

기본연구 2008-17

유류오염 실태조사 및 환경생태 복원방안 연구

- 허베이 스피리트호 유류유출 사고 사례 -

정종관 · 김종렬 · 성기준 · 황경엽

발 간 사

환경재앙으로서 허베이 스피리트호 유류오염 사고처럼 우리 국민들에게 충격을 준 일은 일찍이 없었습니다. 기름 범벅이 된 새, 하얗게 죽어간 성게, 갯가재, 조개 등 수많은 생명체의 사멸은 바다를 삶의 터전으로 살아 온 많은 지역주민에게도 충격과 분노, 좌절을 느끼게 했습니다. 그러나 방제당국과 행정기관의 신속한 대응과 함께 유류오염 피해의 확산을 온 몸으로 막아준 123만 명에 달하는 자원봉사자들의 헌신적 노력 등에 힘입어 검은 바다를 청정해역으로 다시 태어나게 하였습니다.

그러나 그동안의 외형적 성과만으로 유류유출에 따른 주민의 피해와 생태계훼손의 충격이 해소된 것은 아닙니다. 아직도 사고에 따른 지역주민의 손해배상이 이루어지지 못했고, 정상적인 생업활동으로서의 복구도 미진한 상태입니다. 비록 눈에 보이는 기름의 흔적은 사라졌다 해도 생태환경 복원은 장기적인 관점에서 모니터링과 복원계획 수립을 통해 해결해 가야 할 과제입니다. 유류유출 사고지역을 예전의 청정한 생태환경으로 복원하고 지역의 경제와 산업활력을 찾는 것은 결국 사고 이전의 깨끗한 환경으로 되살릴 수 있을 때 가능할 것입니다.

이 관점에서 유류유출에 따른 피해실태를 조사하고 유류오염 방제와 생태복원에 대한 방안을 모색하는 것은 향후 혹시 있을지 모르는 이러한 사고의 위험을 예방함으로써, 서해안지역이 오염위기를 극복하고 경제적 활력과 생태관광 지역으로 재도약하는데 기여할 수 있을 것입니다.

충청남도는 새로운 대한민국의 중심으로서, 그리고 국가발전의 성장엔진으로서 역동적인 지역발전을 거듭하고 있습니다. 이에 따라 원유를 비롯한 가스, 화학물질 등의 해상물류 유통량도 크게 늘어날 것입니다. 앞으로 이러한 유류 및 위험물류 유출사고의 발생을 미연에 예방하기 위해서라도 과거의 아픈 기억을 잘 정리하고 교훈으로 삼는다면 지역의 녹색성장을 위한 귀한 사례가 될 것입니다. 따라서 유류유출에 따른 대응 방안과 환경생태 복원의 다양한 경험을 공유하고, 환경사고 대응정책 및 사고지역에 대한 생태복원 계획의 상호연관성을 확보하여 실행력을 강화해 나가는 것이 환경재앙을 극복하는 바람직한 모델일 것입니다.

이 연구과정에서 서해유류유출환경대책 포럼을 공동개최하여 연구 방법론을 이끌어내고 체계를 정립하신 한국환경정책평가연구원 정희성 석좌위원님, 행정실무 차원에서 자문과 협조를 아끼지 않은 충청남도 서해안유류사고대책본부 권희태 본부장님

과 담당 공무원 여러분, 공동연구자로서 유류오염지역 생태환경 복원분야를 연구하신
부경대학교 성기준 교수님, 환경 잔류유분의 화학분석을 연구하신 한국석유품질관리
원의 김종렬 박사님, 유류오염지역 토양 환경영향을 연구하신 KIST 황경엽 박사님의
노고에 감사드립니다. 그리고 연구보고서의 완성도를 높이기 위해 세부내용에 대해
전문가 검토를 통해 내용을 보완해주신 한국해양연구원 심원준 박사님, 국립환경과학
원 김명진 박사님, 한국환경정책평가연구원 신용승 박사님께도 감사드립니다.

연구과정에서 많은 유류오염지역 방제현장을 확인하고 실사구시를 모토로 하여 지
식정보 생산의 네트워크 매니저로 활약한 우리 연구원의 정종관 연구위원의 노고에
감사의 뜻을 표합니다.

2008년 12월 31일

충남발전연구원장 김용웅

연구요약

1. 연구 배경 및 목적

우리나라의 대형 유류유출 사고에 대한 대응 경험은 1995년 시프린스호 사고 이후 허베이 스피리트호 사고가 처음으로 유류유출 사고에 따른 실태조사 및 환경생태 복원 등 대응방안이 미흡한 상황이다. 외국의 경우 1978년 아모코카디즈호, 1989년 엑슨발데즈호, 2002년 프레스티지호 사고 등에서 해양 유류유출 오염물질 제거, 방제 종료점 선정 방법과 기준, 환경생태 복원 방법 등에 대한 경험적, 귀납적 사례를 축적하고 있다.

유류유출 방제 관련 종료점의 설정 및 환경생태 복원시책 추진 등은 많은 이해당사자가 관련되어 있으므로 국가, 지방, 지역공동체 등 합의형성 과정이 필수적인 요소이다. 따라서 다양한 방제 및 환경생태 복원 방법론의 정립과 함께 외국의 사례분석 등을 통해 정책적 시사점을 도출할 수 있도록 해야 한다.

「허베이 스피리트호 유류오염사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법」 시행(2008. 6. 15)에 따라 유류오염 피해에 대한 실태조사와 주민 및 해양환경 등에 대한 신속하고 적절한 수습 및 복구대책을 수립·시행하기 위한 조사연구가 필요하다. 따라서 본 연구는 유류유출에 따른 유류폐기물의 처리, 유출유의 방제 및 정화작업을 통해 최종적으로 해양 및 연안 환경생태의 복원 추진을 주요 목적으로 한다.

본 연구는 지역단위의 유류오염 폐기물 처리 및 해양환경 생태계 복원을 위한 추진체계와 다양한 관련부문 이해당사자간의 협력을 토대로 통합적인 합의형성 과정을 정립하는 데에도 기여할 수 있을 것이다.

2. 주요 연구내용

본 연구에서 다룬 주요내용은 다음과 같다.

- 유류오염 폐기물의 현지처리 방안을 수립하고,
- 방제 종료점 설정은 유류유출에 의한 환경상의 영향 최소화와 함께 지역단위 복원전략의 수립·집행과 관련해 중앙-지방, 정부-지역주민간 협력을 기초로 하는 합의형성 과정(consensus process)을 거쳐,

- 방제(response), 정화작업(cleanup), 복원(restoration)을 단계적으로 이행하기 위한 복원 로드맵의 효율적인 집행과 운용을 위한 정책수단 확보방안을 제시한다.

유류유출 이후 해안정화평가팀(SCAT)의 현장조사와 방제작업에 따른 방제 성과 평가 시 현장 조사를 통해 해안선에 표착된 원유, 유화제에 의해 분산된 후 해안에 표착된 초콜릿무스 상태의 안정화물과 타르 덩어리의 성상을 분석하였다. 그 결과 2008년 1월 9일 안면읍 내파수도에서 포집된 원유시료와 유화제로 분산된 반고체상의 초콜릿무스의 성상을 비교하면 모든 성분에서 초콜릿무스가 높았다. 따라서 동일지점이라도 안정화상태의 반고상이 되면 중금속 성분이 농축됨을 알 수 있다. 한편 2008년 4월 4일 이원면 내리 꾸지나무골에서 표착된 고상의 타르 덩어리는 대체로 시간이 경과하여 성분의 함량이 높아졌다. 그러나 2008년 4월 15일 소원면 파도리 해안에서 표착된 액상의 타르는 분산된 상태로 상대적으로 성분함량이 낮게 나타났다. 그리고 2008년 10월 8일 학암포 잔존유류(lingered oil) 방제현장에서 채취한 시료를 등유에 희석하여 분석한 결과 잔존유류 성분이 거의 없는 상태로 해안에 표착된 타르보다도 중금속 농도가 현저히 낮아졌다.

유류 오염지역의 생물학적 정화방법에는 두 가지가 있는데, 첫째는 오염 지역에 영양염을 첨가하여 오염된 지역에 이미 존재하는 유류 분해 미생물의 활동을 촉진시켜 유류 분해능을 향상시키는 방법(biostimulation)이고, 둘째는 인위적으로 배양된 유류 분해 미생물을 오염지역에 첨가하는 방법(bioaugmentation)이다. 생물학적 정화방법은 광범위하게 오염된 지역을 정화하는 데에 매우 적합할 수 있는 방법이다. 원리는 생태계에서 자연적으로 정화되는 원리를 모방하되 자연상태에서 모자라는 점(잔류유분 분해속도)을 보완하여 자연정화 속도보다 빠르게 진행되도록 일련의 인위적인 조치를 하는 것이다. 이 일련의 조치로

- ① 잔류유분을 분해하는 미생물을 오염현장에 투입하는 것
- ② 부족한 영양성분을 보충하기 위하여 비료 또는 미생물제제 등을 투입하는 것
- ③ 호기성인 잔류유분 분해미생물에게 산소를 공급하는 것
- ④ 일정한 온도를 유지하는 것

미생물독성시험 방법은 생분해 활동을 방해하는 독성물질이 존재할 때 생물

학적 복구법 시행 전에 토양을 희석시키는 등의 용도를 결정하는데 이용된다. 그러나 오염현장이 장기간 방치될 경우 물질계통이 변화될 수 있으므로 복구법에 대한 처방은 될수록 신속하게 찾는 것이 바람직하며 이를 위하여 미생물 독성시험법과 별도로 호흡측정계(respirometer)에 의한 실험을 수행하는 것이 바람직하다. 호흡측정계는 미생물의 호흡활동을 통한 산소소비 속도로 미생물의 활성을 감지하는 방법으로서 호흡활동이 왕성할수록 주어진 조건이 미생물의 유류분해 활동이 적합함을 나타낸다. 산소소비속도가 가장 왕성한 "Soil+B"의 조건이 다른 실험조건에 비하여 오염토양을 정화하는데 가장 적합하다.

잔류유분오염 해안에는 대부분 질소와 인성분이 충분하지 않아 생물학적 정화 시 이를 보충해 주기 위하여 비료를 사용한다. 특히 친유성 비료는 바다로 씻겨 나가는 양도 무기질 비료에 비하여 적고 씻겨나간 비료도 물에 쉽게 용해되지 않아 부영양화가 억제될 수 있다.

3. 결론 및 정책 제언

생태 복원을 위한 적응관리(adaptive management)를 포함한 단계적 복원절차는 2단계로 고려하였다. 유출유류의 제거에 초점을 맞추는 1단계의 치유절차와 이후의 생태복원 목표 달성을 위한 오염지역과 훼손지역의 복원계획 및 실행, 장·단기 모니터링과 이들의 생태적·법적 성공의 평가 및 복원계획의 수정을 포함한 2단계의 적응관리로 구성된다.

오염지역의 경우 방제작업이 수행되어 오염물질의 직접적인 제거가 일어난 지역과 방제작업이 시행되지 않아 자연정화 지역과의 구분 및 방제과정에서 훼손된 지역 및 추가적인 훼손이 우려되는 지역을 모두 포함하며, 복원의 계획과 실행 모니터링의 경우 장단기로 나누어 진행되는 것이 바람직하다. 허베이 스피리트호 유출사고와 같은 대규모의 유류유출로 인한 연안생태계의 복원 평가는 속성분석과 추세분석 등 장단기의 모니터링 결과를 활용할 수 있으며 또한 적응관리를 적용할 수 있는 분석 방법들을 적절히 활용해야 할 것이다. 하지만 이에 앞서 분명한 장단기 복원목표와 복원목표 달성을 평가할 대조생태계(reference ecosystem)의 확보 및 평가 기준의 마련이 우선되어야 한다. 평가할 속성들의 선정과 모니터링 기간 등 세부 사항에 전문가 그룹과 주민들의 참여 또한 필요하다.

필갯벌의 정화와 관련하여 유출된 유류가 갯벌 하층부로 침투하기가 어려우므로 갯벌전체가 오염되지는 않으나, 일단 생물서식 구멍 등의 틈새 등으로 유입된 유류는 손쉽게 하층부로 이동하게 된다. 일반적으로 유류는 혐기성 상태에서 분해속도가 매우 느리고, 또한 투수성이 매우 낮은 갯벌의 특성상 물리적 기작으로 유류를 다시 밖으로 나오게 하는 것도 어렵다. 따라서 물리적인 압력을 최소화 하며 자연적인 분해기작을 가능한 촉진할 수 있는 방법의 도입이 필요하다.

이 방법 가운데 하나가 자연공기유입 장치관의 설치이다. 이는 국부적인 유류오염지역에 자연적으로 공기가 유입될 수 있게 하는 것이다. 이 방법은 미생물을 이용한 생물학적 분해에 가장 큰 제한 요소가 될 수 있는 산소를 공급함으로써 미생물 분해를 촉진시키고, 아울러 기체상으로의 이동을 용이하게 하여 갯벌에 침투한 유류를 제거할 수 있다. 이와 함께 미생물이나 영양물질 주입 등 생물학적 처리와 병행하여 사용할 수 있다.

차 례

제1장 연구의 배경 및 목적	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 목적	2
3. 연구의 범위 및 방법	3
1) 내용적 범위	3
2) 연구의 방법	3
제2장 유류오염 사례와 선행 연구	6
1. 해양 유류오염 사고 연구	6
1) 시프린스호	8
2) 토리캐년호	10
3) 아모코카디즈호	10
4) 엑슨발데즈호	12
5) 걸프전쟁	15
6) 시엠프레스호	16
7) 나훔카호	18
2. 해양 유류오염 생태복원	21
1) 생태복원	21
2) 해양생태 복원	26
제3장 유류오염 실태조사	33
1. 서해안지역 유류오염 피해상황	33
1) 해역별 유류오염 상황	36
2) 염습지 지역	36
3) 갯벌 양식장지역	37
4) 암반 및 바위지역	37

2. 연안생태계 저서생물상 변화 비교	38
1) 저서 무척추동물 출현양상	40
2) 고찰	41
3. 유류오염 폐기물처리	42
1) 유류폐기물 처리현황	42
2) 유류폐기물 현장처리	44
3) 유류폐기물 성상분석	46
4) 유류오염 토양의 고화처리	47
 제4장 유류오염지역 방제관리 방안	49
1. 유류유출 방제 종료점 설정	49
1) 개요	49
2) 방제 종료점의 정의	50
3) 방제 종료점의 목적	50
4) 방제 종료점 측정을 위한 기본 방법	51
5) 방제 종료점 설정에 영향을 주는 사안	54
6) 방제 종료점 설정의 원칙	54
7) 분석측정에 의한 방제 종료점	55
2. 유류유출 방제 종료점 적용	58
1) 개요	58
2) 지역별 방제적용	60
3. 갯벌 방제 방법고찰	62
1) 사전조사	62
2) 필갯벌 정화	63
 제5장 생태영향 모니터링 및 복원관리 방안	67
1. 생태영향 모니터링 방법	67
1) 모니터링 체계	67
2) 위해성평가	69

3) 해양환경평가	70
4) 해양생물 검정법	71
2. 유출유의 확산과 생태영향	73
1) 유출유의 확산	73
2) 유출유에 의한 환경생태 영향	75
3. 유처리제 살포에 따른 해양생태 영향	76
1) 유류오염 방제	78
2) 유류유출에 의한 생태영향평가	78
4. 해양오염영향 조사와 복원계획	82
1) 해양오염영향 조사	82
2) 생태학적 복구와 관리	85
5. 오염해역 환경생태 복원 방안	87
1) 복원방법의 선정	87
2) 오염지역의 물리적 처리 복원	88
3) 오염지역의 화학적 처리 복원	89
4) 오염지역의 생물학적 처리 복원	90
5) 소결론	99
6. 주민참여와 복원평가	101
1) 적응관리와 주민참여	101
2) 적응관리와 복원평가	104
 제6장 결론 및 정책 제언	 106
1. 결론	106
2. 정책 제언	108
참고문헌	112
ABSTRACT	
〈부록 1〉 유류오염 환경피해 산정 조사방법	
〈부록 2〉 어패류의 탈독성화 효소지표 (EROD)	
〈부록 3〉 해안선유류정화평가(SCAT) 조사결과 사례	

표 차례

<표 1> 주요 해양 유류유출 오염사고	8
<표 2> 생태복원 관련 고려 특성	24
<표 3> 유류폐기물 화학물질 함량 성분 분석	46
<표 4> 생물검정기술의 종류	73
<표 5> 유처리제 성능시험성적서	77
<표 6> 원유농도별 해양생태 영향정도	79
<표 7> 유류사고 후 생태계 회복에 드는 소요시간 추정	83

그림차례

[그림 1] 연구수행 흐름 및 체계도	5
[그림 2] 시프린스호 유류오염 확산도	9
[그림 3] 아모코카디즈 사고로 폐사된 삿갓조개와 유류오염지역	11
[그림 4] 아모코카디즈 사고 영향권역도	11
[그림 5] 엑슨발데즈 사고 후 생물체내 PAH축적 농도	14
[그림 5] 엑슨발데즈 사고 후 생물 개체수 변화	14
[그림 7] 걸프전쟁 후 페르시아만 서안의 생태변화와 영향	15
[그림 8] 걸프전쟁 후 페르시아만 조간대의 생태변화	16
[그림 9] 개체군지표 아비	17
[그림 10] 후쿠아-이시카와 지역 연안 이매패류 체내의 벤즈피렌 농도변화	19
[그림 11] 벤즈피렌의 활성화 영역과 안정화	19
[그림 12] 중유의 생분해 정도를 나타낸 가스크로마토그램	20
[그림 13] 사고 발생 18년이 지난 2007년에도 발견되는 해안 및 해저 잔존유류	20

[그림 14] 생태계의 훼손과 복원 활동	22
[그림 15] 염생습지와 삿갓조개	28
[그림 16] 갯가재 폐사체와 구멍갈파래 이상증식 가입	29
[그림 17] 연안 정점 미세조류 성장률 테스트결과	33
[그림 18] 연안 정점 해수 발광미생물 테스트결과	34
[그림 19] 허베이 스피리트호 유류유출사고 오염도 현황	35
[그림 20] 태안의 잔류유분	36
[그림 21] 태안 안면도의 염생습지	37
[그림 22] 유류오염에 의한 성게 폐사체와 양식장 시설 철거	37
[그림 23] 유류오염지역 현황과 방제작업(가의도, 태배, 호도, 소근진)	38
[그림 24] 정점별 중수 분포도	39
[그림 25] 정점별 개채수 분포도	39
[그림 26] 유류유출사고 전후의 개채수 비교	40
[그림 27] 유류유출사고 전후의 중수 비교	40
[그림 28] 해안지역의 유류폐기물 임시매립지(보령 호도)	44
[그림 29] 유류폐기물 처리지점	45
[그림 30] 토양정작법 유류제거	45
[그림 31] 안면읍 내파수도 표착 유류와 초콜릿무스	47
[그림 32] 이원면 꾸지나무골 표착타르	47
[그림 33] 소원면 파도리 표착타르	47
[그림 34] 소석회에 의한 유류오염 토양 안정화 기작	48
[그림 35] 유류유출 해안방제 정화작업 및 생태모니터링 흐름도	49
[그림 36] 유류오염지역 정화작업 의사결정 과정	51
[그림 37] 해안 유류오염지역 조사기록 야장	53
[그림 38] 중점 방제지역 및 특정도서 위치도	62
[그림 39] 갯썰매를 이용한 수작업 도구 개념도	65
[그림 40] 갯벌지역 양식장 유류오염 상태	65
[그림 41] 갯벌양식장 유류오염 심화지역	66
[그림 42] 위해성평가와 관리 체제 모식도	69

[그림 43] 종합적인 해양환경평가 모식도	70
[그림 44] 구리 노출 농도 대비 어류 생존율 곡선(용량-반응곡선)	72
[그림 45] 바닥에 가라앉은 타르볼	78
[그림 46] 수면에 뜬 타르볼 및 기름막	78
[그림 47] 생태영향평가와 위해성 관리	79
[그림 48] 생태계 피해 정도와 회복 정도	80
[그림 49] 조간대 생태계 변화도	81
[그림 50] 생태계복원 프로그램 추진 체계도	86
[그림 51] 미생물복합체를 이용한 유류분해 능력 가스크로마토그램	91
[그림 52] 수용성/친유성 비료 사용시 비료거동 개념	94
[그림 53] 유류오염토양의 생물학적 분해속도	97
[그림 54] 생물정화제제 살포 전후의 비교(캐나다 동부해안)	100
[그림 55] 태안군 유류오염 생태모니터링 지점	100
[그림 56] 주민참여형 생태복원과 모니터링	103
[그림 57] 단계별 생태복원 절차 제안	104

제1장 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경

- (국내 유류유출 오염사고 실태) 국내 유류유출 오염사고 대응방안 미흡
 - 우리나라의 대형 유류유출 사고에 대한 대응 경험은 1995년 시프린스호 사고 이후 허베이 스피리트호 사고가 전부임
 - 외국의 경우 1978년 아모코카디즈호, 1989년 엑슨발데즈호, 2002년 프레스티지호 사고 등을 통해 해양 유류유출 환경재난에 대한 대응 방안이 축적되어 있음
 - 이에 따라 해양 유류유출 오염물질 제거, 방제 종료점 선정 방법과 기준, 환경생태 복원 방법 등에 대한 경험적, 귀납적 사례를 축적하고 있음
- (유류오염 방제 및 환경생태 복원 실태) 중앙정부 주도의 방제 및 환경생태 복원 시책 추진에 따른 지역내 협력조정·통합 추진체계 필요
 - 유류유출 방제 관련 종료점의 설정 및 복원시책 추진 등은 많은 이해당사자가 관련되어 있으므로 국가, 지방, 지역공동체 등 합의형성 과정이 필수적인 요소임
 - 다양한 방제 및 환경생태 복원 방법론의 정립과 함께 외국의 사례분석 등을 통해 정책적 시사점을 도출할 수 있도록 해야 함
- (향후 전망) 「허베이 스피리트호 유류오염사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법」 제정에 따른 시행(2008. 6. 15)
 - 유류오염 피해에 대한 실태조사와 주민 및 해양환경 등에 대한 신속하고 적절한 수습 및 복구대책을 수립·시행하기 위한 조사연구가 필요한 상황
 - 특별법 시행령은 허베이 스피리트호 유류오염 사고로 피해를 입은 주민 및 해양환경 등에 대한 신속하고 적절한 수습 및 복구대책을 수립·시행하기 위하여 동 법률에서 위임된 사항과 그 시행에 필요한 사항을 정하는 것을 목적으로 함
 - 특별법 제10조에 따라 특별해양환경복원지역 지정고시는 2008년 12월 예정
- (착안사항) 유류유출에 따른 환경영향 조사 및 복원대책 강구
 - 유류유출 방제 과정에서 수거된 폐유는 황과 염소 함유량이 높아 현행 폐기물 관련법상 지정폐기물로 분류되고 있음

- 또한 유류 유출에 따라 방제과정에서 발생한 유류오염 폐기물은 흡착포, 흡착재, 폐섬유, 폐오일펜스와 양식장에서 발생한 폐지주목, 패각 등의 가연성 물질 등이 있음
- 방제과정에서 유처리제가 살포되면 수중유(oil-in-water) 상태의 에멀전이 생성되어 분산
- 타르상태의 폐유는 유중수(water-in-oil) 상태로 점성도가 높고 시간이 경과함에 따라 풍화에 의해 반고화 상태를 거쳐 아스팔트상으로 변환
- 기름에 오염된 해안의 갯벌, 모래, 자갈, 암반 등은 지속적인 방제 작업에도 불구하고 자연생태계에 잔류한 유분은 장기간에 걸쳐 해역, 해양, 육역, 연안 생태계에 영향을 줄 수 있음
- (대책) 직접적인 대책 설정 필요
 - 이에 따라 유류유출 피해지역의 환경영향을 최소화하기 위한 유류오염 폐기물처리 및 생태 모니터링과 복원을 위한 관리대책 수립 필요
 - 유류오염지역의 환경모니터링 및 복원방법은 물리, 화학, 생물학적 방법 등 다양한 공학적 방법과 생태학적 방법을 고려하여 추진

2. 연구의 목적

- 본 연구는 유류유출에 따른 유류폐기물의 처리, 유출유의 방제 및 정화작업을 통해 최종적으로 해양 및 연안 환경생태의 복원추진을 주요 목적으로 함. 이를 위한 구체적인 연구목적은 다음과 같음
 - 반출이 어려운 도서지역 등 유류오염 폐기물의 현지처리 방안 수립
 - 방제 종료점 설정은 유류유출에 의한 환경상의 영향 최소화와 함께 지역단위 복원 전략의 수립 · 집행과 관련해 중앙-지방, 정부-지역주민간 협력을 기초로 하는 합의 형성 과정(consensus process)을 거쳐야 함
 - 방제(response), 정화작업(cleanup), 복원(restoration)을 단계적으로 이행하기 위한 복원 로드맵의 효율적인 집행과 운용을 위한 정책수단 확보방안 제시
- 본 연구는 지역단위의 유류오염 폐기물 처리 및 해양환경 생태계 복원을 위한 추진체계와 다양한 관련부문 이해당사자간의 협력을 토대로 통합적인 합의형성 과정을 정립하는 데에도 기여할 수 있을 것임

3. 연구의 범위 및 방법

1) 내용적 범위

- 유류오염 폐기물의 물리화학적 성상 분석
 - 수거된 폐유 : 탄소, 수소, 황, 염소, 산화물, 중금속 등
 - 유류오염 폐기물 : 가연분, 수분, 회분 등 삼성분
- 유류오염 폐기물의 처리 방안
 - 소각처리
 - 매립안정화 처리
- 방제 종료점 설정 방안
 - 지형특성별, 해역 이용특성별 변화 예측
 - 암반/절벽, 바위, 모래, 자갈, 갯벌, 염습지, 석축/콘크리트 등 인공구조물
 - 양식장, 해수욕장, 자연경관 보전지역 등으로 구분
- 방제 및 생태복원 관련 특성분석
 - 기계적, 물리적, 수작업 방제방법 비교와 효과예측
 - 유처리제의 성상과 생태 독성 영향
 - 미생물처리제의 성상과 생태영향 모니터링 방법

2) 연구의 방법

- 문헌조사 : 관련이론 및 선행연구 검토
 - 유류유출 관련사례 검토 및 선행사례 분석을 토대로 연구방향과 연구가설 도출
- 자료분석
 - 연구에 필요한 자료는 오염해안정화 진단평가기술(SCAT) 복원조사 시 조사자료 활용 및 생태복원 방법 관련 내용은 추가 현장조사 실시
 - 유류오염 폐기물의 성상 분석은 한국석유품질관리원과 공동 연구

- 유처리제와 미생물처리제 관련 연구는 해경, 해양연구원 자료 활용으로 추진
- 생태 모니터링과 복원을 위한 관리대책은 KIST 및 부경대학교와 공동연구
- 현장조사 : 방제현황, 방제성과, 환경생태 복원정도 평가
 - 정확성 평가(전문가 검토, 환경생태 복원정도의 비교)
 - 해수욕장, 섬지역, 해안 등 연안해역 이용상황을 고려한 방제 현장조사를 통해 방제작업 성과에 대한 평가
- 해상 및 해안 방제종료점 설정, 해양환경복원지역 지정관리 방안은 관련 연구진, 공무원, 지역주민, 방제기관의 공동참여를 통한 합의형성 워크숍을 거쳐 추진
 - 서해유류유출환경대책포럼 구성 운영(충남발전연구원, 한국환경정책평가연구원, 국립공원관리공단, 한국수산개발연구원, 한국해양연구원, 한국문화관광연구원, 한국법제연구원, 국토연구원 등 8개 기관 공동으로 2008년 1월부터 9차 포럼 개최)



[그림 1] 연구수행 흐름 및 체계도

제2장 유류오염 사례와 선행 연구

1. 해양 유류오염 사고 연구

해상에서의 유류오염 발생 후 대부분의 자연자원이 스스로 회복된다고 생각하는 아주 긍정적인 시각과 일부 지역에서 오염이 장기적인 영향을 끼칠 것이라고 생각하는 아주 부정적인 시각이 공존할 수 있다. 대부분의 유류 유출은 여러 달 또는 수년에 걸쳐 발견되는 심각한 영향을 초래기도 하지만, 2년 내에 회복하기 어려운 중대한 영향을 끼치는 경우는 드물다. 그렇지만 일부 해양생태계, 군집과 개체군들은 이미 인간의 활동이나 기후의 변화로 인해 만성적으로 황폐화되었으며, 유류유출은 이러한 자연자원의 다양성이나 생산성에 보다 장기적인 영향을 끼칠 위험성을 잠재적으로 가지고 있다.

장기적인 피해를 끼칠 수 있는 상황이라면 환경에 장기적으로 영향을 주는 잔류성 유기오염물질(POPs, Persistent Organic Pollutants), 성장률이 저하되는 주요 종들, 제한적인 회복 가능성과 유류오염 정화작업의 심각한 문제점 등에 대해서 고찰이 필요하다. 수많은 사례 연구 중에는 대형 유류오염 후에 놀라울 정도로 신속한 회복 사례와 오염에 갈수록 민감해지는 자연자원에 대한 사례가 포함되어 있다. 따라서 오염의 부정적인 영향에 대한 신뢰할만한 증거가 있는 오염 특성 검토와 동시에 이러한 유류 오염으로부터 회복이라는 용어를 정의하는 작업과 관련시켜 논의가 필요하다.

중대한 오염사고는 언제나 처음 몇 주 동안은 많은 대중과 정치적인 관심을 받게 되지만, 관심은 빠르게 사라지고 1, 2년 후에는 중대한 영향에 대한 요약보고가 발표될 때 정도에만 반짝하고 관심을 받는 정도가 되어버린다. 그래서 5년 이상 장기간의 영향연구 성과에 대한 보고서가 드물다는 사실은 이러한 장기적인 영향을 탐지하기가 어렵다는 점을 반영하고 있다.

Auris(1994, 1995)는 서로 다른 여러 연안환경에서 발생한 유류유출사고의 영향과 자연 재생과정에 대한 연구 대부분을 수집 정리하였는데, 활용할 수 있는 과거 100여

건의 심각한 오염사고에 대한 연구들 중에서 5년 이상의 유류유출사고의 영향을 추적한 것은 불과 10개 밖에 없음을 보여준다. Kingston(2002)은 오염 후의 대부분 환경자원의 회복, 특히 유류 성분을 제거한 후의 회복에 초점을 맞추었다. 그러나 Carls(2001)와 Peterson 등(2003)은 신속한 회복이라는 ‘기존의 패러다임’에 의심을 가지고 접근하였는데, 유류오염 사고연구 사례로부터 생태계에 미치는 장기적인 영향에 대한 상당한 증거들을 확보하였다고 주장하였다. 이것들은 Southward(1982)가 제시한 견해와 유사한데, 그는 “유류의 영향은 군집의 구조를 훼손시키고, 생태계를 황폐화시켜, 해양생태 환경을 단일 중 우점상태로 변하게 한다”고 주장한다. 이론적으로, 모든 유류오염은 장기간의 영향을 끼친다. 오염의 영향은 환경변화의 배경 속에서 탐지 가능한 경우에만 고려하는 것이 합리적인 자세라는 견해가 있다. 그러나 충분한 자료와 연구사례들을 검토한다면 어떠한 형태의 미세한 오염의 영향도 탐지할 수 있다는 반론도 있다. Shigences(2005)가 주장한 것처럼, 오염의 영향과 환경변화의 배경을 서로 구분하여 경계선을 결정하는 것은 연구자들의 시각 차이를 반영할 수밖에 없다고 할 수 있을 것이다. 접근시각의 차이는 ‘회복’이라는 개념이 다양하게 정의되고 있는 원인이 되기도 하지만, 각 연구사례에서 회복되는 시간단위의 차이가 발생하는 이유이기도 하다.

해양 유류오염 사고의 생태영향을 조사하는 목적은 유류유출이 군집과 개체군에 미치는 잠재적인 영향을 결정하는 중요 요소와 환경생태계의 회복 개념을 발전시키는 데 있다. 이를 위해서 기존의 연구사례와 오염사고 후의 장기간에 걸친 영향변화 연구 사례들을 살펴볼 필요가 있다. 세계적인 대형 유류유출사고로 1967년 영국 해안에서 발생한 토레이 캐년호 사고, 1989년 알래스카에서 발생한 엑슨 발데즈호 사고, 1999년 프랑스 해안에서 발생한 에리카호 사고, 2002년 스페인 해안에서 발생한 프레스티지호 사고를 들 수 있다. 이러한 주요 사고의 원인과 규모는 다음과 같다.

〈표 1〉 주요 해양 유류유출 오염사고

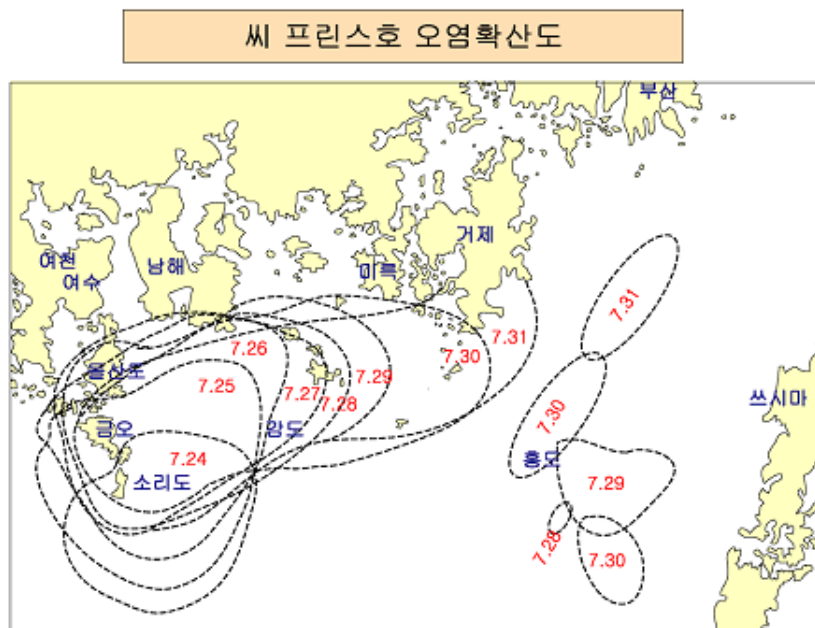
발생일	장소	오염원	유출량(kL)	원인
1995. 7. 24	한국	Sea Prince	원유 5,035	좌초
1967. 3. 18	영국	Torrey Canyon	원유 119,000	좌초
1978. 3. 6	프랑스	Amoco Cadiz	원유 261,165	좌초
1983. 8. 6	남아프리카	Castillo De Bellver	원유 252,000	충돌
1989. 3. 24	미국	Exxon Valdez	원유 41,257	좌초
1991. 4. 12	이탈리아	Haven	원유 144,000	폭발
1992. 12. 3	스페인	Aegean Sea	원유 74,000	좌초
1993. 1. 5	스코틀랜드	Braer	원유 85,000	좌초
1996. 2. 15	영국	Sea Empress	원유 72,000	좌초
1997. 1. 2	일본	Nakhodka	병커C 6,240	침몰
1997. 10. 15	싱가폴	Evoikos	병커C 29,000	충돌
1999. 12. 12	프랑스	Erika	병커C 14,500	침몰
2002. 11. 13	스페인	Prestige	중유 63,000	침몰
2003. 8. 13	파키스탄	Tasman Spirit	원유 29,000	좌초
2004. 12. 7	미국 알래스카	Selendang Ayu	병커C 1,817	좌초
2006. 7. 13	레바논	Jiyyeh Power St	병커C 15,000	폭격
2007. 12. 7	한국	Hebei Spirit	원유 12,547	충돌

1) 시프린스호

1995년 남해 소라도 인근해상의 시프린스호 사고 후 3차례(1996, 1998, 2000)에 걸친 환경피해 및 영향조사 결과 조간대의 잔류유분 분포상황은 1차 및 2차 조사에는 대부분의 지역(소라도 덕포, 소항간도, 금오도 등)에서 유류가 조립질 퇴적물을 통과하여 하부의 기반암 굴곡표면 위 퇴적층내에 보존되어 있는 형태로 남아있다. 금오도 등의 사질 조간대 지역 2차 조사에는 유류 잔존층의 분포깊이가 10~20cm 하부층으로 침강하고 유류성분이 계속 풍화되었다. 조하대에서는 2차조사시 1차 조사에 비해 유류오염 상태가 현저히 감소했는데, 1년 후에도 불구하고 퇴적층 유출유류 풍화와 분해, 그리고 하부 퇴적층으로의 침투가 빨리 진행되었다. 퇴적물내 PAHs 농도는 건량기준 20~800 ng/g의 낮은 농도로 나타났다.

미생물 해양생태계의 특성으로는 유류성분이 잔존하고 있는 조간대 및 조하대의 일부 정점에서 많은 양의 유류에 장기간 동안 노출되었음에도 불구하고 세균군집의 크기가 다른 정점들과 거의 유사하거나 약간 증가한 것으로 나타나 유류 분해세균이 자연상태에서도 효과적으로 적응하여 생물정화 기술(bioremediation)의 현장적용이 가능함을 시사하였다. 조하대 저서생물군은 종류와 생물량이 점차 증가하였고, 조간대 부착동물이나 해조류는 전체적으로 군집구조가 자연상태와 유사한 수준에 도달하였으나 일부 지역에서 특정 저서동물이 극우점하는 단순화 현상이 나타나 안정성은 미흡한 상태였다.

환경독성화학 특성으로 환경 및 생물체내 PAHs의 농도수준은 3차년 조사(2000)에서 낮은 농도구배(57~137ppb)로 나타났다. 사고해역내 잔존 PAHs의 거동 특성은 금오도 연목 인근해역에서 조간대 부착유분이 조하대로의 이동현상이 나타나 다른 지역에 비해 특히 높은 PAHs 농도를 보이고 있기에 지속적인 모니터링이 필요한 상황이다.



(그림 2) 시프린스호 유류오염 확산도

2) 토리케년호

Torrey Canyon호 사고 후 암석으로 이루어진 해변 청소 작업으로 인한 영향은 전설로 남아있다. 매우 독성이 강한 제1세대 유화제의 대대적인 살포는 해안식생의 대량 폐사를 초래하였으며, 지금까지 유화제의 악영향성의 사례로 알려져 있다. 유화제를 살포하지 않은 해변에서는 신속한 회복이 보고되는 한편, 유화제를 살포한 해변 군락지의 붕괴는 10년(어쩌면 15년 까지도) 이상 지속되었다고 보고되었다(Hawkins & Southward 1992). 이러한 현상은 특히나 회복 기간 중, 유류가 제거되고 물리적인 청소작업으로 인한 2차 피해가 없는 해안에서 자연적인 상태에서도 군락의 붕괴가 지속되었다는 점에서 중요하다 할 것이다. 이 기간은 다른 어떤 사례보다 장기간이었는데, 보고서에 관찰된 군락의 붕괴가 우세종의 대규모의 변동에서 추출한 것인데도 그렇다는 점에서 주목하여야 한다. 오염의 영향을 받은 해안에서 종의 다양성이 감소한 현상은 회복하는데 10년 정도가 소요되는 삿갓조개류의 한 종에서만 두드러진다. 이 삿갓조개(limpet) 종은 지리학적 분포범위의 가장자리에 위치하여 있고, 이로 인해 자연적인 회복에 제한이 있었다. 보고된 다른 종들의 경우 매우 빨리 번식하여 회복되었고 그 후 전형적인 자연 상태에서의 변화보다도 훨씬 심하게 요동(搖動)했다.

