



서론

유류유출은 물리적 질식과 독성영향의 결과로 해양환경에 심각한 손상을 입힐 수 있다. 손상의 정도는 일반적으로 유출유의 양과 종류, 주위 조건, 그리고 유류의 영향을 받은 생물과 그들의 서식지의 민감도에 따라 다르다.

이 문서는 선박 기인 유류 오염과 방제작업의 결과가 해양 동식물과 그들의 서식지에 미치는 영향에 대해 설명한다. 특히 오랫동안 다양한 연구의 주제가 되어왔던 유류와 생태계 사이의 복잡한 상호작용에 관해 논의한다. 유류유출이 어업과 양식업, 광범위한 인간 활동에 미치는 구체적인 영향은 별도의 ITOPF 기술서에서 다룬다.

개요

유류유출은 해양 환경에 다양한 영향을 줄 수 있고, 종종 방송매체를 통해 해양 동식물상의 생존에 끔찍한 결과를 가져오는 환경 재해로 그려진다. 대형 사고는 오염된 해안가에 사는 사람들의 생계와 삶의 질에 악영향을 미치고 생태계에 심각한 고통을 주면서 단기간에 환경에 심각한 영향을 미칠 수 있다(그림 1). 유출 사고 후에 기름범벅이 된 조류의 사진은 해양 자원의 피할 수 없는 손실과 함께 광범위하고 영구적인 환경 손상을 더 잘 인식하게 해준다. 대개 유류유출 후에 대형 보상 청구와 감정적인 반응이 뒤따른다는 것을 고려하면, 실제 유출 영향과 후속 조치에 관한 균형 잡힌 관점을 갖기 어려울 수 있다.

유출의 영향은 수십 년 간 연구되어 왔고, 많은 관련 과학기술 문헌들이 있다. 결과적으로, 특정 사고의 손상 규모와 기간에 대한 광범위한 지표들을 참조하여 유류 오염의 영향에 대해 충분히 이해하고 있다. 일반적인 유류유출의 영향에 대한 과학적 평가 결과, 유출로 인해 손상이 발생하고 개별 생물 수준에서 손상 정도가 심각할 수는 있지만, 개체군들은 높은 회복력을 가진다고 나타났다. 시간이 지나면, 자연적 회복 과정은 손상을 복구하고 생태계가 정상적으로 기능하도록 되돌릴 수 있다. 적절히 실시된 방제작업을 통한 유류의 제거는 회복 과정을 도울 수 있고, 주의 깊게 관리되는 복구 조치로 회복 과정을 촉진시킬 수도 있다. 몇몇 경우에서 장기간 손상이 보고되었지만, 대부분의 경우, 심지어 가장 큰 유류 유출 후에도, 영향을 받은 서식지와 해양 생물들은 몇 분기가 지나면 폭넓게 회복될 것으로 예상할 수 있다.

유류유출 손상 메커니즘

유류는 다음 메커니즘 중 한 가지 이상에 의해 환경에 영향을 줄 수 있다.

- 생리적 기능에 영향을 미치는 물리적 질식
- 치사 또는 아치사 효과를 일으키거나, 세포 기능의 장애를



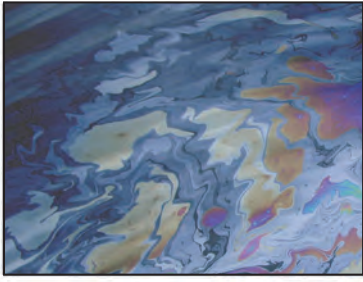
▲ 그림 1: 어촌에 인접한 해안가에 부착된 유류

유발하는 화학적 독성

- 주로 군집에서의 핵심 생물 소실과 기회종의 서식지 잠식과 같은 생태적 변화
- 서식지나 은신처 상실, 생태적으로 중요한 종의 최종사멸과 같은 간접적인 영향

유류유출 영향의 특성과 기간은 유출유의 종류와 양, 해양환경에서의 유출유의 거동, 주위 조건과 물리적 특징의 측면에서 유출의 위치, 그리고 특히 계절과 일기 개황과 관련된 타이밍과 같은 다양한 요인에 의해 결정된다. 다른 주요 요인에는 영향을 받은 환경의 생물학적 구성, 구성 종의 생태적 중요성과 그들의 유류 오염에 대한 민감성이 있다. 적절한 정화 기술의 선택과 정화 작업 실시 후 효과 또한 유출의 영향과 상당히 깊이 관련될 수 있다.

유출의 잠재적 영향은 오염 물질이 자연적 과정에 의해 희석되거나 소멸되는 속도와도 관련이 있다. 이것은 피해 지역의 지리적 범위와 중요한 환경 자원이 상당한 시간 동안 고농도의 기름 또는 독성 요소에 노출될지를 결정한다. 또한, 생물이 유류 오염에 취약하거나 민감한 정도도 중요한 요소이다. 취약한 생물은 일반적으로 해양 환경에서 해수면이나 물가에 자리 잡고 있어서 유류와



▲ 그림 2: 해양 생물에 미치는 일반적인 영향은 독성(특히 경질유와 석유제품)에서 질식(중유, 중질유 및 풍화된 기름)에 이르기까지 다양하다.

접촉할 가능성이 더 큰 생물이다. 민감한 생물은 유류나 유류를 구성하는 화학물질에 노출되어 극심한 손상을 입을 수 있는 생물이다. 덜 민감한 생물은 단기간의 노출은 견딜 가능성이 높다. 많은 나라에서 해안선과 다양한 서식지를 민감지도상에 표시해왔다. 예를 들면, 합성지도(resultant map)와 민감지도는 맹그로브 숲이나 염습지에 가장 높은 환경민감지수를 부여하는 한편, 모래해변은 일반적으로 환경민감지수가 낮다.

유출유의 특성은 모든 손상의 정도를 결정하는 중요한 요소이다(그림 2). 중질유(HFO) 같은 지속성이 매우 큰 유류의 대량 유출은 해안가 조간대를 덮어 질식을 통한 광범위한 손상을 입힐 가능성이 있다. 그러나 유류의 화학적 조성은 생물학적 이용도가 낮기 때문에, 중질유(HFO)나 다른 용해도가 낮고 점도가 높은 유류에는 독성 효과가 낮다. 아스팔트 포장(많이 풍화된 유류와 자갈이 섞여서 굳은 복합체)에 섞여 들어간 유류는 서식지 변형으로 인한 간접적인 손상을 발생시키지만, 유류가 해안에 머무는 시간과 관계 없이 생물학적 이용도는 낮다.

