

유류오염 방제에 생물정화제제 형식승인제도 도입

바다에 유출된 기름으로 오염된 지역의 친환경적인 방제를 위하여 기름분해 미생물을 이용하는 생물정화기술을 소개하고, 해양환경관리법 시행('08.1.21)으로 방제약제에 새로 추가된 생물정화제제의 성능시험기준 및 검정기준 등 형식승인절차를 기술하였다.

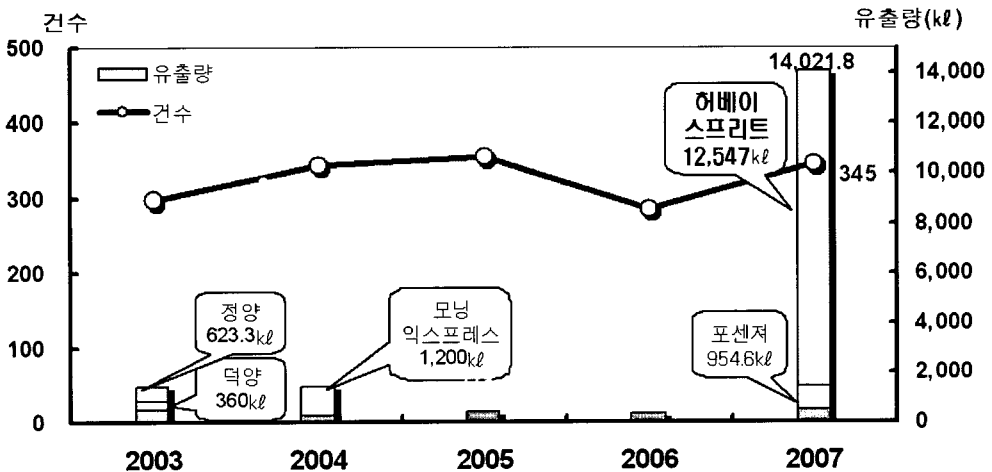
윤 주 용

해양경찰청 연구개발센터(jooyong@kcg.go.kr)

해양에서의 기름유출사고는 선박의 좌초·충돌·침몰 등 해난사고나 선박의 부주의·고의배출 등에 의한 유출로 인하여 발생한다. 우리나라 연안에서는 매년 320여건의 크고 작은 사고가 발생하고 있으며 선박의 대형화 및 선복량 증가로 대형 해양오염 사고의 위험성이 상존하고 있다. 또한 지정학적 특성상 수출·입 물동량의 대부분이 해상으로 운송되고 있으며 수입되는 원유량도 증가추세에 있다(그림 1, 표 1 참조).

해양에 기름이 유출되면 일반적으로 오일펜스를

전장하여 유출유를 포획한 후 유회수기와 유흡착재 등을 사용하여 기름을 회수하고, 잔여 얽은 유분은 자연방산 시키거나 유처리제를 살포하여 유화·분산 처리하는 물리·화학적 방제방법을 사용하고 있다. 그러나 이들 물리·화학적 처리방법은 사고초기에는 가장 효과적인 방법이나 기름을 완전히 제거할 수 없으며 유처리제 사용은 2차오염 우려 가능성을 제기하고 있어 습지, 갯벌, 조간대 지역 등 생물자원이 풍부한 환경민감지역에 대한 새로운 방제기술이 요구되고 있는 실정이다.



[그림 1] 해양오염사고 발생현황(최근5년간)



<표 1> 대형 해양오염사고 발생현황

(단위 : 원)

