

# 해상 유출기름의 특성변화

방제기술정보문서

2



# 서론

해상에서 유류가 유출되면 다양한 물리적, 화학적 변화가 발생하며, 유출유의 일부는 해수표면에서 소멸되지만, 오래 지속되는 것도 있다. 해양환경에서 유출유의 거동 특성은 유출량, 유류의 초기 물리적, 화학적 특성, 기후, 해상 상태, 해상에서의 유류 잔존 여부 등과 같은 요인들에 의해 결정된다.

일련의 과정들과 시간에 따라 유류의 특성, 조성 및 거동 변화에 이들이 미치는 상호작용에 대한 이해는 유류유출 방제의 모든 측면에서 기초가 된다. 예를들면, 유류가 자연적 소멸(natural dissipation)로 인해 취약한 자원(vulnerable resources)에 피해를 주지 않는다고 예측되면 정화작업은 필요하지 않을 것이다. 적극적인 방제가 필요할 때, 유류의 유형과 거동 특성이 가장 효과적인 방제 방법을 결정한다.

본 기술서는 ‘풍화작용’으로 알려진 유출유에 작용하는 다양한 자연 과정의 복합적인 영향을 기술하고 있다. 유류가 해양환경에서 지속될 것인지를 결정하는 요인들은 방제 작업의 영향과 함께 고려된다. 해양에서 유출유의 거동 특성은 방제의 모든 측면에 중요한 영향을 미치기 때문에, 결과적으로 본 기술서는 ITOPF 방제기술정보집의 다른 부분들과 함께 살펴보아야 한다.

## 유류의 특성

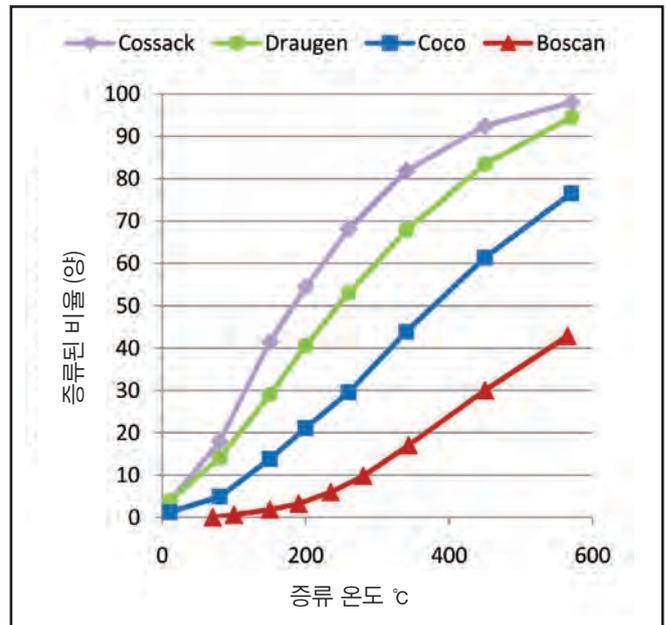
다양한 장소에서 생산되는 원유들은 그 물리적, 화학적 특성이 매우 다른 반면에, 많은 정제품들은 원유 생산지역과 상관없이 뚜렷한 특성을 갖는 경향이 있다. 정제과정에서 다양한 비율의 비경질성 유류(residue)와 경질성 유류를 혼합한 연료유(Intermediate, HFO)는 그 특성들이 상당히 다르다.

해상에서 유출된 유류의 거동과 지속성에 영향을 미치는 주요 물리적 특성에는 비중, 증류 특성, 증기압, 점도, 유동점이 있다. 모든 물리적 특성들은 휘발성분의 비율과 아스팔텐, 레진, 왁스 함량과 같은 화학적 조성에 따라 결정된다.

유류의 **비중 또는 상대적 밀도**는 비중이 1인 순수한 물(pure water)에 대한 상대적 밀도이다. 대부분 유류는 일반적으로 약 1.025의 비중을 갖는 해수보다 밀도가 낮거나 가볍다. °API는 일반적으로 원유와 석유제품의 비중을 나타내는데 사용되며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{specific gravity}} - 131.5$$

비중은 유류의 부유 여부를 결정할 뿐만 아니라, 다른 특성들을 나타낼 수도 있다. 예를 들어, 비중이 낮은 (높은 °API) 유류는 높은 비율의 휘발성분을 함유하고 낮은 점도를 갖는 경향이 있다.

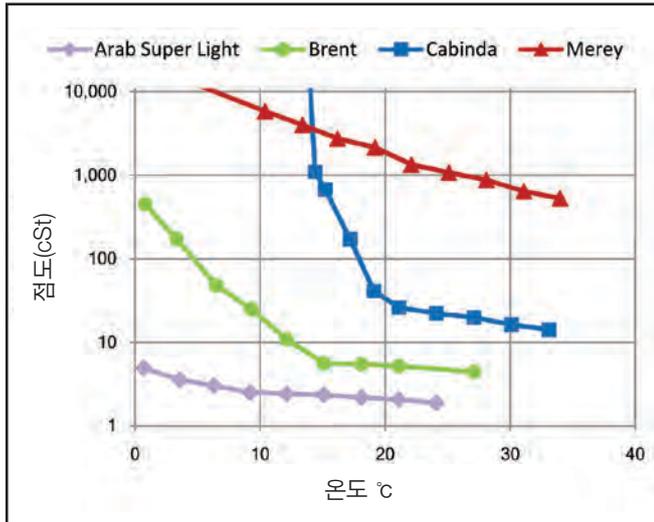


▲ 그림 1: 4가지 원유의 증류 곡선. 최대온도 이상에서 남아있는 기름은 주로 잔류물이다. 자료는 원유 분석 결과(crude oil assays).

유류의 증류 특성은 휘발성을 나타낸다. 휘발 과정에서 유류의 온도가 올라감에 따라 다양한 성분들이 잇따라 끓는점에 도달하여 증발하고, 그런 다음에 냉각되어 응축된다. 증류 특성은 주어진 온도범위 내에서 정제되는 원유 기름(parent oil)의 비율로 나타낸다(그림1). 역청(bituminous), 왁스, 아스팔트의 잔류물을 함유한 일부 유류는 고온에서 조차 쉽게 증류되지 않고, 해양환경에서 오랜 기간 지속되는 경향이 있다

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
	Arabian Super Light	Brent	Cabinda	Merey
Origin	Saudi Arabia	UK	Angola	Venezuela
°API	50.7	37.9	32.5	17.3
SG at 15°C	0.79	0.83	0.86	0.96
Wax content	12%	No data	10.4%	10%
Asphaltenes	7%	0.5	0.16	9%
Pour point	-39°C	-3°C	12°C	-21°C

▲ 표 1: 4가지 원유의 물리적 특성. 표 2의 분류에 따른 그룹화 (페이지 8).



▲ 그림 2: 표 1의 4가지 원유의 점도/온도 관계.

(예, 그림 1의 Boscan 원유).

증기압은 일반적으로 100°F (37.8°C)에서 측정된 리드 증기압 (Reid Vapour Pressure)을 인용하여 유류의 휘발성에 대한 추가 정보를 제공한다. 3kPa (23mmHg) 보다 큰 증기압은 대부분의 환경에서 발생하는 증발의 기준이다. 100kPa (760mmHg) 이상에서, 물질은 기체와 같은 반응을 보인다. 예를 들어, 휘발유는 40-80kPa (300-600mmHg) 사이의 증기압을 갖는다. Cossack 원유는 44kPa 리드 증기압을 가지며, 저온에서 끓는 성분의 비율이 높아 휘발성이 큰 반면, 1.7kPa 리드 증기압을 가진 Boscan 원유는 휘발성이 훨씬 낮다.