이와 달리, 등유와 기타 경질유의 화학적 조성은 생물학적 이용도가 보다 높고, 독성을 통한 손상 가능성이 더 크다. 그러나 경질유는 증발과 확산을 통해 빠르게 소멸되므로 민감자원이 유출 위치에서 충분한 거리에 있는 한 전반적으로 손상을 덜 준다. 반면에, 오염된 물의 순환이 적은 얇은 석호와 같이 진흙 퇴적물이나 폐쇄된 지역에 오염 물질이 갇힐 때처럼, 희석이 느리게 진행되는 상황에서 영향은 더 크고 더 오래 지속될 것으로 예상할 수 있다. 폐사를 유발하는 수준보다 낮은 노출 수준에서, 독성 성분의 존재는 섭식 장애나 생식 장애와 같은 아치사 효과로 이어질 수 있다.

해양 환경은 매우 복잡하며, 시공간에 따른 종의 구성양과 분포의 자연적 변동은 해양 환경의 정상적인 기능에 있어서 근본적인 특성이다. 이러한 환경 속에서 해양 동식물들은 그들의 서식지 변화에 대처하는 다양한 자연적 회복 수준을 가지고 있다. 환경 스트레스에 대한 생물의 자연적 적응은 그들의 번식 전략과 함께 주위 조건에서 일별, 계절별 변동에 대처하는 중요한 메커니즘을 제공한다. 이러한 내재된

회복력은 일부 식물과 동물들이 유류에 의한 특정 수준의 오염을 견딜 수 있다는 것을 의미한다. 그럼에도 불구하고, 유류유출이 해양 서식지에 영향을 미치는 유일한 인류 기인 압력은 아니다. 천연자원의 광범위한 과잉 개발과 만성적인 도시 및 산업 오염 또한 해양 생태계의 변화 정도에 상당한 영향을 준다. 높은 자연적 가변성의 배경과 비교하여, 유류유출에 의한 번식 성공률, 생산성 또는 생물다양성의 저하와 같은 미묘한 손상을 감지하기 어려울 수 있다

해양 환경의 회복

해양 환경이 극심한 혼란으로부터 회복할 수 있는 능력은 해양 환경의 복잡성과 회복력의 작용이다. 허리케인과 쓰나미와 같은 매우 파괴적인 자연 현상으로부터의 회복은 대규모 폐사와 함께 극심한 혼란 후에도 생태계가 시간이 지남에 따라 어떻게 회복될 수 있는지를 보여준다. 회복의 정의와 생태계가 회복되었다고 말할 수 있는 시점에 대해 상당한 논쟁이 있지만, 생태계의 자연적 다양성이 유출 전과 똑같은 상태로 되돌아가기 어렵다는 것은 널리 수용되고 있다. 대신에 회복에 대한 대부분의 정의는 서식지의 특징적인 동물상과 식물상 군집의 재착생과, 생물다양성 및 생산성 측면의 정상인 기능에 초점을 둔다.

이러한 원칙은 1967년 영국 해안에서 유조선 토리캐년(TORREY CANYON) 사고 발생 후 취해진 부적절한 방제작업의 경험으로 설명될 수 있다. 그 때 암반해안에 독성 세정제를 사용하여 심각한 손상을 가져왔다. 특정종의 분포가 바뀌고 혼란의 영향이 20년 넘게 지속되는 것으로 관찰되었지만, 생태계의 전반적인 기능과 생물다양성, 생산성은 1~2년 내에 회복되었다. 위에서 제안된 정의에 따라, 암반해안의 군집은 2년 안에 회복되었다고 말할 수 있었다. 그럼에도 불구하고, 이 정의의 한계는 구성 생물들의 연령 분포를 고려하지 않았다는 것이다. 사고 발생 전에는 유생부터 성체에 이르는 전 연령대의 생물이 분포했던 반면에, 새로 가입된 동물과 식물의 연령 범위가 좁아서 초기에는 군집이 안정적이지 못했다.

이와 마찬가지로, 유출의 영향이나 열대 폭풍우와 같은 자연 현상에 의해 맹그로브 숲이 손상되면 영향을 받은 지역은 인접한 지역에서 옮겨온 어린 식물들이 재착생하게 될 것이다. 그러나 이러한 대체 식물은 모두 비슷한 연령일 것이고, 나무가 다 자랄 때까지 똑같은 환경 서비스를 완전하게 보완해줄 수는 없을 것이다. 이러한 관찰을 통해 영향과 손상을 구분할 수 있다. 어떤 경우에, (생태계의 정상적인 기능의 측면에서) 덜 심각한 영향은 생태계가 오염 손상으로부터 회복된 후에도 여전히 감지될 수 있다.

회복 메커니즘은 포식관계의 압박과 다른 사멸 원인들을 다루기 위해 발전해왔다. 예를 들면, 해양 생물의 가장 중요한 번식 전략 중 하나는 넓은 범위에 산란하는 것으로, 많은 알과 유생이 플랑크톤에 노출되고 해류에 의해 널리 분포하게 된다. 대부분의 경우, 백만 개의 개체 중 일부만 살아남아 성체로 성장한다. 이러한 높은 생산력은 어린 단계에 있는 개체를 과잉 생산하게 되어, 새로운 지역을 점령하거나 유출의 영향을 받은 지역으로 영입되어 개체군에서 소실된 개체를 상당부분 대체할 수 있다. 반면에 수년동안 많은 수의 새끼를 생산할 수 없는 장수종은 충분히 성숙하지 못해서 오염사고의 영향에서 회복되는데 오랜시간이 걸릴 가능성이 크다.

대부분의 경우 몇 계절 주기 안에 회복이 이루어지고, 표 1에서 볼 수 있듯이 맹그로브와 같은 주목할만한 예외를 제외한 대부분의 서식지는 1-3년 내에 회복된다.

해양 환경

다음 절에서는 다양한 환경에서 선박기인 유류유출에 의해 발생한 다양한 손상 유형을 고려한다.

외해와 연안역

대부분의 유류는 해수면을 떠다니다가 파도, 바람, 해류에 의해 넓은 지역에 걸쳐 퍼져나간다. 일부 점성이 낮은 유류는 해수면 아래 몇 미터 내에서 자연적으로 분산될 것이고, 특히 파도가 치는 곳에서 빠르게 희석될 것이다. 시간이 지나도 유류유출이 지속될 경우, 유출 지점에서

서식지	회복 기간
플랑크톤	몇 주/몇 개월
모래 해변	1-2년
개방성 암반해안	1-3년
폐쇄성 암반해안	1-5년
염습지	3-5년
맹그로브	10년 이상

▲ 표 1: 유류 오염 후 다양한 서식지의 회복 기간. 기간은 유출유류의 종류와 양을 포함한 많은 요소에 따라 다르다. 여기서 회복은 서식지가 정상적으로 기능하는 시점으로 정의된다.

