

## 海上流出油 汚染地域에서의 微生物處理濟 활용 방안 연구

정진원<sup>(1)</sup>, 윤주용<sup>(2)</sup>, 신재록<sup>(3)</sup>, 김한규<sup>(4)</sup>

### The Study for Practical use of Bioremediation Agent in Oil-Contaminated Area

by

Jin-Won Chung<sup>(1)</sup>, Joo-yong Yoon<sup>(2)</sup>, Jae-Rouk Shin<sup>(3)</sup> and Han-Gyu Kim<sup>(4)</sup>

#### 요 약

해양에 기름이 유출되면 일반적으로 오일펜스를 전장하여 유출유를 포획한 후 유회수기와 유흡착제 등을 사용하여 기름을 회수하는 물리적방법과 유처리제를 살포하여 유화·분산 처리하는 화학적인 방제방법으로 구분할 수 있다. 그러나 이들 물리·화학적인 처리방법은 사고초기에는 가장 효과적인 방법이나 기름을 완전히 제거할 수 없으며 유처리제 사용은 2차 오염 우려 가능성을 제기하고 있어 습지, 갯벌, 조간대 지역 등 생물자원이 풍부한 환경민감 지역에 대해 새로운 방제기법이 요구되고 있다. 우리나라의 경우 해양오염 방제방법은 물리·화학적 처리방법에 대한 자세한 적용방법 및 사용지침 등이 해당 법규정에 명시되어 있을 뿐만 아니라 이들 방법개발에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 또한 실제로 국내 유류오염사고의 방제에 있어서는 대부분 물리적 처리방법과 화학적 처리방법이 병행되어 실시되어 왔다. 반면에 생물학적 처리방법이 실제 방제작업에 적용된 경우는 없는데, 이는 생물정화기술에 대한 이해부족 및 기술의 난이성, 기술개발의 부진 등의 원인에 기인한 것일 수도 있으나, 근본적으로 해양생태계에 생물정화기술의 적용 및 사용지침 등에 대한 어떠한 제도적 규정이나 지침 등이 명문화 된 것이 없어 현실적으로 사용에 많은 제약에 따르고 있다. 본 연구에서는 환경친화적인 처리기법인 미생물처리제의 활용 필요성, 국내외 기술개발 현황, 선진외국의 시험방법 및 검정방법 등을 연구하여 우리나라에서 미생물처리제를 사용할 수 있는 활용방안에 대하여 논하고자 한다.

#### Abstract

Recently more than 450 incidents of oil spill a year have occurred in nearshore of Korea, which caused unmeasureable losses in fisheries and severe damage in marine ecosystem. Two approaches remain paramount in any response to marine oil spill ; the enhancement of natural dispersion of the oil by using dispersants, and mechanical recovery using booms and skimmers. A technique currently receiving fresh attention is the enhancement of the natural bioremediation of oil through the application of micro-organisms and/or

(1) 해양경찰청(KNMPA), cjwon@nmpa.go.kr  
(2) 해양경찰청(KNMPA), jooyong@nmpa.go.kr  
(3) 해양경찰청(KNMPA), krshin@nmpa.go.kr  
(4) 해양경찰청(KNMPA), khg50@nmpa.go.kr

nutrient. Oil, like many natural substances, will biodegrade over a period of time into simple compounds such as carbon dioxide, water and biomass. Bioremediation is the term used to describe a range of processes which can be used to accelerate natural biodegradation. More specifically biostimulation is the application of nutrients, and bioaugmentation or seeding is the addition of microbes specially selected to degrade oil. Bioremediation is an economically attractive method for the clean-up of oil-contaminated area. Bioremediation has been demonstrated to be an effective oil spill countermeasure for use in cobble, sand beach, salt marsh, and mud flat environment.

Keyword: bioremediation Agent, oil-contaminated area, biodegrade.

## 1. 서 론

해양에서의 기름(원유, 석유제품 및 이들을 함유하는 유성혼합물 및 폐유) 유출사고는 선박의 좌초·충돌·침몰 등 해난사고나 선박의 부주의·고의배출 등에 의한 유출에 의하여 발생한다.

1991~2001년까지 우리나라 연안에서 발생한

해양오염 사고는 총 4,190건으로 연평균 380여건의 크고 작은 사고가 발생하고 있으며 선박의 대형화 및 선복량 증가로 대형 해양오염 사고의 위험성이 상존하고 있다. 우리나라는 지정학적 특성상 수출·입 물동량의 대부분이 해상으로 운송되고 있으며 수입되는 원유 또한 매년 증가 추세에 있다. Table 1과 Table 2는 연도-사고

Table 1 Numbers and amounts of oil lost in terms of spill size during 1991~2001.

Year		Total	<1kL	1~100kL	100~1,000kL	>1,000kL
Total	Number of spills	4,190	3,760	393	28	9
		100%	89.7%	9.4%	0.7%	0.2%
	Quantity spilt(kL)	43,741	493	3,942	8,270	31,036
		100%	1.1%	9.0%	18.9%	71.0%
1991		240	208	28	4	-
1992		328	266	58	3	1
1993		371	325	38	5	3
1994		365	313	52	-	-
1995		299	257	34	4	4
1996		337	296	37	4	-
1997		379	339	35	4	1
1998		470	431	37	2	-
1999		463	440	23	-	-
2000		483	457	25	1	-
2001		455	428	26	1	-

Table 2 Major oil spills in Korea occurred during 1990~2000.

