

생물정화제제의 성능시험·검정기준, 형식승인절차(안) 등에 관한 연구

정진원⁽¹⁾, 윤주용⁽²⁾, 신재록⁽³⁾, 김한규⁽⁴⁾

The Study for Performance Test · Verification Standard, Form approval procedure(draft) of OSBA

by

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

요 약

해상에 유출된 유류의 생물정화방법은 자연상태로 존재하고 유류분해능력이 있는 박테리아, 균류 또는 효모와 같은 토착미생물의 환경요인을 최적화하거나, 병원성 또는 유전자조작미생물을 제외한 특별한 환경정화능력을 가진 미생물을 오염된 지역에 투입하여 유류오염물질을 자연적으로 분해함으로써 오염된 환경을 원래의 상태로 회복시키는 기술이다. 현재 우리나라 규정에는 해양오염사고시 생물정화제제를 사용할 수 있는 제도적인 근거가 마련되어 있지 않아 실제사용 뿐만 아니라 관련 기술개발에 있어 많은 제약이 따르고 있다. 본 연구에서는 생물정화제제의 개발과 활용을 위해 관련규정에 대한 법률적 개정방향을 제시하였고 사람의 건강과 생태계의 유해한 성분을 포함하고 있는지 혹은 발생가능성이 여부를 확인하기 위하여 4단계의 생물정화제제 성능시험방법, 검정기준 및 형식승인절차를 제시하였다. 1, 2단계의 절차를 통해 생물급성독성 및 유류분해성능을 평가하여 형식승인을 여부를 결정하고 3, 4단계 절차를 통해 현장적용 가능성을 평가하는 단계로 구분하였다.

Abstract

For the last decade, some 400 small and large oil spill accidents have occurred every year. Such accident blow a serious damage to the marine resource and ecosystem, which can't be estimated in terms of economic and environmental losses. The physical/chemical methods used currently may be effective at the initial stage of accidents, but they can't serve to remove the spilled oil completely. Moreover, the dispersant may lead to a secondary contamination detrimental to the lives inhabiting wet lands, beaches and tidal zone. Thus, a new decomposing technology is required for the environmentally sensitive areas. Bioremediation is the active use of biological techniques to mitigate the consequences of a spill using biological processes and refers both of stimulation of

-
- (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

pollutant biodegradation and/or to enhance ecosystem recovery. 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.

Keywords: OSBA(Oil Spill Bioremediation Agent), bioremediation, biodegradation, oil spill.

1. 서 론

최근 10년간 우리나라 연안에서는 매년 평균 400여건의 크고 작은 유류 오염사고 발생하고 있으며 이러한 오염사고는 수산자원의 손실과 해양생태계의 파괴 등을 유발시켜 계량하기조차 힘든 경제적·환경적 손실을 가져온다. 그러나 현재 사용하고 있는 물리·화학적 방법은 사고 초기에는 가장 효과적인 방법이나 유출유를 완전히 제거하기 어렵고 유처리제의 사용은 2차 오염 우려 가능성을 제기하고 있어 습지, 갯벌 및 조간대 지역 등 생물자원이 풍부한 환경민감 지역에 대한 새로운 복원기술이 요구되고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 미생물을 이용한 생물정화기술이 새로운 대안으로 부각되면서 선진국에서는 우수한 유류 분해 미생물에 관한 연구와 미생물 적용방법 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 해안 유류 오염 현장에서 직접 미생물을 이용하여 해결하려는 다양한 시도가 이루어지고 있다.

우리나라에서도 선진국에 비해 다소 미약한 수준이지만 생물정화기술에 대한 연구가 진행되어 오고 있다. 그러나 해양생태계에 생물정화기술의 적용 및 사용지침 등에 대해 어떠한 제도적 규정도 명문화 된 것이 없어 현실적 적용에 많은 제약에 직면하게 되었다.

이에 따라 본 연구에서는 '02년도 7월에 완료한 '생물정화제제 형식승인제도 도입을 위한 연구용역' 결과와 'IMO의 생물정화제제 지침서'를 기본으로 하여 생물정화제제의 활용의 필요성, 사용기법 및 법제도 현황 등을 고찰하고 우리나라 실정에 맞는 생물정화제제 성능시험 및 검정기준(안), 형식승인 절차를 제시하고자 한다.

2. 생물정화기술(Bioremediation techniques)

2.1 생물정화(bioremediation) 정의

생물정화(bioremediation)란 생물학적과정을 통하여 유류유출의 영향을 완화시키는 생물학적 기술의 적극적 활용방법으로 정의될 수 있으며 오염물질의 생분해(biodegradation)촉진과 생태계 회복을 향상시키는데 적용되는 기술로 정의될 수 있다(IMO[2001]).

자연상태로 존재하는 박테리아, 균류 또는 효모와 같은 토착성미생물의 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 조성에 따라 그 생분해성 여부와 정도가 결정된다. 따라서 이러한 요소를 파악해서 미생물에 의한 오염물질의 처리를 극대화시키는 방법이다(Lee and Kim [2001]).

