

해양유류오염 생물정화기술

2007년 12월 7일 발생한 태안유류오염사고를 계기로 국내유류오염사고 현황을 알아보고, 유류오염 발생시 해양생태계에 어떤 영향을 미치는지 살펴본다. 또한 유류오염을 제거하기 위하여 긴급방제작업에는 어떤 기술이 적용되고, 어떤 문제점이 있는지 알아보고 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 생물정화기술 적용을 제안하며 이에 대한 상세한 방법을 설명한다.

김 상 진

한국해양연구원 해양생명공학센터(s-jkim@kordi.re.kr)

2007년 12월 7일 태안일원에서 총 유출량 12,547 kl 규모의 허베이 스피리트호 대형 해양유류오염사고가 발생하면서 모든 국민의 관심이 집중되었다. 항상 그렇듯이 사고가 발생할 당시 온나라가 떠들썩 하였으나 사고가 난지 약 4개월여가 지나면서 다시 우리의 기억에서 서서히 사라져가고 있다. 그러나 아직도 현장은 오염이 심각하고, 어민들의 보상문제는 매듭이 지어지지 않은 상황이다. 본고에서는 국내 유류오염현황과 아울러 유류오염사고가 발생하면 어떤 피해가 일어나고, 어떻게 긴급방제과정이 진행되고, 긴급방제 후 어떤 일을 하여야 하는지를 허베이 스피리트호 사고를 예로 소개하고자 한다.

국내 유류오염사고 현황

1980년도부터 국내산업의 비약적인 발전으로 인하여 원유 수입량이 폭발적으로 증가하였으나 1995년도까지 해난사고 방지 시스템이 취약하여 해양유출사고가 연평균 300건 이상 발생하였다. 유류 및 오염물질 1,000 kl 이상의 대형사고는 허베이 스피리트호 사고까지 포함하여 현재까지 약 13건이 발생하였고, 모든 대형사고는 유조선에 의해 발생하였음을 알 수 있다 (표 1). 특히 1993, 1995년도에는 대형 유류오염사고가 총 6건으로 이례적으로 많이 발생

하였다. 이와 같은 연이은 대형사고는 사회적으로 많은 관심을 불러일으키게 되었고, 1995년도 씨프린스호 사고를 계기로 국가에서도 적극적인 국가 긴급방제계획 정비 및 관련법에 대한 검토가 이루어졌다. 이와 같은 결과로 국가방제능력을 약 1,000 kl 규모에서 16,900 kl 규모로 제고시켰고, 해양오염방제조합을 설립하고, 해양오염방지법을 개정하여 대형사고시 환경영향조사를 실시하도록 후속 조치하였다¹⁾.

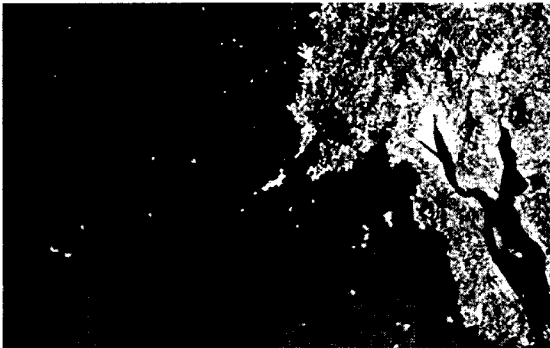
그럼에도 불구하고 1995년도 이후부터 금번 허베이 스피리트호 사고 발생 기간 동안에는 1,000 kl 규모이상의 대형사고가 발생하지 않아 우리의 큰 관심을 끌지는 못하였으나, 크고 작은 사고는 끊임없이 발생하였다. 1997년부터 2006년까지 3,915 건의 선박 유류오염사고가 발생하였고, 총 10,234 kl의 기름이 바다에 유출됐다. 이는 허베이 스피리트호 원유 유출량 12,547 kl의 82% 수준이다. 또한 이 기간 동안 해양오염사고는 연평균 390건 정도가 발생하여, 1996년 이전보다 오히려 발생건수는 증가한 것으로 분석된다²⁾.