(unit : won ₩)

No.	Date	Location	Ship name	Q't(kL)	Cause	Damage demanded (Copensation)	Oil Cleanup Cost
1	'90. 7.15	인천호남정유 저유소앞	코리아호프 (유조선, 12644톤)	B-C 1,500	충돌	474억 (54억)	50억
2	'93. 6.16	인천 용진군 백암등대	코리아비너스 (유조선, 25368톤)	경유 2,000 항공유 2,288	좌초	1,020억 (48억)	5억
3	'93. 9.27	광양만	제5금동호 (유조부선, 532톤)	B-C 1,228	충돌	916억	56억
4	'95. 7.23	여천군소리도	씨프린스호 (유조선, 144567톤)	원유 4,155 B-C 879	좌초	735억	198억
5	'95. 9.21	부산남형제도	제1유일호 (유조선, 1591톤)	B-C 2,392	침몰	554억	124억
6	'95.11.17	여수 호유부두	호남사파이어 (유조선, 142448톤)	원유 1,402	충돌	82억	84억
7	'97. 4. 3	통영 등가도	제3오성호 (유조선, 786톤)	B-C 1,699	침몰	1억9천만 (6천9백만)	8억4천만
8	'97.11.25	포항 구룡포항 북방파제	제3동진호 (유조선, 237톤)	경유 400 등유 320	침몰	1천4백만	1억4천8백만
9	'97.11.25	부산 남부민동	바른호 (냉동선, 4392톤)	B-C등 203	좌초	-	7억2백만
10	'98. 1.15	울주군 서면	뉴바른호 (화물선, 4400톤)	B-C등 301	좌초	17억3천만	1천8백만
11	'00. 4.11	평택 포승면	대림501호 (준설선, 1458톤)	경유등 290	침몰	-	3억3천만

Table 3 Import situation of crude oil(1975~2000).

(unit : thousand BBI)

Year	1975	1985	1990	1996	1997	1998	1999	2000
Quantity of inducton	117,795	198,313	308,368	721,927	873,415	819,094	874,090	893,943
% ↑ ↓	-	68.3%	55.5%	134.1%	20.9%	6.2% ↓	6.7%	2.3%

규모별 오염사고 발생현황과 주요사고사례를 나타낸 표이면 Table 3은 원유수입추이를 나타낸 표이다.

해양에 기름이 유출되면 일반적으로 오일펜스를 전장하여 유출유를 포획한 후 유회수기와 유흡착재 등을 사용하여 기름을 회수하고, 잔여 유분은 자연방산 시키거나 유처리제를 살포하여 유화·분산 처리하는 물리·화학적인 방제 방법을 사용하고 있다.

그러나 이들 물리·화학적인 처리방법은 사고 초기에는 가장 효과적인 방법이나 기름을 완전

히 제거할 수 없으며 유처리제 사용은 2차오염 우려 가능성을 제기하고 있어 습지, 갯벌, 조간대 지역 등 생물자원이 풍부한 환경민감지역에 대한 새로운 방제기법이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 환경친화적인 처리기법인 미생물처리제의 활용 필요성, 국내외 기술개발 현황, 선진외국의 시험방법 및 검정방법 등을 연구하여 우리나라에서 미생물처리제를 사용할 수 있는 활용방안에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 유출유의 환경적 영향과 기름의 경시변화

### 2.1 유출유의 피해

기름유출은 연안활동이나 해양자원을 이용하려는 사람들에게 심각한 환경·경제적 피해를 가한다. 대부분의 대형오염사고의 공통된 특징은 쾌적한 지역을 오염시켜 어업, 관광, 산업, 항만 이용 등에 많은 비용손실과 위협을 초래하는데 이러한 피해는 주로 기름의 물리적 성질에 의해 야기되고 있다.

해양생물은 기름의 물리적 성질(서식지에 대한 물리적 오염과 질식작용) 또는 화학적 성분(독성효과 및 생물농축에 따른 악영향)에 의해 피해가 발생되며 이를 제거하기 위한 유출유의 방제작업 시에도 피해를 입을 수 있다.

기름유출에 의한 피해정도는 언제나 유출량에 따라 결정되는 것은 아니다. 환경오염 민감지역에 유출된 소량의 기름이 다른 지역의 유출보다 훨씬 더 치명적인 결과를 초래할 수도 있기 때문이다.

해양에 유출된 석유탄화수소(petroleum hydrocarbon)가 생태계에 피해를 입히는 화학적 인 원인은 유출유속에 여러 가지 독성물질들이 함유되어 있기 때문이다. 이 물질들은 BTEX와 같은 저분자·고독성 방향족물질(aromatics)뿐만 아니라 carboxylic acids, phenols, sulfides, thiols, 그리고 thiophenes 등이 있으며 특히 anthracene, phenanthrene, benzo[a]anthracene, benzo[a]pyrene과 같은 다환방향족탄화수소(PAHs : Polycyclic aromatic hydrocarbon)는 그 독성이 매우 강하여 발암성, 돌연변이 유발성, 내분비계 교란물질로 알려져 있다. 또한 석유탄화수소류의 독성은 유기화학구조별로 구분할 때 알칸류, 시클로알칸류, 알켄류, 그리고 방향족 순으로 점차 강하여 진다.

### 2.2 기름의 경시변화

유출된 유류의 소멸은 무생물학적(abiotic)과정 즉, 물리·화학적성질의 변화과정과 생물학적(biotic)과정을 통하여 일어난다. 무생물학적과정은 유출유의 확산(spreading), 증발(evaporation), 분산(dispersion), 유화(emulsion), 용해(dissolution),

산화(oxidation), 침전(sedimentation) 등의 과정을 말하며 생물학적과정은 기름을 탄소원이나 에너지원으로 사용하는 해양의 미생물을 통해 분해가 이루어지는 생물분해(bioremediation)과정으로 구분 할 수 있다. 유출 초기단계에서는 확산, 증발, 분산, 유화, 용해 등의 작용이 우세하며 산화, 침강, 생물분해 등은 기름의 장기적인 작용에 해당된다. 기름의 최종분해는 bacteria, yeasts, filamentous fungi 등 해양미생물에 의해 일어난다. 이러한 과정들은 유종의 특성, 유출량, 기상, 해상상태 등의 환경적 영향에 의해 정도의 차이가 발생하게 된다.