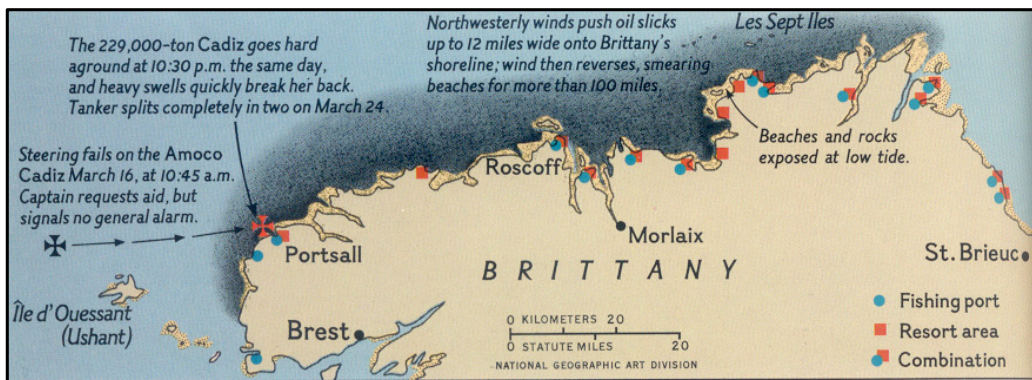
3) 아모코카디즈호

Amoco Cadiz호 사고는 프랑스 북서부 브리타니 지역의 해안에 있는 다양한 종의 해안 생물에 심각한 영향을 끼쳤지만, 이것의 생태학적 영향은 현재는 침식작용과 망가진 습지대의 저성장에 관련하여 가장 잘 알려져 있다. 한편 비슷한 정도로 오염되었지만 정화작업을 하지 않은 지역은 5년 이내에 자연적인 식생상태로 복원되었다(Baca 외, 1987). 습지대를 청소작업을 통해서 물리적으로 변화시킨 것이 이 경우에 있어서 오히려 장기적인 영향을 끼치는 중요한 원인이 되었다.



[그림 3] 아모코카디즈 사고로 폐사된 갯조개와 유류오염지역

Amoco Cadiz 오염사고는 또한 Morlaix 만의 조간대 하층의 퇴적층에 영향을 주었다. Dauvin(1998)은 저서생물에 대한 영향이 12년 이상 지속되었음(유류가 전혀 없는 상태에서도)을 제시하고 있다. 그는 해저바닥(17m 깊이)의 깨끗한 모래 서식지에서 갑각류의 밀도(주로 Ampelisca - 이것은 물속의 유류에 가장 민감하게 반응한다고 알려져 있다)가 조사기간 동안에 많이 줄어들었으며, 심지어는 생식력이 가장 높은 기간에도 그러하였다는 사실을 밝혔다. 그는 이러한 서식 환경에서의 Ampelisca의 군락상태는 자연적인 조건에서는 안정적인 '최고조'상태를 이루지만, 오염으로 인하여 이러한 상태가 심각하게 훼손되었을 뿐만 아니라, 지리적으로 격리되어 있어서 그 회복이 더디다는 점을 주장하였다.



[그림 4] 아모코카디즈 사고 영향권역도

4) 엑슨발데즈호

1989년 엑슨발데즈호는 수중의 블리 암초(Bligh Reef)에 좌초되어 41,257kL의 원유를 알래스카 프린스 윌리엄 하구에 쏟아내서 1,770km의 해안을 오염시켰다. 막대한 비용을 들여 방제작업을 했지만, 흘러나온 유류의 겨우 14%만이 회수되었다. 이로 인한 경제적 생태적 손실을 보면, 기름 유출 사고 이후 우선 75%의 업소가 관광객 혹은 낚시 고객의 감소로 고통을 받았다. 오염지역의 존재가치(existence value)는 49~72억 달러로 평가되었고, 사라진 동물의 한 종(species)당 대체 비용(replacement cost)은 해양 동물의 경우 20,000~300,000달러, 육상 동물의 경우 125~500달러, 조류의 경우 170~6,000달러라고 한다. 또 1,000~2,800마리의 수달, 302마리의 바다표범, 250,000마리 이상의 철새가 대량으로 죽은 것으로 보고되었다.

이런 단기적 영향 이외에도 기름 유출은 생태계에 장기적으로 심각한 영향을 미친다. 2001년 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmosphere Administration, NOAA)의 보고에 따르면 96개 지점을 조사한 결과 58%에서 아직도 기름이 발견되었고 프린스 윌리엄 하구 지역 약 20에이커(81,000m²)가 기름에 오염되어 있는 것으로 나타났다. 특히 문제가 되는 것은 지표 아래에 있는 기름으로 이들은 주로 조간대(潮間帶, intertidal zone)에 분포하고 있어 생태계의 회복을 장기적으로 막는 역할을 하고 있다고 보고되었다.

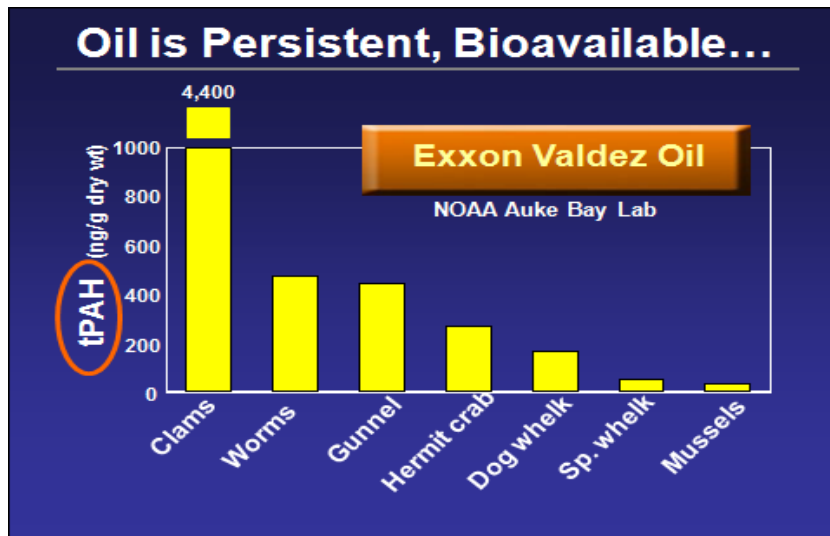
사건 이후 15년이 지난 2004년 보고에 따르면 30여 종이 피해를 받았는데, 이중 가마우지(cormorant), 바다표범(harbor seal), 흰줄박이오리(harlequin duck), 청어(pacific herring), 바다오리(pigeon guillemot) 등이 전혀 회복되고 있지 않고, 붉은반점 송어, 쇠오리(murrelet) 등은 회복 여부가 불투명하다고 한다. 이들의 회복에는 30여년이 걸릴 것이라고 한다. 이 밖에도 낚시, 휴양, 관광 같은 인간의 경제 활동 또한 아직 회복되지 않고 있어 기름 유출 사고로 인한 손실은 가히 측량하기 어려울 정도로 크고 장기간에 걸쳐있다고 할 수 있다.

Exxon Valdez호로부터의 원유유출로 인한 영향에 대하여는 연구자별 시각의 차이에 따라 의견이 다르다(Shigenaka 2005). 눈에 띄일 정도로 유류가 일부 지역의 돌과 자갈의 아래 위와 거친 자갈 해변에 아직도 남아 있다(Short 외 2004). 그리고 일부

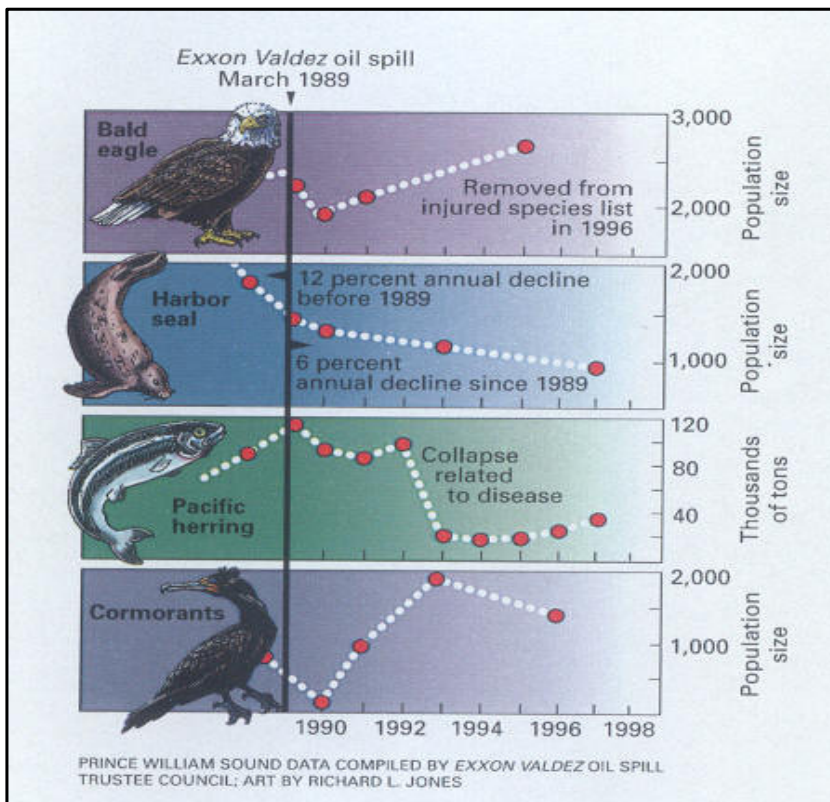
쌍각류의 조직에 유류성분이 과다하게 축적되어 있는 사실은 오염된 해안과 관계가 있어 보인다. 하지만 국부적인 오염피해를 넘어서서 생태계 전반에 관한 장기적인 영향에 대해서는 서로 상반되는 주장이 공존하고 있는 실정이다. 오염사고 전 상태에 대한 자료가 매우 불충분할 뿐만 아니라 서로 상반된 요소들 때문에 이동성 종(물고기, 새, 동물)들의 개체군에 미치는 오염의 영향을 감지하기 어렵다. 그리고 치사량 효과를 심하게 오염된 지역과 관련시키려는 많은 연구들이 주변에 흩어져 있는 유류의 영향에 대하여 충분하게 검토하지 못하였다. Page 등(2004)은 해저면 퇴적층에 Exxon Valdez 유출사고로부터 발생한 것을 포함 여러 발생원으로부터 연유한 탄화수소가 상당량 남아 있다는 것을 밝혔다. 연안의 바위에 서식하는 어류 속의 탈독성화 효소 지표(EROD 활동도; 부록 참고)를 이러한 배후 환경에서의 유류를 기준으로 수립하였으나, 다른 곳보다 Exxon Valdez호의 사고지역에서의 수치가 더 높지는 않았다. 오염의 영향을 받은 다수의 개체군과 군집의 종 다양성과 생산력이 신속하게 회복되었음 보여주는 생태학적 연구가 많이 보고되고 있다(Gilfillan 1995, Wiens 외 1999).

한편 유류유출에 따른 다환방향족탄화수소 16종을 총량으로 나타낸 건량기준 생물체내 축적농도는 각각 대합조개 4400, 갯지렁이 490, 황줄베도라치 470, 절지동물인 소라게 290, 쇠고둥류 60~190, 홍합류 30 ng/g 수준을 보였다(NOAA, 2001).

외해로부터 보호된 해안의 생물상이 고압 고온수로 씻어내기 등의 공격적인 오염방제활동으로 인하여 어떤 영향을 받는가에 대한 Houghton 외의 연구가 있다. 그들은 오염으로부터 7년 후에도 청소지역에서 군집 우점종의 개체수의 증감이 매우 크게 요동치고 있음을 보여주었다(그러나 오염되지 않은 곳과 오염되었으나 방제를 하지 않은 곳에서는 이러한 요동이 적었다). 이러한 개체군의 변동은 Torrey Canyon 오염사고의 그것과 유사한 모습을 보여주고 있다. 한편 종의 풍부함과 부유함이 지속적으로 감소하는 기간이 현저하게 짧아진 것 같다(대략 2년 내지는 3년).



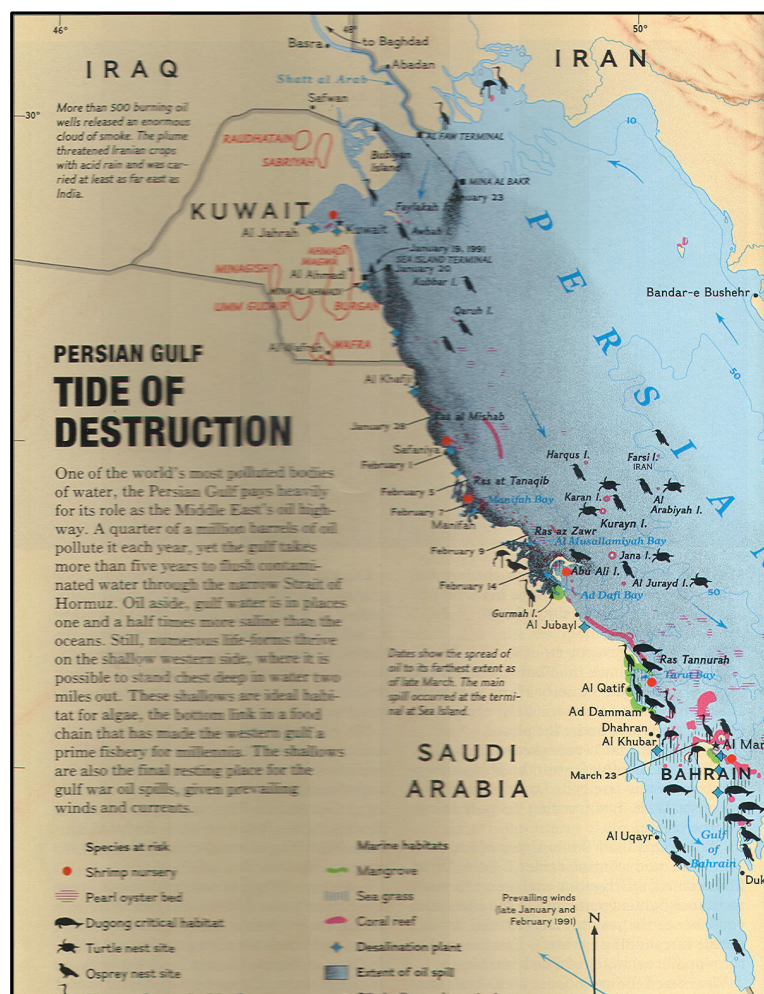
(그림 5) 엑슨발데즈 사고 후 생물체내 PAH축적 농도



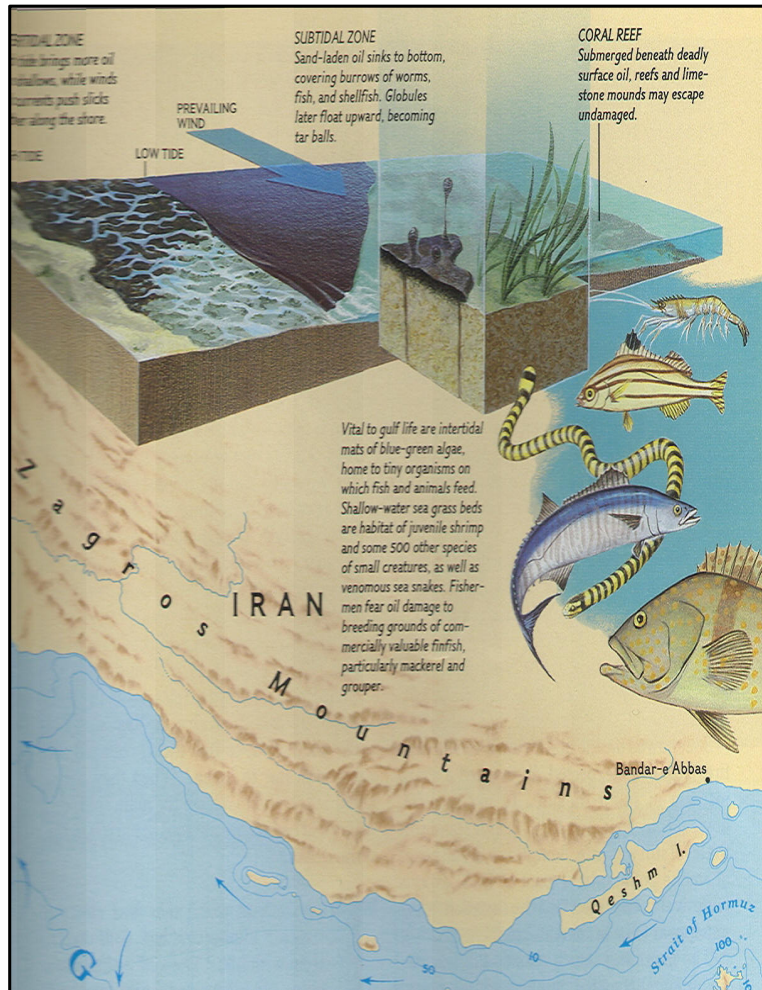
(그림 6) 엑슨발데즈 사고 후 생물 개체수 변화

5) 걸프전쟁

1991년 걸프전쟁 후 페르시아만의 타르와 아스팔트층은 아직도 사우디아라비아 해안의 조간대 모래분지, 홍수림(紅樹林, mangrove)과 염생생물대 등의 넓은 지역을 황폐화시키고 있다(Michel 외 2005). 조간대 상층부와 조간대 바로 상부에 미치는 생태학적 영향(특히 염생생물과 구멍 속에 사는 계의 개체군)은 매우 심각하고 회복의 기미를 보이지 않고 있다(Getter 외 2005).



(그림 7) 걸프전쟁 후 페르시아만 서안의 생태변화와 영향

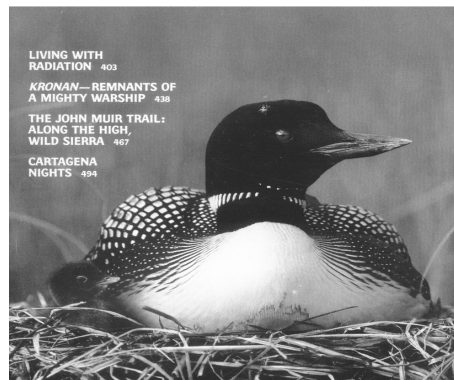


(그림 8) 걸프전쟁 후 페르시아만 조간대의 생태변화

6) 시엠프레스호

Sea Empress 오염사고로부터의 유류 잔류물은 별로 발견할 수 없었고, 최근 10주기를 맞아 모든 이용 가능한 자료를 검토한바 장기적인 영향의 증거는 없었다(Moore 2006). 유류취급 항만과 매우 풍족한 연안 서식지에 대한 지역적인 환경 조사가 이미 광범위하게 이루어졌고 계속 감시되어 왔기 때문에, 데이터의 부족으로 인해 이러한 결론이 난 것은 아니라 할 수 있다. 그러나 이번 검토는 몇 가지 주목할 만한 영향들을 확인하였다.

비록 지역의 바닷새 개체군에 주목할 만한 장기간의 영향을 끼치지 않은 것으로 밝혀졌지만, 바닷새에 대한 장기적인 감시 자료를 검토한 결과가 밝혔듯이 약간의 지역적인 영향이 확인되었다. 예를 들어 바다오리(murre)의 작은 무리들은 지금 거의 멸종되었고, 10년 동안 다시 서식지는 회복되지 않았다. 아마도 여기서 처음으로 번식한 새들에게 황폐화된 해안 절벽이 그다지 매력이 없었을 것이고 나이든 새들은 습관적으로 옛 등지에 돌아왔기 때문일 것이다(Haycock). 무엇보다도 Voiter 외(2005)의 연구가 중요한 의미를 갖는데, 그들은 Skomer섬의 서식지에서 번식활동을 관찰해 온 결과 바다오리 다수가 오염 때문에 죽었고, 그 결과 개체군의 구성에 심대한 영향을 끼쳤음을 밝혔다. 하지만 이것의 장기적인 영향은 불분명하다. 그들의 연구 결과는 이용 가능한 등지들을 이전에는 번식하는데 사용하지 않았을 새들이 채우게 되었음을 시사하고 있다. 개체군 내의 상당한 수의 아비(阿比, loon) 번식 무리가 생산성과 개체군을 유지하도록 하는 완충 역할을 한 셈이다.



[그림 9] 개체군지표 아비

이 오염사고는 천해(淺海)의 바위 해역을 오염시켜 거기에 서식하는 회귀 방석불가사리의 생존을 위협하였다. 자신의 출생지로 돌아가서 번식을 하는(그래서 플랑크톤 상태의 유충으로부터 자연재생이 일어나지 않는다) 방석불가사리는 사망률이 매우 높고(95% 이상), 개체군의 회복이 가능하지 않게 된다. 그러나 오염 이전 상태로의 전체 군집의 밀도 회복이 예상보다는 빨랐는데(6년 이내, Crump), 이는 아마도 생존한 다섯 종의 동물들의 자체 수정이 가능했기 때문일 것이다. 이 경우는 예상했던 것 보다 훨씬 더 높은 회복 잠재력을 보여준 사례이다. 다른 많은 저서생물에 대한 연구에 비해서 비교적 상세한 연구가 이루어졌어도 여전히 이 오염사고는 개체군 생태계에 대

해서 우리 지식이 부족함을 드러냈다고 할 것이다. 여타 연구들이 보고한 것처럼, 예전에 생각한 것보다는 방석불가사리 動物門(Asterina Phyletic)이 희귀종이 아닌 것으로 보인다.

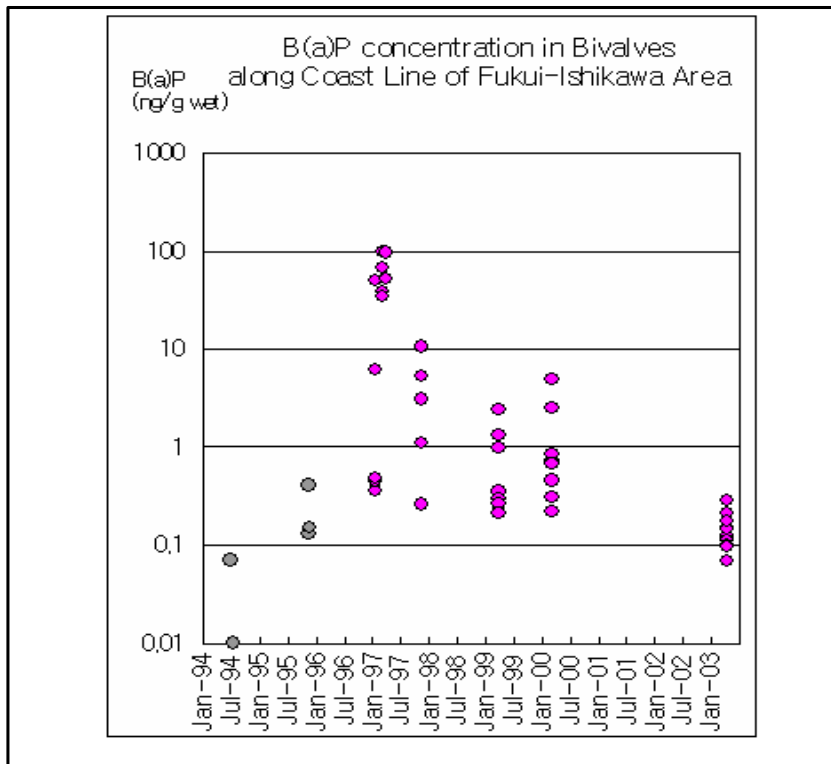
마지막으로 바위로 이루어진 상부 조간대 지역의 이끼는 매우 느리게 성장하고, 오염 후 일부 잘 발달된 군락이 장기적인 영향을 받는 것이 확인되었다. 오염은 우점종의 개체수의 풍부함에 영향을 주는 것이 확실해 보이는데, 이로 인하여 일부 오염 지역에서는 생산력이 급격하게 감소하게 된다. 한편 종의 다양성의 감소는 발견되지 않았다(Crump, 2006).

7) 나훗카호

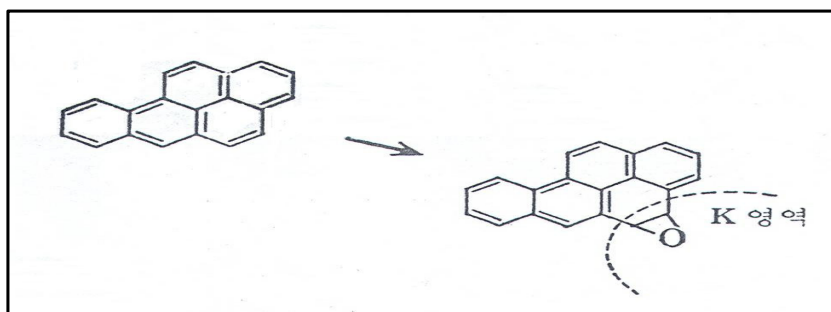
1997년 1월 2일 러시아 선적 나훗카(Nakhodka)호(적재중량 13,157톤)는 난방용 중유인 벙커C유 19,000톤을 싣고 중국 상하이에서 러시아 캄차카로 가던 중에 폭풍우를 만나 표류하던 중 암초에 부딪치면서 두 동강이 났고 벙커C유가 유출되었다. 약 6,240kL의 중유가 바다로 흘러들어 서쪽 해안의 도토리(鳥取)에서 효고(兵庫), 후쿠이(福井), 이시카와(石川), 니가타(新潟), 동북의 아키타(秋田)까지 9개 현 480km에 피해를 안겼다. 해상은 사고초기 유출된 기름이 에멀전 형태로 변한 기름과 두터운 기름띠가 형성됐다. 해안선에는 짙은 검은색의 기름이, 만곡부에는 유중수(water-in-oil)로써 반고체 무스 상태의 두터운 기름층이 형성되었다. 해상방제 장비로는 수로준설선 5척, 일본 내 석유회사 소속 유회수선 3척, 이동용 스키머 등이 사용됐다. 연안에서는 강력 흡입차, 콘크리트 펌프차를 이용해 해수면의 기름을 빨아들인 뒤 기름통에 담아 처리했다. 해안에서 회수된 드럼통은 격막펌프(diaphragm pump)를 활용했다. 수거작업 때에는 점도가 높은 기름 덩어리가 해초류와 뒤섞이면서, 기름을 빨아들이는 펌프가 잦은 고장을 일으켜 점도를 낮추는 에멀전 브레이크가 사용되기도 했다. 해안가로 흘러든 기름 제거작업은 주민들을 비롯해 관광협회 직원, 각종 단체, 시·군청의 직원, 초·중·고교생, 경찰관 및 자위대, 자원봉사대가 동원되었다.

유류오염 피해가 심했던 카나자와 해안 일대 암벽 위에 만들어진 임시저장소에 모인 기름은 결국 강력 흡입차에 의해 근처의 처리장으로 반출됐다. 처리장은 논을 파서 만들었기 때문에 방수가 되지 않아 다시 회수해 나가노(長野)현의 매립지로 이송하

는 이중고를 겪었다. 이처럼 방제 및 복원의 시행착오로 현지 어민의 방제작업 종료 동의를 얻는 데는 사고 발생 1년 반만인 1999년 7월이 돼서야 가능했다.

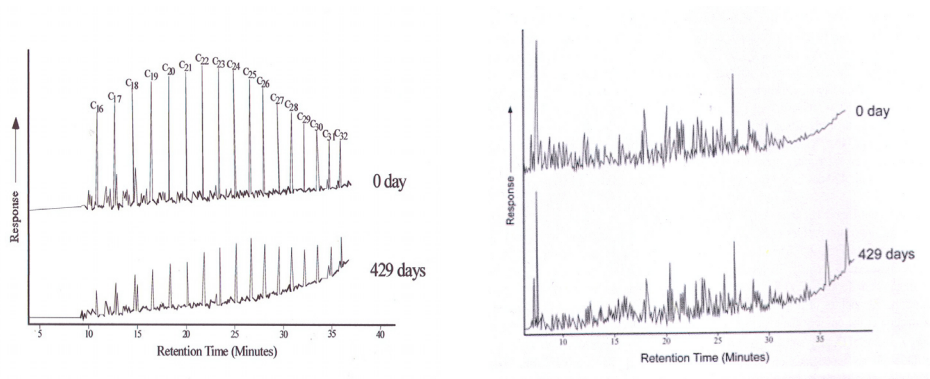


(그림 10) 후쿠이-이시카와 지역 연안 이매패류 체내의 벤즈피렌 농도변화

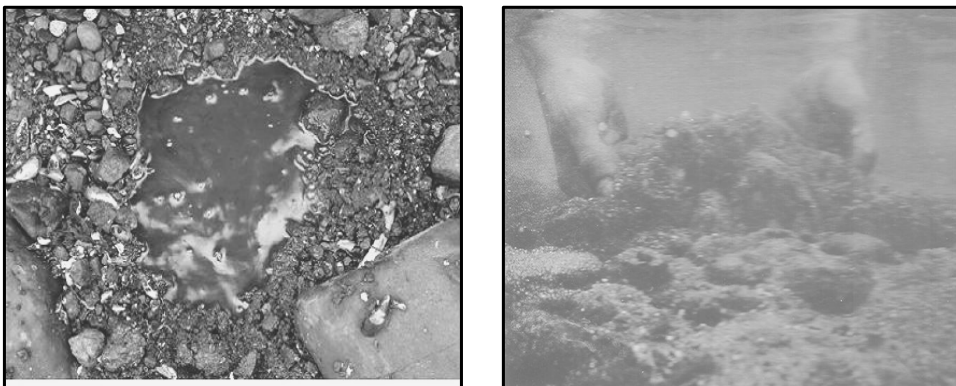


(그림 11) 벤즈피렌의 활성화 영역과 안정화

사고해역인 후쿠이-이시카와 지역에서 포획된 이매패류(bivalves) 체내에 축적된 3,4-벤즈피렌 농도는 사고이전에 0.1~1ng/g 수준을 보였으나 사고 직후는 평균 8~60ng/g 수준으로 나타나서 사고 이전 농도 수준으로 낮아지는데 적어도 6년이 소요됨을 보여주고 있다. 이는 일본 환경시료은행에서 유류유출 사고 이전과 이후의 시료를 저장 보관하여 이러한 비교분석이 가능했다. 특히 벤즈피렌은 전자밀도가 높은 K-영역에서 대사활성화에 의해 에폭사이드 화합물을 형성하고 DNA 구성 핵산염기와 반응하기 쉬워 생체내의 독성을 일으키는 요인으로 알려져 있다.



[그림 12] 중유의 생분해 정도를 나타낸 가스크로마토그램



[그림 13] 사고 발생 18년이 지난 2007년에도 발견되는 해안 및 해저 잔존유류
(미국 알래스카 엑스발데즈호 사고, 1989.3)

2. 해양 유류오염 생태복원

1) 생태복원

자연생태계에 대한 이용행위는 장기적인 차원에서 신중하게 이루어져서 생태계의 지속가능성이 고갈되지 않도록 보존 또는 현명하게 이용하는 것을 전제로 한다. 아울러 그 구조가 훼손된 자연생태계에 대해서는 그 구조를 원래 자연생태계의 구조에 비슷하게 가도록 복원해야 하는데, 자연생태계의 보전활동은 앞에서 언급한 바와 같이 이용을 유보한 상태에서의 보전이 아니라, 그 구조와 기능을 원래의 자연생태계의 상태에 가깝게 가도록 유도하는 적극적인 차원에서의 보존활동이 된다고 할 수 있다.

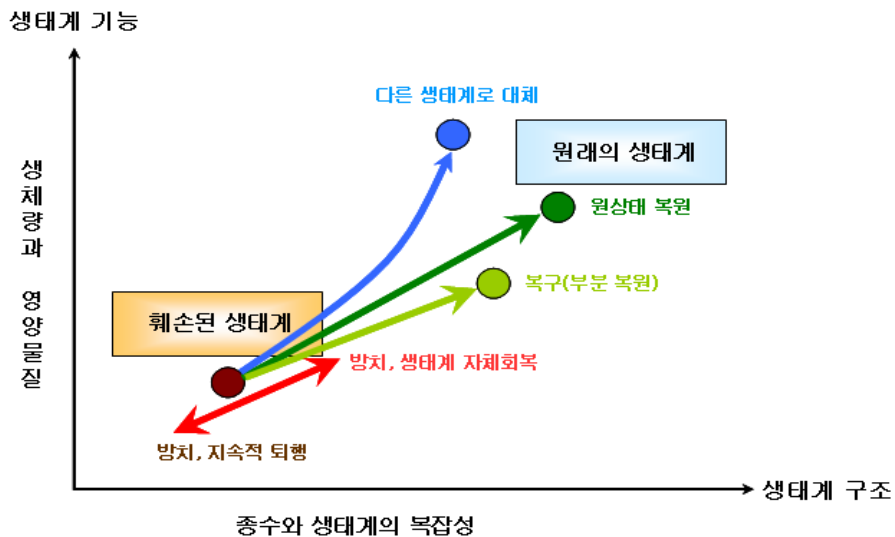
(1) 생태계 복원 정의

Bradshaw(2000)는 생태계 수준에서의 복원은 훼손된 생태계의 구조와 기능을 복원, 회복, 치유, 대체(재생) 등 서로 다른 방안을 도입하여 회복시키는 것인데, 생태계 복원과 관련된 용어의 사용에 대해서는 국내외에서 명확하게 정의되어 있지 않으나 대체로 다음과 같이 정의할 수 있다.

복원(restoration)이란 '원래의 상태 혹은 위치, 훼손되지 않은 온전한 상태로 되돌리는 행위'이며, 복원한다(restore)는 것은 '원래의 상태, 건강하고 활력이 있는 상태로 되돌리는 것'으로 정의된다. 따라서 복원이란 건전하고 활력이 있는 원래의 상태로 되돌리는 행위로서 가장 완벽한 방법이다. 회복(rehabilitation)은 '이전 단계나 상태로 되돌리는 행위'로서 복원행위와 유사하지만 완전성에서는 다른 행위이다. 실제로 훼손된 생태계를 과거의 온전했던 생태계로 단시간에 되돌리는 것은 매우 어렵다. 따라서 현재 시행되는 많은 복원행위는 "회복"에 해당된다. 치유(remediation)는 '교정하여 좋게 만드는 행위'로서 목표보다는 과정을 강조한다. 재생(reclamation)도 원래 '완전한 상태로 되돌리는 행위'로 정의되지만 영국에서는 경작지를 위하여 토지를 개간하는 것으로도 정의된다. 사용을 위해서는 대체(replacement)행위도 포함이 되지만 이것도 일종의 복원을 하는 행위에 해당한다. 증진(enhancement)은 주로 미국에서 많이 사용하는 것으로 대체 생태계를 설치함으로써 상태를 향상시키는 것을 의미한다. 생태계 복원을 고려할 때 자주 사용되는 용어로서 '저감(mitigation)'이 있다. 이것은 더욱 파

괴되려고 하는 부위를 진정시켜서 완화하는 것이다. 저감도 복원(회복이나 대체의 일부로서)의 성과로 볼 수 있지만 시행자에 따라서는 분리하여 고려하는 경우가 있다.

이러한 복원행위에 관련된 방안은 대상이 종이나 개체군, 서식지, 생태계, 수질, 토양에 따라서 달라진다. 그러나 생물과 무생물 환경이 상호 작용하는 생태계 수준의 복원행위는 훼손된 생태계를 단지 원래 상태로 되돌리는 목적뿐만 아니라 생태계 자체가 생태과정까지 회복하도록 도와주는 시간까지도 고려해야 한다. 이 모든 복원활동은 생태계의 구조적, 기능적인 특성을 고려하여 활동함으로써 가능하다.



(그림 14) 생태계의 훼손과 복원 활동

파괴된 생태계는 자체치유성에 의하여 원래의 자연생태계로 돌아가려는 특성이 있으며 천이과정은 이런 특성 중에 하나이다. 그러나 회복하는데 오랜 시간이 걸리기 때문에 과정과 시간을 단축시키기 위하여 재생(대체, reclamation), 회복(rehabilitation), 복원(restoration)의 처방을 도입한다(Bradshaw 2000의 변형).

Hobbs & Norton(1996)에 의하면 복원(restoration)이란 훼손된 시스템을 치유할 목적으로 행하는 광범위한 활동을 말한다. 최근 유럽에서 활발히 논의되어 시행하고 있는 생태공학적인 복원방법은 동식물군집의 상호작용, 생태계의 조성, 복원, 개발 및

보전 등 생물서식지의 안정성과 건전성을 시·공간적으로 성취하는데 매우 유용한 방법을 제시하고 있다. 여기에서는 크게 세 가지 개념이 도입되고 있다. 무생물적인 서식지 환경조성(physiotope creation)은 무생물적인 환경요소를 변화시킴으로서 자연적인 생태군집과 자연과정의 발달을 도모할 수 있는 위치를 창출해 내는 방안이다. 생물 서식지 환경조성(biotope creation)은 생태군집이 발달하는 과정에서 지침에 따라서 적절한 교란을 줌으로서 새로운 생물이 도입될 수 있는 공간을 확보하는 방안이다. 조성된 서식지는 서식지 발달과정에 따라서 적절한 관리의 강도가 필요하다.

다음 표는 생태복원과 관련하여 고려할 요소들을 정리한 것이다.

첫째, 이러한 생태복원에 있어서 복원의 대상이 되는 생태계 및 서식지의 종류가 매우 많다는 것이다. 특히 인간이 많이 간섭한 생태계에 대해서는 더욱 고도의 복원 사업을 시행해야 할 중요성이 더욱 크다고 할 수 있다.

둘째, 복원을 하기 위한 대상 생물상을 포함한 생태계의 구조적 요소를 보면 이것은 크게 생물적인 요인과 무생물적인 환경요인을 생각할 수 있다. 특히 생물상의 경우는 그 수가 굉장히 많이 있기 때문에 복원해야 할 생물종과 개체군의 경우 그들이 살아갈 무생물적인 환경에 대한 복원 역시 필수적으로 이루어져야 할 것이다.

셋째, 이러한 복원은 복원을 통해서 이루고자 하는 생태계 복원 효과를 충분히 달성하기 위해 다양한 생태계의 서비스기능을 복원하는데 중점을 두어야 한다.

넷째, 이러한 복원은 다양한 차원에서의 과학적인 정보에 기초하여 복원을 해야 하는데, 다양한 생태학적인 분야에 대한 바른 이해를 기초로 이루어져야 한다.

다섯째, 이러한 복원사업은 사회적으로 충분한 효과를 내어야 하고 그것이 확산되어야 하는데, 이러한 사회적 효과를 통해서 사업으로서의 미래를 확보할 수 있게 된다. 특히 이러한 사회적인 기여를 평가할 중요한 지표는 궁극적으로 생태적 지속가능성의 증진으로 인식되고 평가되어야 한다.

〈표 2〉 생태복원 관련 고려 특성

복원대상 생태계 및 서식지 (ecosystems and habitats)	복원 대상 생물상(biota)을 포함한 생태계의 구조적 요소	생태계 복원 효과 (ecosystem services)	복원을 위해서 고려할 생태학적 분야(ecological fields)	복원의 사회적 효과 (social impacts)
해양 (oceans) 갯벌 및 연안 (tidal flats and coasts) 하천과 강 (rivers & streams) 호수 및 소택지 (lakes and marshes) 숲 (forests) 초지 (grasslands) 농업생태계 (agro-ecosystems) 도시환경 (urban environments) 산업 환경 (industrial environments)	식물(plants): 양치식물, 나자식물, 피자식물, 선태식물, 조류 등) 동물(animals): 포유류, 조류, 어류, 양치류, 파충류, 곤충류 등) 미생물(microbes) 토양(soil) 환경 대기권(atmosphere) 환경 수권(hydrosphere) 환경	수질개선 (water quality) 식량생산 (food production) 기후조절 (climate regulation) 휴양 (recreation) 홍수조절 (flood protection) 국토보전 (land protection) 생태공학 (eco-engineering) 대기개선 (air quality)	생물지리 (biogeography) 개체군 동태 (population dynamics) 養料循環 (element cycling) 식물-동물간의 상호작용 (plant-animal interactions) 식물-미생물간의 상호작용 (plant-microbe interactions) species diversity 기능적 다양성 (functional diversity) 지구 변화 (global change) 영양단계 상호작용 (trophic interactions) 에너지 흐름 (energy flow) 제1차 생산 (primary production) 분해 (decomposition) 생태계 발달 (development and succession) 서식지 단편화 (habitat fragmentation) 생태적 이동/침입 (invasions) 생태생리 (ecophysiology) 생태모델 (theory and modelling) 분자생태 (molecular ecology) 생태독성 (ecotoxicology)	의사결정 (decision making) 교육 (education) 정책개발 (policy development) 환경윤리 (ethics) 민간 활동 (NGO activity) 영향평가 (EIA)
경관의 구성요소 (landscape elements)	생물다양성 (biodiversity)	생태계 기능 증진 (ecosystem functions)	생태학 분야 (ecological science)	생태적 지속가능성 (ecological sustainability)

(2) 오염 생태계 복원

오염 지역의 생태계 복원은 종 다양성과 생산력의 두 가지 특성이 군집과 개체군의 생태학적 가치와 기능을 가장 잘 표현한다.

