

허베이 스피리트호 유류오염사고

김 상 진

한국해양연구원 해양생명공학연구센터

Herbei Sprit Oil Spill Accident

Sang-Jin Kim

Marine Biotechnology Research Centre, Korea Ocean Research & Development Institute

1. 서론

2007년 12월 7일 오전 7시 15분 경 태안 만리포 북서 방 10 km 해상에서 삼성중공업소속 크레인부선을 예인 중 기상악화로 예인 줄이 절단되어 표류하다 정박 중인 유조선 허베이 스피리트호와 충돌하였다. 이 사고로 적재된 263,000 kL의 원유 중 12,547 kL가 유출되었고, 많은 양의 기름이 주변 해역은 물론이고 제주도까지 확산되어 해양생태계에 영향이 심각하다. 한편 해안가에도 다량의 유류가 표착되어 향후 방제의 어려움과 아울러 생태계 회복이 용이하지 않을 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 태안에서 발생한 허베이 스피리트호 사고를 계기로 국내 유류유출사고 현황을 살펴보고, 특히 허베이 스피리트호 사고와 1995년도 여천에서 발생한 씨프린스호 사고를 비교 분석하였다. 또한 유류오염방제기술 현황을 검토하고, 특히 생물정화기술에 대한 소개를 통하여 현행 국가오염방제체계의 문제점을 지적하고 향후 대안을 제시한다.

2. 국내 유류유출현황

1980년도부터 국내산업의 비약적인 발전으로 인하여 원유 수입량이 폭발적으로 증가하였고, 해난사고 방지 시스템이 취약하여 해양유출사고가 연평균 300건 이상까지 발생하였다. 그중 유류 및 오염물질 1,000 kL 이상의 대형 사고는 허베이 스피리트호 사고까지 포함하여 그동안 약 13건이 발생하였고, 모든 대형사고는 유조선에 의해 발생함을 알 수 있다(Table 1). 특히 1993, 1995년도에는 대형 유류오염사고가 총 6건으로 이례적으로 자주 발생하였다. 이와 같은 연이은 대형사고는 사회적으로 많은 관심을 불러일으키게 되었다. 이로 인해 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,¹⁾ 해양오염방지법을 개정하여 대형사고시 환경영향조사를 실시하도록 후속 조치하였다.²⁾

그 이후부터 급변 허베이 스피리트호 사고 발생 기간 동안에는 1,000 kL 규모 이상의 대형사고가 발생하지 않아 우리의 관심을 끌지는 못하였으나, 크고 작은 사고는 끊임없이 발생하였다. 즉 1997년부터 2006년까지 3,915건의 선박 유류사고가 발생하였고, 총 10,234 kL의 기름이 바다에 유출됐다.³⁾ 이는 허베이 스피리트호 원유 유출량 12,547 kL의 82% 수준이다. 지난 10년간 100 kL 이상의 대형 기름유출사고는 14건이었지만 전체 유출량의 68%를 차지했다. 또한 이 기간 동안에도 해양오염사고는 연평균 390건 정도가 발생하여 1996년 이전보다 오히려 발생건수는 증가한 것으로 분석된다. 이와 같이 사고건수가 증가하는 이유는 동북아지역의 교역량 급증에 따라 우리나라의 해상교통량도 매년 증가하는 데다 선박의 대형화와 고속화, 잦은 기상이변 등으로 인한 것으로 분석되고 있다. 따라서 유류오염사고를 감소시키기 위해서는 제반 문제점을 검토하고 개선할 필요가 있다.

대형 유조선 사고의 발생빈도는 낮지만 일단 발생 시에는 큰 환경오염을 일으킨다. 1996년 이후에도 크고 작은 유류유출사고가 연평균 390여건이 발생하였음에도 국민의 관심을 끌지 못하다가 12년 만에 한국에서는 최대 유출량인 12,547 kL의 대형 유류유출사고가 태안에서 발생하게 된 것이다. 이와 같은 요인으로는 오랜 시간 동안 대형사고가 없어 운항안전에 대한 주의가 느슨한 면도 있다는 지적이 많다. 따라서 급변 사고를 계기로 대형유조선 오염사고에 대한 대책이 강구되어야 한다. 특히 대형사고를 일으키는 유조선에 대한 이중선체 의무화시기를 앞당길 필요가 있으며, 영해내 유조선 운항에 관련하여 특별 안전조치 강구가 필요하다.