## 3. 유출유 방제 방법

해상유출유에 대한 방제방법은 유출유의 종류, 환경조건, 가용인력 및 장비 등을 고려하여 가장 효율적인 방법이 선택되어야 한다.

### 3.1 유출유의 확산방지

해상유출사고가 발생하였을 경우에는 초기의 신속한 대응으로 유류의 확산범위를 제한하는 것이 가장 중요하다. 유류 확산방지를 위한 기자재는 오일펜스(oil-fence) 등이 가장 많이 사용되고 있으며 유결화제(oil solidifying agent)와 같은 물질을 사용하기도 한다. 그리고 제한된 범위이기는 하지만 붐형 유흡착재(boom type absorbent)를 연결하여 사용할 수도 있다.

### 3.2 유출유 회수

유출유 회수방법에는 크게 기계적회수, 물리적회수로 구분할 수 있다. 기계적회수에는 유회수기(oil skimmer, trawl skimmer) 등을 이용하여 회수하는 방법이며 물리적회수 방법은 유흡착제를 사용하여 유출유를 직접 흡유하여 회수하는 방법이다.

### 3.3 유출유의 분산처리

이 방법은 유처리제를 사용하여 해상의 유출유를 미립자화하여 분산시킴으로써 자연계에 존재하는 유류분해 미생물이 유적(oil droplet)을 효과적으로 이용할 수 있게 접촉면적을 넓게 해주

는 작용을 한다. 유처리제는 사용방법, 사용장소, 시기 및 유종 등을 고려하여 사용하면 충분한 효과를 기대할 수 있으며 사용결정시에는 ‘유처리제 사용지침’에 의거하여 사용하여야 한다.

### 3.4 현장소각

해상에 유출된 유류를 회수하지 않고 현장에서 소각처리하는 방법이다. 이 방법은 유류를 회수하는데 필요한 시간과 경비를 절감할 수 있고 다량의 유류를 단시간내에 처리할 수 있는 장점이 있으나 소각으로 인한 대기오염이나 소각잔재물의 영향 등으로 실제로 이 방법을 응용할 수 있는 경우는 극히 제한적이다.

### 3.5 자연정화방법

해양에는 석유탄화수소를 탄소원이나 에너지원으로 사용하는 미생물들이 존재한다. 이와 같은 미생물들은 산업폐수 또는 가정하수가 유입되는 지점에 풍부하게 존재하나 해양에도 널리 분포되어있다. 비록 외해에 경우 이런 종류의 미생물이 수적으로 충분히 존재하지 않으나 적절한 조건이 되면 빠른 성장을 하기도 한다. 미생물에 의한 유류분해 과정에서 온도, 산소공급, 질소, 인과 같은 영양물질의 농도가 매우 중요한 요소로 작용한다.

## 4. 우리나라 해양오염방지자재·약제의 현황

해양에 기름이 유출되었을 경우 유류오염으로부터 해양환경을 보존하기 위한 최선의 방법은 빠른 시간내에 유출유를 회수 및 처리하는 것이다.

이러한 방법을 물리, 화학적인 방법으로 구분할 수 있는데 일반적인 물리적 처리방법은 오일펜스를 이용하여 유출유를 포집하고 유출유 두께, 점도, 수온 등을 고려하여 유회수기, 유흡착제, 유겔화제 등의 자재를 선택적으로 사용하여 유출유를 직접 회수하는 방법이며 화학적인 처리방법은 유처리제 등을 유막에 살포하여 해상유출유를 수중 분산시켜 자연분해될 수 있도록 하는 방법이다.

해양유출유의 방제작업시 사용할 수 있는 품목은 해양오염방지법 제64조 2항(해양오염방지설비·자재 또는 약제의 형식승인), 동법시행규칙 제104조(자재·약제의 형식승인신청)에 규정되어 있으며 검정방법 및 검정대행자 또한 법제화되어있다. 이러한 규정은 방제자재·약제를 사용함에 있어 해양환경에 미치는 영향을 최소화하고 일정성능이상의 제품을 생산·판매토록 유도하고자 함을 목적으로 하고 있다.

현재 해양오염방지 자재·약제품목은 유처리제, 유흡착제, 유겔화제, 오일펜스 등 4종으로 한정되어 있으며 이외에 방제선과 같은 방제장비 등은 “방제선 및 방제장비의 성능인정방법에 관한 규정”으로 해양경찰청 고시를 통해 성능을 인정받게 된다.

현재 해양경찰청의 형식승인을 받고 시판되거나 보유중인 자재·약제의 현황은 총 4종 198점으로 Table 4와 같으며 형식승인을 위한 주요성능시험항목은 Table 5와 같다.

해양오염 방제방법은 우리나라의 경우 물리·화학적 처리방법에 대한 자세한 적용방법 및 사용지침 등이 해당 법규정에 명시되어 있을 뿐만 아니라 이들 방법개발에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 또한 실제로 국내 유류오염사고의 방제에 있어서는 대부분 물리적 처리방법과 화학적 처리방법이 병행되어 왔다. 반면에 생

Table 4 Currently Listed approval marine pollution prevention products(2002. 3. 31).

	Total	Domestic	Import	Others
Oil spill dispersant	17 Co. 21 ea	15	4	2
Oil absorbent	40 Co. 91 ea	69	22	·
Oil solidifying agent	7 Co. 8 ea.	4	4	·
Oil fence	22 Co. 78 ea.	41	32	5

Table 5 Performance test items of marine pollution prevention products.