종 다양성은 간혹 단순히 종들의 다채로움을 측정하는 것을 뜻하지만, 그보다는 종들의 숫자와 풍부함을 표시하는 지표로부터 추출되는 것이 일반적이다. 더러는 군집들의 종 구성이 시간이 지남에 따라 급속하게 변화를 겪는 경우도 있다. 그러나 동

일한 방법을 통해서 신뢰할 만한 지속적인 조사가 이루어진다면, 특정한 서식지에서 종 다양성은 자연적인 상태에서 안정된다는 것을 알 수 있다. 오염사고로 인하여 종 다양성이 감소하고 난 후 정상적인 상태의 종 다양성으로의 복구를 회복의 정의로 삼을 수 있다. 이 때 꼭 동일한 종 구성상태로의 복귀일 필요는 없다. 종 다양성을 유지하는 것이야말로 생태계의 건강성을 재는 가장 중요한 척도로 생각할 수 있다.

생산력은 유기물질의 1차 생산량과 2차 생산량을 기준으로 가장 잘 측정할 수 있으나, 그 보다는 종 다양성과 성장속도와 상관이 있는 것으로 여겨지고 있다. 특정 개체군의 생산력의 수준은 자연 상태에서 계절과 해에 따라 요동을 심하게 보여주고 있으나, 특정한 요동의 범위 특성을 찾을 수 있다. 따라서 오염사고로 인한 생산력의 저하 후, 전형적인 생산력 수준으로의 복구를 회복의 정의로 사용할 수 있다. 그러나 위의 오염 연구들에서 보여준 것처럼, 개체군들이 장기간에 걸쳐서 생산력의 고저가 반복되는 현상이 점차 시간이 지남에 따라 둔화되기 때문에 이러한 의미의 회복과 혼동될 수 있다.

그럼에도 불구하고 여기서는 지속적으로 생산력이 감소하는 상태에서 이를 반전시키는 생산력 복구 과정을 가장 중요한 1차적인 회복 과정으로 정의한다. 한편 오염사고 후 시간이 경과하면서 비정상적인 요동은 상대적으로 덜 중요하지만 이 과정을 2차 회복 과정의 요동이라고 용어를 정리하였다. 이러한 입장은 Baker 외(1990)와 Kingston(2002)의 주장과 유사하지만, 이와 같이 생산력의 회복을 두 단계로 분리한 것은 처음 시도한 것이라고 할 수 있을 것이다.

이렇게 두 가지 특성을 정의하는 것이 개체군과 군집 또는 생태계의 기능에 대해서 충실하게 기술하지 못하고 표준적인 방법론을 정의하는 것이 용이하지는 못하지만, 이 특성은 생물학적 군집에 폭넓게 적용하는 것이 가능하게 된다. 또한 대다수의 연구자들이 2차 회복과정의 요동이 상대적으로 덜 중요하다고 동의하지는 않지만, 그 개념만큼은 모든 생물학자들 사이에서 암묵적으로 이해되고 있다. 물론 환경 영향을 평가하는데 매우 유용한 것으로 평가받는 치사량 효과측정 방법들이 있다(Kirby 외 2000). 그러나 생태학적 영향에 관한 정보가 부재한 상태에서 이 방법들을 활용하기에는, 생태학적 기능과 자연적인 변덕성에 대한 우리의 이해가 여전히 부족한 실정이다. 게다가 효소활동 - 이 효소활동은 주변 환경이 PAHs에 오염되면서 동물들의 조직에

서 일어남 - 에 관한 분석이 활발해지고 있지만, 이러한 분석들이 초기 상태와 연관하여 이루어지지 않는다면, 오히려 결과를 왜곡시킬 가능성이 높다(Lee 와 Anderson 2005).

따라서 생물학적 다양성 또는 개체군이 지속적으로 계속적으로 감소하는 현상이 오염의 가장 부정적인 영향에 대한 가장 믿을만한 근거를 제공한다고 할 수 있을 것이다. 그리하여 회복 개념 정의를 수정하여(Baker, 1990), 다음과 같이 정의하고자 한다.

생태학적 회복은 그 군집내의 식물군과 동물군의 특성이 존재하고 정상적으로 기능하는 - 이 기능은 주로 생물학적 다양성과 생산력이 정상적인 수준에 이를 때 명백해진다 - 생물학적 군집이 재확립된 경우를 의미한다.

2) 해양생태 복원

(1) 유류오염 생태복원 영향요소

① 유류의 지속성

파도의 운동이 유류의 지속성을 상당히 감쇄(減殺)시킨다. 외해로부터 보호된 잔잔한 정체수역 환경(대개 해안 20km 이내)에서의 수류 유동에너지 감쇠(減衰)가 장기적인 생태학적 영향의 주원인이 된다. 이와 같이 유류의 특성과 환경조건이 폐쇄수역까지 도달한 유류의 운명에 결정적인 영향을 끼치는 바, 이러한 수역은 매우 민감하여 손상을 입기 쉽다. 따라서 이러한 수역이 유류에 오염되는 것을 막는 것이 장기적 영향을 줄이는 최선의 방법이라 할 것이다. 태안지역에는 가로림만, 천수만, 근소만, 소근진만, 근흥만, 장명수 등 대소규모의 폐쇄성 해역이 분포한다.

파도 운동에 많이 노출되는 서식지에서의 유류의 지속성은 매우 낮아지기 때문에(육상으로부터 만성적으로 유류가 유입되지 않는다면) 화학적으로 독성이 있거나 질식성이 있는 유류가 수년간 잔존하는 경우는 드물다. 유류유출 지역인 서해안 안흥항의 평균 조위차는 7m로 해수의 유동에너지가 큰 편이다. 그러나 정수면(靜水面, still

water)에서 오랜 시간 동안 유류가 잔존하게 되면 타르가 처리하기 곤란한 찌꺼기를 형성할 수 있다. 특히 모래와 자갈이 섞인 해변에 장시간이 경과한 상태에서 타르가 굳어져서 아스팔트층이 형성되는 경우에 그러하다. 종 다양성이나 생산력에 현저한 장기적인 영향을 끼치는 것은 타르 찌꺼기에 의한 물리적 질식 과정인 것으로 보이는데, 이러한 질식 과정이 저층을 굳게 만들고 빈 틈새를 메워버림으로써 서식지의 다양성을 감소시키기 때문이다.

풍화된 타르의 화학적 독성은 이것이 침전물 내부 입자층에 표착(漂着)됨으로써 줄어들게 된다. 이런 침전물들(암석과 자갈밭으로 이루어진 상부 서식지에서 특히)은 생태학적 영향이 매우 적는데 삿갓조개와 고둥종류의 이동 자국과 해조류들이 타르 잔류물에 서식하고 있는 것을 볼 수 있다. 새로 생성된 침전물은 결코 생태학적 영향이 온전한 것은 아니며, 오래된 침전물에서도 여전히 유류 광택이 생길 수 있다(1978년 Esso Bernicia 오염사고 현장에서 관찰됨). 하지만 유류의 물리적 존재 자체가 주로 영향을 끼침에 틀림없다. 폐쇄해역의 진흙층 서식지에 갇혀있는 탄화수소를 여러 생물들이 이용하는 것이 가능함에 따라 몇몇 생물검정이나 생태학적 영향 연구들에서 나타난 것처럼 이것의 화학적 활동성(chemical activity)이 장기적 영향을 끼치게 된다. 시간이 경과함에 따라 독성이 분해되고 감소되지만, 대부분의 폐쇄해역의 무산소층 뿔에서 20년 이상 독성이 지속되게 된다. 조하대에서 가라앉은 유류의 침전물들이 저서생물에게 장기적으로 생태학적 영향을 끼칠 것으로 예상된다. 그러나 이와 관련 현재까지 연구(1991년 Haven 오염사고, 국립연구소 1999)가 많이 이루어지지 않았고, 특별하게 눈에 띄는 영향을 확인하지 못하였다.

② 느린 성장의 장수 핵심 종

느리게 성장하면서 장수하는 종의 사망률은, 비록 잔존유류나 자연 재생의 영향이 제한적일지라도, 개체군의 구조에 최소한 장기적인 영향을 끼치는 것으로 보인다. 군집 내에서 중요한 구조적인 역할을 하는(물리적인 개체군의 크기나 그 밖의 생태학적 영향력에 의하여) 종이 어느 정도 유류오염의 영향을 받는가가 중요한 관심사일 수밖에 없다 - 이러한 종을 '핵심 종(core species)'이라고 정의한다. 10년 이상의 수명을 누리면서 유류오염의 영향을 받기 쉬운 종에는 다음과 같은 것들이 있다 - 이끼, 산호말, 홍수림, 일부 달팽이 종(특히 삿갓조개), 산호, 게 및 바닷가재 종, 얕은 물에 사는 조개류, 굴에 사는 바닷고슴도치, 새와 파충류 및 포유류의 몇몇 종이 해당된다.

이러한 종들 중에서 홍수림에 끼치는 장기적인 영향이 가장 큰 것으로 조사되었다 (NOAA, 2002). 유류가 홍수림을 고사시키고 나서 사라진 뒤에, 자연 재생에 의하여 예전처럼 다른 생물상과 야생생물을 지탱할 수 있는 상태로 자라는 데는 많은 시간이 걸리게 된다. 산호에 미치는 장기적인 영향에 대해서도 보고된 바 있다. 산호가 오염에 그다지 취약하지 않고 회복 잠재력이 높지만 생물학적인 다양성에 대한 잠재적인 후속 영향은 매우 높다. 우리나라에는 홍수림은 없으나 생태적으로 민감한 염습지와 해안사구 등의 보전가치가 높은 지역이 유류유출 영향권에 분포한다.



(그림 15) 염생습지(안면도 장곡리, 2008. 7)와 갯조개(보령시 외연도, 2008. 10)

그러나 이끼의 경우를 제외하고, 오염사고에 관한 연구들은 위에서 언급한 종들의 저성장으로 인한 오염의 장기 영향에 관해서 근거를 제공하지 못하고 있다. 물론 이러한 결과는 개체군의 나이와 크기에 관한 자료의 부족 때문인지도 모른다. 일부 유류오염사고 후 바닷새들의 폐죽음의 규모를 감안하더라도, 이들 개체군의 회복 잠재력이 대단함을 알 수 있다. 갯조개와 새에 관한 연구는 비록 오염이 개체수에 통계학적 영향을 끼치기는 하겠지만, 남아 있는 개체군이 생산력에의 영향을 신속하게 완화시킨다는 사실을 시사하고 있다.

1978년 Amoco Cadiz 오염사고 후의 조간대 갑각류 개체군의 느린 회복상황은 여기서 우리가 다루어야 할 정도로 흥미롭다. Dauvin(1998)의 자료에 의하면 갑각류의 개체수는 현재 매우 줄어들었지만, 샘플링을 하는 기간 내내 밀도는 보통의 상태를

유지하였음을 보여준다. 따라서 갑각류의 잠재적 번식률을 감안할 때, 지리적으로 고립된 것이 원인은 아닌 것 같다. 다른 곳에서의(이 곳에서는 밀도가 높은 *Ampelisca*의 나팔관들이 해저서식지의 구조에 영향을 끼치는 매트 모양의 지형을 형성하였다.) 이와 유사한 정도로 밀도가 높은 *Ampelisca* 개체군에 대한 관찰은 이러한 설명 방식에 대한 대안을 시사하고 있다. 일단 이 개체군들이 임계 밀도상태에 다다르게 되면 Dauvin이 설명한 스스로 지탱하는 ‘극상상태’를 형성하는 것 같다. 하지만 이러한 밀도 상태에 다다르기 위해서는 시간이 걸리고 특별한 환경상태가 전제가 되어야 한다. 이 경우가 바로 특정 종이 위와 같은 고밀도의 매트 상태를 형성하여 ‘핵심 종’의 지위를 획득하는 사례인 것으로 생각된다. 이와 함께 특정 종이 이렇게 매트를 서서히 형성하여 오래 유지하는 것이 오염이 장기적인 영향을 끼치는 것이 가능하도록 하는 것으로 보인다. 오염사고 이전과 이후의 *Ampelisca* 개체군(매트를 형성하지 않은)에 대한 연구들(Nikitik & Robinson, 2003)은 오염의 심각한 영향을 보여주고 있고, 또한 이러한 유출사고 영향 후 3~4년 이내에 오염사고 이전의 상태로 회복됨을 확인하여 주고 있다.



(그림 16) 갯가재 폐사체(2007. 12)와 구멍갈파래 이상증식 가입(태안군 의항리, 2008. 6)

③ 자연재생 잠재력의 한계

유류유출지역의 유류가 분산되는 패턴은 전면적으로 퍼지지 않고 국부적으로 집중 분포하는 상태를 보이고 있으며, 대부분의 종이 분포하는 범위에 비해서 매우 좁은 범위에 유류가 분산된다는 점을 감안한다면, 어떤 종이 대규모로 피해를 입을 수 있다. 그러나 어떤 종은 외부의 자연재생 원천지로부터 지리적으로 떨어져 있거나 제한된 자연재생능력 특성을 가진 지역적인 개체군을 이룬다.

지역적인 개체군을 결정하는 요소들에는 다음과 같은 것 - 물리적 장벽, 거리, 분포 범위의 경계, 번식 장소와 먹이를 구하는 장소 간의 강력한 연계성, 포자·유충·미성숙체·성숙체의 제한된 분산 기제(機制), 지역적인 자연재생을 제한하는 다른 재생산의 구조적 특성 등이 있다.

유류오염사고에 관한 연구들은 부분적으로 자연재생 잠재력의 한계 때문에 일어나는 장기적 영향에 대한 예들을 보여준다. 하지만, 1996년 Sea Empress 오염사고 후의 Asterina 불가사리의 예기치 않은 회복 사례는 대부분의 종이 오염피해에 취약한 정도를 예측하는 데 조심스럽게 접근하여야 할 필요성을 제기하고 있다.

④ 과도한 유류오염 방제작업

심각한 오염 영향을 끼치는 벌크 상태의 유출유류를 제거하거나 소산시킴으로써 장기적 영향을 줄일 수 있다. 그러나 물리적인 방제작업이 무리하게 이루어질 경우 오히려 장기적 생태영향을 끼칠 수 있다는 사실이 널리 알려져 있다.

오염사고의 연구들은 습지에서의 과도한 방제작업 때문에 장기적 영향을 끼친 사례들을 보고하고 있다. 하지만 동 연구들은 암석 또는 자갈 해변의 경우(Torrey Canyon 과 Exxon Valdez 사고 지역)에는 1차적인 회복과정이 매우 신속하게 이루어지는 반면, 장기적 영향은 주로 2차적 회복 과정에서의 요동(搖動)에서 나타난다는 것을 보여주고 있다.

위의 두 오염사고의 연구 결과와 Sea Empress 오염사고 후 전혀 방제작업을 하지 않았던 서부 앵글만에서의 삿갓조개 개체군에 대한 상세한 연구를 비교해보면 흥미롭게 나타난다. 만안에서는 50% 이상의 삿갓조개가 죽었으나(곳에 따라서는 거의 100%가 죽은 경우도 있다), 채 5년이 지나지 않아 별다른 2차적인 회복과정의 요동 현상을 겪지 않고 거의 완전히 회복되었다. Torrey Canyon(1967)과 Exxon Valdez(1989) 오염사고 현장의 경우 과도한 방제작업으로 인하여 해변의 거의 모든 종들이 대량으로 죽고 서식지 교란이 발생하였기 때문에 오히려 요동이 증폭되었던 것으로 추정하고 있다.

그리고 물리화학적 분해기능의 제2세대 또는 미생물 분해기능의 제3세대 유화제를 사용한 경우에 장기적 영향이 있었다는 사례는 아직 보고된 바 없다. 그러나 활용 가

능한 자료가 매우 제한되어 있고 화학적 예멸전으로 분산된 유류가 뱀 성분의 퇴적물에 포획·흡착되었을 수도 있다(이 경우 장기적인 생태학적 영향을 끼칠 잠재력을 갖고 있다고 할 것이다). 특히 부유사(浮遊渣, suspended matters) 등 부유물질 함량이 높은 해수에 유화제를 저속으로 살포한 경우 특히 그럴 가능성이 높다.

(2) 해양생태 회복 잠재력

해양환경에 잔존하는 유류는 확실히 장기적인 생태영향의 잠재력을 지니고 있다. 유출유류가 일단 제거되고 나면, 서식지가 유류오염 방제작업으로 인하여 물리적으로 손상을 입지 않는 한 대부분의 개체군과 군집들은 신속하게 회복된다. 일부 종들의 경우 생물학적 특성이 느리게 회복되는데, 이러한 경우는 장기적인 유류 오염의 영향을 받는 개체군들이다. 유류가 제거된 곳에서의 느린 회복의 경우도 자연적인 요동과 환경 스트레스는 복잡한 양상을 보이고 있다.

Torrey Canyon(1967) 유류유출사고 후로 탄화수소 분석, 해양생물 치사에 영향을 주는 스트레스, 군집의 요동과 교란을 검정하는 기술테크닉 분야에서 장족의 발전이 있었지만, 이러한 발전은 다른 시각을 갖고 있는 생물학자들 간에 일치된 견해를 끌어내는데까지는 이르지 못하고 있다. 여러 연구자들의 견해에 따르면, 몇몇 대형 유류 오염사고 관련 연구들이 지역적 규모의 생태학적 변이과정에 대해서는 통찰력을 보여주고 있지만, 보다 넓은 범위의 생태계에 대해서는 그렇지 못한 실정이다. 이러한 결과는 어류와 오염의 확산 등에 관한 연구들이 우리에게 통찰력은 제공하는 성과가 있었던 것에 비하면 대조적이라고 할 수 있을 것이다. Gesamp(2001 b)의 연구는 유류 오염을 전 지구적 차원에서 우선 대처해야 하는 일들의 우선순위에서 낮은 순서와 지역적 문제로 제쳐두고 있다. 유류오염사고의 생태학적 영향을 연구하기 위해서는 다른 요소들의 환경 영향들과 관련시켜 연구하는 것이 중요하다.

위에서 논의한 바에도 불구하고, 여러 가지의 포착하기 힘든 장기적인 환경에 끼치는 영향들이 유류오염으로 인해 발생하는 것 같다. 그리고 이러한 영향들은 데이터가 부적당하거나 자연적인 요동이 그 영향을 가리기 때문에 판단하기가 힘들다. 예를 들면, 자연적인 재생 잠재력이 약한 폐쇄된 지역에서 개체수가 적은 민감한 종들의 치사율로 인한 생태학적 다양성의 손실은 비교적 적다는 것이 알려져 왔다. 한편 유류오염으로 인하여 서식지에 빈 공간이 생기면서 여기에 새로운 종이 군락을 이룰 기

회를 제공하기도 한다.

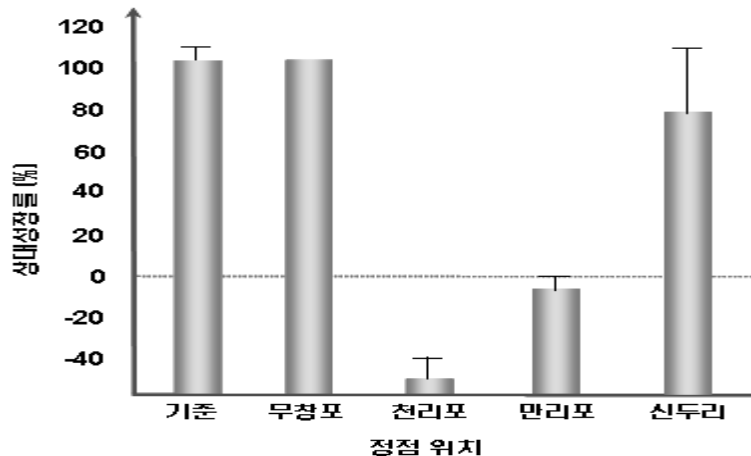
결론적으로 다른 인간 활동으로 인한 만성적인 환경영향과 기후변화로 인한 스트레스가 생태학적 자원들을 유류오염 사고로 인한 영향을 더 취약하게 만드는 것 같다. 어떤 개체군의 회복 잠재력은 다른 형태의 오염, 어류 남획, 기타 환경훼손 활동에 의하여 약화될 수 있다. 예를 들어 같은 해 같은 장소에서 Braer호 유류오염사고(1993)와 같은 대형 사고가 지금과 같은 상황에서 발생한다면, 조류에 대한 장기적인 영향이 보다 심각해질 것이다. 영국 북부에서는 기후영향과 바닷새의 먹이 부족 및 어류 남획이 겹쳐서 지난 수년간 바닷새 개체군에 심각한 영향을 끼쳤다(JNCC 2005). 유류 오염사고로 인한 추가 사망률이 올라가고 그 결과 개체군의 상태가 약화되면서, 신속하게 회복할 수 있는 잠재력을 확보하지 못하게 되는 것 같다. 또 기후변화와 연안개발 등으로 인하여, 전 세계적으로 산호초의 취약성이 매우 높아졌다(Waddell 2005). 이처럼 생물 개체수와 종 다양성 간의 감소 상승작용으로 환경생태 회복 잠재력은 감소하게 된다.

제3장 유류오염 실태조사

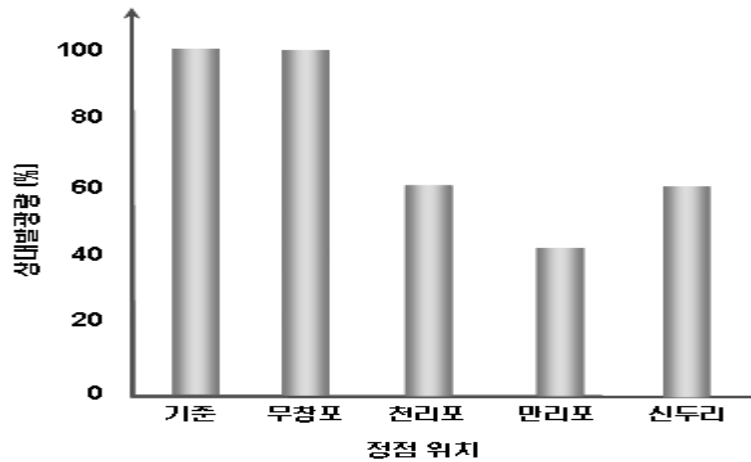
1. 서해안지역 유류오염 피해상황

2007년 12월 7일 태안 앞바다 북서쪽 10km 해상에서 삼성중공업 소속 부선과 정박중이던 홍콩 선적 유조선 허베이 스피리트호가 충돌하여 12,547kL 원유를 유출시키며 서해안 일대에 검은 재앙을 일으켰다.

유출된 기름은 만리포, 천리포, 신두리 등의 인근 해수욕장과 가로림만, 천수만, 주변 섬으로 유입되면서 해양생태계를 파괴시켰다. 각종 바닷새들이 기름범벅이 되어 죽어갔다. 유출 후 시간이 지나면서 갯벌에 살던 고둥, 성게, 갯가재(썩), 갯지렁이와 같은 저서생물들이 큰 피해를 입었다. 12월 10일 사고해역과 비교해역 조사에서 만리포, 천리포, 신두리에서 채취된 해수에 대하여 생물검정을 실시한 결과 해양성 식물플랑크톤의 성장 저해 및 사망이 관찰되었고 발광박테리아의 발광저해 역시 관찰되었다.



(그림 17) 연안 정점 미세조류 성장률 테스트결과



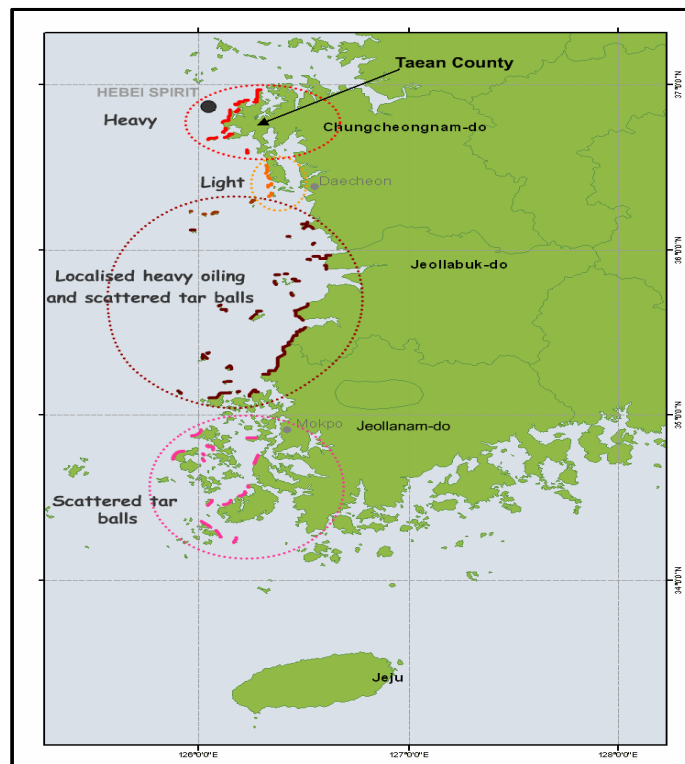
(그림 18) 연안 정점 해수 발광미생물 테스트결과

유화제는 계면활성제와 용매로 구성되어 있어 기름과 물이 쉽게 섞일 수 있게 하는 약품이다. 주로 기름 유출 초기 기름을 잘게 쪼개서 미생물 분해 촉진을 유도하고 기름띠가 해안가로 밀려들지 않게 하려는 목적으로 사용된다. 유화제를 사용하면 기름이 잘게 쪼개지고 물과 섞여 기름띠가 사라진다. 휘발성 물질이 대부분 날아가고 없는 상태이거나 휘발성 물질 함유량이 원래부터 적은 유류가 유출된 경우라면 유화제를 뿌려도 별 효과가 없다. 따라서 현장에서의 적절한 판단아래 필요한 경우 적정량의 유화제 살포가 필요하다. 유화제는 사용에 대해서는 국제적 지침이 존재한다. 수심 10m 이내에서 사용 금지되어 있고 살포 후 3시간 이내 어장에 도달할 수 있는 지역에서도 살포가 금지되어 있다. 10~20m 수심에서는 매우 조심스럽게 사용할 것을 권고하고 있다.

유화제가 기름을 근본적으로 없애주지는 않는다. 유화제 자체는 독성이 약할 수 있지만 유화제로 분산된 에멀전 유류는 독성이 남아있다. 녹아나온 기름의 양이 일시적으로 증가하기 때문에 독성 영향은 오히려 일정시간 동안 강하게 나타날 수 있다. 바다에 녹아들은 상태로 존재하는 유류관련 유해물질들은 여러 경로를 통해 해양생물에 유입되면서 생태계에 영향을 주게 된다. 유화제 사용으로 큰 기름덩어리들이 쪼개져 작은 기름덩어리들이 만들어지면서 에멀전 오일이 형성되는데 에멀전 오일은 수층에 머무르면서 해류나 조류에 따라 먼거리를 이동하다가 해안가에서 터지거나 엉겨 붙기도 한다. 태안에서 발생한 기름유출 사고로 형성된 에멀전 오일과 타르볼은 전라

남도 지역 해안가와 양식장에 피해를 입히고 한달 후에 제주도까지 이동한 것으로 조사되었다. 유류유출 피해 상황을 보면 태안·보령지역을 중심으로 유화제로 분산된 수중유(oil-in-water) 상태로 해안에 표착되었고, 충남의 5개 시·군 59개 도서, 부안, 신안 등 전남북 42개 도서에 주로 경화된 타르덩어리가 부착되었다. 이에 따른 피해 상황으로는 서산·당진의 가로림만에서 안면읍 내파수도까지 해안 167km를 따라 473개소의 어장 5,159ha와 해수욕장 15개소에 피해가 집중되었다. 전남지역에서는 영광, 신안지역을 중심으로 김양식장과 마을어장 22,261ha 가 피해를 입었다.

이에 따라 2008년 10월 말까지 폐유 4,175kL, 유류오염폐기물 32,074톤이 회수되었다. 방제 과정에 동원된 주요 장비와 자재는 유흡착재 498톤, 유처리제 298kL, 오일펜스 47km 등이며, 방제 인력으로는 자원봉사자 130만, 주민 54만, 군·경·공무원 29만 등 213만명에 이르렀다.



(그림 19) 허베이 스피리트호 유류유출사고 오염도 현황

1) 해역별 유류오염 상황

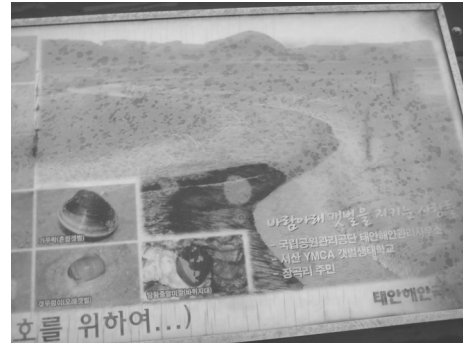
유류유출 시 사슬모양의 저분자물질과 방향족화합물은 휘발성이 높아 대부분 대기로 쉽게 휘발산된다(원유 중 함량은 30~40% 내외). 그리고 초기 유출량의 40% 정도가 풍화된 형태로 환경에 남게 된다. 이 반고상의 잔류물은 그 물질자체의 위해성은 낮으나 액상으로 생태계에 장기간 체류할 경우 복원을 저해한다. 갯벌생물 서식지나 해안 사석(riprap) 등에 잔류유분이 산재해 있다.



(그림 20) 태안의 잔류유분

2) 염습지 지역

유류유출에 따라 직간접으로 영향을 받은 염습지는 태안군 고남면 장곡리 바람아래해수욕장 인근지역인데, 이곳은 해안사구의 곰솔, 통통마디, 칠면초, 나문재 등의 염생식물 군락이 잘 발달되어 있다.



[그림 21] 태안 안면도의 염생습지

3) 갯벌 양식장지역

유출유류의 직접 영향을 받은 대표적인 지역은 태안군 소원면 의항리 개목항 북쪽에서 원북면 신두리 사이의 만안에 위치한 양식장으로 해안의 기질조성은 주로 사질토 및 니사질(泥砂質) 점토로 구성된 빨로 되어 있다.



[그림 22] 유류오염에 의한 성게 폐사체와 양식장 시설 철거

4) 암반 및 바위지역

기질이 암반 및 바위로 된 조상대에 위치한 지역으로 2007년 12월 10일 사리 때

최상부까지 유분이 표착되었으며 시간이 경과함에 따라 표착된 잔류유분이 반고체상의 아스팔트로 고화가 진행되고 있어 방제 작업의 강도면에서 고압세척이 이루어진 곳이 많다.

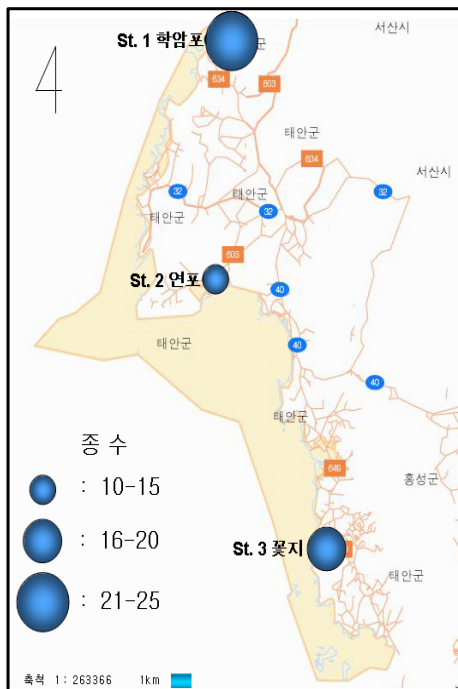


(그림 23) 유류오염지역 현황과 방제작업(가의도, 태배, 호도, 소근진)

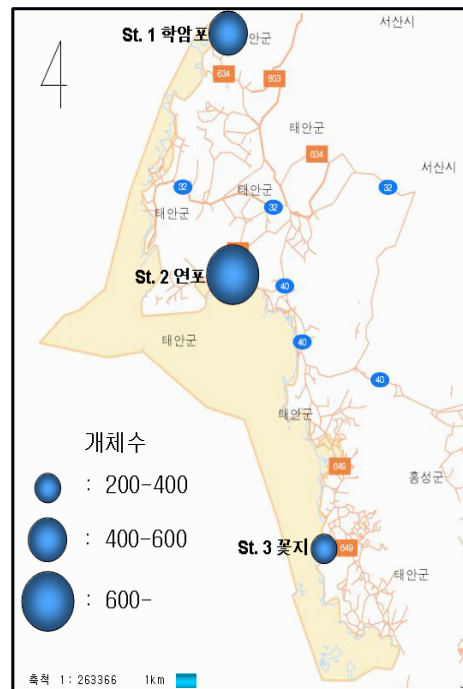
2. 연안생태계 저서생물상 변화 비교

해양 저서생태계에서 무척추동물은 출현종수나 생물 현존량에 있어서 가장 풍부하게 나타나는 2차 생산자이며, 생태학적으로 중요한 기능을 수행한다. 해양에서 무척추동물은 천해의 조간대를 포함한 대륙붕지역에 풍부하게 분포하고 있으며, 그 분포는 일반적으로 수질 및 저질의 생물·물리·화학적 요인에 의해 영향을 받는다. 태안 연안 해역은 서해 연안 가운데 비교적 관리가 잘되고 있는 지역으로 연성저질(軟性底質,

soft substrate) 생물상이 다른 지역에 비해 비교적 양호한 편이었다. 하지만 유류오염 사고는 조간대 생태계에 심각한 피해와 교란을 초래했을 것으로 판단된다. 유류오염에 의한 생태계의 영향은 유류오염 발생 시, 가능한 한 빠른 시간 안에 조사가 이루어져야 유류오염 사고 전후의 생태계 변화를 비교하고 유류오염의 영향을 조사가능하게 할 수 있다. 특히 이번 유류오염 지역의 태안해안국립공원 지역에서 조간대 생물에 관한 연구가 진행된 사례가 있다(2007년 태안국립공원자연자원조사 보고서, 2007). 따라서 유류오염 지역 내에서 오염발생 전후의 생태계를 직접적으로 비교할 수 있다. 태안 연안역 중 3곳(학암포, 연포, 꽃지) 연성기질 해역에서 유류오염 전후의 저서 무척추동물 출현 양상을 비교함으로써 유류오염에 따른 오염지역 내 저서 무척추동물의 생물상 변화를 조사하여 비교하였다.



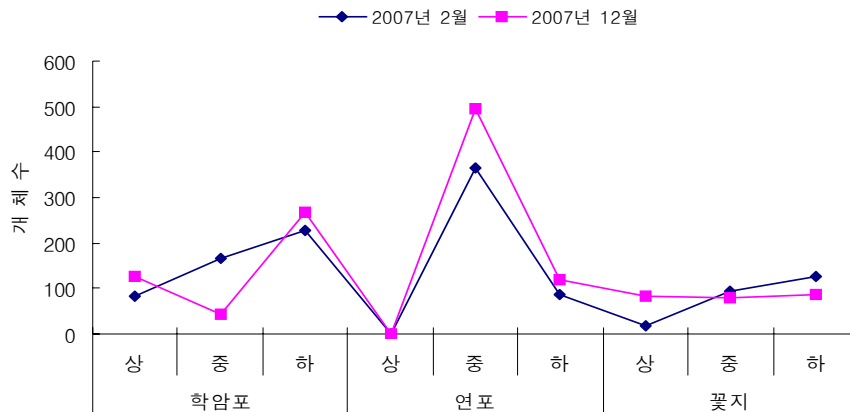
〔그림 24〕 정점별 종수 분포도



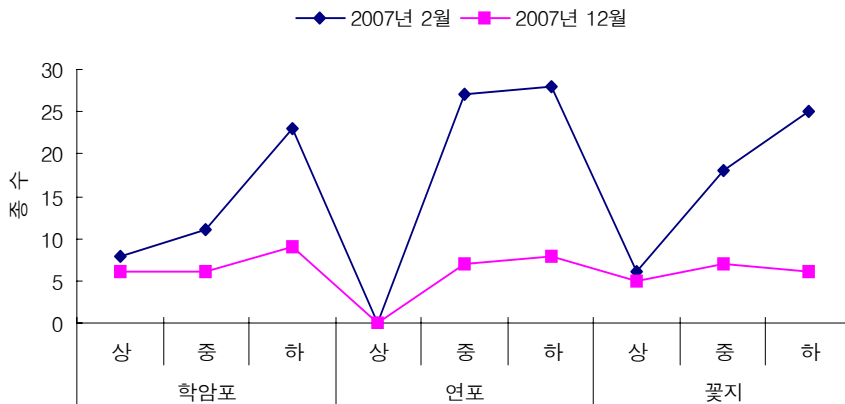
〔그림 25〕 정점별 개체수 분포도

1) 저서 무척추동물 출현양상

유류오염 발생 전인 2007년 2월과 유류오염 발생 후인 2007년 12월(태안국립공원, 2007)에 출현한 저서 무척추동물의 개체수는 유사하게 나타났으나, 2007년 12월 유류오염 발생 후 저서 무척추동물의 종수는 2007년 2월 유류오염 발생 전보다 감소하였다.



[그림 26] 유류유출사고 전후의 개체수 비교



[그림 27] 유류유출사고 전후의 종수 비교

2) 고찰

일반적으로 조간대 생물의 유류오염으로 인한 피해는 암반 조간대에서는 담치류와 고둥류에서 직접적인 피해 영향이 나타나고 있는 경향을 보이며, 종수와 개체수의 감소가 바로 나타남을 알 수 있다(Peterson, 2000). 그러나 연성 조간대의 경우 그 피해가 바로 나타나지는 않는다고 보고되고 있다. 그러나 갑각류 중 갯벌 조간대에서 우점하는 계류나 단각류(端脚類)의 경우에는 이들이 유류 독성에 예민한 종류이므로 그 개체수의 감소가 바로 나타나며, 회복 또한 오랜 시간이 소요된다고 보고되고 있다(Peterson, 2000). 본 조사에서는 조사지역 갯벌 조간대의 저서 무척추동물의 개체수는 별로 차이가 없으나, 종수에서는 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 그러나 이번 유류 오염의 직접 피해 지역인 학암포의 경우, 개체수에서는 2007년 2월 158개체/m²였으나, 12월 경우 147개체/m²로 다소 감소하였고, 종수에서도 2월 총 42종에서 12월 총 21종으로 많이 감소한 것을 볼 수 있다. 특히 학암포에서 유류오염에 민감한 갑각류의 경우 2월 8종 133개체/m²가 출현하였으나, 12월에는 5종 56개체/m²로 그 감소폭이 크게 나타났다. 단각류의 경우를 보면 그 양상을 더욱 잘 알 수 있는데, 개체수는 뚜렷한 감소가 나타났고, 단각류 중 모래 옆새우(*Dogielinotus loquax*)는 조간대 중부에서 우점하는 종이었는데 유류오염 이후 전혀 채집되지 않았다. 우점종의 변화를 살펴보면, 2007년 2월에는 최우점 종인 서해비단고둥과 백합치패가 출현하였는데, 12월의 경우 납작 얼굴갯지렁이와 백합치패가 그 지위를 차지하였고, 2월에 우점종으로 나타났던 단각류 중 모래 옆새우(*Dogielinotus loquax*)가 전혀 출현하지 않았다. 특히 2월에 전 지역에서 최우점종이었던 서해비단고둥은 5위로 밀려났으며, 그 자리를 다모류인 납작 얼굴갯지렁이가 1위를 차지하고 있음을 알 수 있다. 전반적으로 아직 우점종을 차지하는 종류의 변화는 심하게 나타나지 않았으나 갑각류의 경우 그 지위가 바뀌어가는 양상을 보이는 것을 알 수 있다.