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

2.2 생물정화 필요성

모든 오염사고 상황에 적합한 단 하나의 대응기술은 존재하지 않는다. 그러므로 방제계획은 현재의 모든 정화방법을 고려해야만 한다. 일반적인 물리·화학적 방법보다 생물정화의 기본적인 장점은 물(H₂O)과 이산화탄소(CO₂)로 전환되는 자연적인 생분해 과정의 향상으로 인해 잠재적으로 유독한 오염물질을 제거한다는 것이다.

Table 1은 일반적인 방제방법과 생물정화기술 사용에 대한 찬성과 반대의 의견을 요약한 것이다.

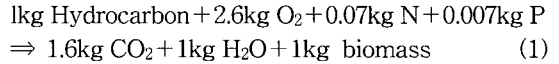
2.3 생물정화의 작용

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 석유계탄화수소(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 물질들이다(IMO[2001]).

일반적으로 호기성상태에서 기름이 미생물처

리되는 생물학적과정을 화학식으로 표시하면 식(1)과 같다



2.4 생물정화에 영향을 주는 요인

생물정화는 오염환경의 특성과 미생물간의 상호작용에 의해 지대한 영향을 받는다. 생물과정으로서 온도, 용존산소, 영양물질 농도와 같은 미생물 성장에 영향을 미치는 인자들도 생물정화과정을 제한할 수 있다. 따라서 생물정화를 사용하려는 어떠한 의사결정 과정에도 이와 같은 환경인자를 반드시 고려해야만 한다. 이와 같은 환경인자들에 대한 사항은 다음과 같다.

2.4.1 온도(Temperature)

해수표면의 온도는 극지방 2℃에서 열대지방 35℃까지의 범위를 가진다. 낮은 온도는 유류의 점성을 증가시키므로 생물활성도가 감소된다. 추운지방의 경우 온도는 생물정화의 제한요인으로 작용한다. 일반적으로 토양내 미생물은 중온성인 경우가 대부분이므로 20~30℃ 일 때 분해가 가장 활발히 진행된다. 국내환경조건에서 겨울철에는 저온에서 활성을 갖는 균주가 요구될 수 있으므로 저온성 미생물을 첨가해 줌으로써 효과를 기대할 수 있다.

2.4.2 용존산소(Dissolved Oxygen)

Table 1 Pros and cons of bioremediation.

Pros	Cons
유류분해 미생물은 어디에나 존재하며 다양한 해안선형태에서 사용할 수 있다.	open water에서는 희석 때문에 작업효율이 낮다.
자연적인 과정이다.	오염물질이 많이 남아 있는 곳에서는 사용이 곤란하다.
폐기물을 발생하지 않는다.	환경조건과 유류의 특성에 주로 의존한다. 물리/화학적 기술보다 오랜시간이 소요된다.
일반적으로 많은 노동력이 필요치 않으며 비용이 효과적일 수 있다.	충분한 계획과 세심한 모니터링이 필요하다.

적절한 용존산소 농도는 생물정화에 매우 중요하다. 일반적으로 해안가 환경의 표층은 산소가 충분히 공급된다. 특히 파도작용에 의한 산소의 공급이나 전달이 증진되는 연안지역은 용존산소의 농도가 높다. 그러나 염습지(salt marshes) 혹은 갯벌(mudflats)과 같은 미세한 퇴적토(fine-grained sediments)로 구성된 해안가는 산소이용성의 감소가 우려된다. 해안의 높이나 갯벌의 경우 산소의 공급이 미생물대사에 의해 소비되는 산소에 비해 충분하지 못하다.

2.4.3 무기영양염(Nutrient)

생물정화 과정은 충분한 영양물질이 공급되어야만 유지된다. 탄화수소가 탄소원으로 제공되고 지속적인 무기영양염이 존재할 때 성공적인 분해가 일어날 수 있다. 해수의 질소(nitrogen) 평균농도는 0.5~0.6mg/ℓ로 매우 낮기 때문에 해수가 효율적으로 교환된다 하더라도 질소는 제한요인으로 작용한다. 영양물질의 농도가 풍부한 기수(estuary), 연안 해역, 오염되었거나 퇴적토가 풍부한 내수면 수로 혹은 청정지역에도 영양물질의 농도는 제한될 수가 있다.

3. 생물정화 전략(Bioremediation Strategies)

3.1 생물자극법(Biostimulation)

이 방법은 유류를 분해하는데 필요한 산소나 무기영양염 같은 성분을 미생물에게 충분하게 제공하는 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 유류분해에는 O₂(탄화수소량의 2.6배), 질소(질소/탄화수소=0.07), 인(인/탄화수소=0.007)의 비율이 일반적인 견해이다.

기공성이 높은 모래(sandy), 자갈(gravel), 조약돌(pebble), 큰돌(cobble)로 구성된 해변가는 탄소원이 제한되어 있다. 따라서 유류오염이 발생되면 자연계 서식 분해미생물들은 신속히 반응하여 증식하게 된다. 낮은 유류농도(대략<1 g/kg)의 경우 탄화수소 독성은 낮으며 현장에 존재하는 질소농도와 산소만으로도 신속한 유류분해에 충분할 것이다. 이와 같은 상황에서 생물정화는 자연분해과정을 모니터링하는 것으로도 충분하다. 그러나 높은 유류농도(대략>5 g/kg)의 경

우 미생물들은 산소나 무기영양염이 제한되므로 생물자극이 정화방법의 적절한 선택이 될 것이다.