	Oil spill dispersant	Oil absorbent	Oil solidifying agent	Oil fence
Types	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 일반형</li> <li>◦ 농축형(10배희석)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 매트, 롤, 쿠션</li> <li>◦ 로우프, 붐*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 액상형*</li> <li>◦ 분말형</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ A형</li> <li>◦ B형</li> <li>◦ C형</li> </ul>
Major Test Items	1. 인화점	1. 온도시험	1. 인화점*	1. 외관검사
	2. 동점도	2. 흡유량시험	2. 동점도*	2. 치수검사
	3. 유화율	3. 흡수량시험	3. 겔화율	3. 부유시험
	4. 계면활성제의 생분해도	4. 진동시험	4. 포집율	4. 인장강도시험
	5. 생물에 대한 영향시험	5. 내유성시험	5. 겔화유의 함수율	5. 기질의 누설시험
	6. 유동점	6. 중량(인장시험*)	6. 유겔화제의 회수성	6. 내유시험
	7. 색	7. 강도시험	7. 생물에 대한 영향시험	7. 내후시험
	8. 밀도	8. 소각시험	8. 수용성성분의 생분해성	8. 기질의 내압시험
		9. 동정시험	9. 소각시험	
		10.소각시험		
KS No.	KS M 2800	KS K 1600	KS M 1720	KS M 3737

물학적 처리방법이 실제 방제작업에 적용된 경우는 없는데, 이는 생물정화기술에 대한 이해부족 및 기술의 난이성, 기술개발의 부진 등의 원인에 기인한 것일 수도 있으나, 근본적으로 해양 생태계에 생물정화기술의 적용 및 사용지침 등에 대한 어떠한 제도적 규정도 명문화 된 것이 없어 현실적으로 사용하기에 많은 제약이 따르기 때문이다(Kim[1999]).

## 5. 생물정화기술

### 5.1 생물정화기술의 정의

생물정화방법(bioremediation)은 자연상태로 존재하는 박테리아, 균류 또는 효모와 같은 토착성 미생물의 대사활동에 영향을 미치는 환경요인을 최적화하거나, 특별한 환경정화능력을 가진 미생물을 오염된 환경에 투입하거나 또는 양자 복합적인 처리를 통하여 각종 오염물질을 분해함으로써 오염된 환경을 원래의 상태로 회복시키는 것이다. 자연환경에서의 오염물질의 제거는 아주 복잡한 과정으로서, 존재하는 오염물질의 성질과 농도, 환경조건, 환경에 존재하는 토착성 미생물 군집의 구성에 따라 그 생분해성 여부와 정도가

결정된다. 따라서 이러한 요소를 파악해서 미생물에 의한 오염물질의 처리를 극대화시키는 방법을 bioremediation이라 한다(Lee and Kim [2001]).

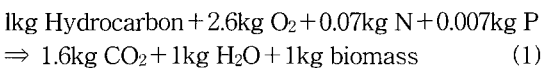
### 5.2 미생물에 의한 유류분해

1900년대 초 석유탄화수소는 미생물에 의해 분해될 수 있으며 미생물의 성장에 필요한 단일 탄소원 및 에너지원으로 이용한다는 것이 알려지게 되었다. 그 이후에는 지방족탄화수소(aliphatic hydrocarbons), 방향족탄화수소(aromatic hydrocarbons), 그리고 가스상태의 탄화수소(gaseous hydrocarbons) 등 각각에 대한 미생물의 대사과정이나 탄화수소이용 미생물들의 유전학, 토양이나 수계환경에서의 석유탄화수소의 운명, 그리고 석유탄화수소 분해미생물들의 다양한 적용가능성에 관한 연구가 이루어져 왔다. 그리고 최근에 들어서는 실제적인 다양한 석유탄화수소의 생물학적 회복기술에 관한 연구가 진행되고 있으며 또한 많은 실제적인 적용도 이루어지고 있다(Atlas[1984], Leahy and Colwell[1990], Rosenberg [1993]).

미생물분해가 가능한 유기오염물질들은 석유

계탄화수소(petrol, diesel, crude oil, lubricants, some fuel oils), PAHs(Polynuclear Aromatic Hydrocarbons), oxygenate hydrocarbon(e.g. glycols, surfactants, detergents), pesticides, BTEX components(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene), solvents 등의 물질들이 다.

일반적으로 호기성상태에서 기름이 미생물처리되는 생물학적과정을 화학식으로 표시하면 식(1)과 같다



미생물을 이용한 생물정화 방법은 물리·화학적 처리방법과 비교하여 처리기간이 길고 사전검토와 처리 후 모니터링 통해 지속적으로 관리해야 한다는 단점이 있으나 미생물에 의해 유류가 물과 이산화탄소로 전화되는 환경친화적인 장점과 비용 면에서도 유리한 점이 있다.

### 5.3 생물정화용제제

생물정화기술은 오염된 지역에 유류분해미생물이 부족할 경우 외부에서 특정미생물을 첨가하는 bioaugmentation 방법과 빈영양 환경에 인(P)이나 질소(N)와 같은 영양염제를 첨가하여 토착미생물의 활동을 자극하는 biostimulation 방법으로 구분될 수 있다(Bragg et al[1993], Lee et al[1993]).

제품의 구분은 Biological Additive(Microbiological Culture, Enzyme Additive)와 Nutrient Additive로 구분할 수 있다. 미생물처리제를 사용한 생물정화기술은 미생물에게 필요한 영양염제를 첨가하여 토착미생물을 활성화시키거나 분리한 미생물을 오염된 환경에 첨가하는 방법으로 자연정화 능력을 인위적으로 향상시키는 환경친화적인 방법이며 물리·화학적 방제 방법 후 완전히 제거되지 않거나 접근이 어렵거나 환경민감도가 높은 지역의 회복기술로 활용될 수 있다.

## 6. 미생물처리제 현황

### 6.1 외국의 사용현황

최초로 bioremediation 기술을 적용한 사례는 1972년 미국 펜실바니아주의 Ambler 시의 파손된 가솔린 파이프라인으로부터 유출된 가솔린의 처리를 들 수 있으며, 최근의 사례로 1989년 알래스카의 Prince William만의 Exxon Valdez호의 유출사고에 따른 해안의 유류오염사고에 대한 처리를 들 수 있다.

