

## 유출된 기름의 해상 및 해안에서의 거동 및 방제기술

정 정 조

순천대학교 환경공학과

### Behavior and Clean-up Technique of Spilled Oil at Sea and Shoreline

Cheong-Jo Cheong

Department of Environmental Engineering, Suncheon National University

#### 1. 서론

2007년 12월 7일 07경 태안 만리포 북서방 10 km 지점에서 기상악화로 예인선의 예인줄이 절단되어 크레인 이 표류하다 정박중인 허베이 스피리트(Hebei Spirit)호와 충돌하여, 적재되어 있던 10,900 ton(12,547 kL)의 원유(Kuwait crude, Iranian heavy crude, Upper zakum crude)가 해상으로 유출된 사상 최악의 해양오염사고가 발생했다.

이 처럼 유조선의 사고는 다량의 기름이 일시에 해상으로 유출되기 때문에 해양환경을 황폐화시키게 되는데, 유출된 기름은 생물체의 세포막에 작용하여 직접적인 치사독성을 유발하고, 먹이섭취나 행동이상을 초래하기도 하며, 조류의 깃털이나 체모의 소수성을 저하시켜 체온저하로 죽음에 이르게 하거나, PAHs(polycyclic aromatic hydrocarbons)와 같은 발암성물질이 체내에 농축되며, 환경변화에 따른 생물의 종조성과 지리적 분포의 변화를 초래하는 것은 말할 것도 없고, 생태계의 구조나 기능에 커다란 악영향을 끼치며 물질순환을 저해시킨다.

1997년 7월 일본의 동경만에서 발생한 Diamond grace 호의 좌초 사고로 1,500 m<sup>3</sup>의 원유가 유출되었을 당시 방제당국에서는 유화분산제(dispersant)를 살포하는 등 방제작업을 실시하였다. 자연적 분산이나 화학적 분산에 의해서 기름입자가 해저로 퇴적되면 기름을 분해하기 위해 기름분해 세균이나 곰팡이가 증식하여 산소를 고갈시켜 모든 생물들이 질식사하게 된다. Diamond grace호의 사고발생으로부터 약 1개월이 경과한 시점에서 해저의 상황을 촬영한 사진을 보면 백색 곰팡이와 같은 유황환원균이 대량으로 증식(Fig. 1(a))하여 이매패류가 전부 폐사하였으며(Fig. 1(b)), 산소부족으로 인해 토양 밖으로 나온 다모류의 모습도 관측되었다(Fig. 1(c)). 이 처럼 기름유출사고는 해안지역의 생물체는 말할 것도 없이 해저생물에 까지 치명적인 영향을 미치게 된다.

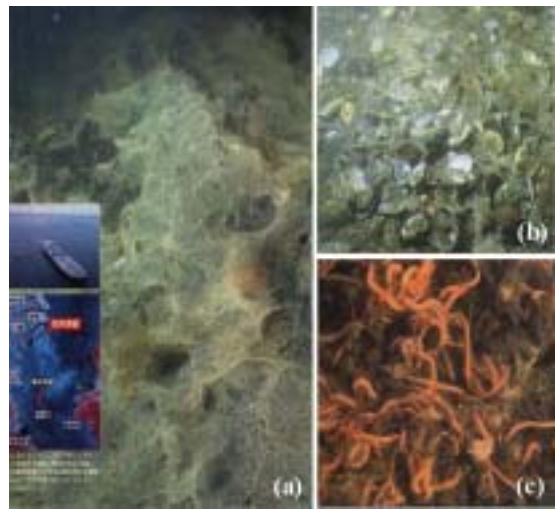


Fig. 1. Photos of sea bed after a month from the Diamond Grace oil spill in Tokyo bay.

기름유출사고는 해양생물뿐만 아니라 인간에게도 영향을 미치게 되는데, 원유에 포함된 저분자 성분들은 급성독성을 유발시킨다. 방향족 탄화수소인 benzene, toluene 및 xylene은 중추신경계를 마비시키며, benzene고리가 2개 이상인 PAHs는 발암성, 돌연변이 및 기형 유발성을 가지고 있으며, 특히 3,4-benzo(a)pyrene과 1,2-benzoanthracene 등과 같은 PAHs는 암을 유발하는 물질로 분류된다.

따라서 생태계나 인간에게 심각한 영향을 미치는 기름오염 피해를 최소화하기 위해 유출된 기름의 거동과 국외에서 적용되고 있는 처리방법들을 소개하여 과학적이고 효율적인 기름오염방제를 위한 자료를 제공하고자 한다.

#### 2. 유출된 기름의 거동

##### 2.1. 기름이란?

통상 기름(oil)이라하면 상온에서는 액체로 존재하고 물보다 가벼워서 수면 위에 얇은 층을 이루어 퍼지는 물질을 가리키며, 점성과 가연성이 있고 물에 용해되지 않는

E-mail: ccj@sunchon.ac.kr

Tel: 061-750-3815

Fax: 061-750-3508

**Table 1.** Typical composition of some oils and petroleum products<sup>1)</sup>

		Unit : percent, except for metals(ppm)				
Group	Compound class	Gasoline	Diesel	Light crude	Heavy crude	Bunker C
		50~60	65~95	55~90	25~80	20~30
Saturates	Alkanes	45~55	35~45	-	-	-
	Cyclo alkane	5	30~50	-	-	-
	Waxes	-	0~1	0~20	0~10	5~15
		25~40	5~25	10~35	15~40	30~50
Aromatics	BTEX	15~25	0.5~2.0	0.1~2.5	0.01~2.0	0.0~1.0
	PAHs	-	0~5	10~35	15~40	30~50
Resins	-	-	0~2	0~10	2~25	10~20
Asphaltenes	-	-	-	0~10	0~20	5~20
Metals	-	-	-	30~250	100~500	100~2000
Sulphur		0.02	0.1~0.5	0~2	0~5	2~4

\* Light crude oil : as imported from Canada or Louisiana  
 Heavy crude oil : as imported from Arabic countries

**Table 2.** Typical oil properties<sup>1)</sup>

Group	Units	Gasoline	Diesel	Light crude	Heavy crude	Bunker C	Crude oil emulsion
Viscosity	mPa.s at 15 °C	0.5	2	5~50	50~50,000	10,000~50,000	20,000~100,000
Density	g/mL at 15 °C	0.72	0.84	0.78~0.88	0.88~1.00	0.96~1.04	0.95~1.00
API gravity		65	35	30~50	10~30	5~15	10~15
Pour point	°C	NR	-35~-1	-40~30	-40~30	5~20	>50
Flash point	°C	-35	45	-30~30	-30~60	>100	>80

\* NR = Not Relevant

$$\text{API Gravity} = [141.5 \div (\text{density at } 15.5)] - 131.5$$

특징이 있고, 요리에 사용되는 동·식물성 기름과 공업분야에서 사용되는 광물성 기름으로 분류할 수 있다.

석유라고 하는 “petroleum”은 광물성 기름으로 라틴어의 “petra”(石 또는 岩)과 “oleum(油)”의 합성어이며, 유전으로부터 채취한 상태의 기름으로 수분과 가스분을 포함하고 있는 액체를 말한다.