유류의 점도는 흐름에 대한 저항이다. 점도가 높은 유류는 점도가 낮은 것에 비해 잘 흐르지 않는다. 모든 유류는 온도가 내려감에 따라 점성이 증가하며(즉, 흐름이 순조롭지 못함), 유류 구성요소에 따라 정도의 차이를 보인다. 그림 2는 4가지 원유의 온도-점도 관계를 보여준다. 본 기술서에서 동점도\*의 단위는 센티스토크스 (centistokes, cSt=mm<sup>2</sup>/s)를 사용하였다.

유동점은 유류가 더 이상 흐르지 않는 최저 온도이며, 왁스와 아스팔텐 함량과의 함수이다. 냉각되어 왁스 성분이 결정구조를



▲ 그림 3: 유동점 이하의 온도에서 해상에 유출된 유류는 반고체 상태의 덩어리를 형성한다. 이 그림은 수온 28°C에서 유동점 +33°C인 Nile 혼합유이다. 이 유류는 지속성이 높으며, 먼 거리를 이동한다.

형성하기 시작할 때, 유류는 혼탁점 (cloud point)이라는 온도에 도달할 것이다. 결정 형성은 유류의 흐름을 점점 더 저해하고, 계속된 냉각으로 마침내 유동점에 도달하면 유류의 흐름은 멈추고 액체에서 반고체 상태로 변한다(그림 3). 그림 2의 Cabinda 원유는 이러한 거동의 예시를 나타낸다. 30°C 부터 냉각됨에 따라, 이 유류의 점도는 천천히 높아지며, 일단 혼탁점(cloud point)인 20°C 이하가 되면 기하급수적으로 점도가 높아지기 시작한다. 유동점 12°C에서 점도는 흐름을 막기에 충분히 높아진다.

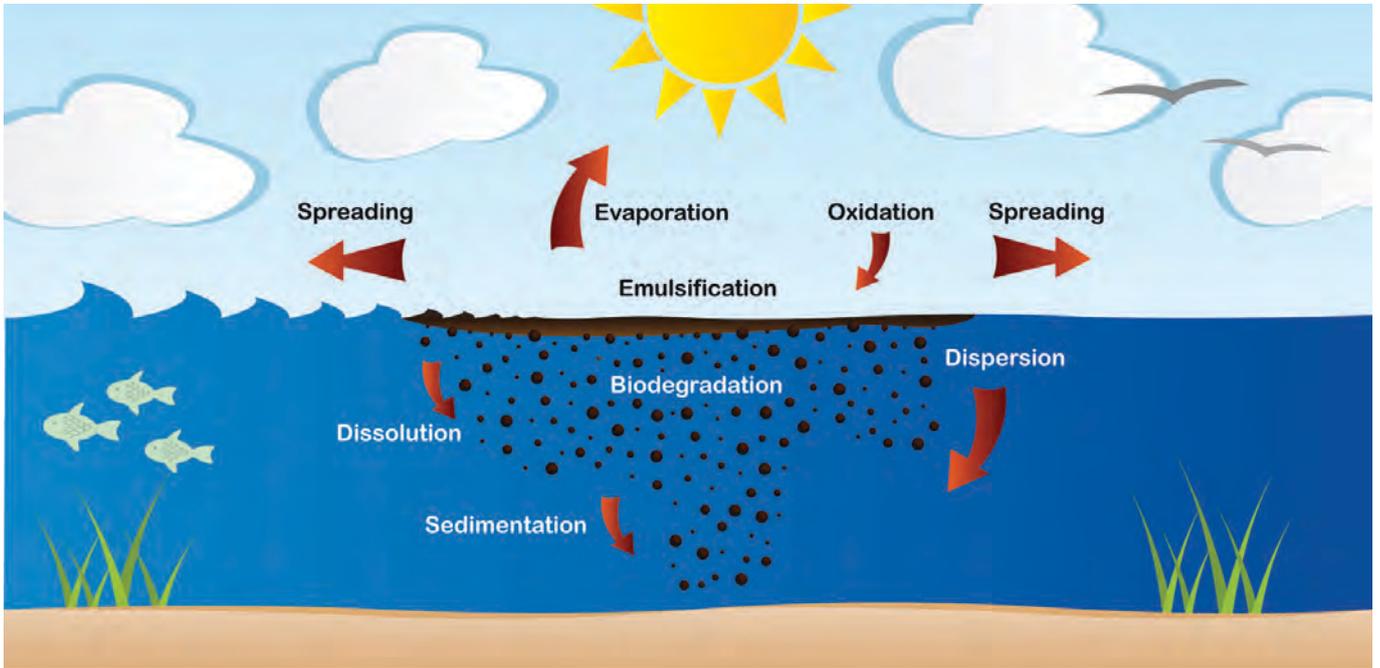
## 풍화작용

아래에 논의된 각각의 과정들은 유출유의 풍화작용을 일으키는 데 영향을 미친다(그림 4). 그러나 각 과정의 상대적 중요성은 시간에 따라 달라진다. 그림 6은 보통의 해상 상태에서 전형적인 원유 유출에 관련된 풍화작용을 보여준다. 이러한 과정들뿐만 아니라, 해양 유출유 항공탐색에 관한 기술서(TIP 1)에서 서술된 바와 같이 유막은 바람과 해류에 따라서 이동한다.

## 확산

유류는 유출되자마자, 해상에서 확산되기 시작한다. 확산속도는 주로 유류의 점도와 유출량에 따라 결정된다. 점도가 낮은 유류는 높은 것보다 더 빨리 확산된다. 액체 상태의 유류는 처음에 큰 규모의 유막으로 확산되지만 곧 분할되기 시작한다. 유류가 확산되고 두께가 감소함에 따라, 검정색 또는 어두운 갈색의 두꺼운 유류 패치에서 유막의 가장자리부터 무지개 빛깔과 은빛 광택으로 변한다(그림 5). 반고체 또는 점성이 높은 기름 덩어리 (fragment)는 얇은 층으로 확산되기 보다는 패치로 분산되고,

\* 동점도 = 동적점성도 ÷ 밀도. 동점도는 센티포이즈 (cP) 또는 초당 SI 등가 밀리파스칼 (mPa/s) 단위로 측정된다.



▲ 그림 4: 해상에서 유류에 작용하는 풍화작용. 유류가 해안에 부착되면, 풍화작용의 일부는 더 이상 진행되지 않는다.

일부 센티미터 단위의 두께가 될 수 있다. 외해에서 풍성해류(wind circulation) 패턴은 좁은 띠(narrow bands) 또는 풍향과 평행한 '유막띠'를 형성하는 경향이 있고, 시간이 경과함에 따라 유류 특성은 유막 이동을 결정하는데 덜 중요해진다.