가까운 해수 상부층에 분산된 유류가 계속 축적될 수 있다. 침몰한 난파선으로부터의 중질유(HFO, 낮은 ° API)*의 유출 또는 유류 화재 후 남은 유성잔재물로 인한 수층하부의 유류유출에도 불구하고, 해수 하부층이나 해저에서는 유출유가 생물에 미치는 영향이 적다.

플랑크톤

원양 해역에는 박테리아, 동물(동물성 플랑크톤)과 식물(식물성 플랑크톤)을 포함한 무수히 많은 단순한 부유생물들이 서식한다. 이러한 부유생물에는 결국 해저나 해안가에 정착하는 알과 유생을 포함하여 어류와 무척추동물의 알과 유생이 포함된다. 플랑크톤은 주로 포식자에 의해, 또는 환경 조건의 변화와 지속적으로 살아남기 어려운 지역으로의 이동으로 인해 자연적인 폐사율이 높다. 반면에, 특히 온대 기후의 봄처럼 영양분의 공급이 풍부한 유리한 조건에서 플랑크톤은 개체군이 급속하게 증가한다. 일단 영양분의 투입이 감소하거나 영양분이 소비되면, 개체군은 집단 폐사하고 죽은 생물들은 생분해되어 해저로 가라앉는다. 이 생태계는 짧은 생산 시기 안에 풍부한 생산을 함으로써 이러한 극한에 대처하기 위해 진화해 왔다. 결과적으로, 플랑크톤은 일반적으로 시간과 공간에 있어서 매우 고르지 못하게 분포하고 모든 해양 집단 중 가장 변화가 많다.

유류 노출에 대한 부유생물의 민감도는 잘 정립되어왔고, 광범위한 영향이 발생할 가능성이 있다. 그러나 일반적으로 저연령 단계 생물의 과잉 생산은 알과 유생 단계의 손실을 만회하기에 충분하며, 유출의 영향을 받지 않은 인접 지역으로부터의 유입을 통한 완충 작용으로 유출 이후 성체 개체군의 현저한 감소가 관찰되지는 않았다.

어류

치어 단계는 수중의 비교적 낮은 유류 농도에도 민감한 반면에, 성어는 훨씬 더 회복력이 좋고 야생종 수준에서 거의 영향이 감지되지 않는다. 자유 유영하는 어류는 적극적으로 유류를 피한다고 생각된다. 예외적으로 특정 종의 연급군(the year class)의 감소가 기록된 적이 있으나 대량 폐사는 드물다. 발생했던 폐사는 상당한 양의 경질유가 해안선을 따라 부서지는 파도로 방출되면서 또는 강에 유출되면서, 태풍 속에서 분산유가 수중에 매우 많이 국지적으로 축적된 것과 관련된다. 유류유출이 어획된 어류 자원과 양식산 해양 생산물에 미치는 영향은 유류 오염이 어업 및 양식업에 미치는 영향에 관한 별도의 ITOPF 기술서에서 더 자세히 다룬다.

바닷새

바닷새는 가장 취약한 개방 수역 생물이며, 대형 사고로 많은 개체가 죽을 수 있다. 해수면에서 떼를 지어 함께

* American Petroleum Institute gravity.



▲ 그림 3: 기름범벅이 된 아프리카 펭귄들(*Spheniscus demersus*)을 울타리 안으로 몰아 넣고 있다.



▲ 그림 4: 록호퍼 펭귄(*Eudyptes moseleyi*)이 회복된 것처럼 펭귄은 다른 조류보다 세척으로 인한 이점이 더 크다.

다니는 바다오리와 바다쇠오리, 기타 다른 종들은 특히 위험에 놓여있다. 그러나 바닷새 개체군의 상당한 폐사율은 유류유출과 관련 없는 폭풍 또는 먹이 자원이나 서식지 손실로 발생될 수 있다. 폐사 원인과 그것이 특정 사고로 인한 것인지 규명하기 위해서는 사후 연구가 필요할 수 있다.

깃털의 오염은 유류가 새에 미치는 가장 명확한 영향이다. 깃털은 피부에 따뜻한 공기를 가두는 역할을 하고, 부력과 단열의 기능이 있다. 기름이 묻으면, 깃털의 보호층의 섬세한 구조와 단열 기능이 있는 솜털에 문제가 생기게 된다. 그러면 해수가 피부와 직접적으로 접촉하게 되어 체온이 떨어지고 결국 저체온증으로 폐사할 수 있다. 한랭 기후에서는 새의 깃털에 묻은 작은 기름 방울도 충분히 폐사에 이르게 할 수 있다. 많은 조류의 피부 아래 지방층은 추가적인 단열층이 되고 에너지를 저장하는 역할을 한다. 이러한 저장분은 새의 체온 유지를 위해 빨리 소모될 수 있다. 추위와 탈진, 부력의 상실로 고통 받고 있는 조류는 익사할 수 있다. 더구나 기름범벅이 된 깃털은 새가 먹이를 찾거나 포식자를 피하기 위해 이륙하고 비행하는 능력을 감소시킨다.

일단 기름에 묻으면, 새는 본능적으로 깃털고르기를 통해 스스로를 정화하는데, 이때 몸의 깨끗한 부분으로 유류를 퍼뜨릴 수 있다. 유류는 섭취될 가능성이 매우 크고, 폐의 충혈, 장이나 폐 출혈, 폐렴, 간과 신장 손상 등과 같은 심각한 영향을 줄 수 있다. 등지로 돌아오면, 새의 깃털에 묻은 유류가 그들의 어린 새끼나 부화하는 알로 옮겨질 수 있다. 알이 유류에 오염되면 난각을 얇게 만들고, 부화에 실패하거나 성장 장애를 일으킬 수 있다.

유출유의 양과 바닷새가 영향을 받을 가능성 사이에 명확한 관련성은 없다. 번식기에 또는 바닷새의 많은 개체군이 모이는 곳에서 발생하는 작은 유출은 일년 중 다른 시기에 또는 다른 환경에서 발생하는 큰 유출보다 더 위험하다는

것을 증명할 수 있다. 몇몇 종들은 더 많은 알을 낳고, 더 자주 번식하거나 어린 새들이 번식 집단에 더 일찍 가입함으로써 군집 감소에 대처한다. 비록 회복은 몇 년의 시간이 걸릴 수도 있고, 또한 먹이 공급과 서식지 사용 가능성 등 여러 요소들에 의해 달라지지만, 이러한 과정은 회복을 도울 수 있다. 단기적, 중기적 손실이 기록되는 것이 일반적이지만, 위에서 말한 회복 메커니즘은 개체군 수준의 장기적 영향을 성공적으로 방지할 수 있다. 그러나 어떤 경우에는 유류유출이 작은 군생지를 영구적으로 감소시킬 수 있는 위험이 있다.