원유(crude oil(petroleum))는 통상적인 처리를 통해 수분과 가스분을 제거한 석유를 말하며, 이 원유에는 수천가지의 다양한 탄화수소성분(Hydrocarbon, 75% 이상)과 유황화합물(4%), 산소화합물(2%), 질소화합물(1%), 그리고 미량의 금속 화합물(V, Fe, Ni, Cu, K, Na, Ca, As, Si)인 비탄화수소(Non-hydrocarbon)가 주로 포함되어있다. 원유는 그 원산지에 따라 물리·화학적 성질이 다소 차이가 나며, 산유국으로부터 원유 상태로 수입되며 정제과정을 거쳐 석유제품이 된다.

석유제품(oil(petroleum) products)은 해양수송을 통해서 유입된 원유를 이용목적에 적합하게 정제공정을 통해 정제된 제품을 말하며, LPG, 가솔린, 등유, 경유, 중유, 윤활유, 아스팔트 등이 이에 속한다.

Table 1과 2는 원유 및 석유제품의 일반적인 조성 성분과 성질을 나타내고 있다. Table 1에서 포화분(saturates)은 분자량이 상대적으로 작고, 극성이 낮으며, 분해성이 양호하다. 반면 아스팔틴분 쪽으로 내려올수록 역으로 분자량이 크고, 극성이 높으며, 분해성이 나쁘다.

Table 2에서 제시된 물리적 성질 중에서 대표적인 것이 점도, 밀도, 유동점인데 *Hebei Spirit*호에서 유출된 Kuwait crude, Iranian heavy crude, Upper zakum crude의 점도는 9.95 cSt(at 40 °C), 16.83 cSt(at 20 °C), 8.09 cSt(at 30 °C)이며, 비중은 약 0.85~0.89의 범위이며, 유동점은 -57°C, -36°C, -51°C이었다.

## 2.2. 원유의 수입

한국석유공사로부터 입수한 자료를 통해 분석한 결과, 2007년 한해 31개 국가로부터 87가지의 원유 873,481,000 bbl(138,796,131 kL)이 국내로 수입되었으며, 지역별로 보면 Middle east(80.1%), Asia(15.0%), Africa(4.1%) 그리고 South america(0.2%) 순이었다(Fig. 2). 주요 수입국가로는 Saudi Arabia, Arab Emirates, Kuwait, Iran순이었으며, 주요 수입국가 및 수입량은 Fig. 3에 나타내었다. 또한 수입량이 많은 원유는 Arabian light crude(113,048,000 bbl), Kuwait crude(94,031,000 bbl), Arabian medium crude(87,196,000 bbl), Murban crude(71,300,000 bbl) 순이었다(Table 2).

이번 *Hebei Spirit*호의 기름유출사고로부터 유출된 기름의 양은 2007년 수입된 원유의 약 0.009%에 해당하는 양임에도 불구하고 서해안지역을 심각히 오염시켰으며, 금번 유출량의 1만배 이상의 원유가 국내의 해안을 통해 수송되고 있어 사고위험에 언제나 노출되어 있다.

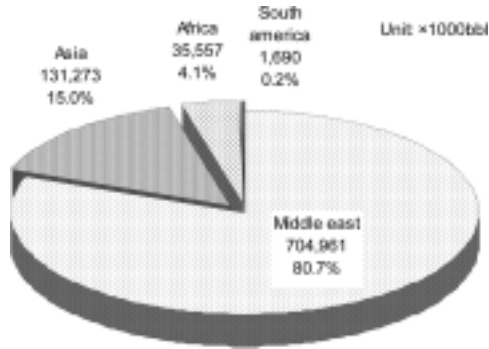


Fig. 2. Imported region and volume of crude oils in 2007.

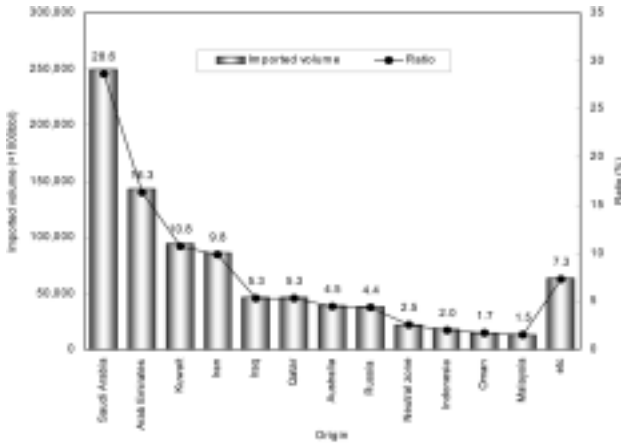


Fig. 3. Imported countries and volume of crude oils in 2007.

2.3. 기름유출 사고

Fig. 4는 해양으로 유입되는 기름의 기원을 나타낸 자료<sup>2)</sup>로서, 도시나 육상으로부터 해양투기나 강을 통한 유입

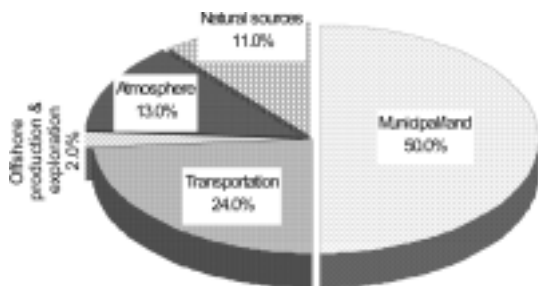


Fig. 4. Statistical data of oil sources into the sea worldwide.

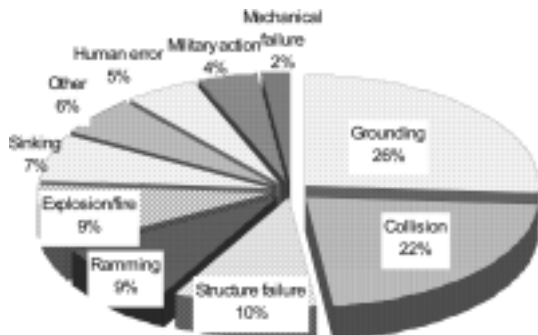


Fig. 5. Causes of vessel oil spill in the world.

등으로 인해 약 50%의 기름이 해양으로 유입되며, 수송과정 중에 발생하는 사고나 deballasting으로 유입되는 것이 24%, 해양에서 자연적으로 발생하는 것이 11%정도이다. 이중 수송과정 중에 발생하는 기름유출사고의 유형<sup>3)</sup>을 보면 좌초 26%, 충돌 22%, 선체파손 10% 순으로 나타났다 (Fig. 5).