3. 유류오염 폐기물처리

1) 유류폐기물 처리현황

유류유출 초기에 회수된 유류폐기물은 액상과 고상으로 나누어 처리하였다. 그 현황으로 액상폐기물은 해양환경관리공단 주관으로 현대정유로 이송·보관, 재처리하고, 고상폐기물은 해경 주관으로 피해검정회사인 한국해사감정(보험사 대리인)이 12개 구역별로 20개 방제업체를 지정, 수거된 액상·고상 폐기물은 방제조합 또는 방제업체별로 폐기물처리업체를 개별 접촉하여 운반·처리하였으나 처리체계 미흡으로 운반처리가 지연되었다.

수집·처리체계의 문제점으로는 수거된 유류폐기물의 신속한 운반·처리가 지연된 이유로 20개 방제업체별로 폐기물처리업체와 개별적으로 계약 및 처리방안을 논의하고 있어 신속·적정 처리가 지연되었다. 그리고 폐기물 처리비용의 부담주체, 정산방법 등이 불확실한 상황이어서 폐기물처리업체의 적극적인 참여와 조치가 이루어지지 못했다.

수거된 유류폐기물(폐기물관리법상 지정폐기물)은 많으나, 이를 수집·운반할 수 있는 허가차량(지정폐기물 수집·운반 차량)이 절대적으로 부족하여 수집·운반에 애로가 있었다. 수거된 유류폐기물의 신속한 처리가 지연됨에 따라 다양한 후속 문제점으로 비가 올 경우 수거된 유류폐기물이 누출되어 2차 오염유발 우려, 수거 폐기물의 운반·처리가 지연됨으로 인해 침출수 발생, 수거작업에도 영향을 미칠 우려가 있었다. 이에 따라 처리업체 선정이 지연되어 수거된 유해폐기물(지정폐기물)의 무단투기 또는 부적정 처리도 우려되는 실정이었다. 유류폐기물은 폐기물관리법상 지정폐기물에 해당되어 적정 자격을 갖춘 업체에서 수집·운반·처리(주로 소각)되어야 한다.

액상폐유 처리 방법으로는

- 유분을 소각한 유수분리 후 남은 물 폐수처리
- 증발농축 처리수 잔재물은 소각, 안정화처리
- 응집 침전 처리후 잔재물 소각
- 분리, 증류, 추출, 여과 열분해 처리후 정제처리

고상폐유 처리 방법으로는

- 소각하거나 안정화처리
- 타르피치류 처리 방법으로는 소각하거나 관리형 지정폐기물 매립처리

폐유는 정제유로 재활용이 가능한데 이때 산업규격적합연료로 검사를 받아야 한다.

신속·적정처리 보완대책으로 폐기물의 수거와 처리를 구분하여 폐기물 처리를 추진하기 위해 유류폐기물 수거는 방제업체 주관으로 수행하였고, 한국해사감정이 산업폐기물공제조합과 협의하여 12개 처리구역별로 폐기물처리업체를 지정, 처리하도록 하였다. 수거된 유류폐기물의 처리비용 정산조치는 유류폐기물의 신속한 처리를 위하여 “선 처리, 후 정산” 원칙하에 모든 작업을 추진하고, 수거 폐기물의 적정 처리를 기하고 추후 비용 정산에 정확을 기하기 위해 폐기물 적법처리시스템(Albaro)을 적용하여 태안 계량소 설치 운영 등을 추진하였다. 이 과정에서 정부(환경부, 국토해양부, 해양경찰청), 한국해사감정(보험사), 산업폐기물공제조합 등 관계기관에서 협의하여 적정 비용을 결정하되, 협의가 어려울 경우 정부 차원에서 적정처리비용을 결정하는 방식으로 추진기로 하였다.

폐기물의 원활한 수집·운반을 위한 행정지원 사항으로 유류폐기물의 원활한 수집·운반을 위하여 시·군 청소차량 등 동원가능한 일반차량에 임시 수집·운반 허가증 발급하여 폐기물의 신속한 처리를 위해 청소차량 등 차량지원 조치를 하였다. 그리고 폐기물 처리업체에서는 수거된 유류폐기물을 우선적으로 처리토록 하기 위하여 기존에 위탁받은 폐기물에 대하여는 보관기간 연장 등의 조치가 이루어졌다.

폐기물처리 현지 대책반 구성·운영은 수거된 유류폐기물의 신속·적정 처리를 위해 태안군청에 “유류폐기물 처리대책반”을 설치·운영하였는데 환경부 산업폐기물과, 금강유역환경청, 충청남도, 태안군, 해양경찰청, 한국해사검정, 산업폐기물공제조합 등으로 구성하였다. 2008년 1월말까지 연안에 수집된 유류폐기물 발생량 10,200톤 중 8,434톤(83%)을 적정 처리할 수 있는 지정폐기물 처리시설(주로 소각처리)로 이송 완료하였다. 반출되지 못해 임시보관된 유류폐기물(약 1,800톤 추정)은 차량진입이 가능한 지역부터 반출·처리되었다. 매일 발생하는 유류폐기물을 즉시 처리시설로 이송하고 차량과 장비 진입이 어려운 지역과 도서지역 등에 산재되어 있는 유류폐기물을 수

거·반출하는 작업은 해양경찰청 협조 하에 유류폐기물의 2차 오염 발생방지에 중점을 두고 추진되었다.

2) 유류폐기물 현장처리

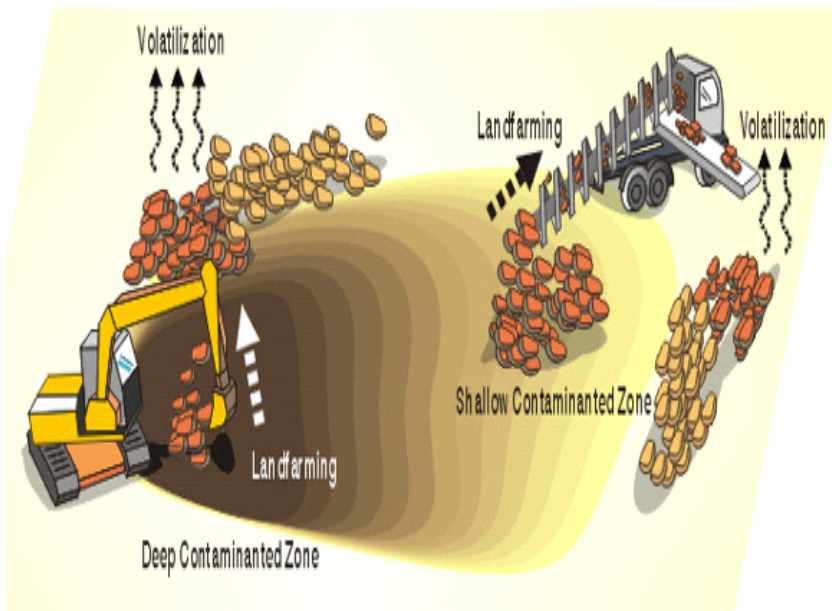
모래와 자갈 해안, 제방 등에서 수거한 기름이 묻은 모래, 자갈, 흙착제 등의 안전한 폐기는 쉽지 않다. 방제복과 폐유분, 기름찌꺼기 등은 현행법상 지정폐기물로 분류되므로 전문처리업체에서 수거 위탁처리하고 있다. 그런데 손해배상문제로 방치해 놓은 폐사된 양식장 굴, 바지락 등 패각류와 지주목 등은 소각시키는데 비용이 많이 소요되고, 분리나 세척도 시간이 많이 소요된다. 도서지역에서 제때 수거조치가 어려운 유류오염폐기물은 생석회를 혼합하여 매립하는데, 이 때 경운기 로타리장치(rototiller, rotovator) 등으로 섞어 기름성분이 있는 물질 중 수분은 석회와 반응하여 열을 발생하고 혼합을 촉진하게 된다. 생석회로 혼합처리하면 발열반응에 의해 수중유(oil-in-water) 상태의 기름이 조기 고화되어 흘러나오지 않으며 안정화된다. 한편 유류오염도가 심한 지역은 굴삭기로, 덜한 지역은 선별기로 기계적인 토양경작법으로 제거하는 방법도 있다.



[그림 28] 해안지역의 유류폐기물 임시매립지(보령 호도)



〔그림 29〕 유류폐기물 처리지점



〔그림 30〕 토양경작법 유류제거

3) 유류폐기물 성상분석

유류유출 이후 해안선정화평가팀(SCAT)의 현장조사와 방제작업에 따른 방제성과 평가 시 현장 조사를 통해 해안선에 표착된 원유, 유화제에 의해 분산된 후 해안에 표착된 초콜릿무스 상태의 안정화물과 타르 덩어리의 성상을 분석하였다.

2008년 1월 9일 안면읍 내파수도에서 포집된 원유시료와 유화제로 분산된 반고체상의 초콜릿무스의 성상을 비교하면 모든 성분에서 초콜릿무스가 높았다. 따라서 동일지점이라도 안정화상태의 반고상이 되면 성분이 농축됨을 알 수 있다.

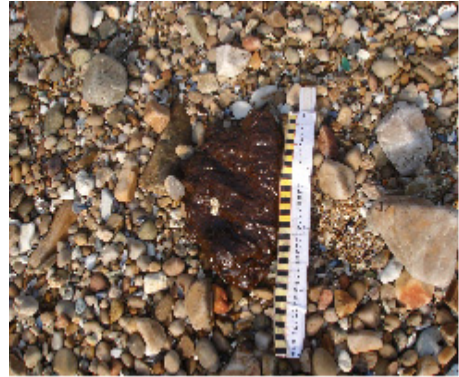
한편 2008년 4월 4일 이원면 내리 꾸지나무골에서 표착된 고상의 타르 덩어리는 대체로 시간이 경과하여 성분의 함량이 높아졌다. 그러나 2008년 4월 15일 소원면 파도리 해안에서 표착된 액상의 타르는 분산된 상태로 상대적으로 성분함량이 낮게 나타났다. 그리고 2008년 10월 8일 학암포 잔존유류(lingered oil) 방제현장에서 채취한 시료를 등유에 희석하여 분석한 결과 잔존유류 성분이 거의 없는 상태로 해안에 표착된 타르보다도 중금속 농도가 현저히 낮아졌다.

〈표 3〉 유류폐기물 화학물질 함량 성분 분석

(단위 : mg/kg)

성분	안면읍 내파수도		소원면 파도리	이원면 내리 꾸지나무골	원북면 학암포	원북면 학암포 R-2
	Fresh Oil	Mousse				
Fe	14.33	43.49	4.12	961.60	0.71	0.15
Ni	17.38	26.38	6.66	ND	ND	ND
Zn	1.10	1.66	ND	139.29	0.22	ND
Al	27.18	88.54	1.77	27.70	0.12	0.29
Cr	0.84	0.90	NA	NA	ND	ND
Mn	0.76	1.36	ND	5.51	ND	ND
Cd	0.36	0.37	NA	NA	ND	ND
V	16.44	37.33	18.61	1.32	ND	ND
P	23.45	30.94	ND	208.76	0.10	ND
Ca	18.35	63.81	2.87	83.96	0.49	0.43
Mg	31.62	151.26	1.51	73.01	ND	ND
Pb	3.81	4.49	ND	0.59	0.14	ND
Si	36.55	127.99	1.84	69.58	0.06	0.03
Ti	1.28	3.50	ND	1.25	NA	NA
Sb	42.63	152.75	1.72	66.46	NA	NA

(주) ND ; Not Detected, NA ; Not Available



(그림 31) 안면읍 내파수도 표착 유류와 초콜릿무스



(그림 32) 이원면 꾸지나무골 표착타르



(그림 33) 소원면 파도리 표착타르

4) 유류오염 토양의 고화처리

유류폐기물의 물리화학적 처리는 안정화, 불용화 방법이 있는데 유류오염 토양에 소석회를 혼합(표준 5%)처리하면 수 일 내에 기름성분을 완전히 안정화 불용화 시켜 유류유출에 따른 환경상의 피해를 경감시킬 수 있다. 소석회에 의한 유류오염 토양 안정화 메카니즘은 다음과 같다.

유류오염 토양에 소석회($\text{Ca}(\text{OH})_2$)를 첨가, 혼합 교반한다. 소석회와 토양중의 수분이 접촉하면 수화(hydration)반응이 일어난다. 소석회의 계면활성제 작용으로 수화반응 속도가 지연되면서 석회입자가 유류(액상, 고상)를 동시에 미세화시키는 분산반응이 일어난다. 분산된 유분이 흡입자에 흡착, 포함되어 소수성이 있는 안정한 물질이 된다. 시간이 경과함에 따라 물질표면에서는 탄산가스가 반응해 불용성의 석회석 피막이 형성되며 pH는 중성화된다. 이때 토양입자내의 유분이 규소성분과 반응하여 결정광물을 생성해 강도가 증가한다. 그 결과 토양의 압축강도가 높아져 물의 침투를 방지할 수 있다. 미세화된 표면적이 증대된 유분은 장기적으로는 흙속의 미생물에 의해 분해되어 자연감소된다. 처리 후의 토양은 최종적으로 석회석의 입자가 되어 불용화, 무해화된다. 따라서 이러한 방법은 토양화학적 방법으로 현장에서 유류오염 폐기물과 유류오염 토양을 신속히 처리할 경우 적용할 수 있는 방법이다.



(그림 34) 소석회에 의한 유류오염 토양 안정화 기작

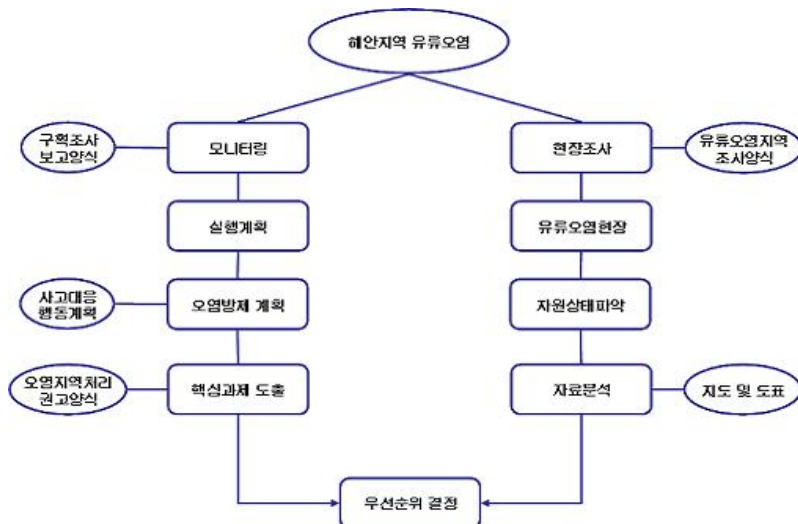
제4장 유류오염지역 방제관리 방안

1. 유류유출 방제 종료점 설정

1) 개요

본 내용은 해안지역 유류오염에 대한 방제 종료점 측정과 선택할 수 있는 방향과 지침을 제공하는 데 목적이 있다(해안유류유출 방제종료점 가이드라인, 캐나다 환경부, 2007). 방제 종료점 설정과 관련하여 토론을 포함한 연구논문, 복잡한 틀구조, 단순한 종료점 요약서 등이 있지만 국가/국제적인 방제 종료 판단점(준거치)과 기준, 널리 사용할 수 있도록 상세하게 제공하는 특정기관의 설정한 절차 등이 마련되어 있지 않다.

Owen과 Sergy(2003)는 방제 종료점과 관련하여 간단하고 구체적인 의사결정 방법론, 즉 상대적으로 단순하면서도 실질적이고 종합적이며 보편적으로 적용할 수 있는 경우는 가능하지 않다고 하였다. 각각의 유류유출 상황이 다르기 때문에 방제 종료점은 사건의 특정여건을 만족시켜야 한다. 그러나 생생한 의사결정 과정의 틀 구조로 쓸 수 있는 설명 및 사례와 함께 적용할 수 있는 기본적인 개념과 원칙이 있다.



[그림 35] 유류유출 해안방제 정화작업 및 생태모니터링 흐름도

2) 방제 종료점의 정의

해안지역 처리나 해안선 정화 종료점은 구획별, 유류 오염지역별로 할당한 특정 준거치인데, 충분한 처리(오염제거) 노력이 구획이나 단위지역에 대해 완결되었을 때로 규정하고 있다. 실제로 방제 종료점은 특정유류유출에 대해 실질적인 '정화'상태에 대한 정의를 의미한다. 방제 종료점은 처리 활동을 평가하는 표준이다. '정화'상태는 앞서 정의한 대로 방제 종료점에 도달되어 유류에 오염된 해안선구획의 특정한 처리가 합의된 목적 또는 목표수준에 이르게 되었을 때를 말한다.

3) 방제 종료점의 목적

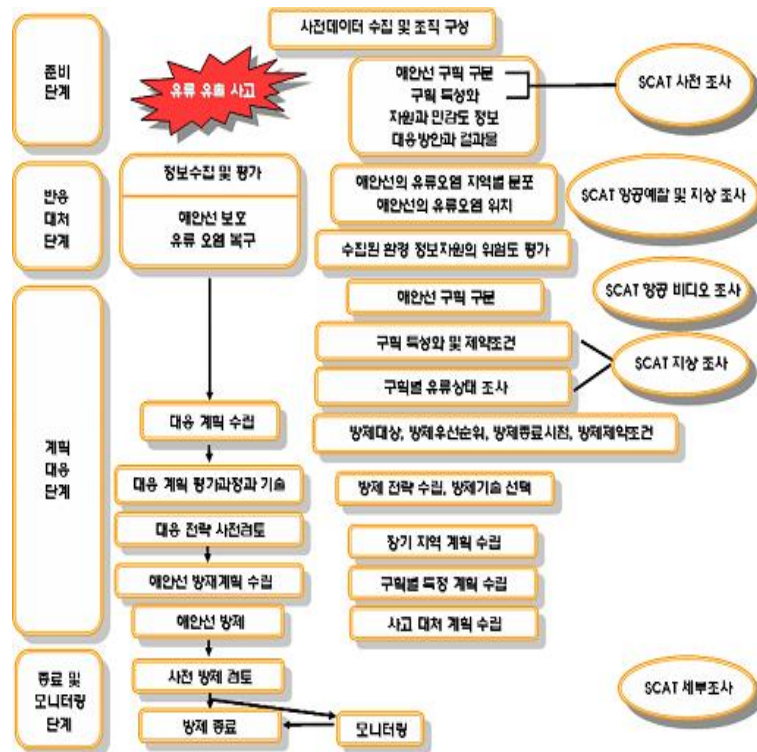
유류유출 방제를 위하여 처리 종료점을 설정하는 것은 의사결정 과정 관리, 방제 작업, 그리고 완전한 처리결정의 중요한 핵심이다. 유류유출 대응 책임자는 사전예방책으로 종료점 설정의 가치를 알고 있어야 한다.

해안선 처리 종료점을 할당하는 실질적인 이유는 :

방제작업 시작 전에 특정 지역 또는 해안선 구획의 처리 목적과 기술을 선정할 수 있도록 유류유출 관리팀을 돕고, 작업 감독관이 정화목표나 목적을 갖고 잘 알려진 정화완결점을 향해 그들의 활동을 적절하게 맞춰갈 수 있도록 제공하는데 있으며; 그리고 검사 팀에게는 방제 목적에 관한 처리 활동의 결과와 해안선의 조건을 평가할 기준과 준거치를 제공한다.

방제 종료점 설정과정의 중요한 잇점 :

해안선 처리 의사결정 과정에서 고려해야 할 다양한 환경, 사회, 경제적 요소의 인식과 평가를 촉진하고 적합하고 실질적인 방제 대안을 선택하는 것을 돕는데 있으며, 그리고 다양한 책임 기관과 이해당사자 간에 합의형성을 만들어가도록 시도하고 관심사항의 인식을 촉진하는 것이다. 모든 관련기관이 성취할 것이 무엇인지 같은 기대치를 공유할 때 효과적이고 성공적인 방제작업은 훨씬 더 가능해 질 것이다.



(그림 36) 유류오염지역 정화작업 의사결정 과정

4) 방제 종료점 측정을 위한 기본 방법

과거 유류유출과 다른 기관으로부터 처리 종료점은 4가지 방법론이나 접근법으로 구분한 범주로 나누고 있다(Owen과 Sergy, 2003). 정성적인 필드 관측은 기름띠의 존재유무 설명에 사용되는데, 기름의 특성, 예를 들면 관찰되는 기름 없음(NOO), 유동상의 기름이 없음, 기름 잔류물 없음, 또는 무지개색 유막이 없음 등으로 구분한다. 이 타입의 종료점 결정은 비교적 쉽고 단순한 서술 방식으로 빠르다. 직접 관측은 현장이나 항공예찰 비디오카메라 이미지로 보충받을 수 있다. 정성적인 필드 관측은 많은 유류유출 사고에서 사용되는데 종료점 설정의 일반적인 방식이다. 이 분류법 관련 절차는 정량적인 필드 측정 방법은 시각적 측정과 유류양 관측에 바탕을 두고 있다. 이 분류법은 많은 방제작업에 사용되었다.

측정방법은 한 가지 이상의 수치적 기준, 예를 들어, 기름에 오염된 범위, 표면 기름 분포율, 기름이 덮고 있는 범위, 기름 두께, 그리고 기름의 양을 포함한다. 가끔 기준은 또한 특정 장소나 기름의 형태에 핵심적인 요소로 작용한다. 이 시각적 접근법은 간단한 기술방식과 수치화한 출력으로 신속하고 분명한 절차로 방제작업 감독관에게 명쾌한 지침을 제공한다. 측정기준과 용어는 해안선 방제작업 평가기술(SCAT)과정에서 전형적으로 사용되는 것과 거의 같다.(Owen과 Sergy(2000) ; 2004) 분석측정방법은 일반적으로 여러가지 매체의 필드시료 대표군과 실험실에서 기구를 사용하는 후속 분석을 필요로 한다.

3가지 타입의 분석측정법은

- 기름 또는 특정 화학물질의 농도를 측정하는 화학 분석
- 독성 효과에 대한 시험생물의 반응을 평가하는 독성학 분석
- 악취물질의 인간 감지를 결정하는 관능법 분석

실험실 분석과 함께, 필드 분석용 측정 도구의 제한적 선택은 종료점 평가에 사용될 수 있다. 일반적이지 않더라도, 분석측정법은 특정 또는 이상 상황에서 기능할 수 있다. 그러나 가장 해석적인 기준은 급성보다 오히려 만성적인 문제와 관련된 건강 기준으로서 발전되어 왔다. 분석적 접근법은 종료점이 되는 지를 평가하기 위하여 대표시료를 모으고 적기에 결과를 도출하는 데에는 종종 비현실적이기도 하다.

설명을 위한 해석적 영향평가방법은 시스템 영향평가에 기초하여 처리 종료점을 개발하게 된다. 이러한 방법은 환경, 사회, 경제, 그리고 문화적인 요인을 포함할 수 있다(Dick et al . 2002). 이 접근법은 복잡도가 크게 변할 수 있다. 한 가지 수준에서 정성적, 정량적, 서술적 지표의 결합을 통해 상세하고 멀티요소 합성 방법으로 연결하고, 유사한 환경영향평가 연구에서 적용되는 비슷한 기법을 사용할 수 있다. 또 한편으로는, 그것은 평가자 자신의 경험에 기초한 단순한 척도로 간주할 수 있는 주관적인 판단이라 할 수 있다. 이 방법은 기본적으로 정성적 측정법이라기보다 해석적 평가방법이며, 그래서 개인적 주관성 정도를 가지고 있다.

정성적, 정량적 필드 측정에 바탕을 둔 종료점은 우선적 대안으로 추천한다. 이 방법은 거의 모든 유류유출에 적합하다. 정성적, 정량적 필드 측정에 바탕을 둔 종료점

은 거의 모든 유류유출에 적합하기 때문에, 이 지침은 정성적, 정량적 필드 측정 접근법의 관점에서 종료점까지 기록된다. 그럼에도 불구하고, 내용의 대부분은 또한 종료점을 설정하고 평가를 위한 다른 방법과 부합한다.

[illegible]

[그림 37] 해안 유류오염지역 조사기록 야장

5) 방제 종료점 설정에 영향을 주는 사안

알려진 배출원으로 부터 유류유출이 있을 때 처리 종료점 설정은 책임있는 당사자의 입력자료를 갖고 유류유출 관리팀과 책임있는 정부 부처에 의해 공동으로 결정된다. 의사결정 과정의 기작은 유류유출 관리팀의 조직에 달려 있다. 종종 처리 종료점의 초안 설계는 정부와 환경관련기관(Environmental Unit), 경험이 풍부하고 기술 과학 조언 자문관에 의하여 작성되는데, 어떤 점에서는 많은 이해당사자 그룹이 정책결정 과정에 간여하는 결과를 초래한다. 적절한 종료점 범위를 결정하는 과정은 상대적으로 단순한 것으로부터 어렵고 복잡해서 여러 단계의 협상까지 거치는 것이 있다.

국가, 지역, 지방자치단체, 정치 그룹, 대중매체, 그리고 영향권에 살거나 이용하는 지역민 등 다양한 이해관계에 작동하는 영향요소의 범위가 넓어 자주 타협이 요구된다. 이런데도 불구하고, 종료점은 모든 유류유출에 대해, 일반적이든 또는 개별 구획에 대해서든 설정되어야 한다. 종료점의 선택은 다음 문제와 기준에 의하여 좌우된다.

예를 들면,

- 해안선의 형태 : 기반암, 방조제, 모래 해변, 습지, 또는 염습지
- 서식지 가치 또는 구획의 용도, 이용 시기 : 야생동물 피난처, 주거 지역, 농업 지역, 바다표범 포획지(haul-out), 공원, 또는 원격지
- 작업 실행도 : 접근성, 집결이동성, 자원, 기술의 유효성
- 유류 오염 정도와 형태
- 처리의 순 환경 편익
- 자연정화의 예상 비율
- 날씨와 바다 상태 같은 환경 영향

6) 방제 종료점 설정의 원칙

(1) 해안선 처리 종료점은 범위의 척도를 달리해서 적용될 수 있다. 종료점은 3단계로 설정된다.

- (i) 보편적 척도 : 특정 종료점은 유류유출 전체 영향권과 지역 내의 모든 구획에서 최소 기준을 만족시켜야 한다.
 - (ii) 집단적 척도 : 서식지, 해안선, 토지이용 형태를 달리하여 적용되는 종료점
 - (iii) 상세한 척도 : 개별 해안선 구획이나 해안선 단위구간에 적용되는 특정 종료점
- (2) 다른 기준과 표준은 해안선의 구획을 달리하여 적용한다.
 - (3) 심지어 서로 같은 개별 종료점은 예를 들어, 물, 식생, 지표면과 지표면 아래 저질, 그리고 조간대 등 환경 구성요소를 달리하여 적용될 수 있는데, 종의 분포 또는 토지이용 변화에 달려있다. 각각의 구획에 대한 종료점은 그 구획 내에 더 중점을 두거나 세분화될 수 있다.
 - (4) 각각의 해안선 구획이나 단위구간은 유일하든 보편적이든 종료점 자신의 '틀'을 기본적으로 가지고 있어야 한다. 이러한 종료점은 다른 형태의 표준의 결합이 될 수 있으며, 그들은 그 구획의 특정 환경 구성요소에 적용할 수 있다.
 - (5) 처리 계획이 많은 순차 처리 작용 또는 분류법의 사용에 바탕을 둘 때는 한 해안선 구획 내에 한 가지 이상의 처리 종료점 '틀'을 가질 수 있다.
 - (6) 종료점 측정을 완료하기 위한 실제적인 요구사항으로 예를 들면, 정밀도, 노력의 수준, 공정을 끝내기 충분한 시간, 그리고 안전 문제 등을 고려해야 한다.
 - (7) 보편적으로 적용할 수 있는 표준 방법이나 정형화된 것은 없다. 방제 처리기준과 종료점은 사건의 특성에 의해 유출에 따라 달라진다. 처리 기준과 종료점은 또한 한 가지 방제 작업 내에서도 영향과 위험이 영향권 내에서 같지 않은 경우가 종종 있는 것처럼 변한다.
 - (8) 필드에서 방제작업 및 검사 팀이 모호한 표현은 오해할 수 있기 때문에 종료점 정의는 간결하고, 명확하여, 이해할 수 있어야 한다.
 - (9) 분명히 규정된 규범이라도, 유류유출 관리 팀은 판단 전화를 하거나 타협을 요구할 수도 있다.

7) 분석측정에 의한 방제 종료점

이 범주의 종료점은 육안으로 보는 측정과 반대로 분석에 의해 결정된다. 이처럼, 그들은 상당히 긴 반응 시간과 더 많은 비용이 소요된다. 분석 방법은 일반적으로 다양한 매체의 대표 필드 시료군과 실험실에서의 부수적 기기분석이 필요하다.

화학 분석은 기름 또는 특정 화학물질의 농도를 측정한다.

독성학 분석은 독성 효과에 대한 시험생물의 반응을 측정한다.

관능법 분석은 악취에 대한 인간의 검출을 결정하는 데에 사용된다.

실험실 분석 이외에, 종료점을 평가하기에 사용될 수 있는 필드 분석용 도구는 제한하여 선택할 수 있다.

○ 화학분석

- 특정시료 화학물질 또는 유류 농도의 분석측정에 기초하고 있다.

○ 요구되는 정의

- 규정된 물질 : 기름, 개별 성분, 또는 화합물
- 시료매체의 특성
- 단위구역 당 농도나 수용할 수 있는 농도
- 시료 취합 방법
- 실험실 분석 방법론과 자료해석 절차

○ 종료점의 예

- 해변의 단위 지역 당 시료수, 표본 크기, 깊이와 위치, 평균농도 10 ppm(TPHs를 어떻게 평가하는 지에 대한 언급과 함께)을 초과하지 않는 유류에 오염된 조간대 퇴적물 저질의 총석유계 탄화수소농도(TPHs)
- 퇴적물 간극수(분석법 언급과 함께)에서 벤젠 0.002 mg/L 이하 ;
- 모래 해변(분석법 언급과 함께)에 500 피트 간격으로 TPHs 100 ppm 이하;
- BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌)에 대해 미국 환경청(US EPA)과 州 1차 최대오염 농도기준을 초과하지 않을 것

○ 독성분석

독성영향에 대한 시험생물의 반응측정에 기초를 두고 있는데, 요구되는 조건으로는 다음의 항목을 다룬다.

- 생체시험의 형태, 시험생물, 시험지속시간, 종료점
- 급만성, 치사 및 아치사 시험을 포함(참조 : 캐나다 환경부는 표준화된 생물시험

방법의 시리즈를 가지고 있다.)

- 생체시험의 보기 : 96시간 무지개 송어 급성치사 시험 ; 단각류(端脚類, amphiphoda)는 퇴적물 독성실험에 이용되는 대표적인 시험 생물임(예; 옆새우류, 야광물벼룩 등) 28일 생존, 성장, 증식시험 ; 성계 受精 ; 퇴적물 공극수 시험.
- 시료 및 샘플링 방법
- 생물시험의 성패 척도
- 자료 해석과 신청

○ 종료점의 예

- 지역 어류종의 96시간 LC50 시험치(시험생물 중 50% 치사농도)
- BTEX, 나프탈린, 가솔린등 탄화수소에 대한 만성 EC20(20%영향농도) 의의(시험 생물 중 20% 치사농도)
- 지역 어류종의 서식지에서 산란을 위한 급만성 독성 비율
- 중대하지 않은 서식지를 위한 급만성 독성 비율
- 미국 EPA는 벤젠과 금속의 독성으로 용출절차를 제한한다.

○ 관능법 분석

악취에 대한 인간 검출에 기초한다.

다음의 평가시방서를 필요로 한다.

- 시료형태와 취합 절차
- 시험 방법과 합격/불합격 기준

○ 종료점의 보기

- "해변퇴적물에 남은 악취가 있는가?"(검출 방법론에 관련하여)
- "요리된 바닷가재의 살코기에 냄새가 나는가?"(검출 방법론에 관련하여).

2. 유류유출 방제 종료점 적용

1) 개요

Endpoints are...

The desired final state of a site after clean-up

Standards against which cleanup operations are judged

Specific Criteria

○ 방제 종료점

- 유류오염정화가 완료된 각 지역의 바람직한 최종상태
- 정화작업의 성과를 판단할 수 있는 기준점
- 특정 항목별 판단 평가 기준

○ 유류유출 후 정화완료 상태의 실질적인 정의

- 요구되는 정화상태의 수준을 결정하기 위해서는
- 정화작업팀의 판단기준
- 모든 이해당사자의 요구사항을 반영
- 정화기술의 선정
- 여러 차례에 걸친 협상과 논의 과정을 거쳐 비교적 단순하거나 복잡할 수 있음

○ 고려사항

- 사회경제적 토지이용
- 생태계와 서식처의 가치
- 사용주기와 계절적 변화
- 오염도 및 오염형태
- 정상상태 또는 사고이전상태
- 지역공동체가 이해할 수 있는 수준
- 실질적이고 달성가능한지 여부

- 객관적이고 감성에 의해 영향을 받지 않을 것
- 해안의 형태에 따라 각각의 기준이 정립되어야 함
- 모든 지역이 같을 필요는 없음
- 바람직한 기준은 이해와 관찰하기 쉬워야 함
- 요구된 지역 이외에는 정량적 기준은 회피할 것
- 화학적 분석
- 해안지역에 남아있는 잔류 유분량의 계산

○ 거주지가 없는 해안지역

- 모래자갈 : 표면두께<0.1 cm, 기름분포<10%
- 이탄해안 : 표면두께<0.1 cm, 기름분포<10%
- 자연 자갈/바윗돌, 인공사석구조물 : 표면, 기름분포<20%
- 식생절단제방 : 표면두께<0.1 cm, 기름분포<20%, 큰 나무뿌리에 표착
- 갈대/부들 : 끈적거림이 없는 표착상태
- 습지가장자리 : 끈적거림이 없는 표착상태, 2cm/m²가 넘는 타르볼의 수<2

○ 거주지가 있는 해안지역

- 모래자갈 : 유분이 보이지 않을 것
- 이탄해안 : 유분이 보이지 않을 것
- 자연 자갈/바윗돌 : 얼룩상태, 기름분포<20%
- 인공사석구조물 : 얼룩상태
- 식생절단제방 : 표면두께<0.1 cm, 기름분포<10%, 큰 나무뿌리에 표착
- 갈대/부들 : 끈적거림이 없는 표착상태
- 습지가장자리 : 끈적거림이 없는 표착상태, 2cm가 넘는 타르볼이 없을 것, 2cm이하의 타르볼 분포<10%

유류에 오염된 해안지역은 짧은 기간내에 유류유출 이전처럼 깨끗한 상태로 되돌릴 수 없음. 정화공법과 그 시행효과가 해안지역에 미치는 영향의 한계인식 필요. 자연정화과정이 최종정화의 주요 방법임. 사회적 합의와 객관성의 유지가 필요

- 방제 종료점 도달이 최종목표는 아님
- 숨겨진 위해요소나 장기적 영향을 확인하기 위해 사후처리모니터링이 필요
(해안정화평가기술, 실험실내 분석 등)
- 방제 종료점 수준까지 정화된 구획에서도 유류가 다시 나타날 수 있음
- 유류유출사고에 따른 생태계의 완전한 회복은 항상 가능한 것은 아님
- 대개의 조사구획에서 대부분의 기름이 제거된 것을 발견할 수 있었음. 많은 구획들이 가볍거나 중간 수준의 오염도를 보였음
- 접근하기 어려운 소규모 만 지역의 경우 오염정도가 심각했음. 2차 오염을 막기 위해서는 많은 양의 기름과 유류폐기물이 수거되어야 함
- 대개의 모래사장에서는 기름이 대부분 제거되었음. 이 지역들은 중간 또는 최종 복원단계에 있다고 봐야 함
- 바위가 많고 기반암으로 이루어진 지역은 가볍거나 중간 정도의 오염수준을 갖고 있으며 최종방제가 필요할 수도 있음

2) 지역별 방제적용

- 만리포/천리포
 - 오염이 많이 정화된 상태
 - 상부 조간대에 타르볼 형태의 기름 유적, 표면하 수면 유막 관찰
 - 수작업 제거, 자연정화 적용 가능
 - 만리포 남단 해역의 자갈 등은 이적하여 세정작업 등 필요
 - 해변가 배후지 모래부분 정화작업 필요
- 학암포, 구례포
 - 방제작업이 많이 진행되어 오염이 경미한 상태
 - 현재 해안가 땅고르기(tilling) 정화작업 진행 중

○ 신두리

- 표면은 경미한 오염수준
- 남쪽 끝단에 방파제(상부 조간대)에 기름 유막 존재
- 기름찌꺼기 수작업 수거, 갯닦기, 남측해안 땅고르기(tilling) 등 필요
- 굴양식장 오염시설 제거
- 장기적 모니터링 및 지속적 관리 필요자연정화 등 필요

○ 구름포, 망산, 백리포

- 넓은 지역에서 유적 관측, 지표면 아래 20cm에서 유막 관측
- 기반암석, 자갈 등은 수작업 정화/방제작업 필요
- 해변가의 경우 자연정화가 바람직

○ 만대

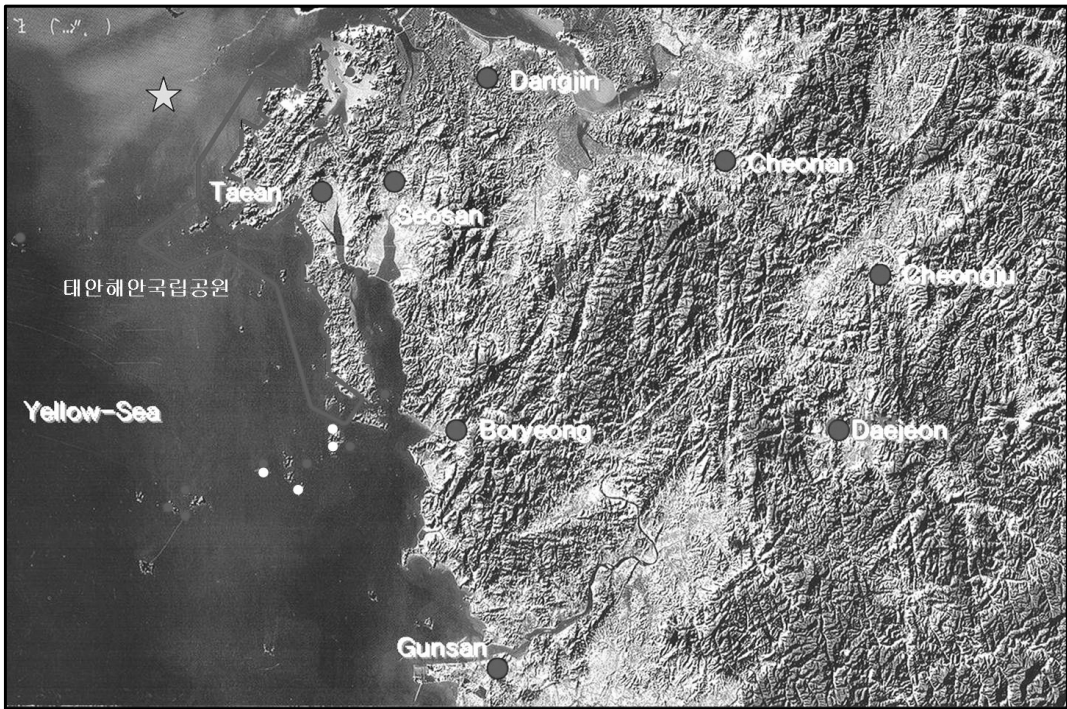
- 평가구역에서 적은 량의 기름 유막, 유적 등 발견
- 갯닦기, 자연정화 및 장기적 모니터링 필요

○ 모항

- 인공구조물 산재, 상부 조간대에 유막, 유적이 넓은 지역에 분포
- 고압세척, 표면 세정제 사용 등 필요

○ 가의도/내파수도

- 넓은 지역에서 두꺼운 유적 및 지표면 아래 1m에서 원유 관찰
- 상부 조간대에서 에멀전 및 타르볼 형태의 기름 존재
- 권고 : 수작업 제거, 지표면 아래 정화작업, 자연정화 등 필요



[그림 38] 중점 방제지역 및 특정도서 위치도

3. 갯벌 방제 방법고찰

1) 사전조사

해양에 누출된 잔류유분이 자연적으로 분해·소멸될 때 까지는 많은 시간을 요하므로 정화작업은 신속히 착수되어야 할 것이나 착수보다 더 중요한 것은 제대로 수행하는 것이며 이를 위한 사전조사와 일목요연한 계획의 수립이다.