E-mail: s-jkim@kordi.re.kr

Tel: 031-400-6240

Fax: 031-406-2495

Table 1. 유류 및 오염물질 1,000 kL 이상 유출 해난사고

| 일시 | 장소 | 선명 | 원인 | 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 | 경신희(유조선) | 침몰 | 벵커-C 2,650 |
| 1990.7.15 | 인천 월미도앞 | 코리아호프호(유조선) | 충돌 | 벵커-C 1,500 |
| 1992.5.10 | 부산 남형제도 | 스텐레스 프린세스호(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 | 벵커-C 1,228 |
| 10.1 | 충남 대산항 | 프론티어 익스프레스호(유조선) | 좌초 | 납사 8,322 |
| 1995.7.23 | 여수 소리도 | 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 스프리트호(유조선) | 충돌 | 원유 12,547 |

3. 유류오염방제기술 현황

3.1. 유류오염 긴급방제방법

현재 해상 및 해안긴급방제방법으로 해상에서는 유회수기, 유흡착재 등으로 유류를 회수하거나, 해안에서는 기계 혹은 장비를 이용하여 기름을 제거, 회수하거나, 손으로 기름을 닦아내는 일명 ‘개떡이’라는 방법인 물리기계적방법이 가장 많이 사용하는 방법이다. 다른 방법으로는 주로 해상에서 유출된 기름을 유처리제 혹은 강력한 물 분사를 통하여 유류를 분산하는 방법인 화학적 처리방법이 있다. 이와 같은 방법들은 유출유류의 완전제거가 매우 어렵고, 막대한 방제비용이 지출된다. 특히 유처리제 처리방법은 신속한 유류분산효과를 노릴 수 있으나 2차 오염문제를 야기 시키기도 한다. 그러나 방법은 다량의 기름이 유출되어 눈에 쉽게 보이는 지역의 기름을 제거하는데 가장 효율적이다. 그럼에도 불구하고 대부분의 유출된 유류는 이와 같은 방법으로 가장 성공적으로 제거 혹은 회수하여도 전체 유출량의 10~20% 미만에 불과하다는 것이 그동안의 유류오염사고의 연구결과이다. 이와 같은 초등조치를 취한 후의 나머지 생태계에 잔류하는 유류는 결국 후속방제를 통해 지속적으로 제거하여야 한다. 국내의 경우에는 환경정화 및 복원방법으로 그동안 자연정화법을 활용하였다. 즉 자연의 미생물자정능력에 맡기는 방법이다. 그러나 국내에서는 자연정화법에 필수적으로 병행하여야 할 모니터링을 체계적으로 수행하지 않아 그동안 채택한 자연정화법은 방치하는 수준이라 말할 수 있다. 따라서 향후 자연정화법을 경우에 따라 적용할 시에는 반드시 과학적이고 체계적인 모니터링 특히 생태계에 미치는 영향 등을 지속적으로 관찰하는 제도를 시급히 마련하여야 한다.

특히 태안지역과 같은 국토의 활용도가 매우 높은 한국의 경우에서는 자연정화법보다 적극적인 생물정화기술을 도입할 필요가 있다. 다행히 2008년 1월 해양오염방지법이 폐지되고, 해양환경관리법이 발효되면서 생물정화제제 형

식승인제도를 도입함으로써 생물정화를 활용할 수 있는 문을 열어 놓았다.⁴⁾

2000년 해양오염방지법이 개정되면서 대형 유류오염사고(유류 유출량 100 kL 이상)는 해양환경관리심의위원회의 심의를 거쳐 해양오염영향조사를 실시하여야 한다.²⁾ 따라서 허베이 스프리트호 사고가 현재 이법의 적용을 받아 해양오염영향조사를 실시하고 있다. 그 내용을 보면 크게 자연환경분야, 생활환경분야, 사회·경제환경 분야 세 가지로 나누어 조사를 한다. 세부 내용을 살펴보면 자연환경분야에는 기상, 해류·조류, 해저지질, 해양환경(수질·물질·퇴적물), 해양생태계가 포함되어 있고, 생활환경분야에는 연안 및 해역이용, 수산물의 안정성, 공공시설의 오염피해가 있으며, 사회·경제환경 분야에는 인구, 주거, 산업, 어업현장이 조사항목으로 포함되어 있다.