한편, 1995년부터 2007년 까지 13년간의 국내에서 발생한 기름유출 사고 발생건수와 유출된 기름의 양에 관한 자료를 Fig. 6에 제시하였다. 여수 소리도 부근에서 *Sea prince* 호의 좌초로 유출사고가 발생한 1995년에는 기름유출 사고 발생건수가 299건으로 약 15,776 kL의 기름이 유출되었으며, 이후 2000년까지는 사고 발생건수가 483건으로 증가하다가 2007년까지는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 1995년에서 2006년까지의 평균 기름유출량은 약 1,084 kL이었으나, 2007년 태안 앞바다에서 발생한 *Hebei Spirit* 호의 기름유출사고로 12,547 kL의 기름이 유출됨으로 인해 2007년의 기름유출량은 1,4022 kL로 급격한 증가추세를 나타내었다. 기름유출사고 원인을 살펴보면 Fig. 7에 제시한 바와 같이 부주의 117건, 사고 73건 선체파손 74건, 고의 14건 등으로 조사되었으며, 이중 부주의에 의한 사고발생이 거의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

2.4. 유출된 기름의 해상에서의 거동 및 풍화과정

이번 태안 앞바다에서 발생한 *Hebei Spirit*호의 기름유출 사고에서와 같이 기름이 해양으로 유출되면, Fig. 8에 제시한 바와 같은 물리적, 화학적, 생물학적 변화를 거치면

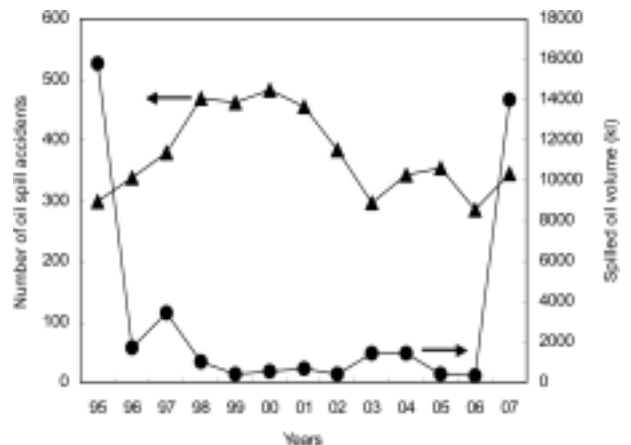


Fig. 6. Number of oil spill accidents and spilled oil volume in Korea.<sup>4)</sup>

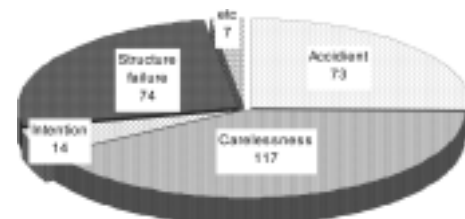


Fig. 7. Causes of oil spill accidents in Korea(2006).<sup>4)</sup>

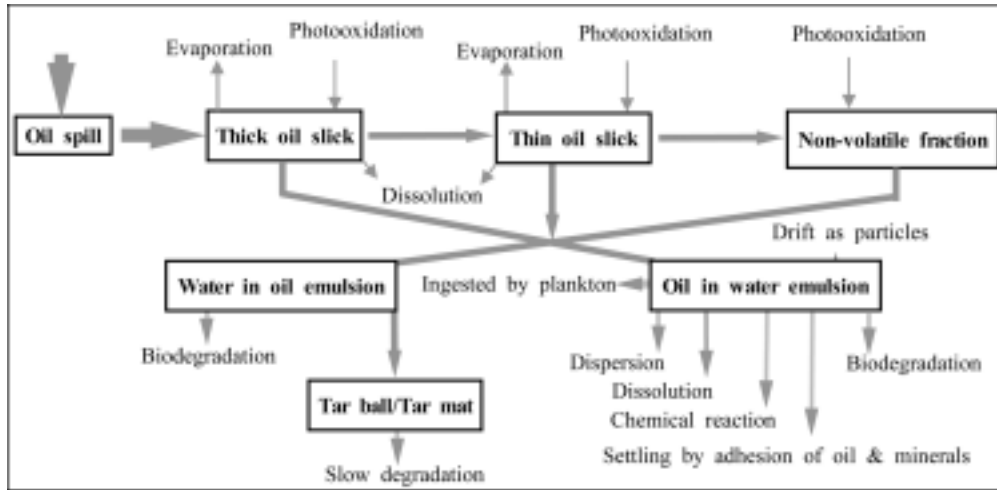


Fig. 8. Weathering processes of spilled crude oil.

서 소실되어 가는데 이 과정을 풍화과정(weathering process)이라 한다. 이 풍화과정은 확산과 이류와 같은 이동과 유출유의 물리·화학적 성질이 변하는 증발, 유화, 분산, 광산화, 용해, 미생물 분해가 있다.

2.4.1. 확산(Spreading)

해상에 유출된 기름의 제 1단계 변화는 급격한 확산이며 유출과 동시에 일어나는 변화로서 비표면적을 증대시켜 증발, 광산화, 미생물분해와 같은 풍화과정을 촉진시키기 때문에 매우 중요한 현상이다.

해상에서 유출된 기름의 확산에 영향을 미치는 물리적인 인자로는 중력(gravity), 표면장력(surface tension), 점성력(viscosity), 관성저항력(inertial force), 풍향, 풍속, 파랑, 해류, 해안이나 해양의 지형, 유출유의 종류 등이 있다.

기름이 유출되면 유출직후부터 비균질막형태(non-homogeneous film type)로 0.01~0.3 mm의 두께까지 빠르게 확산되며, 중질원유(heavy crude oil)나 중유(bunker C)는 유막(oil slick)으로 비교적 두꺼운 편이며, 가솔린, 디젤유, 경질원유(lighter crude oil)의 경우에는 보다 더 얇은 두께까지 확산이 된다.

2.4.2. 이류(Drift)

유출된 기름의 이동은 바람과 조류와 같은 물리적인 힘에 기인하기 때문에 유출유의 해상에서의 이동을 예측할 수 있는 중요한 물리적인 인자가 된다.

1967년 영국연안에서 발생한 *Torrey Canyon*호의 사고로부터 유출된 원유의 유막은 풍향과 동일한 방향으로 풍속

의 3.4%로 이동했으며, 동경만에 *Diamond Grace*호의 사고로 유출된 원유는 풍속의 4%로 이동했다. 종합하면 해상에 유출된 기름은 조류의 약 60%와 풍속의 3~4%로 이동한다고 말할 수 있다.

Fig. 9는 바람과 조류에 따른 유막의 이동경로를 나타낸 자료이다.

2.4.3. 증발(Evaporation)

해상에 유출된 기름은 급격히 확산되어 층이 얇아져 균질한 유막이 형성되는데, 그와 동시에 원유 중에 포함된 저비점성분의 증발이 시작된다. 유출유 중의 저분자 성분들이 증발 하게 되면 잔존유중에 비휘발성분(asphaltenes)과 같은 고분자 성분)의 증가로 점도가 높아져 분산, 유화, 용해, 침전과 같은 풍화메카니즘(weathering mechanism)에 영향을 미치게 된다. 저비점 성분의 증발은 유출유의 물리·화학적 성질을 변화시키는데, 만일 무게비로 약 40%의 성분이 증발에 의해서 소실되었다면 점도는 수천배 증가하고, 비중은 10% 정도, 인화점(flash point)은 400% 높아진다.