3.1.1 산소자극(Oxygen stimulation)

산소의 제한은 산소가 퇴적토내 미생물에게 충분히 투과공급 되지 못하였을 때 발생한다. 퇴적토내의 유류가 퇴적토 공극을 막아버리기 때문에 산소투과성이 불량할 수도 있다. 이런 경우에 퇴적토의 투과성을 회복하고 공기 중의 산소를 주입할 수 있게 하기 위하여 raking, tilling 또는 harrowing을 통해 산소를 공급할 수 있다.

3.1.2 영양염자극(Nutrient stimulation)

충분한 무기영양염 농도를 유지하기 위해서는 주로 질소와 같은 영양물질을 첨가하여야 한다. 영양물질이 제한되지 않게끔 탄화수소와 무기영양염의 비가 C:N:P = 100:10:1로 유지하는 것이 중요하다(IMO[2001]).

생물자극법 용도로 사용하기 위한 영양염제는 매우 다양한 종류가 제공되고 있다. 유기영양물질 혹은 무기영양물질의 공급원으로는 고체상, 입상 혹은 액상비료 등과 같은 것이 사용되어지고 있다. 부영양화나 독성조류 증식을 유발할 수 있기 때문에 영양물질(특히 암모니아)의 축적을 피해야 한다.

3.1.3 기타정화방법

유류의 접촉면적을 증가시키기 위하여 사용하는 계면활성제(surfactant)는 유류분해율을 궁극적으로 상승시킨다. 이와 같은 방법도 생물정화에 생물자극법 중 하나의 전략으로 분류할 수 있다. 해양환경에 유류가 유출되면 미생물의 분해는 주로 유류와 물의 계면에서 일어난다. 따라서 유류-물의 계면을 화학유처리제(chemical dispersant), 표면활성제(surface agent), 생물계면활성제(biosurfactant)의 첨가를 통해 증가시킴으로써 생분해도의 속도와 범위를 향상시킬 수 있다.

그러나 해안가에 계면활성제 사용에는 주의가 요구된다. 계면활성제에 의해 오염된 유류가 퇴적토 깊숙이 침투되거나 생태학적인 악영향을 유발할 수 있기 때문이다.

3.2 생물접종법(Bioaugmentation)

만약 충분한 유류분해 미생물들이 오염된 지역에 서식하고 있지 않다면 유류분해미생물의 첨가는 그들이 새로운 환경에서 생존할 수만 있다면 매우 유용할 것이다. 그러나 해안환경에는 탄화수소분해 미생물들이 대부분 풍부하게 서식하고 있는 것으로 알려졌다. 생물접종법은 무기영양염을 함께 첨가했을 때 오염된 해안에 성공적으로 생물정화를 수행할 수 있다. 토착 유류분해 미생물들이 존재하는 경우 상호경쟁은 생물접종법에서 주의해야 할 사항이다.

3.3 식물정화법(Phytoremediation)

담수습지(freshwater wetlands)와 염습지(saltmarshes)는 가장 민감한 생태계중의 하나이며 가장 정화하기 힘든 곳이다. 유류의 생분해율과 서식지 회복을 가속화시키기 위해 식물의 성장을 이용하는 것을 식물정화법이라고 부른다. 현재 약간의 습지 식물종은 근권(rhizosphere)의 공기공급과 삼출액(exudates)의 방출 그리고 미생물활성을 자극하는 효소들에 의해 호기성 유류생분해를 효과적으로 자극한다는 증거가 있다. 식물생장과 관련된 오염물질 분해 즉, 식물정화법은 연안환경에 하나의 유류유출 대책으로서 유망하다. 이 과정은 잔류유류 농도가 식물이 견딜 수 있는 수준의 농도로 감소될 때까지 오염지역으로부터 존재하는 내성식물들에 직접 자극을 주거나 아니면 다른 지역으로 적절한 식물종을 식목하는 방법에 기초를 두고 있다.

3.4 Ex-situ 기술 (현장의 기술)

Ex-situ 기술은 오염지역과 가까운 현장에서 시행되어진다. 주요 Ex-situ 기술은 토양경작법(landfarming), 퇴비화공법(windrow composting), 바이오파일공법(biopiling) 등을 들 수 있다. 이 과정은 유류오염사고를 처리하는 과정에서 발생하는 유류폐기물(oily waste)을 처리하는 것에 매우 적합하며 1996년 Sea Empress 사고 이후 광범위하게 사용되었다.

토양경작법은 오염토양을 굴착하여 지표면에 깔아놓고 정기적으로 뒤집어줌으로써 공기를 공급해주고 미생물의 성장을 촉진하기 위해 영양분, 수분을 공급하는 생분해 공법이다.