유류가 확산 또는 부서지는 비율은 파도, 난류, 조류, 해류의 영향을 받는다 - 복합적인 영향력이 강할수록 그 과정이 더 빨라진다. 수시간 동안 수 제곱 킬로미터 확산되거나, 수일간 수백 제곱 킬로미터의 유류 확산 된 예가 많이 있다. 점도가 낮은 유류의 소규모 유출을 제외하고는 확산은 균일하지 않고, 마이크로미터보다 작은 두께부터 몇 밀리미터 또는 그 이상까지 유류 두께의 큰 변화가 일어날 수 있다.

## 증발

유류의 휘발성분은 대기중으로 증발한다. 증발 비율은 주변의 온도와 풍속에 따라 결정된다. 보통 200°C 이하에서 끓는점을



▲ 그림 5: 중유(medium oils)와 경유가 확산될 때, 매우 얇은 유막이 형성된다. 이것들은 빠르게 소멸되는 무지개 빛깔과 은빛 광택으로 나타난다.

갖는 유류 성분들은 온도 조건에 따라 24시간 이내에 증발한다. 유류의 증류 특성에서 살펴본 바와 같이 끓는점이 낮은 성분 비율이 커질수록 증발 정도가 커진다. 예를 들어, 그림 1에서 Cossack 원유의 경우, 원유의 55%가 200°C 이하에서 끓는 성분들로 구성된 반면에, Boscan 원유의 경우 단지 4%만 200°C 이하에서 끓는 성분들로 구성된다.

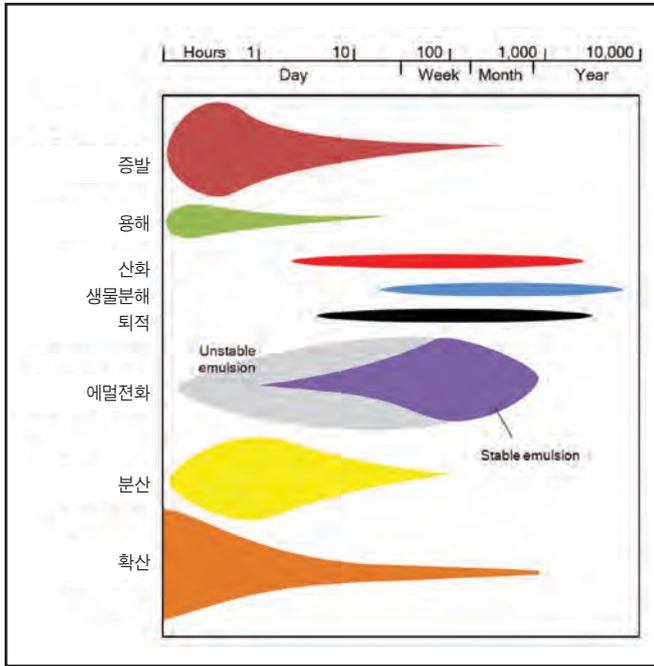
유출된 유류의 표면적이 클수록 가벼운 성분들이 더 빨리 증발하기 때문에 유류의 초기 확산 비율은 증발 비율에 영향을 미친다. 거친 물결, 빠른 풍속, 따뜻한 온도 또한 증발을 증가시킨다.

증발 후에 남은 유류의 잔류물은 밀도와 점도가 증가하여, 방제방법뿐만 아니라 연속되는 풍화작용에 영향을 미친다.

등유, 휘발유와 같은 정제품의 유출은 단시간에 완전히 증발할 것이고, Cossack과 같은 가벼운 원유는 유출 첫째날에 유출량의 50% 이상 증발될 수 있다. 이러한 극도의 휘발성 기름은 사망이 막힌 좁은 지역에 유출될 때, 화재나 폭발의 위험뿐만 아니라 인체에도 위험이 될 수 있다. 이와 대조적으로 중유(heavy oil)는 증발이 발생한다 해도 폭발의 위험이 거의 없다. 그럼에도 불구하고, 중유는 화재 위험은 존재한다. 만약 유류가 고여있는 잔잔한 조건에서 잔재물에 불이 붙는다면, 이것은 격렬한 연료유 화재로 이어질 수 있는 충분한 여지가 될 수 있다.

## 분산

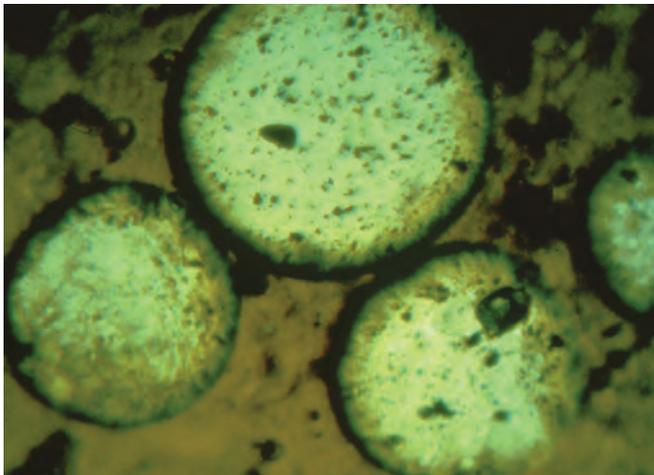
분산의 비율은 주로 유류의 특성과 해황에 따라 결정되는데, 쇄파가 존재하는 곳에서 점도가 낮을 때 가장 빨리 진행된다. 표층에서 파도와 난류가 유막의 전부 또는 일부를 다양한 크기의 작은 방울로 부서지게 하여 해수 상부층에 혼합되도록 할 수



▲ 그림 6: 원유그룹(표 2참조)의 통상적 유출 거동 특성에서 시간에 따른 풍화작용의 상대적 중요성변화를 나타내는 도식-각 밴드의 너비는 풍화작용의 중요성을 나타낸다.(출처: SINTEF).

있다. 작은 기름 방울은 계속 부유하는 반면에, 큰 기름 방울은 다른 기름 방울과 합쳐져 유막을 재형성하거나 매우 얇은 유막으로 확산되어 표층으로 다시 떠오른다. 직경이 약 70 $\mu$ m 보다 작은 기름 방울의 경우, 표층으로 떠오르는 속도가 바다의 난류와 상쇄되어 계속 부유하게 된다. 이 분산된 유류는 더 많은 양의 해수와 혼합되어, 농도가 빠르게 감소된다. 분산에 의해 증가된 유류 표면적은 또한 생물분해, 용해, 퇴적과 같은 과정들을 촉진시킨다.

유체나 다른 풍화작용에 아무런 제약 없이 확산되는 유류는 보통의 해상 상태에서 단시일 내에 완전히 분산될 수 있다. 유처리제의 사용은 이런 자연적 과정을 가속화 할 수 있다.



▲ 그림 7: 기름에 둘러싸인 물방울을 보여주는 water-in-oil 에멀전의 확대 이미지 (x1,000).

반대로, 점성이 큰 유류는 유처리제 살포에도 거의 분산되지 않고, 표층에서 두꺼운 덩어리를 형성하는 경향이 있다.