증발에 영향을 미치는 주된 인자로는 유출유의 물리·화학적 성질, 유막의 두께, 확산면적, 온도, 풍속 등이다.

기름이 유출될 당시 주변 환경여건에 따라 다소 차이는 있겠지만, 15°C의 조건에서 이들 안에 gasoline은 완전히 증발되고, 경유는 약 60%, 중질원유는 40%, 중질원유는 20%, C중유는 약 3%가 증발하는 것으로 알려져 있다. 이 증발에 의해서 소실되는 휘발성분은 생물에게 강한 독성을 발현한다.

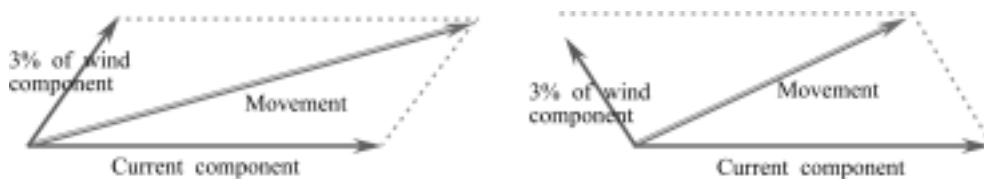


Fig. 9. Effect of different wind and current directions on the movement of an oil slick.

**Table 3.** Reduction of spilled oil(light North sea crude oil) by evaporation and dispersion under different sea condition<sup>5)</sup>

State of the sea	Loss of oil through evaporation(%)	Loss of oil through dispersion(%)		
		Day 1 ~ 3	Day 4 ~ 5	Day 6 and later
Calm	25 ~ 35	10 ~ 30	5 ~ 15	0 ~ 5
Medium	30 ~ 40	20 ~ 40	10 ~ 20	0 ~ 7
Rough	35 ~ 45	30 ~ 50	20 ~ 30	0 ~ 10
Very rough	35 ~ 45	40 ~ 60	25 ~ 35	0 ~ 10

Table 3은 해상 조건에 따른 증발과 분산에 의한 유출 원유의 소실율을 나타낸 자료이다.

2.4.4. 유화(Emulsification)

유화라고 하는 것은 어떠한 액체가 작은 입자형태로 다른 액체의 내부로 분산되는 것을 말하며, 수면위의 유막은 파도와 같은 물리적 혼합작용에 의해서 해수와 섞여 유화(emulsification)된다. 유화는 유-중-수 에멀션(water in oil emulsion, w/o emulsion)과 수-중-유 에멀션(oil in water emulsion, o/w emulsion)의 형태로 나눌 수 있고, 해수가 50~80% 포함된 유-중-수 에멀션을 “무스(mousse)”나 “초코렛 무스(chocolate mousse)”라고 한다, 원유가 mousse화 되면 유출된 원유의 양보다 약 3배 정도가 증가하게 되고, 이때 기름의 점도는 약 100~1,000배까지 증가하게 된다. 한편 o/w emulsion은 파동에 의한 자연적인 분산이나 인위적인 분산제의 살포에 의해서 만들어 지게 된다.

2.4.5. 분산(Dispersion)

겨울철에 바람이 강하기 때문에 기름유출사고의 약 50%가 집중되는 경향을 나타내며, 강한 바람에 의해서 유출유의 이동이 빨라지고 수체(water body)의 성층현상이 약해지기 때문에 분산현상이 잘 발생한다. 자연적인 분산은 파도와 난류에 의해서 발생하며 0.02 mm보다 작은 입자들은 수중에서 안정적으로 수중에 머무르지만, 0.1 mm 이상의 큰입자들은 파도에 의해서 잠시 수 중으로 분산되더라도 해수와의 비중차에 의해서 수초 안에 다시 떠오른다. 1993년 Scotland의 Shetland 연안에서 Braer호가 좌초되어 북해산 경질원유가 85,000 ton 유출되었으나 해안의 강한 바람과 파도에 의해서 유출된 기름의 50% 이상이 수중으로 분산되었다고 알려져 있다.

한편 해상에 유출된 기름을 방제하기 위한 한 방법으로 적용되는 유화분산제의 살포는 해수중으로 유막을 분산시키는 역할을 하는데 분산된 기름입자들은 비중이 해수의 비중 1.025보다 가볍기 때문에 수중 5 m 이내에 대부분이 분포하며 조류를 타고 광범위하게 이동하게 된다. 분산된 기름입자의 일부는 교반되지 않거나 분산제의 살포량이 부족하면 다시 기름막으로 될 수 있고, 일부는 수중의 미세 토양입자들과 부착되어 바닥으로 가라앉게 된다.

해상의 기름막에 분산제를 살포하면 분산된 기름의 비표

**Table 4.** Solubility of n-alkanes in freshwater and seawater at 25°C

n-alkane (Carbon number)	Solubility(ppb)	
	Freshwater	Seawater
Dodecane(C <sub>12</sub> )	307	2.9
Tetradecane(C <sub>14</sub> )	2.2	1.7
Hexadecane(C <sub>16</sub> )	0.9	0.4
Octadecane(C <sub>18</sub> )	2.1	0.8
Eicosane(C <sub>20</sub> )	1.9	0.8
Hexacosane(C <sub>26</sub> )	1.7	0.1

면적이 증가되어 생물에 독성이 강한 저분자 성분이 쉽게 증발될 수 있고, 미생물에 의한 분해를 촉진시키는 긍정적인 효과도 있다. 그러나 기름을 수중에 분산시킴으로써 수중에 서식하는 생물들에게 접촉할 수 있는 기회가 오히려 증가되어 더 큰 영향을 미칠 수도 있다. 그리고 연안 부근의 수심이 낮은 해역이나 폐쇄성해역에서 사용될 경우 분산된 기름이 장시간에 걸쳐서 고농도로 지속되어 생물에 악영향을 미치게 된다.

2.4.6. 용해(Dissolution)

유출된 기름중의 저분자 일부가 해수중으로 용해가 가능한데, 이들 성분은 증발에 의해서 약 10~100배 빨리 대기중으로 휘발되기 때문에 용해되는 양은 매우 작다. 따라서 유출유의 mass balance를 산정할 때 일반적으로 용해에 의한 손실은 제외된다.

Table 4는 기름 속에 포함되어 있는 포화분의 담수와 해수에서의 용해도를 비교한 결과이다. 담수보다 해수에서의 용해도가 낮고 탄소수가 증가함에 따라 용해도가 감소하는 경향을 나타낸다.

2.4.7. 광산화(Photooxidation)

유막에 태양광선이 비추게 되면 광산화에 의해서 기름중의 산소와 탄소가 결합하여 새로운 생성물이 만들어지는데, 이 새로운 생성물은 resin이다. 그로 인해 기름중의 resin 함량이 높아져 용해도가 다소 높아지고 water-in-oil emulsion의 형성이 용이해진다. 광산화 속도는 대략 0.1%/day보다 느리다. 하지만 아직까지 광산화가 기름에게 어떠한 영향을 미치는 지에 관해서는 명확히 밝혀지진 않았다.

