

# 기름오염방제시 유처리제 사용지침

방제기술정보문서

4





# 서론

유처리제(dispersant) 살포의 1차적 목적은 유막을 분해하여 수많은 작은 기름방울을 생성시킨 뒤 수중에서 신속히 희석되고 자연 발생 미생물에 의해 분해되도록 하는 것이다. 유처리제를 적절히 사용하면 기름 유출을 효과적으로 방제함으로써 중요한 민감 자원의 손상을 최소화 또는 예방할 수 있다.

다른 방제 기법과 마찬가지로 유처리제는 기름의 특성, 바다 및 기상 상태, 환경적 민감성, 유처리제 사용에 대한 국가 규정 등을 고려하여 신중하게 사용해야 한다. 특히 기상 상태 또는 자원의 가용성 문제로 인해 여타의 해상 방제 기법이 제약을 받는 경우, 유처리제를 사용함으로써 상당한 정도의 환경적, 경제적 효과를 거둘 수 있다.

본 문서에서는 선박을 이용한 기름 유출 방제 수단의 하나로서 유처리제의 사용 및 한계에 대해 개괄한다.

## 기름 분산 메커니즘 및 유처리제의 구성 성분

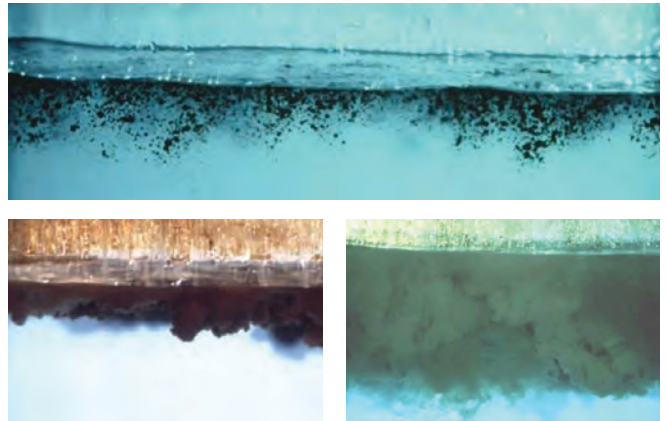
해상 기름 유출 사고 후, 유막을 구성하는 일부 기름은 자연적으로 수중 분산된다. 이러한 분산 정도는 유출유의 종류와 바다의 복합 에너지가 좌우한다. 저점도 기름은 고점도 기름보다 자연적으로 잘 분산되는 편이다. 일반적으로 원유의 분산 정도는 연료유보다 높다.

자연적 분산은 파도와 바람이 제공하는 복합 에너지가 기름/물 계면장력보다 강하여 다양한 크기의 작은 기름방울로 유막을 분해함으로써 이루어진다(그림 1a). 크기가 상대적으로 큰 기름방울들은 다시 수면으로 급속히 떠올라 서로 결합하여 유막을 재형성한다. 상대적으로 작은 기름방울들은 파도의 작용과 난류 때문에 수중에 머물다가 수면 밑의 조류에 의해 희석된다.

자연적 분산 과정은 5 m/s(10노트) 이상의 파도와 바람이 있는, 적당히 거친 바다에서 이루어진다. 예컨대 1993년 탱커 선박 BRAER호가 셰틀랜드 제도에서 좌초했을 당시, 강한 폭풍이 불고 있었기 때문에 점성도가 매우 낮은 Gulfaks 원유 85,000톤 화물 중 대부분이 자연적으로 분산되면서 해안가에는 최소한의 영향을 미치는 데 그쳤다.

유처리제는 기름/물 계면의 장력을 감소시킴으로써 자연적 분산을 향상시킨다. 파도의 작용에 의해 작은 기름방울들이 더 많이 만들어지는 것이다(그림 1b 및 그림 1c). 유처리제는 계면활성제와 용제가 섞여 있는 것을 말한다. 용제는 '시너' 역할을 통해 계면활성제의 점성도를 낮춤으로써 살포 가능하도록 하는 기능과, 계면활성제가 유막으로 침투할 수 있도록 촉진하는 기능을 수행한다.

각각의 계면활성제 분자에는 친유성 및 친수성 요소들이 있다. 기름에 살포되었을 때 용제는 계면활성제를 기름/물 계면으로



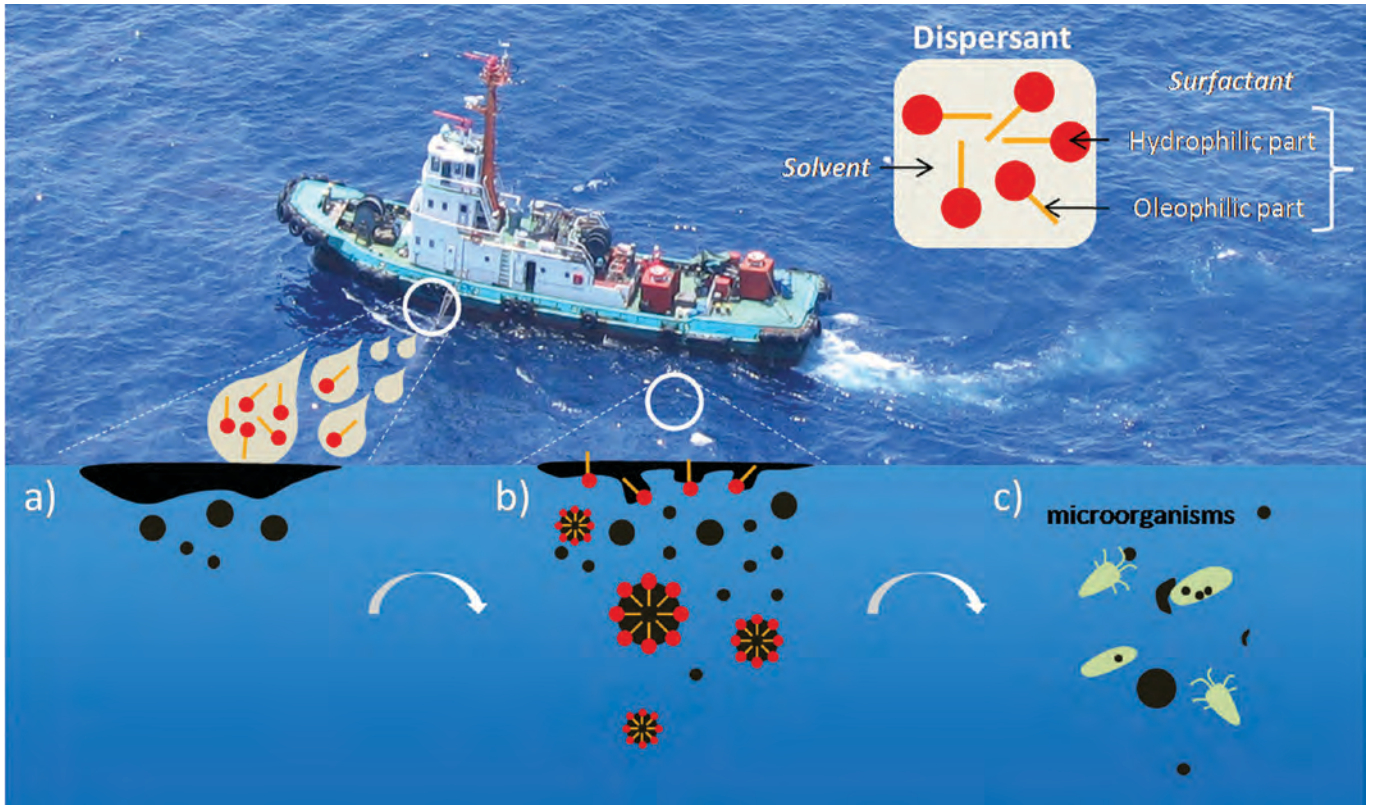
▲ 그림 1: 실험실 조건에서의 성공적인 분산. a) 유처리제를 살포하지 않은 기름(자연적 분산), b) 유처리제를 살포한 기름, c) 유처리제를 살포한 기름의 몇 초 후 모습. 급속히 희석되고 있다.(사진 제공: Delft Hydraulics Institute)

보내는데, 여기서 분자들이 재배치되어 친유성 부분은 기름에, 그리고 친수성 부분은 물에 있게 된다. 이를 통해 물/기름 계면의 장력이 약해지고, 파도 에너지의 힘이 더해져 유막으로부터 작은 기름방울들이 생긴다. 수중에 머무를 정도로 충분히 작은 기름방울들은 특유의 커피색을 띠며 수면 하에서 뿌옇게 흩어진다(그림 1c).