(1) 현황조사

- 토양의 성상 : 입도 (펄, 고운모래, 자갈, 바위 등)
- 잔류유분의 분포 : 평면상 위치 및 깊이

- 잔류유분상태 : 단순판단 성질 (흐름성, 냄새, 굳기 등)
- 포화/불포화 : 조수시간 관련 자료
- 생분해성 조사 : 호흡측정계(respirometer)에 의한 생분해인자, 잔류유분분해미생물밀도
- 종다양성 및 서식밀도 조사

(2) 우선순위 결정 : 민감도와 오염도를 고려하여 결정

- 동시 다발적으로 모든 오염지역을 정화하는 것이 가능하지 않다면 주민생활 및 생태계를 고려하여 민감도가 높은 지역을 우선 정화.
- 민감도가 높더라도 오염도가 낮다면 자정작용으로 정화되도록 하는 것이 바람직함.

(3) 정화작업 시 고려사항

인위적 방제방법에 따라 오히려 부작용을 초래할 수도 있으므로 민감도가 높은 갯벌지역은 잔류유분 오염도가 낮아 자정작용으로 감내할 수 있는 기간 내에 정화가 가능할 것으로 판단되면 자연정화에 맡기는 것이 바람직하다. 갯벌이나 모래사장 등 해안의 오염을 정화하는 데 어려운 점 중의 하나는 밀물과 썰물에 의한 조위변동이다. 그러므로 정화작업 수행하기 이전에 2차오염 등 부작용을 방지하기 위한 철저한 대비가 있어야 한다.

2) 펄갯벌 정화

(1) 방제 방법

점토질로 이루어진 펄갯벌은 투수성이 낮아 잔류유분이 침투하기 어렵지만 갯벌생물들이 뚫어 놓은 구멍이 잔류유분 유입통로가 되어 갯가재가 집단폐사 하는 등 갯벌생물이 폐사할 정도로 잔류유분으로 오염된 상태이다. 추정하건대, 갯벌 속에 들어간 잔류유분은 외부와 차단되어 오랫동안 흐름성이 있는 상태로 머물 것이며 이로 인하여 산소전달을 차단함과 아울러 일부 수용성 성분들로 인하여 주위의 생태계복원에 오랜 기간 지장을 줄 것이다.

펄갯벌은 표면의 상층부를 제외하고 깊이로 들어가면서 산소농도가 급격히 낮아지

므로 속에 들어 있는 잔류유분을 비교적 신속하게 제거하는 방법으로 생각할 수 있는 것은, 적극적인 생물학적 처리를 시도하는 것보다 우선 기계적인 힘을 동원하여 잔류유분들이 외부로 나오도록 하여 포집처리 하는 것이다. 잔류유분의 포집처리 방법으로는 다음의 방법들을 생각할 수 있다.

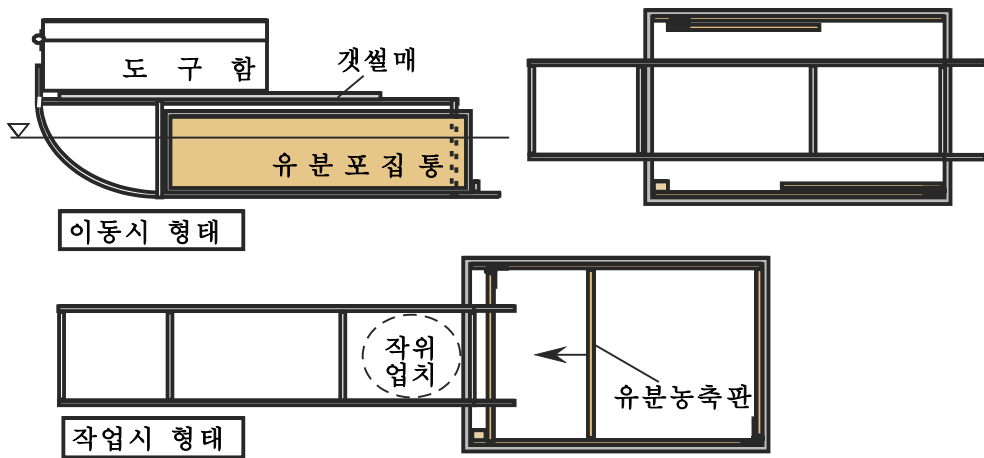
갯썰매와 같은 운반도구를 이용하여 이중 안전장치 역할을 하는 오일펜스로 구획된 곳에서 여러 명이 썰레질과 같은 방법으로 구멍에 들어가 있는 잔류유분을 물 위로 나오게 한 후 이를 유흡착재(oil sorbent boom)로 제거하는 방법을 생각할 수 있다. 이 방법은 소극적이기는 하나 작업을 조직하기에 따라 잔류유분을 비교적 말끔히 제거할 수 있을 것이며 갯벌에 과도한 기계적 부하를 주지 않아 생태계의 교란을 최소화 시킬 수 있을 것이다. 또한 여러 개의 격리된 틀 내에서 작업이 진행되므로 기상이 악화되어도 잔류유분이 넓게 펼쳐진 오일펜스를 넘어 재오염시킬 우려가 적다. 그러나 작업자가 물에 들어가야 하므로 기온이 낮아지면 작업이 제한될 수 있다.

(2) 자연공기유입관 설치에 의한 생태복원

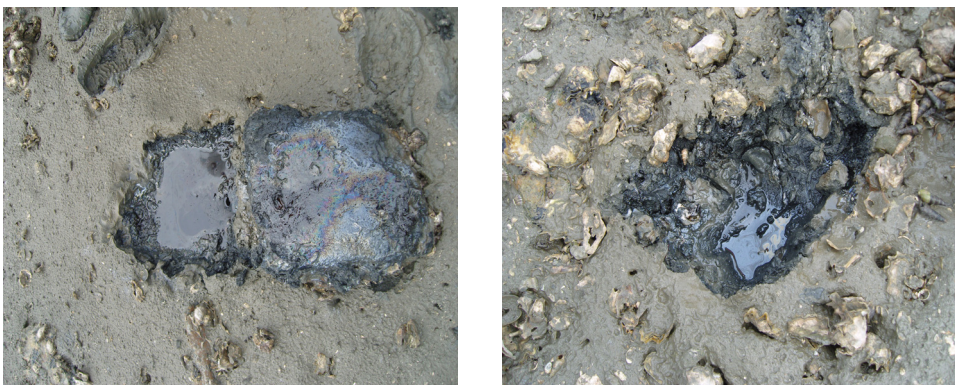
갯벌 특히 펄갯벌처럼 점토의 함량이 높은 일부 갯벌의 경우 유출된 유류가 갯벌 하층부로 침투하기가 어려우므로 갯벌전체가 오염되지는 않으나, 일단 생물서식 구멍 등의 틈새 등 이동 통로가 있는 경우 갯벌에 유입된 유류는 손쉽게 하층부로 이동하게 된다. 이렇게 하층부로 유류가 침투하였을 경우에는 자연적으로 정화되는 것은 거의 불가능하다. 왜냐하면 일반적으로 유류는 혐기성 상태에서 분해속도가 매우 느리고, 또한 투수성이 매우 낮은 갯벌의 특성상 물리적 기작으로 유류를 다시 밖으로 나오게 하는 것도 어렵기 때문이다. 무엇보다도 갯벌에서의 유동성 제약이 기계적인 처리를 거의 불가능하게 하며, 기계적인 방제방법을 도입하더라도 매우 민감한 갯벌 생태계에서의 무리한 물리적 처리는 유류로 1차 피해를 입은 생태계를 더욱 악화시킬 수도 있다.

따라서 물리적인 압력을 최소로 하며 자연적인 분해기작을 가능한 촉진할 수 있는 방법의 도입이 필요하다. 갯벌의 오염이 국부적일 수 있으므로, 갯벌전체를 처리하기 보다는 오염이 확인되거나 예상되는 지역에 대하여 국부적인 처리가 필요하다. 이 중 가능한 접근방법이 자연공기유입 장치관의 설치이다. 이는 국부적인 유류오염지역에 자연적으로 공기가 유입될 수 있게 하는 것이다. 이 방법은 미생물을 이용한 생물학

적 분해에 가장 큰 제한 요소가 될 수 있는 산소를 공급함으로써 미생물 분해를 촉진시키고, 아울러 기체상으로의 이동을 용이하게 하여 갯벌에 침투한 유류를 제거할 수 있다. 이 경우에도 주민들은 큰 역할을 담당할 수 있는데, 그들의 생활터전인 갯벌에서 오염된 지역을 발견하고 관리하는데 가장 큰 역량을 갖고 있기 때문이다. 수산물 관리나 채취과정에서 오염이 확인되면 해당지역에 인력으로 설치하여 기계적인 방법으로 갯벌이 피해를 입는 것을 최소화 한다. 필요한 경우 미생물의 주입이나 영양물질의 주입 등 생물학적 처리와 병행하여 사용할 수 있다.



[그림 39] 갯썰매를 이용한 수작업 도구 개념도



[그림 40] 갯벌지역 양식장 유류오염 상태



(그림 41) 갯벌양식장 유류오염 심화지역

제5장 생태영향 모니터링 및 복원관리 방안

1. 생태영향 모니터링 방법

1) 모니터링 체계

일반적으로 모니터링(monitoring)은 특정한 목적으로 특정한 목표치(관리기준)를 가지고 특정 해역, 생물 서식지, 해역의 생물, 물리화학적 특성에 대하여 과학기술적인 방법으로 표본을 채취하고 또 채취하는 반복적인 행위를 지칭한다. 즉 주어진 항목의 임계점, 관리기준에 대하여 해역의 추세를 파악하고 이를 초과하거나 위반하는 경우에 사전에 합의된 정책적 조치를 취하는 것을 목적으로 한다. 이러한 행정 조치를 촉발할 목적으로 실시하는 운영 모니터링은 조사를 정기적으로 실시하고 나중에 그 추세와 결과에 정책적 의미를 부여하는 정기관측(surveillance)과는 다르다. 운영모니터링은 관리대상 해역의 환경상태가 목표로 하는 해양환경기준에 맞는지, 배출한계 내에 있는 지의 준수 여부판단의 근거 확보차원이며, 만약 그 해역이 기준을 만족하지 못하거나 인위적으로 변화되었다면 그 원인을 파악하기 위한 조사(혹은 진단)차원의 모니터링이 있을 수 있음을 원칙으로 하고 있다. 여기에서 후자는 원인과 결과를 수사하게 된다. 우리나라의 지정해역 수질 조사나 해양환경감시망은 정기관측의 성격이 강하다.

(1) 현장 모니터링의 설계

운영 모니터링의 핵심은 영향가설의 구성이다. 해당 사업의 시행으로 사업 대상 해역의 환경변화가 예상된 범위에서 이루어지고 있는 지를 확인하기 위하여 수립되어야 한다. 즉 영향가설을 검증하는 데 어떤 관측과 시료 채취 및 분석이 필요한지, 그리고 자료는 어떻게 관리되고 해석되어야 하는가? 영향권의 범위의 판단은 영가설(零假說, null hypothesis)에 의거하게 된다.

(2) 정기 관측의 설계

정기관측의 설계는 비용편익효과를 고려해야 한다. 현장 감시 모니터링이 환경기준의 만족 여부에 초점을 맞추고 있는 데 반하여 정기관측은 경향을 판단하는 것이므로 최고의 과학적 기술을 동원하여야 한다. 즉, 자연적인 변이와 인위적인 변이를 구분할 수 있을 정도의 기술력의 확보가 선행 조건이다. 따라서 정기관측을 시작하기 전에 자연변화와 오염원의 존재, 입력예상량에 대한 분석과 기술 상태를 면밀히 검토하여야 한다. 또한 10년 이상의 장기간 관측에는 기후변화의 영향도 나타나게 된다. 그러므로 실제적인 위협요인이 존재하지 않는 한, 정기 관측을 실시하는 경우에는 특별한 주의가 필요하다.

선박사고로 인하여 유류가 유출되었을 때 초기 방제활동을 한 후에 사고해역이 원래 상태로 회복되는 지, 회복되는 동안에 환경피해가 발생하지 않는 지를 감시하기 위한 정기관측은 유효할 것이다.

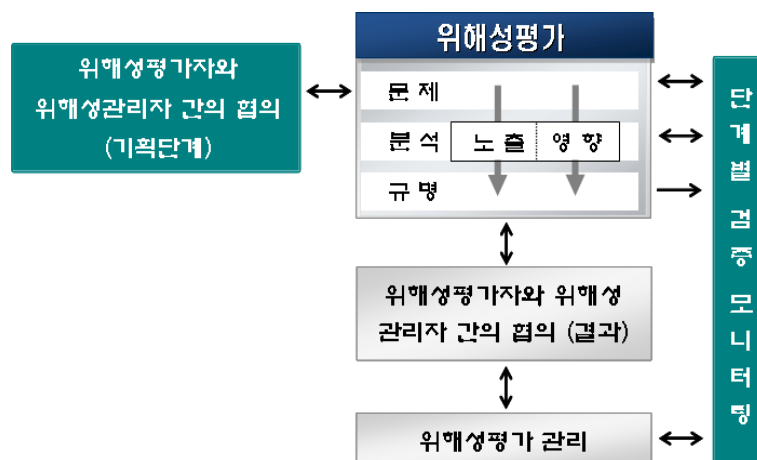
(3) 오염진단기술

어느 해역의 유류오염 여부판단은 오염도의 규정 즉, 환경기준을 초과하는 경우에 오염이 되었다고 본다. 그러나 일반적으로는 오염물질의 존재정도를 검출하는 것을 의미하는 것으로도 사용된다. 이러한 개념에 속하는 유류오염 진단은 해양환경에 존재하는 특정 오염물질 검출방법이 진단기술에 해당된다. 또한 해역의 생물이 유출된 유류로 인하여 질병상태인 것을 검출하는 방법이다. 예를 들면 다환방향족탄화수소(PAHs)의 여러 화학종의 존재비율로서 타르 볼의 해역내 존재를 발견하는 것은 전자에 해당되고, 생물 축적의 정도나 영향을 살펴보는 방법으로는 개체의 생리상태의 교란을 분자수준에서부터 세포내 소기관(organelle), 세포(cellular), 조직(tissue), 개체군(population), 군집(community), 그리고 생태계(ecosystem) 차원의 영향을 조사하여 오염의 영향을 진단할 수 있다. 오염진단기술에서 중요한 것은 오염 이전의 원래상태를 파악하는 기술이다. 그러나 원래 상태(default position)는 사회적 기준의 산물이고 그것은 시간에 따라 변한다.

2) 위해성평가

오염해역에 대해 방제 과정을 통해 유류유출 오염원을 차단하면 유해물질의 유입이 중지되고, 해역의 자연적인 해저 퇴적과정이나 외해와의 해수교환 등으로 유분에 함유된 유해물질의 농도가 줄어들어 자연적으로 복원이 된다. 따라서 연안 해역에서의 오염저감은 오염원을 제거하는 것이 가장 중요한 수단이다. 일반적으로 해양환경은 한번 오염되면 거의 회복되지 않는다고 하나, 유류오염 현상의 정확한 과학적인 이해와 최적 복원 및 정화기술(BMP & BAT)의 선정과 시행을 통하여 원상태로 복원할 수 있음은 이미 많은 사례로서 증명이 되고 있다. 이는 여러 가지 잠재적인 오염 완화 및 복원방법을 동원하는 것이 해역의 용도를 고려하여 오염도 수준과 여건상황에 맞는 것인지를 결정하는 단계에 이르게 된다. 이러한 위험관리를 위한 도구로 위해성평가와 관리를 들 수 있다.

위해성평가와 관리체계(framework for risk assessment and management)에서 위해성평가는 해역의 특성규명, 노출평가, 효과평가, 위험특성규명으로 구성되고 위험관리는 위해성평가에 근거하여 방제사업 시행과 사후 영향감시, 완화(mitigation), 치유복원(remediation)을 의미한다. 이 경우에는 수학적 기법을 동원한 다목적 다기준 의사결정 기법(multi-purpose and multicriteria decision analysis)을 사용할 수 있다. 위해성평가와 관리에서 유류오염도와 이로 인한 생태영향이라는 주어진 문제의 체계적 정리가 제대로 이루어져야 분석과 위해성 규명을 통해 위해성관리가 제대로 될 수 있다.



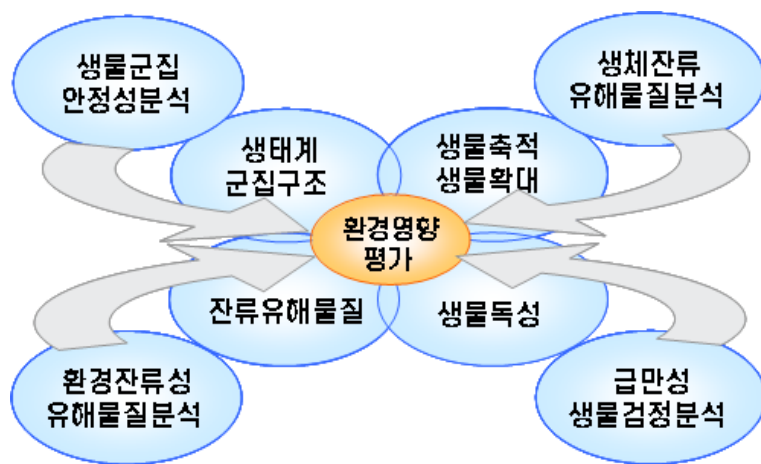
[그림 42] 위해성평가와 관리 체계 모식도

3) 해양환경평가

환경을 올바르게 이해하고 종합적으로 평가하기 위해서는 다양한 환경조사가 필요하다. 선진국에서는 생태계 군집, 잔류유해물질 농도, 생물농축이나 생물확대, 생물독성 등 다양한 매체들을 대상으로 수행하여 얻어진 결과들을 종합분석하여 유류유출에 따른 해양환경영향을 평가한다. 이들 조사 항목들은 정보를 상호보완적으로 제공하고 있는데 예를 들면, 잔류유해물질 농도조사는 환경에 잔류하는 특정한 오염물질 농도를 정량적인 수치로 제공하여 특정 유해물질에 의한 오염 가능성을 잠재적으로 평가할 수 있게 해준다. 생물검정분석은 환경내 존재하는 모든 유해물질에 의한 생물독성 유무와 강도에 대한 정보를 제공하여 분석되지 않은 미지의 유해물질에 대한 생물영향을 잠정 평가할 수 있게 해준다.

생물군집 조사는 생태계의 건강성 정보와 군집 구조의 취약성에 대한 정보를 알려줌으로써 오염수준이 생태계 수준까지 확대되어 영향을 주는가에 대한 판단을 가능하게 한다.

한편, 생체내 잔류하는 유해물질분석을 통해 생물축적이나 생물확대를 파악할 수 있으며 이 정보는 수산물 섭취에 의해 발생될 수 있는 인체 보건학적 영향을 판단하는 근거자료로 이용될 수 있다.



[그림 43] 종합적인 해양환경평가 모식도

4) 해양생물 검정법

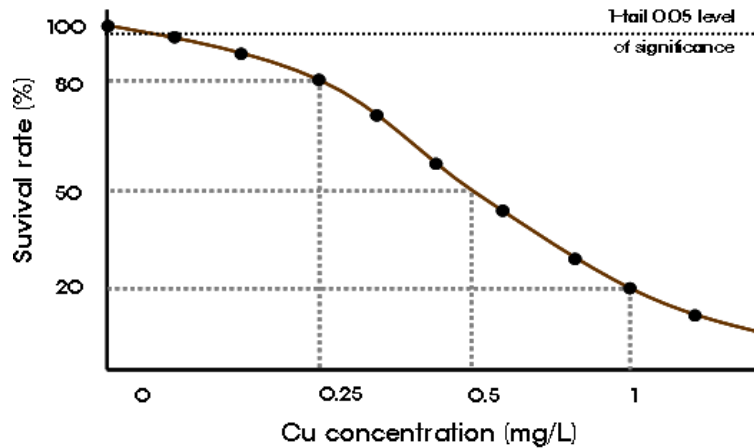
(1) 생물검정법의 정의

생물검정법(bioassay)이란 표준시험종과 표준화된 방법을 사용하여 물질 노출 전후의 생물영향을 비교하여 독성의 상대적 강도를 비교하는 시험을 일컫는다(USEPA, 1997). 어류를 다양한 구리의 농도에 96시간동안 노출시키는 실험을 한 경우, 구리를 넣지 않은 대조구에서는 96시간 후 생존율은 100%, 구리 0.25ppm에 노출된 경우 생존율은 80%, 0.5ppm에 노출된 경우 생존율은 50%, 1ppm에 노출된 경우는 10% 생존하였다고 하면 어류의 96시간 구리 노출반수치사농도(LC50)는 0.5ppm이다.

또 다른 예로, 똑같은 수의 개구리밥을 다양한 구리 농도에 노출시켜 성장을 관찰하면 구리 노출 농도에 따라 그리고 시간에 따라 성장률이 달라지는 것을 관찰할 수 있다. 노출 7일 후 상태를 관찰해보면 구리를 처리하지 않은 대조구에서의 살아있는 총요수는 132개, 구리 0.2ppm에 노출된 경우는 120개, 0.5ppm에 노출된 경우는 21개, 1ppm에 노출된 경우는 0개이다. 이 경우 개구리밥의 구리 반수영향농도(EC50)는 0.2ppm과 0.5ppm사이에 존재한다고 생각할 수 있다. EC50 값을 보다 신뢰성 있게 산출하고 싶을 때는 농도와 생물 반응간의 관계를 표현하고 이 관계를 가장 잘 표현해줄 수 있는 수식을 찾아 원하는 값을 추정해내는 방식을 이용한다.

이런 생물검정 실험결과를 다른 실험생물, 다른 오염물질에 대해 얻는다면 오염물질에 대한 생물들의 반응을 정량화할 수 있으며 상대적인 민감도도 비교할 수 있다.

LC50	해당 생물 50%가 죽는 오염물질농도(반수치사농도)
EC50	해당 생물 50%가 영향을 받는 오염물질농도(반수영향농도)
LC(EC)50	값으로부터 해당 생물 보호를 위한 기준치 도출 가능
LC(EC)50	값 비교시 오염물질에 대한 상대적 민감도 비교 가능



(그림 44) 구리 노출 농도 대비 어류 생존율 곡선(용량-반응곡선)

(2) 생물검정법과 화학분석법

생물검정법과 화학분석법은 어느 하나가 우월하거나 부족하다고 할 수 없으며 서로 보완적이다. 화학분석법으로 해당 물질에 대한 농도를 정량적으로 알아낼 수 있지만 해당물질로 생물이 어느 정도 영향을 받는지 알아내기 어렵다. 반면 생물검정법으로 생물이 오염물질에 어느 정도 영향 받는지 알아낼 수 있지만 어떤 물질 때문에 영향을 받았는지 알아내기 어렵다. 그러나 두 방법을 잘 조합하여 사용하면 어떤 물질 때문에 어떤 생물이 얼마나 영향을 받는지 추론해내는 것이 가능하다.

(3) 급성/만성 생물검정법

생물검정법은 노출기간에 따라 급성과 만성으로 구분될 수 있다. 급성노출시험은 생활사보다 짧은 단기간에 대한 노출시험이며 만성노출시험은 생활사에 해당되는 장기간에 대한 노출시험이다. 예를 들면, 물벼룩 48시간 사망률시험이나 송사리 96시간 사망률시험 등은 급성독성시험이고 물벼룩 28일 생식률 시험과 같은 것은 만성독성시험이다. 일반적으로 급성독성은 생물의 치사도를 관찰하고 만성독성은 생물의 성장 저해, 생식 저해 등을 관찰하므로 급성독성영향보다 만성독성영향이 저농도 노출 수준에서 발생한다. 해양생물을 이용한 급성독성시험은 발광박테리아 발광저해시험(30분 노출), 단각류 사망률시험(10일 노출), 성게 수정율시험(1시간 노출)등이 많이 이용된다. 해양생물을 이용한 만성독성시험은 단각류 40일 생식률시험이 많이 활용되고 있다.

(4) 생물검정법의 활용도

생물검정법은 노동 절감, 비용 절감 효과가 크며, 오염물질에 대한 생물의 반응을 지표로 삼고 있기 때문에 오염물질의 독성영향 정도를 객관적으로 진단할 수 있는 수단으로 인정받고 있다. 현재 개발되어 사용되고 있는 생물검정기술의 종류는 다양하다.

〈표 4〉 생물검정기술의 종류

육 상		해 양	
담수	육상퇴적물	해수	해양퇴적물
발광박테리아	발광박테리아	발광박테리아	발광박테리아
식물플랑크톤	저서단각류	식물플랑크톤	저서단각류
개구리밥	갈따구	해조류	성게
물벼룩	빈모류	동물플랑크톤	이매패류
단각류		단각류	갯지렁이류
어류		요각류	곤쟁이류

우리나라에서도 물벼룩 급성 독성 테스트를 이용하여 산업폐수 통합독성을 평가하는 제도를 2007년 입법하여 시행하고 있고 식물플랑크톤, 물벼룩, 어류 등을 공공수역 생태 위해성평가에 활용하고 있다. 또한 해양분야에서도 발광박테리아, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 저서 단각류, 성게, 어류 등을 이용한 생물검정법을 해양환경공정시험법에 반영하여 오염퇴적물 독성 모니터링, 해양투기물 안정성 평가, 해양환경기준 설정 등에 활용하고자 시도하고 있다. 생물검정법은 수체, 퇴적물, 공극수와 같이 자연 환경 매질에 대해서 적용될 수 있지만 경우에 따라서는 침출수나 유기용매추출액에 대해서도 적용 가능하다.

2. 유출유의 확산과 생태영향

1) 유출유의 확산

물보다 가벼운 액체상태의 기름은 바다로 유출되면 해수면에 얇은 막을 만들며 퍼

저나간다. 유막의 분산속도와 두께는 수온, 기상 및 해상 상태, 유출된 기름의 성질에 따라 결정된다. 가벼운 기름일수록 유막의 두께가 얇고 빨리 분산된다. 유출된 기름 중에 분자량이 적은 성분은 휘발하고, 수용성 성분은 해수에 녹으며, 섞이지 않는 성분은 유화되어 작은 방울 형태로 분산된다.

기름이 유화되는 속도는 파도나 난류에 따라 다르고, 이 유상액은 마치 초콜릿 무스처럼 보이며, 아주 끈적끈적해 해안으로 밀려오면 조간대 생태계에 큰 영향을 미치게 된다. 원유 성분 중에 무거운 부분은 기름이 1mm에서 10~20cm 정도 되는 타르볼을 형성한다. 현미경적인 크기의 유화된 기름방울은 표면적이 넓어서 미생물에 의해 분해가 쉽게 일어나지만 타르볼이나 무스는 상대적으로 느리게 분해된다.

탄화수소의 혼합물인 원유 성분은 박테리아, 효모, 곰팡이와 같은 미생물에 의해 분해된다. 직선형, 가지형의 탄화수소는 비교적 빨리 분해되고 고리형 탄화수소는 느리게, 분자량이 큰 타르는 아주 느리게 분해된다.

기름 중 탄소수가 적은 지방족 탄화수소나 방향족 탄화수소는 미생물에 의해 수개월 내 분해가 가능하지만, 분자량이 크고 구조가 복잡한 탄화수소는 분해가 늦거나 미생물에 의해 분해되지 않는 것도 많다. 다환방향족 탄화수소는 발암물질로 알려져 있으며, 고리가 3개 이상인 것은 자연 상태 하에서 미생물에 의한 분해속도가 아주 느려 오랫동안 잔류한다. 그러나 미생물 대신 오염물질에 대한 내성이 강한 것으로 알려진 갯지렁이 종류나 연체동물들이 다환방향족 탄화수소를 분해한다는 것이 밝혀진 바 있다.

유조선 사고를 비롯해 여러 가지 원인으로 인해 바다로 유출된 기름은 해양생태계에 크고 작은 영향을 미친다. 유류 유출 사고는 상황에 따라 수일부터 길게는 수십 년 동안 생태계에 영향을 미치기도 하며, 유출량이 적더라도 시기와 장소에 따라 생태계에 큰 영향을 미칠 수 있다.

원유와 정제된 기름의 수용성 성분 중에는 해양생물에게 해를 미치는 각종 유독물질이 포함되어 있다. 향기로운 냄새가 나는 방향족 탄화수소는 지방족 탄화수소보다 독성이 강하다. 벤젠이나 톨루엔 등 저분자 방향족 탄화수소는 물에 잘 녹으며 세포

막을 파괴하고 효소나 구조단백질에 영향을 미친다. 지방족 탄화수소는 마취효과가 있는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 무거운 타르보다는 분자량이 적은 화합물이 독성이 강하다. 분자량이 아주 적은 것은 공기 중으로 빨리 휘발해 버리므로 해양생물에게는 사고 초기에 단기적인 영향을 미친다. 그러나 타르볼 형태로 된 기름은 덩어리 형태로 분해되지 않고 남아 장기적인 영향을 미친다.

2) 유출유에 의한 환경생태 영향

유출된 기름이 해양생물에 미치는 영향은 사고 당시 직접적인 피해와 사고 후 오랜 시간이 경과한 후에 나타나는 장기적인 피해로 구분할 수 있다. 직접적인 피해는 다시 기름의 물리적인 특성에 의한 피해와 화학적 성분에 의한 피해로 나눌 수 있다.

물리적인 피해는 원유나 벙커유 등 점성이 큰 기름에 접촉하여 질식사하거나 체온이 떨어져 사망하는 경우를 말한다. 항온동물인 바닷새는 깃털에 기름이 묻으면 방수성과 보온성을 상실해 체온이 급격히 떨어져 죽게 된다. 1990년에서 1991년에 걸쳐 일어난 걸프전쟁 당시 이라크의 해안 석유시설의 파괴로 약 6,700만 톤의 원유가 흘러나와 인근에 살던 바닷새 2만~5만 마리가 체온저하로 사망했다.

한편 바다 표면에 유막을 형성하면 대기에서 해양으로 녹아들어가는 산소의 양이 줄어들기도 한다. 화학적인 피해는 기름에 포함된 방향족 탄화수소 등의 독성에 의해 사망하는 경우이다. 이런 독성물질은 휘발성이 있으므로, 유출사고가 난 직후 며칠 동안 생태계에 미치는 영향이 가장 크다.

1977년 스웨덴 해역에서 일어난 유조선 테시스호 사고로 유출된 기름의 독성 성분 때문에 동물플랑크톤이 약 5일 동안 급격히 감소한 바 있다. 또한 1978년 아모코 카디즈호 사고로 유출된 기름의 독성 성분으로 인해 영국 해안의 플랑크톤 군집이 감소하였다가 2~3주 지난 후에야 회복되었다는 보고도 있다.

그밖에 기름에 오염된 수산식품에서 기름 냄새가 나서 상품가치가 떨어지는 것 등이 직접적인 피해에 속한다. 장기적인 피해는 엑슨 발데즈호 사고의 경우처럼 수십

년 동안 일어날 수 있다. 특히 갯벌에 스며든 기름은 오랫동안 남아있으면서 표면으로 천천히 나와서 만성적인 피해를 유발한다. 유출 유류는 생물 종류에 따라 미치는 영향이 다르다. 유류를 이용하는 박테리아는 숫자가 늘어나게 된다. 플랑크톤(부유생물)들은 유류 유출사고 초기에 유류의 독성 성분으로 인한 피해가 크지만, 군집이 금새 회복될 수 있다. 어류와 같이 유연능력이 있는 생물들은 사고 해역을 벗어나 다른 곳으로 이동할 수 있어 피해가 적을 수 있다.

그렇지만 운동성이 적거나 바닥에 붙어사는 저서생물의 경우 유연생물이나 부유생물보다는 유류 유출에 의한 피해가 크다. 조간대에 사는 저서생물 경우 유류 자체의 독성에 의해 사망하기도 하며, 유막 형성으로 질식사하기도 한다. 이외에도 유류 섭식으로 인한 생리적인 장애가 유발될 수 있다.

대체로 생태계의 변화가 자연적인 변화 범위 내에 있다면 복원되었다고 한다. 즉 사고 이전에 자연적으로 생태계가 변화했던 것과 변화 폭이 다르지 않다면 생태계가 회복되었다고 말할 수 있다. 그러나 사고 이전에 그 지역의 생태계 조사 자료가 없다면 훼손된 생태계의 회복 정도를 판단하기 어렵다. 시프린스호 사고 경우에도 사고 전 소리도 인근 해역의 생태계 조사 자료가 없어 어려움을 많이 겪었다. 다행히 이번 사고로 피해를 입은 태안 해역은 기존에 조사한 자료들이 많아 생태계 복원 정도를 모니터링하고 평가하는 것이 용이할 것이다.

3. 유처리제 살포에 따른 해양생태 영향

현재 사용되는 유분산처리제는 자체독성이 높지 않다. 화학적인 조성은 계면활성제 30%에 탄화수소용제 70%의 비율로 구성되고, 유분산처리 문제는 유처리제 자체의 독성 때문이 아니라 독성이 높은 기름성분을 수중에 분산시켜 기름의 독성작용을 공간적으로 확대시키는데 있다. 유처리제의 연안 살포는 연안의 양식장에 직접적으로 기름방울의 영향을 미치게 하므로 외해에서만 유처리제가 사용되고 있는 것이다.

유처리제의 사용은 정책적인 의사결정의 문제인데, 유처리제를 전혀 사용하지 않을 경우 유막이 환경적으로 민감한 지역(갯벌, 습지 등)이나 경제적으로 중요한 지역(해수욕장 등)으로 접근하도록 방치되므로 더욱 큰 피해를 입힐 수 있다. 유처리제는 조류나 해류의 방향으로 기름의 진로를 변경하는데 사용하는 것이다. 단, 유처리제의 사용으로 인하여 만들어지는 기름방울은 생화학적으로 완전히 분해되기까지 오랫동안 수중에 잔류할 수 있으므로 현장방제책임자는 과학적인 의사결정과정을 거쳐 유처리제의 사용 범위를 결정해야 한다.

〈표 5〉 유처리제 성능시험성적서

시험항목		판정기준	제품A	제품B
1. 인화점(C.O.C. ℃)		61이상, 단 주성분이 물인 제품은 생략	생략	생략
2. 동점도(40℃, mm ² /s)		30 이하	0.8011	0.8103
3. 유화율 (%)	처리상태	미립자로 분해되고 가라앉지 않을 것	이상 없음	이상 없음
	30초	90 이상	91.1	90.2
	10분	35 이상	41.5	38.9
4. 계면활성제의 생분해도(%)		생분해시험 개시 후 7일째의 값과 8일째의 값과의 평균치가 90이상	95.8	95.1
5. 생물영향시험	스케레트네마 코스타툼 (100ppm)	100ppm 이상의 시험구에서 유처리제를 넣지 않은 시험관과 같은 색조나 약간 엷은 색조일 것.	약간 엷은 색조	약간 엷은 색조
	송사리 (24hr, TLm, ppm)	4,000 이상	4,000 이상	4,000 이상
	알테미아 새우 (24hr, TLm, ppm)	4,000 이상	4,000 이상	4,000 이상
	우럭 (24hr, TLm, ppm)	2,000 이상	2,000 이상	2,000 이상
6. 유등점(℃)		- 0.5 이하	- 5.0	- 2.5
7. 색 (ASTM)		보고치	L 0.5	L 1.0
8. 밀도 (15℃, g/cm ³)		신청인이 제시한 값 (1.009)±0.01 이내	1.0096	1.0023



[그림 45] 바닥에 가라앉은 타르볼



[그림 46] 수면에 뜬 타르볼 및 기름막

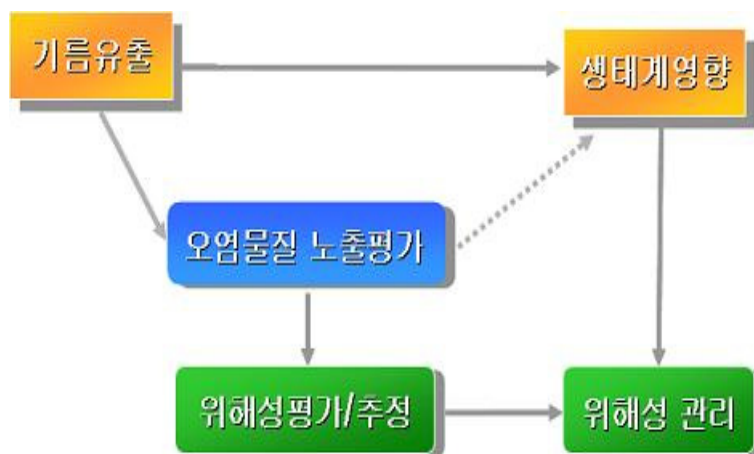
1) 유류오염 방지

유류유출 초기에 살포되는 유처리제는 원유를 작은 원유방울(oil droplet)로 만들어 수중으로 분산시키는 작용을 하는데, 유처리제가 직접적으로 타르볼을 생성한다고 할 수는 없으나 원유를 물속에 분산시킨다는 측면에서 간접적으로 타르볼의 생성에 영향을 줄 수 있다. 현재 사용되는 유처리제의 화학적인 조성은 계면활성제 30%에 탄화수소용제 70%의 비율로 구성되고, 자체독성이 높지 않으나 유처리 문제는 유처리제 자체의 독성 때문이 아니라 독성이 높은 원유성분을 수중에 분산시켜 원유의 독성작용을 공간적으로 확대시키는데 있다. 따라서 유처리제의 연안 살포는 연안의 양식장에 직접적으로 원유독성 영향을 미치게 하므로 수심 20m 이상의 외해에서만 유처리제를 사용하도록 규정하고 있다.

2) 유류유출에 의한 생태영향평가

원유유출로 인한 생태영향평가 방법은 그 피해가 커지기 전까지는 정량가능한 수준으로 나타내기가 어렵다. 피해가 나타나더라도 구체적인 원인을 규명하기 충분한 정도로 원인 특성에 따른 피해 규명이 어렵고, 피해가 나타나서 대응책을 세우면 시기적으로 늦은데다 사회적 비용이 매우 커지게 된다. 원유유출이 해양환경에 미치는 생태영향평가와 위해성 관리방안간의 연관도는 그림과 같이 나타낼 수 있다.