| 일시 | 장소 | 오염원 | 유출량(kℓ) | 원인 | 피해요구액 (보상액) | 방제비용 |
|-------------|----------------|-----------------------------|---------------------|----|------------------|--------|
| '90. 7. 15 | 인천호남정유 저유소앞 | 코리아호프 (유조선, 12644톤) | B-C 1,500 | 충돌 | 474억 (54억) | 50억 |
| '93. 9. 27 | 광양만 | 제5금동호 (유조선, 532톤) | B-C 1,228 | 충돌 | 916억 | 56억 |
| '95. 7. 23 | 여천군소리도 | 씨프린스호 (유조선, 144567톤) | 원유 4,155 B-C 879 | 좌초 | 735억 | 198억 |
| '95. 9. 21 | 부산남형제도 | 제1유일호 (유조선, 1591톤) | B-C 2,392 | 침몰 | 554억 | 124억 |
| '95. 11. 17 | 여수 호유부두 | 호남사파이어 (유조선, 142448톤) | 원유 1,402 | 충돌 | 82억 | 84억 |
| '97. 4. 3 | 통영 등가도 | 제3오성호 (유조선, 786톤) | B-C 1,699 | 침몰 | 1억9천만 (6천9백만) | 8억4천만 |
| '97. 11. 25 | 부산 남부민동 | 바론호 (냉동선, 4392톤) | B-C등 203 | 좌초 | - | 7억2백만 |
| '98. 1. 15 | 울주군 서면 | 뉴바론호 (화물선, 4400톤) | B-C등 301 | 좌초 | 17억3천만 | 1천8백만 |
| '00. 4. 11 | 평택 포승면 | 대림501호 (준설선, 1458톤) | 경유등 290 | 침몰 | - | 3억3천만 |
| '03. 9. 12 | 부산 중앙부두 | 덕양호 (유조선, 147톤) | B-C등 360 | 침몰 | 37억4천만 | 35억9천만 |
| '03. 12. 23 | 여수 낙포부두 | 정양호 (유조선, 4061톤) | B-C등 620 | 충돌 | 62억 | 39억2천만 |
| '07. 12. 7 | 태안 만리포 | 허베이 스피리트호 (유조선, 146848톤) | 원유 12,547 | 충돌 | - | - |

유출유의 피해

기름유출은 연안활동이나 해양자원을 이용하려는 사람들에게 심각한 환경·경제적 피해를 가한다. 대부분의 대형오염사고의 공통된 특징은 쾌적한 지역을 오염시켜 어업, 관광, 산업, 항만이용 등에 많은 비용손실과 위험을 초래하게 된다.

해양에 유출된 기름의 영향은 초기의 직접적인 피해와 사고 후 수개월 또는 수십년에 걸친 장기적인 피해로 크게 나눌 수 있다. 직접적인 생물 피해는 기름과 접촉하거나 독성이 강한 성분을 흡수하여 영향을 받는 것을 말한다. 해안에서 서식하는 생물이나 바닷새들은 원유나 병커유와 같은 점도가 높은 기름과 직접 접촉하게 되면 체온이 떨어지거나 질식을 하는 등 치명적인 피해를 입는다.

유류의 생리적 독성은 주로 방향족 탄화수소에 의한 생물의 대사작용 방해 때문에 일어난다. 유류의 독성은 용해도가 높은 성분의 함량과 밀접한 관계가 있다. 방향족 탄화수소는 경질유일수록 많이 함유되어 있기 때문에 가솔린이나 경유 등 경질유의 유출사고가 중질유의 유출사고보다 심각한 오염피해를 일으킬 수 있다. 그리고 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.

기름의 경시변화

유출된 유류의 변화는 물리·화학적 과정과 생물

학적 과정을 통하여 일어난다. 물리·화학적 과정은 유출유의 확산, 증발, 분산, 유화(乳化), 용해, 산화, 침전 등의 과정을 말하며 생물학적 과정은 기름을 탄소원이나 에너지원으로 사용하는 해양의 미생물을 통해 분해가 이루어지는 생물분해과정으로 구분할 수 있다.

유출 초기단계에서는 확산, 증발, 분산, 유화, 용해 등의 작용이 우세하며 산화, 침강, 생물분해 등은 기름의 장기적인 작용에 해당된다. 기름의 최종분해는 박테리아, 곰팡이, 효모균 등 해양미생물에 의해 일어난다. 이러한 과정들은 유종의 특성, 유출량, 기상, 해상상태 등의 환경적 영향에 의해 정도의 차이가 발생하게 된다.