효과적으로 분산 가능한 기름방울의 크기는 1-70  $\mu\text{m}^*$ 이며, 가장 안정적인 크기는 45  $\mu\text{m}$  미만이다. 이러한 크기 범위의 기름방울들이 수면 쪽으로 상승하는 속도는 바다의 난류에 의해 상쇄되어 정지 상태를 유지하게 되며, 기름과 유처리제 혼합물은 수면 아래 2-3m 지점에서 급속히 희석된다. 기름방울의 표면에 계면활성제가 부착되고 희석 및 분산 과정에서 기름방울들이 서로 결합할 가능성이 줄어들면서, 기름방울들이 재결합하여 유막을 다시 형성할 가능성은 최소화된다.

다양한 종류의 해양 미생물에 의한 생분해는 기름방울의

\*  $\mu\text{m}$  = 마이크로미터 =  $10^{-6}\text{m}$ ,  $1\ \mu\text{m} = 0.001\text{mm}$



▲ 그림 2: 화학적 분산 과정: a) 계면활성제와 용제를 함유한 유처리제가 기름 표면에 분산되면, 용제가 계면활성제를 기름으로 침투시킨다. b) 계면활성제 분자는 기름/물 계면으로 이동하여 표면장력을 감소시킴으로써 유막에서 작은 기름방울이 떨어져 나오게 한다. c) 기름방울들은 난류 혼합에 의해 분산되며, 박테리아나 곰팡이와 같은 자연 발생 미생물에 의해 최종적으로 분해된다. 이 마지막 단계는 며칠 또는 몇 주가 걸릴 수 있다.

표면에서만 발생한다. 기름이 아닌 물에 미생물들이 있기 때문이다. 비교적 크기가 작은 기름방울들이 무수히 만들어지면 기름의 표면적이 증가하면서 생분해 가능한 부분도 증가한다. 예컨대 직경이 1 mm인 기름방울이 직경 45 μm 기름방울 10,000개로 분산된다면 원래의 기름방울보다 표면적이 20배 증가한다. 실제로 모든 기름방울이 동일한 크기는 아니지만, 비교적 크기가 작은 기름방울들이 훨씬 더 많이 분포하기 때문에 생분해 기회가 대폭 향상되는 것이다.

## 유처리제의 분류

유처리제는 세대 및 유형에 따라 분류된다. 1세대 제품은 1960년대에 도입되었는데, 산업용 클리너 및 그리스 제거제와 유사했으며 수생 독성(aquatic toxicity)이 강했다. 이들 제품은 기름 유출 방제에 더 이상 사용되지 않는다.

2세대 유처리제는 1유형 유처리제라고도 불리는데, 해상에서 선박으로부터 살포함으로써 기름 유출을 방제하기 위해 설계되었다. 이들 제품은 저방향(low aromatic) 또는 무방향 성분의 탄화수소 용제와 15-25% 정도의 계면활성제를 함유하고 있다. 2세대 유처리제는 해수로 미리 희석하면 효과적이지 않기 때문에 희석하지 않은 상태로 살포된다. 유처리제와 기름의 비율은 1:1과 1:3 사이로, 투입률이 높은 편이다. 1세대보다 독성은 낮지만 상대적으로 효과가 덜하며, 3세대 유처리제보다는 독성이 강하다. 여러 국가에서 1유형 유처리제는 더 이상 사용되지 않는다.

3세대 유처리제는 두세 종류의 계면활성제와 글리콜 및 경질유 추출 용제를 함유하고 있다. 가장 흔하게 사용되는 계면활성제는

비이온계(지방산 에스테르와 에톡실레이티드 지방산 에스테르) 및 음이온계(sodium alkyl sulphosuccinate)이다. 용제 내의 계면활성제 농도는 25-65%로, 1유형 제품들보다 높은 편이다.

3세대 유처리제는 2유형 및 3유형으로 구분할 수 있다. 두 유형 모두 농축형 유처리제이다. 그러나 일반적으로 2유형 유처리제는 사용 전 해수에 희석시켜 보통 10% 정도의 농도를 유지하는데, 효과를 거두기 위해서는 유처리제/물 혼합물 대 기름의 비율이 1:5에서 2:1에 이르는 고농도여야 한다. 이러한 희석 요건은 선박에서 살포하여 사용할 때 제약 조건으로 작용한다. 3유형 유처리제는 희석하지 않고 사용하며, 일차적으로 항공기에서의 효율적인 살포를 위해 개발되었지만 선박에서도 사용 가능하다. 유처리제 대 기름의 비율은 1:5와 1:50 사이이며, 이상적인 비율은 유출 사고 시 직접 시험해 봄으로써 결정된다. 현재 가장 흔하게 사용할 수 있는 유처리제는 3세대 3유형이다.

## 유처리제의 한계

유처리제의 효과는 모종의 물리적, 화학적 변수에 의해 제약을 받는데, 그중 가장 중요한 변수는 바다의 상태와 기름의 특성이다. 유처리제 사용의 적정성을 판단하려면 이러한 제약 조건을 충분히 고려해야 한다.

## 해상 상태

해상에서 유처리제를 성공적으로 사용하려면 최소한의 과도 에너지가 필요하다. 에너지가 낮은 경우, 분산된 기름방울들은

표면으로 다시 떠올라 유막을 재형성하게 된다. 나아가 해상 상태가 극심한 경우에는 쇄파에 의해 기름이 가라앉기 때문에 유처리제와 기름의 직접적인 접촉이 방해됨으로써 유처리제의 효과가 감소한다. 현장 시험 결과에 따르면 최적의 풍속은 4-12 m/s(8-25노트) 정도이다.

일차적으로 유처리제는 30-35 ppt(천분율) 정도의 염분이 있는 해수에서 사용하도록 제조된다. 염분이 5-10 ppt 미만인 바다에서, 특히 사전에 희석된 유처리제를 살포하면 효능이 감소한다. 비슷한 이치로 염분이 35 ppt를 넘는 바다에서도 효율이 떨어진다. 유처리제의 효과는 담수에서 현저하게 감소한다. 계면활성제가 기름/물 계면에서 안정되지 않고 유막을 뚫고 수중으로 들어가는 경향이 있기 때문이다. 그러나 담수에서 사용할 수 있도록 특별히 제조된 유처리제도 있다. 강이나 호수와 같이 한정된 담수 시스템에서는 분산된 기름의 충분한 희석이 가능할 정도의 수심 또는 물 교환이 존재하는지 등의 추가적 사항들을 고려해야 한다.