기름범벅이 된 새들의 세척과 재활이 시도될 수 있지만, 많은 종들의 경우 일반적으로 치료 받은 새들의 극히 일부만 세척 과정에서 살아남는다. 그렇게 살아남아서 방류된 새들 중 매우 작은 비율만이 야생에서 살아남아 성공적으로 번식한다. 펭귄은 종종 예외인데, 일반적으로 많은 다른 종들보다 회복력이 좋다. 적절하게 다뤄지면 대다수는 세척 과정에서 살아남아 번식 집단에 다시 합류할 수 있다(그림 3과 4). 심지어 펭귄에서도, 세척된 새들의 번식 성공률이 유류 오염에서 완전히 탈출한 새들의 번식 성공률보다 낮다는 것이 발견되었다. 그럼에도 불구하고, 조류 세척 우수 사례의 개발과 보급은 결과를 개선하는데 도움이 된다.

해산포유류와 파충류

고래, 돌고래 등 고래목의 동물들은 숨을 쉬거나 통로를 확보하기 위해 수면으로 올라올 때 부유 유류의 영향을 받을 위험이 있다. 유류가 코 조직과 눈에 손상을 입힌다는 것은 거의 확실하다. 그러나 폐사 기록이 있는 곳에서는 일반적으로 부검을 통해 폐사 원인이 유류가 아닌 다른 이유 때문이라고 결론 내렸다. 초식성 해우류(해우와 듀공)와 같은 대형 열대 해산포유류도 유류에 취약할 것으로 예상되지만, 이러한 동물들의 유류 오염 손상이 보고된 것은 매우 드물다. 그러나 해안에서 활동하는 바다표범, 수달 및 다른 해양포유류는 유류의 영향으로 고통 받기



▲ 그림 5: 유류는 이 새끼 물개(*Arctocephalus australis*)와 같은 포유류의 중요한 생리 기능을 유지하는 능력에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.



▲ 그림 6: 대모거북(*Eretmochelys imbricate*) 새끼가 세척되고 있다.(사진 출처 USCG).

더 쉽다. 털로 체온을 조절하는 종들은 만약 털이 기름을 뒤집어쓰면 계절에 따라 저체온이나 고열로 죽을 수 있기 때문에 유류에 가장 민감하다(그림 5).

부유하는 유류는 바다 거북, 해양 이구아나, 바다뱀과 같은 해양 파충류에게 위협이 될 수 있다. 특히 바다 거북은 둥지를 트고 알을 품는 시기(nesting season)에 취약하다. 유류가 모래해변에 머물러있거나 둥지가 정화 작업 동안 땅가지면 알과 갓 부화한 새끼들을 잃을 수 있다. 성체는 감염에 대한 민감성을 증가시키는 점막 염증으로 고통 받을 수 있다. 그러나 기름범벅이 된 바다 거북이 성공적으로 세척되어서 바다로 되돌아간 경우가 많다(그림 6). 바다 거북의 모든 종은 주로 서식지 손실, 목표종 어획 및 부수어획과 같은 인간 활동으로 인해 위협받거나 위협에 처한다.

천해역

천해에서의 손상은 강한 파도 작용에 의해 또는 해안에서 너무 가까운 곳에서 유처리제가 부적절하게 사용되어 유류가 수중에 섞여 들어가면서 자주 발생한다. 많은 경우, 예를 들면 조석 플러싱 덕분에, 회석 능력은 수중의 유류 농도가 위험한 수준보다 낮게 유지되게 하기에 충분하다. 반면에, 경질유 정제품이나 경질 원유가 천해로 분산되어 유류의 독성 성분 농도가 높아지는 곳에서는 저서생물들과 퇴적물에 사는 동물들은 폐사한다.

해초

해초의 다양한 종들은 온대수역과 열대수역에서 발견된다. 그들은 많은 다른 생물들에게 은신처를 제공하고, 매우 다양하고 생산적인 생태계를 뒷받침한다. 해초층은 물의 흐름을 감소시켜서 퇴적을 증가시키는 한편, 뿌리 구조는 침식으로부터 해안 지역을 보호하면서 해저를 안정화시킨다. 부유 유류는 나쁜 영향 없이 해초층을 통과할 가능성이 높다. 그러나 유류나 유류의 독성 성분이 충분히 높은 농도에서 이러한 천해역에 섞여 들어가면, 해초와 관련 생물들은 영향을 받을 것이다. 선박 프로펠러와 붐 앵커에 의해 식물들이 찢어지거나 뽑힐 수 있기 때문에, 해초 주변에서는

정화 작업이 조심스럽게 이루어져야 한다.

산호

산호초는 매우 풍부하고 다양한 해양 생태계를 제공하고, 생산성이 매우 높으며 해안을 보호해준다. 산호는 유류에 오염되면 회복되는데 오랜 시간이 걸릴 수 있는 매우 민감한 생물이다. 분산유는 산호초에 손상을 줄 수 있는 가장 큰 위협이다. 부서지는 파도로 인해 증가한 난류가 유출유의 자연적 분산을 촉진할 때, 그리고 유처리제가 사용될 때 그 위험이 가장 높다. 산호 자체도 그렇지만, 산호가 서식지로서 제공되는 군집도 유류에 민감하다. 결과적으로, 유처리제는 산호초 근처에서 사용되면 안 된다. 드문 경우에, 산호초는 대조 때 건조될 수 있어 부유 유류에 덮일 위험이 있다.

선박 좌초는 유류 오염보다 산호초에 손상을 입히는 더 주요한 원인이다. 또한, 남획이나 파괴적인 어업 관행, 삼림 벌채로 인한 영양분 오염과 상승된 침전, 그리고 해안 건설 사업과 같은 인류 기인 영향도 산호에 스트레스를 유발할 수 있다.

해안가

해안가는 해양 환경의 어떤 다른 부분보다도 유류의 영향에 노출되어 있다. 그러나 해안 동물상과 식물상은 조석 주기뿐만 아니라 칠썹거리리는 파도에의 주기적 노출, 건조한 바람, 급격한 온도차, 강우량으로 인한 염분의 변화, 그리고 다른 심각한 스트레스를 견뎌내야 하기 때문에 선천적으로 회복력이 좋다. 이러한 내성은 많은 해안 생물들에게 유출 영향을 견디고 회복하는 능력도 부여한다.