2.4.8. 미생물분해(Biodegradation)

해양이나 연안에 존재하는 90종 이상의 bacteria와 fungi는 석유탄화수소를 분해하여 에너지를 얻는다. 미생물 분해율은 유출된 기름의 성질과 온도에 많은 영향을 받으며 온도가 증가함에 따라 미생물 분해율도 증가하게 된다. 기름 성분 중에서 특히 분해가 용이한 성분은 carbon수가 12~20번까지의 포화분이며, 높은 분자량을 갖는 방향족분과 아스팔틴분은 분해속도가 매우 느리다. gasoline은 미생물 분해가 용이한 성분을 포함하고 있으나 이들 성분들은

또한 미생물에게 독성을 발현하는 성분이기도 하다. 이들 gasoline에 포함되어있는 성분들은 휘발이 용이하기 때문에 미생물분해가 일어나기 전이 증발되어버린다. 그리고 diesel oil은 미생물분해가 용이한 성분인 saturates 성분을 많이 포함하고 있고, light crude oil은 미생물분해가 용이한 성분을 어느 정도 포함하고 있다. 또한 heavy crude oil에는 미생물분해가 용이한 성분은 많지 않고, bunker C에는 거의 없다.

또한 미생물 분해율에 영향을 미치는 인자로는 dissolved oxygen이 있는데, 이 용존산소가 풍부한 해수면에서는 미생물 분해가 상대적으로 빠르지만 용존산소가 적거나 없는 anoxic condition에서나 anaerobic condition에서는 미생물 분해가 매우 느리게 진행된다.

그리고 미생물 분해에 영향을 미치는 인자로는 nutrients (nitrogen, phosphorus)와 유출된 기름과 미생물이 접촉할 수 있는 계면이 중요하기 때문에 영양염이 풍부하거나 미생물의 접촉이 용이한 분산상의 기름이 되면 미생물 분해가 보다 용이하다.

2.4.9. 침전(Sedimentation)

유출된 기름이 침전하는 것은 해수의 비중(1.025)과 유출된 기름의 비중(원유 ≍ 0.85~0.89, C중유 ≍ 0.90)의 차에 의해서 결정되는데, 일반적으로 유출유의 비중은 해수의 비중보다 낮기 때문에 유출유 자체만으로 해저로 침전하는 것은 물리적으로 불가능하다. 그러나 유출유가 수중에 존재하는 작은 입자상물질과 부착하게 되어 비중이 해수보다 높아지게 되면 해저로 침강하게 된다. 조간대에 가까운 지역에는 입자상 물질이 해양에 비해 상대적으로 높기 때문에 유출유가 쉽게 부착되어 바닥으로 침전이 용이하게 된다. 이렇게 침전된 기름성분들은 미생물분해가 일어나고 동시에 해저층의 산소를 모두 소모하게 됨으로 해저환경이 anoxic condition이나 anaerobic condition으로 변하게 되어 해저 생물들에게 산소결핍으로 인한 질식과 같은 치명적인 영향을 미치게 됨은 물론이고 미생물 분해가 매우 느려 수십년 동안 잔존하는 경우가 많다.

그리고 유출된 기름의 성분 중에서 저비점성분이 증발하

게 됨으로써 형성되는 tar ball(직경이 10 cm 이하의 잔존유로 형성된 것)이나 tar mat(직경이 10 cm~1 m까지의 잔존유로 형성된 것)의 경우는 비중이 다소 높아지나 이 역시 비중이 해수의 비중보다 작기 때문에 자체만으로 침강하지는 않는다(Fig. 10). 단 해안지역에 표착한 tar ball이나 tar mat가 모래입자와 뒤섞여 비중이 무거워진 채로 조하대로 이동해가는 경우는 있을 수 있다.

언론보도에서처럼 oil ball이 형성되어 해수 중에 떠돌다가 기온이 올라가면 수면 위로 떠올라 터져서 수 km를 오염시킨다는 것은 사실과 전혀 다르며, 이러한 현상은 실질적으로 불가능하다.

Table 5는 Exxon Valdez, Braer, Sea Empress호의 기름 유출사고 당시 유출된 기름의 mass balance를 산정한 결과이다.

2.5. 유출된 기름의 해안에서의 거동 및 풍화과정

유출된 기름은 시간의 경과와 더불어 연안지역에 표착하게 되는데, 연안에 표착되는 기름의 형태는 저비점 성분이 증발하고 w/o emulsion이 형성된 풍화유와 자연적인 분산 또는 인위적으로 분산제를 살포해서 형성된 분산유가 있을 수 있다.

연안지역은 크게 펠지반, 모래지반, 자갈지반, 암석지반으로 나눌 수 있다.

2.5.1. 펠지반

유출된 기름이 펠지반에 유입되었을 경우 펠은 점토질 토양이 가지고 있는 특성상 토양의 수분함량이 포화상태의 조건이 형성되어 있기 때문에 유출된 기름과 비중차로 인해 표착된 기름자체 만으로 바로 토양 중으로 침투되지는 않는다. 그러나 간조시에 저서생물(benthos)들이 만들어 놓은 구멍으로 유출된 기름이 유입하는 경우는 있을 수 있다. 또한 펠지반의 조간대에서는 파도나 조석과 같은 물리적인 해수의 유동으로 인해 미세입자들이 고농도로 부유(suspension)하게 되는데, 이 부유된 토양입자들은 유출된 기름과 접촉하여 유막상태의 기름을 작은 입자상태 만들어 oil-mineral aggregates(기름+토립자 합체물)를 형성시켜



Fig. 10. Recovery of tar ball & tar mat.

Table 5. The Crude oil mass balance for the Exxon Valdez, the Braer and the Sea Empress spills after the first stage response at sea and on the shoreline<sup>6)</sup>

Oil fate	Exxon Valdez (1989)	Braer (1993)	Sea Empress (1996)
Total amount spilled(ton)	37,000	85,000	72,000
Evaporated(%)	20~30	9~19	35~45
Dispersed(%)	20~25	46~56	45~59
Recovered at sea(%)	4~8	0	1~2
Recovered at shoreline(%)	7~15	0	1.5~3.5
Stranded on the shoreline(%)	22~51	<1	2~6
In subtidal sediments(%)		35	

넓은 범위로 분산시켜 유출유의 풍화를 촉진시키며 미생물 분해속도를 촉진 시킨다.

2.5.2. 모래지반

모래지반으로 유입되는 유출유는 창조시(rising tide)에 해수와의 비중차로 인해 수면에 부유상태로 조위의 상승과 더불어 고조위선(high water line)의 모래지반에 표착(stranding)하게 된다. 이때 토양 간극수위는 모세관작용(capillary action)에 의해서 해수면보다 높기 때문에 비중이 낮은 유출유는 바로 토양중으로 침투되지 못한다. 물론 창조시에 파도가 아무리 친다 해도 결과는 마찬가지이다. 창조시에 파도와 조석의 작용으로 고조위선으로 이동한 기름은 파도에 의해서 고조위선부근의 모래표면에 표착을 하게 되고 낙조시(falling tide)에 해수면이 하강하게 됨으로 인해 토양 간극수위가 낮아짐과 동시에 토양 중으로 매우 느린 속도로 이동(침투)하게 된다. 모래지반에서 유출유의 침

투는 기름의 종류나 유출량, 토양입경, 온도 등과 같은 많은 변수에 의해서 결정된다. Fig. 11은 유출된 기름양을 달리하였을 경우 기름의 종류에 따른 침투 깊이의 차이를 나타내고 있다.<sup>7)</sup> 침투깊이는 유출된 기름양에 비례하며 기름이 가지고 있는 점도에 반비례하는 경향을 나타낸다.

