사량을 다음과 같이 추정하였다.

$$\begin{aligned} \Delta Q^{2003} &= \Delta Q^{95} * (P^{2003} / P^{95}) * (R^{2003} / R^{95}) \\ &= 2,629\text{톤} * 5.75 * 0.69 = 10,431\text{톤} \dots\dots\dots (\text{식 4-15}) \end{aligned}$$

(식 4-15)에서 R^{2003} 과 R^{95} 는 2003년과 1995년의 황토 미살포시 적조에 의한 실제적인 피해 범위 및 정도를 나타낸다.

위에서 추정된 2003년도 황토를 살포하지 않았을 경우의 양식어류 폐사량 10,431톤은 통계상에 나타난 2003년도 양식어류 생산량 72,393톤의 약 14%에 해당하는 양이다. 이를 바탕으로 2003년도 황토를 전혀 사용하지 않았을 경우의 양식어류 생산량은 앞에서 추정된 Q_0 73,164톤에서 10,431톤을 뺀 62,733톤

으로 추정된다.

다음으로는 최근에 이루어진 연구를 바탕으로 양식수산물 수요의 가격에 대한 탄성치를 추정하였다. <표 4-3>에 나타난 바와 같이, 최근의 연구에서는 양식어류 수요의 가격탄성치가 -0.2~-1.25로 추정되었지만, 넙치, 조피볼락 등 주요 어종의 탄성치는 비교적 높아 -0.7~-1.25로 추정되고 있다. 국내에서는 양식어류 생산량 중 넙치와 볼락류의 비중이 매우 높으므로, 9) 이를 고려하여 국내 양식어류 수요의 가격 탄성치를 기존 연구에서 나타난 탄성치 추정결과의 중간 수준보다 약간 높은 -0.85로 가정하였다. 한편 2003년도 양식어류의 평균가격은 어업생산통계에서 나타난 총 생산금액을 생산량으로 나눈 값인 kg당 8,827원으로 추정하였다.

<표 4-3> 최근 연구에서 나타난 양식어종 수요의 가격 탄성치 추정결과

구 분	연구사례 1 ¹⁾	연구사례 2 ²⁾
넙 치	-0.73	-0.67
조피볼락	-1.25	-1.00
돔	-0.57	-
방 어	-1.00	-
농 어	-0.20	-

주 : 1) 정명생·임경희, 『활어 소비구조 분석에 관한 연구』, 한국해양수산개발원, 2003.

2) 이계임 등, 『수산물 수급실태 분석과 중장기 전망에 관한 연구』, 해양수산부 용역과제, 2003.

이상과 추정된 양식어류 수요의 가격 탄성치 등을 이용하여 2003년도 적조 미발생시 양식어류의 가격(P_0)과, 적조발생 상황에서 황토 미살포시의 양식어류 가격(P_1) 등을 추정하면, 각각 8,716원과 10,183원으로 나타났다.

지금까지 도출한 추정치들을 <식 4-7>에서 <식 4-10>까지 대입하여 2003년도 양식어류에 대한 황토살포의 경제적 편익을 추정하면 약 915억 9,700만 원으로 계산된다.

9) 2003년도의 경우 전체 양식어류 생산량 중 넙치류와 볼락류를 합한 비중이 89%에 이룸.

(2) 황토살포에 따른 비용 추정

황토살포의 경제적 타당성을 분석함에 있어서 황토살포에 따른 간접적 비용인 해양 생태계 및 생물에 미치는 영향은 고려하지 않았다. 그 이유는 첫째, 일부 과학자들에 의해 황토살포가 해양 생태계 및 생물에 부정적 영향을 준다는 주장이 제기되고 있기는 하지만, 아직 그러한 주장이 현장실험을 통해 입증되지 않았다는 점이다. 둘째, 일부 과학자들의 주장과는 반대로 국립수산과학원에 의한 현장실험에서는 황토살포가 해양 생물의 성장에 아무런 악영향을 주지 않는 것으로 나타났다는 점이다. 즉 여태까지의 황토살포의 간접적 영향에 대한 논의를 검토해 보면, 황토살포가 해양 생태계 및 생물에 부정적 영향을 준다는 결론을 내릴만한 근거가 충분하지 않다.

따라서 본 타당성분석에서 황토살포에 따른 비용으로 직접적 비용인 황토구입비(채취비 및 운반비), 황토살포를 위한 선박 및 장비 이용료, 인건비만을 포함하였다. 이와 별도로 지방자치단체에서 황토 야적장을 유지하는 데 따른 비용도 발생하지만, 이는 계량화가 쉽지 않고 다른 비용에 비해 그 규모가 미미할 것으로 판단되어 분석에서 제외하였다.

황토살포에 따른 직접적 비용은 각 지방자치단체에 문의하여 추정하였는데, 그 결과는 다음과 같이 총 118억 3,000만 원으로 산출되었다.

- 2003년도 황토 구입비 : 34억 2천만 원(<표 2-9> 참조)
 - 황토구입비 톤당 15,000원
 - 황토구입량 : 228,000톤
- 황토살포시 동원된 선박 임대료 : 58억 8천만 원
 - 선박종류별 일일 평균 임대료 : 500,000원(<표 4-4> 참조)
 - 동원된 선박 척수 : 11,752척
- 황토살포를 인한 인건비 : 16억 8천만 원
 - 일일 보통인부 인건비 : 50,000원(「물가정보」지 참조)
 - 황토살포에 동원된 인력 : 33,525명
- 황토살포에 사용된 장비비용 : 8억 5천만 원
 - 굴삭기 일일 임대료 : 353,000원(<표 4-4> 참조)
 - 황토살포에 동원된 장비의 대수 : 2,417대
- 합계 : 118억 3천만 원

<표 4-4> 황토살포에 사용된 선박 및 장비의 임대료

선박 및 장비	톤수	대수	단가(천 원)	비고
화물선	40톤급	1	590	1일 8시간 사용기준
바지선	300톤급	1	650	
형망선	10톤급	1	350	
굴삭기	0.4m ³	1	332	

5) 경제적 타당성분석 결과

<표 4-5>는 여러 가지 가정 하에서 황토살포의 경제적 타당성분석 결과를 나타내고 있다.

<표 4-5> 적조방제용 황토살포의 경제적 타당성분석 결과

구분		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3	시나리오 4	시나리오 5 (비용-편익이 같아지는 경우)
가정	1995, 2003년의 생산시설 규모의 차이(배)	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75
	1995년과 대비한 양식어류의 폐사 정도(배)	0.69	0.35	0.35	0.35	0.14
	폐사 어류의 개체당 중량(그램/미)	100	100	70	70	100
	양식어류의 가격탄력성	0.85	0.85	0.85	1.20	0.85
황토살포에 따른총편익(억 원)		916	411	263	262	118
생산자 잉여 변화(억 원)		-7	-36	-30	54	-647
소비자 잉여 변화(억 원)		923	447	293	208	765
황토살포 비용(억 원)		118	118	118	118	118
황토살포에 따른 순편익(억 원)		798	292	145	144	0
편익-비용 비율(배)		7.74	3.47	2.22	2.21	1.00

<시나리오 1>은 앞에서 2003년도 황토살포에 따른 편익과 비용을 추정하면서 적용하였던 가정을 바탕으로 한 것이다. <시나리오 1>에 따른 타당성 평가 결과는 편익-비용 비율이 무려 7.74배에 이르러서, 적조방제용 황토살포의 경제적 효과가 매우 높음을 나타내고 있다. 물론 이러한 분석결과는 과학적 실험 혹은 모니터링 결과를 바탕으로 한 것은 아니지만, 전복에 대한 방제 효과를 전혀 고려하지 않았고 적조에 의한 실제적인 피해범위를 1995년에 비해 30% 이상 낮다고 가정하는 등 여러 가지 보수적 가정을 바탕으로 한 것임을 고려할 때, 적조방제를 위한 황토살포가 경제적 타당성을 갖고 있음을 강력히 시사하는 것이라고 할 수 있겠다.

<시나리오 2, 3, 4>는 표준안에 따른 경제적 타당성 분석시 적용하였던 것에 비해 한층 더 보수적인 가정을 바탕으로 분석한 것이다. 특히 <시나리오 2, 3, 4>에서는 동일한 조건일 때 2003년도 적조에 의한 실제적인 피해 범위 및 정도가 1995년의 35%에 불과하다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 그럼에도 불구하고 각 시나리오의 편익-비용 비율은 2.0을 넘고 있다. 즉, 이 경우에도 황토살포에 따른 편익이 비용의 2배를 넘고 있음을 나타내고 있는 것이다. 물론 <시나리오 2, 3, 4>에서도 전복에 대한 방제 효과는 고려되지 않았다.

<시나리오 5>는 나머지 가정들을 <시나리오 1>에서 적용한 것과 동일하게 했을 때, 황토살포에 따른 편익과 비용이 같아지기 위해서는 적조에 의한 실제적인 피해 범위 및 정도를 1995년에 비해 어느 정도 낮게 잡아야 하는가를 나타내기 위한 것이다. <시나리오 5>에 따른 분석 결과, 황토살포에 따른 순편익이 '0'보다 작아지기 위해서는, 동일한 조건 하에서 2003년 적조의 실제적인 피해 범위 및 정도가 1995년도 적조의 14% 이하가 되어야 하는 것으로 나타났다. 그러나, 이는 2003년 발생한 적조의 밀도나 피해발생 건수 등을 고려할 때 다소 비현실적인 가정인 것으로 판단된다.