유류오염지역에서 생물학적 처리가 적용된 대표적인 사례들에 대해 알아보면 다음과 같다.

#### 6.1.1 Exxon Valdez oil spill(미국)

1989년 3월 24일 유조선 Exxon Valdez호가 Alaska Prince William해협에 약 40,000톤의 원유를 유출시켜 2,090km의 해안을 오염시키는 사고를 발생했다. 원유로 오염된 해안지역은 일차적으로 물리·화학적 처리 이후에 생물회복기술을 실험적용하게 되었다. 해협 주변의 해안조성은 99.5%의 바위와 자갈로 이루어졌으며, 0.5%는 모래와 습지로 구성되었다. 이미 그 지역에는 탄화수소를 분해시킬 수 있는 토착미생물이 높은 수준으로 존재하고 있었으며, 강력한 조력 등에 의해 적절한 산소공급이 이루어진다는 실험실 실험결과를 바탕으로 친유성 영양염제(oleophilic fertilizer)인 Inipol EAP-22와 지속성 영양염제인 Woodac와 Customblen 그리고 수용성 영양염제를 사용하였다. 특히, 이 지역의 생물정화 기술도입은 매우 광범위한 지역을 선정하였으며 생물정화기술의 가능성을 증명하는 계기가 되었다(Kim[2002], Crawford[1990]).

#### 6.1.2 Amoco Cadiz(프랑스)

Amoco Cadiz 사고에 의해 1978년 3월 프랑스 브레타뉴 해안에 약 20여만톤의 Arabian 및 Iranian Light기름이 유출되었다. 당시 매우 악한 기상조건에 의해 대량의 유출된 기름은 매우 빠르게 확산되어 넓은 해안이 오염되었다. 이 사고에서 해안가를 오염시킨 대부분의 유출유는 펌프에 의한 기계적 방법으로 회수하였지만 일부 모래지역의 경우 기름이 침투되거나 새로운 모래가 위를 덮는 등에 의해 작업이 어려웠으며 바위틈은 기계적 작업환경이 여의치 못하였다.

이런 지역들을 정화하기 위하여 4가지 방법의 생물정화 기술을 도입하여 수행하였다. 첫 번째로는 상용화된 세척제를 활용한 방법인데 이 세

척제에는 기름에 오염된 토양에 적합한 영양분이 포함되어 있어 세척효과 뿐만 아니라 토착미생물의 활성을 촉진시키는 효과를 기대할 수 있었고, 두 번째로는 동결건조시킨 유류분해세균, 분산제 및 영양염제를 혼합하여 조건대 지역에 적용하였다. 세 번째로는 농업용화학비료만을 적용시켰고, 마지막으로 0.1%의 계면활성제를 처리하는 등의 다양한 시도를 하였다. 그러나 기름 성분이 변화 되었으나 물리적 혹은 생물학적 작용인지에 대한 확실한 결과는 얻지 못하였다(Kim[2002], Swannell et al.[1996]).

### 6.1.3 Haifa beach 오염사고(이스라엘)

1991년 8월 약 100톤 정도의 중질원유(heavy crude oil)유출로 이스라엘의 Haifa와 Akko지역 사이에 위치한 Zvulon해안 북쪽이 3Km정도 오염된 사고가 있었다. 이 지역에 Rosenburge 등은 F-1이라는 친유성영양염제와 이계제를 분해할 수 있는 유류분해미생물 RT(*Gluconobacter* sp.), RL4(*Pseudomonas* sp.), RL3(*Pseudomonas alcaligenes*)를 혼합하여 처리한 결과, 대조구에 비교하여 그 정화속도가 훨씬 빠르게 진행되었으며 처리한지 25일 후에 초기 3.8g-oil/kg-sand였던 지역이 0.6g-oil/kg-sand로 약 84.5%정도가 분해됨을 보고하였다(Kim[2002]).

## 6.2 미국의 Bioremediation Agents 현황

미국의 경우 우리나라의 형식승인제도와 유사한 'U.S. EPA National Contingency Plan Product Schedule' 제도를 운영하고 있다. 미국의 'Clean Water Act', 'The Oil Pollution Act of 1990(OPA90)', 그리고 'National Contingency Plan(NCP)'에 근거한 'National Oil and Hazardous Substances Pollution Contingency Plan Product Schedule'을 U.S. EPA Oil Program Center에서 관리한다.

'U.S. EPA NCP Product Schedule'은 게재된 제품종류, 제품목록, 제작사 그리고 게재일자 등만을 수록한 것이며 'NCP Product Schedule Notebook'은 Federal On-Scene Coordinators (FOSCs), Regional Response Team(RRTs) 등이 다양한 사고상황에 알맞은 방제자재를 선택할 수 있도록 게재된 제품의 기술정보 및 시험결과 등을 수록한 참고서라할 수 있다.

품목별 시험방법은 'National Oil and Hazardous Substances Contingency Plan(59 Federal Register, September 15, 1994)'에 품목별 시험항목이 기술되어있다. NCP Product Schedule에 등재하기 위해서는 기본적으로 유처리제(dispersant)의 경우 분산효율이 50±5%효능을 입증하고 독성실험을 마친 제품에 대해서는 신청자의 게재요청에 의해 등재를 할 수 있게 되며 생물학적처리제(Bioremediation Agent)의 경우 28일 경과 후 결과치가 효능(effectiveness)을 입증하게 되면 등재 할 수 있다. 단, NCP product schedule에 등재되었다고 해서 EPA에서 제품에 대해 승인(approve)이나 보증(endorse)을 한다는 의미는 아니며 Table 6은 2001년 12월 현재 게재된 제품현황을 나타낸 표이며 현재 총 5종 49점이며 Table 7은 NCP product schedule에 등재된 미국의 미생물처리제 제품 현황을 나타내었다.