해양생태계는 다양한 생물상과 무생물상이 조화를 이루는 시스템인데, 원유유출이라는 외부 스트레스에 대처하여 장기간에 걸쳐 복원되는 특성을 갖고 있다. 따라서 단기간의 미약한 수준의 스트레스에는 쉽게 반응하지 않으며 그 반응도 매우 긴 시간에 걸쳐 서서히 나타나는 특성을 갖고 있다. 이러한 외부 스트레스에 대해 여러 가지 수준의 생물단계에서 나타나는 반응에 걸리는 시간과 환경생태의 수준을 나타낼 수 있다.



(그림 47) 생태영향평가와 위해성 관리

〈표 6〉 원유농도별 해양생태 영향정도

원유 농도	해양생태 영향
0.01g/m ³ (10 ppb)	플랑크톤 생식장애 - 어획고 영향 가능
0.02g/m ³ (20 ppb)	탄소동화작용 장애
1g/m ³ (1 ppm)	바다가재유충 성장장애
5g/m ³ (5 ppm)	새끼 물고기 사멸
10g/m ³ (10 ppm)	갑각류 화학장애 발생
12g/m ³ (12 ppm)	조개류 영양실조
기 타	바다동물의 신호체계 교란, 친유성먹이 섭취에 의한 어류성장 장애

대부분이 다시 출현할 것으로 예상하고 있다(환경부, 외국 사례와 문헌조사). 단기적으로 약 3년간은 원유오염 환경에 강한 갯지렁이가 우점할 것이고, 사고 직후 1년간은 원유오염에 따른 햇빛 차단 영향으로 식물 광합성이 방해를 받아 소형 저서동물이 먹이원인 플랑크톤의 소멸로 사라질 것으로 예상된다. 저서동물은 암반, 펄 등의 표면 또는 내부에 서식하는 동물군으로 이동성이 적어 원유오염에 취약하다. 이어 어패류, 부착생물 등이 폐사함에 따라 바위로 이뤄진 조간대와 갯벌로 이뤄진 조하대가 모두 심각한 영향을 받을 것이다.

이와 함께 원유에 함유된 다환방향족탄화수소(PAHs) 등 독성물질이 먹이사슬의 각 영양단계별 동물체내에 차례로 농축되는 과정(생물농축)을 거쳐 큰 동물, 즉 조류에까지 영향을 미칠 수 있다. 염도가 높아 방제 작업 과정에서 mousse 형태로 가라앉은 것은 해저 모니터링과 원유상태를 평가하여 장기적인 제거작업이 필요하다고 판단된다. 해저에 가라앉은 유분은 저서생태계에 심각한 타격을 줄 수 있는데, 1993~98년에 걸쳐 원유로 오염된 바닷속을 모니터링 한 결과 BTEX 등의 방향족 탄화수소 혼합액이 박테리아와 플랑크톤에 독성으로 작용함이 나타났다.



[그림 49] 조간대 생태계 변화도

사고 직후 수주에서 수개월 안에는 원유 유출사고 영향이 비교적 적은 플랑크톤류가 점진적으로 회복되고, 1년 후부터는 저서동물 가운데 원유오염 환경의 개척종(pioneer species)인 가시버들갯지렁이가 서식하기 시작한다. 생물종의 복원 과정은 오

염된 환경에 가장 잘 적응하는 종부터 나타나 갯지렁이류가 한동안 우점종을 차지한 뒤 먹이사슬 단계가 어느 정도 안정되면 다양한 생물군이 출현하게 된다. 사고 3년 후에는 해조류가 회복되며 사고 5년 후부터 조개류가 뚜렷이 회복될 것으로 예상된다. 간석지나 염습지는 생태적 민감지역으로 생태계복원이 보통 20년은 지나야할 것으로 보고 있다. 특히 갯벌에서 원유가 충분히 제거되지 않은 상태에서 모래가 쌓여 기존의 오염부분이 지하로 침강하는 경우가 많아 복구에 오랜 기간이 소요될 것으로 전망되고 있다.

2007년 12월말부터 환경부와 국토해양부가 공동조사팀을 구성해 원유 유출사고가 발생한 태안 일대의 해역과 육역에 대한 오염지역 생태계 긴급조사를 실시하고 있는데, 지속적인 자연자원 정밀조사 모니터링이 필요한 상황이다. 장기계획으로서 환경생태 모니터링 시, 2008년부터 10년간 사고 지역 주변 생태계의 변화, 사고지역 주변 토양과 해저층의 원유 잔류 실태 등의 환경영향조사와 함께 훼손된 해안사구의 복구, 잔류 원유 제거 등 생태계 복원사업의 병행 추진이 필요하다.

4. 해양오염영향 조사와 복원계획

1) 해양오염영향 조사

해양환경관리법에 따르면 선박에서 일정 규모 이상(100 kL 이상)의 오염물질이 해양에 배출되는 경우 발생일로부터 3개월 이내에 그 선박 또는 해양시설의 소유자가 해양오염영향조사기관을 통해 해양오염영향 조사를 실시하도록 규정하고 있다. 그러나 이번 사태의 경우 규모 이상의 오염물질이 대량 배출되었고 오염물질의 확산으로 양식시설 등의 대량피해가 일어나고 있어 관련 예외 규정에 의거해 국토해양부에서 해양환경 오염영향 조사를 실시하고 있다. 지난 1995년 발생한 Sea Prince 유류 오염의 경우에는 초기 유류오염 영향 평가를 위한 과학적 증거 수집 및 관측이 즉각적으로 시행되지 않아 국제유류보상기금(IOPC 펀드)에 경제적 손실 피해를 입증하는데 어려움이 있었다. 이러한 과거 경험과 현재 유류 오염의 심각성을 바탕으로 이번 Hebei Spirit 사태에서는 긴급조치의 일환으로서 추진하고 있다.

□ 현황 및 문제점

대형 유류유출 사고의 경우 사고 발생 후 3~5년이 지나도록 조하대와 조간대에 유분이 잔류하며 생태계에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 통상 사고지역의 생태계가 회복되는데 약 10년 이상 소요되는 것으로 추정되며 증장기적이고 지속적인 방제가 절실하게 필요하다. 엑슨발데즈호 기름유출사고의 경우 과학자들은 해안선의 서식지가 회복되는 데 30년이 넘게 걸릴 것이라고 평가한 바 있으며, 1995년 시프린스호 사고가 발생한 여수 소리도 부근에서는 아직도 잔존유류가 발견되며 어장이 원상태로 복원되지 못하고 있다.

〈표 7〉 유류사고 후 생태계 회복에 드는 소요시간 추정

구분	3년	5년	10년	20년	30년
염하구	주로 대합, 연체류 회복 안됨	대합, 연체류 일부 회복 안됨	회복됨	회복됨	회복됨
해양	모래해변	개체군들이 보임	거의 회복	회복됨	회복됨
	암석해안	생물군락은 복원 안 된 상태	생물군락 대체로 회복	회복됨	회복됨
	간석지	주로 이매패류가 안 보임	이매패류 일부 회복 안됨	회복됨	회복됨
	염습지	일년생 식물, 수명 짧은 생물 복귀	다년생식물 정착 안됨, 대개의 생물 회복	회복 최종단계	피해범위가 꽤 넓어도 회복
	외양	개체군 복귀지역 얼마 안 됨	수명 긴 생물 복귀	생물종 대부분 출현	피해범위가 꽤 넓으면 미회복

□ 대응 방안

태안지역의 조간대는 물리적 또는 화학적 방법을 통해 방제가 어려운 바위나 자갈 및 갯벌로 이루어져 있으며, 따라서 생물학적 방제방법 적용검토 필요하다. 생물학적 방제란 유류분해 미생물과 영양염류를 이용하여 유류를 분해시키는 방법으로서 세계적으로 효능이 입증된 바 있으며 우리나라에도 G-7 등으로 관련기술이 개발되었다.

해양 유류오염사고의 증장기 방제는 물론 사고지역의 생태계 복원에는 소요기간이

오래 걸리고 때문에 이에 필요한 많은 장비와 인력이 장기간 지속적으로 투입되어야 함한다. 따라서 향후 중·장기 방제에 소요되는 충분한 예산자원을 안정적으로 확보할 수 있는 제도적 방안을 마련할 필요가 있다.

□ 환경·생태영향 조사 및 예측 현황 및 문제점

해양 유류유출 사고이후 환경·생태계가 어떠한 영향을 받고 있으며 향후 어떻게 변화할 것인지에 대한 예측을 통해 효과적인 방제방법과 복원방안을 제시할 수 있다. 또한 사고에 대한 책임규명이 이루어지고 난 이후에 직·간접적인 피해보상 규모를 산정하기 위해서는 환경·생태적 피해 및 영향의 시간적, 공간적 범위에 대한 평가가 필요하다.

□ 대응 방안

서해안은 대부분 수심이 얇고 해류로 인한 희석, 자정능력이 비교적 약한 특성을 가지므로 여타의 유류유출 사고에 비해 조하대에 잔존하는 유류오염물질의 양이 많을 것으로 예상하고 있다. 때문에 이번 사고로 인한 환경생태적 영향과 피해도 장기간 지속될 가능성이 크다고 할 것이므로 현재 잔존 유류량의 분포에 대한 정확한 조사는 물론 그 중·장기적 변화에 대한 예측을 토대로 향후 중장기 방제계획을 수립하는 것이 필요하다.

향후 본격적인 환경·생태영향 조사에 대비하여 사고 이전 및 초동상태에 대한 자료 확보가 무엇보다 중요하다. 2005년 국립공원관리공단에서 수행한 태안지역의 상세 생태현황 조사자료가 있어 이를 사고이전의 생태현황 비교 데이터로 활용할 수 있다. 향후 관련 연구기관이 중장기적인 계획을 수립하여 체계적으로 환경생태영향을 조사하면서 방제와 생태복원을 동시에 추진토록 지원해야 할 필요가 있다. 또한 초기 오염상태가 보존된 관찰지역(observation site)을 설정하여 오염 확산 범위 및 오염도 평가의 기초가 되는 초기시료(유출 원유시료 포함)의 확보와 필요시 향후 오염도 및 생태계 복원의 경년변화를 관찰할 수 있도록 할 필요가 있다.

2) 생태학적 복구와 관리

대부분의 유류유출사고는 기상상태가 매우 좋지 않을 때 발생하므로 초동방제가 거의 되지 않는다. 결국 다량의 유류가 조간대 지역으로 이동하여 해양생태계를 파괴하게 된다. 특히 우리나라 서해안의 조간대 지역은 유류사고에 매우 취약한 환경조건을 가지고 있다. 복잡한 지형과 산재한 섬들로 인해 유출된 유류가 표착할 수 있는 해안선의 범위가 넓으며 강한 왕복성 조류는 각종 해양생물이 서식하는 조간대 지역에 유류를 빠르게 확산시킨다.

조간대에서의 유류오염 방제기술 역시 물리적, 화학적, 생물학적 방법이 있는데 이것 역시 지역적인 특성에 맞게 도입되어야 한다. 중요한 것은 조간대에서의 오염은 해상에서의 오염과는 달리 매우 지속적이라는 것이다. 1995년 시프린스호 사고시 해저에 스며든 유류는 현재도 유류가 일부 발견되고 있으며, 조간대 저층에 퇴적된 유류는 파도에 의해 유리되어 인근 조하대 지역에서 서식하고 있는 저서생물에 사고 발생 후 2~3년이 지나도록 발견되었다.

유류오염지역의 생물학적 복구는 두 가지 방법이 있는데, 첫째는 오염 지역에 미생물의 먹이가 되는 영양염을 첨가하여 오염된 지역에 이미 존재하는 유류 분해 미생물의 활동을 촉진시켜 유류 분해능을 향상시키는 방법이고, 둘째는 인위적으로 배양된 유류 분해 미생물을 유류오염지역에 추가 살포하여 유류 분해시간을 빠르게 하는 방법이다. 현재까지 조사된 바에 의하면 최소한 90종 이상의 해양미생물이 신진대사에 필요한 탄소와 에너지원으로 기름을 이용함으로써 기름을 분해할 수 있다고 알려져 있으며, 여기에는 박테리아, 균류, 일부 조류도 포함된다. 이들 미생물은 전 해상에 분포되어 있으나, 유류유출이 빈번한 지역에 다량으로 분포한다.

해양미생물에 의한 유류분해는 일반적으로 유출유중 생물에 대한 독성이 강한 저분자 탄화수소성분이 증발, 유화된 후 이루어지며 유류분해율은 수온과 용존산소량, 영양염류, 기름입자의 크기에 따라 다르다. 생물에 의한 유류의 분해는 기름-물 사이의 경계면에서 이루어지므로 유출유가 자연적으로 또는 유처리제 등과 같은 화학제 작용으로 작은 유상(油狀)이 형성될 경우 기름-물 사이의 접촉 표면적이 커져 생물분해를 촉진시킬 수 있다.

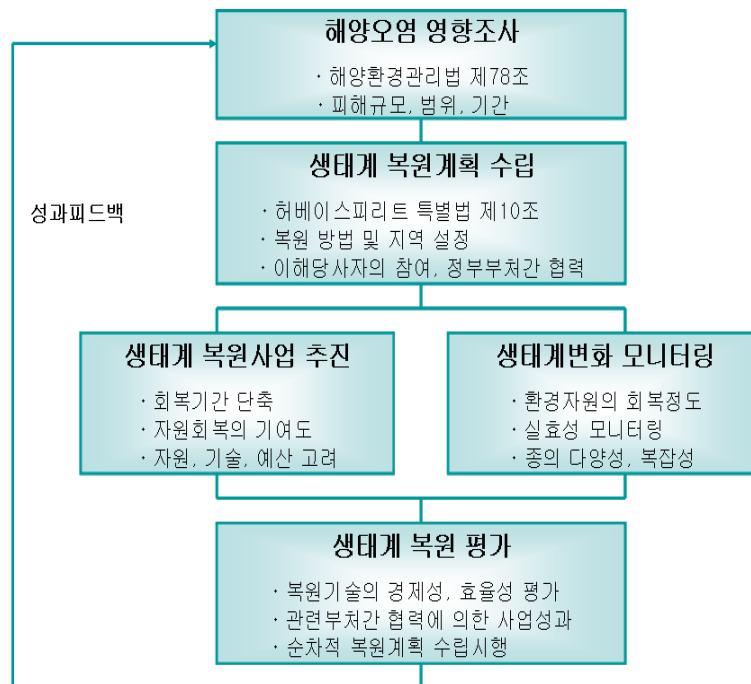
□ 생태계 복원 계획 수립 및 시행

○ 근거 : 허베이 스피리트호 유류오염사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법

- 제10조(특별해양환경복원지역의 지정 등) : 해양환경이 훼손된 지역과 생태계변화 등이 우려되는 지역을 지정·고시, 동 지역에 대해 특별해양환경복원계획을 수립·시행(생태계조사·연구계획, 모니터링, 복원계획, 기타 필요사항)

○ 추진 일정 및 계획

- 특별법에 따른“특별해양환경복원지역”을 중간조사결과 발표와 함께 지정·고시(2009. 4 예정)하고 친환경적 장기복원계획 추진
- 특별해양환경복원지역 지정·고시 및 복원프로그램 계획 수립을 위한 관련 전문가 협의회 운영 및 미국 국립해양대기청(NOAA) 측과 생태계복원 프로그램에 관하여 협의(2008. 4 기준)



〔그림 50〕 생태계복원 프로그램 추진 체계도

5. 오염해역 환경생태 복원 방안

1) 복원방법의 선정

유류오염지역에 대한 환경생태 복원을 위해서는 방제를 통한 물리화학적 오염물질 제거와 생물학적 환경복구 방법이 적용될 수 있다. 유출된 유류를 제거하는데 중점을 두는 방제는 가시적 성과가 나타내는데 비교적 짧은 시간이 소요되는 반면, 생물학적 복원에는 방제후 남은 유류의 제거에 미생물 물질대사를 이용하여 분해하는 것이므로 비교적 장시간이 소요된다.

대부분의 유류유출사고는 기상상태가 매우 좋지 않을 때 발생하므로 초동방제가 쉽지 않다. 결국 다량의 유류가 조간대 지역으로 이동하여 해양생태계를 파괴하게 된다. 특히 태안해안의 조간대 지역은 유류사고에 매우 취약한 환경조건을 가지고 있다. 복잡한 리아스식 지형의 굴곡이 심한 해안선과 산재한 섬들로 인해 유출된 유류의 표착선 범위가 넓으며, 강한 왕복성 조류의 흐름은 각종 해양생물이 서식하는 조간대 지역에 유류를 빠르게 확산시킨다.

조간대에서의 유류오염 방제기술 역시 물리적, 화학적, 생물학적 방법이 있는데 이것 역시 지역적인 특성에 맞게 도입되어야 한다. 중요한 것은 조간대(intertidal zone)에서의 오염은 해상에서의 오염과는 달리 매우 지속적이라는 것이다. 자갈이나 바위 틈에 스며든 유류는 제거되지 않아 사고발생 후 몇 년이 지난 후에도 유류가 다량으로 발견되고 있으며 조간대 저층에 퇴적된 유류가 파도에 의해 계속 유리되어 인근 조하대(subtidal zone) 지역에서 서식하고 있는 저서생물에는 사고 발생 후 2~3년이 지나도록 계속해서 유류가 생물체에 축적되어 발견되고 있다. 한편 조위가 가장 높은 시기인 사리 때 외해로부터 밀려온 방제유류 잔류물질과 점성이 큰 유류가 표착된 부유폐기물은 방제 작업이 어려운 암벽 골짜기나 외딴섬의 상부인 조상대(supratidal zone)에 깊숙이 박혀있는 경우가 많다. 따라서 이러한 유류오염 폐기물 제거와 함께 지속적인 생태계 복원을 위한 노력이 중요하다.

2) 오염지역의 물리적 처리 복원

(1) 암벽과 인공구조물 지역

암벽이나 방파제 같은 인공구조물에 부착된 유류는 고압의 물로 세척한다. 50~60℃의 물을 분사압력 80~140 bar로 분무하여 유류를 떼어내고 오일펜스를 미리 설치한 외해 쪽으로 밀어내어 흡착포, 유류회수기(oil skimmer), 흡입펌프를 이용하여 수거한다. 유류회수기의 사용이 곤란할 경우에는 폴리우레탄 폼, 폴리프로필렌, 짚, 이탄, 닭 깃털 등으로 흡착한다. 구조물에 잔류성 유류가 아스팔트 형태로 부착 고화되었을 경우 고압의 미세한 모래를 분사(sand blasting)하여 제거하는 방법도 적용할 수 있다.

(2) 자갈 지역

조간대 지역은 다양한 크기의 바위 및 자갈로 이루어져 있으므로 유류가 깊이 스며들기 때문에 수작업을 통해 일일이 제거한다. 낮은 점도의 유류는 고압력의 물로 제거하거나 흡착포로 닦아서 제거할 수 있지만 자갈 사이로 스며들어난 유류 제거는 지속적인 제거가 요구된다. 또한 점도가 높은 유류로 오염된 자갈은 모두 수거하여 화학적 처리를 해야 한다. 휘발성이 낮은 잔류성 유류성분이 자갈 아래에 2~3년간 체류될 경우 점차 아스팔트 성분으로 고화가 진행된다.

(3) 모래 지역

모래 지역은 해수욕장과 같은 관광지역임과 동시에 해양저서생물의 서식처로 수산물 생산의 기반이 되는 지역이다. 따라서 인간의 토지이용이 활발한 상업적 가치가 높은 지역이므로 철저한 복원이 필요하다. 다량의 유류로 오염되었을 경우에는 그레이더(grader)나 유류 수거 및 경운작업을 위해 고안된 트랙터(tractor-powered beach cleaning device)와 같은 중장비를 사용한다.

(4) 갯벌 지역

갯벌로 구성된 진흙층은 배수가 잘 안되므로 거의 전역에 걸쳐 표층에만 유류가 분포한다. 이러한 지역은 낮은 압력의 물로 씻어내는 방법이 있다. 갯벌 지역은 주로 풀이나 갈대 등이 많이 존재하는 곳으로 유류가 유출된 경우 거의 전 지역이 오염되

며 특히 물이 많이 존재하는 곳에서 피해가 심각하다. 다른 지역에 비해 자정작용이 빠른 속도로 일어나지만, 갯골 틈새로 유입된 유류는 미생물에 의한 생분해시간이 오래 걸린다. 다량의 유류에 의해 오염된 갈대 부들 등 식생이 풍부한 지역은 현장을 연소 처리하는 방법이 가장 일반적이다. 연소 처리를 하더라도 2~3개월 안에 다시 식물이 생장하므로 빠른 기간 내에 원래 상태로 복원된다.

3) 오염지역의 화학적 처리 복원

(1) 유처리제 처리법

유처리제를 오염된 지역에 뿌리거나 오염물을 수거한 후 유처리제로 세척하는 방법이 있다. 즉 유류로 오염된 자갈, 바위, 모래 등을 수거하여 유처리제로 세척하는 방법으로서 해상에서 직접 뿌려 사용하는 방법과는 다르다. 조간대 지역에서 오염된 유류를 제거할 경우 최소한의 양을 사용하여 오염된 모래나 자갈 등과 유처리제의 접촉시간을 30분 이하로 조절하는 것이 적당하다. 또한 직접 수거하여 세척할 경우, 세척효과는 오염지역의 토양조성과 유처리제의 종류에 따라 다르나 일반적으로 0.1%로 희석한 유처리제를 사용할 경우 높은 세척효과를 나타낸다.

유처리제 살포 시 유화작용은 하나의 액체가 다른 액체에 방울형태로 분산되어 존재하는 현상으로 정의된다. 이것은 계면활성제에 의한 용해촉진작용과는 구별된다. 유화작용(emulsification)과 용해촉진작용(solubilization)의 근본적인 차이점은 계면활성제에 의한 용해촉진이 용액에 용해된 것으로 간주되는 반면, 유화된 액적은 주변을 둘러싸고 있는 용액과는 분리된 상(phase)으로 간주된다는 점이다. 이처럼 유화작용은 저절로 생기지 않고 기계적 에너지가 가해져야 일어날 수 있는데, 에너지 공급이 끊어지면 불안정해져 유화된 액적이 사라지고 두 액상이 완전 분리된다. 유류오염지역에서의 유화작용은 계면활성제를 주입하고 세척수를 뽑아내는 순환과정 중 지하수 흐름의 난류에 의해 부분적으로 형성될 수 있다. NAPL(nonaqueous phase liquid, 非水性액상물질)이 유화작용에 유화된 형태로 존재하게 되면 조석에 의한 해수의 유동에 의해 물질이동이 이루어지기 때문에 오염물질의 유동성이 크게 증가한다. 유화작용은 일정 정도의 혼합을 전제로 하는데 현장토양세척에서는 이러한 혼합이 어려우므로 자유흐름상태의 오염물이 다량으로 존재하지 않는 한 유화작용은 제한적으로 일어나게 된다.

(2) 계면활성제 처리법

계면활성제를 오염지역에 주입하였을 경우 오염물질 유동현상 중에 NAPL과 토양 입자간의 표면장력 감소에 의한 NAPL의 수직적 움직임이 촉진된다. 유류오염물질이 지표면으로 유출되는 경우 NAPL은 중력에 의해 천천히 아래로 이동하게 되는데 이 중 일부는 토양구성체(matrix)와의 표면장력에 의해 불포화 토양(vadose zone)공극 중에 응결입자(ganglia) 형태로 잔류한다. 이러한 현상을 잔류성 포화(residual saturation)라 하는데 여기에 계면활성제 용액을 주입하게 되면 토양구성체(matrix)와 NAPL사이의 표면장력이 낮아져 잔류성 NAPL의 수직적 움직임을 촉진시킨다. 이러한 현상은 불포화 토양층의 유류오염물질을 제거하는 긍정적인 면이 있는 반면, 오염 물질을 이동만 시킬 뿐 회수하는 데는 큰 도움이 되지 않는다. 따라서 용해도 촉진에 의해 유류오염물질의 효율적인 제거를 전제로 해야 한다.

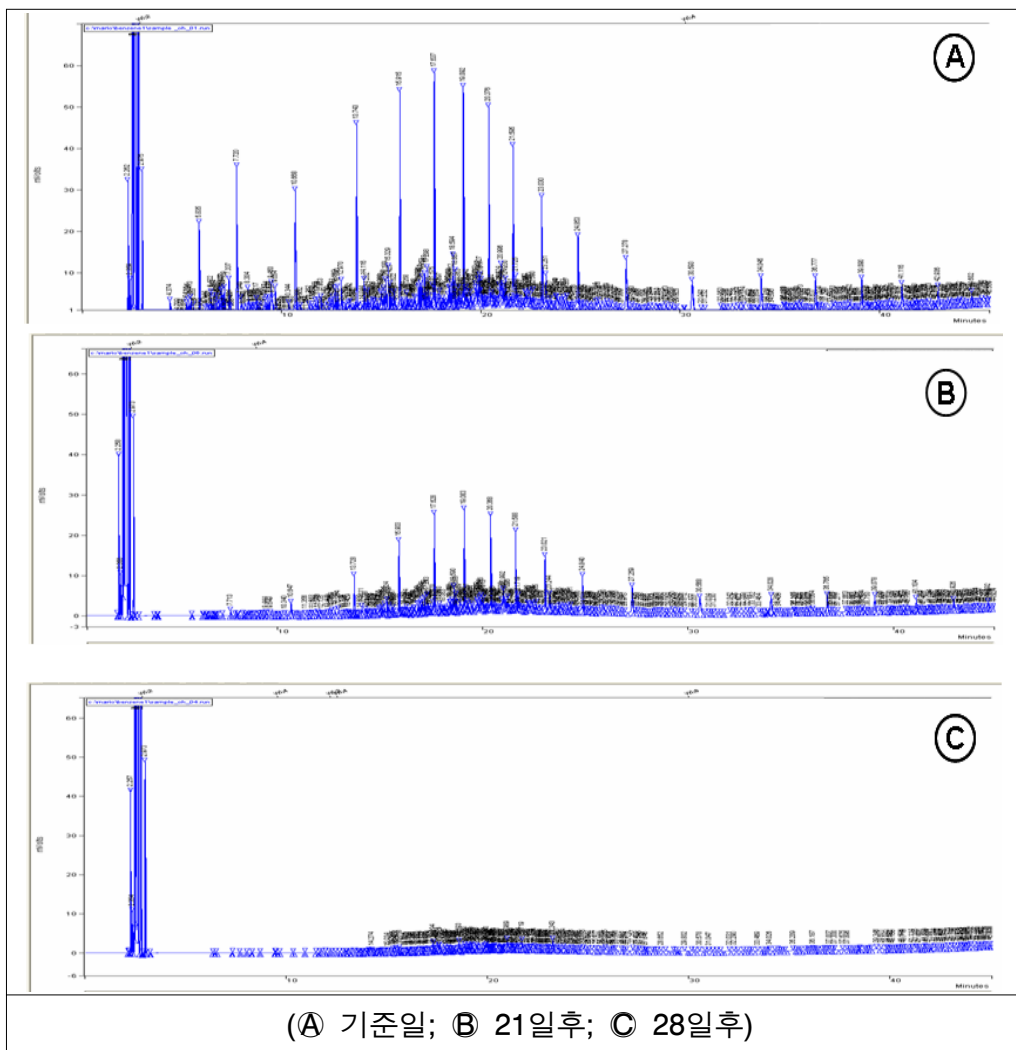
토양정화에 계면활성제를 이용하고자 하는 노력은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 그 첫째는 현장 토양세척법(in-situ soil flushing)으로 계면활성제를 주입하여 토양세척효율을 증대시켜 흡입 처리하는 것이고, 다른 하나는 계면활성제를 첨가제로 사용하여 토양의 생물학적 처리효율을 증대시키는 방법(surfactant-aided bioremediation)이 있다. 그러나 현장적용의 대부분이 토양세척을 이용한 방법이며 계면활성제를 이용한 유류오염토양의 생물학적 처리는 아직도 파일럿 규모가 대부분이다.

4) 오염지역의 생물학적 처리 복원

생물학적 정화방법에는 두 가지가 있는데 첫째는 오염 지역에 영양염을 첨가하여 오염된 지역에 이미 존재하는 유류 분해 미생물의 활동을 촉진시켜 유류 분해능을 향상시키는 방법(biostimulation)이고 둘째는 인위적으로 배양된 유류 분해 미생물을 오염지역에 첨가하는 방법(bioaugmentation)이다.

현재까지 조사된 바에 의하면 최소한 90종 이상의 해양미생물이 신진대사에 필요한 탄소와 에너지원으로 기름을 이용함으로써 기름을 분해할 수 있다고 알려져 있으며, 여기에는 박테리아, 균류, 일부 조류도 포함된다. 이들 미생물은 전 해상에 분포되어 있으나, 유류유출이 빈번한 지역에 다량으로 분포하고 있다. 국립공원관리공단에서 유류오염이 심했던 3개 지역(학암포, 구름포, 파도리)과 비교적 심하지 않았던 2개 지

역(백사장, 바람아래해변) 등 총 5개 지역의 토착 미생물을 이용하여 유류분해능을 시험하였다. 미생물은 유류오염지역의 퇴적물 표본을 채취하여 농화배양 기법으로 유류를 분해하는 미생물복합체(consortium)를 확보하고 1% 원유의 유류분해 능력을 실험 결과 약 28일 후에는 유류오염물질이 급격히 감소하였다. 이러한 실험은 영양분 공급 시 생태적 문제 발생의 가능성을 감안하여 토착 미생물 첨가방법을 채택하였다. 유류 유출 해역에 서식하고 있지 않는 외래미생물을 활용한 방제방법과 영양염을 살포하는 방법 등은 검증되지 않은 경우가 많으므로 주의해야 한다.



[그림 51] 미생물복합체를 이용한 유류분해 능력 가스크로마토그램

(1) 생물학적 정화방법의 원리

생물학적 정화방법은 광범위하게 오염된 지역을 정화하는 데에 매우 적합할 수 있는 방법이다. 원리는 생태계에서 자연적으로 정화되는 원리를 모방하되 자연상태에서 모자라는 점(잔류유분 분해속도)을 보완하여 자연정화 속도보다 빠르게 진행되도록 일련의 인위적인 조치를 하는 것이다.

이 일련의 조치란

- ① 잔류유분을 분해하는 미생물을 오염현장에 투입하는 것
- ② 부족한 영양성분을 보충하기 위하여 비료 또는 미생물제제 등을 투입하는 것
- ③ 호기성인 잔류유분 분해미생물에게 산소를 공급하는 것
- ④ 일정한 온도를 유지하는 것

잔류유분으로 오염된 토양정화에 많이 사용하는 토양경작법의 경우, 오염토양에는 대부분 이미 잔류유분을 분해하는 토착미생물이 높은 밀도로 존재하고 있어 질소와 인을 보충하기 위한 비료를 혼합해 주고 산소공급을 위하여 주기적으로 경작기를 사용하여 밭을 갈듯이 오염토양을 갈아 준다. 오염토양은 대부분 3개월 이내에 정화된 다(3개월 이상 소요될 수 있을 정도로 심하게 오염된 토양은 토양정화 등 다른 방법에 의해 단독적으로 또는 병행하여 처리한다). 하지만 내륙의 일정부지에서 유분으로 오염된 토양을 정화하는 것과 갯벌정화의 경우는 기본적으로 입지여건이 다르다. 육지에서 발생하는 유류오염 토양의 정화는 별도의 장소로 이송되어 외부와 격리된 공간에서 처리된다. 이에 반하여 갯벌 현장은 자연상태에 노출된 곳이며 정화대상 부지도 넓어서 토양경작법과 같이 일정기간을 주기로 땅을 갈아 얹어주는 데에는 한계가 있다. 그 외에 갯벌 현장은 밀물과 썰물에 의하여 번갈아서 포화상태와 불포화상태가 반복되는 곳이다. 이와 같은 현장특성을 감안하면;

① 잔류유분 분해 미생물투입

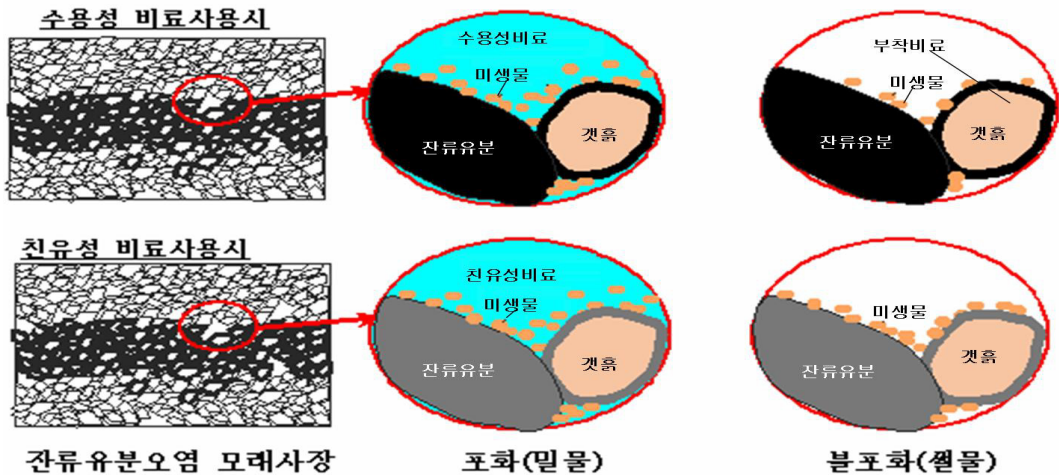
잔류유분성분 중 단순한 방향족화합물은 녹조류에 의하여 분해되나 대부분은 박테리아와 균류에 의하여 분해된다. 잔류유분을 분해하는 미생물은 바다 어디에나 존재하여 시간이 어느 정도 흐르면 오염된 곳의 미생물은 거의 100% 잔류유분분해 미생물로 존재하기도 한다. 미생물이 증식되고 만일 산소와 영양물질이 충분히 있다면 MARPOL 협정의 누출 허용치인 15~100ppm 정도의 잔류유분은 수 시간~수 일 내에

생분해성이 90%정도는 완전히 분해되나 나머지 약 5~10%인 고분자물질은 생분해성이 거의 없어 그대로 남는다. 그러나 인위적으로 투입된 미생물, 특히 유전자가 조작된 미생물이 생태계에 미치는 영향은 아직 미지수로 남아 있어, 만일 생물학적 처리를 시도하는 시점에서 미생물농도가 충분히 높아진다면 미생물 투입보다는 생육조건을 호전시키기 위한 영양물질을 투입하는 방법에 초점을 맞추는 것이 바람직할 것이다.

② 비료사용

잔류유분오염 해안에는 대부분 질소와 인성분이 충분하지 않아 생물학적 정화 시이를 보충해 주기 위하여 비료를 사용한다. 그러나 조수간만차가 있는 해안의 특성상 수용성 무기질 비료를 사용하면 밀물 시 포화층이 되면서 이 비료들은 일부 토양에 흡착된 상태로 남아 있겠지만 대부분 바다로 씻겨나가 2차오염을 유발할 가능성이 있다. 알래스카의 경우 부영양화가 목격되지 않았으나, 이 결과는 해안의 작은 부분에서 이루어진 실험에 대한 것이어서 과연 전 대상부지에 같은 방법으로 하였어도 양상이 그대로였을지는 의문스러운 부분이 있다. 우리나라 해수의 평균온도는 25℃로서 알래스카의 최고온도인 20℃ 보다 높은 것도 이를 우려스럽게 하는 부분이다.

알래스카를 비롯하여 여러 현장의 실험결과에서도 친유성 비료가 무기질 비료에 비하여 효과가 더 좋은 것으로 발표된 바 있다. 친유성 비료란 잔류유분에 비료성분이 녹아 들어가거나 비료가 잔류유분에 밀착되도록 한 지효성(遲效性) 비료의 일종이다. 그러므로 무기질 비료를 사용하면 비료가 잔류유분과는 별도의 공간인 물속에 있는 반면, 친유성 비료를 사용하면 잔류유분 자체가 영양물질까지 함유하게 되어 생분해성이 높아지므로 잔류유분 부위에 미생물수가 높아지고 결과적으로 잔류유분을 더 쉽게 분해할 수 있다. 이와 같이 높은 비료효과 이외에 친유성 비료는 바다로 씻겨나가는 양도 무기질 비료에 비하여 적게 되며 씻겨나간 비료도 물에 쉽게 용해되지 않아 부영양화가 억제될 수 있다.



(그림 52) 수용성/친유성 비료 사용시 비료거동 개념

(2) 생물학적 복구법의 특성

생물학적 복구법은 오염물질을 제거하는데 미생물을 이용하는 것이다. 이 방법에는 일반적인 접근법으로 두 가지가 있는데, 그 하나는 영양물질을 첨가하거나 포기를 하는 등 환경을 개조시키는 것이고, 다른 하나는 난분해성 물질을 분해시키는 미생물을 종균으로 접종하는 방법이다. 생물학적 방법이 효율적일 경우 최종산물은 물이나 이산화탄소와 같이 무해한 물질로 변화되어 환경이나 생물에 아무런 해를 주지 않아야 한다. 오염물질을 제거하는데 있어서 생물학적 복구법을 사용하면 막대한 비용이 소요되는 다른 방법에 비하여 훨씬 비용이 적게 든다는 장점이 있다. 엑슨발데즈 사고시 알래스카의 프린스 윌리엄 사운드 지역에서 석유로 오염된 자갈들을 물리·화학적으로 정화하는데 막대한 비용이 소요되었지만 그렇게 커다란 성과는 거두지 못하였다. 따라서 그 대안으로 최근에는 생물학적 복구법에 대한 관심이 높아지고 있다. 왜냐하면 생물학적 복구법에 의한 방제가 가시적으로 만족스런 결과를 나타내었을 뿐만 아니라 매립지의 조기안정화, 대기오염물질의 처리 등 다양한 분야에 적용가능성이 높기 때문이다.

재래적인 처리기술은 독성폐기물로 오염된 다량의 토양을 소각로로 옮겨 연소분해 처리하는 방법이 주를 이루었으나 전형적인 생물학적 복구법은 현장에서 행해질 수 있기 때문에 간단한 장비만 있으면 가능하다. 그러나 다른 처리기술과 마찬가지로 생물학적 복구법 역시 처리할 수 있는 대상물질이 제한되어 있으며 처리장소의 조건 및

처리시간 등의 제약을 받고 있다. 생물학적 복구법은 환경오염물질의 파괴에 있어 커다란 잠재력을 갖고 있는데 특히 연료유나 크레오소트로 오염된 토양의 처리에 효과가 탁월하다. 오염된 부지에 대해 오염정화기술로서의 생물학적 복구법의 잠재력이 시험되었다. 야외에서의 파일럿 실험이나 실험규모의 생물학적 실험에 있어서 가장 큰 관심사가 되는 오염물질은 석유와 크레오소트인데 60%의 부지가 이러한 시험에 사용되었다. 생물학적 복구법은 최근에 그 이용과 기술이 급속히 신장하고 있는 분야이다.

(3) 생물학적 복구법의 검증

생물학적 복구기술이 잠재적으로 유용하다는 것을 증명하려면 제어된 조건하에서 오염물질의 생물학적 분해가 증진되었다는 것을 입증하여야 한다. 이것은 현장에서 수행하기가 어려우므로 실험실내에서 실험을 행하여야 한다. 실험실내에서의 실험을 통하여 특정한 처리가 오염된 부지로부터 채취한 난분해성물질을 제거하는데 효과가 있다는 것을 증명해야 한다. 실험실내에서의 실험은 실제의 환경조건에 가장 가깝게 모형화해야만 실용적인 결과를 얻을 수 있게 된다. 이것은 대개 현장에 고유한 미생물 개체군을 가지고 있는 시료를 채취 이용함으로써 수행된다. 이러한 실험에 있어서는 오염물질의 미생물학적 풍화작용 효과를 실제의 생물분해 작용과 구분하기 위해서 살균처리와 같은 적절한 대조군을 함께 설치하는 것이 중요하다. 이러한 실험은 물론 야외에서의 현장 입증실험을 대체하는 것은 아니지만 특정한 생물학적 복구법에 대한 과학적인 신뢰성을 확인하는데 있어서 매우 중요하다. 이것은 또한 잠재적인 생물학적 복구처리 목표를 선별하는데 있어서도 유용하다.