또 본 타당성분석시에는 2003년도에 대규모 수산생물 피해를 가져 온 태풍 '매미'의 영향도 고려하였다. 그러나 태풍으로 인한 피해는 타당성분석 결과에 큰 변화를 가져오지 않는 것으로 판명되어 그에 대한 기술은 생략하였다.

결론적으로 지금까지의 분석 결과는 황토살포가 해양 생태계 및 생물에 미치는 2차적 영향이 없다고 가정할 경우에 적조방제용 황토살포의 경제적 타당성이 충족되고 있음을 시사하고 있다.

2. 적조방제용 황토살포에 대한 어업인들의 의견조사

1) 조사개요

적조방제를 위한 황토살포가 경제적 타당성을 충족한다 하더라도 황토살포로 인해 피해를 입고 있거나 피해를 입고 있다고 생각하는 일부 집단이 존재한다면, 후생경제학적 관점에서는 적조방제용 황토살포가 반드시 사회의 후생수준을 증진시켰다고 말할 수는 없다. '파레토 안전(Pareto Safety)'의¹⁰⁾ 기준에서 황토살포가 사회의 후생수준을 증진시켰다는 결론에 도달하기 위해서는, 황토살포에 따른 수혜자는 존재하되 그로 인한 피해자는 발생하지 않아야 하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 적조방제용 황토살포의 전체적인 경제적 효과에 대한 분석뿐만 아니라, 황토살포에 대한 찬성 및 반대의 입장에 있는 어업인 집단의 분포를 확인하고 그 이유를 파악하기 위하여 어업인을 대상으로 한 설문조사를 실시하였다.

조사대상자는 종사 어업의 유형과 거주 지역을 고려하여 무작위로 98명을 추출하였다.¹¹⁾ 조사대상자 중 거주하는 어촌지역에서 황토살포를 실제로 경험한 비율은 46%에 이르는 것으로 나타났다(<표 4-6> 참조).

조사방법은 미리 작성된 조사표를 바탕으로 조사원이 전화 통화 및 방문을 통해 조사대상자와 면담하는 방식으로 이루어졌다. 조사는 2004년 10월 21일부터 10월 30일까지 열흘에 걸쳐 실시하였다.

조사내용은 적조가 어업경영에 미치는 영향, 적조방제용 황토살포에 대한 찬성 여부 및 그 이유, 그리고 현재의 황토살포 방식의 개선 필요성 등이다.

10) '파레토 안전'은 사회 구성원인 어느 개인의 효용 감소 없이 다른 개인의 효용 증가가 이루어질 수 있는 상태를 말한다.

11) 본 조사는 비확률적 표본추출법을 사용하였으므로, 조사결과의 정확도에 대한 통계적 검증은 불가능함. 그러나 조사의 일차적 목적이 황토살포에 대한 찬성 및 반대 집단의 존재를 확인하는 데에 있으므로, 이러한 표본추출법을 통해서도 조사의 목적을 달성하는 데에는 무리가 없다고 판단됨.

<표 4-6>

조사대상자의 종사 어업 및 지역별 분포

지역	어류양식업 해상가두리	어류양식업 육상수조식	패류 양식업	해조류 양식업	어선어업 및 기타	계
동해안 (울산, 기장)	0	8	3	6	3	20
통영시	10	2	5	0	3	20
남해군	5	1	12	0	2	20
여수시	10	1	2	0	5	18
완도(고흥)	7	0	2	8	5	20
계	32	12	24	14	16	98

2) 조사결과분석

(1) 적조가 어업경영에 미치는 영향

적조가 어업경영에 미치는 영향에 대하여, 전체 응답자의 37%가 ‘심각하다’고 답변하였으며, 25%는 ‘약간의 영향을 준다’, 그리고 39%는 ‘거의 영향을 주지 않는다’고 답하였다. 종사어업별로는 육상수조식 양식, 패류양식, 가두리 양식에 종사하는 어업인 중에서 적조의 영향을 인식하는 비율이 높았다(<표 4-7> 참조).

적조의 영향을 크게 받지 않는 것으로 알려진 패류(연체동물 포함)양식 어업인과 어선어업에 종사하는 어업인들 중에서 적조의 영향을 인식하는 비율이 예상보다 높게 나타난 것은 조사대상 어업인들이 이들 어업 이외에 어류양식을 겸업하는 경우가 많고, 답변자 중 최근 적조에 의한 피해가 컸던 전복양식 어업인이 다수 포함되었었기 때문인 것으로 분석된다.

종사어업의 유형보다 황토살포의 경험 여부에 따라 적조의 영향을 인식하는 정도에 큰 차이가 나타났다. 거주지역에서 황토살포를 경험한 조사대상자 중 ‘적조가 어업경영에 심각한 타격을 준다’고 답변한 비율이 62%에 달했으나, 비경험자 중에는 17%에 불과하였다. 이는 적조발생시 그 피해가 심각할 것으로 예상되는 지역을 중심으로 황토살포가 이루어졌기 때문인 것으로 풀이된다(<표 4-8> 참조).

<표 4-7> 종사 업별 적조가 어업에 미치는 영향에 대한 인식

구 분	답변비율(%)					
	전체	가두리 (어류)	육상수조식 (어류)	패류	해조류	어선어업 및 기타
심각한 타격을 준다	36.7	40.6	91.7	45.8	14.3	31.2
약간의 타격을 준다	24.5	31.2	0.0	29.2	14.3	31.2
거의 영향을 주지 않는다	38.8	28.2	8.3	25.0	71.4	37.6
합 계	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

<표 4-8> 거주지역에서의 황토살포 경험 여부에 따른 적조의 영향에 대한 인식

구 분	답변비율(%)	
	황토살포 경험자	황토살포 비경험자
심각한 타격을 준다	62.2	17.0
약간의 타격을 준다	26.7	22.6
거의 영향을 주지 않는다	11.1	60.4
합 계	100.0	100.0

(2) 적조방제용 황토살포에 대한 입장

전체 응답자의 57%가 적조발생시 황토살포에 대해 찬성 의사를 표시하였고, 20%는 유보적인 입장을 보였다. 그러나 22%는 반대 입장을 표명하였고 그 중 1/4은 '적극적으로 반대한다'고 답변하여, 본 조사를 통해 적조방제용 황토살포에 반대하는 어업인 집단이 분명히 존재함을 확인할 수 있었다(<표 4-9> 참조).

종사업별로는 패류양식 종사자 중에 황토살포를 반대하는 비율이 높았는데, 이는 황토살포에 따른 2차적 영향이 주로 패류와 연체동물 등에서 나타날 가능성이 높기 때문인 것으로 판단된다.

<표 4-9>

적조발생시 황토살포에 대한 찬성 여부

구 분	답변비율(%)					
	전체	가두리 (어류)	육상수조식 (어류)	패류	해조류	어선어업 및 기타
적극적으로 찬성	13.3	2.0	5.1	2.0	1.0	3.1
찬성하는 편	43.9	16.3	2.0	9.2	7.1	9.2
모르겠다	20.4	9.2	3.1	3.1	4.1	1.0
반대하는 편	17.3	4.1	2.0	7.1	1.0	3.1
적극 반대	5.1	1.0	0.0	3.1	1.0	0.0
합 계	98	32	12	24	14	16
리커트 5점 척도	3.43	3.43	3.83	3.00	3.43	3.75

황토살포에 대한 입장에 있어서도 황토살포 경험자와 비경험자 사이에 차이를 보이고 있다. 거주지역에서 황토살포를 경험한 조사대상자 중에는 황토살포를 찬성하는 비율이 65%로서 황토살포를 경험하지 않은 조사대상자의 찬성비율 57%에 비해 높게 나타났다. 반대 의사를 표명한 비율에 있어서는 황토살포 경험자(19%)가 비경험자(28%)보다 낮았다(<표 4-10> 참조).

<표 4-10>

황토살포 경험자와 비경험자의 황토살포에 대한 입장

구 분	답변비율(%)	
	황토살포 경험자	황토살포 비경험자
적극적으로 찬성	21.7	6.5
찬성하는 편	43.5	50.0
모르겠다	15.2	28.3
반대하는 편	13.0	23.9
적극 반대	6.0	4.3
합 계	46	52
리커트 5점 척도	3.61	3.12

황토살포에 찬성한 응답자를 대상으로 그 이유를 질문한 결과, 응답자의 25%는 ‘황토살포가 적조피해를 줄이는 데 효과가 있다고 확신하기 때문’이라고 답하였다. 반면 응답자의 54%는 ‘황토살포가 적조피해를 줄이는 데 효과가 있다고 들었기 때문’이라고 답하였으며, 20%는 ‘다른 방법이 없으니 황토라도 살포해야 한다’고 답하였다. 즉 적조방제용 황토살포를 찬성하는 어업인들 중 대다수는 적조발생시 황토살포를 지지하고 있기는 하지만 그 효과는 확신하지 못하는 것으로 나타났다(<표 4-11> 참조).