## 에멀전화

대부분 유류는 물을 흡수하여 물먹은 기름, 즉, 에멀전(water-in-oil emulsions)을 형성한다. 이것은 기름 오염물의 양을 5배까지 증가시킬 수 있다. 유류 유출 시, 에멀전은 15ppm 이상의 결합된 니켈/바나듐 농도 또는 0.5% 이상의 아스팔텐을 함유하는 기름에 대하여 가장 쉽게 형성된다. 이 화합물의 존재와 일반적으로 보퍼트 풍력(Beaufort Force) 3 (풍속 3-5ms-1 또는 7-10 knots) 이상의 거친 해황은 에멀전이 형성되는 비율을 결정한다. 증유와 같이 점성이 있는 유류는 경질성 유류보다 더 천천히 물을 흡수하는 경향이 있다. 에멀전은 변하기 때문에, 파도 속에서 유류의 이동은 흡수된 물방울 크기를 줄이고, 에멀전은 계속해서 점성을 더 높게 만든다(그림 7). 동시에 아스팔텐 화합물은 기름이 물방울을 덮도록 촉진시켜 에멀전의 안정성을 높일 수 있다. 포함된 물의 양이 증가하면 에멀전의 밀도는 해수 밀도에 도달하지만, 고형 입자들(solid particulates) 없이는 해수 밀도를 증가할 수 없다. 안정한 에멀전은 70-80%의 많은 물을 함유하고, 보통 반고체 상태이며 강렬한 적색/갈색, 오렌지 또는 노란색이다(그림 8). 또한 안정된 에멀전은 지속성을 유지하여, 영구히 에멀전 상태로 남을 수 있다. 덜 안정적인 에멀전은 잔잔한 해상에서 햇빛에 의해 뜨거워지거나 또는 해안선에 노출되면, 기름과 물이 분리될 수 있다.

에멀전의 형성은 다른 풍화작용의 영향에 대한 비율을 감소시켜 표층과 해안선에서 경유와 증유(light and medium crude oils)가 지속되는 주요 원인이 된다. 비록 안정한 에멀전은 점성이 있는 유류와 유사하게 거동하지만, 그 구성 성분의 차이는 효과적인 방제 방법을 결정하는데 영향을 미친다.

## 용해

유류가 용해되는 비율과 정도는 구성 성분, 확산, 수온,



▲ 그림 8: 적색/갈색을 띠는 에멀전화 된 증유의 회수. 분석 결과, 에멀전의 수분 함량이 50%로 나타났다.

난류, 분산 정도에 따라 결정된다. 원유의 무거운 성분들은 해수에서 거의 용해되지 않는 반면에, 가벼운 성분들, 특히 벤젠, 톨루엔과 같은 방향족 탄화수소는 천천히 용해된다. 그러나 이러한 화합물들은 또한 휘발성이 가장 커서 용해되는 것보다 증발에 의해 10에서 1,000배 정도 속도로 매우 빠르게 손실된다. 그 결과, 해수에서 용해된 탄화수소 농도는 1ppm을 거의 초과하지 않고, 용해 작용은 해상의 표층에서 유류를 제거하는데 큰 기여를 하지 못한다.

## 광산화

탄화수소는 산소와 반응하여 용해성 생성물 또는 타르를 형성시킬 수 있다. 산화 작용은 햇빛에 의해 촉진되고 유출 전체 기간동안 발생되지만, 다른 풍화작용과 비교해 볼 때 유류의 소멸에는 전체적으로 큰 영향을 미치지 않는다. 강한 햇빛 아래에서조차도 얇은 유막은 천천히 분해되어, 보통 하루에 0.1%보다 적은 양이 분해된다. 고분자량 화합물들은 표층에 보호막을 형성하기 때문에 점성이 매우 큰 두꺼운 유층이나 에멀전은 분해되기 보다는 분해되기 어려운 잔류물로 산화되는 경향이 있다. 이들은 해안에 표착되는 타르볼에서 확인 될 수 있는데, 주로 산화된 유류와 퇴적물 입자로 구성된 단단한 표면으로 더 부드럽고 덜 풍화된 내부를 싸고있다.

## 퇴적과 침강

분산된 기름 방울은 수중에서 부유하는 퇴적물 입자들과 유기물간의 상호작용을 통해 밀도가 충분히 높아지면 해저로 천천히 침강할 수 있다. 얇은 연안 지역과 강 하구역은 보통 분산된 기름 방울들과 결합될 수 있는 부유물질들이 풍부하여, 기름 입자들의 퇴적에 유리한 조건을 제공한다. 기수(blackish water)역에서는 강의 담수가 해수의 염분 비중을 낮추기 때문에, 중립 부력의 기름 방울은 침강 될 수 있다. 또한 부유 생물들은 기름을 섭취하고, 분립(faecal pellets)으로 결합되어 해저로 침강 된다. 드문 경우지만, 유류는 폭풍이 불 때 많은 양의 부유물질과 혼합되어 해저로 침강할 수 있다. 이와 마찬가지로, 날림 모래(wind-blown sand)는 가끔 떠다니는 기름 위에 쌓여 기름을 침강 시킬 수 있다.

대부분의 유류는 비중이 낮아, 밀도가 더 높은 물질과 상호작용하고 부착되지 않는 한, 계속 물에 뜨는 경향이 있다. 그러나 일부 중유, 무거운 연료유, 에멀전은 해수 비중에 근접한 값을 가지며, 퇴적물과 최소한의 상호작용으로도 침강할 수 있다. 일부 잔유(residual oil)는 해수보다 높은 비중 (>1.025)을 가지며, 유출되었을 때 침강될 수 있다.

일부 유류는 화재로 가벼운 성분들이 전소될 뿐만 아니라 고온 때문에 무거운 발열성 생성물들이 형성되어 화재 후에 침강될 수 있다. 만약 방제기술로서 현장 소각을 시행한다면 소각 후 잔류물질의 침강을 고려하여야 한다.

밀도가 높은 유류는 악천후의 해상에서는 완전히 침수(over-



▲ 그림 9: 침강된 연료유의 수작업 회수.

washed)되어 표층 아래로 내려가 상당시간 항공탐색으로 관찰하기 어렵게 된다. 기름은 제거되는데 상당한 시간이 걸리게 된다. 이러한 현상은 가끔 유류의 침강과 혼동되지만, 잔잔한 조건에서 유류는 다시 떠오른다.

퇴적은 해양환경에서 유출유의 축적을 초래하는 중요한 장기적인 과정들 중 하나이다. 그러나 대량의 기름 침강은 해안선과의 상호작용의 결과로 해안과 가까운 천해역에서만 주로 관측되며 다른 지역에서 관측되는 것은 매우 드물다(그림 9).

## 해안선과의 상호작용

해안선에 부착된 유류와 해안선의 상호작용은 주로 해안선에 노출되는 에너지 수준과 해안 저질의 특성 및 규모에 따라 결정된다.

침강을 야기하는 퇴적물 상호작용은 가장 흔히 모래 해변에 부착된 유류가 원인이다. 개방형 모래 해변에서, 퇴적물 축적(부착)과 침식의 계절적 순환은 기름층이 연속적으로 뒤덮이고 드러나는 것을 반복하게 한다. 심지어 덜 개방적인 모래 해변에서도 부착된 유류는 날림 모래에 의해 뒤덮일 수 있다. 일단 유류가 모래와 섞이면, 조수 간만 또는 폭풍에 의해 근해역으로 휩쓸려 가서 침강할 것이다. 반복적인 순환이 자주 발생하는데, 이를 통해 유류/모래 혼합물이 해변에서 떨어진 근해역으로 씻겨 가고, 조립질 모래 입자들이 분리되면서 유류가 다시 표층으로 부유된다. 그러면 이 유류는 모래와 다시 섞여 침강되고, 이러한 순환이 반복된다. 모래 해변에서 뿔어져 나오는 광택은 이러한 과정이 발생하고 있다는 징후이다.