### 기름의 특성

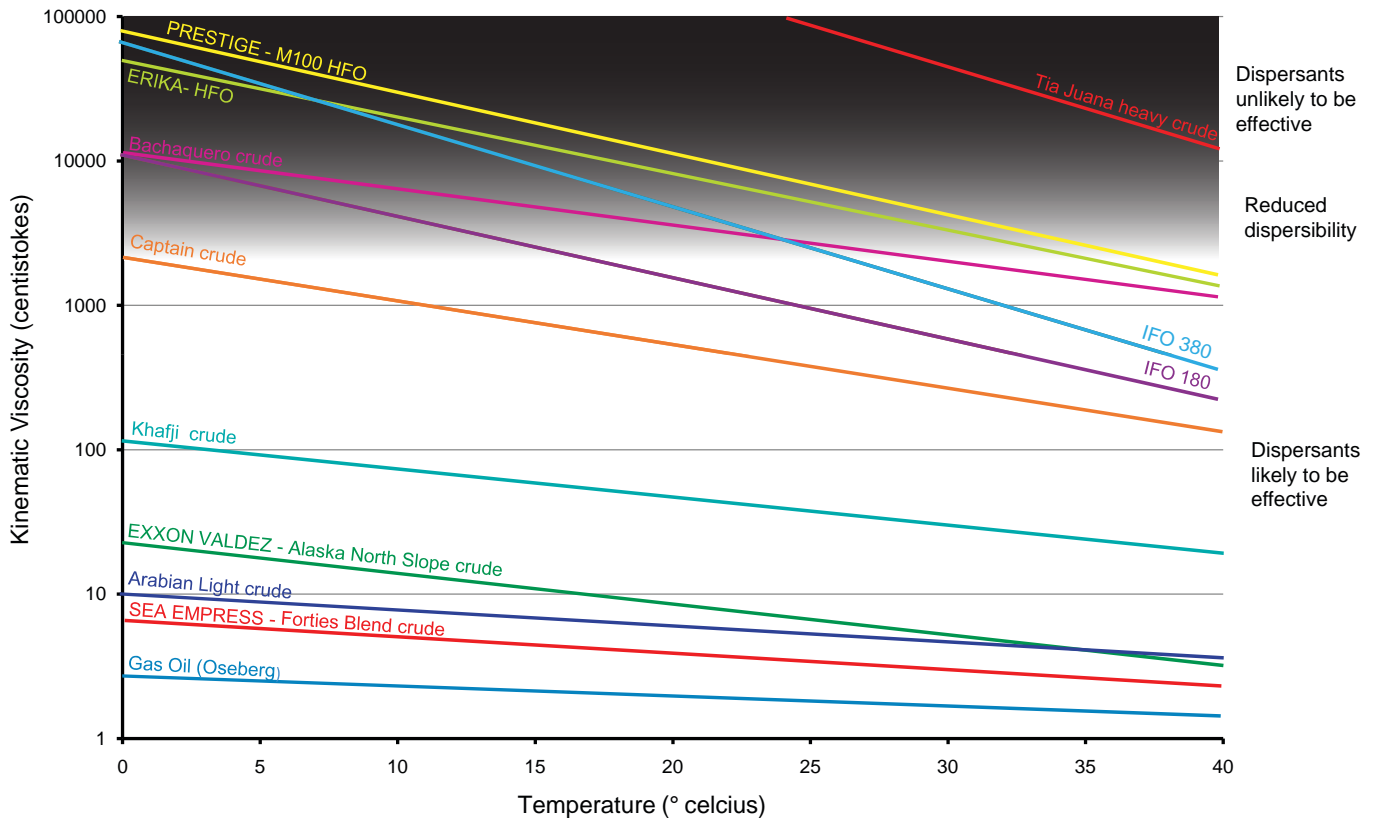
기름의 특성, 그리고 해상에서의 풍화에 의해 그러한 특성이 변화하는 방식은 유처리제의 사용이 성공적일 것인가를 판단하는데 중요하다. 기름의 점성도와 유동점은 기름이 얼마나 쉽게 분산될 것인가를 효과적으로 가늠할 수 있는 지표이다.

기름의 점성도가 증가하면 유처리제의 효과가 감소한다(그림 3 및 그림 4). 갓 유출된 저점도 내지 중점도 원유(ITOPF

방제기술정보문서 '해당기름 유출의 특성변화'에서 설명된 Group 2 및 Group 3 기름)는 일반적으로 대부분의 바다 온도에서 쉽게 분산되는 것으로 여겨진다. 그러나 점성도가 더 높은 기름(Group 4 기름)은 분산 상한선에 도달할 가능성이 있다. 일반적으로 대부분의 유처리제는 살포 당시 점성도가 5,000-10,000 cSt 이상인 기름에 효과를 발휘하지 못할 가능성이 있다. 유출유의 점성도는 주로 증발 및 에멀전화로 이루어진 풍화 효과로 인해 증가하게 된다. 이에 따라 갓 유출되었을 때 분산 가능한 기름이 이후에는 불가능해질 수 있다. 풍화 또는 시간의 흐름에 따른 기름 특성의 변화는 유처리제의 성공적인 살포가 제약을 받는다는 사실을 의미한다. '기회의 창', 다시 말해 가용 시간은 해당 기름의 종류 및 환경 조건에 따라 일반적으로 두세 시간에서 이삼 일 정도이다.

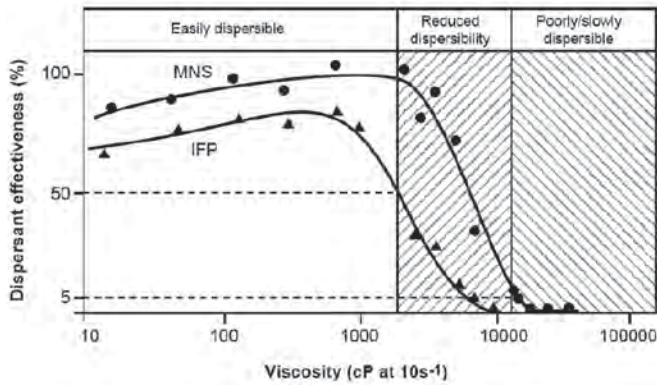
비슷한 이치로 유동점이 주위 온도보다 높은 기름은 가열된 상태에서 운송되는데, 이러한 기름이 유출되면 식으면서 점성도가 급속히 증가하여 반고체 상태가 되는 경우가 많다. 일반적으로 유동점이 해수면 온도와 비슷하거나 더 높은 기름은 분산이 불가능하다.

유동점이 높은 종류를 포함하여 점성도가 높은 기름은 자연적으로 또는 유처리제 살포에 의해 쉽게 분산되지 않는다. 기름의 기계적 저항성으로 인해 작은 기름방울들이 유막에서 떨어져 나오지 못하기 때문이다. 나아가 이러한 종류의 기름에 살포된 유처리제는 유막을 뚫지 못하고 씻겨 나가 수중에서 사라져 버리는데, 성공적인 분산 상태(그림 6)와 달리 흰색 플룸(plume)



▲ 그림 3: 기름 10종의 점성도와 바다 온도와의 관계. 이 그래프는 에멀전화로 인한 점성도 증가는 고려하지 않았다. Erika호(1999년 프랑스) 및 Prestige호(2002년 스페인)에서 유출된 기름을 포함한 고점도 기름은 일반적으로 분산되지 않는다. Sea Empress호(1996년 웨일즈) 및 Exxon Valdez호(1989년 알래스카)에서 유출된 기름을 포함한 여러 종류의 원유는 일반적으로 분산 가능하다. 가솔린과 같이 점성도가 더 낮은 기름은 일반적으로 유처리제를 사용하지 않고도 쉽게 분산(및 증발) 가능하다.



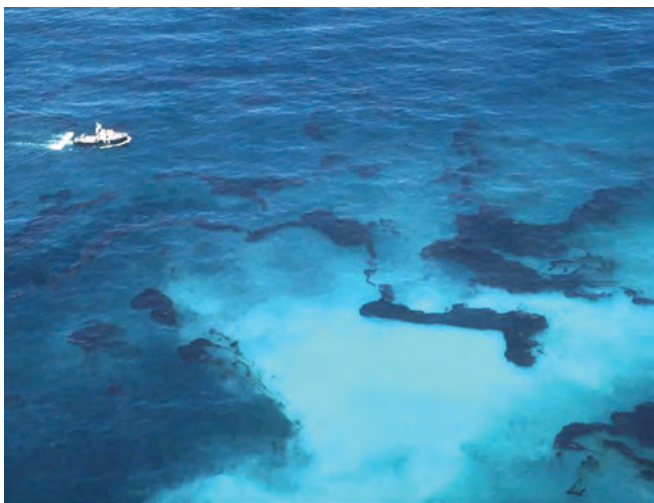


▲ 그림 4: 유처리제의 사용 효과와 다양한 점성도의 기름 및 에멀전 사이의 관계. 점성도가 5,000-10,000센티포이즈(cP) 인 기름은 분산시키기가 상대적으로 더 어렵고, 10,000 cP를 초과하는 기름은 일반적으로 분산되지 않는다. 그래프상의 두 곡선은 상이한 MNS 및 IFP 테스트 프로토콜을 통해 확보한 결과이다.(센티포이즈 = 센티스트로크 x 밀도)(사진 제공: SINTEF)

이 형성된다(그림 5). 유처리제의 제조법은 적용가능한 점성도의 범위를 넓히고 고점도 기름에 대한 효과를 향상시키기 위해 지속적으로 발전하고 있다. 예컨대 기름과의 접촉 시간을 늘려 용제의 침투를 촉진시키기 위한 겔형 유처리제가 개발되고 있다.