<표 4-11>

황토살포에 찬성하는 이유

구 분	답변비율(%)
적조피해 줄이는 데에 효과 있다고 확신	25.4
적조피해 줄이는 데에 효과 있다고 들었기 때문	54.3
다른 방법이 없으므로 황토라도 살포해야 한다.	20.3
합 계	100.0
답변자 수	59

황토살포를 반대하는 조사대상자에 대해서도 그 이유를 질문하였는데, 응답자의 60%가 ‘황토살포로 인해 어업자원이 폐사하기 때문’이라고 답하였다. 또 26%는 ‘황토살포로 인한 수중환경 악화’, 13%는 ‘황토살포가 적조피해를 줄이는 데 아무런 효과가 없기 때문’이라고 답하였다. 이러한 조사결과를 바탕으로 할 때 황토살포에 반대하는 어업인의 대다수는 황토살포의 2차적 영향을 우려하고 있는 것으로 해석할 수 있다(<표 4-12> 참조).¹²⁾

12) 그러나 설문조사 이후에 황토살포에 반대하는 일부 조사대상자를 대상으로 별도로 추가적인 조사를 실시한 결과, 황토살포에 반대하는 어업인들 중에서도 상당수가 황토살포가 해양생물을 폐사시키는 2차적 영향을 갖고 있는지에 대해서는 확신하지 못하는 것으로 나타났다.

<표 4-12>

황토살포에 반대하는 이유

	답변비율(%)
적조피해 줄이는 데에 아무런 효과 없다.	13.0
황토살포로 인해 다른 어업자원이 폐사하기 때문	60.9
황토살포로 수중환경 악화	26.1
합 계	100.0
답변자 수	23

(3) 황토살포 방식에 대한 인식

현재의 황토살포 방법에 대해 질문한 결과, 응답자의 1/3은 ‘별문제가 없다’고 답한 반면, 응답자의 2/3는 ‘문제가 있기 때문에 개선되어야 한다’고 답하였다. 즉 대다수의 어업인들은 황토살포에 대한 찬성 여부를 떠나 그 방법에 문제가 있다고 인식하고 있음을 알 수 있다(<표 4-13> 참조).

<표 4-13>

황토살포 방법에 대한 인식

구 분	답변비율(%)
현재의 황토살포 방법에 별 문제 없다.	33.7
문제가 있기 때문에 개선되어야 한다.	66.3
합 계	100.0
답변자 수	77

황토살포 방법의 개선방안을 묻는 질문에 대해서는 응답자의 38%가 ‘연구기관 등에서 황토살포의 효과를 확인한 후에 시행해야 한다’고 답하였는데, 이는 앞에서 많은 어업인들이 황토살포의 효과를 확신하지 못하는 것으로 나타난 조사결과와 부합하는 것이라고 할 수 있다. 또 응답자의 36%는 ‘황토를 고르게 분쇄한 후 살포해야 한다’고 답하였으며, 26%는 ‘양식어장을 중심으로 선택적으로 살포해야 한다’고 답하였다. 이러한 조사결과는 응답자의 60% 이상이 황토의 과다 살포를 우려하고 있음을 시사하고 있다(<표 4-14> 참조).

<표 4-14>

황토살포 개선방안에 대한 의견

구 분	답변비율(%)
연구기관 등에서 황토살포의 효과를 확인한 후에 시행	38.1
마구잡이식 살포를 지양하고, 황토를 고르게 분쇄한 후 살포	35.7
양식어장을 중심으로 선택적으로 살포해야 한다.	26.2
합 계	100.0
답변자 수	42

3. 요약 및 시사점

황토살포에 대한 경제적 타당성분석 결과는 매우 긍정적인 것으로 나타났다. 그러나 이는 황토살포가 해양 생태계 및 생물에 대해 갖는 2차적 영향이 없다는 가정을 바탕으로 하고 있어서, 황토살포의 2차적 영향을 실제로 어떻게 인식하느냐에 따라서 사회경제적 관점에서의 타당성은 달라질 수 있다.

설문조사를 통해 절반 이상의 어업인들이 적조방제용 황토살포에 대해 긍정적으로 인식하는 것으로 나타났지만, 한편으로는 상대적으로 소수이기는 하지만 황토살포에 반대하는 어업인 집단도 존재함을 확인할 수 있었다. 황토살포에 찬성하는 어업인들 중 다수는 황토살포의 효과를 확신하지는 못하고 있는 것으로 나타났다. 한편 황토살포에 반대하는 어업인들은 황토살포가 해양 생태계 및 생물에 미치는 부정적 영향을 우려하고 있는 것으로 나타났다.

이러한 결과를 고려할 때, 공공기관에 의해서 황토살포의 적조방제 효과와 2차적 영향이 명백하게 규명될 때까지는 적조발생시의 황토살포에 관한 사회적 합의는 완전히 이루어지기 힘들 것으로 보인다.

또 어업인들의 대다수는 현재의 황토살포 방식에 대해 문제점을 인식하고 있는 것으로 나타났다. 상당수의 어업인들은 공공기관에서 황토살포의 방제효과를 규명한 후에 사업을 시행하기를 바라고 있으며, 또 황토의 과도한 살포를 우려하여 황토를 고르게 분쇄한 후 살포하거나 양식어장을 중심으로 선택적으로 살포하기를 바라고 있는 것으로 나타났다.

이상의 분석결과를 바탕으로 앞으로 공공부문에서 황토살포와 관련하여 추

진해야 할 과제를 제시하자면, 단기적으로는 과다 살포가 이루어지지 않도록 현재의 황토살포 방식을 개선해 나가야 하며, 중장기적으로는 황토살포의 적조 방제 효과와 해양 생태계 및 생물에 미치는 2차적 영향을 분명히 규명하여 어업인에게 홍보하는 일이라고 할 수 있겠다.

제 5 장 황토살포의 문제점 및 개선방안

1. 외국사례분석

1) 세계의 적조 동향

적조는 사람의 눈에 매우 잘 띄는 현상이므로, 연구의 대상이 된 것도 상당히 이른 시대부터였다. 1844년에는 S. T. Walker가 멕시코 만의 어류 폐사에 관하여, 1855년에는 W. Webb이 적조생물인 *Noticula miliaris*에 관해 기록하고 있다. 발생현상으로는 1858년 H. J. Carter가 폼페이 섬 연안역에서 발생한 적조현상을 기술하고 있다. 이후 북아메리카를 중심으로 하여 유럽, 아시아, 아프리카 등, 세계의 각 해역에서 적조발생에 관한 보고가 발표되고 있다. 일본에서는 1891년에 노모토(野元), 마루가와(丸川)가 아고 만(英虞灣)의 적조를 보고한 것이 학술보고의 효시였다.

이 후 많은 적조관련 논문이 있지만, 대부분은 적조현상의 추이, 적조생물의 종류, 적조발생의 환경, 적조에 의한 어업피해 등에 관한 기록이 주류를 이루고 있다. 특히 적조현상이 일어나기 전부터 소멸까지를 일관하여 조사한 예는 거의 없다. 일부 적조생물의 분류·동정은 극히 많은 문제를 안고 있고, 보고된 적조생물종에 관한 의문이 전혀 없다고는 할 수 없다. 이는 편모조 등의 배양기법이 비교적 근년에 진보한 때문에 생리·생태학적 지식이 불충분한 것에도 기인한다.

현재 적조뿐만 아니라 유독종에 의한 어패류의 독화 현상은 남아프리카에서 북극의 스칸디나비아 반도와 북미 알래스카까지 거의 모든 부동(不凍)의 전세계 연안에서 발생되고 있다. 발생해역의 시기는 계절에 관계없이 거의 연중 발생하고 있다. 특히 온대 지방에서는 봄철에서 가을철까지, 북반구의 북위도 지역 국가에서는 7~8월 여름철에, 그리고 남반구의 호주나 뉴질랜드 등지에서는 9월부터 3월까지 발생하고 있다. 적조를 일으키는 원인생물 종류 수도 발트 해 연안에서의 남조류 적조와 호주연안에서 *Nodularia spumigena* 등 점점 늘어가고 있다.

또한 마비성 패독을 일으키는 *Alexandrium tamarense*, *A. catenella*, *Gymnodinium*

*catenatum*의 독소와 설사패독을 일으키는 *Dinophysis* spp.에 대한 연구가 가장 많은 비중을 차지하고 있다(국립수산진흥원, 1993). 독성 조류와 그것들이 내는 독소는 60년대부터 30개국 이상에서 수백 명의 학자들에 의해 연구되어 왔다. 국제적 토론과 협력단체들(DIEM, IOC, IUPAC)은 매년 정기적 모임을 가지며, 분류학자, 독성학자, 화학자, 위생학자와 해양생물학자의 도움을 받고 있다(Lassus, 1990).

2) 일본

일본은 적조방제를 위하여 점토살포를 개인사업자 중심으로 실시한 적이 있으나 정부차원에서의 대량 살포는 이루어지지 않았다. 그러나 2000년 들어서 야쓰시로(八代) 만 연안에서 유해적조가 발생하여 약 39억 엔의 수산피해가 발생하자 황토를 일부 살포하고 있다.

그러나 일본에서의 황토살포는 양식업자 중심으로 스스로 실시하고 있으며 우리나라와 같이 황토살포에 대한 정부지원이나 세부적인 살포기준 등이 마련되어 있지는 않다. 다만 화학약품, 초음파, 해면회수, 응집흡착제에 의한 적조 생물 구제기술연구가 이루어졌으나 실용화되지는 않은 상황이다. 최근 세토나(瀬戸) 내해 수산연구소에서 미생물을 이용한 적조구제기술을 개발하여 효능도 인정되었지만 어업인들과 지자체의 반대로 실용화는 이루어지지 않았다.