암반해안과 모래해안

암반해안과 모래해안이 파도 작용과 조류의 수중침식 효과에 노출되는 것은 유류의 영향에 가장 회복력이 좋다는 것을 의미한다(그림 7). 이 수중침식은 대개 자연적이고 빠른 자가 세척을 할 수 있다. 온대 기후에서 암반해안에

미치는 영향의 전형적인 예는 해양 달팽이의 핵심종인 삿갓조개류(Patella vulgata)의 일시적 상실이다. ‘핵심’ 종들은 그들의 생물량과 균형이 맞지 않는 생태계에 대한 영향을 제어할 수 있는 식물 또는 동물로, 그들의 상실은 그러한 생태계에 극적인 변화를 가져올 수 있다. 바위 표면의 미세조류를 뜯어 먹고 사는 삿갓조개류는 조류의 성장과 다른 동물상의 정착을 제한한다. 그들의 상실은 일반적으로 기회종인 녹조류의 빠른 성장을 가져온다(그림 7 삽화). 시간이 지나면서 이 조류의 성장은 다른 조류 종에 의해 대체되고, 삿갓조개류가 바위 표면에 다시 균집을 이루도록 해주어 생태적 균형이 점차 회복된다. 열대와 아열대 모래해안에서는 달랑개(Ocypode sp.)가 삿갓 조개류와 비슷한 환경적 지위를 차지한다. 그럼에도 불구하고, 해안이 깨끗해지는 몇 주 내로 개는 종종 이전과 비슷한 숫자로 해안에 다시 균집을 형성한다.

부드러운 퇴적해안

고운 모래와 진흙은 강어귀를 포함하여 과도 작용으로부터 보호되는 지역에서 발견되고, 생물학적으로 매우 생산적인 경향이 있다(그림 8). 그들은 종종 철새와 이매패류를 포함한 퇴적물에 사는 토착 무척추 동물들의 대형 균집을 지원하고, 일부 종들에게는 생육지가 된다.

고운 퇴적물은 다른 기질처럼 쉽게 영향을 받지 않지만, 유류가 벌레의 서식구멍과 식물의 뿌리통로를 통해 침투하거나 폭풍에 의해 퇴적물에 섞여 들어갈 수 있다.

고운 퇴적물에 침투한 오염물질은 수년 간 지속될 수 있어서 장기적인 영향을 줄 가능성이 높다.

염습지

부드러운 퇴적해안의 상부 가장자리는 종종 다년생 나무와 일년생 다육 식물과 풀로 구성된 염습지 초목들이 균집을 이루고 있다. 염습지는 보통 온대기후와 관련이 있지만, 아극지역에서 열대지역에 이르는 세계 곳곳에서 나타난다. 열대 해안의 염습지는 주로 조간대 상부와 하부를 각각 차지하고 있는 맹그로브와 관련된다. 종 구성은 주로 염도에 따라 결정된다. 예를 들면, 강어귀의 상부에 있는 염도 낮은 물이나 기수지역에서는 습지 식물이 갈대밭을 이룬다. 습지에서 옮겨온 식물 유기 분해물도 강어귀와 연안해역에서 먹이 천국이 되는데 일조한다. 많은 염습지들은 특히 철새의 서식지로의 중요성 때문에 국제적으로 중요한 습지에 관한 람사협약하에서 특별 보존 상태를 유지한다.

유류유출이 염습지에 미치는 영향은 식물의 성장 기간과 관련된 연중 시기에 따라 다르다. 온대 또는 냉대 지역의 습지는 겨울철에 휴면기인 반면에, 지중해 습지는 고온의 여름철에 성장이 느리다. 하나의 사고는 보통 일시적인 영향을 주지만, 수년에 걸친 더 장기적인 손상이 반복적이고 만성적인 유류 오염이나, 작업자들이 오염지역 현장을 밟고 지나다니는 것, 중장비 사용, 오염된 기질 제거와 같은 적극적인 정화 활동에 의해 발생할 수 있다. 습지는 추가적인 손상의 위험 없이 정화작업을 하기 어렵기 때문에,



▲ 그림 7: 암반해안은 일반적으로 바람과 파도에 노출되어 빠르게 자정될 수 있다. 삿갓조개류를 포함한 생물군은 유류의 영향을 받을 수 있고, 이들 중 상당수가 죽은 후에 기회종(조류와 해초)이 풍부해질 수 있다. 시간이 지나면서 종들이 재정착하고 균형이 회복될 것이다.



▲ 그림 8: 부드러운 퇴적물은 주로 폐쇄되고 덜 역동적인 해안선을 따라 발견되고, 대개 생물학적으로 매우 생산적이다. 정화작업은 손상을 확장시키거나 악화시킬 가능성이 있기 때문에, 자연적으로 정화하기 위해 유류에 오염된 습지를 떠나는 것이 고려되어야 한다. 반면 샘플에서 보이는 것처럼 유류가 기질 속으로 침투하면 수년 간 머무를 수 있다.

습지가 자연적으로 정화되도록 내버려두도록 자주 권고된다. 그러나 초목을 불태우거나 벌목하려고 생각한다면, 초목이 죽은 후에 다시 하는 것이 가장 좋다. 일반적으로, 식물의 뿌리나 알뿌리가 심각하게 오염이나 정화작업 동안 지나친 압밀로 인해 손상되지 않는 한, 계절적 재성장이 일어날 것으로 예상할 수 있다.

맹그로브

맹그로브는 열대와 아열대의 폐쇄성 해안 하구에서 자라는 염내성 목본식물과 관목의 집단이다. 맹그로브 숲은 게, 굴 및 기타 무척추 동물들에게 가치 있는 서식지를 제공할 뿐만 아니라 물고기와 새우에게 중요한 생육지이다. 또한, 복잡한 뿌리 구조가 퇴적물을 붙잡아서 안정화 시켜줌으로써 해안선의 침식을 줄여주고 인접한 해초지와 산호초에 육지 퇴적물의 침적을 최소화 해준다.

그들의 위치는 맹그로브가 유류유출에 매우 취약하다는 것을 의미한다. 맹그로브는 또한 맹그로브가 자라고 있는 기관의 크기에 따라 유류에 의한 오염에 매우 민감한 것으로 간주된다. 맹그로브는 일반적으로 조밀하고 질퍽한 혐기성 퇴적물에서 자라고, 작은 구멍(피목)을 통해 기근에 공급되는 산소에 의존한다(그림 9). 근계가 무거운 유류 속에 잠기면 이러한 산소 공급을 차단하여 맹그로브를 죽게 할 수 있다. 그러나 비교적 자유롭게 물을 교환할 수 있는, 공기가 통하는 개방된 퇴적물에서는 근계가 바닷물에서 산소를 끌어오기 때문에 유류에 의한 질식에 더 높은 내성을 가지고

있다. 또 다른 위험성은 특히 경질유 정제품 속의 기름의 독성 요소가 염분 평형을 유지하는 식물의 체계에 지장을 주어 소금물에 견디는 능력에 영향을 주는 것이다. 경험에 의하면 중질유(HFO)에 의한 질식으로 인한 맹그로브의 손실은 일부 유처리제를 포함한 더 가벼운 제품에 침유되어 죽는 것보다 덜한 것처럼 보이는데, 이는 나무 숲의 지역적 손실을 초래할 수 있다.