퇴비화공법은 오염된 물질을 호기성미생물의

발효를 통하여 퇴비를 만들어 재활용하는 공법이며 바이오파일공법은 오염토양을 굴착한 다음, 파일을 설치하고 미생물 활성을 증대시키기 위해 공기, 영양물질 등을 파일프라인을 통해 공급하여 처리하는 공법이다. 이 밖에 지중 생물학적 복원기술(In-Situ bioremediation)로는 액상 미생물제제를 오염토양내로 주입하여 토착미생물의 활성을 증진시키거나 미생물 개체수를 증대시켜 오염물질의 분해효율을 향상시키는 비굴착 복원방법이 있다.

4. 우리나라 해양오염방지자재 · 약제의 현황

4.1 우리나라의 현황

해상유출유의 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 법제화되어 있다. 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 방제선등 방제장비 등은 “방제선 및 방제장비의 성능인정방법에 관한 규정”(해양경찰청고시 제1997-51호(1997. 12. 30.))로 해양경찰청 고시를 통해 성능을 인정받게 된다.

현재 해양경찰청의 형식승인을 받고 시판되거나 보유중인 자재 · 약제의 현황은 총 4종 204점으로 Table 2와 같으며 형식승인을 위한 주요성능시험항목은 Table 3과 같다.

4.2 해양오염방지법 시행규칙 개정 추진내용

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

Table 2 Currently Listed approval marine pollution prevention products(2002. 10. 30).

	Total	Domestic	Import	Others
Oil spill dispersant	17 Co. 21 ea	15	4	2
Oil absorbent	40 Co. 9 ea	70	22	.
Oil solidifying agent	7 Co. 8 ea	4	4	.
Oil fence	22 Co. 83 ea	46	32	5

Table 3 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"> ◦ 일반형 ◦ 농축형(10배희석) 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 매트, 롤, 쿠션 ◦ 로우프, 붐* 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 액상형* ◦ 분말형 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ A형 ◦ B형 ◦ C형
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 흡수율	5. 기실의 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. 기실의 내압시험
		9. 동정시험	9. 소각시험	
		10.소각시험		
KS No.	KS M 2800	KS K 1600	KS M 1720	KS M 3737

있으나, 근본적으로 해양생태계에 생물 정화기술의 적용 및 사용지침 등에 대한 어떠한 제도적 규정도 명문화된 것이 없어 현실적으로 사용에 많은 제약에 따르기 때문이다(Kim[1999]).

생물학제제의 개발과 활용을 위해 선행되어야 하는 것은 제도적 규정을 명문화하는 것이 우선적이다.

Table 4는 생물정화제제 추가에 따른 해양오

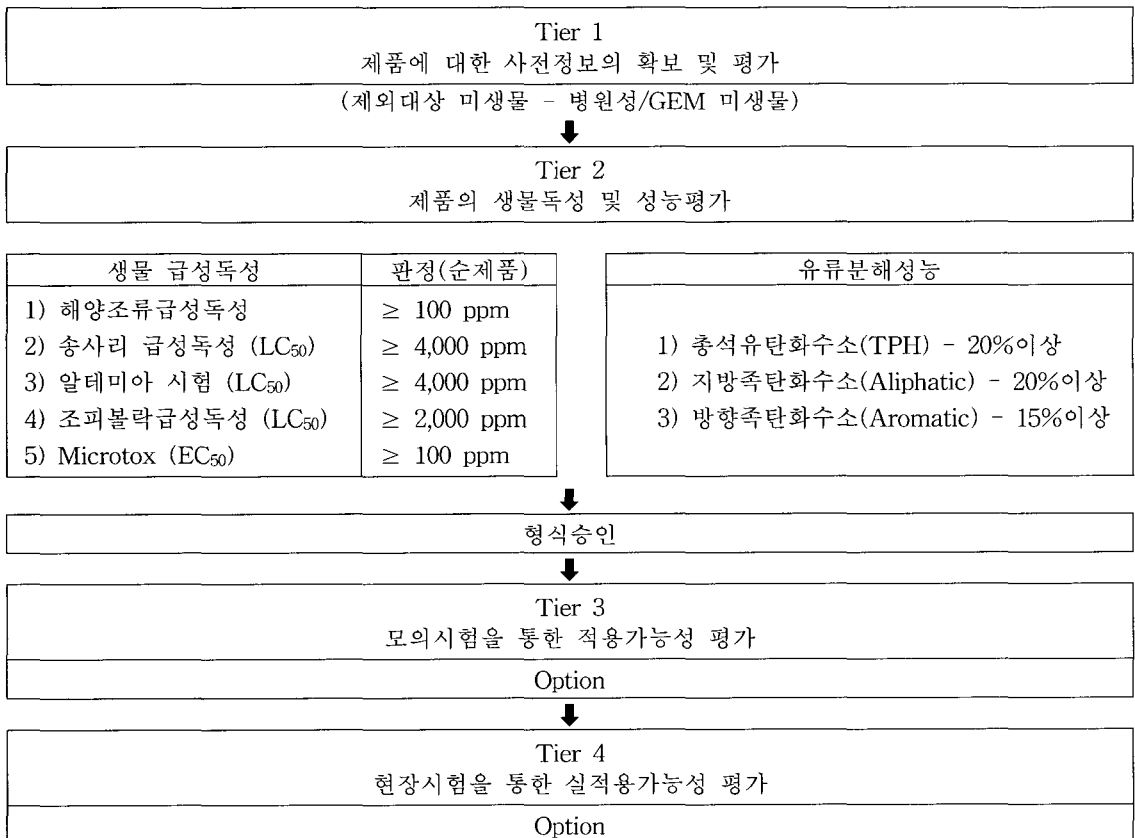
염방지법 시행규칙의 개정내용이다. 형식승인을 얻어야 하는 자재·약제의 종류의 생물정화제제의 추가는 물론 검정시험기관의 지정기준, 그리고 형식승인절차 등을 제·개정하여야 한다.