대형 해양오염사고가 발생하면 주민, 국민의 보호와 아울러 생태계의 신속한 복원을 통한 국토보존이 가장 우선 시해야 할 사항으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 현행 해양오염영향조사에는 조사항목이 광범위하게 열거되어 있기는 하나 그 목적이 매우 애매모호하다. 차체에 보상에 관련된 주민피해 및 환경피해를 과학적으로 제시할 수 있는 방안이 구체적으로 적시되어야 하고, 환경복원에 대한 구체적 방안을 수립할 수 있는 조사가 되어야 한다. 물론 주민의견 수렴과정이 포함되어 있으나 전문적인 지식이 필요한 사안에 대해 주민의 의견 수렴은 쉽지 않을 것으로 사료된다. 그러므로 허베이 스프리트호 사고 오염영향조사 결과가 도출되면 분석과 다양한 의견 수렴을 통하여 미비한 점은 수정 보완하여 향후 구체적인 개선이 필요할 것으로 사료된다.

3.2. 씨프린스호 사고와 허베이 스프리트호 사고와의 방제현황 비교

씨프린스호 사고와 허베이 스프리트호 사고의 방제현황을 상호 비교하여 다양한 시사점을 도출할 수 있었으며,

Table 2. Comparison of remediation actions between Sea prince and Herbei spirit oil spill accidents

| 구분 | 씨프린스호 사고 | 허베이 스프리트호 사고 ¹⁾ | 비고* |
|------------------------|-------------------|----------------------------|--------------|
| 유출량 | 원유 및 B-C유 5,035 톤 | 원유 12,547 톤 | 2.5 배 |
| 해상/해안방제기간 | 19 일/5 개월 | 70 일/70 일 | - |
| 유회수량 ²⁾ | 1,390 톤 | 4,175 톤 | 3 배(1.2 배) |
| 유흡착재 수거량 ³⁾ | 3,364 톤 | 23,880 톤 | 7 배(2.8 배) |
| 유흡착재 사용량 | 239.7 톤 | 326.3 톤 | 1.4 배(0.6 배) |
| 유처리제 사용량 | 717.6 톤 | 297.6 톤 | 0.4 배(0.2 배) |
| 오일펜스 동원 | 13.8 km | 31.9 km | 2.3 배(1 배) |
| 유회수기 동원 | 126 대 | 42 대 | 0.3 배(0.1 배) |
| 진공차량 동원 | - | 144 대 | - |
| 선박 동원 | 8,295 척 | 11,163 척 | 1.3 배(0.5 배) |
| 인력 동원 | 166,905 명 | >1,500,000 명 ⁴⁾ | 9.0 배(3.6 배) |
| 방제비용 | 180억원 | - | - |

¹⁾ 2007년 12월 30일 자료(방제기간은 2008년 2월 14일 기준)

²⁾ 해수 포함

³⁾ 유흡착물 포함

⁴⁾ 2008년 1월 10일 자료, 자원봉사자: 55 %

*: 허베이 스프리트호 사고의 각 수치를 씨프린스호 사고에 비교한 비율, () 은 허베이 스프리트호 사고의 유류유출량이 씨프린스호 사고의 2.5배임을 감안하여 계산한 비율

방제에 관한 문제점 도출 및 향후 개선방안을 제시하였다. 허베이 스프리트호 사고의 경우에는 현재에도 방제작업이 진행되는 과정이라 정확한 수치의 비교는 어려우나 대략의 경향을 볼 수 있을 것으로 사료된다(Table 2).