생물학적 복구법의 효능을 시험하는 실험에 있어서 전형적으로 측정되는 파라미터로는 미생물 개체군의 계수, 산소소비율과 이산화탄소 발생량으로 나타낸 미생물의 호흡률, 오염물질의 소멸도를 나타내는 분해율이다. 생물학적 복구법의 효능을 가장 직접적으로 측정하는 방법은 오염물질의 소멸도를 측정하는 것이다. 그런데 이 방법을 사용할 때에는 적절한 대조군과 분석방법을 선정하는 것이 매우 중요하다. 오염물질의 소멸도는 생물학적 분해에 의해서만이 아니라 증발과 광분해 및 용탈에 의해서도 일어난다.

한편 실험실에서의 효능검사 목적은 상업적인 생물학적 복구제품이 환경을 간단히 개조시킴으로써 성취할 수 있는 것보다는 그 제품이 상당한 정도로 오염물질의 생분

해를 증진시키는가의 여부를 결정하는 것이다. 이러한 실험은 전해 호흡량 측정기를 통하여 시간의 경과에 따른 산소흡수율을 측정하고 분해율과 미생물성장률을 측정하게 된다. 현장에서 오염물질 생분해율을 측정하기는 매우 어렵다. 현장 실험을 실시하기 위해서는 닫힌 실험계가 필요하고 호흡량 측정 등은 현장에서 수행하기가 매우 어렵기 때문에 수많은 반복실험을 통하여 통계적 재현성이 입증되어야만 그 신뢰도를 인정받을 수 있게 된다. 이러한 관점에서 해양환경관리법 시행규칙(2008. 1. 20. 개정)에서는 생물정화제제(生物淨化製劑)를 형식승인을 받아야 하는 약제의 종류에 포함하여 성능시험성적서와 사용방법설명서를 해양경찰청장에게 제출하도록 하고 있다.

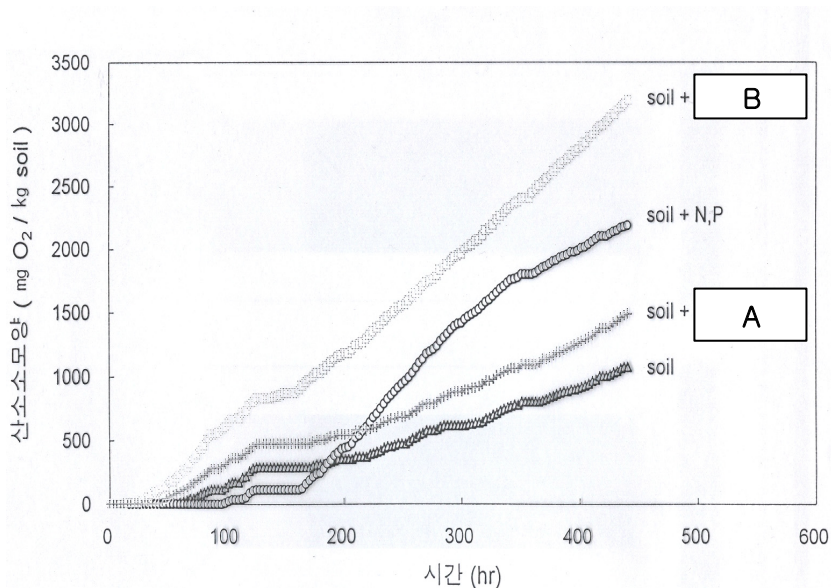
생물학적 복구법이 그 효능을 인정받기 위해서는 생태적인 악영향이 없어야 한다. 생태학적 부작용 실험은 비료와 같은 화학적 첨가제가 토착생물에 독성을 미치는지의 여부를 밝히는 것으로서 직간접적 또는 만성적인 독성피해를 알아내게 된다. 실험대상은 물벼룩과 같은 갑각류, 굴의 유충 등의 조개류, 그리고 무지개송어 등의 어류 등이다. 그 밖에도 조류성장률 등의 실험을 병행하기도 한다. 이 실험의 근본적인 목적은 부영양화 등을 발생시키지 않으면서 생분해를 촉진시킬 수 있는 영양물질의 적용범위와 그 양을 파악하는 것이다. 예측하지 못했던 독성이나 잔류물질에 의한 돌연변이 현상 등에 위해성을 파악하기 위하여 생체군집을 이용한 잔류물 분석을 해야 할 필요가 있다. 유류오염의 토양처리효능을 알아내기 위하여 미생물독성시험(microtox) 군집인 인산염광세균(photobacterium phosphoreum)을 종종 이용하는데, 이는 빛발광의 감소율을 측정함으로써 가능하다.

또한 미생물연료전지의 원리를 이용하여 비교적 용이하게 온라인분석(on-line analysis)이 가능한 미생물독성시험 방법도 있다. 이 방법은 독성의 유무 및 정도에 따라 미생물이 전기를 발생하는 정도가 다르게 나타나는 원리에 의한 것이다. 생물학적 복구법을 시행하게 되면 가세되는 물리, 화학적인 교란에 의해 독성이 일시적으로 더 나타날 수 있지만 종국적으로는 독성이 사라지게 된다. 미생물독성시험 방법은 생분해 활동을 방해하는 독성물질이 존재할 때 생물학적 복구법 시행 전에 토양을 희석시키는 등의 용도를 결정하는데 이용된다.

일반적으로 원유와 같이 복합성분으로 이루어진 물질들은 생분해 시 순차적으로 분해된다. 즉, 분해되기 쉬운 물질로부터 분해되기 어려운 물질 순으로 분해가 진행되며 독성이 있거나 장기적인 분해를 요하는 물질은 잔류하는 것으로 나타난다.

이 과정에서 분해되기 쉬운 물질은 바로 최종산물인 탄산가스나 물로 분해되는 반면 분자량이 큰 물질들은 중간생성물로 분해되는 단계를 거쳐 최종산물로 분해되는 다단계 분해양상을 보인다. 따라서 미생물독성시험 방법을 동원하여 오염토양의 독성양상을 판별하고 독성을 감소시키는 일련의 조작에 대한 실험결과를 도출할 때까지 매우 긴 시간이 소요될 수 있다. 그러나 오염현장이 장기간 방치될 경우 물질계통이 변화될 수 있으므로 복구법에 대한 처방은 될수록 신속하게 찾는 것이 바람직하며 이를 위하여 미생물독성시험법과는 별도로 호흡측정계(respirometer)에 의한 실험을 수행하는 것이 바람직하다. 호흡측정계는 미생물의 호흡활동을 통한 산소소비 속도로 미생물의 활성을 감지하는 방법으로서 호흡활동이 왕성할수록 주어진 조건이 미생물의 분해활동에 적합함을 나타낸다. 아래 그림은 디젤로 오염된 토양에 대한 호흡측정계 실험결과를 나타낸 것인데, 산소소비속도가 가장 왕성한 "Soil+B"의 조건이 다른 실험조건에 비하여 이 오염토양을 정화하는데 가장 적합한 것으로 나타나고 있다.

Respirometer를 이용한 토양 중 디젤의 생물학적 분해속도



N,P : 영양분 A, B : 미생물 제재

[그림 53] 유류오염토양의 생물학적 분해속도

다환방향족 탄화수소(PAHs) 등 돌연변이를 일으키는 잔류물 측정은 에임즈시험(Ames test)으로 시행한다. 원유로 오염된 경우 생물학적 분해가 시작되면 어느 정도의 돌연변이 현상이 발생하지만 생분해가 진행되면서 이러한 현상이 사라지게 된다. 이러한 현상은 씨앗의 발아상태나 식물의 성장 생육실험을 통해서 입증되었다. 종자나 식물을 이용한 실험은 미생물실험보다 민감도가 훨씬 낮기 때문에 탄화수소의 농도가 건량무게기준 토양의 1% 이상인 경우에만 그 결과를 알 수 있다. 이 방법은 유류오염 침윤토양 지역에서 다시 식생이 살아나는 시기를 결정할 때 이용된다.

(4) 생물학적 복구법의 적용사례

유해화학물질에 대한 생물학적 분해를 제한하는 요인들은 폐기물의 농도, 산소결핍, 영양염류의 부족, 수분부족, 온도, pH 등이다. 이러한 제한요인들이 제거되면 미생물들은 급속히 성장하게 된다. 경쟁력이나 생존력이 약한 몇몇 경우를 제외하고는 특별히 미생물을 토양에 접종할 필요는 없다. 그러나 접종을 한다고 하더라도 미생물의 생존과 번식에 적합한 생태학적 조건들을 함께 만들어 주어야만 소기의 성과를 거둘 수 있다. 그러한 생태학적 조건들은 알맞은 온도, 적당한 수분, 영양염류, 산소, pH 등을 들 수 있다. 생물학적 복구법을 이용하여 유류오염 방제시 문제가 되는 또 다른 요인은 질소, 인 등의 영양염류의 첨가이다. 질소와 인은 미생물대사의 필수요소로 이들이 부족하면 생분해율이 급격히 낮아진다. 친유성 질소 인 복합비료는 생분해가 활발한 기름과 수표면 사이에서 희석되지 않고 남아 생분해를 돕는다. 1978년 아모코 카디즈호 유류유출사고시 사용된 친유성 비료는 질소원으로 요소를, 인산원으로 라우릴인산염을, 탄소원으로 올레인산을 사용하였다.

생물학적 복구법은 현장이나 또는 지상의 생물반응기를 설치하여 오염된 토양을 처리한다. 처리시 배양된 미생물을 추가하거나 영양염류와 산소 등을 주입하기도 한다. 유류로 오염된 토양과 지하수의 복원은 석유화학공장에서 침전슬러지나 탈수케익 등 폐수처리과정에서 유분을 다량 함유한 폐기물의 안정화 처리와 같은 공정을 적용한다. 이 방법이 바로 토양미생물처리법인데 통상 토양처리 또는 토양경작(land farming)이라 하며 적용장소나 시간, 처리율 등을 조절할 수 있다. 토양경작법을 적용하기 위한 부지는 홍수, 강우유출, 침출현상에 대한 고려가 필요하다. 유류함유 폐기물을 생분해시킬 경우 토양상부 15~20cm 두께로 유류함량을 약 5%정도로 하며, 10%를 넘을 경우 생물학적 분해가 잘되지 않는다. 이 수치는 ha당 유류 100kL에 해당한다. 이 때 반응 조건은 pH 7~8로 유지하기 위해 석회로 조절한다. 그리고 영양분 비

율은 탄화수소:N:P=800:4:1로 한다. 그 외에 적절한 배수가 이루어져야 하고 살수는 건조하고 기온이 높을 때 적용한다. 유류유출 사고시 생물학적 복구가 가능하다는 판단이 서면 현장처리가 가장 경제적이고 환경적으로 안전하다. 즉 오염된 토양을 굴착하여 15~20cm 두께로 펼친 후 생물학적 복구 방법을 적용할 수 있다.

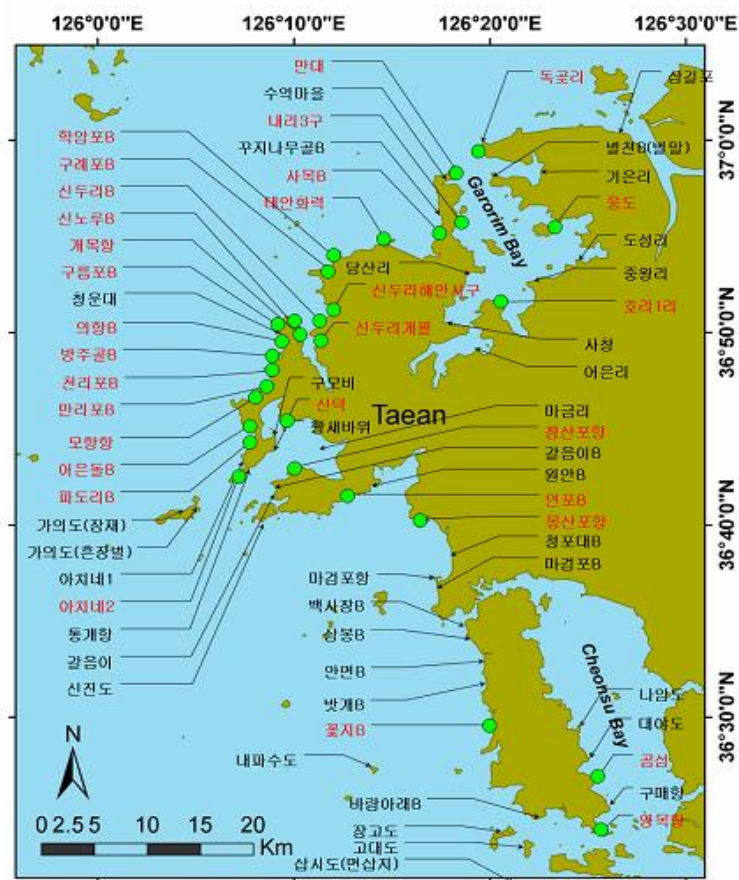
1989년 엑슨발데즈호 기름유출사건으로 생물학적 복구법과 적용법에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 사고 직후의 초기 대응책은 물리적인 방법으로서 고압 분사기를 가지고 해안을 세척하는 것이었다. 그러나 이 방법은 비용이 많이 소요되었으며 분쇄된 기름이 다시 합쳐지는 등 비효율적이었다. 따라서 미국 환경청과 엑슨모빌사는 생물학적 복구법을 적용하는데 합의하였다. 이 방법의 초점은 영양물질을 첨가시키는 것이 토착미생물들이 보다 활발하게 생분해도를 높일 수 있는가에 대한 것이었다. 친유성 비료의 적용은 놀랄만큼 성공적이었으며, 그 결과 기름에 시커멓게 뒤덮여 있던 해안가의 자갈은 10일만에 다시 원래 상태로 변하였고, 기름이 말끔히 제거되었다. 이 결과로 인하여 생물학적 복구법을 적용할 경우 영양물질이 포함된 비료를 주입하는 것이 매우 바람직하다는 결론을 얻게 되었다. 이러한 결과로 생물학적 복구법이 유류 오염 지역을 정화하는 중요한 처리방법으로 주목받게 되었다.

5) 소결론

유류유출에 의한 환경오염문제 해결을 위해서는 물리화학적 기법을 적용하는 방제 이후 환경생태 안전성검증과 독성실험, 생분해도 평가, 생체축적성 평가를 거쳐 생물학적 복구법에 대한 적용 연구가 전제되어야 한다. 유류는 난분해성 물질이므로 이에 대한 환경모니터링시 정교한 분석기구나 미생물학적 검증을 거치게 된다. 이 경우 대상물질에 대한 생분해도, 최적 분해조건, 생태계에 대한 위해성을 종합적으로 판단하여 시행해야 한다. 특히 2008년 1월 20일부터 적용되는 개정된 해양환경관리법 시행규칙에서는 생물정화제제를 형식승인을 받아야 하는 약제의 종류에 포함하고 있으므로 향후 이에 대한 유류오염지역 현장적용 평가와 함께 지속적인 생태계 모니터링에 대한 기법개발도 기대되고 있다.



(그림 54) 생물정화제 살포 전후의 비교(캐나다 동부해안)



(그림 55) 태안군 유류오염 생태모니터링 지점

6. 주민참여와 복원평가

1) 적응관리와 주민참여

생태복원에 있어서 고려되어야 할 중요한 요소 중 하나가 시간이다. 다소간의 차이는 있지만 시간이 필요하다는 것이 분명하며, 정책결정자는 복원에 소요되는 시간을 인정하여야 한다. 하지만 단순히 오염초기의 유류제거율만을 이용하여 복원기간을 예측하는 것은 매우 부정확한 방법이다. 분해가 상대적으로 용이한 성분의 분해 및 휘발 이후 남아있는 성분은 분해가 느리게 일어나기 때문이다. Exxon Valdez 사고 이후 계속해서 예상보다 높은 농도로 지속되고 있다는 연구 결과들이 좋은 예라 할 수 있다(Carls et al., 2001; Short et al., 2004). 유출이후 1992년 까지는 연 68%의 제거율로 예측되었으나 그 이후 2001년 까지 모니터링 결과로는 4% 미만의 제거율을 나타냈다고 보고되었다(Short et al., 2007).

복원에 장기간의 시간이 필요할 수 있다는 것은 복원전략이 장·단기로 나누어 추진되어야 하는 것을 의미하며, 초기 예측이 틀릴 수 있다는 이전의 연구 결과들은 복원의 방향이 예상과는 다르게 진행될 수 있음을 인식하고 필요하다면 복원전략을 수정하여 원래의 복원목표를 이루어 나갈 수 있는 적응관리를 도입하거나 고려해야 한다. 적응관리는 초기의 복원목표의 수정을 요구하는 것이 아니라 이것을 이루기 위하여 방법의 수정을 의미한다.

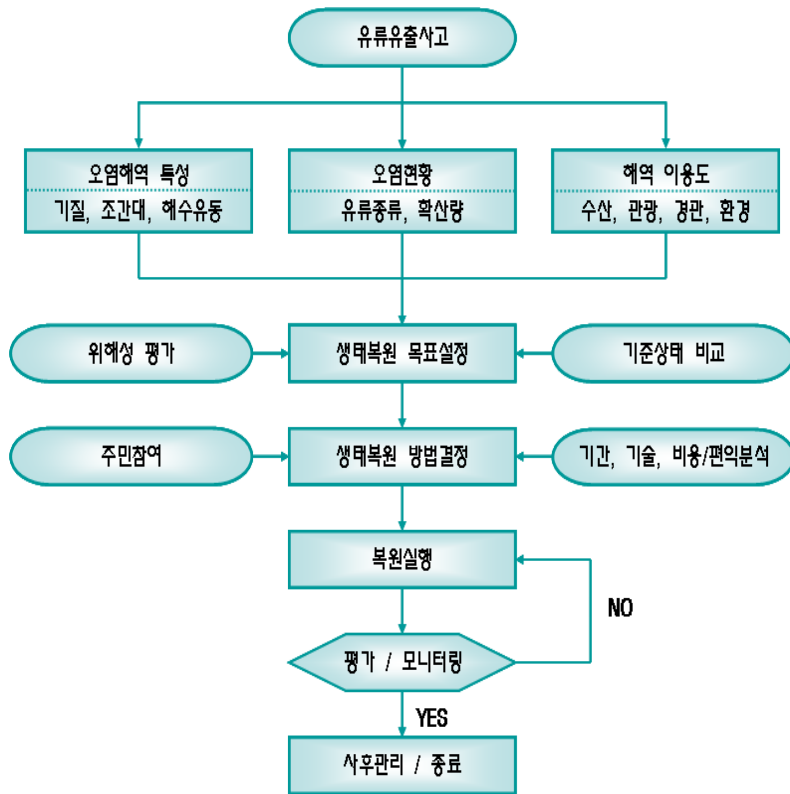
연안지역에서의 생태복원에 고려하여야 할 중요한 또 하나의 요인은 바로 지역 주민들이다(이석모, 2008). 주민들은 이미 연안 생태계의 일부로 오랜 기간 동안 그들의 활동은 해당 지역의 생태계를 유지하는 구성요소가 되어있다. 갯벌에서의 수산물의 생산은 바다로 유입된 영양물질을 다시 육지로 되돌리는 역할을 하며, 바지락이나 낙지와 같은 수산물을 채취하는 일들은 갯벌 생물의 활동과 더불어 정화기작에 도움을 줄 수 있다. 하지만 1차 방제 이후에 주민들의 역할은 더 커질 수 있다.

첫째, 주민들은 오염지역의 정화와 생태계 회복의 중요한 모니터링을 담당할 수 있다는 것이다. 주민들이 모니터링 참여는 장단기에 걸친 지속적인 모니터링, 일관된

모니터링의 시행, 적극적인 현장모니터링 등의 장점을 가질 수 있다.

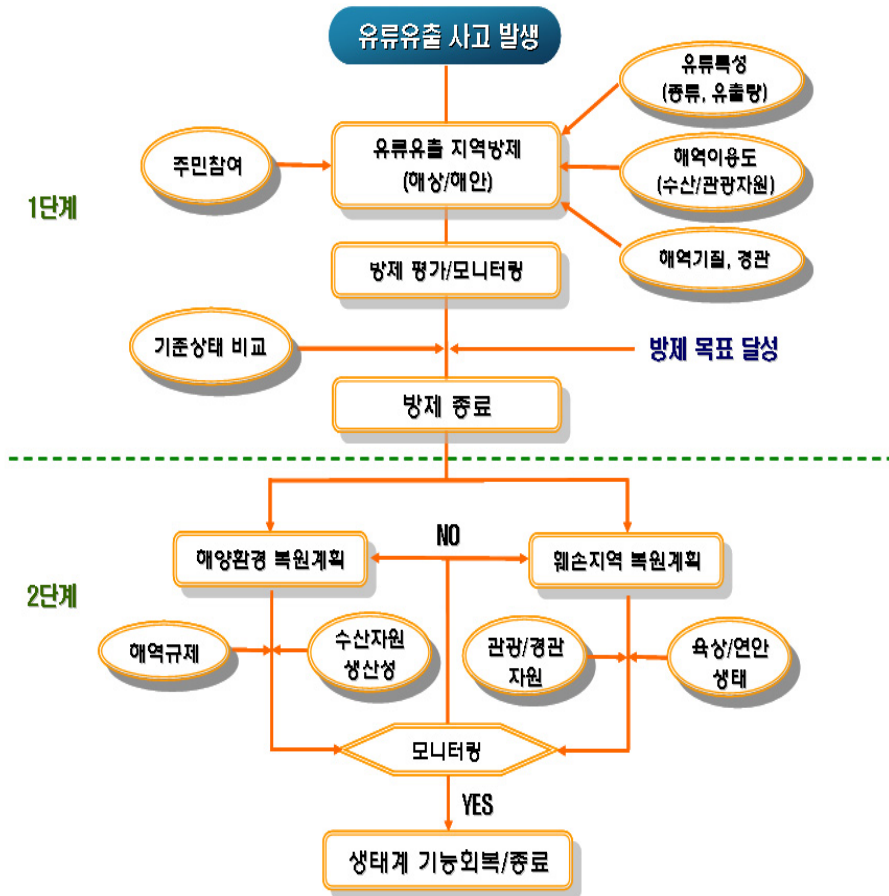
둘째, 그들의 어획활동의 정도가 해당생태계의 회복에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 오염물질에 노출된 해양 생물들은 충격에서 회복되는 정도가 다르다. 유류가 제거되었다고 이들의 밀도가 바로 증가되는 것은 아니다. 어떤 종의 회복에는 상당히 오랜 시간이 요구될 수도 있다. 그러한 종들이 어획으로 해당 생태계에서 소멸 혹은 일정밀도 이하로 감소하게 된다면 그리고 이러한 종들이 생태학적으로 그 생태계의 종 구성에 큰 영향을 미치는 썩갯돌 종이라면 문제는 더 심각해질 수 있다. 따라서 방제이후 즉각적인 어획의 재개보다는 자발적 혹은 보상적인 방법을 사용해서라도 해당 생태계에서 중요 종들의 보호 또한 수반되어야 한다.

다음은 유류오염 지역의 생태복원 절차를 나타낸 것이다. 지역 주민들이 생태복원에 어떻게 참여할 수 있는지를 잘 보여주고 있다. 특별한 환경기준이 없는 현재의 상황에서 연안생태계의 복원목표 즉 복원기준을 설정하는 데에도 전문가와 더불어 복원지역을 이용할 주민의 의견 수렴은 중요하다. 복원방법의 결정에도 해당 지역을 잘 알고 적극적 협력이 가능한 주민의 의견이 충분히 반영되어 복원방법이 결정되는 것이 바람직하며, 복원시행 및 모니터링에 있어서도 주민들의 참여는 바람직하다고 할 수 있다.



〔그림 56〕 주민참여형 생태복원과 모니터링

적응관리(adaptive management)를 포함한 단계적 복원절차는 다음과 같다. 유출유류의 제거에 초점을 맞추는 1단계의 치유절차와 이후의 생태복원 목표 달성을 위한 오염지역과 훼손지역의 복원계획 및 실행, 장·단기 모니터링과 이들의 생태적·법적 성공의 평가 및 복원계획의 수정을 포함한 2단계의 적응관리로 구성된다. 오염지역의 경우 방제작업이 수행되어 오염물질의 직접적인 제거가 일어난 지역과 방제작업이 시행되지 않아 자연적인 정화능을 이용하는 지역과의 구분 및 방제과정에서 훼손된 지역 및 추가적인 훼손이 우려되는 지역을 모두 포함하며, 복원의 계획과 실행 모니터링의 경우 장단기로 나누어 진행되는 것이 바람직하다.



(그림 57) 단계별 생태복원 절차 제안

2) 적응관리와 복원 평가

일반적으로 복원을 평가하는 방법을 다음과 같이 3가지로 나눌 수 있다.

첫째, 복원성과를 직접비교(direct comparison)하는 것이다. 이는 복원지역과 대조 지역의 특성을 비교하는 것으로 해당 생태계의 생물학적 요인과 무생물학적 요인 중 중요한 20~30여개의 변수를 비교하는 것이다. 대조지역과 더불어 사고지역의 복원이 전과 이후의 상태를 비교할 수도 있지만, 가장 바람직한 것은 오염이전의 해당 생태계 혹은 아직 오염되지 않은 인근의 유사생태계를 대조지역으로 선정하여 복원을 평가하는 것이 바람직하다. 하지만 직접비교를 이용하여 복원을 평가할 때 발생할 수

있는 문제점도 있는데 이는 비교변수의 선정에 주관적일 수 있고 이 경우 선정된 변수에 따라 결과가 왜곡될 수 있다는 것이다. 또한 선정된 변수 중 일부만이 만족할 경우도 있는데, 예를 들면 20여 변수 중 5개만 만족하거나 혹은 5개가 만족스럽지 않을 경우에 복원의 정도를 평가하기 애매한 경우가 많으며, 직접 비교 시에 어느 정도까지를 복원의 성공으로 평가할 지에 대한 명확한 이론적 근거가, 예를 들면 대조지역의 50%, 80%, 100% 중 어느 정도까지를 성공으로 볼 것인지 평가할 수 있는 기준이 없다는 것이다 .

둘째, 속성분석 (attributes analysis)으로 이는 대조생태계를 특징지을 수 있는 주요 속성들의 그룹을 분석하는 것으로 이를 위해서는 계획된 모니터링과 관련 자료들이 필요하다. 속성분석을 통한 복원 평가를 위해서는 단순비교가 아니라 유사도나 군집분석과 같은 통계적인 방법의 도입이 고려될 수 있다.

셋째, 추세분석 (trajectory analysis)으로 장·단기간에 걸친 모니터링 결과들의 경향을 분석하는 것으로 어느 한 시점이 아니라 복원이후의 복원방향이나 변화상태를 비교하여 복원시행의 결과의 방향을 판단하여 복원결과를 평가하는 것이다.

허베이 스피리트 유출사고와 같은 대규모의 유류유출로 인한 연안생태계의 복원 평가는 속성분석과 추세분석 등 장단기의 모니터링 결과를 활용할 수 있으며 또한 적응관리를 적용할 수 있는 분석 방법들을 적절히 활용해야 할 것이다. 하지만 이에 앞서 분명한 장단기 복원목표와 복원목표 달성을 평가할 대조생태계의 확보 및 평가 기준의 마련이 우선되어야 한다. 평가할 속성들의 선정과 모니터링 기간 등 세부 사항에 전문가 그룹과 주민들의 참여 또한 필요할 것이다.

제6장 결론 및 정책 제언

1. 결론

해상에서의 유류오염사고 발생에 따라 장기적인 피해를 끼칠 수 있는 상황이라면 환경에 장기적으로 영향을 주는 잔류성유기오염물질(POPs), 성장률이 저하되는 주요 종들, 제한적인 회복 가능성과 유류오염 정화작업의 심각한 문제점 등에 대해서 고찰이 필요하다. 수많은 사례 연구 중에는 대형 유류오염 후에 놀라울 정도로 신속하게 회복되는 사례들과 오염에 갈수록 민감해지는 자연자원에 대한 사례가 포함되어 있다. 따라서 오염의 부정적인 영향에 대한 신뢰할만한 증거가 있는 오염특성 검토와 동시에 이러한 유류오염으로부터 회복이라는 용어를 정의하는 작업과 관련시켜 논의가 필요하다.

허베이 스피리트호 사고로 인한 유류유출 피해 상황을 보면 태안·보령지역을 중심으로 유화제로 분산된 수중유(oil-in-water) 상태로 해안에 표착되었고, 충남의 5개 시·군 59개 도서, 부안, 신안 등 전남북 42개 도서에 주로 경화된 타르덩어리가 부착되었다. 이에 따른 피해 상황으로는 서산·당진의 가로림만에서 안면읍 내과수도까지 해안 167km를 따라 473개소의 어장 5,159ha와 해수욕장 15개소에 피해가 집중되었다. 전남지역에서는 영광, 신안지역을 중심으로 김양식장과 마을어장 22,261ha가 피해를 입었다.

이에 따라 2008년 10월 말까지 폐유 4,175kL, 유류오염폐기물 32,074톤이 회수되었다. 방제 과정에 동원된 주요 장비와 자재는 유흡착재 498톤, 유처리제 298kL, 오일펜스 47km 등이며, 방제 인력으로는 자원봉사자 130만, 주민 54만, 군·경·공무원 29만 등 213만명에 이르렀다.

유류유출 이후 해안선정화평가팀(SCAT)의 현장조사와 방제작업에 따른 방제성과 평가 시 현장 조사를 통해 해안선에 표착된 원유, 유화제에 의해 분산된 후 해안에 표착된 초콜릿무스 상태의 안정화물과 타르 덩어리의 성상을 분석하였다.

2008년 1월 9일 안면읍 내파수도에서 포집된 원유시료와 반고체상의 초콜릿무스의 성상을 비교하면 모든 중금속 성분함량이 초콜릿무스가 높았다. 따라서 동일지점이라도 안정화상태의 반고상이 되면 성분이 농축됨을 알 수 있다. 2008년 4월 4일 이원면 내리 꾸지나무골에서 표착된 고상의 타르 덩어리는 대체로 시간이 경과하여 성분의 함량이 높아졌다. 그러나 2008년 4월 15일 소원면 파도리 해안에서 표착된 액상의 타르는 분산된 상태로 상대적으로 성분함량이 낮게 나타났다. 그리고 2008년 10월 8일 학암포 잔존유류(lingered oil) 방제현장에서 채취한 시료를 등유에 희석하여 분석한 결과 잔존유류 성분이 거의 없는 상태로 해안에 표착된 타르보다도 중금속 농도가 현저히 낮아졌다.

방제 종료점의 정의는 해안지역 처리나 해안선 정화 종료점은 구획별, 유류 오염 지역별로 할당된 특정 준거치인데, 충분한 처리(오염제거) 노력이 구획이나 단위지역에 대해 완결되었을 때로 규정하고 있다. 실제로 방제 종료점은 특정유류유출에 대해 실질적인 '정화'상태에 대한 정의를 의미한다. 방제 종료점은 처리 활동을 평가하는 표준이다. '정화'상태는 앞서 정의한 대로 방제 종료점에 도달되어 유류에 오염된 해안선구획의 특정한 처리가 합의된 목적 또는 목표수준에 이르게 되었을 때를 말한다.

방제 종료점 설정의 목적은 유류유출 방제를 위하여 처리 종료점을 설정하는 것은 의사결정 과정 관리, 방제작업, 그리고 완전한 처리결정의 중요한 핵심이다. 유류유출 대응 책임자는 사전예방책으로 종료점 설정의 가치를 알고 있어야 한다.

해양환경평가는 환경을 올바르게 이해하고 종합적으로 평가하기 위해서는 다양한 환경조사가 필요하다. 선진국에서는 생태계 군집, 잔류유해물질 농도, 생물농축이나 생물확대, 생물독성 등 다양한 매체들을 대상으로 수행하여 얻어진 결과들을 종합분석하여 유류유출에 따른 해양환경영향을 평가한다. 이들 조사 항목들은 정보를 상호 보완적으로 제공하고 있는데 예를 들면, 잔류유해물질 농도조사는 환경에 잔류하는 특정한 오염물질 농도를 정량적인 수치로 제공하여 특정 유해물질에 의한 오염 가능성을 잠재적으로 평가할 수 있게 해준다. 생물검정분석은 환경내 존재하는 모든 유해물질에 의한 생물독성 유무와 강도에 대한 정보를 제공하여 분석되지 않은 미지의 유해물질에 대한 생물영향을 잠정 평가할 수 있게 해준다.

생물군집 조사는 생태계의 건강성 정보와 군집 구조의 취약성에 대한 정보를 알려 줌으로써 오염수준이 생태계 수준까지 확대되어 영향을 주는가에 대한 판단을 가능하게 한다. 생체내 잔류 유해물질 분석을 통해 생물축적이나 생물확대를 파악할 수 있으며 이 정보는 수산물 섭취에 의해 발생될 수 있는 인체 보건학적 영향을 판단하는 근거자료로 이용될 수 있다.

2. 정책 제언

유류오염지역에 대한 환경생태 복원을 위해서는 방제를 통한 물리화학적 오염물질 제거와 생물학적 환경복구 방법이 적용될 수 있다. 유출된 유류를 제거하는데 중점을 두는 방제는 가시적 성과가 나타내는데 비교적 짧은 시간이 소요되는 반면, 생물학적 복원에는 방제후 남은 유류의 제거에 미생물 물질대사를 이용하여 분해하는 것이므로 비교적 장시간이 소요된다.

대부분의 유류유출사고는 기상상태가 매우 좋지 않을 때 발생하므로 초동방제가 쉽지 않다. 결국 다량의 유류가 조간대 지역으로 이동하여 해양생태계를 파괴하게 된다. 특히 태안해안의 조간대 지역은 유류사고에 매우 취약한 환경조건을 가지고 있다. 복잡한 리아스식 지형의 굴곡이 심한 해안선과 산재한 섬들로 인해 유출된 유류의 표착선 범위가 넓으며, 강한 왕복성 조류의 흐름은 각종 해양생물이 서식하는 조간대 지역에 유류를 빠르게 확산시킨다.

조간대에서의 유류오염 방제기술 역시 물리적, 화학적, 생물학적 방법이 있는데 이것 역시 지역적인 특성에 맞게 도입되어야 한다. 특히 조위가 가장 높은 시기인 사리 때 외해로부터 밀려온 방제유류 잔류물질과 점성이 큰 유류가 표착된 부유폐기물은 방제 작업이 어려운 암벽 골짜기나 외딴섬의 상부인 조상대(supratidal zone)에 갇혀있어 박혀있는 경우가 많다. 따라서 이러한 유류오염 폐기물 제거와 함께 지속적인 생태계 복원을 위한 노력이 중요하다.

유류오염지역의 생물학적 복구는 두 가지 방법이 있는데, 첫째는 오염 지역에 미생물의 먹이가 되는 영양염을 첨가하여 오염된 지역에 이미 존재하는 유류 분해 미생물의 활동을 촉진시켜 유류 분해능을 향상시키는 방법이고, 둘째는 인위적으로 배양된 유류 분해 미생물을 유류오염지역에 추가 살포하여 유분 분해시간을 빠르게 하는 방법이다. 현재까지 조사된 바에 의하면 최소한 90종 이상의 해양미생물이 신진대사에 필요한 탄소와 에너지원으로 기름을 이용함으로써 기름을 분해할 수 있다고 알려져 있으며, 여기에는 박테리아, 균류, 일부 조류도 포함된다. 이들 미생물은 전 해상에 분포되어 있으나, 유류유출이 빈번한 지역에 다량으로 분포한다.

생태계 복원 계획 수립 및 시행은 허베이 스피리트호 유류오염사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법에 근거하여 해양환경이 훼손된 지역과 생태계변화 등이 우려되는 지역을 지정·고시하고, 동 지역에 대해 특별해양환경복원계획을 수립·시행하도록 하고 있으므로 생태계조사·연구계획, 모니터링, 복원계획, 기타 필요사항을 반영하도록 하고 있다. 따라서 친환경적 장기복원계획 추진 시 다음과 같이 적응관리를 통한 생태복원 성과분석의 병행추진 방안을 고려할 수 있다.

적응관리와 주민참여 관점에서 생태복원에 있어서 고려되어야 할 중요한 요소 중 하나가 시간이다. 다소간의 차이는 있지만 시간이 필요하다는 것이 분명하며, 복원에 소요되는 시간을 인정하여야 한다. 복원에 장기간의 시간이 필요할 수 있다는 것은 복원전략이 장·단기로 나누어 추진되어야 하며, 초기 예측이 틀릴 수 있다는 이전의 연구 결과들은 복원의 방향이 예상과는 다르게 진행될 수 있음을 보여준다. 따라서 이러한 것을 예상하여 필요하다면 복원전략을 수정하고 원래의 복원목표를 이루어 나갈 수 있는 적응관리의 도입을 고려해야 함을 알 수 있다. 적응관리는 초기의 복원목표의 수정을 요구하는 것이 아니라 이것을 이루기 위하여 방법의 수정을 의미한다.

연안지역에서의 생태복원에 고려하여야 할 중요한 또 하나의 요인은 바로 지역 주민들이다. 주민들은 이미 연안 생태계의 일부로 오랜 기간 동안 그들의 활동은 해당 지역의 생태계를 유지하는 구성요소가 되어있다. 특히 1차 방제 이후에 주민들의 역할은 더 커질 수 있다.

첫째, 주민들은 오염지역의 정화와 생태계 회복의 중요한 모니터링을 담당할 수

있다는 것이다. 주민들이 모니터링 참여는 장단기에 걸친 지속적인 모니터링, 일관된 모니터링의 시행, 적극적인 현장모니터링 등의 장점을 가질 수 있다.

둘째, 그들의 어획활동의 정도가 해당생태계의 회복에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 오염물질에 노출된 해양 생물들은 충격에서 회복되는 정도가 다르다. 유류가 제거되었다고 이들의 밀도가 바로 증가되는 것은 아니다. 어떤 종의 회복에는 상당히 오랜 시간이 요구될 수도 있다. 그러한 종들이 어획으로 해당 생태계에서 소멸 혹은 일정 밀도 이하로 감소하게 된다면 그리고 이러한 종들이 생태학적으로 그 생태계의 종 구성에 큰 영향을 미치는 켄네틱 종(wedge species)이라면 문제는 더 심각해 질 수 있다. 따라서 방제이후 즉각적인 어획의 재개보다는 자발적 혹은 보상적인 방법을 사용해서라도 해당 생태계에서 중요 종들의 보호 또한 수반되어야 한다. 특별한 환경기준이 없는 현재의 상황에서 연안생태계의 복원목표 즉 복원기준을 설정하는 데에도 전문가와 더불어 복원 지역을 이용할 주민의 의견 수렴은 중요하다. 복원방법의 결정에도 해당 지역을 잘 알고 적극적 협력이 가능한 주민의 의견이 충분히 반영되어 복원방법이 결정되는 것이 바람직하며, 복원시행 및 모니터링에 있어서도 주민들의 참여는 바람직하다고 할 수 있다. 적응관리와 복원 평가를 위해 세가지 고려사항은 다음과 같다.

첫째, 복원성과를 직접비교하는 것이다. 이는 복원지역과 대조지역의 특성을 비교하는 것으로 해당생태계의 생물학적 요인과 무생물학적 요인 중 중요한 20~30여개의 변수를 비교하는 것이다. 대조지역과 더불어 복원이전과 이후의 상태를 비교할 수도 있지만 가장 바람직한 것은 대조지역 즉 오염이전의 해당 생태계 혹은 아직 오염되지 않은 인근의 유사생태계가 대조지역으로 선정되는 것이 바람직하다.