5. 유류오염 생물정화제제(OSBA)의 형식승인절차

Table 4 Amendatory draft of Enforcement Regulation of the Prevention of Marine Pollution Act.

개정 전	개정 후
<p>제104조(자재·약제의 형식승인신청)①제64조제2항의 규정에 의하여 형식승인을 얻어야 하는 자재·약제의 종류는 다음과 같다</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 오일펜스 2. 유처리제 3. 유흡착제 4. 유겔화제 <p>제114조(해양오염방지설비의 성능시험 등의 대행) ②법 제64조제6항의 규정에 의하여 해양경찰청장은 별표 28의 기준에 적합한 자를 지정하여 자재·약제의 성능시험 및 검정에 관한 업무를 대행하게 할 수 있다.</p>	<p>제104조(자재·약제의 형식승인신청)①제64조제2항의 규정에 의하여 형식승인을 얻어야 하는 자재·약제의 종류는 다음과 같다</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 오일펜스 2. 유처리제 3. 유흡착제 4. 유겔화제 5. 생물정화제제 <추가> <p><별표 28 기준 변경></p>

Table 5 OSBA(Oil Spill Bioremediation Agent) testing flowchart in Korea.



5.1 기본안

생물정화용 제품의 안정성과 성능을 시험·평가하는 절차는 4 단계로 분류하였다. 미국의 EPA와 캐나다의 환경청에서는 생물정화제제의 평가를 위한 검정단계를 기본단계로 포함한 5단계로 나누어져 있으나 우리나라에서는 절차를 간소화하기 위해 기본단계와 1단계를 통합하여 모두 4 단계로 구성하였다. 각 단계의 기본적인 흐름은 Table 5에 나타내었다.

5.2 성능시험기준

5.2.1 제1단계 - 제품에 대한 사전정보의 확보

본 단계는 제품에 대한 정보를 판매자로부터 요구하고 제출된 정보를 통하여 해양 유류오염물질을 정화하는 생물정화제제 여부를 확인하고 그 효율성을 제출된 자료를 근거로 판단하는 단계이다. Table 6은 제1단계의 평가기준, 평가항목 및 평가방법에 대해서 표로 요약하였다. 제품에 대한 정보질의서는 제품의 구성성분, 성분의 안전성 및 위해성, 적용방법, 생분해능, 적용사례, 제품의 생산능력에 대한 자료를 제시하도록 작성하였다.

5.2.2 제2단계 - 제품의 독성 및 성능평가

제 1단계에서 제출된 서류의 평가를 통과하면 2 단계를 진행할 수 있다. 2 단계에서는 제품의 독성과 효능을 평가하게 된다. 생물에 대한 독성평가와 제품의 성능평가를 동시에 진행하여 기준을 만족하면 그 결과를 통보하고 그 결과를 바탕으로 생물정화제제 형식승인을 신청할 수 있다.

(1) 생물에 대한 독성평가

독성평가는 생물정화제제가 생물에 미치는 영향을 조사한다. 일반적으로 독성은 급성독성과 만성독성으로 구분하여 수행하고 있다. 그러나 미국의 경우 생물정화제제를 대상으로한 독성은 Inland silverside(96hr LC₅₀)와 Mysid shrimp(48hr LC₅₀)을 이용한 급성독성위주의 자료를 요구하는 반면 캐나다의 경우 무지개송어(96hr LC₅₀), 물벼룩(48hr LC₅₀) 및 Microtox(EC₅₀)을 이용한 급성독성 이외에 sub-lethal effects를 추

가적으로 요구하고 있다.

규제 농도는 미국의 경우 명확히 규정되어 있지 않은 반면, 캐나다는 순제품의 경우 급성독성 LC₅₀ 값을 100 ppm 순제품/L이상으로 규정하고 있으며 제조자의 권유에 따라 현장에서 적용용액의 사용을 권유할 경우 적용용액을 대상으로 한 독성시험에서는 급성독성 LC₅₀ 값을 1,000 ppm 적용용액/L 이상으로 규정하고 있다.

본 안은 해양을 대상으로 한 생물정화제제임을 감안할 때 담수 기준안인 캐나다의 생물종을 대상으로 기준을 정하는 것보다는 미국기준과 같이 해양생물종을 대상으로 정하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

또한 향후 생물정화제제 독성평가를 수행하는 과정에서 이미 확립된 해양오염방지 자재·약제의 성능시험 기준과 병행하였을 경우 편리성을 고려하여 본 안에서는 해수환경 생물에 대한 독성시험 방법으로 5가지의 대상생물 즉 조피볼락, 송사리, 알테미아새우, 해양성 조류(algae)에 대한 급성독성 시험과 Microtox 급성독성시험을 제안하고자 한다.