해안선에서 매우 미세한(<4microns) 무기물 입자들과 유류의 상호작용은 무기질 또는 점토질 유류 응집체를 형성한다. 유류의 점도에 따라, 풍부한 물의 이동은 기름 방울들이 정전기적으로 미세 입자들을 끌어당기게 할 수 있다. 기름 방울을 둘러싸고 있는 미세 입자들은 더 큰 기름 방울들의 결합과 더 큰 퇴적물 저질(예를 들어, 모래 또는 자갈)에 정착되는 것을 막는다. 그

결과로 초래되는 안정한 응집체는 중립 부력에 가깝고, 난류에 의해 부유할 만큼 충분히 작다. 안정한 응집체는 결국 연안류에 의해 널리 확산될 수 있고, 과도 작용과 해류가 다른 과정들(예를 들어, 퇴적물 침식)이 발생하기에는 매우 약한 곳인(에너지가 낮은) 폐쇄성 해안으로부터 일정 기간 동안 많은 양의 기름을 제거할 수 있다.

갯벌 퇴적물과 습지는 가장 일반적인 폐쇄성 해안이다. 대부분의 경우 유류는 이런 미세한 퇴적물내로 스며들지 못하고, 표층에 남는다. 그러나 천공동물에 의한 '생물교란작용'은 때때로 점성이 낮은 유류가 벌레 먹은 구멍, 식물의 줄기 등의 아래로 이동하여 퇴적물내로 들어가게 한다. 또한 유류는 미세한 갯벌 입자들이 수중에서 부유하고 유류와 혼합되는 강한 폭풍이 칠 때, 이러한 세립질 퇴적물과 결합될 수 있다. 잔잔한 동안에는 갯벌은 서서히 침강되고 유류는 퇴적물과 함께 침적될 수 있다. 이러한 폐쇄성 지역에서 퇴적물은 오랜 기간 움직이지 않을 것이다. 퇴적물 속에는 산소 농도가 낮아서 유류의 분해가 매우 적게 일어난다.

폐쇄성 조약돌 해안이나 자갈 해안에서 점성이 높은 유류가 방제작업기간 동안 제거되지 않았다면, 주로 표면 기름층의 산화물인 아스팔트를 형성할 수 있다(그림 10). 부유 기름은 이러한 개방된 저질에 쉽게 스며들 수 있고, 해상에서의 제거와 저질의 자체적인 다른 풍화작용들로부터 보호된다. 아스팔트는 만약 건드리지 않고 그대로 둔다면, 수십년간 지속될 수 있다.

## 생물분해

해수에는 기름 혼합물의 물질대사가 일어날 수 있는 다양한 해양 미생물들이 함유되어 있다. 이들은 기름을 탄소와 에너지의 근원으로 이용할 수 있는 박테리아, 곰팡이류, 효모균류, 단세포 조류, 원생동물들을 포함한다. 이러한 유기물들은 전세계 해양에



▲ 그림 10: 원유 유출 후 실험의 일부로서, 영향을 받은 해안 지역은 오염된 그대로 남아 있었다. 약 1m<sup>2</sup>의 유류 패치는 아스팔트 포장과 같이 15년 이상 남아 있다.

널리 분포하고 있으며, 유류의 자연적 누출 지역 또는 산업 폐기물과 처리되지 않은 하수를 받아들이는 도심지에 가까운 만성적으로 오염된 연안 해역에서 더 풍부하다.

생물분해의 비율과 정도에 영향을 미치는 주요 요인들은 유류의 특성, 산소와 영양분(주로 질소와 인의 혼합물)의 이용가능성 및 온도이다. 많은 중간체 화합물들이 탄화수소가 분해되면서 만들어지지만, 최종적인 생물분해의 결과물들은 이산화탄소와 물이다.

각각의 미생물 유형은 특정 그룹의 탄화수소를 분해하는 경향이 있어, 함께 또는 잇따라 작용하는 광범위한 미생물들이 지속적인 생물분해를 위해 필요하다. 생물분해 과정을 통해서 미생물의 복합적 군집은 성장한다. 생물분해를 위해 필요한 미생물은 연안에서 떨어진 외해에서는 아주 조금 존재하지만, 유류가 이용 가능하면 빠르게 증식되고, 영양분 또는 산소 부족으로 제한되지 않는 한 생물분해는 계속될 수 없다. 미생물은 원유속의 화합물들을 분해할 수 있긴 하지만, 일부 크고 복잡한 분자들은 이러한 분해에 저항력을 가지고 있으며, 이런 잔류물들은 유류 내에서 검정색을 띠는 화합물을 포함하는 경향이 있다.

생물분해 비율을 높이는 제품들은 이용이 가능하다. 연안 해역에서는 영양분 공급이 부족하지 않기 때문에 이러한 물질의 효능은 의문의 여지가 있으며, 산소 농도 또는 수온의 상승은 실현 불가능 하다.

미생물은 산소와 필수 영양소를 얻을 수 있는 물속에 서식하고, 따라서 생물분해는 오직 기름과 물의 경계면에서만 발생할 수 있다. 해상에서는 자연적 또는 화학적 분산을 통한 기름 방울의 형성이 생물학적 활동을 할 수 있는 접촉 면적을 증가시켜 분해를 향상시킨다. 이와 대조적으로 해안선의 두꺼운 층이나 고조선(High water line) 위에 부착된 유류는 표면적이 작아 물과 접촉하는데 매우 제약을 받는다. 이런 조건하에서 생물분해는 매우 느리게 진행되며, 만약 기름이 제거되지 않았다면 그 기름은 오랜 기간 지속적으로 잔류한다.

생물분해에 영향을 미치는 다양한 요인들은 기름이 제거되는 비율을 예측하기 어렵게 만든다. 비록 생물분해는 대량의 축적 기름을 확실히 제거할 수는 없지만, 흔히 조류나 취송류에 의해 침수되어 해안선에 부착되는 미량의 유류를 자연적으로 제거하는 주요한 장기 메카니즘 중 하나이다.

## 복합 작용

이전에 기술된 풍화작용들의 복합적인 영향이 그림 13에 요약되었다. 상대적인 중요성은 그림 6에 나타난 것과 같이 시간에 따라 변하지만, 모든 과정은 유류가 유출되자마자 작용한다. 확산, 증발, 분산, 에멀전화, 용해는 유류유출 초기

## Group 1 oils

- A:** °API > 45 (Specific gravity < 0.8)  
**B:** Pour point °C  
**C:** Viscosity @ 10–20°C: less than 3 CSt  
**D:** % boiling below 200°C: greater than 50%  
**E:** % boiling above 370°C: between 20 and 0%

	A	B	C	D	E
Aasgard	49	-28	2 @ 10°C	58	14
Arabian Super Light	51	-39	2 @ 20°C		
Cossack	48	-18	2 @ 20°C	51	18
Curlew	47	-13	2 @ 20°C	57	17
F3 Condensate	54	<-63	1 @ 10°C	81	0
Gippsland	52	-13	1.5 @ 20°C	63	8
Hidra	52	-62	2.5 @ 10°C	60	11
Terengganu condensate	73	-36	0.5 @ 20°C	>95	0
Wolbybutt	49	-53	2 @ 20°C	55	4
Gasoline	58		0.5 @ 15°C	100	0
Kerosene	45	-55	2 @ 15°C	50	0
Naptha	55		0.5 @ 15°C	100	0