## 6.3 국내의 현황

국내에서의 해양유류분해에 관한 연구는 매우 미진한 상태이며 연구수준을 살펴보면 균주분리, 균주분류 및 동정, 분리균주의 유류분해활성도, 유류분해활성도에 대한 환경인자의 영향 등에 대한 연구에 중점을 두고 있다. 또한 균주의 분리는 온대지역인 국내육상과 해양이 주 대상이고 특히 해양부분은 주로 강하구 지역에서 수행하였다. 또한 분리미생물은 세균으로서 중온성세균에만 국한되어 있고 호기성세균으로 연구범위가 제한되어 있다. 탄화수소의 종류로는 원유, 경유, Bunker-C유를 주대상으로 연구가 수행되고 있다(Kim[2002]). 현재 국내에서 해양유류오염의 생물학적 방제에 관한 연구는 "환경친화적 유류오염 저감을 위한 상용화 기술 개발에 관한 연구(1998. 12. 1~2001. 11. 30)" 사업 사례이외에는 찾아보기 힘든 실정이며 해양오염사고시에 미생물처리제를 사용할 수 있는 제도적인 근거가 마련되어 있지 않다. 이러한 기본적인 문제를 해결하기 위해 해양경찰청에서는 미생물처리제에 의한 자연친화적인 방제기술을 도입하여 해양오염사고로 인한 환경피해를 최소화하기 위하여 해양유출 기름오염 방제작업시 사용할 수 있는 미생물처리제에 대한 성능시험기준 및 검정기준안을 마련 중에 있다.



Table 6 Currently listed product by category.

	Product Type	Number
1	Dispersants	7
2	Surface Washing Agents	19
3	Surface Collecting Agents	0
4	Bioremediation Agent ◦ Biological Additives(11) - Microbiological Cultures (10) - Enzyme Additives(1) ◦ Nutrient Additives(4)	15
5	Miscellaneous Oil Spill Control Agent	8
Total		49

Table 7 Bioremediation agents of USA(Dec. 2001).

No.	Product Name	Product Type	Manufacture	Listing Data	others
B-10	Inipol EAP 22	Nutrient Additive	Elf Aquitaine, Inc*	1996. 1.11	France
B-19	WMI-2000	Microbiological Cultures	Waste Microbes, Inc.	1990. 6.18	
B-29	PRP	Enzyme Additives	Petrol Rem, Inc.	1995.10.25	
B-35	BioGEE HC	Microbiological Cultures	RMC Bioremediation	1996.10. 6	
B-36	Oppenheimer Formula	Microbiological Cultures	Oppenheimer Biotechnology, Inc.	1996.10. 6	
B-37	BR	Microbiological Cultures	Enviro-Zyme, Inc.	1995.10. 6	
B-41	MICRO-BLAZE	Microbiological Cultures	Verde Enviromental, Inc.	1997. 1.21	
B-42	VB591™Water, VB997™Soil,&BiNutrix	Nutrient Additives	BioNutraTech Inc.	1997. 5. 2	
B-43	STEP ONE	Microbiological Cultures	B&S Research.Inc	1997. 3.21	
B-45	SYSTEM E.T. 20	Microbiological Cultures	Quantun Enviromental Tech, Inc.	1995.11.14	
B-48	BET BIOPETRO	Microbiological Cultures	BioEnviro Tech	2000. 8.31	
B-52	ENZYT	Microbiological Cultures	Acorn Biotechnical Corporation	1996. 2. 2	
B-53	Oil Spill Eater II	Nutrient Additive/Enzyme Additives	Oil Spill Eater International, Co.	1996. 8.26	
B-54	PRISTINE SEA II	Microbiological Cultures	Marine System	1999. 6.28	
B-55	Velite	Nutrient Additive	Land and Sea Restoration LLC	1999. 9.10	