어류는 대표적 국내 양식어종으로 경제적 피해 산정시 유의한 종인 조피볼락의 치어를 이용한 급성 독성(24hr LC₅₀)과 아울러 시료를 언제나 획득할 수 있는 송사리 및 알테미아새우 시험을 고려하고 있다. 해양 조류(Algae)는 해양생태계의 일차생산자로 유처리제의 1차 피해 대상 생물로 알려져 있으며 일반적으로 독성시험에 3종의 조류(*Skeletonema costatum*, *Thalassiosira pseudonana*, *Dunaliella tertiolecta*)가 사용되고 있다. 본 안에서는 국내에 널리 분포하는 *Skeletonema*를 시험종으로 이용한 KS M 2800 규정 시험방법을 고려한다.

마지막으로 미생물을 이용한 독성시험으로 널리 상용화되어 있는 Microtox 시험을 추가하고자 한다. Microtox 시험은 해양성 발광 미생물인 *Photobacterium phosphoreum*(NRRL B-11177)의 발광 저해도를 측정하는 생물학적 독성평가 기법이다(Bulich[1984]). 실험이 간편하고, 빠른 결과를 취득할 수 있다는 장점으로 캐나다와 미국에서 적용하고 있다.

5종을 대상으로한 독성시험에서 해양조류(*스케레트네마코스타툼*)의 경우, 100 ppm 이상의 시험구에서 생물정화제제를 넣지 않은 시험관과 같은 색조나 또는 약간 옅은 색조의 것을 합격

Table 6 Test procedure of Tier 1.

평가기준	평가항목	평가
(가) 제품의 물리·화학·생물학적 구성	㉔ 제품의 구성성분에 대해 명확히 설명하고 있는가?	☞ ㉔와 ㉕항목의 기준에 적합하지 않을 경우 생물정화제제로서 검토대상이 아니며 따라서 2단계 검토가 불필요하다. ☞ 신뢰할 수 있는 자료를 근거로 해양환경에 부적합한 폐해를 일으키지 않는다는 증명이 타당한지를 평가한다.
	㉕ 제품의 화학적 성분의 특성, 물리·화학적 성분, 제품의 작용속도와 잔류성, 그리고 인간과 포유류, 새, 다른 야생동물과 해양자원, 생태학적 영향에 대한 제품성분의 독성, 축척에 관한 신뢰성있는 문헌으로부터의 화학적자료의 존재여부 등이 제공되었는가를 평가한다.	
	㉖ 생물학적인 구성성분 중 병원성 및 유전공학적으로 조작된 미생물(GEM)을 사용하였는가를 확인한다.	
(나) 제품의 적용시 생분해를 예상도 및 분해양식을 검증한 자료가 있는가?	㉗ 유류화합물의 생분해가 제품을 구성하고있는 화학물질 또는 생물에 의해 진행되었음을 과학적으로 증명한 실험, 증명서 또는 논문이 제시되었는가를 평가한다.	☞ 제품의 생분해능력과 적용가능성을 판단한다
	㉘ 생분해를 증명하는 정량적인 분석자료가 제시되었는가를 판단한다. 실험실, 현장실험을 통하여 무기영양염구나 대조구와 비교하여 제품이 생분해를 증가시키었는가에 대한 자세한 내용 즉, 유류분해속도, 지방족 및 방향족탄화수소에 대한 GC분석, 산소 소비율, CO ₂ 발생, 유류분해 미생물성장 등의 결과를 기술하였는가를 평가한다.	
(다) 제품의 적용기준	㉙ 제품의 성능시험을 수행하기 위해, 적용비율과 적용 용액 준비과정에 대한 상세한 정보가 기술되었는가를 확인해야한다. 이러한 정보는 성능시험을 위한 기초자료로 이용되기 때문에 기술된 내용의 변경을 통하여 시험결과에 대한 이의를 신청할 수 없음을 확인한다.	☞ 적용에 적합한 방법을 사용하였는가를 판단
	㉚ 제품의 적용방법에 다를 때 적용된 제품의 양이 알맞은 반응속도인지 또는 최대속도인지를 평가한다	
(라) 생산능력을 갖추고 있는가를 평가	㉛ 제품의 성능이 확인되어 인증을 받았을 경우 제품을 생산하여 판매할 수 있는 잠재적인 능력을 판단한다.	

**** 단계 1의 최종결정 ****

만약 제출된 자료수집에서 제품이 다음 3가지 기준에 해당하다면 단계 1의 목적을 달성한 것으로 판단한다.

(가) 제품의 구성성분이 생물정화제제로 적합함을 증명하였다.

(나) 신뢰할 수 있는 자료를 사용하여 환경에 부적합한 해를 일으키지 않음을 증명하였다.

(다) 제품이 어떻게 생분해를 향상시키는지에 대해 적절히 증명하였다.