일부 기름, 특히 아스팔텐 함유량이 비교적 높고(>0.5%) 니켈/바나듐 농도가 15 ppm을 넘는 기름은 W/O(Water in Oil) 에멀전을 형성하기 쉽다. 그러나 에멀전이 안정적이지 않은 경우, 농축 유처리제는 유막을 파괴하여 액상에 가까운 기름과 물을 분리시킬 수 있으며, 이러한 기름은 유처리제를 재차 살포함으로써 분산된다. 에멀전이 성공적으로 파괴되는 경우, 빛을 반사하는 순수 기름 파편들이 관찰된다.

디젤유, 가솔린 및 등유와 같은 경질유는 에멀전화가 쉽게 되지 못하고 확산되어 해수면에서 얇은 유막(sheen)을 형성하는데, 유처리제를 사용할 필요 없이 급속히 증발하거나 분해된다. 경질유 또는 얇은 유막에 유처리제를 사용하는 것은 바람직하지 않다. 유처리제 방울들이 유막을 '뚫고' 들어가 기름의 '군집'



▲ 그림 5: 유처리제가 고점도 연료유를 효과적으로 방제하지 못했음을 보여주는 흰색 플룸. 기름은 영향을 받지 않은 상태로 남아 있다.

현상을 일으키기 때문이다. 수중에 있는 유처리제는 유막이 즉각적으로 재형성되도록 하며, 이때 깨끗한 바닷물로만 이루어져 있는 부분이 생기는데 이를 분산 효과로 오인하지 않아야 한다(그림 7). 석유에 사용하도록 제조된 유처리제는 팜유나 유채씨유와 같은 비석유계에는 효과가 거의 없거나 전무한 것으로 알려져 있다.

## 유처리제의 선택

유처리제는 다양한 제조법에 따라 생산되며 기름의 종류에 따라 효과가 다양하다. 특정 기름에 대한 효과의 순위를 매기기 위해 실험실 시험을 시행해 볼 수 있으며, 일부 국가에서는 생산 및 처리되는 기름의 종류를 알 수 있는 석유 생산 시설 및 오일 터미널의 담당자들로 하여금 해당 기름에 가장 효과적인 유처리제에 대한 연구를 실시하도록 요구한다. 그러나 연구 결과를 가지고 해상에서 처리해야 할 기름의 양을 추정할 때에는 주의가 요구된다. 실험실 환경에서는 해상에서와 정확히 동일한 조건을 만들어 내기가 어렵기 때문이다. 방제 계획의 일환으로 3유형 농축 유처리제와 기름을 1:20의 비율로 섞은 물질이 통상적으로 사용되며, 분사 장비는 이러한 비율에 맞도록 사전에 설정되어 있는 경우가 많다. 갓 유출된 기름의 경우에는 유처리제의 투입량을 줄일 수 있으며, 반대로 2회 이상의 살포가 필요하고 고점도 기름 또는 에멀전화한 기름이 있는 경우에는 증가시킬 수 있다.

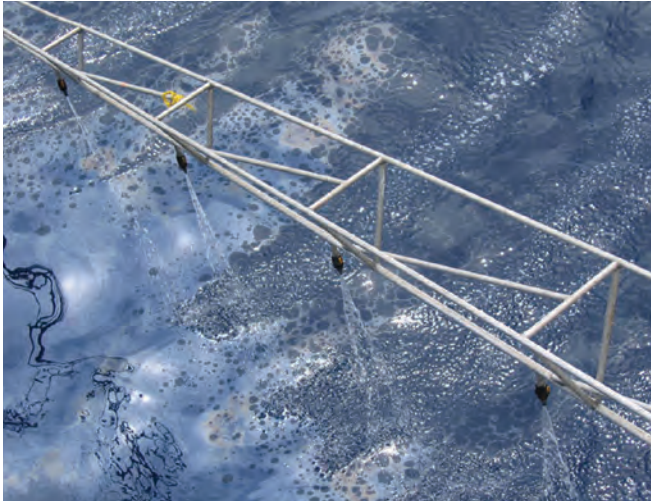
## 다른 방제 기법과의 상충여부

대형 사고 현장에서는 유처리제의 사용이 기타 방제 기법과 중복되거나 상충하지 않도록 하기 위해 모든 방제 조치 간의 조율이 필요하다. 예컨대 수중으로 분산된 기름은 오일뿔으로 포집하거나 유회수기로 회수할 수 없다. 또한 기름은 상대적 표면장력의 특성상 폴리프로필렌과 같은 여러 종류의 유흡착제에 부착한다. 기름의 표면장력이 유처리제로 인해 변화하면 유흡착제의 효과가 현저하게 감소하게 된다. 마찬가지로 친유성 유회수기는 유처리제와 함께 사용할 경우 악영향을 받게 된다.

## 유처리제의 살포 방식



▲ 그림 6: Sea Empress호 유출 사고 당시 Forties Crude에 유처리제를 살포한 직후 시작된 분산 과정(사진 제공: AEA Technology)



▲ 그림 7: 선박에 설치된 스프레이 암을 통해 얇은 유막에 유처리제를 살포함으로써, 기름의 분산 대신 군집 현상이 발생했다.



▲ 그림 8: 터그보트에 설치된 방수포를 통한 유처리제 살포. 유처리제가 고르지 못하게 퍼지고 바람의 영향을 받는 모습이다.

해상에 유출된 기름을 방제하기 위한 유처리제는 선박 또는 항공기를 통해 살포할 수 있다. 대형 다발항공기는 주요 외해 유출 현장에서 살포할 수 있는 유처리제를 다량으로 탑재할 수 있는 장점이 있지만, 선박, 헬리콥터, 경비행기 등과 마찬가지로 해안 근처의 비교적 규모가 작은 유출 현장에도 적합하다.

분사 시스템은 적정 크기의 유화제 방울을 분사할 수 있어야 한다. 방울의 크기는 기름의 영향과 증발 손실을 극복할 수 있을 정도여야 하지만, 기름/물 계면에 머물지 않고 유막을 뚫을 정도로 커서는 안 된다. 유화제 방울의 최적 크기는 직경 600-800  $\mu\text{m}$ 이다.

해수 또는 얇은 유막에 유처리제를 살포하는 것은 비효과적이고 값비싼 자원의 낭비이다. 따라서 기름이 풍화하거나 바다 상태가 바뀌기 전에 유막의 가장 두꺼운 부분을 신속히 조준해야 한다.

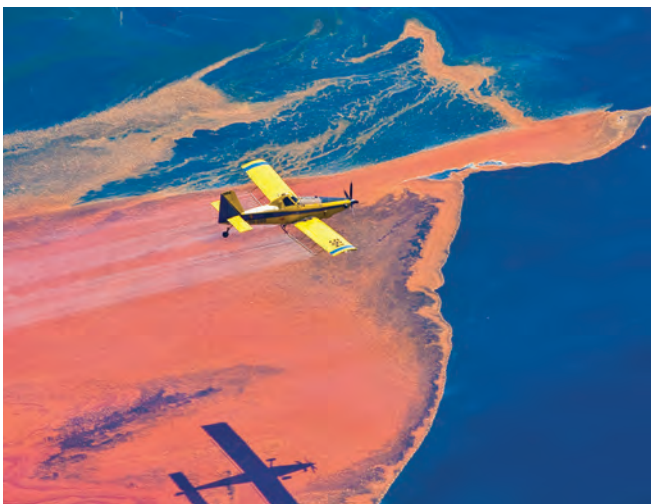
## 선박 살포

선박에서 분사되는 유처리제는 스프레이 암에 설치된 노즐을 통해

살포된다(그림 7). 디젤 펌프 또는 전기 펌프는 유처리제를 저장 탱크로부터 스프레이 암으로 이송하는데, 스프레이 암에 설치된 노즐은 암의 길이를 따라 유처리제 방울들을 단일 패턴으로 살포하도록 조정되어 있다. 스프레이 유닛은 이동식이거나 선박에 영구 설치되는 방식이며, 유처리제를 회석하지 않거나 해수와 회석한 뒤 살포할 수 있는 시스템을 갖추고 있다.