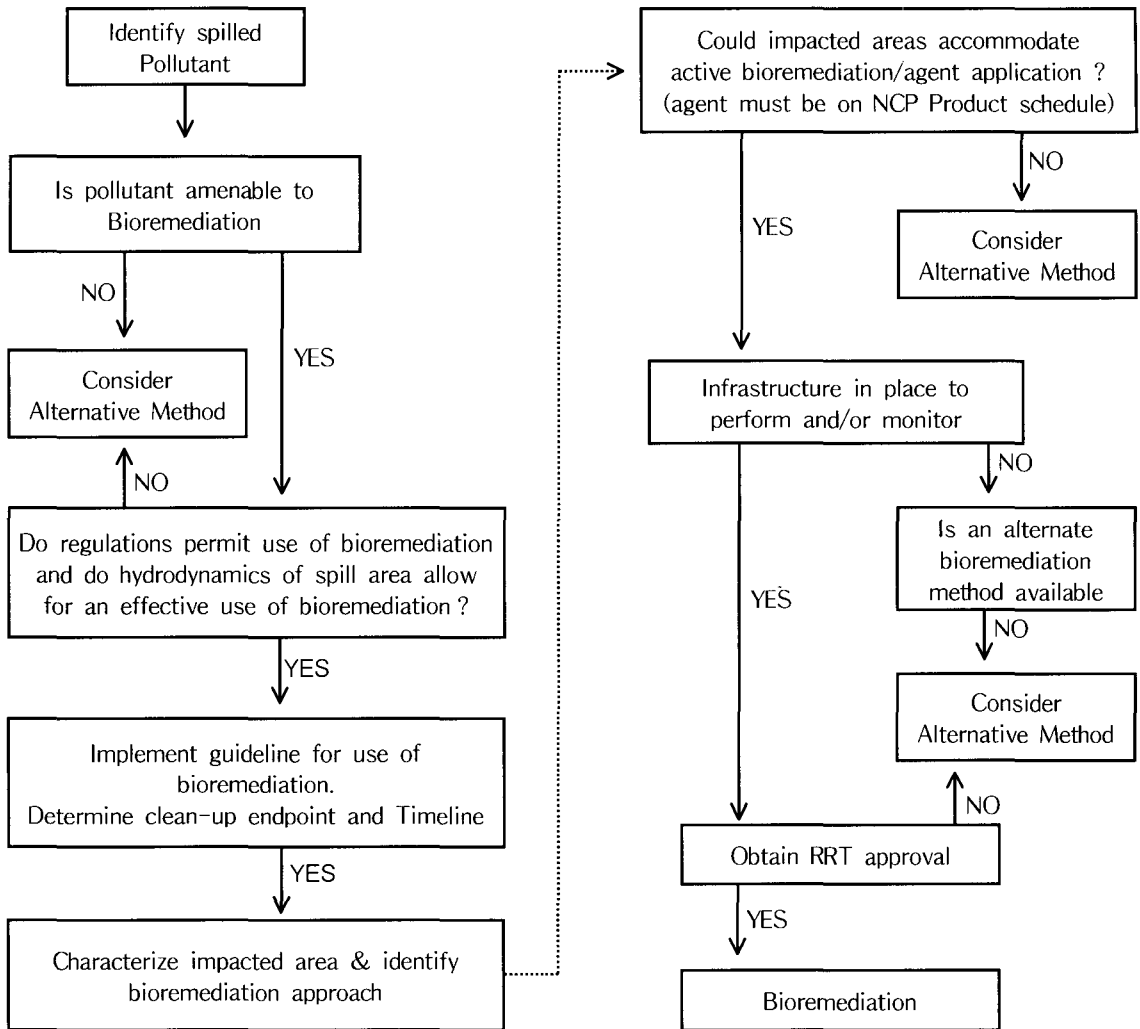


Fig. 1 Decision tree for consideration of bioremediation.

## 7. 생물학적처리기법의 사용절차 및 판단기준(Bioremediation Spill Response Plan)

이 절에서 설명되는 사항은 U.S. EPA Region 4에서 유출사고에 대한 대응 전략중 하나의 방법인 생물학적처리기법에 대한 사용절차, 판단기준, 미생물처리제 선택기준 등을 나타낸 것이다. 우리나라 현실에 완벽하게 적용될 지는 의문이지만 선진모델의 하나의 사례로서 문헌조사를

통해 알아보았다.

### 7.1 생물학적 처리 결정을 위한 단계 및 조사방식(Decision Tools)

의사결정을 위해 결정과정과 미생물처리 사용허가를 위한 조사를 통해 생물학적 처리방법 사용 여부를 결정한다.

#### 7.1.1 결정과정(Decision Process)

생물학적처리방법의 사용결정은 적용 가능한 규

정, 잠재적인 환경영향, 사용가능성, 병참지원 등의 여러 가지 사항에 대한 적절한 평가 후에 내려져야 할 사항이다. 이 과정은 발생된 유출사고에 대해 생물학적 처리 방법 사용이 가능한지를 결정하는 과정이다. Fig. 1은 의사결정과정을 나타낸 절차도이다.

### 7.1.2 미생물처리 사용허가 조사서(Bioremediation Use Authorization Form)

Bioremediation Use Authorization Form은 생물학적처리방법 의사결정을 하기 위한 조사양식이다. 이 조사서는 OSC(on-scene coordinator)가 조사하여 RRT(Regional Response Team)에 제출하게 된다. RRT는 OSC로부터 받은 조사보고서를 검토하여 24시간 이내에 승인여부를 결정하게 된다.

주요 조사내용은 다음과 같다.

- 사고특성조사(Time & data of release, Status of spill, Properties of spilled product etc.)
- 타당성평가기준(Type of environment, Information of Bioremediation agent etc.)
- 생물학적 처리 작업계획(Bioremediation Work Plan)
- 생물학적 처리 후 모니터링 계획(Biomonitoring Plan)
- 계획관리(Project Management)

## 7.2 타당성평가기준(Feasibility assessment criteria)

### 7.2.1 사고 특성조사(Incident Characteristics)

유출사고에 대한 특성을 조사하는 것으로 사고 발생일시, 장소, 오염상황, 유출물질의 종류, 유출량 등을 조사하는 과정이다.

### 7.2.2 유출유 특성조사(Characteristics of spilled oil)

유출된 기름의 종류 및 물리·화학적 특성을 분석하여 미생물처리 적정성 여부를 사전에 검토하는 단계이며 Group별로 일반적인 분류하여 판단할 수 있게 하였다. Table 8은 기름의 특성을 5가지로 구분한 표이다.

### 7.2.3 피해지역의 특성조사(Characteristics of Affected Habitat)

피해지역에 따라 미생물처리 적용이 가능지역의 판단기준 설정.

## 8. 결 론

해상유출유에 대한 방제방법은 유출유의 종류, 해양환경조건, 보유장비 및 자재 등을 고려하여 가장 효율적인 방법이 선택되어야 한다. 해상유출유는 가급적 빠른 시간내에 물리적 회수방법을 통해 처리하는 것이 바람직하며 물리적 회수가 곤란한 얇은 유막의 유출유는 화학적 처리방법이 적용될 수 있다.

이러한 물리·화학적 방법 이외에도 오염현장과 주변환경에 대해 피해를 주지 않으면서 환경회복을 필요로 할 때 적용될 수 있는 기술이 미생물처리제(bioremediation agent)를 이용한 생물정화 기법이다.

생물정화기법(bioremediation)은 자연상태로 존재하는 박테리아, 균류, 또는 효모와 같은 토착성 미생물에 영향을 미치는 환경요인을 최적화시키거나, 특별한 환경정화능력을 가진 미생물을 오염된 환경에 투입하거나, 또는 양자 복합적인 처리를 통하여 각종 오염물질을 분해함으로써 오염된 환경을 원래상태로 회복시키는 기법이다. 이 기법은 물리·화학적 처리방법과 비교하여 처리기간이 길다는 단점이 있으나 미생물에 의해 유류가 물과 이산화탄소로 전환되는 환경친화적이라는 장점과 비용에서 유리한 면이 있다.