이렇게 만조시(flooding tide)에 토양에 표착한 기름은 다음의 만조시까지 약 12시간 동안 토양 중으로 침투하고 다음 조위의 상승시에 침투된 기름의 일부가 다시 부상해서 상기한 메커니즘에 의해 토양 중으로 다시 침투하게 되고 또한 파도의 반복적인 작용으로 모래입자들이 이동하여 침투된 기름을 덮게 된다. 이러한 반복적인 작용으로 인해 토양 중에 침투한 기름은 sandwich형태의 모양을 만들기도 한다(Fig. 12). 이렇게 토양 중으로 침투된 기름은 저서생물에게 치사독성을 유발시키는 것은 말할 것도 없고 해수의 침투 차단에 의한 용존성 및 현탁성 물질의 공급차단, 토양내부의 온도상승에 의한 산소의 용존능 저하 등의 문제를 야기시킬 수 있다.

2.5.3. 자갈지반

Fig. 13은 자갈층으로 침투된 기름의 모습을 나타낸 사진으로, 자갈지반의 경우에 있어서 유출된 기름의 침투거동은 모래지반에서의 침투거동과 유사하며 모래지반에 비해 간극이 크기 때문에 간극사이에서 침투된 기름의 유동이 비교적 용이하다.

2.5.4. 암석지반(인공구조물)

연안 지반이 암반이나 해안구조물의 경우에는 유출된 기름이 해수위의 상조위선의 암반이나 TTP(tetrapod)에 부착하게 되며, 해안구조물이나 암반사이의 구멍으로 기름이 깊이 침투하는 경우도 있다(Fig. 14).

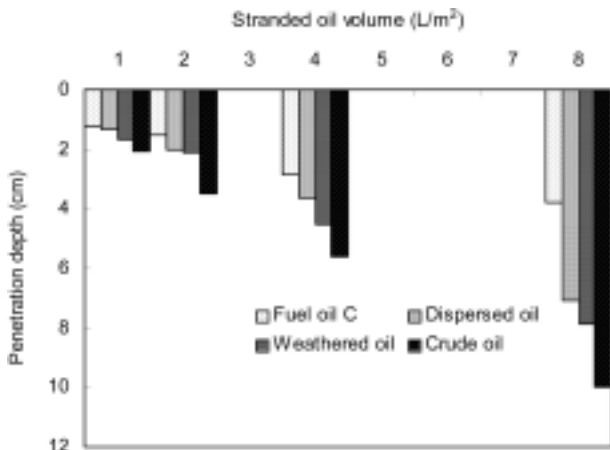


Fig. 11. Penetration of spilled oil into the coastal sediment.

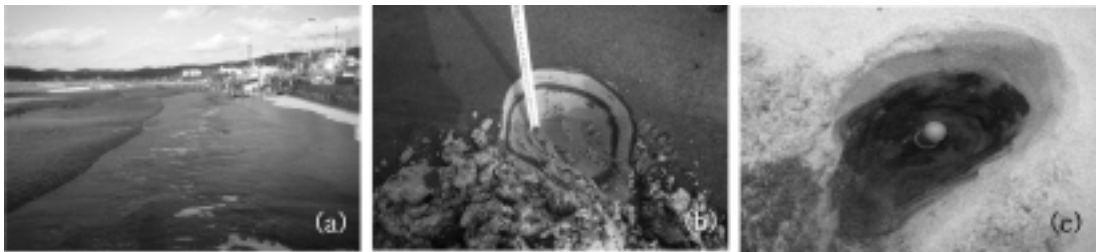


Fig. 12. Photos of oil penetration patterns taken at Manripo beach in December 8(a), December 11(b), January 6(c).



Fig. 13. Photos of oil penetration patterns taken at Padori beach(December 12(a), December 12(b) and Gurumpo beach(December 11(c)).





Fig. 14. Photos of oil adhesion on rock(a), tetrapod(b) and artificial revetment(c) at Taejan in December 12.

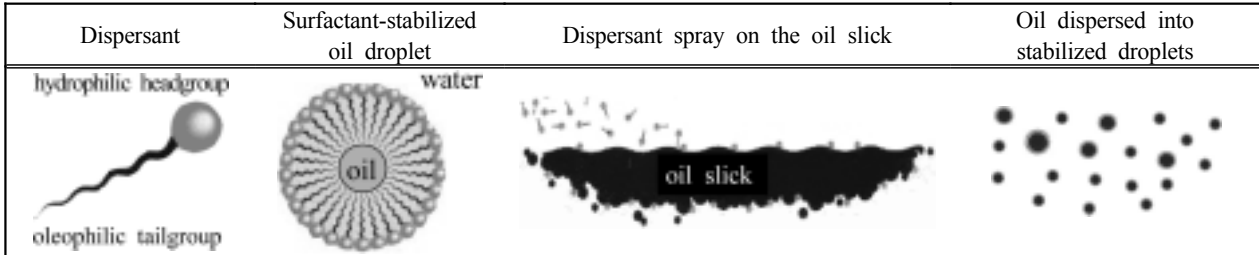


Fig. 15. Structure of dispersant and its work to oil slick.

### 3. 유출유의 방제 및 처리법

#### 3.1. 해상방제

유출된 기름의 해상에서의 방제법은 우선적으로 oil fence를 쳐서 기름의 확산과 이동을 막아 skimmer나 sorbent를 이용하여 회수하는 방법이 일반적이다. 이 물리적인 회수법은 생태계 영향이 가장 적은 해상방제법이다. 또한 유화분산제(dispersant), 결화제(solidifier), 유화방지제(deemulsifying agent)와 같은 화학적 처리제를 이용하는 방법 등이 있으나, 이 중에서 유화분산제를 살포하는 방법이 종종 적용된다. Fig. 15에 제시한 바와 같이 분산제의 성분은 용매와 계면활성제이며, 용매는 기름막에 구멍을 만들어 계면활성제를 침투시키는 역할을 하고, 계면활성제는 해수와 기름막의 계면장력을 감소시킨다. 이때 파도나 조류에 의해서 교반이 일어나게 되면 기름막은 미세한 입자로 해수중으로 분산된다. 이 분산된 기름입자들은 비중이 해수의 비중 1.025보다 가볍기 때문에 수중 5 m 이내에 대부분이 분포하며 조류를 타고 광범위하게 이동하게 된다. 분산된 기름입자의 일부는 교반되지 않거나 분산제의 살포량이 부족하면 다시 기름막으로 될 수 있고, 일부는 수중의 미세 토양입자들과 부착되어 바닥으로 가라앉게 된다.