3) 미국

미국에서는 1950년대 말 적조구제를 위한 황산동을 살포하였으나 환경오염 문제가 발생하여 어떠한 물질도 적조구제를 위하여 바다에 살포하지 못하고 있는 실정이다. 그 후 1970년대까지 화학물질을 이용한 물질개발이 있었으나 성공을 거두지 못했고, 1990년대에는 천적을 이용한 생물학적 방법이 고안되었으나 생태계에 미치는 영향으로 인하여 실용화가 이루어지지 않은 상황이다. 다만 1990년대부터 우리나라에서 황토를 이용한 적조구제를 보고 이를 활용할 수 있는 연구가 있었으나 미국산 황토는 인 함유량이 많아 도리어 부영양화 문제가 될 수 있어 흡착제를 이용한 방식을 개발 중에 있다.

2. 황토살포의 문제점

1) 적조발생 기작 규명 부족

적조 발생의 조기 예측 및 이동·확산 예보를 위해서는 우선적으로 적조 발생의 기작에 대한 규명이 선행되어야 한다. 1995년 이후 우리나라 연안에 가장 심각한 적조피해를 일으키고 있는 종은 많은 연구를 통해서 *C.polykrikoides*로 알려져 있으며, 전남 고흥군 나로도 인근해역에서 최초로 발생하여 남해안 일대로 이동·확산되고 있는 것으로 조사되고 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 이 종에 의한 적조발생 기작을 포함한 근본적인 문제 해결을 위한 원인규명이 이루어지지 않은 실정이다.

즉 적조발생 전·후의 해양, 적조발생 메커니즘, 환경조건이 갖추어지고 적조 생물의 유입이 이루어졌을 때 어떠한 기작에 의해서 그렇게 짧은 시간에 개체 수의 증식이 가능한지, 적조 발생 후의 거동, 적조의 발생과 소멸과정 등이 명확히 규명되어 있지 않다는 것이다. 따라서 보다 정확한 적조발생상황 규명 및 대책수립이 이루어질 수 없다는 것이다.

2) 황토살포가 생태계에 미치는 영향

적조방제용 황토살포에 대하여 가장 많은 논란은 과연 황토살포가 해양생태계에 영향을 미치지 않는 것인가이다. 이에 대하여 학계 및 연구소에서 일부 단편적인 조사와 실험이 이루어지고는 있으나 아직 명확히 규명되었다고 할 수는 없다. 황토의 경우 자연물질이기 때문에 바다에 살포하고 저층에 쌓인다 해도 큰 문제가 없으며 더욱이 객토의 효과가 있다고도 한다. 더욱이 그 살포량이 바다면적에 비하여 대단히 미약하고 매년 연중 살포하는 것이 아니기 때문에 문제가 없다는 것이다.

그러나 해양생태계의 물리, 화학, 지질 및 생물학적 특성에 따라서는 그 영향이 다양할 수가 있다. 약 10여 년간 황토를 살포하였기 때문에 이제는 해양생태계에 어떻게 영향을 미치는지에 대하여 명확한 규명을 할 때가 되었다고 할 수 있다. 또한 적조구제물질을 해상에 투하하는 적합한 기준도 보다 강화하여야 할 것이다.

3) 황토 과다살포 및 비효율적 살포방식

적조방제를 위한 황토살포의 문제점으로는 우선 황토살포방식의 문제점을 들 수 있다. 1995년 대규모 적조가 발생하여 많은 수산피해를 입은 이후 1996년부터 유해적조 발생시 적조방제를 위하여 비교적 환경친화적이며 적조구제 효율도 우수한 황토를 사용하고 있다.

현재 권장하고 있는 황토의 적정 살포량은 m^2 당 100~400g이지만 실질적으로 현장에서 사용하고 있는 양은 이보다 많을 것으로 추정된다. 유해적조는 1993년도 이후 매년 반복 발생하고 앞으로도 당분간 계속될 것으로 전망해 볼 때 매년 저층에 퇴적되는 황토의 양도 증가할 것으로 예상된다.

이러한 현상은 황토살포 체제상의 문제점과 어업인들의 인식부족에 기인하는 바가 크다. 즉 현재 황토살포는 자치단체에서 용역업체와¹³⁾ 계약하고, 동원된 선박에 황토를 할당시켜 살포하도록 하고 황토살포 비용을 지불하고 있다. 그러나 자치단체에서는 담당인력의 한계로 인해 해상에서 수행되고 있는 황토의 적정살포량과 해역에 대한 감시감독이 어려운 실정이다.

황토살포의 방식도 적조발생시 선박에서 황토를 바로 바다에 대량 투입하기 때문에 황토살포 효과도 떨어지고 사업비용 증가뿐만 아니라 저층에 많은 양의 황토가 축적되어 생태계에 악영향을 미칠 수도 있다. 또한 수산피해가 예상되는 해역에만 살포하는 것이 아니라 비교적 넓은 바다를 대상으로 살포하고 있어 그 문제는 더 크다.

적조발생 등으로 인해 가두리 내의 양식생물이 폐사되었을 경우에는 단시간 내에 부패되어 양식생물의 연쇄적인 폐사와 이차수질오염 문제를 야기한다. 그러므로 최단 시간 내에 폐사어를 가두리로부터 제거해야만 하는데, 현재 어업인들이 수동으로 이러한 제거작업을 하기 때문에 많은 시간과 인력이 소요되고 있어 비효율적이다.

4) 대체기술개발의 부족

현재 우리나라에서 적조방제기술이 개발되었거나 개발 중인 것은 황토를 제

13) 경남상도는 해수어류조합, 전라남도는 공개입찰에 의한 업체임.

외하고 약 15여 종이 있다. 그러나 대부분 기술적으로는 가능하나 현장에서 대량의 적조를 방제하기에는 한계가 있고, 경제적 측면에서 많은 비용이 소요되어 황토를 대체할 만한 수준은 아니라는 것이 일반적인 견해이다.

3장과 4장에서 보았듯이 황토의 적조방제 효과는 뛰어나며 경제적으로도 상당히 긍정적이라는 평가다. 그러나 품질이 좋은 황토가 무한정 있는 것도 아니고 아직 해양생태계에 미치는 영향이 명확히 규명되지 않았기 때문에 황토에만 의존하는 것은 한계가 있다고 할 수 있다.

5) 적조피해보상

적조는 우리나라뿐만 아니라 일본, 미국, 캐나다 등을 비롯한 전세계 많은 나라에서 발생하고 있다. 그러나 대부분의 선진국에서는 적조현상 자체가 연안 오염에 의해 나타나는 자연현상이고, 수산피해 역시 이로 인해 부수적으로 발생하는 현상으로 인식하여 큰 사회적 이슈로 부각되지 않고 있다.

그러나 우리나라는 적조가 사회적 문제로 부각되고 있고 재해보상법에 의하여 정부에서 직접 피해보상을 실시하고 있다. 이처럼 외국과 비교해 볼 때 우리나라의 경우는 적조에 대한 인식이 인재로 보는 경우가 많고 정부가 직접 보상을 함으로써 많은 사회적 비용이 발생하고 있다. 또한 보상과정에서 불법이 야기되고 많은 집단민원이 발생하는 등 사회적으로도 바람직스럽지 못한 현상들이 매년 되풀이되고 있다.

6) 황토관리

적조방제용으로 사용되는 황토는 시·도에서 매년 적조가 발생하기 이전에 구입하여 야적하고 있다. 그러나 그 기간이 장기이고 임야 등 공터에 노출되게 관리함으로써 눈이나 비가 오면 씻겨 나가면서 품질이 떨어지고 유실되는 사례가 많다.

또 다른 문제점으로는 적조방제에 적합한 양질의 황토를 조달하는 데 한계가 있을 수 있다는 것이다. 황토는 주로 임야에서 채굴하는데 매년 지금과 같이 황토가 살포된다면 중국에는 황토 공급 부족현상이 나타날 수 있다.

3. 개선방안

1) 적조발생 기작 규명연구

적조발생 기작에 대한 규명연구의 방향은 다음과 같다. 첫째, 적조가 특정해역에 발생하기 위해서는 기본적으로 적조생물이 증식하기 위한 조건이 갖추어져야 한다. 따라서 해수유동을 포함한 환경 조건(수온, 염분, 일조량, 영양염류, 클로로필 등)들에 대한 체계적인 조사와 분석이 이루어져야 한다. 특히 우리나라 적조발생에 대하여 적조 격년제 발생설과 쿠로시오 해류 이동설 등 다양한 이론들이 제기되고 있음을 감안할 때, 적조발생 기작연구는 수온과 염분과의 관계뿐만 아니라 쿠로시오 해류의 이동과 적조발생과의 관계 등을 검증할 필요가 있다. 이러한 연구는 단순히 적조발생 기작의 연구를 넘어선 해양생태계 측면에서 이루어져야 할 것이다.

둘째, 적조생물이 증식하기 좋은 환경조건이 갖추어져 있다고 하더라도 적조생물의 유입 여부에 따라서 적조발생 여부가 결정된다. 따라서 이들 적조생물들이 어디에서 어떠한 경로를 통해서 특정해역에 유입되는가에 대한 연구는 환경조건을 규명하는 것만큼이나 중요하다. 예를 들어, 많은 편모조류 적조생물들이 환경 조건에 따라서 휴면포자(resting cyst)를 형성하였다가 호적조건이 갖추어지면 발아하여 적조를 일으키는 것으로 알려져 있다. 그러나 국내에서 적조를 일으키고 있는 적조생물의 휴면포자 존재 여부와 어떠한 종이 휴면포자를 형성하는지에 대한 연구는 아직도 미진한 상태이다.