먼저 허베이 스프리트호 사고는 씨프린스호 사고 유류유출량의 약 2.5배로서 12,547 kL이다. 씨프린스호 사고는 해상 약 200 km, 해안 약 73 km 오염이 되었으나 허베이 스프리트호 사고는 이보다 매우 광범위할 것으로 추측된다. 2007년도 말 현재 해안오염지역만 65 km에 이르고 있으나, 2008년도에는 더욱 광범위하게 오염이 확산되었다. 방제기간은 허베이 스프리트호 사고의 경우 현재도 진행 중이므로 비교가 어렵다. 그럼에도 불구하고 해상방제기간만 비교하면 씨프린스호 사고에 비해 매우 길어지고 있다. 유류유출량을 감안해도 약 1.4배로 길어지는 이유는 먼저 유출유류가 씨프린스호 사고에 비해 허베이 스프리트호 사고가 광범위하게 확산된 것을 시사하고 있다.

유회수량은 허베이 스프리트호 사고가 씨프린스호 사고에 비해 유류유출량을 감안하여 비교하면 약 1.2배 정도 회수가 되어 약간 높거나 비슷한 수준임을 알 수 있다. 유출량대비 유회수량이 대동소이한 것으로 미루어 초기 긴급방제의 한계를 나타내고 있으며 향후 이에 대한 대책강구가 필요하다. 예를 들어 해상 악천후 시에도 작동 가능한 유류펌프선, 유회수선 확보가 필요하다. 유출량의 감소와 유출된 유류의 회수의 성공여부는 사고 초기에 결정된다. 따라서 고도 방제 교육훈련을 마친 유류방제 기동타격대를 조직하고 악천후에도 기동 가능한 강력한 기장비를 확보하여 운영할 필요가 있다. 가까운 일본의 경우에도 기동타격대를 구성하여 초기 기술지원 등 효율적인 방제 활동을 수행한다.

유흡착재 사용량은 오히려 약 0.6배로 줄었는데 유흡착재 수거량은 2.8배로서 매우 높은 증가율을 나타내고 있다.

이는 허베이 스프리트호 사고에서 유흡착재의 확보가 원활하지 않았던 면과 대체물로 국민 특히 자원봉사자가 제공한 옷가지, 재활용 형겔 등을 이용한 것에 기인한다. 금번사고의 대표적 특징 중 하나인 유흡착재 수거량이 대폭 증가한 결과는 막대한 특정폐기물의 증가를 조래하였다. 따라서 대체물질 사용의 측면을 방제효율성 면과 경제적인 면에서 사후 검토할 필요가 있으며, 향후 흡착재 확보 방안에 대한 근본적인 계획을 재검토하여야 하며 확보물량이 부족 시 방제효율성과 경제성을 고려하여 사용가능한 대체 흡착재에 대한 연구도 필요하다.

방제용 기장비의 사용경향을 비교하면 오일펜스의 동원량은 대동소이한 경향을 나타냈다. 그러나 유회수기동원량과 진공차량 동원량은 상반된 경향을 나타내고 있다. 사용된 장비의 종류가 유회수기는 대폭 감소하였고, 진공차량은 대폭 증가하였다. 이는 해상에 유용한 유회수기가 일기 등으로 인하여 별로 활약을 하지 못하였고, 오히려 해안가에 유류가 오염된 후에 주로 유회수작업이 일어났음을 알 수 있다. 따라서 악천후에서도 가동할 수 있는 해상장비의 대형화 및 적정화에 대한 연구가 필요하다. 한편 해안가 작업에서도 유용하게 활용할 수 있는 소형장비 개발이 필요하다. 또한 허베이 스프리트호 사고의 경우 선박동원은 계속 증가 추세로 아직 비교하기는 이른 면이 있으나 해상방제기간이 허베이 스프리트호 사고가 씨프린스호 사고에 비해 길어지므로 선박동원 절대량이 많은 경향을 나타낼 것으로 예상된다.