해상의 기름막에 분산제를 살포하면 분산된 기름의 비표면적이 증가되어 생물에 독성이 강한 저분자 성분이 쉽게 증발될 수 있고, 미생물에 의한 분해를 촉진시키는 긍정적인 효과도 있다. 기름막 위에 살포된 계면활성제는 기름막과 해수사이의 계면 장력을 저하시키게 되는데, 기름막의 점도가 2,000 cSt 이상인 경우에는 유화분산제의 효과가 거의 없다.

유출유의 해상방제법의 또 한 가지는 해상에서 유출유를 직접 소각하는 방법(in-situ burning)이 있다(Fig. 16). 이 방법은 외양(外洋)에서 유출된 기름을 처리하기 위해 적용되는 방법으로 점화시에 저분자 성분의 휘발에 의한 폭발 가



Fig. 16. In-situ burning of spilled oil slick.

능성이 있으며, 기름 속에 포함되어있는 PAHs와 같은 독성물질이 확산되어 2차오염을 유발시킬 가능성이 있으므로 풍향을 잘 고려하여 인근지역에 피해가 없도록 해야 한다.

#### 3.2. 해안에 표착된 기름의 방제 및 처리법

2003년 Nature지에 발표된 논문(How to clean a beach)<sup>8)</sup>의 내용을 요약하면, 해안에서 수작업(manual recovery)으로 기름을 제거하는 것이 생물피해가 적고, 사람이 직접 기름이 뒤덮은 암벽이나 오염된 모래지역 등을 구분해서 기름을 제거할 수 있고 장비의 투입이 곤란한 고립된 암석 지반에도 효과적이다.

고온고압세척(high-pressure hot water)의 경우는 1989년 Exxon Valdez호의 기름유출사고시에 적용하였으나 고온고압세척을 하지 않은 지역보다 기름의 제거속도가 느렸고, 3년 후에는 두지역 모두 거의 동등했다. 따라서 현재는 거의 사용하지 않는 방법이고, 스페인에서는 방파제나 항구의 벽과 같은 인공구조물의 기름제거에만 적용되고 있다.



**Table 6.** Definitions, strongpoints, weakpoints of cleanup techniques to oil polluted shoreline

<p>1. 자연회복 (Natural recovery)</p>	<p>D: 정화로 인해 발생할 수 있는 생물학적 피해가 방지하는 것보다 크다고 판단될 때 적용하는 방법 S: ① 많은 생태피해가 예상되는 지역에서 기름 유출량이 적은 경우 ② 개방된 해변에서 파도에 의해 쉽게 제거될 수 있는 경우 ③ 해변에서 diesel유와 같은 지속성이 약한 기름이 유출되었을 경우 W: ① 기름이 장기적으로 잔존하여 생태계나 주민들의 생계가 위협받는 경우</p>
<p>2. 수작업에 의한 제거 (Manual recovery)</p>	<p>D: 손, 갈퀴, 포크, 걸레, 삽, 흡착포 등을 이용해서 기름을 제거하는 가장 일반적인 해안정화법 S: ① 점성이 높은 적은양의 표면 기름제거의 경우 ② 장비의 접근이 불가능한 지역 ③ 폐기물의 발생이 적고 기름으로 오염된 지역에만 집중적으로 방제가능 W: ① 제거 속도가 매우 느리고, 기름중의 인체유해성분에 쉽게 노출되며, 미끄러짐 등으로 인한 부상의 위험성이 있음</p>
<p>3. 물뿌리거나 물세척 (Flooding or washing)</p>	<p>D: 30℃ 이하의 물을 200 kpa(50 psi) 이하의 압력으로 뿌려 해안의 기름을 제거하는 일반적 방법. 온도가 높을수록 제거 효율은 좋으나 생태계피해가 커짐. S: ① 자갈로 형성된 연안지역에서 적합 W: ① 해안지반이 모래나 펄로 구성된 지역에는 부적합 ② 기름에 예민한 식물종이 서식하는 지역에서는 부적절</p>
<p>4. 진공흡입 (Vacuum)</p>	<p>D: 해변이나 해안에 모아진 기름을 진공흡입방법을 이용하여 제거하는 방법 S: ① 작은 진공흡입장치는 해안가의 기름제거에 적합 ② 가정폐기물(분뇨 등)제거용 진공흡입트럭은 모아진 기름이나 회수된 기름의 제거에 적합 W: ① 안전을 위해서 휘발성이 강한 기름의 경우에는 부적합</p>
<p>5. 기계적 제거 (Mechanical removal)</p>	<p>D: scraper, grader, bulldozer, tractor 등의 중장비를 이용하여 해안의 기름이나 기름에 오염된 모래 등을 제거하는 방법 S: ① 인력에 의한 방법보다 일시에 많은 지역의 기름에 오염된 토양을 제거 ② 지반이 모래나 작은 자갈의 경우 효과적 W: ① 중장비의 접근이 어려운 경우가 많고, 바퀴에 의해서 표착된 기름이 보다 깊이 침투하는 경우가 발생 ② 자중에 의해서 저서생물에게 악 영향을 미칠 수 있고, 과도한 모래가 폐기물로 반출되어 2차적인 처리에 부담 가증</p>
<p>6. 갈아엎기 (Tilling and aeration)</p>	<p>D: 쟁기형태의 장비를 이용해서 오염된 토양을 갈아엎는 방법으로 토양중에 잔존하는 기름의 분해 및 분해를 촉진시키기 위한 방법 S: ① 토양중의 기름을 노출시켜 자연적인 분해를 촉진시키고, 토양중에 잔존유로 형성된 "asphalt pavement"를 부수는 역할 ② 해수욕장과 같은 모래지반에서는 토양중에 잔존하는 기름냄새의 증발을 촉진시킴 ③ 모래나 자갈지반에 적합 W: ① 저서생물에게 악 영향을 미칠 수 있음</p>
<p>7. 파도에 의한 세척 (Sediment reworking or Surf washing)</p>	<p>D: 상조위선(high water line)에 잔존하는 토양중의 기름을 자연적인 힘을 이용해서 제거하기 위한 방법으로 상조위선의 오염토양을 장비로 이용해서 조간대로 이동시켜 파도에 의해서 제거하도록 하는 방법 S: ① 파도에 의해서 기름이 제거되기 때문에 친환경적인 방법 ② 모래나 자갈지반에 적합 W: ① 파도에 의해서 토양중의 기름이 재유출되어 인근지역을 오염시킬 수 있음</p>
<p>8. 화학세정제 이용 (Shoreline cleaning agent)</p>	<p>D: 최근 개발된 저독성의 beach cleaner나 surface-washing agents를 이용하여 표착된 기름을 제거하는 방법 S: ① 모래, 자갈, 암반, 인공구조물에 부착된 기름에 적용 W: ① 생물에 대한 독성의 우려가 있으므로 방제당국의 승인을 받은 후 적용</p>
<p>9. 저온·고온 고압세척 (High-pressure cold or hot water washing)</p>	<p>D: 고압으로 저온 또는 고온의 물을 오염지역에 살포하는 방법으로 함께 존재하는 식물이나 동물 및 유처리 미생물까지 씻어 내버리는 결과를 초래함. S: ① 고온의 물을 분사하기 때문에 효율적 ② 자갈이나 암석지반에 적합 W: ① 자연방치를 하는 방법보다 정화능력이 떨어짐</p>
<p>10. 모래현탁액 뿌리기 (Sand blasting)</p>	<p>D: 모래현탁액을 기름이 부착된 장소에 살포하는 방법 S: ① 부두, 방파제, 교각과 같은 인공구조물에 부착된 기름의 제거 W: ① 동·식물을 파괴</p>
<p>11. 스팀정화 (Steam cleaning)</p>	<p>D: 고온의 스팀을 분사하여 부착된 기름의 점성을 저하시켜 제거하는 방법 S: ① 부두, 방파제, 교각과 같은 인공구조물에 부착된 기름의 제거 W: ① 동·식물을 파괴</p>
<p>12. 식물제거 (Vegetation cutting)</p>	<p>D: 기름에 오염된 지역의 식물을 베어냄으로써 기름을 제거하는 방법 S: ① 오염된 식물을 베어냄으로써 2차적인 식물피해를 예방가능 W: ① 장비의 진입으로 인해 보다 심각한 식물피해가 우려</p>
<p>13. 현지소각 (In-situ burning)</p>	<p>D: 현장에서 기름을 소각하는 방법으로 water level이 높고 소각잔재물의 제거가 용이하며 식물의 성장에 영향을 미치지 않을 경우에는 유용한 방법 S: ① 초봄에 수위가 높아 식물이 타더라도 뿌리까지는 영향을 미치지 않은 경우 W: ① 늦여름이나 초가을에는 많은 식물이 죽을 수 있으므로 부적합</p>
<p>14. 화학적 방법 (Chemical agent)</p>	<p>D: beach cleaner나 surface-washing agents이외의 dispersant, solidifier, recovery agent를 살포하여 기름을 제거하는 방법 S: ① 기름이 표착된 초기 분산제의 살포가 효과적 W: ① 토양중의 저서생물에게 악 영향 ② 기름의 토양침투를 증가시키거나 기름의 회수를 저해</p>
<p>15. 미생물정화법 (Bioremediation)</p>	<p>D: 미생물을 이용해서 기름으로 오염된 지역을 정화하는 방법으로 크게 유처리 미생물을 배양하여 오염지역에 살포하는 방법(bioaugmentation)과 기름의 분해를 촉진시키기 위해서 영양제를 살포해주는 방법(biostimulation)이 있으나, 일반적으로 biostimulation이 적용됨 S: ① 펄, 모래, 자갈, 암석지반에 적용 ② 포화분을 상대적으로 많이 포함하고 있는 기름에 경유나 증유에 적합 W: ① 영양염의 살포로 적조 발생 ② 분해속도가 매우 느려 장시간이 소요 ③ 영양염의 농도, DO, pH, 온도에 많은 영향을 받음</p>