셋째, 환경조건이 갖추어지고 적조생물의 유입이 이루어졌을 때 어떠한 기작에 의해서 그렇게 짧은 시간에 개체 수의 증식이 가능한지에 대한 규명을 위하여 환경조건과 적조생물의 유입이 있고, 그 다음 급속한 증식을 일으키게 하는 일종의 방아쇠(triggering) 역할을 하는 기작을 규명하여야 할 것이다.

넷째, 적조생물들의 이동·확산과정에서 나타나는 수평/수직적인 이동에 대한 규명 즉 적조발생 후의 거동에 관한 규명을 하여야 할 것이다.

다섯째, 적조의 발생과 소멸과정에 대해서는 지금까지의 연구 결과에 의하면 *C.polykrikoides* 적조는 전남 고흥군 나로도 인근해역에서 발생하여 남해안 일대로 이동, 확산되는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 결과를 뒷받침할만한 충분한 관측 자료 및 분석 결과는 나오고 있지 않다. 이를 위해서는 같은 시기

타 해역에서의 환경조건들에 대한 충분한 관측과 분석결과들이 비교 검증되어야 한다. 이는 적조생물의 초기발생해역으로부터 타 해역으로 이동·확산되는지 아니면 동시 다발적 또는 시차를 두고 타 해역에서 적조가 발생하는지를 결정하는 것으로서 적조생물의 이동과 확산 예보에 있어서 대단히 중요한 사항이다.

2) 해양생태계에 미치는 영향분석

황토살포방식을 계속 사용하기 위해서는 최우선적으로 황토살포로 인한 해양생태계의 영향을 규명하여야 할 것이다. 이론적이거나 선행적인 수준의 영향분석이 아닌 현장에서 다양한 형태의 영향을 추적조사하고 분석하여야 할 것이다.

따라서 다양한 분야의 많은 연구인력이 투입되어 현장에서 비교실험 등이 수행되어야 할 것이다. 이러한 연구는 적조발생 기작연구와 연계하여 추진하는 것이 바람직할 것이다. 또한 이러한 해양생태계에 미치는 영향이 규명되면 새로운 적조방제 대체기술 개발 및 적용시 이러한 기술을 응용하여 사전 검증을 할 수도 있을 것이라고 여겨진다.

3) 고품질 황토살포 및 살포방식 개선

황토살포로 인한 영향을 최소화하면서 효과를 배가시키기 위해서는 황토살포량을 현저히 줄일 수 있는 고효율 황토의 개발과 더불어 황토 이외의 친환경적 고효율 적조방제물질의 개발이 필요하다.

적정 황토살포에 대한 감시감독을 철저히 하기 위해서는 해당지역에 거주하는 애향심과 책임의식이 투철한 명예감시요원을 적조방제선에 승선시켜 활용하는 방안을 고려해 볼 필요가 있다. 또한 현행의 일원화된 계약방식을 변경하여 황토의 채취 및 야적장까지 운반하는 것은 중장비 등이 필요하므로 기존의 계약방식으로 운영하되, 현장에서의 황토살포는 피해를 입은 양식업자 또는 어촌계단위로 방제계약을 체결하여 자기어장 주변해역에 대한 적조방제를 맡게 하는 것도 검토할 필요가 있다.

황토살포를 효과적으로 하기 위해서는 인력에 의한 방법보다는 과학적이고도 기계화된 방식을 도입하여야 할 것이다. 현재 국립수산과학원과 한국해양연

구원에서는 적조경보기, 황토살포기, 적조제거기 등과 같은 적조피해 예방 및 방제장비를 개발하였고, 현재 정부에서는 적조방제장비에 대한 보급의 확대를 위해 적조경보기와 적조제거기에 대해서 정부보조와 용자를 실시하고 있다. 특히 최근에는 황토의 살포량을 현저히 줄이면서 적조구제효율을 높일 수 있는 전해황토살포기를 개발하였다. 따라서 이러한 적조피해 예방 및 방제장비를 적극 활용하여 황토를 살포할 수 있도록 정책적으로 장비구입 지원이 있어야 하고, 어업인들이나 시·도에서는 이러한 살포방식으로 전환하여야 할 것이다.

한편 적조로 인하여 폐사한 어류를 신속히 제거할 수 있는 자동 흡입장치의 개발이 요구되고 또한 이 장치에 계수기를 부착시켜 폐사어를 계수할 수 있다면 적조피해보상에 필요한 폐사어의 산정에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 또한 적조에 의해 폐사된 어류 중 부패되지 않은 신선한 것은 사료용으로 활용될 수 있으나 현재는 대부분 폐기되고 있어 자원을 낭비하고 있다. 따라서 앞으로 폐사어를 활용하는 방안을 검토할 필요가 있다. 예로서 양어용 배합사료나 단미제품 시료로 활용하는 방법 등이 있을 수 있다.

4) 적조구제물질 및 장비 사용에 의한 구제

「수산업법」 제79조 제1항 제7호14) 및 「수산자원보호령」 제16조15)에 의하면 수산동식물의 번식·보호를 위하여 물질을 사용할 때에는 이를 해양수산부 장관 또는 시·도지사가 사용기준을 정하여 고시하도록 되어 있다. 그러나 그동안 이에 대한 기준이 마련되어 있지 않아 많은 논란이 있어왔다. 다행히 2004

14) 수산동식물의 병해방지에 관한 사항과 양식 및 병해방지를 목적으로 하는 약품 또는 물질의 사용에 관한 제한 또는 금지.

15) 제16조(자원보호를 위한 수질보전등) ① 해양수산부장관 또는 시·도지사는 법 제79조 제1항 제6호 또는 제7호의 규정에 의하여 관계기관의 장과 협의하여 수산동식물의 번식·보호를 위한 수질보전의 기준과 양식 또는 병해방지를 위한 약품 또는 물질의 사용기준이나 그 사용의 제한 또는 금지에 관한 사항을 정한다.

② 해양수산부장관 또는 시·도지사는 제1항의 규정에 의하여 수질보전의 기준·약품 또는 물질의 사용기준을 정하거나 그 사용을 제한 또는 금지한 경우에는 즉시 이를 고시하여야 한다.

③ 해양수산부장관 또는 시·도지사는 제1항의 규정에 의한 기준의 수질을 보존하기 위하여 필요하다고 인정될 때에는 관계부처의 장과 협의하여 관계인에게 이에 대한 시정 기타 필요한 조치를 명할 수 있다.

년 10월 12일(해양수산부고시 제2004-63호) 「적조구제물질·장비의 사용에 관한 기준」을 마련하여 고시함으로써 원칙을 마련한 셈이다.

동 기준에 의하면 적조구제용 물질 및 장비를 개발한 자가 이를 적조구제용으로 사용하고자 할 때에는 성분분석과 현장 실용성 평가를 받아야만 하도록 하고 있다. 평가항목은 성분분석의 경우 주로 해양환경수질을 평가하는 항목으로 구성되어 있고, 실용성 평가는 구제효율, 해양생태계 영향, 생물영향, 사용(운용)방법 및 경제성 등이다.

따라서 적조구제를 위한 물질이나 장비는 모두 동 고시에 의하여 평가를 받아야만 사용이 가능하다. 다만 자연황토, 전해수 황토살포기, 적조제거기, 제트스트리머 등 기준에 사용하고 있던 구제물질이나 장비는 동 고시에 적합한 것으로 경과조치를 두고 있다. 그러나 기준에 사용하고 있는 황토나 장비도 동 고시의 평가기준에 적합한지를 평가하여 사용하여야 할 것이고, 평가항목이나 기준도 해역의 특성에 맞게 차별화하고 강화할 필요가 있다.

5) 대체기술개발

적조방제 대체기술개발의 기본조건은 구제율, 안정성 및 경제성이라 할 수 있다. 즉 개발된 기술이 적조를 효과적으로 방제할 수 있어야 하며, 그러한 물질 및 행위로 인하여 해양생태계에 악영향을 끼쳐서는 안 된다는 것이다. 그리고 마지막으로 그러한 기술의 적용에 필요한 비용보다 이익이 많아야 한다는 것이다.

업계에서는 우리나라 적조가 매년 발생하고 그 규모가 점차 커지면서 대체기술개발에 많은 노력을 하고 있다. 정부에서는 그러한 개발된 기술의 사용여부를 결정할 때 상기에서 제시한 3가지 기준에 의하여 평가하고 적용여부를 결정하여야 할 것이다. 또한 업계의 자발적인 기술개발에만 의존하지 말고 정부는 적극적으로 그러한 대체기술 개발에 투자하는 것도 대체기술 개발을 위해서 필요할 것이다.

6) 황토관리 및 운영비 개선

황토의 야적으로 인한 유실 및 품질저하를 막기 위하여 야적장에 덮개를 씌

우는 등 구조물을 설치할 필요가 있고, 이를 위한 예산지원이 있어야 할 것이다. 그럼으로써 유실 및 품질저하를 막을 뿐 아니라 황토수급상의 문제도 해결할 수 있다.

적조방제 황토살포는 황토의 구입에서부터 운반, 살포라는 3단계 과정을 거치기 때문에 크게 황토구입비와 운영비로 구분할 수 있다. 그러나 현재 적조방제용 황토예산은 황토구입비만 정부와 지자체가 50%씩 담당하고 있기 때문에 일부 지자체에서는 운영비를 황토구입비에 포함하여 예산을 책정하고 있다. 따라서 황토구입비만으로는 황토구입량 및 단가를 정확히 산출할 수가 없다. 따라서 실질적으로 사업을 시행하기 위하여 황토구입비와 운영비를 분리하여 예산을 책정하고 운영토록 하여야 할 것이다.