대형 유조선 사고의 발생빈도는 낮지만 일단 발생 시에는 치명적인 환경오염을 일으킨다. 일반적으로 바다에 기름이 유출되면 물보다 비중이 낮은 기름은 해수면 전체로 유막을 형성하며 광범위한 지역으로

1) 김상진, 허베이 스피리트호 유류오염사고 (2008) 대한환경공학회지 특집 30권 2호: 146-152.

<표 1> 유류 및 오염물질 1000 kℓ 이상 유출 해난사고주¹⁾

일 시	장 소	선 명	원 인	오염물질(kℓ)
1985. 3.	경북 영일군	천일호(유조선)	좌초	8,400
1986. 1.	부산 영도	진용호(유조선)	충돌	6,108
1986. 8.	여천 군학동	빅토리아호(유조선)	충돌	3,200
1988.2.24	포항	경신호(유조선)	침몰	벙커-C 2,650
1990.7.15	인천 월미도앞	코리아호프호(유조선)	충돌	벙커-C 1,500
1992.5.10	부산 남형제도	스텐레스 프리세스호(유조선)	좌초	경유 400 S.M 1,500
1993.6.16	인천 영흥도 앞	코리아 비너스호(유조선)	좌초	경유 4,288
9.27	전남 광양만	제5금동호(유조선)	충돌	벙커-C 1,228
10.1	충남 대산항	프론티어 익스프레스호(유조선)	좌초	납사 8,322
1995.7.23	여수 리도	씨 프린스호(유조선)	좌초	원유 및 연료유 5,035
9.21	부산 남형제도	제1유일호(유조선)	좌초, 침몰	미상
11.17	여천 호남정유 전용 부두	호남 사파이어호(유조선)	접촉	원유 1,402
2007.12.7	태안	허베이 스피리트호(유조선)	충돌	원유 12,547



[그림 1] 태안유류오염사고 4일 후 2007년 12월 11일 위성사진 (화살표 만리포해변)²⁾

퍼지게 된다(그림 1). 전해수면에 유막이 형성되면, 일단 햇빛을 차단하게 되고 이로 인해 광합성을 하는 해조류 및 미세조류는 사멸된다. 또한 형성된 유막은 산소를 차단시켜 수층에 사는 동물은 물론이고, 조간대에 혹은 퇴적토에 서식하는 많은 동물의 호흡을 저해시켜 질식사하게 된다. 금번 태안유류오염 사고시에도 많은 동물이 사멸되었지만 특히 상괭이와 같은 고래종류도 광범위한 지역에 유막이 형성되

어 호흡을 하기 위해 수면에 떠오를 때 유막이 산소 유입을 차단하므로 결국 많은 수의 고래가 피해를 본 것으로 추측된다. 이와 같이 유영속도가 빠른 동물이 그런데 움직임이 느린 동물의 경우는 그 피해가 치명적일 수 있다.

이와 같은 일차적인 피해에 이어 이차적인 피해로는 유류에 함유되어 있는 독성화합물에 의한 피해이다. 먼저 초기에는 유류화합물에 포함된 휘발성이 강한 벤젠, 톨루엔 등과 같은 방향족 유기용매 혹은 지방족 탄화수소가 생물체를 용해시키거나 치명적인 독성을 유발시킨다. 원유의 종류에 따라 다르나 통상 총량의 10 ~ 30%가 이와 같은 휘발성 성분이므로 해양생물 뿐 아니라 방제작업을 하는 인력들도 매우 조심을 하여야 한다. 단기독성을 나타내는 저분자량의 독성화합물에 비해 고분자량인 다환방향족 화합물은 장기적으로 발암성, 돌연변이성 등과 같은 치명적인 독성을 갖고 있는 것이 더 큰 문제이다. 이와 같은 다환방향족 고분자화합물은 그 농도는 낮으나 분해가 쉽지 않고, 수용성이 아니므로 생물체에 농축이 쉽게 되어 먹이사슬을 통해 축적되므로 최종적으로 인간에게 도달하여 독성을 나타내는 것이 특징이다. 따라

2) 사진제공: 해양경찰청



서 유류오염사고가 발생하면 인간을 포함하여 모든 생물이 영향을 받게 되고, 사멸하게 되어 유류가 생태계에 미치는 피해는 극심하다.