맹그로브 생태계에서 살고 있는 생물들은 유류의 직접적인 영향과 더불어 서식지의 장기적인 손실에 의해 영향을 받을 수 있다. 복잡한 맹그로브 생태계의 자연적 회복은 오랜 시간이 걸릴 수 있고, 복구 조치들은 그런 서식지들의 회복 과정을 실제로 촉진시킬 수 있을 것이다.

장기적인 손상

효과적인 정화 작업에는 보통 대규모 유류 오염의 제거, 오염 손상의 지리적 범위와 기간 축소, 그리고 자연적 회복 허용이 포함된다. 그러나 적극적인 정화 방법은 추가적인 손상을 가져올 수 있어서 자연적 정화 과정이 더 선호될 수도 있다. 시간이 지나면서, 여러 가지 요인들이 유류의 독성을 감소시켜, 오염된 기질이 새로운 성장을 지원할 수 있다(그림 10). 예를 들면, 유류는 비와 조류에 의해 씻겨나갈 수 있고, 유류가 풍화되어 독성이 덜한 잔존유만 남기고 휘발성 부분은 증발한다.



▲ 그림 9: 맹그로브는 유류에 매우 취약하다. 유류가 지주근이나 호흡근을 덮으면(호흡 구조는 기질을 통해 수직으로 성장함) 피목(구멍)을 막아서 가스 교환을 차단하여 질식으로 이어질 수 있다.

해양 환경은 뛰어난 자정 능력을 갖고 있기 때문에 유류유출의 영향은 대개 국지적이고 일시적이며, 보고된 장기적인 손상 사례가 거의 없다. 그러나 어떤 특정한 상황에서는 손상이 영구적일 수도 있고, 생태계의 손상이 일반적으로 예상한 것 보다 더 오래 지속될 수도 있다. 심각한 장기적인 손상으로 이어지는 경향이 있는 상황들은 특히 유류가 퇴적물 안에 갇혀서 정상적인 풍화 과정을 겪지 못하는 곳에서의 유류의 지속성과 관련이 있다. 예를 들면, 습지와 같은 폐쇄성 서식지, 자갈해안과 연안 해역, 특히 유류유출이 폭풍우와 동시에 발생했을 때이다. 습지를 침수시키는 폭풍 해일은 고운 퇴적물을 정체시켜서 자연적으로 분산유와 접촉하게 될 가능성이 크다. 일단 폭풍이 누그러지면, 퇴적물 속에 섞여 들어간 유류가 습지 바닥에 자리잡는다. 비슷한 상황들로 유류가 고운 퇴적물에 섞여 들어가 연안 해역에 자리잡는다. 이러한 상황에서, 무산소 상태는 유류의 모든 분해를 더디게 한다. 자갈해안에서, 유류와 자갈 혼합물의 풍화는 아스팔트 포장층을 형성할 수 있고, 이것은 얼마 동안 지속될 것이다. 아주 무거운 기름이나 화재 잔류물과 같은 바닷물보다 더 무거운 석유제품은 얼마 동안 분산되지 않고 머무르는 곳에서 해저로 가라앉아 저서생물들의 국지적인 질식을 유발할 수 있다.

사후 연구

토리캐년 사고 이후 발생한 거의 모든 대형 사고에서 유류

오염의 영향에 대한 연구를 실시한 결과, 유출의 잠재적인 환경 영향에 관한 중요한 지식들이 밝혀졌다. 이러한 지식 수준을 감안하면, 모든 유출 후에 사후 연구를 고려하는 것은 적절하지도 필요하지도 않다. 그러나 사고의 특정 상황에서 발생하는 영향의 구체적인 범위, 특성 및 기간을 결정하기 위해, 사후 연구가 필요하다. 유류 오염의 영향은 대부분의 경우 잘 이해되고 예측가능하기 때문에 다양한 가상의 영향을 조사하려고 시도하는 것보다는 두드러지는 손상을 정량화하는데 연구의 초점을 맞추는 것이 중요하다. 해양 환경에서 보여지는 다양성은 잠재적인 광범위한 영향들에 대한 연구가 결정적인 결과를 가져올 가능성이 적다는 것을 의미한다.

오염물질의 화학분석에 사용할 수 있는 기술들은 계속해서 진화하고 있다. 유류의 잠재적인 독성 요소의 농도는 현재 1조 분의 1(ppt, ng/kg, 1×10^{-12})의 수준으로 측정될 수 있다. 피해 평가 연구의 가장 중요한 목표 중 하나는 관측된 피해의 경로를 알아내고, 특히 만성적으로 오염된 환경에 원인이 되는 특정 유류 오염물질의 성질을 식별하는 것이다. 이를 위해 대개 가스 크로마토그래프 질량 분석기(GC-MS)를 이용한다.

생물지표(Biomarker)는 원유와 석유제품에서 발견되는 다환방향족탄화수소(PAH)에 노출된 동물을 선별하는데 일상적으로 사용된다. 예를 들면, EROD(ethoxyresorufin-O-deethylase) 활동을 측정하여 신진대사와 독성 제거,



그림 10a: 습지 정화를 위한 작업자들의 출입은 유류로 인한 손상이상의 추가적인 손상을 일으킬 수 있다.



그림 10b: 7주 후 뚜렷한 새로운 성장 징후를 보이는 정화된 습지



그림 10c: 22개월 후, 습지는 비록 기회종들이지만 완전히 수풀로 뒤덮였다.



그림 10d: 3년 후, 습지는 완전한 종 다양성을 회복하였다.

▲ Figure 10: Natural recovery of a damaged marsh.

그리고 악성 종양의 발전에 관여하는 간 조직의 효소 수준을 감지한다. 이 기술은 감지할 수 있는 신체 부담 없이 PAH에 대한 노출을 표시하기에 충분히 민감하며, 잠재적인 손상을 초기에 경고할 수 있다. 그러나 이 효소의 활동 수준의 변화는 또한 유류와 관련 없는 다른 유사한 독성 물질의 존재와 같은 또 다른 스트레스의 원인도 포함한다. 활동 수준은 또한 동물의 체온 변화뿐만 아니라 연령과 생식 상태를 반영한다. 따라서 이러한 연구들은 이와 같은 잠재적 혼란 요소들을 고려하는 것이 중요하다.