으로 하고 현저하게 엷은 것은 불합격으로 하며 송사리 급성독성(LC₅₀) 4,000 ppm이상, 알테미아 급성독성(LC₅₀) 4,000 ppm이상, 조피플락 급성독성(LC₅₀) 2,000 ppm이상, Microtox 급성독성(EC₅₀) 100 ppm이상의 값을 나타내어야 한다.

(2) 생물정화제제의 유류분해능 평가

본 항의 목적은 생물정화제제의 생분해능력을 평가하는 것이다. 이러한 평가의 가장 기초적인 근거가 되는 항목은 유류성분의 감소를 통하여 평가할 수 있다. 미국의 경우는 성능시험의 기준이 명확히 제시되어 있지 않고 다만 성능시험에서 총 석유탄화수소(GCD-TPH), 지방족 탄화수소, 방향족탄화수소의 검출 그리고 유류분해세균을 검출하여 제품에 관한 모든 정보와 시험결과를 EPA 지침서 목록에 수록되어 있다.

캐나다의 경우는 생물학적인 변화나 생분해를 통한 광물화에 관한 실험내용은 수록되어 있지 않고 다만 총 석유탄화수소(GCD-TPH), 지방족 탄화수소, 방향족탄화수소를 검출하여 20, 20, 15%이상 감소한 제품에 대하여 성능시험에 통과한 것으로 판단하며 그 이하인 경우 성능시험에 통과하지 못한 것으로 규정되어 있다. 본 성능시험안에서는 두 선진국에서 만들어진 지침서와 국내 연구내용을 토대로 하여 성능시험의 항목은 일차적으로 미국과 캐나다에서 공히 사용하는 총 석유탄화수소(GCD-TPH), 지방족 탄화

수소, 방향족탄화수소를 검출하고 그 외 보조자료로 이용할 수 있는 유류분해미생물의 검출 및 생분해과정을 통하여 탄화수소가 완전산화될 때 생성되는 이산화탄소의 생성율(호흡율)을 측정하는 이산화탄소 생성량 측정방법을 포함한 3가지 분석항목을 설정하였다. 또한 플라스크 실험조건으로 미국과 캐나다와 같이 대조구, 영양염대조구 및 생물정화제제 시험구로 설정하였으며 최종 판단근거는 대조구와 비교하여 생물정화제제 시험구의 생분해도 차이를 이용하여 총 석유탄화수소(GCD-TPH), 지방족 탄화수소, 방향족 탄화수소가 각각 20, 20, 15%이상 감소한 제제는 성능시험을 통과한 것으로 판단기준을 제시하였다.

2단계까지의 평가기준을 만족하게 되면 시험의뢰한 생물정화제제는 성능시험합격과 동시에 형식승인서를 발급받을 수 있다. 다음 3, 4단계는 형식승인과는 별도로 제품의 신뢰성을 높이기 위한 시험방법으로 제조자의 자의에 의해 수행의뢰할 수 있다.

형식승인을 요청하는데 필요한 시험도안 및 설치, 유류분해 미생물 수 측정, CO₂ 생성율 분석, 잔류유류화합물의 분석, 총 미생물 수 검증, 영양염 정량 및 단백질 농도 측정방법에 대한 세부검정을 거쳐야 한다.

Table 7과 Table 8은 생물정화제제의 성능시험 및 검정시험항목을 나타내었다.

Table 7 Items of performance test.

구 분	미생물제제	영양염류·효소제제
독성실험	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 스케레트네마코스타툼 ≥ 100ppm ◦ 송사리(LC₅₀) ≥ 4,000ppm ◦ 알테미아(LC₅₀) ≥ 4,000ppm ◦ 조피플락(LC₅₀) ≥ 2,000ppm ◦ 마이크로톡스(EC 50) ≥ 100ppm 	
유류분해 성 능	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 총석유탄화수소 ≥ 20% ◦ 지방족탄화수소 ≥ 20% ◦ 방향족탄화수소 ≥ 15% 	
	◦ 이산화탄소 발생량	
	◦ 유류분해미생물수	◦ 영양염분석
	◦ 총미생물수	◦ 단백질농도

Table 8 Items of verification test.

구 분	미생물제제	영양염류·효소제제
공 통	◦ 포장	
	◦ 표시	
	◦ 중량	
	◦ 이산화탄소 발생량	
	◦ 마이크로톡스	
구 분	◦ 총미생물수	◦ 영양염분석
항 목	.	◦ 단백질농도

5.2.3 제3단계 - 모의 현장실험을 통한 적용가능성 평가

3단계 자료는 실제 현장조건을 모사한 소규모실험을 실험실에서 수행하여 제품의 효율성과 안정성을 평가하는 것이다. 본 단계에서는 현장 생분해를 모사할 수 있는 다양한 소규모실험 시스템을 이용한다. 그러므로 2단계 연구에서 모사하여 구성할 수 없는 조건 하에서 생물정화제제의 상대적 효율성과 독성을 검증할 수 있다. 소규모 실험 시스템을 위한 프로토콜은 다음과 같은 7가지의 생태계에 적합하도록 개발할 필요가 있으나 이 과제는 향후 장기적인 안목으로 보완 연구되어야 한다. 선진국 중 가장 선두의 위치에 있는 미국의 경우도 현재 해수환경에 대한 시험 방법만이 확립되어 있고 습지, 모래해안은 기술적인 검토가 끝났으나 아직 공식적인 발표가 없으며 나머지는 개발단계이다.