스프레이 암은 선박의 최대한 전방으로 설치되는 경우에 가장 큰 효과를 발휘한다. 이물 쪽의 파도가 살포 패턴의 폭, 다시 말해 분사 폭을 넘어서는 지역으로 기름을 밀어내는 것을 피할 수 있기 때문이다. 스프레이 암을 선수에 설치한 선박은 항해 속도가 빠르며, 보통 건현이 선수쪽에서 더 높기 때문에 훨씬 긴 스프레이 암을 설치할 수 있게 된다. 이를 통해 한정된 양의 유처리제를 가지고도 조우율(encounter rate), 다시 말해 처리 가능한 기름의 양을 최대화할 수 있다. 그러나 스프레이 암이 너무 길면 선박이 너울성 파도에 요동을 칠 때 손상을 받게 된다.

소방 호스나 방수포(그림 8)는 해수로 회석된 농축 유처리제를 살포하는 데 사용되는 경우가 있다. 그러나 흐름 속도가 너무



▲ 그림 9: 외해에서 유출된 원유를 방제하기 위해 농업용 항공기의 뒷날개에 장착된 스프레이 붐으로 유처리제를 살포하고 있다. (사진 제공: Mark Hamilton Photography)



▲ 그림 10: 다발항공기로 유처리제를 살포하는 모습. 이 경우, 천해에서의 살포가 효과적일 것으로 판단되었다.





▲ 그림 11: 현수식 스프레이 시스템을 갖춘 헬리콥터가 원유 유출 현장으로 접근하고 있다. 효과적인 방제가 이루어지기 위해서는 저고도에서 유처리제를 살포해야 한다.(사진 제공: 인도 해안경비대)

빠르고 단일 패턴으로 유처리제를 분사하기가 어렵기 때문에 유처리제를 최적의 방식으로 희석하기가 어렵다. 또한 분사기의 압력이 높기 때문에 유처리제가 유막을 뚫을 위험이 있다. 따라서 방수포는 특정 목적에 부합하도록 조정하지 않는 경우 유처리제를 낭비하게 되고 살포 효과가 없어진다.

선박을 통한 유처리제 살포는 이용과 탑재가 용이하고 특정 유막 부위에 정확하게 살포할 수 있다는 장점이 있다. 또한 항공기에 비해 비용상 장점이 있고 훨씬 많은 양의 유처리제를 탑재할 수 있다. 그러나 심각한 단점 또한 존재한다. 특히 대규모 유출 사고의 경우, 처리율이 낮고 가장 두꺼운 유막의 위치를 선교에서 파악하기가 어렵기 때문이다. 그러나 후자의 문제는 정찰기의 정보를 받음으로써 부분적으로 해결 가능하다.

## 항공 살포

항공기를 통한 유처리제 살포는 신속한 방제, 높은 방제 처리율, 유처리제의 사용 최적화 등의 장점이 있다. 일반적으로 3가지 유형의 고정익 항공기가 사용된다. 첫 번째 유형은 농약 살포용 항공기(그림 9)로서, 유처리제 살포를 위해 약간의 조정이 필요하다. 두 번째 유형은 유처리제 살포를 위해 특별히 개조된 항공기이며, 세 번째 유형은 모듈식 탱크를 갖춘 화물수송기이다(그림 10). 헬리콥터는 스프레이 암이 고정되도록 개조된 종류가 있는가 하면 현수식 버킷 스프레이 시스템을 갖춘 유형도 있는데, 상당한 정도의 조정 작업이 요구되지는 않는 편이다(그림 11). 헬리콥터는 외해에서의 작업을 위해 선박 또는 외해 오일 플랫폼에서 유처리제를 재차 탑재할 수 있는 능력을 갖추고 있다.

어떤 사고에 가장 이상적인 항공기 종류는 1차적으로 유출 사고의 규모와 위치에 따라 결정되지만, 현지의 가용성이 가장 중요한 요인이 될 수 있다. 항공기는 저고도(대형 항공기의 경우, 일반적으로 15-30 m)에서 비교적 느린 속도(25-75 m/s)

로 안전하게 작업할 수 있어야 하고 기동성이 높아야 한다. 그 밖에도 연료 소모량, 화물 탑재량, 유출 지점과 작업 기지 간 거리, 왕복 시간, 짧은 활주로 또는 가설 활주로의 이용 능력 등은 적절한 항공기를 선택할 때 중요하게 고려해야 할 사항이다.

3유형 유처리제는 투입량이 적어(일반적으로 유처리제와 기름의 비율이 1:20) 한정된 탑재량을 최대한 활용할 수 있기 때문에 공중 살포에 가장 적합하다. 항공기 살포 시스템은 저장 탱크로부터 스프레이 암으로 유처리제를 제어 비율로 이송하는 펌프로 구성되어 있다. 유처리제는 스프레이 암을 따라 일정 간격을 위치한 풍력 회전 유닛 또는 압력 노즐을 통해 분사되는데, 이들 장치는 유처리제 방울을 최적의 크기로 살포하도록 설계되어 있다. 이들 두 유형의 분사 유닛 모두 대부분의 경비행기와 헬리콥터에 사용할 수 있지만, 대형 항공기는 압력 노즐을 사용한다.

## 해안가 살포

해안가에서 대량의 기름이 회수되고 나면 유처리제를 일종의 정화제로 사용하여 바위, 방파제 및 기타 인공 구조물과 같은 단단한 표면에 남아 있는 기름을 제거한다. 일반적으로 유처리제는 손으로 작동시키는 배낭형 시스템으로 살포되며, 이후 유처리제가 묻은 기름을 강하게 쓸어낸 뒤 해수로 씻어낸다. 분산된 기름은 회수할 수 없기 때문에, 유처리제의 사용이 승인된 해안가는 일반적으로 환경적 민감성은 낮지만 위탁 시설로서의 가치가 높은 지역으로 국한된다. 한편 해안가 정화를 위해 특별히 제조된 제품도 사용할 수 있다. 그러나 이들 제품은 기름을 회수해야 한다는 점에서 유처리제와는 다른 방식으로 작용한다. 그리스 제거제는 선박의 기관실 세척을 위해 사용되지만, 대부분의 제품이 유처리제보다 독성이 강하기 때문에 해상 또는 해안가 정화제로 사용하지 않아야 한다.

## 살포량

유처리제의 적정 살포량(application rate)을 계산하려면 효과적인 분산을 위한 유처리제 대 기름의 비율을 결정해야 한다. 이 비율은 1유형 유처리제의 1:1에서 시작하여 3유형 유처리제의 1:50에 이르기까지 다양한데, 살포 방식, 유처리제의 종류, 기름의 종류, 환경 조건 등에 따라 결정된다. 살포량은 다음과 같은 두 단계로 계산된다.

1. 유막의 평균적인 두께와 범위에 대한 관찰 및 가정에 근거하여 방제 대상 기름의 양을 추정한다.
2. 요구되는 투입량(유처리제:기름 비율)의 달성에 필요한 유처리제의 양을 계산한다.