## Group 2 oils

- A:** °API 35–45 (Specific gravity 0.8–0.85)  
**B:** Pour point °C  
**C:** Viscosity @ 10–20°C: between 4 Cst and semi-solid  
**D:** % boiling below 200°C: between 20 and 50%  
**E:** % boiling above 370°C: between 15 and 50%

### Low pour point <6°C

	A	B	C	D	E
Arabian Extra Light	38	-30	3 @ 15°C	26	39
Azeri	37	-3	8 @ 20°C	29	46
Brent	38	-3	7 @ 10°C	37	33
Draugen	40	-15	4 @ 20°C	37	32
Dukhan	41	-49	9 @ 15°C	36	33
Liverpool Bay	45	-21	4 @ 20°C	42	28
Sokol (Sakhalin)	37	-27	4 @ 20°C	45	21
Rio Negro	35	-5	23 @ 10°C	29	41
Umm Shaif	37	-24	10 @ 10°C	34	31
Zakum	40	-24	6 @ 10°C	36	33
Marine Gas oil (MGO)	37	-3	5 @ 15°C		

### High pour point >5°C

	A	B	C	D	E
Amna	36	19	Semi-solid	25	30
Beatrice	38	18	32 @ 15°C	25	35
Bintulu	37	19	Semi-solid	24	34
Escravos	34	10	9 @ 15°C	35	15
Sarir	38	24	Semi-solid	24	39
Statfjord	40	6	7 @ 10°C	38	32

주석: 높은 유동점을 갖는 유류는 그들의 유동점 보다 높은 주위 온도에서 그룹 2와 같은 반응을 보인다. 이것은 아래의 그룹 4 유류와 같이 다르다.

▲ 표 2: ° API 에 따라 분류된 유류의 예. 각각의 그룹은 표 1, 그림 1, 2, 12, 13과 관련이 있다. 일반적으로 유류가 유출되었을 때 지속성은 그룹 번호에 따라 증가한다.

## Group 3 oils

- A:** °API 17.5–35 (Specific gravity 0.85–0.95)  
**B:** Pour point °C  
**C:** Viscosity @ 10–20°C: between 8 CSt and semi solid  
**D:** % boiling below 200°C: between 10 and 35%  
**E:** % boiling above 370°C: between 30 and 65%

### Low pour point <6°C

	A	B	C	D	E
Alaska North Slope	28	-18	32 @ 15°C	32	41
Arabian Heavy	28	-40	55 @ 15°C	21	56
Arabian Medium	30	-21	25 @ 15°C	22	51
Arabian Light	33	-40	14 @ 15°C	25	45
Bonny Light	35	-11	25 @ 15°C	26	30
Iranian Heavy	31	-36	25 @ 15°C	24	48
Iranian Light	34	-32	15 @ 15°C	26	43
Khafji	28	-57	80 @ 15°C	21	55
Sirri	33	-12	18 @ 10°C	32	38
Thunder Horse	35	-27	10 @ 10°C	32	39
Tia Juana Light	32	-42	500 @ 15°C	24	45
Troll	33	-9	14 @ 10°C	24	35
IFO 180	18–20	10–30	1,500–3,000 @ 15°C		–

### High pour point >5°C

	A	B	C	D	E
Cabinda	33	12	Semi-solid	18	56
Coco	32	21	Semi-solid	21	46
Gamba	31	23	Semi-solid	11	54
Mandji	30	9	70 @ 15°C	21	53
Minas	35	18	Semi-solid	15	58

주석: 높은 유동점을 갖는 유류는 그들의 유동점 보다 높은 주위 온도에서 그룹 3과 같은 반응을 보인다. 이것은 아래의 그룹 4 유류와 같이 다르다.

## Group 4 oils

- A:** °API <17.5 (Specific gravity >0.95) or  
**B:** Pour point >30°C  
**C:** Viscosity @ 10–20°C: between 1500 CSt and semi-solid  
**D:** % boiling below 200°C: less than 25%  
**E:** % boiling above 370°C: greater than 30%

	A	B	C	D	E
Bachaquero 17	16	-29	5,000 @ 15°C	10	60
Boscan	10	15	Semi-solid	4	80
Cinta	33	43	Semi-solid	10	54
Handil	33	35	Semi-solid	23	33
Merey	17	-21	7,000 @ 15°C	7	70
Nile Blend	34	33	Semi-solid	13	59
Pilon	14	-3	Semi-solid	2	92
Shengli	24	21	Semi-solid	9	70
Taching	31	35	Semi-solid	12	49
Tia Juana Pesado	12	-1	Semi-solid	3	78
Widuri	33	46	Semi-solid	7	70
IFO 380	11–15	10–30	5,000–30,000 @ 15°C		



▲ 그림 11: 바지선에서 유출된 후, 해저에 있는 중유. °API 4는 해수 비중 1.025와 비교하여 비중이 1.04이다(출처: NOAA).

단계에 가장 중요하며, 광산화, 퇴적, 생물분해는 장기간에 걸쳐 일어나는 작용으로 유출유의 거동을 결정한다. 분산과 에멀전화는 대립되는 과정으로 분산은 표층의 기름을 제거하고, 에멀전화는 오염물질의 양을 증가시키고 지속시킨다. 기름이 분산될 것인지 에멀전화될 것인지를 결정하는 요인에는 유출 조건(유출량과 비율; 표면 또는 수중 유출 등), 환경 조건(온도, 해황, 해류 등), 그리고 유류의 물리적, 화학적 특성이 포함된다.

풍화작용들이 상호작용하는 방식을 이해하는 것은 해상에서 유막이 존재하는 동안 유류의 변화 특성을 예측할 때 중요하다. 시간에 따른 유류 특성의 잠재적인 변화 예측은 유출유의 지속성 평가와 가장 적절한 방제 방법 선택에 도움을 준다. 이와 관련하여 비지속성 유류(non-persistent oil)는 휘발성과 낮은 점도 때문에 표층에서 순식간에 소멸되는 경향이 있고, 지속성 유류(persistent oil)는 더 천천히 소멸되고 대개 방제 작업이 필요하다는 차이가 있다. 비지속성 유류의 예로는 휘발유, 나프타, 등유가 있고, 대부분의 원유, 중유(intermediate and heavy fuel oils), 역청(bitumen)은 지속성 유류로 분류된다.\*

대안적 분류로 흔히 유류를 그것의 °API에 따라서 4가지 그룹으로 나눈다(표 2). 이것의 목적은 해상에서 유출되었을 때 같은 방식으로 거동할 것 같은 유류들을 분류하는 것이다. 일반적으로 유류의 °API가 더 높은 것이(그리고 비중이 더 낮은 것이) 지속성이 작다. 그러나 일부 가벼운 기름들을 분명히 왁스가 존재하기 때문에 중유와 비슷하게 거동할 수 있다. 왁스