7) 적조피해보상제도 개선

일본에서는 적조에 의한 수산피해가 1960년대부터 발생하였고, 2000년에는 코클로디니움 적조가 발생하여 약 400억 원의 수산피해가 있었으나 사회적인 이슈로 대두되지 못했다. 이러한 원인은 모든 국민이 적조를 자연현상으로 인식하고 있고 1964년에 어업재해 보상제도가 도입되어 적조피해 발생시 공제조합에 가입된 모든 어업인은 피해액에 상응하는 손해에 대하여 공제조합(적조특약)으로부터 보상금을 지급받고 있기 때문이다. 따라서 수산피해의 보상과 관련한 정부 또는 지방자치단체에 대한 집단민원이 거의 발생하고 않고, 적조발생시에도 정부가 아닌 어업인 스스로가 자기어장에 대한 적조피해 최소화를 위해 적조방제를 실시하고 있다.

따라서 우리나라에서도 어업피해에 관련한 어업공제제도 등을 도입함으로써 적조피해보상을 정부가 아닌 보험성격의 공제조합 등에서 담당하고, 중앙정부와 자치단체에서는 어업인이 공제조합에 가입할 수 있도록 그 비용을 부담하는 형태가 바람직할 것이다. 그럼으로써 적조피해보상과 관련한 어업인의 정부에 대한 집단민원 야기와 행정력 소모가 상당부분 해소될 수 있을 것이다.

제 6 장 결론 및 정책건의

적조라는 현상은 자연적 요인에 일어나는 현상이다. 따라서 이 지구상 바다 어디서든지 적조는 발생할 수 있고, 현재도 발생하고 있다. 그러나 이러한 적조를 발생시키는 요인 중 자연적 요인의 큰 변화가 없어도 적조가 최근 들어 부쩍 증가하게 된 이유는 산업화, 도시화 및 인구밀집 등으로 인하여 육상에서 다량의 영양분이 바다로 유입되기 때문이다.

이러한 적조에 대하여 선진국에서는 자연적 현상으로 인식하고 그다지 민감한 대응을 하지 않고 있다. 그러나 우리나라의 경우는 적조가 발생하는 수역이 주로 수 많은 양식어장이 존재하는 내만 및 연안이어서 수산피해를 발생시키기 때문에 사회적 문제로까지 확산되고 있다.

적조의 피해가 지속되고 확산되면서 우리나라는 그 방제대책으로 매년 약 20여만 톤의 황토를 구입하여 살포하고 있다. 이에 소요되는 비용은 황토구입비가 연간 약 34억 원, 이를 살포하는 데 활용되는 선박, 인원 및 장비 등이 84억 원으로 총 118억 원에 달하고 있다.

이와 같이 세계에서 유일하게 우리나라에서 적조방제를 위하여 황토를 살포하게 된 이유는 그 어떤 물질보다도 황토가 적조를 소멸시키는 데 효과가 뛰어나고 비교적 해양생태계에 안전하며 경제적으로도 유리하다고 판단하였기 때문일 것이다. 그러나 과연 황토의 구제효율이 높고, 해양생태계에 안전하며 경제적인가에 대해서 논란이 있어 왔다.

본 연구의 궁극적인 목표는 황토살포에 대한 이상과 같은 의구심에 대하여 자연과학적·사회경제적 관점에서 규명하고자 하였고, 나아가서 적조문제와 황토살포사업에 대한 개선방안을 제시하고자 하였다.

우선 황토살포의 효과는 황토처리 후 약 1시간이 경과하면 80% 이상의 효과가 있는 것으로 평가되었고, 황토를 분쇄하여 살포하거나 물과 섞어서 살포할 때 그 효과가 큰 것으로 나타났다.

황토살포의 해양생태계에 미치는 영향은 저서생물, 퇴적층의 박테리아, 어류·패류·해조에 미치는 영향으로 구분하여 분석하였다. 그 결과 저서생물상

의 변화는 황토 미살포해역과 살포해역의 저서생물의 출현종 수 및 밀도 등이 큰 차이가 없어 황토살포가 저서생물에 나쁜 영향을 끼친다고 말할 수 없었다. 퇴적층에 서식하는 일반 박테리아와 오염지표가 되는 박테리아의 개체 수도 황토 미살포구와 차이가 없어 황토살포 영향이 없는 것으로 평가되었다.

어류에 미치는 영향은 참돔, 쥐치, 넙치, 조피볼락 등을 대상으로 황토살포 후 어류 생존시험 결과 장기간 생존하였고, 굴, 피조개 및 전복 치패 등을 대상으로 한 패류에 미치는 영향실험 결과 황토살포구의 패류가 오히려 미살포구에 비해 생존율이 높아 황토살포가 패류에 좋은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

한편 해조류에 미치는 영향은 황토 0.5% 살포구와 미살포구 간에 있어 해조류의 광합성 효율에는 차이가 없었으나, 황토 1% 살포구에서는 효율이 조금 낮아졌다. 그러나 황토는 살포후 1시간 이내에 침강되므로 빛 투과 감소에 따른 해조류에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단되었다.

아울러 황토살포가 패류(피조개)의 헤모글로빈과 혈장단백질을 상승시켜 오히려 생존율이 증가하였으며, 스쿠티카 등의 어류 기생충을 박멸하는 좋은 효과도 나타났다.

결국 황토살포에 대한 자연과학적 영향분석 결과는 해양생태계에 별다른 나쁜 영향을 미치지 않는 것으로 나타나고 있다.

황토살포의 경제성분석 대상연도는 2003년으로 하되 적조가 가장 많이 광역적으로 발생하였고 수산피해도 컸던 1995년과 비교하였으며, 수산피해 대상은 주로 양식업을 하였다. 분석을 위한 가정은 i) 양식생산시설은 2003년이 1995에 비하여 5.75배 많고, ii) 양식어류 폐사정도는 2003년이 1995년에 비하여 적으며(0.14에서 0.69배), iii) 폐사어류 개체당 중량은 70g에서 100g으로 하였고, iv) 양식어류 가격탄력성은 0.85에서 1.2로 하였으며, v) 황토살포로 인한 해양생태계 및 수산생물에 대한 2차적 영향이 없다고 전제하였다.

이러한 가정 하에 황토살포의 경제성을 분석한 결과 황토살포 연간 총비용은 118억 원이고, 총편익은 118억 원에서 916억 원으로 순편익은 0억 원에서 798억 원을 나타내 편익/비용 비율은 1.00에서 7.74로 평가되었다.

순편익이 0억 원인 경우는 양식폐사가 1995년의 0.14배에 불과하고 폐사어류 중량도 70g에 불과한 반면 가격탄력성은 1.2로 대단히 부정적인 경우를 가정한 것이다. 반면 순편익이 798억 원의 경우는 다소 긍정적인 경우를 가정한 평가

결과이다. 따라서 경제적으로 볼 때 황토살포의 효과는 현실적으로 매우 긍정적이라고 평가할 수 있다.

다만 본 평가는 황토살포가 해양 생태계 및 생물에 대해 갖는 2차적 영향이 없다고 가정하였는데, 그 근거로는 자연과학적인 실험 및 일부 현장실험 결과를 바탕으로 하였다. 그러나 황토살포의 2차적 영향은 보다 면밀한 현장실험과 장기적인 관찰을 기초로 한 결과이어야 하기 때문에 만일 그러한 실험의 결과가 2차적 영향이 있다고 평가되면 사회경제적 효과는 감소될 수 있다고 할 수 있다.

한편 어업인들을 대상으로 한 황토살포에 대한 설문조사 결과는 대부분 적조방제용 황토살포에 대해 긍정적이라고 조사되었다. 다만 소수이기는 하지만 황토살포에 반대하는 어업인 집단도 있었다는 것이고, 황토살포에 찬성하는 어업인들 중 다수는 황토살포의 효과를 확신하지 못하고 있었으며, 황토살포에 반대하는 어업인들은 황토살포가 해양 생태계 및 생물에 미치는 부정적 영향을 우려하고 있었다.

이러한 결과를 고려할 때, 공공기관에 의해서 황토살포의 적조방제 효과와 2차적 영향이 명백하게 규명될 때까지는 적조발생시의 황토살포에 관한 사회적 합의는 완전히 이루어지기 힘들 것으로 보인다.

지금까지의 분석 및 연구결과를 토대로 몇 가지 적조 및 황토살포에 관한 정책적 제안을 하고자 한다. 첫째는 황토살포로 인한 해양생태계에 미치는 영향을 철저히 규명하여야 하며 이에 대한 예산을 대폭 확대하여야 한다는 것이다. 앞에서 본 바와 같이 황토살포로 인한 효과는 상당하였고, 황토살포로 인한 외부불경제효과를 제외한 순수한 경제적 평가결과도 유의할 만한 수준이었다. 그러나 황토로 인한 악영향이 분명하게 규명되지 못했다 하여 영향이 없다고는 말할 수 없다.

둘째는 적조방제 이전에 적조를 발생시킬 수 있는 육상기인 오염원을 철저히 차단하여야 한다는 것이다. 일본의 세토 내해의 예를 보면 범정부적 차원에서 육상기인 오염원을 차단한 결과 지금은 적조는 거의 없고 도리어 수산생물에 필요한 영양분이 너무 적게 유입되어 문제로 지적되고 있음을 상기할 필요가 있다. 즉 사후대책보다는 사전대책이 무엇보다도 우선시되어야 한다는 것이다.