유막 내 기름의 두께는 상당히 다양하지만 갯 유출된 원유의 대부분은 두세 시간 내에 확산되어 전반적인 평균 두께가 0.1 mm( $10^{-4}$  m)인 것으로 알려져 있다. 이러한 두께는 방제 계획을 수립하기 위한 근거로 사용되는 경우가 많으며, 1헥타르( $10,000$  m<sup>2</sup>,  $10^4$  m<sup>2</sup>)에 있는 기름의 양을 다음과 같이 계산하는 데 사용된다.

$$10^{-4}\text{m} \times 10^4\text{m}^2 = 1\text{m}^3 \text{ (1,000리터)}$$

기름의 양을 추정하기 위한 추가 정보는 ITOPF 방제기술정보문서 '기름오염 항공탐색 지침'에 수록되어 있다.

1:20 투입 비율의 경우, 요구되는 유처리제의 양은 다음과 같다.

유처리제의 양 = 기름 1,000리터 ÷ 20 = 50리터

그러므로 살포량은 50리터/헥타르(4.5영국갤런/에이커)가 된다. 방출량(discharge rate)은 살포량(리터/m<sup>2</sup>)에 항공기나 선박의 속도(m/s)와 분사 폭(m)을 곱하면 계산할 수 있다.

예컨대 분사 폭이 15 m이고 비행 속도가 45 m/s(90노트)인 항공기에서의 살포량이 50 리터/헥타르(0.005리터/m<sup>2</sup>)가 되려면 방출량은 다음과 같아야 한다.

방출량 = 0.005리터/m<sup>2</sup> x 15 m x 45 m/s = 3.37리터/s(약 200리터/분)

따라서 투입 비율 1:20을 달성하고 0.1 mm 두께의 유막을 처리하려면 스프레이 시스템 펌프의 방출량이 분당 200리터여야 한다. 선박 살포의 경우도 마찬가지로 방출량을 계산할 수 있다.

실제로는 유막 내 기름의 두께가 부위별로 현저한 차이를 보이기 때문에 최적의 투입량을 정확히 판단하기는 불가능하다. 현실적이고 가장 효율적인 해결책은 유막 중에서 가장 두꺼운 부분을 목표로 삼는 것이다. 위에서 계산한 바와 같이 헥타르당 50리터 정도의 살포량이 여러 경우 적절한 것으로 밝혀졌지만, 유막에 추가적으로 영향을 미칠 수 있는 환경 조건 및 기름의 종류를 고려하기 위한 조정 작업이 필요할 수 있다. 살포량은 펌프의 방출량 또는 선박이나 항공기의 속도를 바꿈으로써 조정할 수 있다. 또한 유막의 방제 처리를 위해 요구되는 유처리제의 양을 추정할 때에는 가장 두꺼운 유막을 목표로 삼을 때의 정확도를 고려해야 하며, 어느 정도의 과도한 분사는 허용해야 한다.

## 물류 및 통제

유처리제의 살포는 숙련된 작업 인원과 철저한 물류 준비를 요구하는 전문적인 작업이다. 살포 작업을 가장 효과적으로 수행하려면 유처리제를 분사하는 선박이나 항공기를 유도하고 조율 작업을 수행할 수 있는 정찰기를 활용하는 것이 바람직하다. 정찰기 탑승 인원은 기름이 가장 많이 집중되어 있는 지점과 가장 위험한 유막을 식별할 수 있어야 한다. 또한 유처리제를 분사하는 항공기나 선박의 작업 인원들과의 효과적인 커뮤니케이션을 통해 이들 인원을 목표로 인도하고, 공중 살포의 경우 유처리제의 과도 분사 및 낭비를 최소화하기 위해 분사의 시작 및 종료 시점을 식별할 수 있도록 해당 항공기를 인도해야 한다. 또한 분사 작업이 진행되는 과정에서 정찰기는 살포의 정확성 및 방제 처리의 효과를 판단하기 위해 사용할 수도 있다. 이들 기능은 특히 유처리제를 대량으로 급속히 살포할

수 있는 대형 다발항공기를 인도할 때 중요하다. 효과적인 실패를 위해 필요한 저고도에서, 특히 유막이 파편화되어 있는 경우에는 작업 인원들이 기름, 얽은 유막 및 해수를 구별하기가 어려울 수 있다.

항공 살포 작업 시에는 안전을 위해 비행 제한 구역을 설정할 필요가 있다. 또한 해상에서 저고도로 비행하는 것은 지극히 어려운 작업이기 때문에 구조 요원들이 필요할 수 있다. 아울러 항공기를 정기적으로 점검함으로써 유처리제로 인해 특히 헬리콥터의 꼬리 회전 날개에 있는 윤활유가 오염되거나 비행 제어 시스템의 고무 부품이 손상되지 않는지 확인해야 한다. 항공기를 담수로 자주 세척하여 유처리제와 바닷물을 제거하는 것이 바람직하다.

주간에 최대한 오랫동안 분사 작업을 지속하려면 지상에서의 효과적인 준비 작업이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 야간에 항공기와 분사 장비를 정기적으로 유지 보수하는 작업이 요구된다. 유막을 방제 처리하기 위해서는, 특히 지속적인 살포가 이루어지는 경우에 1회의 탑재량만으로는 불충분할 수 있으므로 유처리제의 추가 공급 물량을 마련하여 사용하기 편리한 장소에 보관함으로써, 지연 시간을 최소화한 상태에서 선박이나 항공기에 재공급할 수 있어야 한다. 아울러 항공기의 연료 보급, 그리고 대용량 펌프나 탱크로리와 같이 선박 또는 항공기에 탑재해야 할 장비를 고려해야 한다.

유처리제를 장기 보관하려면 플라스틱 드럼, 저장 탱크, 1m<sup>3</sup> IBC(Intermediate Bulk Container) 등이 바람직하다(그림 12). 미개봉 상태로 보관되어 있는 유처리제는 직사광선을 받지 않는 경우 여러 해 동안 보관 할 수 있다. 그러나 개봉 후에는 정기적으로 사용 효과를 시험해야 한다. 제조업체에서는 매년 육안 검사를 실시하고 제품의 밀도, 점성도, 인화점 등 주요 물리적 특성을 점검하도록 권장하고 있다. 이러한 물리적 특성이 현저하게 변했거나 사용 기한이 지난 경우, 유처리제의 효과에 대한 실험이 수행되어야 한다. 종류, 제조 연도 및 브랜드가 다른 유처리제를 저장 탱크나 컨테이너에 한데 섞어서 보관하는 방식은 유처리제의 점성도가 변하거나 일부 성분이



▲ 그림 12: 1 m<sup>3</sup> IBC(Intermediate Bulk Container)를 사용하면 유처리제의 보관 및 취급이 용이해진다.(사진제공:미국해안경비대)



침전 또는 응고될 수 있으므로 피해야 한다. 해수와 섞여 희석된 유처리제는 보관하지 않아야 한다. 대부분의 유처리제는 섭씨 -15도와 30도 사이가 최적의 보관 온도이며, 제조업체들은 유처리제 보관 시 온도 변화를 최소화하도록 권고하고 있다. 기온이 매우 낮은 경우, 일부 유처리제는 점성도가 지나치게 높아져서 분사 노즐을 통과하지 못할 수 있다.

## 유처리제의 효과에 대한 모니터링

화학적 분산 효과는 지속적으로 모니터링되어야 하며, 유처리제가 효과를 발휘하지 못하게 되면 방제 작업을 즉시 종료해야 한다. 분산 효과를 확인하려면 시각적 관찰이 핵심적이지만, 악천후, 침전물이 많은 바다, 옅은 색의 기름을 처리하는 경우, 열악한 조명 등으로 인해 관찰이 어려워질 수 있다. 또한 야간에 유처리제를 분사하고 시각적으로 관찰하는 것은 비실용적이다.

유처리제의 살포가 효과를 거두려면 유출 사고 직후 기름이 비교적 신속히 분산됨으로써 해안가 및 민감 자원에 도달할 위험이 감소해야 한다. 외형상의 변화는 분사 직후 공중에서 시각적으로 관찰할 수 있다. 기름의 외형 변화가 없거나 유막이 줄어들지 않는 경우, 또한 유처리제가 기름에서 빠져나와 수중에 유백색 플룸이 형성되는 경우(그림 5)는 유처리제가 효과를 거두지 못하고 있음을 보여주는 징표이다. 마찬가지로 넓은 지역으로 기름이 확산되거나 광범위하게 분산된 경우, 유처리제를 살포하더라도 오염 손상을 현저히 줄이기 위해 해수면으로부터 충분한 양의 기름을 제거하지 못할 수 있다.