긴급방제

따라서 이와 같은 치명적이고 장기적인 독성으로 인해 유류오염사고가 발생하면 적극적인 긴급방제작업을 적용하게 된다. 유류가 바다에 유출되면 일차적으로 대응하는 긴급방제작업은 크게 해상과 육상으로 나누어서 진행된다. 우선 사고가 발생하면 사고선박의 유출을 원천 봉쇄하는 것이 최우선과제이다. 금번 허베이 스피리트호 사고의 경우에는 사고선박 탱크의 파공이 다수이고, 컷을 뿐 아니라 기상이 양호하지 않아 원천봉쇄가 매우 지연되었다 (그림 2). 따라서 적재된 원유 중 12,547 kl가 유출되어 국내 유류 유출 역사상 가장 많은 양의 기록을 세웠다.

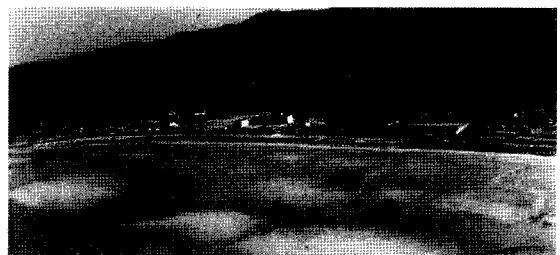
일단 사고선박으로부터 유출된 유류는 해상으로

확산되는 것을 막기 위하여 일차적으로 오일펜스 혹은 붐을 설치한다. 그러나 대부분의 경우 기상악화로 인하여 유출된 기름은 이와 같은 차단조치에도 불구하고 광범위한 지역으로 태안오염사고처럼 퍼지게 된다. 확산된 기름은 피해확산을 막기 위하여 유처리제를 분사하여 수표면에서 수중으로 분산시키는 작업을 한다. 그러나 유처리제의 사용은 이차 독성 문제로 많은 논란을 일으키고 있다. 따라서 유처리제 사용은 긴급한 경우에만 사용되어야 하고, 유류를 분해시키는 것이 아니라 분산시키는 효과만 있다는 것을 주지하여야 한다. 이외에도 해상에 유출된 기름의 회수방법에는 유회수기, 유흡착제 혹은 유흡착포와 같은 물리기계적인 방법으로 회수하는 것이다. 이 방법 또한 안정된 일기가 전제조건이며 또한 많은 인력과 장비가 동원되어야 한다.

이와 같은 긴급 해상방제작업이 진행됨에도 불구하고 대부분의 유류는 해안으로 밀려와 조간대지역을 오염시키게 된다 (그림 3). 이와 같이 해안 육상



[그림 2] Hebei Spirit 호 사고선 및 파공탱크 기름유출²⁾



[그림 3] 만리포 해수욕장 기름제거작업 전후 비교²⁾

지역에 기름이 오염되면 제거에 특별한 방법이 없이 대부분 수작업으로 이루어진다. 일명 개떡이라 불리는 방법으로 조그만 도구, 걸레 등을 동원하여 모래, 자갈, 바위로 이루어진 해안의 표면을 청소하는 것이다. 그러나 이와 같은 작업에는 광범위한 지역에 많은 인력이 동원되어 작업이 진행되어야 하고, 그 효율성도 높지 않다. 그러나 금번 태안사고에서는 150만명 이상의 자원 봉사자가 적극적으로 참여하여 초기 긴급방제에 많은 진척을 보였고, 국내 유류오염사고 역사상 최초로 국민의 적극적인 참여를 이루어냈다(그림 4).