생물학적 처리방법이 적절한 지역은 부유퇴적물의 유류오염농도가 높은 곳, 습지나 갯벌지역, 생물자원이 풍부한 환경민감지역 등이 권장된다. 또한 물리·화학적인 방제작업 후 유류농도가 낮은 지역의 최종처리, 해안토양속으로 침투되어 지속적인 환경피해를 야기시키는 유류피해지역 및 퇴적물과 수층에 존재하는 PAHs 등의 생물학적 분해에 적절한 방법이다.

현재 우리나라 규정에는 해양오염사고시에 미생물처리제를 사용할 수 있는 제도적인 근거가 마련되어 있지 않다. 이러한 기본적인 문제를 해결하기 위해 주관청인 해양경찰청에서는 미생물처리제에 의한 자연친화적인 방제기술을 도입하여 해양오염사고로 인한 환경피해를 최소화하기

Table 8 Characteristics of spilled oil.

Group	Characteristics of Spilled Oil	Type of oil
Group I	Very Light Refined Product <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ very volatile and highly flammable</li> <li>◦ high acute toxicity to biota</li> <li>◦ specific gravity less than 0.80</li> </ul> ☞ not consider for bioremediation due to high evaporation rate	gasoline, naphtha, solvent
Group II	Diesel-like Products and Light Crude Oils <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ light fractions will evaporate to no residue</li> <li>◦ moderate to high toxicity to biota</li> <li>◦ tend to penetrate substrate ; fresh spill are not adhesive</li> <li>◦ specific gravity of 0.80~0.85</li> </ul> ☞ bioremediation most effective on lower molecular weight oils, with faster degrading component	West Texas Crude, marine diesel, Kerosene, jet fuel, No. 2 fuel oil
Group III	Medium-grade Crude Oils and Intermediate Product <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ up to one third will evaporate th the first 24 hour</li> <li>◦ variable acute toxicity, depending on amount of light fraction</li> <li>◦ variable substrate penetration and adhesion</li> <li>◦ specific gravity of 0.85~0.95</li> </ul> ☞ bioremediation most effective on lower molecular weight oils, with faster degrading component	North Slope crude, No. 4 fuel oil, lube oils
Group IV	Heavy Crude Oils and Residual Product <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ low acute toxicity relative to other oil types</li> <li>◦ little substrate penetration ; can be highly adhesive</li> <li>◦ specific gravity of 0.95~1.0</li> </ul> ☞ higher molecular weight and fewer number of straight-chained hydrocarbons makes bioremediation less effective than on medium oils	Venezuela crude, Bunker C, No. 6 fuel oil
Group V	Very Heavy Residual Product <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ very similar to all properties of GroupIV oils, except that the specific gravity of the oil is grater than 1.0</li> </ul>	

위하여 해양유출 기름오염 방제작업시 사용할 수 있는 미생물처리제를 사용할 수 있는 제도적인 장치를 마련 중이다.

생물학적처리방법의 목적인 환경친화적인 방제를 구현하기 위해서는 미생물처리제의 형식승인절차와 검정방법, 안전성검정방안, 사용지침 및 사용 예정장소에서의 생물정화기술 적용여부를 검토하는 Treatability study의 상세절차와 방법 등이 마련되어야 한다.

또한 외국의 'Product schedule notebook'과 같이 형식승인을 마친 제품에 대해서 '해양오염

방지자재·약제 검정 등록제품목록'을 작성하여 제품의 정보와 성능시험결과 등을 공개를 통해 현장방제작업자와 소비자들의 선택범위를 넓혀주어야 한다.

## 참고문헌

- [1] 김상진 외, 2002, "환경친화적 유류오염 저감을 위한 상용화기술 개발", 환경부.
- [2] 김상진 외, 1998, "미생물제제를 이용한 유류오염지역의 환경회복", 한국해양환경공학회 1998

년도 추계학술대회 논문집.

[3] 김상진, 1999, “생물정화기술은 어떻게 적용하여야 하는가?”, 한국해양환경공학회 1999년도 춘계학술대회 논문집.

[4] 김상진 · 이건형, 1998, “해양미생물학”, 동화기술.

[5] 심두섭 외, 1999, “유류오염지역의 생물정화 기술 적용과 모니터링”, 한국해양환경공학회 1999년도 춘계학술대회 논문집.

[6] 심재형, 1998, “해양오염과 생태계”, 민음사.

[7] 윤이용 · 박재규, 2000, “해양오염”, 동화기술.

[8] 이수형 외, 2001, “해상유출사고 방제지원시스템개발 및 상용화 기술개발”, 환경부.

[9] 해양경찰청, 1995, “Guidelines on Oil Spill Dispersant Application”, IMO/UNEP.

[10] ITOPF, 1998, “해상기름 유출대응”, 국제탱커선주오염방지연맹.

[11] Clark, J. & W. Brownell, 1989, “Marine Pollution”, Claredon Press.

[12] Gary Sergy, Sandra Blenkinsopp, Don Westlake, Julia Foght and Don McLeay, 1994, “The development of laboratory methods for assessing the efficacy and toxicity of oil spill bioremediation agents”, Environment Canada.

[13] G. Thomas, R. Nadeay and J. Ryabik, 1995, “Increasing Readiness to use Bioremediation in Response to Oil Spill”, International Maritime Organization.

[14] Kenneth Lee and Francois Xavier Merlin, 1999, “Bioremediation of oil on shoreline environments : development of techniques and guidelines”, IUPAC.

[15] MPEC, 2000, “Implementation of the OPRC convention and the OPRC-HNS protocol and relevant conference resolutions”, Maritime Environment protection committee.