유처리제의 효과는 자외선 형광법(UVF)을 통해 수중 분산기름의 농도에 대한 '실시간' 데이터를 활용하여 모니터링할 수 있다. 시료 채취선으로 하나 이상의 형광계(그림 13)를 예인하여 유막 아래 1 m 이상의 깊이에서 기름 농도의 변화 정도를 측정한다. 유처리제 살포 전에 센서에 의해 측정된 농도에 비해 농도가 현저하게 증가한 경우에는 기름이 분산되었음을 가리킨다(그림 14). 그러나 UVF로는 수중에 분산되어 있는 기름을 정량적으로

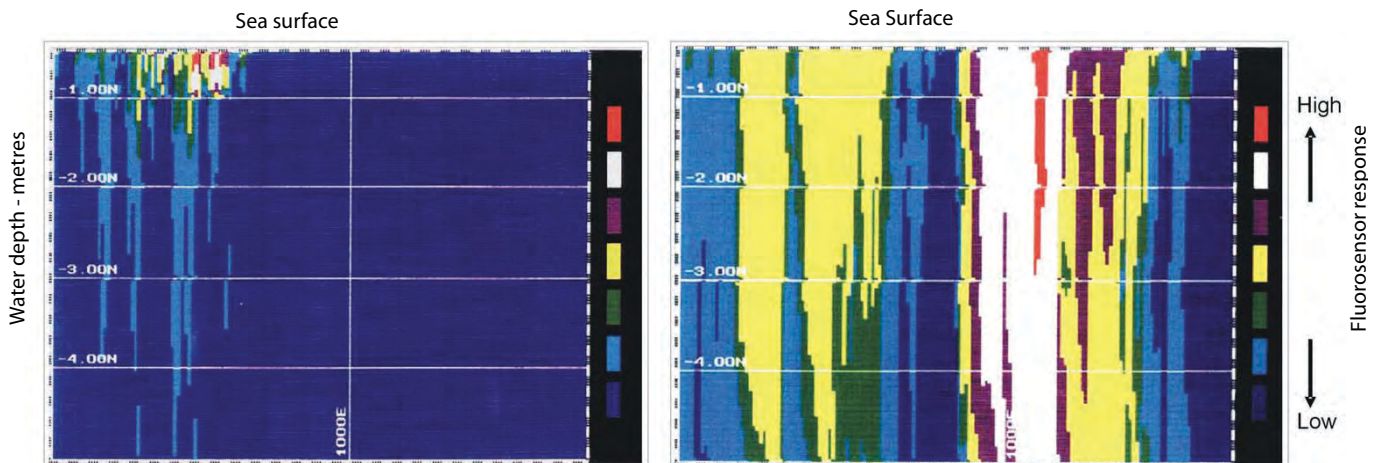


▲ 그림 13: 유처리제의 사용 효과를 측정하기 위해 예인식 형광계를 준비하고 있는 모습(사진 제공: 미국 해안경비대)

측정할 수 없으므로 시각적 관찰 도구와 함께 사용하여 방제 효과의 달성 가능 여부를 판단해야 한다.

## 환경 고려 사항

유처리제의 사용은 이따금 언론 매체나 공론의 장 등을 통해



▲ 그림 14: 유막 표면 아래 수심 0.5-5 m 위치에 있는 기름에 대한 형광계 반응. 좌측 그래프는 유처리제의 살포 전이고, 우측 그래프는 살포 후의 결과이다. 방제 처리 후 기름이 급속히 분산 및 희석되는 것을 알 수 있다.(사진 제공: AEA Technology)



▲ 그림 15: 유처리제를 사용하면 해수면에서 기름이 신속히 제거함으로써 기름 오염에 취약한 바닷새들을 보호하는데 도움이 된다.



▲ 그림 16: 산호초와 같은 민감 지대에서의 유처리제 사용은 특별한 경우가 아니라면 권장되지 않는다. 실령 사용하더라도 환경에 미칠 수 있는 영향을 신중하게 고려한 뒤여야 한다.

광범위한 논쟁을 불러일으킬 수 있는 주제이다. 해안가 오염을 방지하거나 감소시킴으로써 민감 자원에 대한 잠재적 영향을 최소화할 수 있는 수단으로 간주할 수도 있는 반면, 또 하나의 오염 물질을 환경에 추가하는 것으로 여겨지기도 한다. 유처리제의 제조법은 향상되어 왔지만 유처리제/기름 혼합물의 유독성이 해양 동식물에 미치는 영향은 중요한 환경 문제로 다루어지는 경우가 많다. 일부 국가에서는 유처리제가 쉽게 생분해될 수 있는 방법에 관심을 갖고 연구를 진행 중이다. 아울러 여러 국가에서는 유처리제의 효과와 유독성을 모두 고려하기 위해 유처리제의 사용에 대한 승인 절차를 개발하고 있다. 한 국가에서 승인된 제품이 다른 국가에서는 승인받지 못할 수 있으므로, 유처리제의 사용에 앞서 국가별 승인 제품 목록을 적절히 참고해야 한다.

유처리제의 살포 후 기름 농도의 상승은 일반적으로 수심 10 m 미만의 상층부에서만 관찰되며, 해수의 움직임에 의해 희석되면서 농도가 급속히 감소한다. 원유에 대한 연구 결과에 따르면 유처리제 살포 직후 유막 바로 밑에서는 30-50 ppm 범위의 기름 농도가 예상되지만, 두세 시간 후에는 10 m 정도의 수중 상층부에서 1-10 ppm 정도로 농도가 감소한다. 따라서 해양 생물에 대한 노출은 ‘만성’ 이라기보다는 ‘급성’ 의 특징을 보이며, 한정된 노출 시간은 장기적 악영향의 가능성을 감소시킨다. 그러나 수심이 얕은 지역에서 유처리제를 분사하는 것은, 분산된 기름 플룸이 해수 교환작용을 통해 충분히 희석되는 경우가 아니라면 바람직하지 않다.

여타 자원의 과도한 손상 위험 없이 특정 자원을 보호하기 위해 유처리제를 사용해야 하는가를 판단하려는 과정에서 희석 잠재력의 추정은 유용한 근거가 될 수 있다. 최대 농도 및 해당 농도의 유지 시간을 추정할 때 고려해야 할 요인으로는 수심, 단위 면적당 기름의 양, 살포 현장과 민감 지역 간 거리, 조류의 방향 및 속도 등이 있다.

유처리제는 기름을 수면으로부터 제거함으로써 바닷새들의 기름 오염(그림 15), 그리고 해수 소택지, 맹그로브, 관광 해변 등

해안가의 민감 지역 오염을 최소화한다. 그러나 수면에서 제거된 기름은 수중으로 이동하므로, 이렇듯 분산된 기름이 야기할 수 있는 위험과 수면에서의 제거가 가져다주는 장점을 잘 비교해 보아야 한다. 자유 유영성 어류는 수중에서 기름을 감지하고 회피할 수 있는 능력이 있기 때문에 잠재적 노출 위험이 감소될 수 있다. 그러나 산호(그림 16), 해중 식물, 어류 산란 장소 등은 분산된 기름에 대단히 민감할 수 있기 때문에 이들 자원이 영향을 받을 가능성이 있다면 유처리제의 사용이 권장되지 않는다. 마찬가지로 어패류 양식장이나 그 밖에 수심이 낮은 어장 부근에서는 오염의 위험이 있으므로 유처리제의 사용이 권장되지 않는다. 또한 산업용 취수 근처에서는 기름이 취수구로 유입될 위험이 크므로 유처리제의 사용이 바람직하지 않다.