셋째는 적조에 대한 보다 근원적인 연구가 필요하다는 것이다. 적조생물의

다양화, 적조발생 현상의 복잡화 및 적조의 장기화 등에 대한 규명을 단순히 적조 자체로만 볼 것이 아니라 해양생태계 전반을 대상으로 연구하여야 한다는 것이다. 세계에서 가장 적조가 많이 발생하는 불명예를 안고 있지만 한편으로는 적조를 통하여 해양에 관한 연구를 그 어느 나라에 못지 않게 할 수 있다는 것은 불행 중 다행이라 할 수 있다. 다만 이러한 연구를 수행하기 위한 연구인력, 기자재 및 예산이 부족하다는 것이 문제이다.

넷째는 어업인들이나 국민들에게 적조에 대한 정확한 지식을 전달하여야 하고, 황토 등 방제기법에 대한 훈련이 필요하다. 매년 여름철만 되면 적조로 인하여 온 나라가 떠들썩해지는 것은 결코 바람직하지 못하다. 자연적 현상이며 이를 해결하기 위해서는 어떻게 하여야 하는가에 대하여 일반 국민들도 자각할 필요가 있다. 더욱이 아무리 좋은 방제기술이 개발되었다 할지라도 잘못 사용하거나 과도하게 사용할 때에는 도리어 해악이 된다는 것을 이해당사자들에게 인지시켜야 할 것이다.

마지막으로 적조방제의 효율성을 기하기 위하여 단기적으로는 황토의 과다 살포가 이루어지지 않도록 현재의 황토살포 방식을 개선해 나가야 하며, 중장기적으로는 황토살포의 적조방제 효과와 해양 생태계 및 생물에 미치는 2차적 영향을 분명히 규명하여 어업인에게 홍보하는 일이라고 할 수 있겠다.

참고문헌

<국내문헌>

- 국립수산과학원, 『적조문제 해결을 위한 국가종합 기획연구 과제 개발 방안』, 2002.
- _____, 『한국연안의 적조발생 상황』, 1997~2003.
- _____, 『한국의 적조연구 편람』, 2002.
- 김성재, “적조생물의 구제 1 : IOSP에 의한 적조생물의 응집제거”, 『한국수산학회지』, Vol.33, No.5, 2000.
- _____, “적조생물의 구제 2 : 황토에 의한 적조생물의 응집제거”, 『한국수산학회지』, Vol.33, No.5, 2000.
- 김창숙, “코콜로디니움 적조에 노출된 어류의 생화학적 반응”, 『해양생물학 생태학잡지』, 254, 2000.
- _____, “코콜로디니움 적조의 어독성 : 적조에 노출된 어류의 혈액학적 변화 측면”, 『한국수산학회지(영문판)』, 3(2), 2000.
- 김창훈, “한국 연안의 유해·유독 적조조류의 발생과 독성생산”, 『한국조류학회지』, Vol.12, No.4, 1997.
- 김창훈·신재범, “한국 연안의 유해·유독 적조조류의 발생과 독성생산”, 『Algae』, 12, 1997.
- 김평중, “황토살포에 의한 해수중 영양염류의 흡착제거기구”, 『한국수산학회지』, Vol.35, No.2, 2002.
- 김학균 외, 『1998년도 한국연안의 적조발생상황』, 국립수산진흥원, 1999.
- 김학균, 『적조피해와 방제대책』, 적조 및 어장보전에 관한 심포지엄, 국립수산진흥원, 1987.
- _____, “최근 한국 연안의 유해적조와 방제전략”, 『해양연구』, 19(2), 1997.
- _____, “한국연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 변천”, 『한국수산학회지』, Vol.34, No.6, 2001.
- _____, “한국연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조와 방제”, 『Phycotoxins』, Elsevier, 1998.
- 김학균 외, 『한국연안의 적조』, 국립수산진흥원, 1997.

- _____, 『한국 연안의 적조 - 최근적조의 발생 원인과 대책』, 국립수산진흥원, 1998.
- _____, “적조예찰 및 예보자동화 연구”, 『국립수산진흥원 사업보고(적조환경 분야)』, 1998.
- _____, 『1999년도 한국연안의 적조발생 상황』, 국립수산진흥원, 2000.
- 나기환, “부유황토에 의한 적조방제 연구”, 『한국양식학회지』, 9(3), 1996.
- 박영태, “황토첨가 해양퇴적물에서 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides* 분해중 세균 군집의 변동”, 『한국수산학회지』, Vol.31, No.6, 1998.
- 박주석, “진해만의 적조현상에 관한 연구”, 『국립수산진흥원 연구보고』, 1, 1967.
- _____, “한국 근해의 모악류”, 『국립수산진흥원 연구보고』, 6, 1970.
- 박주석 · 이삼근, “한국남해의 식물플랑크톤의 분포와 수괴특성”, 『한국수산학회지』, 23, 1990.
- 서영삼 · 김정희 · 김학균, “NOAA 위성자료에 의한 해수표면 수온분포와 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생의 상관성”, 『한국환경과학회지』, 9, 2000.
- 신일식, “패류독에 관하여”, 『한국양식』, 9, 1997.
- 심재형 · 신운근 · 이원호, “광양만 식물 플랑크톤 분포에 관한 연구”, 『한국해양학회지』, 19, 1984.
- 양재삼 외, “전남 고흥해역의 유해성 적조의 발생연구 1 : 물리 · 화학적인 특성”, 『The sea』, 5, 2000.
- 이석우, 『한국근해해상지』, 집문당, 1992.
- 이영식, “*Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생기작과 대책 1 : *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 소멸의 환경 특성”, 『한국해양학회지』, 6(4), 2001.
- 이진환, “진해만의 적조원인생물에 관하여”, 『한국해양연구소 소보』, 3(2), 1981.
- 이창섭, 『유류오염의 현황과 대책, 해양오염 방지를 위한 정책 토론회』, 삼성 지구환경연구소, 1995.
- 임월애, “통영주변해역의 *Cochlodinium* 적조발생시의 식물성플랑크톤과 해양세균의 종 조성 변화”, 『국립수산진흥원 연구보고』, 57, 1999.
- 정창수 외, “1998년도 남해도 인근수역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 동물플랑크톤의 분포특성”, 『국립수산진흥원 연구보고』, 57, 1999.
- 정해진 외, “전남 고흥해역의 유해성 적조의 발생연구 2 : 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화”, 『The sea』 5, 2000.

- 조용철 · 김창숙, “황토의 광학화 반응이 매개한 적조구제효과”, 『한국조류학회지』, 16(1), 2001.
- 조은섭, “황토살포에 따른 코콜로디니움 Lectin 반응”, 『수진원연구보고』, 7, 1999.
- 조창환, “1978년 진해만 적조와 양식굴의 대량폐사”, 『한국수산학회지』, Vo.112, No.1, 1979.
- 최희구, “황토의 유해성 적조생물 *Cochlodinium* 종의 제거효과”, 한국수산학회지 Vol.31, No.1, 1998.
- 해양수산부, 『2003년 적조대책 평가 및 금후계획』, 2003. 12.
- _____, 『2004년도 적조피해 예방대책』, 2004. 2.
- _____, 『적조구제 물질 및 기술의 실용성 검토 협의자료』, 2003. 6.
- _____, 『적조방제 관계기관 연찬회』, 2003. 6.
- _____, 『적조피해 및 예방 사례집』, 2004. 6.
- _____, 『적조피해대책』, 2002. 8.

〈외국문헌〉

- Agawin N. S., C. M. Duarte and S. Agusti., “Nutrient and Temperature Control of the Contribution fo Picoplankton to Phytoplankton Biomass and Production”, *Limnol. Oceanogr.*, 45, 2000.
- Alvarino. A., “The Chaetognatha of the Naga expedition(1959~1961) in the south China Sea and the Gulf of Thailand 1 Systemetics”, *Naga Rep.* 4(2), 1967.
- Andersen, P., “Design and Implementation of Some Harmful Algal Monitoring Systems”, *In IOC Technical Series*, No. 44, UNESCO, 1996.
- Brzezinski M., and D. M. Nelson., “Interactions between Pulsed Nutrient Supplied and a Photocycle Affect Phytoplankton Competition for Limiting Nutrients in Long term Culture”, *Journal of Phycol.*, 24, 1988.
- Catteral, W. A., “The Voltage Sensitive Sodium Channel: A Receptor for Multiple Neurotoxins”, *Toxic Dinoflagellates*, Anderson, D. M., White, A. W. and Baden D. G. eds. Elsevier, 1985.
- Cembella, A. D., L. Milenkovic, G. Doucette and M. Fernandez, “In Vitro Biochemical Methods and Mammalian Bioassays for Phycotoxins”, *Manual on Harmful Marine Microalgae*, Hallegraeff, A. D., Anderson, D. M.,