둘째, 속성분석으로 이는 대조생태계를 특징지을 수 있는 주요 속성들의 그룹을 분석하는 것으로 이를 위해서는 계획된 모니터링과 관련 자료들이 필요하다. 속성분석을 통한 복원 평가를 위해서는 단순비교가 아니라 유사도나 군집분석과 같은 통계적인 방법의 도입이 고려될 수 있다.

셋째, 추세분석으로 장·단기간에 걸친 모니터링 결과들의 경향을 분석하는 것으로 어느 한 시점이 아니라 복원이후의 복원방향이나 변화상태를 비교하여 복원시행의

결과의 방향을 판단하여 복원결과를 평가하는 것이다.

허베이 스피리트호 유출사고와 같은 대규모의 유류유출로 인한 연안생태계의 복원 평가는 속성분석과 추세분석 등 장단기의 모니터링 결과를 활용할 수 있으며 또한 적응관리를 적용할 수 있는 분석 방법들을 적절히 활용해야 할 것이다. 하지만 이에 앞서 분명한 장단기 복원목표와 복원목표 달성을 평가할 대조생태계(reference ecosystem)의 확보 및 평가 기준의 마련이 우선되어야 한다. 평가할 속성들의 선정과 모니터링 기간 등 세부 사항에 전문가 그룹과 주민들의 참여 또한 필요할 것이다.

점토의 함량이 높은 펄갯벌은 유출된 유류가 갯벌 하층부로 침투하기가 어려워므로 갯벌전체가 오염되지는 않으나, 일단 생물서식 구멍 등의 틈새 등으로 유입된 유류는 손쉽게 하층부로 이동하게 된다. 일반적으로 유류는 혐기성 상태에서 분해속도가 매우 느리고, 또한 투수성이 매우 낮은 갯벌의 특성상 물리적 기작으로 유류를 다시 밖으로 나오게 하는 것도 어렵다. 따라서 물리적인 압력을 최소로 하며 자연적인 분해기작을 가능한 촉진할 수 있는 방법의 도입이 필요하다. 이 방법 가운데 하나가 자연공기유입 장치판의 설치이다. 이는 국부적인 유류오염지역에 자연적으로 공기가 유입될 수 있게 하는 것이다. 이 방법은 미생물을 이용한 생물학적 분해에 가장 큰 제한 요소가 될 수 있는 산소를 공급함으로써 미생물 분해를 촉진시키고, 아울러 기체상으로의 이동을 용이하게 하여 갯벌에 침투한 유류를 제거할 수 있다. 이와 함께 미생물이나 영양물질 주입 등 생물학적 처리와 병행하여 사용할 수 있다.

참고문헌

- 강원대학교, 한국법제연구원, 허베이 스피리트호 기름유출사고의 법적 대응방안과 향후 과제, 공동학술회의 자료집, 2008
- 국토해양부, 국가해양환경정책 공유 및 개선 워크샵, 2008
- 목진용 외1, 유류오염사고 대비 해안방제체제 구축방안, 한국해양수산개발원, 2001
- 성기준, 유류오염 생태복원기술 현황과 발전방향, 태안 해양오염실태분석 및 대책토론회, 지역환경기술개발센터연합회, 2008
- 성기준 외1, 유류오염지역의 생태복원, 대한환경공학회지, 2008
- 수산업협동조합중앙회, 유류오염 피해조사지침, 1995
- 수산업협동조합중앙회, 허베이 스피리트호 유류유출 사고로 인한 어업피해구제 및 해양환경오염 대책토론회, 2008
- 이석모, 주민참여형 복원사업 추진방안, 태안 해양오염실태분석 및 대책토론회, 지역환경기술개발센터연합회, 2008
- 이종화, 해양오염, 신광문화사, 1998
- 충남대학교 해양연구소, 검은 좌절을 딛고 일어난 푸른 태안, 심포지움 자료집, 2008
- 충남발전연구원, 허베이 스피리트호 유류유출사고 피해대책 및 지역 미래발전전략 모색, 2007
- 한국해양환경공학회, 해양환경공학, 동화기술(2008).
- 한국환경정책평가연구원, 서해유류유출사고의 중장기적 대응 방안 마련을 위한 전문가 워크샵, 2008
- 해양경찰청, 허베이 스피리트호 오염사고 해안·도서 오염방제 종합계획, 2008
- 해양수산부, 보령시 무인도서 실태조사 및 관리유형 지정방안 연구, 2007
- 해양수산부, 유류오염 해안 정화 및 평가지침서, 2008
- 해양수산부, 유류오염 환경재해 평가기술개발, 2006
- 홍재상, 한국의 갯벌, 대원사, 1998
- 환경부, 국립환경과학원, 2006 전국 무인도서 자연환경조사-태안, 2006
- 환경부, 국립환경과학원, 2007 전국 무인도서 자연환경조사-보령, 2007
- 환경부, 해상유출사고 방제지원시스템 개발 및 상용화기술개발, 2001
- 희망제작소, 허베이 스피리트호 기름유출사고 피해지역 주민의 복지욕구, 2008
- 田崎和江, 早川和一, ナホトカ号重油流出事故から10年 私たちは何を學だか?, 金澤大學, 2006

- Carls, M. G., Babcock, M. M., Harris, P. M., Irvine, G. V., Cusick, J. A., Rice, S. D.,
 “Persistence of Oiling in Mussel Beds after the Exxon Valdez Oil Spill,” *Marine Environmental Research*, 51, 167-190, 2001
- Chaerun, S. K., Kazue, T., “Biodegradation of Heavy Oil from the Nakhodka Oil Spill by
 Indigenous Microbial Consortia,” *International Journal of Applied Environmental Sciences*,
 2(1), 19-30, 2007
- Environment Canada, Guidelines for Selecting Shoreline Treatment Endpoints for Oil Spill
 Response, 2007
- Kazue, T., Watanabe H., Chaerun, S. K., “Hydrocarbon Degrading Bacteria and Paraffin from
 Polluted Seashores 9 Years after the Nakhodka Oil Spill in the Sea of Japan,” *Journal of the
 Geological Society of China*, 80(3), 432-440, 2006
- MOMAF, Shoreline Assessment Technique, 2008
- National Geographic, Alaska's Big Spill, 1990
- National Geographic, After the Storm, 1991
- National Geographic, Black Day for Brittany, 1978
- National Geographic, In the Wake of the Spill, 1999
- National Geographic, Tragedy in Alaska Waters, 1989
- National Oceanic & Atmospheric Administration, “How to Clean a Beach,” *Nature*, 422(3),
 464-466, 2003
- National Oceanic & Atmospheric Administration, Shoreline Countermeasures Manual, 1992
- Sergy, G. A., Owens, E. H., Guidelines for Selecting Shoreline Treatment Endpoints for Oil
 Spill Response, Environment Canada, 2007
- Short, J. W., Lindeberg, M. R., Harris, P. M., Maselko, J. M., Pella J. J., Rice, S. D., “Estimate
 of Oil Persisting on the Beaches of Prince William Sound 12 years after Exxon Valdez Oil
 Spill,” *Environ. Sci. Techno.*, 38, 19-25, 2004
- Short, J. W., Irvine, G. A., Mann, D. H., Maselko J. M., Pella, J. J., Payne, J. R., Driskell,
 W. B., Rice, S. D., “ Slightly Weathered Exxon Valdez Oil Persists in Gulf of Alaska
 Beach Sediments after 16 Years,” *Environ. Sci. Techno.*, 41, 1245-1250, 2007
- Society for the Ecological Restoration, The SER International Primer on Ecological Restoration,
 2004
- Spies, R. B., Long-term Ecological Change in the Northern Gulf of Alaska, Elsevier, 2007

Uehiro, T., Characteristics of Environmental Specimen Bank in the National Institute for
Environmental Studies Japan, 2007

William J. Mitch and S. E. Jorgensen, Ecological Engineering and Ecosystem Restoration, John
Wiley & Sons, Inc, 2003

ABSTRACT

A Study on the Pollution Survey of Oil Spill and the Methods of Ecological Restoration

– In the Case of the *Hebei Spirit* Oil Spill Accident –

No single incident did more to raise Korean consciousness than the Hebei Spirit disaster, which just disgorged no less than 12,547 kL of crude oil into the clean sea waters of Taean Peninsula Area. The images of dead birds and finless porpoise and wide range of tar-smeared beaches graphically illustrated mankind's capacity to foul its environment. Coming in the wake of 1995, with its devastating stranding of the Sea Prince accident in the Southern islands, the Hebei spill convinced all but the most skeptical observers that humanity was courting ecological disaster.

Taean is famous for fish farms raising oysters, shellfish and abalones as well as it is one of Asia's sensitive wetland, which is ecologically important as migratory birds there during winter. Even the stretchy of West Coast is severely stricken by oil spill accident, Taean has been overcoming so far by applying a participation model created by regional stakeholders. By doing participation of volunteers unprecedented 1.3 million cleanup has endowed holy image with winning the plight all over the world.

Though these polluted areas have been damaged severely in their images as well as intangible values for their products, of course, we should look

at outmoded models as references, but we can not duplicate them as a whole due to progress. However, in order for us to compete on the global stage restoration, we are responsible for developing our own strategies. The goal is to become one of the top advanced regions. Basic ideologies should emphasize a collaboration model for ecological restoration and even to economic one.

After oil spill, during the site survey by SCAT(Shoreline Cleanup Assessment Technique) team and the assessment of along the cleanup, we analyzed the characteristics of debris flowed into seashore including the remnants of oil residue as well as dispersed by emulsifiers as the state of chocolate mousse. As a result, the concentration of heavy metals in the lingered oil and smeared tar lump has been decreased rapidly as time goes by.

Shoreline cleanup endpoints are specific criteria assigned to a segment or unit of oiled shoreline that stipulate when sufficient treatment effort has been completed for that segment or unit. The endpoints are a standard against which treatment activities can be evaluated. Establishing treatment endpoints for an oil spill response is an important and integral part of the management decision-making process, operational response, and determination of treatment completion.

Implementation of ecological restoration will be applied by the promulgated legal ground. A Special Act on the Restoration of Maritime Ecosystem and the Support for the Damaged Local Communities was enacted in 2008, and a working group has been assembled to undertake systematic restoration. In accordance with the Maritime Environmental Management Act(Article 77), it will be used as basic material to

designate maritime environmental restoration areas and establish a restoration plan until the midterm of 2009.

Therefore, the promotion of long-term restoration of ecosystem should be allowed to adaptive management in the scope of time needed. For that to happen, there are three things to do.

First, direct comparison of the performance of restoration and it will be used for the improvement of objective area and reference one.

Second, attribute analysis which is to define the reference ecosystem will be required the planned monitoring and relevant materials.

Third, trajectory analysis which is to describe the trends of short and long term monitoring consequences will be applied for the evaluation of the performance of restoration.

Lastly, inducement of achieving the endogenous development strategy toward the regional Renaissance can also be functioned essentially for green growth of region.

The coast and islands of this oil stricken area are also subject to some development, such as the building of pension houses and other recreational facilities. The national and provincial plans for the designation of specific restoration of marine ecosystem in this area will be presented into an integrated coastal zone management, under all circumstances.

〈부록 1〉

유류오염 환경피해 산정 조사방법

서언

국제기금협약에서는 환경피해의 보상에 있어서 화폐단위로 수량화 시킬 수 있는 경제적 손해에 대해서만 인정하기 때문에 어업 피해가 발생했다면 이를 정량화하여 화폐단위로 수량화하여야 함. 독자적인 피해보상을 하는 미국에서는 환경피해의 추정에 있어서 자연자원 피해추정 모델을 사용한 정량화를 인정하고 있으나, 국제기금에서는 아직까지 이론적인 모델을 이용하여 추상적으로 수량화하여 계산하는 방식을 인정치 않고 있음.

국제유류오염배상기금의 손해배상매뉴얼(IOPC Fund Claims Manual)

민사책임협약(1992), 기금협약(1992) 가입.

유류오염손해배상보장법 제정으로 손해배상의 법적 근거 마련, 피해액 산출기준이 없음.

손해액 산출은 IOPC에 근거하여 추진.

환경손상에 대한 배상은 실제로 취하였거나 취하여야 할 원상회복을 위한 합리적인 조치에 대한 비용에 한함으로 규정. 오염손해의 예방조치 비용에 대해서는 사고가 발생한 후에 오염손해를 방지하거나 또는 최소한으로 줄이기 위해 어떠한 사람에 의해 취해진 모든 합리적인 조치로 규정하여 배상기준을 제한하고 있음.

배상대상 오염손해의 주요 내용

- ① 방제 및 예방조치 : 어떤 장소에서 조치를 취하든 협약체결 국가내의 오염손해를 방지하거나 최소화하기 위해 취해진 합리적인 방제조치 비용.
- ② 재산피해 : 유류에 의해 오염된 재산을 세척하거나 수리 또는 대체하는데 소요되는 합리적인 비용.
- ③ 간접손실 : 유류유출에 의해 오염된 재산의 소유자가 상실한 수입소득 손실분. 도구의 손실로 대체도구를 확보하지 못해 상실된 소득이 해당됨.
- ④ 순수경제적 손실 : 피해자의 소유재산 자체가 오염되지 않았으나 유류오염의 원인에 의한 손실. 해안지역 관광숙박업소의 오염기간 동안 수입감소 시 유류사고의

부정적인 경제적인 영향을 예방하고 줄이기 위한 마케팅의 합리적인 비용.

- ⑤ 환경피해 : 환경피해의 자연복원을 촉진시키는데 목적을 둔 합리적인 복구조치 및 연구비용
- ⑥ 법률자문고용 : 배상을 위한 소송청구 시 청구인의 조언자, 자문자, 상담자를 고용할 경우 협약의 범위 내에서 조언자에 의해 수행된 업무의 합리적인 비용

환경피해로 인한 소득감소를 화폐단위로 수량화하려면 우선 사고 이전에 그 지역에 서식하고 있는 생물량 및 생산량에 관한 자료가 필요함. 그러나 선진외국과는 달리 우리나라의 경우 이러한 기초자료가 태부족인 상태이므로 기존자료를 조사하여 사용하기가 매우 어려움. 향후 국가적 지원에 의해 전국적인 수산 자원조사가 선행되지 않는다면 이러한 문제점을 극복하기 어려우므로 현재 허베이 스피리트호 사고처럼 대형사고가 발생한 경우 사고 즉시 해당 지역의 자원조사를 실시하는 것이 최선의 방법임. 유류오염 영향이 있기 전의 자원량과 사고 직후의 자원량을 조사함으로써 차후 피해복원 경향의 비교자료로 이용할 수 있을 것임.

환경피해의 조사나 원상복구를 위한 조치에 관한 연구를 실시함에 있어서 국제기금에서는 연구를 수행할 전문가를 선정하고 전문가가 수행할 과업을 결정하는 데 있어서 국제기금이 초기 단계부터 관여할 수 있어야 한다는 조건이 있으므로 연구가 시행되기 이전에 국제기금 측과 긴밀한 연락을 통해 연구범위나 내용을 사전 정리하여야 함.

환경피해의 원상복구 방법에 관한 조사연구

국제기금은 오염사고 후 해양환경을 원상으로 회복시키는데 취한 조치에 소요된 비용을 조건에 따라 배상하고 있음. 배상 대상이 되기 위해서는 이러한 조치비용이 합리적이며, 이러한 조치가 기대하는 결과와 비례적이어야 하며, 이러한 조치가 적절하게 성공할 합리적인 전망이 있어야 함. 예를 들어 오염된 지역의 퇴적물을 중장비를 이용하여 제거하고 처리한다면 이러한 조치가 적절하며 효과가 기대되는 경우에만 배상할 수 있음. 환경피해의 원상복구에 있어서 야생동물의 구조 및 치료와 같은 행위도 포함될 수 있으며 배상의 대상임.

따라서 어떠한 조치가 적절한지 혹은 해양환경을 원상으로 회복시키는데 도움을 줄 수 있는지를 사전에 합리적으로 조사할 필요가 있음. 이러한 조사에 있어서도 기금

측과 연구를 수행할 전문가의 선정, 과업의 선정 등을 사전에 협의하여야 함.

환경피해 입증 조사

유류오염과 환경피해 사이에 어떤 인과관계가 있다는 것을 입증하려면

피해자와 오염지역과의 거리, 지리적 근접성,
피해자가 영향을 받은 자연자원에 경제적으로 의존하고 있는 정도,
피해자가 대체할 수 있는 자원, 사업기회 획득 정도,
손실을 경감할 수 있는 정도,
손실 예상가능성,
피해자의 손실을 초래한 기타 원인과 영향 정도

유류오염으로 인한 손실 증명

油指紋法(oil fingerprint)을 이용한 유출물질 확인 등

생산물의 오염여부 입증 조사방법

- ① 육안검사 : 기름유출에 의한 직접접촉폐사, 손실 발생 증명
- ② 관능검사 : 맛과 냄새를 통한 검사, 오염유발물질 동정은 가능하나 정량분석은 미정립 상태
- ③ 분석검사 : 생산물 체내의 원인물질을 정량, 정성분석하기 위한 검사
생물시료분석방법으로 GC, GC-MS 기기분석
분석 신뢰도 제고방법으로 표준시료(SRM)를 이용한 자료의 품질관리 (QA/QC) 시행

오염지속/회복정도 조사방법

- ① 육안검사 : 조사빈도는 생산물종류와 생체량 감소를 측정할 수 있도록 주기설정, 대조군시료도 같은 조사방법으로 조사
- ② 관능검사 : 주관적, 개인차 존재로 정량적 입증은 한계
- ③ 분석검사 : 오염물질의 수중농도는 자정작용으로 크게 감소하게 됨. 오염의 지속성은 해수보다 해저퇴적물, 해변퇴적물 분석에 중점을 둠
오염물질의 대사산물 농축부위 기기분석

유류오염과 피해간의 인과관계 조사방법

- ① 독성실험
- ② 성장속도 측정
- ③ 幼生 생존률 측정
- ④ 산란 측정
- ⑤ 생체효소 유도 측정

〈부록 2〉

어패류의 탈독성화 효소지표

탈독성화 효소지표 EROD는 Ethoxyresorufin-O-deethylase을 의미한다. 일반적으로 다환방향족탄화수소(PAHs)가 동물(보통 고등동물)체내에 들어가면 간에서 외인성 물질을 분해하기 위하여 Mixed Function Oxygenase(MFO) 시스템이 활성화된다. MFO 중에서 초기에 疏水性의 방향족화합물을 분해할 수 있도록 수용성으로 만드는 작업의 하나가 탄소고리에 연결된 -C-H의 수소이온을 -OH基로 치환하는 水酸化(hydroxylation) 과정이다. 이 과정에는 MFO 중에서 세포내에 존재하는 산화환원 효소로 세포호흡에 중요한 역할을 하는 Cytochrome P450계가 중요한 역할을 한다. 따라서 PAHs 등의 물질에 생물이 노출되었는지를 간접적으로 확인하는 방법으로

- 1) Cytochrome P450의 유전자 발현(CYP1A1 gene),
- 2) CYP1A1 mRNA,
- 3) CYP1A1 protein,
- 4) EROD 활성을 재는 것이다.

PAHs가 체내에 들어가면 방향족화합물과 결합하는 아릴계탄화수소(arylhydrocarbon) 수용체에 결합되어 핵 안으로 들어가 DNA를 활성화 시키게 되고 이는 mRNA를 코딩된 대로 단백질을 만들고 단백질은 결국 효소로 만들어져서 반응한다. 그런데 각 반응의 감도와 반응시간이 달라지기 때문에 유전자, 단백질, 효소 수준에서 다 측정을 하는 것이다. 즉, 문치가자미와 조피볼락의 간에서 켜 CYP mRNA, CYP protein, EROD는 PAHs에 노출되었을 때 유도되어 높은 값을 보인다. 다시 말해 해당 값이 높은 생물은 PAHs에 노출되었다는 증거가 되는데 이런 것들을 生體指標(biomarker)라고 부른다.

건강검진 시 간의 건강성을 평가하기 위해 GOT(Glutamic Oxaloacetic Transaminase), GPT(Glutamic Pyruvic Transaminase)를 켜다. 이는 간세포 효소로, 체내 혈중농도는 간염의 지표가 되므로 이 값을 측정하여 간접적으로 건강 상태를 평가하는 것과 유사한 방법이다.

〈부록 3〉

해안선유류정화평가 조사결과 사례

Dream
SHORELINE OILING SUMMARY (SOS) FORM

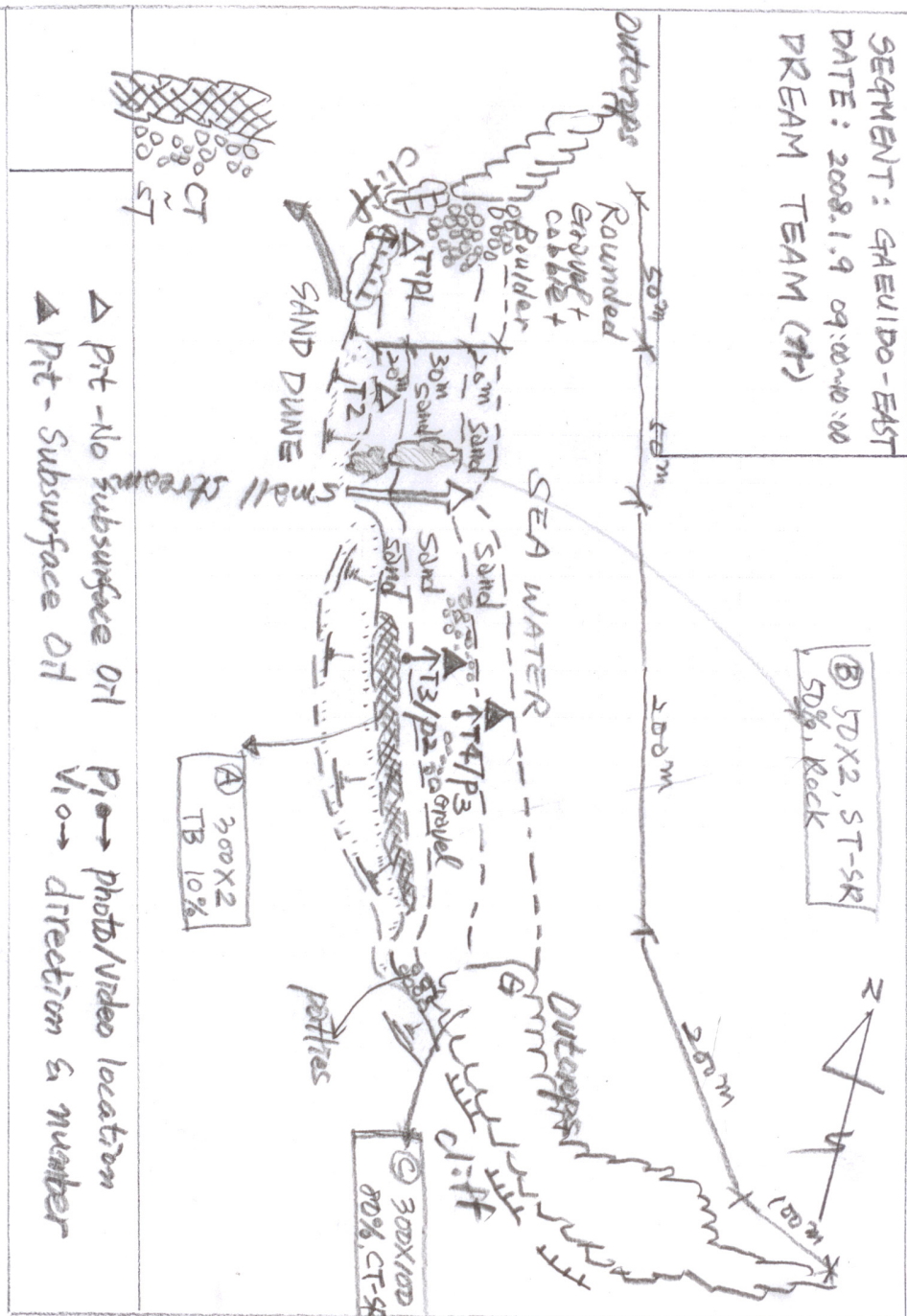
제목(Title): 유조선 '허비스피릿 호' 유류사고(M/T. HEBEI SPIRIT, Oil Spill Incident) Page ____ of ____

1. 일반정보 (GENERAL INFORMATION)		Date (dd/mm/yy): 09/08/08	Time (24h): AM 9:00 ~ 10:00	수위 (Tide Height): LT 10:24 50cm HT 16:49 629cm
조사장소 (Segment) ID: 가-		작업구분 (Operations Division): 가인도 동쪽	hrs to	hrs
조사방법 (Survey) by: 드론 / 오토바이 / 선박 / 헬기 / Boat / Helicopter / Overlook /			기온 (Air Temp): 6 deg C	
2. 조사팀 (SURVEY TEAM)		D		
성명 (name)	소속 (organization)		연락처 (contact phone number)	
Andre	SCAT			
정종관	CDI			
임만빈	HD. ENG			
이금선	KFEM			
도승정	KFEM			
3. 해안정보 (SEGMENT)				
총길이 (Total Segment Length): 4.4 m		조사길이 (Segment Length Surveyed): 1.2 m, 조간대폭 (Max. Intertidal Width): 1.0 m		
시점좌표 (Start GPS):	위도 (LATITUDE): 36° 41' 4.6" N	경도 (LONGITUDE): 126° 5' 3.1" E		
종점좌표 (End GPS):	위도 (LATITUDE):	경도 (LONGITUDE):		
4A. 해안형태 (SHORELINE TYPE) 해수욕장의 저지대에서 주를 이루는 형태에 (P)를 표시, 부수적인 형태에 (S)로 표기. select only one primary (P) oiled shoreline type and any number of secondary (S) types				
기암암형 (BEDROCK): 사면경 (Cliff) 중간경 (Ramp) 평탄경 (Platform)	배사지질층 (Sediment BEACH): 모래 (Sand) 혼합 (Mixed) 자갈 (Pebble/Cobble) 바위 (Boulder)			
인공구조물 (MAN-MADE): 붕투과성 (Solid) 투과성 (Permeable) 종류 (Type)	조간대지질층 (Sediment FLAT): 땀 (Mud) 모래 (Sand) 혼합조성 (Mixed) 잔자갈 (Pebble)/굵은자갈 (Cobble) 바위 (Boulder)			
눈/결빙시 겨울용 SOS 사용 (If snow and ice use Winter SOS)	습지 (MARSH):		기타 (OTHER):	
4B. 해안특성 (COASTAL CHARACTER) 해안해수욕장에서 주를 이루는 형태에 (P)를 표시, 부수적인 형태에 (S)로 표기. backshore character — select only one primary (P) and any number of secondary (S) types				
사면면적 (CLIFF or HILL): 개략높이 (Est. Height) 20 m	배사장 (Beach) P	하구사주 (Delta)	신호 (Lagoon)	
경사 (slope): 평탄 (flat) (<5°) 중간 (medium) 기파 (steep) (>30°) O	장벽형배사장 (Barrier beach)	사구 (Dune) S	습지 (Marsh/Wetland)	기타 (Other)
5. 작업환경 (OPERATIONAL FEATURES)		쓰레기/잔재유류 (debris) 있을 경우 유류오염여부 (oiled?) Y (N) Y (N)		
배후지에서의 접근가능성 (direct backshore access) Y (N)	배후지 작업공간 지정성 (suitable backshore staging) Y (N)	쓰레기가 산재해 있을 경우 (debris amount): 50 봉투 (bags) 또는 (OR) 몇 트럭 (trucks)		
인접 해안가간 접근/연결 가능성 (alongshore access from next segment) Y (N)	접근장애요인 (access restrictions)	주요 접근통로 (current dominated channel)		

Environment Canada Standard SOS - Sergy, Feb 13, 2006

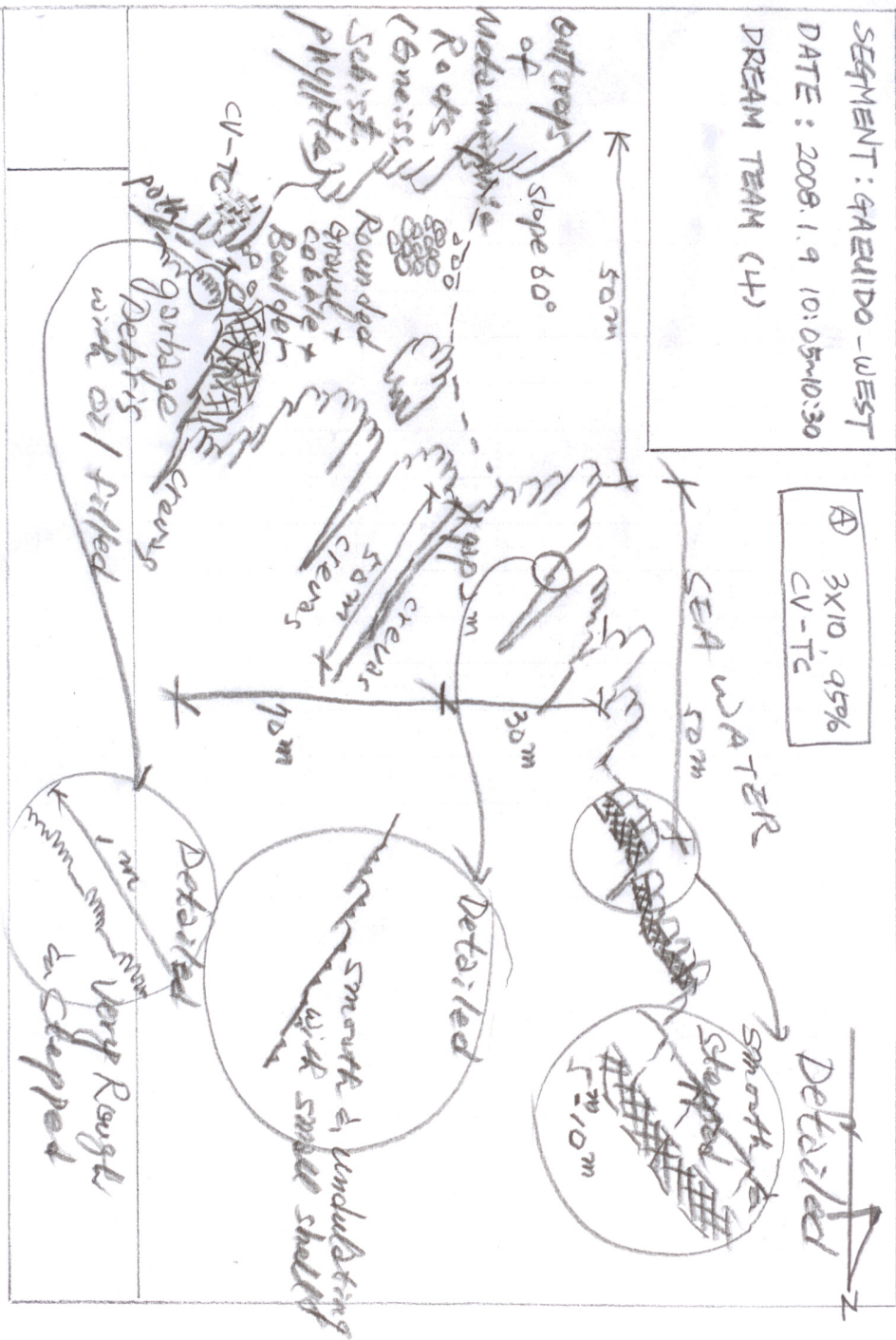
124

SEGMENT: GAUEILDO-EAST
 DATE: 2008.1.9 09:00-10:00
 DREAM TEAM (PT)

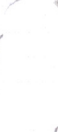


SEGMENT: GAQUIDO - WEST
 DATE: 2008.1.9 10:05~10:30
 DREAM TEAM (4)

① 3X10, 95%
 CV-TC



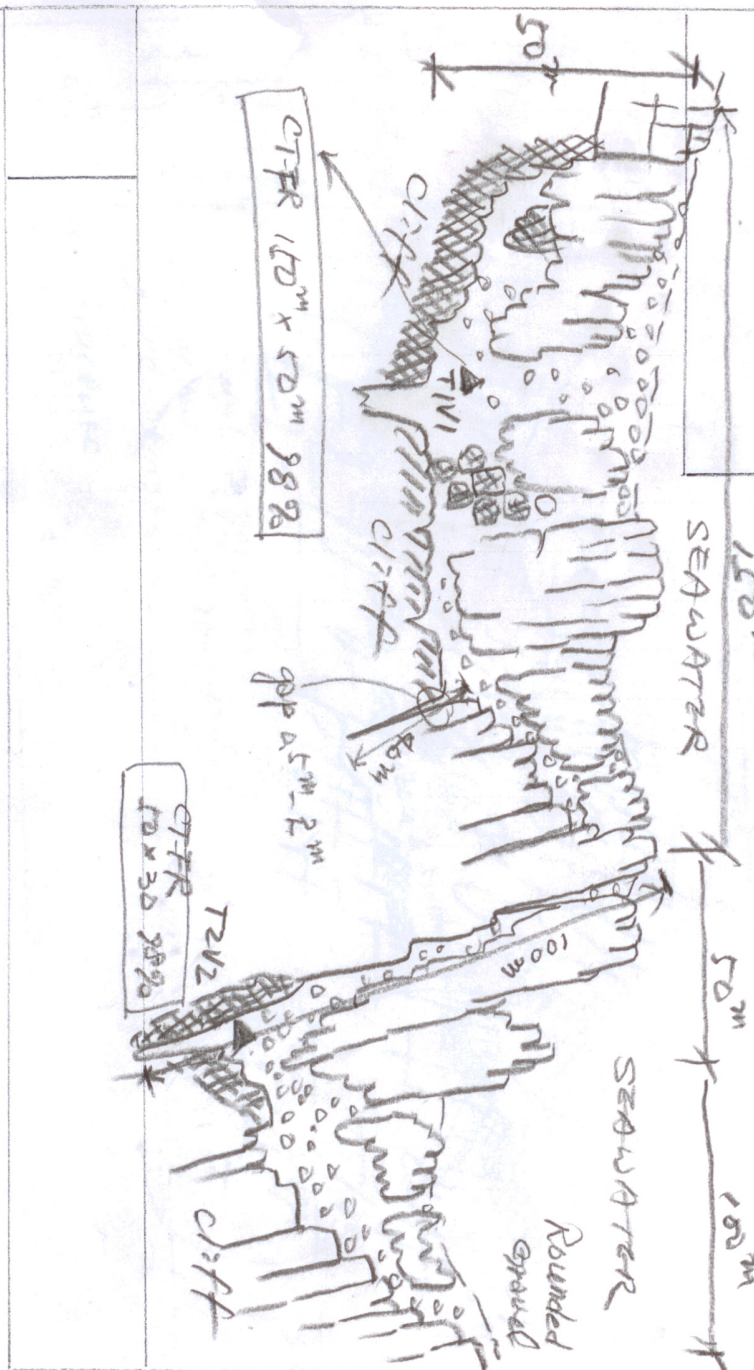
71/1



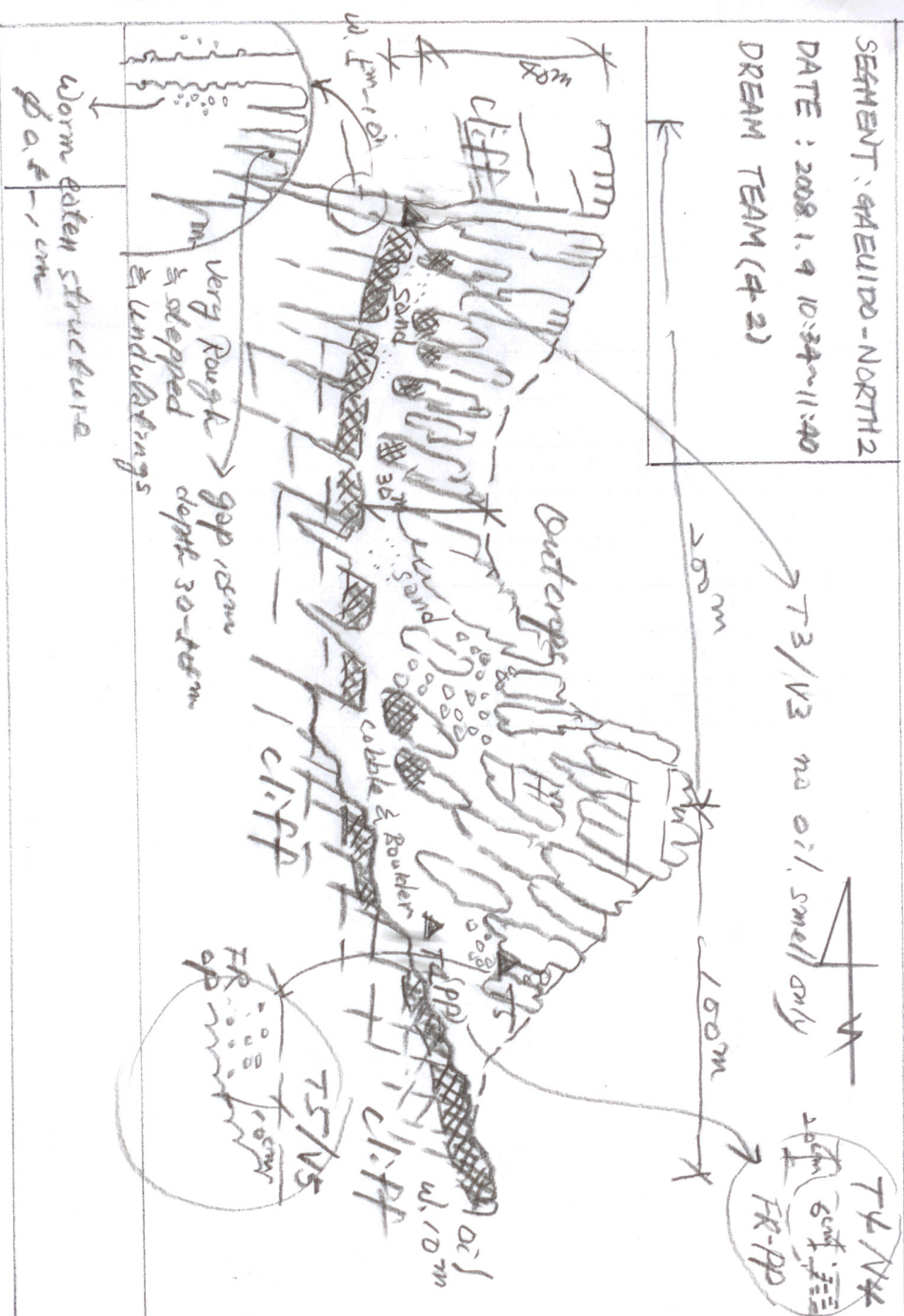
100 ft

35 ft

PP & OP



DATE : 2008.1.9 10:34~11:40
DREAM TEAM (4.2)



■ 집 필 자 ■

연구책임 · 정종관 충남발전연구원 환경생태연구부 연구위원
공동연구 · 김종렬 한국석유품질관리원 책임연구원
성기준 부경대학교 생태공학과 교수
황경엽 한국과학기술연구원 책임연구원

기본연구 2008-17 · 유류오염 실태조사 및 환경생태 복원방안 연구

글쓴이 · 정종관, 김종렬, 성기준, 황경엽 / 발행자 · 김용웅 / 발행처 · 충남발전연구원
인쇄 · 2008년 12월 31일 / 발행 · 2008년 12월 31일
주소 · 충청남도 공주시 금홍동 101 (314-140)
전화 · 041-840-1200(직통) 041-840-1114(대표) / 팩스 · 041-840-1219
ISBN · 978-89-6124-058-1 93500

<http://www.cdi.re.kr>

©2008. 충남발전연구원

- 이 책에 실린 내용은 출처를 명기하면 자유로이 인용할 수 있습니다.
무단전재하거나 복사, 유통시키면 법에 저촉됩니다.
- 이 연구는 본 연구원의 공식 견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.