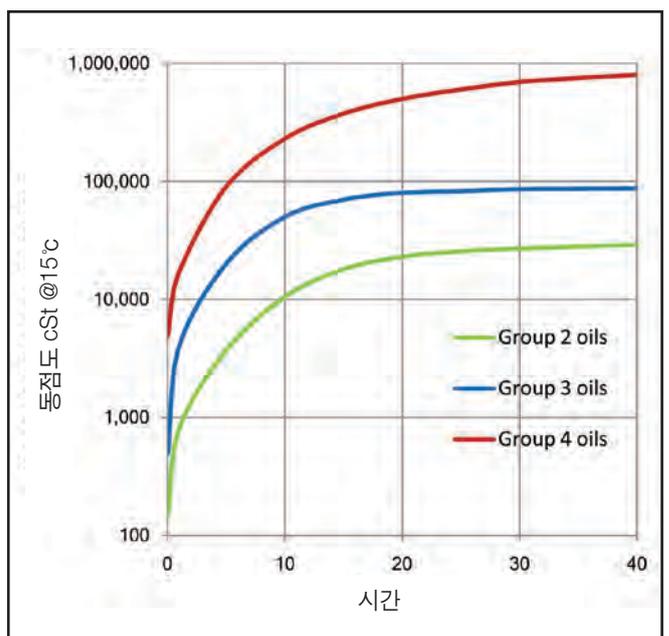
\* 유조선 유류유출에 대한 국제책임 및 보상체계에서는 지속성 유류와 비지속성 유류를 구분하기 위해 비 지속성 유류의 탄화수소 성분비로 (a) 340℃ 분별 증류에서 최소 50% (b) 370℃ 분별 증류에서 최소 95%로 정의한다. 「ASTM Method D86/87 또는 이후 개정본에 따라 실험」

함량이 약 10% 이상인 기름들은 높은 유동점을 갖는 경향이 있고, 만약 주변의 온도가 낮다면 그 기름은 반고체 또는 점성이 매우 높은 액체 상태일 것이고 자연적 풍화작용은 느릴 것이다.

때때로 다섯 번째 그룹은 비중이 1보다 크고 °API는 10보다 작은 기름으로 분류된다. 이런 유류들은 특히 기수역에서 침강하고, 때때로 LAPIOs (API가 작은 기름)로 일컬어진다. 이 범주에는 매우 무거운 연료유와 잔류 슬러리 기름들(slurry oils)이 포함된다(그림 11).

그림 12는 증발과 에멀전화의 결과로서 그룹 2-4의 유출 후 시간에 따른 전형적인 점도 증가를 나타내고, 에멀전화가 점도 증가에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 입증하였다.

그림 13은 4가지 유류 그룹의 자연적 제거 비율을 단순화된 도식으로 나타내고, 또한 시간에 따라 오염물질의 양에 대한 에멀전 형성의 영향을 보여준다. 도식은 현장 관찰에 근거하여 개발되었고, 유류의 물리적 특성에 따라 지속성이 어떻게 달라지는지를 나타낸다. 원유의 정확한 거동은 그 특성과 유출 당시의 상황에 따라 결정될 것이다. 날씨와 기상 조건들은 특히 유막의 지속성에 영향을 미칠 것이다. 예를 들어, 악천후에는 그룹 3 유류가 일반적인 그룹 2 유류의 시간범위 내에 소멸될 것이다. 반대로 차갑고 잔잔한 조건에서는 그룹 4의 지속성에 근접할 것이다. 많은 선박들에 의해 대량 연료유로 운송되는 중유를 포함한 그룹 4 유류는 전형적으로 점성과 지속성이 높으며 방제하기에 가장 문제가 많다. 이러한 높은 지속성은 해상에서 상당히 먼 거리를 이동하여, 광범위한 오염을 야기할 가능성이 있다.



▲ 그림 12: 점도 비율은 거친 해상에서 증가한다. 해양 환경에서 그룹 1 유류의 점도는 절대 100cSt를 넘지 않기 때문에 그림에 나타내지 않았다.

## 컴퓨터 모델링

유류 유출의 이동이나 궤적을 예측할 수 있는 컴퓨터 모델링들이 많이 있다. 일부 모델은 유출유가 주어진 조건하에 시간에 따라 어떻게 변할 것인지를 나타내는 풍화 예측(weathering predictions)을 포함하고 있다. 이것들은 보통 유류 거동의 과학적 연구와 관측 결과 뿐만 아니라 유류의 물리적, 화학적 특성의 데이터베이스를 활용한다. 그러나 풍화작용의 복잡성과 유막 이동에 관한 불확실성 때문에 전체적인 유류 거동을 정확히 예측하는 것은 여전히 어렵다.

따라서 풍화와 이동궤적 모델들이 기반으로 한 가정을 이해하고, 그 결과들을 이용할 때 고려하는 것이 중요하다. 예를 들어, 방제 작업에서 모델의 예측들은 실제 유류 분포와 거동의 관측에 의해 확인되어야 한다. 반면에 모델들은 이러한 관측들을 수행해야 하는 곳과 예상되는 특정 유류 거동의 유용한 징후를 제공한다. 또한 모델들은 최적의 방제기술 평가, 훈련, 긴급계획절차에 있어서 유용하다.