유출유 방제 방법

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

유출유의 확산방지

해상유출사고가 발생하였을 경우에는 초기의 신속한 대응으로 유류의 확산범위를 제한하는 것이 가장

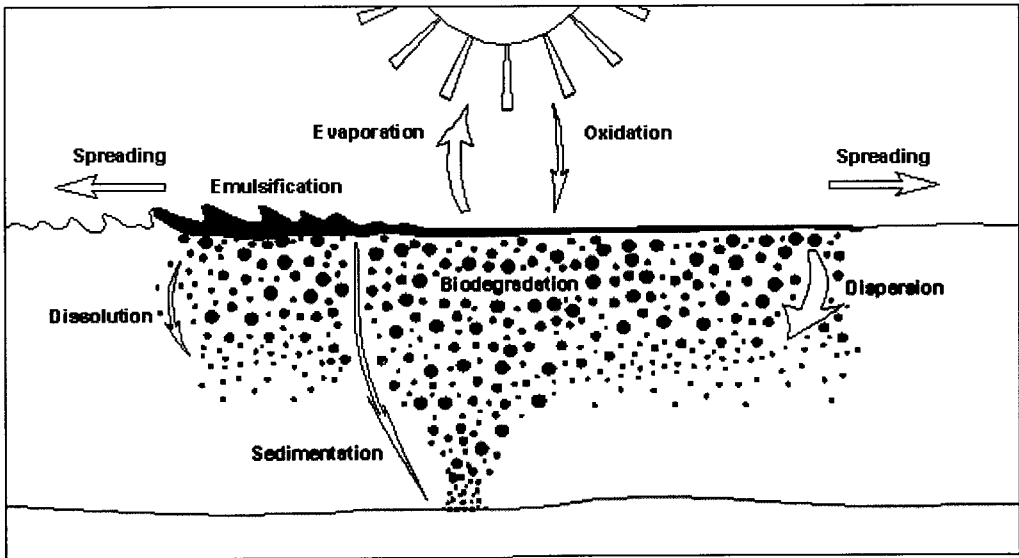
중요하다. 유류 확산방지를 위한 기자재는 오일펜스(oil-fence) 등이 가장 많이 사용되고 있으며 유겔화제와 같은 물질을 사용하기도 한다. 그리고 제한된 범위이기는 하지만 범형 유흡착재를 연결하여 사용할 수도 있다.

유출유 회수

유출유 회수방법에는 크게 기계적회수, 물리적회수로 구분할 수 있다. 기계적회수에는 유회수기 등을 이용하여 회수하는 방법이며 물리적회수 방법은 유흡착재를 사용하여 유출유를 직접 흡유하여 회수하는 방법이다.

유출유의 분산처리

유처리제는 일반적으로 계면활성제와 파라핀계 탄화수소인 용제로 구성되어 있으며 기름을 미립자로 하여 유화분산시켜 해수와 섞이기 쉬운 상태로 만듦으로서 일조에 의한 증발, 산화작용, 미생물 분해 등의 자정작용을 촉진시키기 위하여 사용한다. 유처리제는 사용방법, 사용장소, 시기 및 유종 등을 고려하여 사용하면 충분한 효과를 기대할 수 있으며 사용 결정시에는 '유처리제 사용지침'에 의거하여 사용하여야 한다.



[그림 2] 유출된 기름의 물리화학적 변화과정



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.

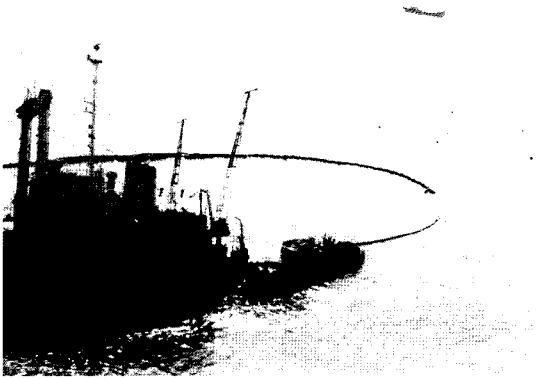
자연정화방법

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 충

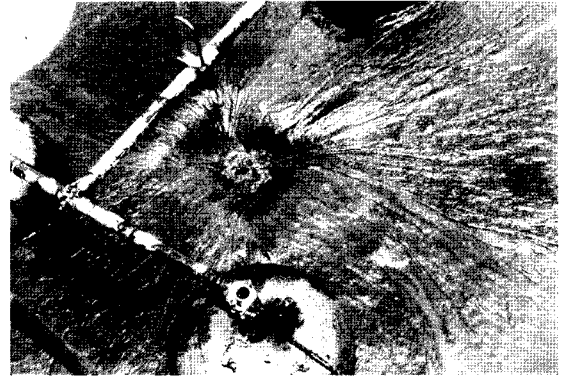
분히 존재하지 않으나 적절한 조건이 되면 빠른 성장을 하기도 한다. 미생물에 의한 유류분해 과정에서 온도, 산소공급, 질소, 인과 같은 영양물질의 농도가 매우 중요한 요소로 작용한다.