연구의 우선순위는 여러가지 요인에 따라 정해질 수 있다. 첫 번째는 영향에 대한 기준선을 설정하는 것이다; 오염이전의 자료가 존재한다면 이와 피해지역을 비교하거나 피해지역 밖의 비교지역에서 동일한 중, 군집 또는 생태계와 비교하거나 바닷새나 갑각류의 폐사와 같이 뚜렷한 손상의 회복을 모니터링함으로써 영향을 파악한다. 플랑크톤은 연구 주제로 좋지 않다. 실험실 연구와 현장 연구 모두 유류에의 노출에 따른 폐사와 아치사 효과를 연구해왔음에도 불구하고, 플랑크톤은 너무 가변적이어서 유출 이전과 이후 상황을 비교하는 것이 거의 불가능하다. 고려해야 할 다른 요소들에는 영향을 받은 지역의 지리적 범위, 오염 정도와 노출 수준 (농도와 기간), 영향을 받은 자원의 중요성, 예를 들면 희소성 또는 생태적 기능 등이 있다. 마지막으로, 연구 수행이 현실적으로 가능한지 고려해야 한다. 실행 가능성은 재정적 지원 또는 단순하게 연구 지역에 대한 접근 가능성이나 연구기간 동안 연구 지역에 문제가 생길 위험등과 관련될 수 있다. 사후 연구의 설계 및 수행에 관한 추가 지침은 별도의 기술서, 해양 유류유출의 샘플링과 모니터링에서 다루고 있다.

복구, 복원, 회복 (Restoration, reinstatement, remediation)

복원(reinstatement) 또는 회복(remediation)으로도 알려진 복구(Restoration)는 손상된 환경을 자연적 회복 과정만으로 예상되는 것보다 훨씬 빨리 정상적으로 기능하던 상태로 되돌리기 위해 어떤 조치들이 취해지는 과정이다. 이 용어는 환경적 손상의 맥락에서 자주 통용되어 사용된다. 그러나 1992 민사 책임 및 기금 협약(CLC & FC)이라는 국제 체제를 따르는 유럽과 그렇지 않은 미국의 환경 법률 사이에 그 용어들의 해석이 다를 수 있다. 1992 기금 청구 매뉴얼**에서 제공하는 지침은 국제 체제 내에서 복원(reinstatement) 조치는 다른 자연적 또는 경제적 자원에 부정적 영향을 미치지 않고 자연적 회복(recovery)을 상당히 촉진하는 실제적 기회를 가지는 조치를 의미를 갖는다. 이 조치는 또한 손상의 정도와 기간, 그리고 얻게 될 혜택에 비례해야 한다. 피해는 해양 환경의 손상으로 간주되고, 여기서 손상이란 유출로 인한 비정상적인 기능 또는 생물 군집 내에 생물의 부재로 설명될 수 있다.

** <http://www.iopcfund.org/publications.htm>

1990 미국 해양오염방지법(OPA 90) 하에서 공포된 법령은 자연적 회복(recovery)을 복구(restoration)에 대한 핵심 메커니즘으로 인정하지만, 기본적 복구과 보상적 복구라는 두 가지 개념을 소개한다. 보상적 복구는 환경이 회복되는 기간 동안 ‘잃어버린’ 환경 서비스에 대해 보상하려는 목적인 반면에, 기본적 복구는 복구(restore)하기 위해 또는 회복(recovery)을 촉진하기 위해 취해지는 조치들로 국제 체제하의 복원(reinstatement)과 같은 의미이다. 2004 EU 환경배상책임 지침(ELD) 또한 회복(remediation)에 대해 이러한 개념을 포함한다. 그러나 국제 체제는 보상적 복구 또는 회복의 개념을 인정하지 않는다.

정화 작업 후에, 특히 조치를 더 취하지 않으면 비교적 더디게 회복되는 곳에서, 손상된 자원을 복구(restore)하고 자연적 회복(recovery)을 촉진하기 위해 더 적극적인 조치들이 정당화될 수 있다. 유류유출 후에 대한 이러한 접근 방법에는 염습지나 맹그로브 식물을 옮겨 심는 것이 있다(그림 11). 일단 새로운 성장이 자리를 잡으면, 다른 형태의 생물체가 회복되고 지역의 침식가능성도 최소화된다.

동물상을 위한 의미 있는 복원(reinstatement) 전략을 설계하는 것은 매우 큰 과제이다. 예를 들면, 인간 활동과 접근을 제한하고, 양미리류와 바다오리류의 경우처럼 제한된 음식 자원에 대한 경쟁을 줄이기 위해 어업을 관리하거나, 둥지를 트고 알을 품는 시기 동안(nesting season) 거북이 이용하는 해변을 폐쇄함으로써 손상된 서식지들이 보호될 것이고, 생태계의 회복(recovery)은 향상될 것이다. 어떤



▲ 그림 11: 격자형으로 개별 모종을 심어 탄생된 맹그로브 지역

경우에는, 손상된 지역의 재착생을 돕기 위해, 근처의 오염되지 않은 지역으로부터 포식자 통제 등을 통하여 자연 번식 군집을 확실히 보호할 수 있다. 그러나 많은 복잡한 생물학적, 생태적, 환경적 요소들은 인접한 군집이 오염된 지역에 재착생하는 능력을 통제할 가능성이 있다.