- Cembella, A. D. eds, *IOC Manuals and Guides*, No.33. UNESCO, 1995.
- Conover, R. J., "Feeding Interactions in the Pelagic Zone", *Paper Delivered at Joint Oceanographic Assembly*, Edinburgh, Scotland, Sept. 1976.
- Halstead, B. W., "Poisonous and Venomous Marine Animals of the World", *Halstead, B. W. ed. Vol.1*, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D. C. 1965.
- Hunter, J. R. and G. L. Thomas, "Effect of Prey Distribution and Density on Thesearching and Feeding Behavior or Larval Anchovy *Engraulis Mordax*", *The Eearly Life History of Fish*, J. H. S. Blaxter ed., 1974.
- Kim H.G., J.S. Park and S. G. Lee., "Coastal Algal Blooms Caused by the Cyst forming Dinoflagellate", *Bull. Kor. Fish. Sooc.*, 23(6), 1990.
- Kim, C. H., "Paralytic Shellfish Toxin Profiles of the Dinoflagellate *Alexandrium* Species Isolated From Benthic Cysts in Jinhae Bay", *Korea. L. Korean Fish. Soc.* 28, 1995.
- Kim, C. S., S. G. Lee and H. G. Kim, "Biochemical Responses of Fish Exposed to a Harmful Dinoflagellate *Cochlodinium Polykrikoides*", *Jounal Exp. Mar. Bio. Eco.*, 2000.
- Kim, C. S., S. G. Lee, C. K. Lee, H. G. Kim and J. Jung., "Reactive Oxygen Species as Causative Agents in the Ichthyotoxicity of the Red Tide Dinoflagellate *Cochlodinium Polykrikoides*", *Jounal Plankton Research* 21, 1999.
- Lewis, R. J., "Detection of Ciguatoxins and Related Benthic Dinoflagellate Toxins:in vivo and in vitro methods", *Manual on Harmful Marine Microalgae*, Hallegraeff, G. M., Anderson, D. M. and Cembella, A. D. eds, *IOC Manuals and Guides* No.33, UNESCO, 1995.
- Martin, J. H., "Phytoplankton Zooplankton Relationships in Narransett Bay IV", *The Seasonal Iimportance of Grazing. Limnol. Oceanogr* 15, 1970.
- Ministry of Health and Welfare, *Standard of Food, Notice of Ministry of Healthand Welfare No.1995-34*, 1995.
- Moon C. H., "Studies on the Phytoplankton and Nutrients in the Yeosu Haeman", *Bull. Korean Fish. Soc.* 22, 1990.
- Nakai, Z., "On the Improvements on the Winkler's Method for Determining

- Oxygen in Seawater”, *Bulletin of the Fishery Experiment Station of the Government General of Chosen* 4, 1933.
- Onoue, Y. and K. Nozawa., “In Mycotoxins and Phycotoxins”, Natori, S., K. Hashimoto and Y. Ueno eds. Elsevier, Amsterdam, 1989.
- Parkash, A. J. C., “Paralytic Shellfish Poisoning in Eastern Canada”, *Fish. Res. Bd. Canada* 177, 1971.
- Parke, M. and P. S. Dixon, “Check List of British Marine Algae Third Revision”, *Journal Mar. Biol. Ass. U. K.* 56, 1976.
- Quilliam, M. A. and J. L. C. Wright, “Methods for Diarrhetic Shellfish Poisons”, *Manual on Harmful Marine Microalgae Hallegraeff, G. M., Anderson, D. M. and Cembella, A. D. eds., IOC Manuals and Guides No.33*, UNESCO. 1995.
- Roberts R. D., M. J. Waiser, O. Hadas, T. Zohary, and S. MacIntyre., “Relaxation of Phosphorus Limitation due to Typhoon induced Mixing in Two Morphologically Distinct Basins of Lake Biwa”, *Japan. Limnol. Oceanogr.* 43, 1998.
- Saha, M. K. and S. K. Konar, “Chronic Effects of Mixture of Petroleum and Emulsifier on Aquatic Ecosystem”, *Environment Ecology*, Vol.8, No.2, 1990.
- Taylor. F. J. R., “The Taxonomy and Relationship of Red tide Flagellate”, *Toxic Dinoflagellates*, Anderson, D. M., White, A. W. and Baden D. G. eds., Elsevier, 1985.
- Uye, S., “Impact of Copepod Grazing on the Red tide Flagellate *Chattonella Antiqua*”, *Mar. Biol.* 92, 1986.
- Wright, J. L. C. and A. D. Cembella, “Ecophysiology and Biosynthesis of Polyether Marine Biotoxins”, *Physiological Ecology of Harmful Algal Blooms*, Anderson, D. M., A. D. Cembella and G. M. Hallegraff, eds., *NATO ASI Series* Vol.41, 1998.

부록 : 적조방제용 황토살포에 관한 설문조사

안녕하십니까?

저희 한국해양수산개발원은 국무총리실 산하의 정부출연 연구기관으로서, 해양수산 부문의 발전을 위한 공익 연구기관입니다.

저희 개발원에서는 현재 적조방제를 위한 황토 살포의 효과에 대해 연구하고 있습니다. 이 연구를 위하여 현장에 계신 어업인 여러분의 의견을 듣고자 합니다. 그러하오니, 잠깐만 시간을 내시고 본 설문조사서에 응답해 주시면 저희가 적조 방제 대책을 수립하는 데에 큰 도움이 될 것입니다.

참고로, 답변하신 내용은 연구를 위한 통계자료 집계에만 사용되며, 외부로 유출되는 일은 절대로 없을 것입니다.

2004. 10.

조사기관 : 한국해양수산개발원(서울시 서초구 방배3동 1027 4)

담당자 : 수산어촌연구센터 연구위원 황기형 (khhwang@kmi.re.kr)

전화 : 02)2105 2863



한국해양수산개발원

※ 다음 설문내용을 읽고 해당되는 보기의 번호를 기입하시거나, 답변 내용을 직접 기재해 주십시오.

1. 귀하가 소속된 어촌계와 그 위치를 기입해 주시기 바랍니다.

- _____ 어촌계
- _____ 도 _____ 군 (시) _____ 면 (읍, 동)

2. 귀하는 현재 어떠한 어업에 종사하고 계십니까? 종사하고 계시는 어업을 모두 선택해 주십시오 _____

- ① 어류 양식업 - 해상가두리식 (주요 양식어종 : _____)
- ② 어류 양식업 - 육상 수조식 (주요 양식어종 : _____)
- ③ 패류 양식업 (주요 양식품목 : _____)
- ④ 해조류 양식업 (양식 품목 : _____)
- ⑤ 어선(정치망) 어업 (업종 : _____)
- ⑥ 신고어업 및 기타 (주요 생식품목 : _____)

3. 귀하가 어업을 경영하는 데에 있어서 적조는 얼마만큼의 영향을 줍니까? _____

- ① 적조가 어업경영에 매우 심각한 타격을 준다.
- ② 적조가 어업경영에 약간의 타격을 주지만 심각하지는 않다.
- ③ 적조가 어업경영에 거의 영향을 주지 않는다.

4. 귀 어촌계 지역에서 과거에 적조 발생시 실제로 황토를 살포한 적이 있습니까? _____

- ① 있다
- ② 없다

5. 귀하는 적조 발생시 황토를 살포하는 것에 대해 찬성하십니까? _____

- ① 적극적으로 찬성한다.
- ② 찬성하는 편이다
- ③ 모르겠다.
- ④ 반대하는 편이다.
- ⑤ 절대적으로 반대한다.

6. (황토 살포에 대해 찬성하신다면) 그 이유가 무엇입니까? 해당되는 보기를 선택하시거나 직접 기입해 주십시오. _____

- ① 황토 살포가 적조피해를 줄이는 데에 효과가 있다고 확신하기 때문이다
- ② 황토 살포가 적조피해를 줄이는 데에 효과가 있다고 들었기 때문이다
- ③ 적조피해를 줄이는 다른 방법이 없기 때문에 황토 살포라도 해야 한다.
- ④ 기타 (직접 기입해 주십시오) _____

7. (황토 살포에 대해 반대하신다면) 그 이유가 무엇입니까? 해당되는 보기를 모두 선택하시거나 직접 기입해 주십시오. _____

- ① 황토 살포가 적조피해를 줄이는 데에 아무런 효과가 없기 때문이다.
- ② 황토 살포로 인해 조개나 해조류 같은 다른 어업자원이 죽기 때문이다.
- ③ 황토 살포로 수중 환경이 악화되기 때문이다.
- ④ 기타 (직접 기입해 주십시오) _____

8. 현재의 황토살포 방법에 대해서는 어떻게 생각하십니까?

- ① 현재의 방법에 별 문제가 없다고 생각한다.
- ② 문제가 있기 때문에 개선되어야 한다.
- ③ 잘 모르겠다.

9. (황토살포 방법에 문제가 있다고 생각하신다면), 그것에 대한 개선방안은 무엇일까요? 보기 중에서 선택하시거나, 직접 기입해 주십시오. _____

- ① 연구기관 등에서 황토 살포의 적조방제 효과를 분명히 확인한 후에 시행해야 한다.
- ② 마구잡이식 살포를 지양하고, 황토를 고르게 분쇄한 후 살포하여야 한다.
- ③ 적조발생 해역 전체에 대해 황토를 살포하기보다는, 양식어장을 중심으로 선택적으로 살포하여야 한다.
- ④ 기타 (직접 기입해 주십시오) _____

10. 그밖에 적조 방제나 황토 살포에 관해 하실 말씀이 있으시면, 아래에 직접 적어 주십시오.

설문에 답해 주셔서 대단히 감사합니다.

적조방제용 황토살포의 효과분석 및 개선방안에 관한 연구

2004年 12月 27日 印刷

2004年 12月 31日 發行

編輯兼 李 廷 旭
發行人

發行處 韓國海洋水產開發院
서울특별시 서초구 방배3동 1027-4
수암빌딩

전 화 2105-2700 FAX : 2105-2800

등 록 1984년 8월 6일 제16-80호

組版·印刷/正陽社 2263-0066 정가 15,000원

판매 및 보급 : 정부간행물판매센터
Tel : 394-0337, 734-6818