유처리제의 사용 여부는 명확하게 결정할 수 있는 문제가 아니며, 다양한 방제 방법(자연적 과정 포함)의 장단점, 비용 효과, 오염 손상으로부터 다양한 자원을 보호하기 위한 우선순위 문제 등을 고려하여 균형 잡힌 판단을 내려야 한다. 유처리제의 살포에 앞서 관계 당국과의 협의하에 환경적, 경제적 순편익의 균형 있는 평가가 필요한 경우가 많다. 기름의 풍화 및 민감 지역으로의 이동으로 인해 유처리제 사용 시간은 제약을 받을 가능성이 있다. 유출 사고 직후, 시간 지연을 방지하기 위해서는 유처리제의 사용 가능성 여부, 그리고 사용 가능한 경우 정확한 사용 상황에 대해 유출 방제 계획의 수립 과정에서 합의되어야 한다.

## 방제 계획

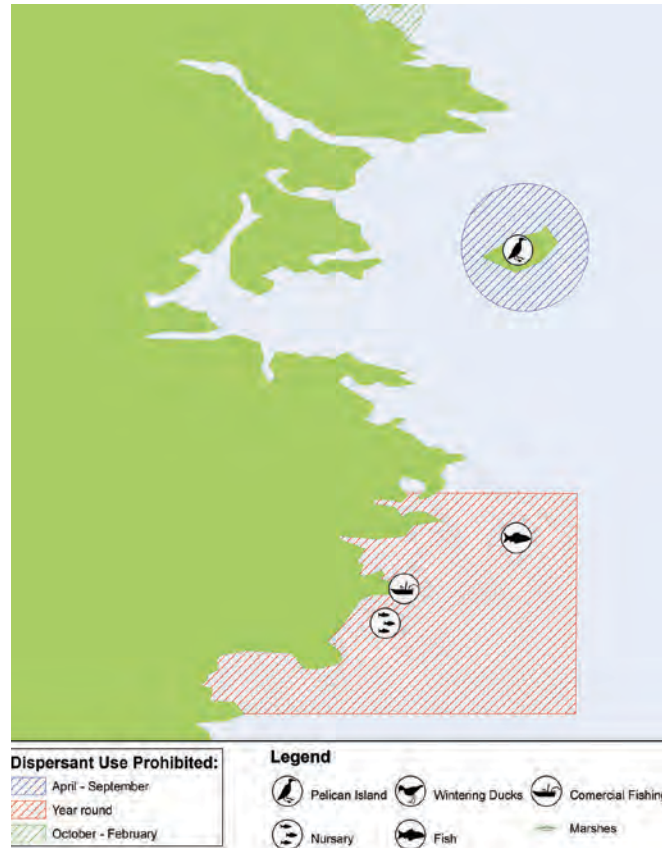
방제 계획의 수립 과정에서 고려해야 할 사항으로는 유출 사고와 관련된 가능성이 있는 기름의 종류, 해당 기름에 대한 유처리제의 효과, 해당 지역의 민감 자원, 물류 등이 포함된다. 물류 운용은 주로 유처리제의 확보, 분사 장비, 선박, 항공기, 가설 활주로, 연료 보급 능력, 중대한 사고 발생 시 필요할 수 있는 국제적 지원과 관련된 통관 문제 등이 포함된다. 민감 지역이 표시된 지도는 민감성에 영향을 미치는 계절적



요인들을 나타낼 수 있기 때문에 유처리제의 사용 가능성 여부와 사용 시기 및 장소를 파악하는 데 도움이 된다. 예컨대 철새들은 연중 특정 시기에 보이는데, 철새들이 부유 기름의 피해를 입을 위험을 줄이기 위해 천해에서의 유처리제 사용 관련 제약을 보유하고 유처리제 살포를 허용할 수 있다(그림 17). 또한 유처리제의 효과적인 방제 능력을 유지하기 위한 재정적 지원 문제도 고려해야 한다. 이들 사항에 대한 논의의 결과는 방제 계획에 명시되어야 한다.

여러 국가에서는 관계 당국의 승인하에 유처리제를 사용하도록 규정하고 있다. 방제 담당자들은 유처리제 사용과 관련된 정책을 숙지하는 것이 중요하다. 사전 동의가 없거나 법규에 부합하지 않는 방식으로 유처리제를 사용하는 경우에 분쟁이 발생하거나 벌금이 부과될 수 있기 때문이다. 일부 국가에서는 사용 효과 및 유독성 시험 결과에 근거한 사용 승인 유처리제의 목록을 관리하고 있다. 또한 유관 당국은 기름 취급 시설 또는 항구에 대한 사전 승인을 통해, 특정 기준을 충족하고 있다는 조건하에 추가적 협의 없이 유처리제를 사용할 수 있도록 허용하고 있다.

교육 훈련 및 실무 연습은 유처리제의 사용을 위한 계획의 핵심적인 부분이며, 이는 기름 유출 방제 작업의 모든 측면에 적용되기도 하다. 작업 인원은 유처리제의 살포 및 안전성에 관한 포괄적 교육훈련을 받아야 한다. 또한 자원 동원 및 분사 장비 배치에 대한 훈련을 정기적으로 실시해야 한다.



▲ 그림 17: 환경민감도는 방제 계획에서 유처리제의 사용 가능성 및 사용 장소와 시기를 판단하고자 할 때 사용되는 경우가 많다. 예시된 지도를 보면 적색 지역에서는 연중 어업이 진행되기 때문에 유처리제의 사용이 금지된다. 그러나 펠리컨 아일랜드(적색 지역)에 위치한 새 군락 주변은 기름을 방제하기 위해 계절에 따라 선승인된다. 표착유에 매우 민감한 맹그로브지역 또는 습지를 보호하기 위한 목적 등의 특별한 상황에서는 본토와 가까운 천해에서의 유처리제 사용이 허가될 수 있다.

## Key Point

- 유처리제는 기름의 자연적 분해를 촉진시킨다. 이는 유막을 분해하여 수많은 작은 기름방울을 생성시킨 뒤 수중에서 신속히 희석되고 궁극적으로 생분해되도록 함으로써 가능하다.
- 대부분의 유처리제는 고점도 및 고착화된 에멀전기름은 분산시키지 못한다.
- 얇은 유막에 유처리제를 분사하는 것은 비효과적이며 자원의 부적절한 사용이다.
- 해상에 유출된 대부분의 원유와 일부 연료유의 경우, 유처리제의 사용이 효과를 발휘할 수 있는 짧은 기회가 존재하므로 신속하고 효과적으로 계획된 방제 작업이 필수적이다.
- 항구 근처에 소규모로 유출된 기름의 방제에는 선박이 적합하지만, 중대한 외해 기름 유출 사고의 경우에는 대형 다발항공기가 더욱 효과적일 수 있다.
- 관찰 결과에 따르면, 외해의 수중 분산 기름은 시간이 경과하면서 해양 생물에 장기적 악영향을 미칠 수 있는 수준 미만으로 농도가 감소한다.
- 유처리제는 바닷새와 같이 수면에 접촉하는 동물 및 맹그로브와 같은 민감 연안 자원의 오염 손상을 신속하게 그리고 효과적으로 최소화할 수 있다.
- 분산된 기름 플룸이 산호, 패류 양식장, 산업용 취수구 등의 민감 자원을 손상시킬 수 있는 지역에서는 유처리제를 살포하지 않아야 한다.
- 효과적으로 준비 및 실행되는 방제 계획, 그리고 유처리제의 사용에 대한 명확한 정책은 유처리제 작업이 효과적으로 이루어질 수 있는 가능성을 크게 높인다.

## ITOPF 방제기술정보집 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](mailto:central@itopf.org)  
 Web: [www.itopf.org](http://www.itopf.org)

#### 번역기관



### 해양경찰청

인천광역시 연수구 해돋이로 130  
 Tel: 032-835-2293 Fax: 032-835-2991  
 Web: [www.kcg.go.kr](http://www.kcg.go.kr)



### 해양환경관리공단

서울특별시 강남구 삼성로610  
 (삼성동 71번지 해공빌딩)  
 Tel: 02-3498-8500 Fax: 02-3462-7707  
 Web: [www.koem.or.kr](http://www.koem.or.kr)

※ 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.