해양오염방제자재 · 약제의 현황

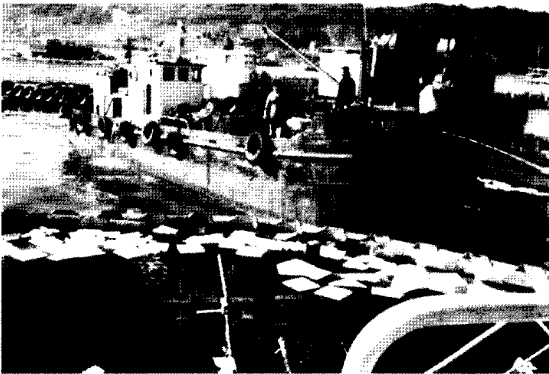
해양에 기름이 유출되었을 경우 유류오염으로 부터 해양환경을 보존하기 위한 최선의 방법은 빠른 시간내에 유출유를 회수 및 처리하는 것이다. 이러한 방법을 물리, 화학적인 방법으로 구분할 수 있는데 일반적인 물리적 처리방법은 오일펜스를 이용하여 유출유를 포집하고 유출유 두께, 점도, 수온 등을 고려하여 유회수기, 유흡착재, 유겔화제 등의 자재를 선택적으로 사용하여 유출유를 직접 회수하는 방



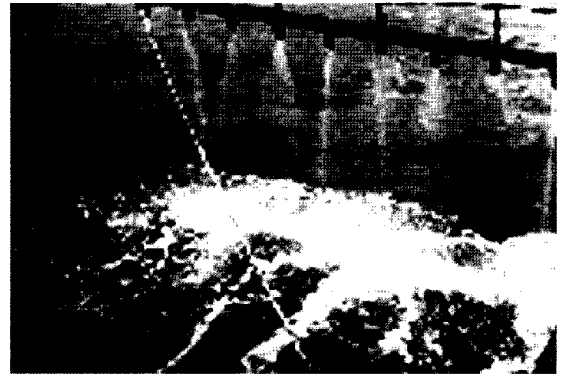
[그림 3] 유출유 확산방지



[그림 4] 유회수기에 의한 회수



[그림 5] 흡착재에 의한 회수



[그림 6] 유출유 분산처리

법이며 화학적인 처리방법은 유처리제 등을 유막에 살포하여 해상유출유를 수중 분산시켜 자연분해될 수 있도록 하는 방법이다.

해상유출유의 방제작업시 사용할 수 있는 품목은 해양환경관리법 제110조(해양환경측정기기 등의 형식승인)과 같은 법 시행규칙 제66조(자재·약제의 형식승인신청)에 규정되어 있다. 이러한 규정은 방제자재·약제를 사용함에 있어 해양환경에 미치는 영향을 최소화하고 일정 성능 이상의 제품을 생산·판매토록 유도하고자 함을 목적으로 하고 있다.

현재 해양경찰청의 형식승인을 받고 시판되거나 보유중인 자재·약제의 현황은 표 2와 같다.

생물정화기술(bioremediation) 정의

생물정화기술은 석유탄화수소를 분해할 수 있는 박테리아, 균류 또는 효모와 같은 미생물을 활성화시켜 오염지역의 유류를 분해하여 최종적으로 물(H₂O)과 이산화탄소(CO₂)로 분해시키는 환경친화적인 방제방법이다.

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. 자연환경에서 오염물질의 제거는 아주 복잡한 과정으로 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 방법이다.

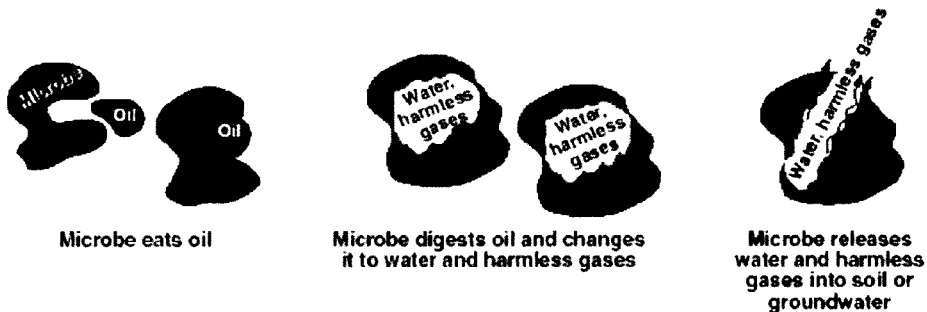
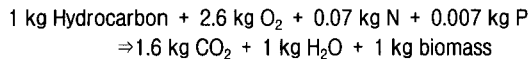
이러한 방법은 자연정화 능력을 인위적으로 향상시키는 환경친화적인 방법이며 물리·화학적 방제방법으로 완전히 제거되지 않거나 접근이 어렵거나 환경민감도가 높은 지역의 회복기술로 활용된다.