이와 같은 방법으로 해상 및 해안육상의 긴급방제 작업이 진행되게 되면 표면상의 유류는 대부분 제거된다. 이와 같은 방법으로 회수되는 기름의 양은 그 동안의 국내의 유류오염사고에서 보면 10% 미만으로 매우 낮다. 그러므로 대부분의 유류는 사고지역



[그림 4] 자원봉사자에 의한 방제장면³⁾

의 생태계에 장기간동안 남아있어 직간접적으로 생태계에 영향을 미친다. 태안지역 또한 현재 대부분 육안으로는 기름이 제거된 것 같이 보이지만 모래 밑, 자갈해안 및 조간대 지역, 혹은 갯벌, 퇴적도에는 다량의 기름이 잔존하고 있을 것이다. 바로 이와 같은 오염유류의 처리가 향후 문제인 것이다. 그동안에는 한국은 이것을 자연정화법이라는 방법 즉 인위적인 후속조치를 취하지 않고 방치하였다. 이런 경우 환경회복의 시간이 수십년에서 백년까지도 걸린다는 보고가 있다. 금번 허베이 스피리트호 사고 지역은 어업활동이 활발하고 국립공원으로서 국민의 방문이 빈번한 지역이다. 과연 자연정화법을 사용하는 것이 적절할지는 재고해보아야 할 일이다.

생물정화기술

유류화합물은 자연생태계에 오염되면 생태계에 있는 유류분해 미생물에 의해 분해가 이루어진다. 모든 자연계의 오염물질은 시간이 오래 걸리고, 짧게 걸리는 차이는 있지만 결국은 미생물에 의해 대부분 분해가 이루어진다. 만일 생태계의 유류분해미생물에 대한 환경인자의 제한이 매우 심하고 많으면 그 시간이 오래 걸리고, 다행히 환경인자가 유류분해에 적절한 상황이면 짧게 걸린다. 따라서 생물정화기술이란 이와 같은 유류분해 능력을 제한하는 환경요인을 조사, 분석하고 문제점을 해결 조치해 줌으로써 유류분해 능력을 최대한 높이는 기술이라고 할 수 있다.

생물정화기술의 정의는 매우 다양하나 간략하게 정의를 내린다면 ‘환경내 오염물질을 생물의 활성을 이용하여 제거, 분해, 농축시키는 기술’을 말한다. 대상이 되는 오염물질의 종류는 유류 뿐 만 아니라 유기물, 무기물을 모두 포함하고, 중금속 등도 해당된다. 또한 생물의 종류도 미생물은 물론이고 식물을 이용하는 방법도 잘 알려져 있다. 본 논문에서는 대상오염물질은 유류화합물이고, 생물종류는 식물, 동물보다는 유류분해능이 탁월한 미생물이 주 대상

3) Rapid Environmental Assessment “Hebei Spirit” Oil Spill—Republic of Korea December 2007, A Joint UN-EC Environmental Emergency Response Mission, EUROPEAN COMMUNITY CIVIL PROTECTION MECHANISM, JOINT UNEP/OCHA ENVIRONMENT UNIT.



이 된다.

생물정화기술은 그 방법에 따라 다음과 같이 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 자연의 미생물자정능력을 이용하여 생태계에 오염된 오염물질을 분해하는 방법인 자연정화법(natural attenuation)이 있다. 국내 해양유류오염방제계획에 긴급방제 후 유일하게 환경회복을 위해 사용하는 방법이기도 하다. 본 방법의 장점은 무엇보다 인위적인 개입을 하지 않으므로 어떠한 변화도 모두 자연에 의해 결정된다는 것이다. 그러나 자연계에 다량의 유류가 오염되면 유류분해능력을 제한하는 여러 가지 환경요인으로 인하여 자연계의 미생물에 의한 분해속도는 매우 낮을 수밖에 없으므로 대형 해양유류오염 사고 후 환경회복에 소요되는 기간이 10 ~ 100년으로 매우 길다. 따라서 자연정화법은 외국의 국토가 넓고, 사람이 많이 살지 않은 지역에 적용하는 방법으로 국내의 태안지역의 경우에는 현실적으로 적절하지 않다.