화학적 방법(chemical agent)역시 생태계에 영향을 주는 방법으로 1967년 영국 연안에서 *Torrey Canyon*호의 기름 유출사고 당시 기름보다 독성이 강한 10,000 ton의 solvent와 detergent혼합물이 살포되어 무척추동물이 죽고 약품 속에 포함된 영양염으로 인해 해조류의 성장이 촉발되었다. 현재에는 상대적으로 독성이 완화된 분산제가 개발되어 사용되고 있지만, 기름이나 분산제 단독보다 분산된 기름이 독성이 강하고 두꺼운 유막의 경우에는 비효과적이므로 부적절한 방법으로 분류된다.

그리고 중장비를 이용하는 기계적 제거법(mechanical removal)은 많은 양의 기름을 빨리 제거할 수 있지만 비용이 많이 든다. 1978년 *Amoco Cadiz*호의 기름유출사고에서 염습지에 중장비를 투입해서 표층 50 cm를 걷어냈으나 12년이 경과한 후에도 기름이 잔존한 반면 중장비를 투입하지 않은 지역에서는 깨끗하게 회복이 되었다.

또한 미생물정화법(bioremediation)의 경우는 언제나 효과적이지만은 않다. 표착된 기름이나 기름분해 미생물들이 씻겨나가지 않도록 폐쇄된 연안에서 적합하나 토양 중에 묻혀버린 기름의 경우는 분해가 매우 느리다. 또한 온도, 용존산소 영양염과 같은 환경조건에 영향을 많이 받고 기름 분해 미생물이 분해가 어려운 성분을 많이 포함하고 있는 heavy oil의 경우에는 분해가 매우 어렵다.

또한 Table 6에 제시한 바와 같이 유출된 기름으로 오염된 해안의 방제 및 처리법들이 적용되고 있다. 이 중에서 1~8까지의 방법은 효율 측면이나 생태학적 측면에서 추천될 만한 방법으로 분류할 수 있으며, 9~15까지의 방법은 부적합하거나 신중한 주의를 요하는 방법으로 분류할 수 있다.

#### 4. 결론

*Hebei Spirit*호의 사고로부터 유출된 기름의 1만배 이상

의 원유(138,796,131 kL, 2007년)가 국내의 해안을 통해 수송되고 있어 기름유출 사고위험에 언제나 노출되어 있다. 기름 유출사고에 의해서 피해를 입은 생태계가 다시 완전 회복되는 데는 수십년의 시간이 걸릴 뿐만 아니라 지역사회의 경제적인 측면에도 커다란 손실을 가져오기 때문에 기름오염으로 인한 생태계 피해를 최소화 할 수 있는 과학적인 방제방법의 개발이나 생태계 회복을 촉진시킬 수 있는 기술의 확립이 절대적으로 요구된다.

또한, 기름오염으로 삶의 터전이 황폐화된 태안지역 주민들이 절망에서 다시 재기할 수 있도록 관련 전문가들이 지혜를 모아야 할 것이며, 이를 통해, 지역주민들이 납득할 수 있는 충분한 보상이 이루어 질 수 있기를 기대한다.

#### 참고 문헌

1. Mervin, F., "The Basic of Oil Spill Cleanup," Lewis Publisher, pp. 34~35(2001).
2. Kennish, M. J., "Practical Handbook of Estuarine and Marine Pollution," CRC Press, pp. 93~139(1997).
3. Mervin, F., "The Basic of Oil Spill Cleanup," Lewis Publisher, p. 6(2001).
4. 통계청 e-나라지표 사이트, <http://www.index.go.kr>.
5. Gerlach, S. A., "Marine Pollution Diagnosis and Therapy," Springer-Verlag, pp. 71~103(1981).
6. Environmental Evaluation Committee, "The Environmental Impact of the Sea Empress Oil Spill," The Stationery Office, p. 24(1998).
7. 정정조, "유출된 풍화유와 분산유의 조건대 침투 및 생태계영향 -용존상물질의 침투량 변화-" 한국해양환경공학회지, 8(3), 134~139(2005).
7. Whitfield, J., "How to clean a beach," *Nature*, 422, 464~466(2003).