생물정화기술의 작용

1900년대 초 석유탄화수소는 미생물에 의해 분해

<표 2> 해양오염방제자재·약제 형식승인 현황(2007.12.31 현재)

| 구분 | 계 | 국내품 | 수입품 | 인정품 | 비고 |
|------|-----------|-----|-----|-----|----|
| 오일펜스 | 22개사 93종 | 51 | 37 | 5 | |
| 유흡착재 | 53개사 147종 | 119 | 28 | | |
| 유처리제 | 20개사 28종 | 20 | 6 | 2 | |
| 유겔화제 | 7개사 8종 | 4 | 4 | | |



[그림 7] 미생물에 의한 기름 분해과정



될 수 있으며 미생물의 성장에 필요한 탄소원 및 에너지원으로 이용한다는 것이 알려지게 되었다. 그 이후에는 지방족 탄화수소, 방향족 탄화수소, 그리고 가스상태의 탄화수소에 대한 미생물의 대사과정이나 미생물의 유전학, 토양이나 수계환경에서의 석유탄화수소의 운명, 그리고 석유탄화수소 분해미생물들의 다양한 적용가능성에 관한 연구가 이루어져 왔다. 그리고 최근에 들어서는 다양한 석유탄화수소의 생물학적 회복기술에 관한 연구가 진행되고 있으며 또한 많은 실제적인 적용도 이루어지고 있다.

일반적으로 호기성상태에서 기름이 미생물처리되는 생물학적과정을 화학식으로 표시하면 그림 7과 같다.

생물정화기술은 오염지역의 종류, 특성 등에 따라 다양한 기법을 적용할 수 있다. 오염지역에 유류분해 미생물이 부족한 경우에 외부의 특정미생물을 투입하는 미생물첨가방법과 빈영양환경에 인(P)이나 질소(N)와 같은 영양양제를 첨가하거나 산소의 공급을 통해 토착유류분해 미생물의 활동을 촉진하여 오염물질을 제거하는 미생물자극방법, 그리고 환경민감도가 아주 높은 지역에서는 자생식물의 경작을 통

해 환경을 복원하는 식물경작방법 등이 있다.

생물정화기술을 적용한 예는 1978년 프랑스 브레타뉴 해안에서 발생한 Amoco Cadiz호 사고, 1989년 미국 알래스카에서 발생한 Exxon Valdez호 사고, 그리고 최근 1996년 영국 밀포드항 입구에서 좌초한 Sea Empress호 사고시에 적용하였으며, 그 적용 가능성을 증명할 수 있는 유용한 자료를 제시하고 있다.

생물정화제제 형식승인제도 도입

국내에서는 1990년대 초부터 G-7 선도기술 개발사업으로 유류분해 균주의 분류 및 동정, 유류분해 활성도에 대한 환경인자의 영향 등을 연구하여 우수 유류분해 미생물을 확보하고 상온에서 장기간 배양 보존할 수 있는 방법 등의 개발에도 성공하였으나, 생물정화기술에 대한 이해부족, 기술의 난이성, 기술개발의 부진 등으로 제도적 규정이 명문화되지 않았다.

해양경찰청에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 생물정화제제의 형식승인제도 도입을 위한 연구용역사업을 실시하여 생물정화제제의 유류분해 성