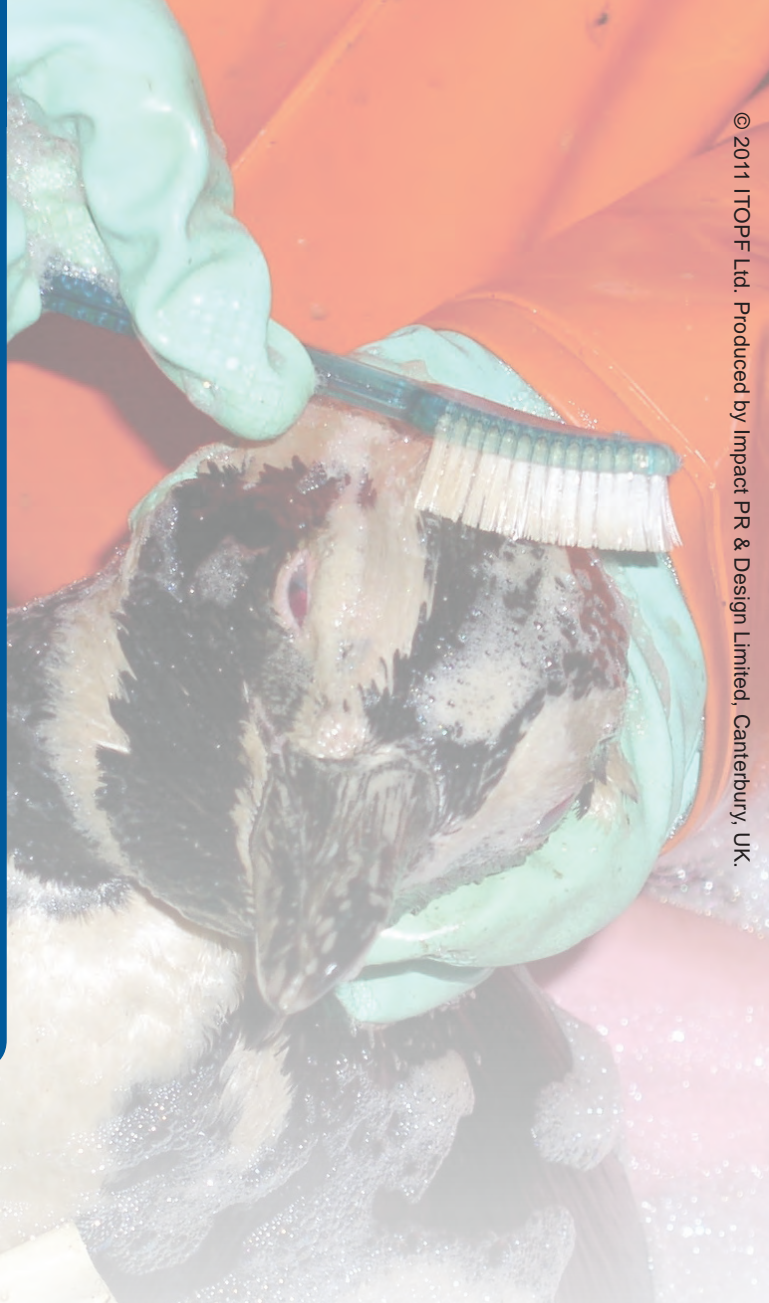
실제로, 해양 환경의 복잡성은 생태적 손상이 인공적으로 복원(repair)되는 정도에 한계가 있다는 것을 의미한다. 대부분의 경우 자연적 회복(recovery)은 비교적 빠르게 진행되지만 매우 드물게 복원(reinstatement) 조치들이 그 속도를 앞지를 수 있다.

Key points

- 해양 환경 내에 광범위하고 매우 복잡한 생태계가 존재하고, 풍부성과 다양성에 있어서 상당한 변동이 발생하는 것은 생태계가 정상적으로 기능하고 있다는 것을 보여주는 특징이다.
- 해양 환경은 유류유출뿐만 아니라 자연 현상에 의한 심각한 교란으로부터 뛰어난 자연적 회복 능력을 가지고 있다.
- 유류유출로 인한 환경적 손상에 핵심적인 영향을 주는 것은 질식과 독성이지만, 손상의 심각성은 유출유의 종류와 유출유가 얼마나 빨리 유류 오염에 민감한 자원들의 위치로 분산되는지에 따라 크게 달라진다.
- 가장 취약한 생물은 해수면이나 해안가에서 발견되는 생물들이다.
- 염습지와 맹그로브는 가장 민감한 해안가 서식지이다.
- 바닷새들은 특히 위험에 놓여있다. 펭귄과 같은 몇몇 종들은 세척에 잘 적응하지만, 다른 종들은 세척 후 야생으로 방출되면 오래 살아남지 못하거나 성공적으로 번식하는데 어려움이 있다.
- 단기적인 영향은 심각할 수 있지만, 지속적인 손상은 드물다. 관찰된 곳에서, 장기간 손상은 유류의 축적이 지속되게 하는 조건을 갖춘 지리적으로 분리된 지역으로 제한되었다.
- 효과적인 방제작업 계획과 실행은 손상을 완화시키며, 복구의 첫 단계로 유류의 제거를 실시한다.
- 잘 설계된 복원(reinstatement) 조치는 때때로 자연적 회복 과정을 향상시킬 수 있다.

ITOPF 기술정보지침서 목록

- 1 기름오염 항공탐색 지침
- 2 해상 유출기름의 특성변화
- 3 기름오염방제시 오일펜스 사용지침
- 4 기름오염방제시 유처리제 사용지침
- 5 기름오염방제시 유회수기 사용지침
- 6 해안오염 식별지침
- 7 해안방제 지침
- 8 기름오염방제시 유흡착재 사용지침
- 9 기름 및 폐기물의 처리 지침
- 10 기름유출 대응의 리더쉽, 지휘 및 관리
- 11 어업 및 양식업에 대한 기름유출의 영향
- 12 사회·경제적 활동에 대한 기름유출의 영향
- 13 환경에 대한 기름유출의 영향
- 14 해상유출기름의 시료채취 및 모니터링 지침
- 15 기름오염에 대한 보상청구 지침
- 16 기름오염에 대한 긴급방제계획 수립지침
- 17 해상에서의 화학오염사고 대응 지침



국제유조선선주오염연맹(ITOPF)은 유류, 화학물질 및 기타 유해물질의 해양 유출에 효과적으로 대응하기 위해 전 세계 선주들과 그들의 보험사를 대표하여 설립된 비영리 조직입니다. 긴급 사고대응, 방제기술에 대한 권고, 피해 평가, 방제계획 수립 지원 및 교육훈련 제공 등의 기술적 서비스를 제공합니다.

본 방제기술정보집은 국제유조선선주오염연맹(ITOPF)의 기술진들의 경험을 바탕으로 개발되었고, 국제유조선선주오염연맹(ITOPF)의 승인 하에 해양경찰청에서 국문으로 번역하였습니다.



ITOPF Ltd

1 Oliver's Yard, 55 City Road, London EC1Y 1HQ, United Kingdom

Tel: +44 (0)20 7566 6999
 Fax: +44 (0)20 7566 6950
 24hr: +44 (0)20 7566 6998

E-mail: central@itopf.org
 Web: www.itopf.org

번역기관



해양경찰청

인천광역시 연수구 해돋이로 130
 Tel: 032-835-2293 Fax: 032-835-2991
 Web: www.kcg.go.kr



한국해양과학기술원

대전시 유성구 유성대로 1312길 32
 Tel: 042-866-3114 Fax: 042-866-3106
 Web: moeri.kiost.ac

※ 본 정보집에 수록된 해양오염 방제기술은 다양한 오염사고 특성 및 환경에 따라 다르게 적용될 수 있으며, 내용중 일부는 생략 또는 의역되어 있을 수 있으므로 해당부분은 원문을 참고 하시길 바랍니다.