두 번째는 생물활성화법(biostimulation)으로 자연계의 서식하는 미생물에 의해 오염유류가 분해되는 과정에서 제한요인으로 작용하는 질소, 인과 같은 무기영양물질, 산소, 수분, 유화제 등을 첨가하거나 공급함으로써 자연계의 미생물활성을 높이는 방법을 생물활성법이라 한다.

세 번째는 생물접종법(bioaugmentation)으로 생물활성법만으로 해결이 되지 않는 경우 즉 유류분해미생물의 적절한 수가 존재하지 않아 제한요인으로 작용하는 경우 사용한다. 이를 해결하기 위하여 유류분해 미생물을 적절히 추가하여 접종하는 방법을 생물접종법이라 한다. 생물접종법은 생물활성화법의 개념이 포함되어 있다.

자연계에 유류가 오염되면 어떤 일이 일어나는가에 대해 살펴봄으로써 생물정화법에 대해 구체적으로 알아본다. 먼저 유류화합물은 탄화수소 물질로서 대부분이 탄소로 구성되어 있다. 그러나 미생물이 탄소를 소비하여 에너지와 생체구성성분을 만들기 위해서는 다른 영양물질이 있어야만 그 과정이 원활하게 이루어진다. 예를 들어 우선적으로 중요한 무기영양물질로는 질소와 인을 들 수 있다. 일반적으로 탄소:질소:인의 최적비율은 100:10:3으로 알려져 있어 유류화합물분해를 높이기 위하여는 질소와 인을 적정 비율로 첨가하게 된다. 물론 자연계에 이미

충분한 무기영양물질이 존재하는 경우에는 제한요인이 아니므로 첨가할 필요가 없다.

또한 다량의 오염물질이 일시에 유입되면 미생물이 유류를 분해하기 위한 호기적 산화과정에 필수적인 산소가 제한된다. 일반적으로 미생물은 혐기적 과정에 비해 호기적 과정에 의한 유류분해속도가 빠르다는 것은 잘 알려진 사실이다. 급변 허베이 스프리트호 사고지역 중 만리포 모래해안에 농기계를 이용하여 백사장을 갈아엎은 이유도 충분한 공기를 공급하여 유류분해미생물을 활성화하기 위한 방법 중 하나이다.

유류를 분해하기 위해서는 충분한 수분공급도 필수적이다. 유류화합물은 소수성물질이므로 물과 혼합되지 않으므로 미생물이 필요한 적절한 수분공급이 필요하다. 해양생태계에서는 특히 상부조간대지역, 바위, 자갈해안가의 경우에 수분이 제한요인으로 작용할 수 있다. 따라서 만리포 백사장의 오염유류를 효율적으로 정화하기 위해서는 공기를 공급하는 방법 이외에 상부조간대에는 적절한 수분공급을 병행하여야 하며, 대부분의 백사장의 경우 질소, 인이 제한요인이므로 분석을 통하여 부족한 양의 질소, 인을 첨가하는 것이 필요하다.

유류분해과정에는 온도영향이 매우 크다. 중온성 유류분해미생물은 적정 성장온도가 20 ~ 30도 내의이므로 온대지방의 경우 여름철을 제외하고 온도는 적절하지 않다. 특히 겨울철의 해수온도는 매우 낮아 빠른 유류분해 속도를 기대할 수 없다. 이를 해결하기 위해 자연계의 온도를 높일 수는 없고, 적정온도를 유지할 수 있는 대형리액터를 이용하여 유류생물정화를 수행하는 방법이 있다. 또는 20도 이하에서도 활성이 높은 저온성 유류분해미생물을 이용하는 방법이 잘 알려져 있다.