<표 3> 생물정화제제 성능시험 방법 및 판정기준

| | | |
|---|--|---|
| 1 단계(제품에 대한 사전정보의 확보 및 평가) | | |
| (병원성 미생물, 유전자 조작 미생물 및 외래 미생물종 제외) | | |
| ↓ | | |
| 2 단계(제품의 생물독성 및 성능평가) | | |
| 생물 독성시험 | 판정 | 유류 분해능 |
| 1) 해양조류시험 2) 송사리 시험(LC ₅₀) 3) 알테미아 시험(LC ₅₀) 4) 조피볼락 시험(LC ₅₀) 5) Microtox(EC ₅₀) | 1) 최대적정사용농도 이상에서 대조구와 색조 비교 2), 3), 4) 24시간 TLm (또는 LC ₅₀)의 값이 최대 적정사용농도 이상 일 것 5) 15분, 30분, 60분 EC ₅₀ 값이 최대적정사용농도 이상 일 것 | 1) 총 석유탄화수소 : 20% 이상 2) 지방족탄화수소 : 20% 이상 3) 방향족탄화수소 : 15% 이상 4) 호흡률 : CO ₂ 발생량의 기울기값이 대조구 보다 클 것 5) 유류분해미생물수 : 사양서의 2% 이상 6) 총미생물수 : 사양서의 2% 이상 |
| ↓ | | |
| 기타 항목 | | |
| 영양염 · 효소제제 | 1) 영양염 정량 : 사양서의 98% 이상 2) 단백질 농도 : 사양서의 98% 이상 | |
| ↓ | | |
| 형식 승인 | | |

능을 평가하고, 사람의 건강과 해양생태계에 대한 안전성을 검증할 수 있는 방법 등을 연구하였으며, 2008년 2월 전문가 및 환경단체의 의견수렴과 토론회를 거쳐 성능시험 및 검정기준을 마련하여 생물정화제제 형식승인제도를 도입하였다.

생물정화제제 성능시험방법 및 판정기준

생물정화제제의 성능을 시험·평가하는 절차는 2 단계로 분류하였다. 특히, 생물정화제제에 의한 해양환경 안정성을 고려하여 병원성 미생물, 유전자공학적으로 조작된 미생물 및 외래미생물 종은 원칙적으로 사용을 금지토록 하였다.

1단계에서는 제품에 대한 사전정보를 받아 적합여부를 판단한다. 제품의 제조 또는 판매자는 제품의 구성성분, 성분의 안정성과 위해성, 적용방법, 주요 영향인자 등에 대한 자료를 제시하고 제출된 서류평가를 통과하면 2단계를 진행할 수 있다.

2단계 시험은 판매자가 제시한 최대적정사용농도에서 실시하며 제품의 생물독성과 유류분해능을 평가한다. 생물독성은 송사리, 알테미아 새우 및 우럭에 대한 치사농도를 시험하여 24시간 TLm(반수치사농도)이 최대적정사용농도 이상이고, 유류분해능은 총 석유탄화수소와 지방족 탄화수소는 20% 이상, 방향족 탄화수소는 15% 이상 감소하여야 한다. 생물정화제제의 성능시험방법 및 판정기준 등 형식승인 흐름도는 표 3과 같다.

결 론

해상유출유에 대한 방제방법은 유출유의 종류, 해양환경조건, 보유장비 및 자재 등을 고려하여 가장 효율적인 방법이 선택되어야 한다. 해상유출유는 가급적 빠른 시간 내에 물리적 회수방법을 통해 처리하는 것이 바람직하며 물리적 회수가 곤란한 옅은 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 생물정화제제를 이용한 생물정화기술이다.

생물정화기술은 자연상태로 존재하는 박테리아, 균류, 또는 효모와 같은 토착성 미생물에 영향을 미치는 환경요인을 최적화 시키거나, 특별한 환경정화능력을 가진 미생물을 오염된 환경에 투입하거나, 또는 양자 복합적인 처리를 통하여 각종 오염물질을 분해함으로써 오염된 환경을 원래상태로 회복시키는 기술이다. 이 기술은 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·화학적 방제작업 후 유류농도가 낮은 지역의 최종처리, 해안도양속으로 침투되어 지속적인 환경피해를 야기시키는 유류피해지역 및 퇴적물과 수층에 존재하는 방향족 탄화수소 등의 생물학적 분해에 적절한 방법이다.

앞으로 유류오염지역에서 기존에 적용하던 물리·화학적 방제방법에 생물학적인 방제방법을 추가하여 복합적인 방제기술을 적용할 수 있어 해양오염피해를 최소화하는데 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김상진, 2002, 환경친화적 유류오염 저감을 위한 상용화기술 개발, 환경부
2. 김상진, 2002, 생물정화제제 형식승인제도 도입을 위한 연구용역, 해양경찰청
3. 심재형, 1998, 해양오염과 생태계, 민음사
4. 이수형, 2001, 해상유출사고 방제지원시스템개발 및 상용화 기술개발, 환경부
5. 정진원, 2002, 해상유출유 오염지역에서의 미생물처리제 활용 방안 연구, 한국해양환경공학회
6. ITOPF, 1998, 해상기름 유출대응, 국제탱커 선주오염방지연맹