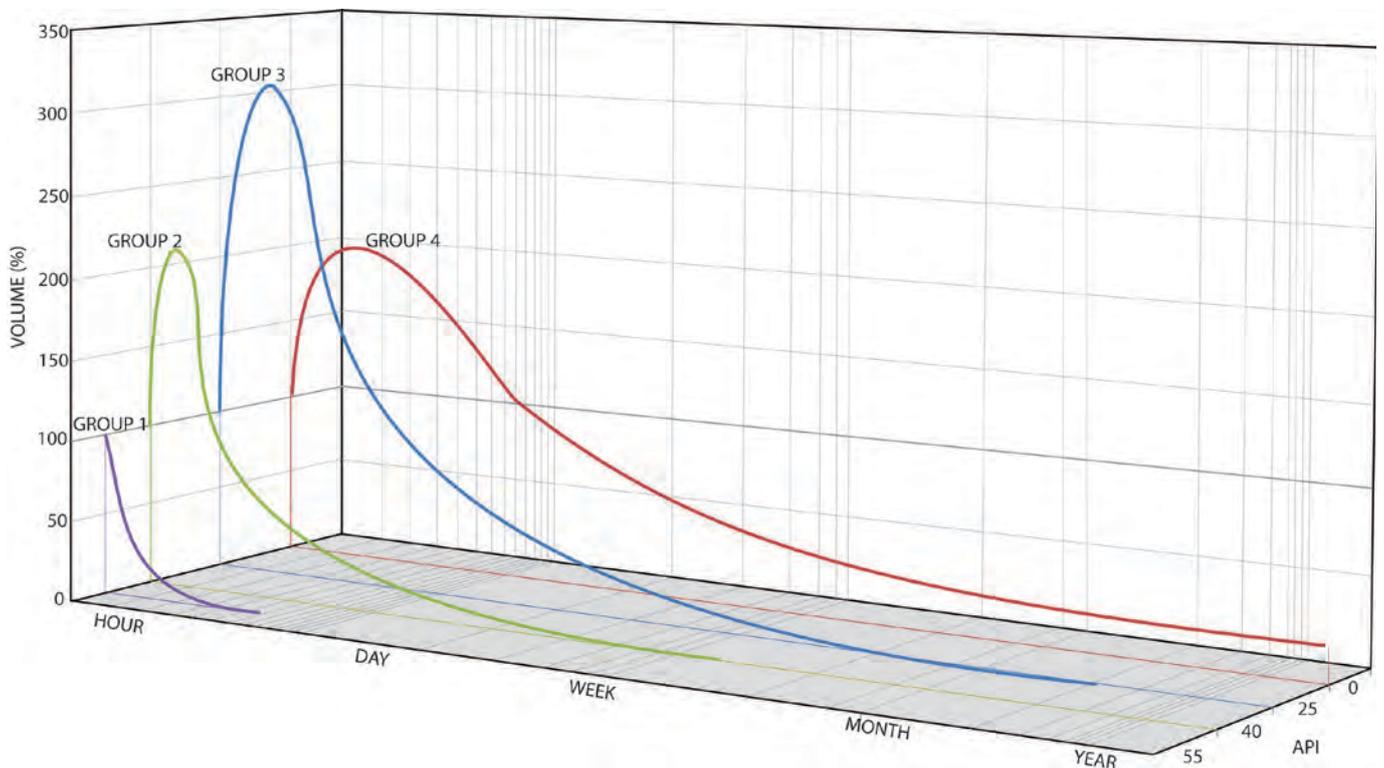
## 방제 작업 및 긴급계획에 대한 영향

유류가 특히 약천후에 빠르게 확산되고 분해되는 경향은 항상 방제기술 선택에 있어서 제약을 줄 것이고, 이것은 과소평가되어서는 안 된다. 예를 들어, 일반적으로 몇 미터 정도 너비의 해상 유희수 시스템은 일단 유류가 수천 킬로미터

확산되고 흩어지면 상당량의 유류 회수가 어려울 것이다. 이런 현상은 점도가 낮은 유류의 경우 몇 시간 내에 일어날 수 있다. 이것이 해상에서 유희수가 큰 유막 부분에만 제한되는 주요 원인 중 하나이다.

풍화를 통한 유류 특성의 변화와 유막의 이동은 유막의 소멸을 모니터링 하는 것 외에 어떤 방제가 필요한지를 알려준다. 적극적인 방제 시, 풍화작용은 방제기술의 진전과 조건 변화에 따라 적합한 방제기술을 다시 고려하고 변경할때 검토되어야 한다. 예를 들어, 해상에 사용된 유처리제는 유류 확산과 유류 점도가 증가할수록 분산효율이 감소된다. 많은 유처리제들은 특정 유류의 특성에 따라 점도가 10,000cSt에 근사할수록 효율이 상당히 낮아지고, 대부분은 점도가 이 수치 이상으로 증가할 때 작용을 멈춘다. 유류의 점도는 매우 빠르게 증가할 수 있고, 이것은 유처리제를 사용할 수 있는 시간이 매우 짧을 것이라는 것을 의미한다. 따라서 유처리제 사용은 정기적으로 모니터링하고, 만약 효과적이지 않다면 살포를 중단해야 한다(그림 14).

마찬가지로, 기계적 회수 시스템이 효율적으로 사용된다면, 유류가 풍화되고, 유류의 점도가 증가하고, 에멀전이 형성됨에 따라 사용되는 스키머와 펌프의 종류가 교체될 필요가 있다. 예를 들어, 친유성의 디스크 스키머(disc skimmers)는 회수를 위해 유류가 원반(disc)에 부착되는 것이 필요하다(그림 15). 그러나 에멀전은 회전 원반(spinning disc)과 같이 돌아가는 움직임이



▲ 그림 13: 기름과 해수 표층에 남은 물 먹은 기름 에멀전의 양은 표 1과 2에 나타난 각 그룹별 기름을 본래 유출된 양 (100%)의 퍼센트로 나타낸다. 곡선은 각 그룹별로 추정된 평균 거동을 나타낸다. 그러나 특정 원유의 거동은 그 특성과 유출시의 환경조건에 따라 일반적인 패턴과는 다르다.



▲ 그림 14: 점도가 높은 기름은 유처리제의 백색 플럼이 기름 주변에 생겨서 유처리제 사용이 성공적이지 않다.



▲ 그림 15: 갓 유출된 경유를 성공적으로 회수하는 디스크 스키머. 그러나 에멀전이 디스크에 흡착되지 않으면, 회수 효율은 감소한다.

있을 때 유동화(shear-thinning) 유체와 같은 작용을 하고, 에멀전 속의 물방울들이 모두 한 방향으로 나란하여, 원반에 부착되기 보다는 점도가 감소되어 에멀전이 쪼개진다. 같은 효과가 원심펌프에도 일어난다. 펌프를 통한 에멀전의 효과적인 움직임이 없이 임펠러가 회전하게 된다. 이런 이유로 용적형 펌프(Positive Displacement Pump)가 에멀전을 옮기는데 권고된다.

다양한 유류의 거동과 방제 작업을 시행할 때의 제약들을 이해하는 것은 효과적인 긴급계획에 있어서도 핵심적이다. 또한 연중 우세풍(prevaling wind)과 우세해류(prevaling current)에 관한 정보는 유류의 이동과 해당 지역에서 영향을 받을 수 있는 민감자원을 확인할 수 있다. 유막의 잔존기간과 방제 작업이 필요한 잔존유 양 및 특성에 관해서는 유류의 종류에

관한 자료로 예측할 수 있다. 이것은 또한 적절한 방제기술과 장비를 선택하는데 도움이 된다.

유류의 종류가 제한적이고, 우세한 기후와 해상 상태를 잘 알고 있는 유류시설이나 해양하역 부표와 같은 고정된 시설들의 경우, 상당히 정확한 예측을 얻을 수 있다. 이것은 효과적인 긴급계획의 개발을 명확히 하고, 적절한 방제 준비를 할 수 있게 한다. 선박 운항이 빈번한 지역에서는 광범위한 종류의 유류가 선박 수송으로 취급되므로 긴급계획이 모든 사태를 대비할 수 없다. 그러므로 만약 방제가 필요하다면 가장 적절한 기술들이 사용될 수 있도록 가급적 빨리 유출유의 종류와 거동이 규명되는 것이 중요하다.

## Key points

- 유출된 유류는 풍화되어 물리적, 화학적 특성이 시간에 따라 변한다.
- 확산, 증발, 분산, 에멀전화는 유류유출 초기 단계에 중요하며, 광산화, 퇴적, 생물분해는 장기간에 일어나는 작용으로 유출유의 거동을 결정한다.
- 풍화작용들의 진행속도는 날씨와 비중, 휘발성, 점도, 유동점과 같은 유류의 특성에 의해 결정된다.
- 증발, 분산은 해수표면으로부터 유류를 제거하는 반면 에멀전화는 지속성과 오염물질의 양을 증가시킨다.
- 해안선과 상호작용은 점토-유류 응집체를 형성 또는 세립한 퇴적물속에 결합되어 폐쇄성 지역에서 지속성을 증가시키거나 또는 입자가 큰 조약돌이나 자갈해변과 혼합 아스팔트화되어 수중에서 제거될 수 있다.
- 일부 중질유는 유출되었을 때, 밀도가 높아서 침강할 수도 있다. 그러나 대부분의 유류는 물에 뜨며, 밀도가 더 높은 퇴적물과 혼합되면 침강한다.
- 유출유의 거동 특성에 대한 이해는 해양 유류오염 대비 대응전략을 최적화하는데 도움을 준다.

## 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)



### 한국해양과학기술원

대전시 유성구 유성대로 1312길 32  
 Tel: 042-866-3114 Fax: 042-866-3106  
 Web: [moeri.kiost.ac](http://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.