또한 미생물이 소수성인 유류화합물을 효율적으로 분해하기 위해서는 큰 덩어리 기름보다는 작은 입자로 분산되어 미생물에 의해 접촉면적이 넓어질수록 분해효율이 높아진다. 그러므로 대부분의 유류분해 미생물 자체는 유류입자와 접촉하는 면적을 높이기 위하여 생물유화제를 생산하는 능력이 있다. 그러나 이와 같은 기간을 단축시키기 위해서는 경우에 따라서 생물유화제를 첨가하여 미생물의 유류분해능을 높이기도 한다. 기타 유류분해 제한요인으로는 미생

물이 필요로 하는 미량원소 및 다양한 영양물질의 부족, 매우 높거나 낮은 pH, 유류의 높은 독성 등이 있다.

또한 유류가 일시에 해양에 다량 오염되면 생태계의 미생물은 대부분 죽거나 활성이 저하된다. 그중에서 유류독성에 내성이 있고, 이를 이용할 수 있는 즉 유류분해미생물이 다른 종류의 미생물보다 유리한 위치에 있게 된다. 이와 같은 특성으로 유류분해 미생물은 서서히 그 수가 증가되어 최종적으로 유류 오염지역에 우점하게 된다. 그러나 이와 같은 천이 과정에는 오랜 시간이 소요되므로 우수 유류분해미생물로 구성된 유류분해용 미생물처리제를 첨가하게 된다. 그러나 접종한 유류분해미생물은 분해가 진행됨에 따라 환경의 유류농도가 점점 낮아지게 되면 다른 미생물들이 우점하게 되고 접종한 유류분해 미생물은 경쟁력을 잃고 그 수가 다시 낮아진다. 최종적으로 환경내에 존재하는 통상의 유류분해미생물농도로 줄어 듬에 따라 생태계에 미치는 영향이 없다.

한편 유류화합물중 자연계에서 분해능이 매우 낮은 다환방향족 화합물을 분해하기 위해서는 일반적인 유류분해미생물과 달리 다환방향족화합물 분해 미생물의 첨가가 매우 유용하게 활용된다. 이와 같은 미생물의 첨가는 사전평가를 통하여 유류분해미생물이 제한요인일 경우에만 수행하고 있고 반드시 앞에서 기술한 여러가지 환경제한요인을 해결하는 방법을 병행하여야 한다. 따라서 미생물첨가 만을 통한 생물정화방법으로는 만족할 만한 결과를 기대할 수 없는 경우가 많다.

그러므로 생물정화기술을 적용하기 위해서는 오염에 대한 매우 정밀한 사전조사가 이루어져야 한다. 오염지도를 바탕으로 여러 오염지역 중 경제적 가치, 생태적 가치 등을 평가하여 그 중요도에 따라 우선순위를 정하고 빠른 정화와 환경복원을 수행하게 된다. 이와 같은 환경제한요인들을 분석하고 제한요인 및 문제점을 해결, 처방하기 위하여 사전처리 가능성평가를 병행하게 된다. 이 결과로부터 생물정화 실시를 어떻게 수행할지를 결정하고, 적용하는 기간 중에도 계속적인 모니터링을 통해 다른 문제점은 없는지 찾아내고 해결하는 과정을 거쳐야 한다. 따라서 이를 수행하는 데는 고도의 전문적 지식과 기술이 요구되어 전문방제라 부르며, 생물정화기술 개발에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 그러나 생물정화기술은 다른 물리기계적 방법, 화학적방법으로 해결이 어려운 환경에서는 유일한 대안이며, 또한 두 방법에 비해 매우 효율적이고 경제적이며 환경친화적이라는 이점이 있다.

금번 태안유류오염사고를 계기로 해양환경법이 개정 발효되었고, 오래 전부터 생물정화기술적용의 걸림돌이 되었던 생물정화형식승인제도가 마련되는 등 후속 조치가 이루어졌다. 그러나 아직도 태안에 긴급방제활동 이후 생물정화기술을 포함한 다양한 전문방제조치가 이루어지지 않고 있어 안타깝다. 아무쪼록 적극적인 조치가 하루 빨리 이루어져 건강한 태안으로 다시 돌아와 주민의 생계가 해결되고, 국민들이 많이 찾을 수 있는 국립공원이 되기를 바란다. *