- (1) 해수: 개방해역 혹은 연안해역의 해수 시스템
- (2) 습지 및 늪지: 해양과 담수시스템
- (3) 자갈해변
- (4) 모래해변
- (5) 내륙 해안
- (6) 특수한 경우: 망그로브 혹은 극한지
- (7) 육지/토양 적용

5.2.4 제4단계 - 현장실험을 통한 실 적용가능성 평가

제 4단계는 2, 3단계의 결과가 얼마나 신뢰성이

있는 평가인지를 평가할 수 있으며 생물정화제제를 직접 현장에 적용하였을 때 방제 효율성을 평가하는 것을 목적으로 한다. 그러므로 제한된 규모의 실현장 시험을 통하여 생물정화제제의 효율성과 독성을 평가할 수 있으며 이러한 결과로부터 3단계의 실험실결과가 얼마나 정확한지를 검증할 수 있다.

현장실험의 표준화된 적용은 3단계에서 제시한 7가지 가상 시나리오를 기초로 하여 설정되어야 한다. 향후 실현장 실험을 위한 다양한 프로토콜들을 개발할 필요가 있다.

6. 결 론

오랫동안 자연계에는 유류오염이 발생한 후 미생물에 의한 분해가 관찰되었고 그 중요성이 인식되어 왔으나 생물정화기술은 개발된 생물정화제품의 능력과 환경에 대한 안정성자료에 대한 신뢰부족으로 인하여 환경문제를 해결하는 방법으로 선택되지 않았다. 대부분의 제품개발자는 정화기술적인 부분을 위주로 연구하였고 생물정화제제가 이미 사용되고 있는 물리·화학적인 유류유출대응방법 만큼 효율적이고 경제적이었던 것을 보여주지 못하였다.

또한, 생물정화제제의 효율성을 평가방법과 형식승인의 제도적 절차 부재는 능력이 있는 생물정화제제의 상용화를 저해하거나 향후 이분야 기술개발의 의욕을 반감시키기도 하였고 실제로 국내외에는 그 동안 많은 종류의 생물정화제제

가 개발되어 있음에도 불구하고 제도의 미비로 인하여 현장에 사용할 수 없었던 것이 현실이다.

그러나 Exxon Valdez호 유류유출사고 이후에 오염사고의 거대한 규모와 다양한 생태계에서 적절한 물리·화학적 대응방안을 찾을 수 없다는 난점 때문에 생물정화기술은 유류유출의 실질적 대응방안으로 잠재력을 나타내기 시작하여 충분한 활용가능성을 가진 환경친화적인 대응방법이라 할 수 있다.

해양경찰청에서는 해양유류오염사고시 생물정화제제를 사용할 수 있는 제도적인 근거를 마련하고 있으며 성능시험, 검정기준 및 형식승인절차를 준비 중에 있다.

유류오염 생물정화제제의 성능시험기준(안) 및 검정기준(안)의 자세한 시험방법은 해양경찰청 분석과 홈페이지 분석자료실에 게시되어 있으며 <<http://analysis.nmpa.go.kr>> 본 연구발표를 통해 전문가의 다양한 의견과 여론을 수렴하여 제도개선사항에 반영하고자 한다.

참고문헌

- [1] 김상진·이건형, 1998, “해양미생물학”, 동화기술.
- [2] 김상진 외, 2002, “환경친화적 유류오염 저감을 위한 상용화기술 개발”, 환경부.
- [3] 김상진 외, 2002, “생물정화제제 형식승인제도 도입을 위한 연구용역”, 해양경찰청.
- [4] 김상진 외, 1998, “미생물체제를 이용한 유류오염지역의 환경회복”, 한국해양환경공학회 1998년도 춘계학술대회 논문집.
- [5] 김상진, 1999, “생물정화기술은 어떻게 적용하여야 하는가?”, 한국해양환경공학회 1999년도 춘계학술대회 논문집.
- [6] 김한규, 2002, “미생물처리제 활용을 위한 제도개선연구”, 연세대학교 공학대학원 석사논문.
- [7] 심두섭 외, 1999, “유류오염지역의 생물정화기술 적용과 모니터링”, 한국해양환경공학회 1999년도 춘계학술대회 논문집.
- [8] 심재형, 1998, “해양오염과 생태계”, 민음사.
- [9] 윤이용·박재규, 2000, “해양오염”, 동화기술.
- [10] 이수형 외, 2001, “해상유출사고 방제지원시스템개발 및 상용화 기술개발”, 환경부.
- [11] 정진원외, 2002, “해상유출유 오염지역에서의 미생물처리제 활용 방안 연구”, 한국해양환경

공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집.

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

[13] ITOPI, 1998, “해상기름 유출대응”, 국제탱커 선주오염방지연맹.