무엇보다 금번 사고에서는 인력동원의 대폭 증가를 들 수 있다. 인력동원은 이미 씨프린스호 사고에 비해 3.6배 이상을 나타내고 있으며 특히 자원봉사자 규모가 55% 이상을 차지하여 놀란 만한 정도로 해안방제가 신속히 이루어졌다. 그러나 밀려오는 자원봉사인력에 대한 사전 준비가 되어 있지 않아 많은 문제점을 노출하였다. 무엇보다 자원

봉사인력을 포함하여 비전문인력의 사전 안전교육 및 방제 교육 시스템과 독성물질 노출에 대한 안정장비 및 교육을 준비하여야 한다. 또한 앞으로는 이와 같은 자원봉사인력을 효율적 활용하기 위하여 국가방계계획 및 매뉴얼에 시스템화된 방안을 수립할 필요가 있다.

4. 생물정화기술

4.1. 생물정화기술의 정의

생물정화기술의 정의는 매우 다양하나 간략하게 정의를 내린다면 ‘환경내 오염물질을 생물의 활성을 이용하여 제거, 분해, 농축시키는 기술’을 말한다. 대상이 되는 오염물질의 종류는 유류뿐만 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 대상이 되므로 이에 대한 언급을 중점적으로 하기로 한다.

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 해결해 줌으로써 유류분해 능력을 최대한 높이는 기술이라고도 볼 수 있다. 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. 그러나 모든 경우에 생물정화가 유리하지는 않다. 그러므로 다양한 오염물질 정화방법 중 물리 기계적, 화학적 방법 보다 유리할 경우에만 생물정화기술을 적용하는 것이 타당하다.⁵⁾

4.2. 오염유류의 자연환경에서 분해과정 중 제한요인

자연계에 유류가 오염되면 어떤 일이 일어나는가에 대해서 살펴본다. 먼저 유류화합물은 탄화수소 물질로서 대부분이 탄소로 구성되어 있다. 그러나 미생물은 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 위해서는 질소와 인을 적정 비율로 첨가하게 된다.^{6,7)} 물론 자연계에 이미 충분한 무기영양물질이 존재하는 경우에는 제한요인이 아니므로 첨가할 필요가 없다.

두 번째는 다량의 오염물질이 일시에 유입되면 미생물이 유류를 분해하기 위한 호기적 산화과정에 필수적인 산소가 제한된다. 일반적으로 미생물은 혐기적 과정에 비해 호기적 과정에 의한 유류분해속도가 빠르다는 것은 주지의 사실이다. 금번 허베이 스프리트호 사고지역 중 만리포 모래해안에 농기계를 이용하여 백사장을 갈아엎는 이유도 충분한 공기를 공급하기 위한 것이다.

유류를 분해하기 위해서는 충분한 수분공급이 필수적이다. 유류화합물은 소수성물질이므로 물과 혼합되지 않으므로 적절한 수분공급이 필요하다. 해양생태계에서는 특히 상부조건대지역, 바위, 자갈해안가의 경우에 수분이 제한요인으로 작용할 수 있다. 따라서 만리포 백사장의 오염유류를 효율적으로 정화하기 위해서는 공기를 공급하는 방법 이외에 상부조건대에는 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 내외이므로 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 유류분해미생물은 유류입자와 접촉하는 면적을 높이기 위하여 생물유화제를 생산하는 능력이 있다. 그러나 이와 같은 기간을 단축시키기 위해서는 경우에 따라서 유분산제를 첨가하여 미생물의 유류분해능을 높이기도 한다. 기타 유류분해 제한요인으로는 미생물이 필요로 하는 미량원소 및 다양한 영양물질의 부족, 매우 높거나 낮은 pH, 유류의 높은 독성 등이 있다.

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 유류분해미생물은 서서히 그 수가 증가되어 최종적으로 유류오염지역에 우점하게 된다. 그러나 이와 같은 천이과정이 오랜 시간이 소요되므로 우수 유류분해미생물로 구성된 유류분해용 미생물처리제를 첨가하게 된다. 그러나 집중된 유류분해미생물은 분해가 진행됨에 따라 환경의 유류농도가 점점 낮아지게 되면 다른 미생물들이 우점하게 되고 집중된 유류분해미생물은 경쟁력을 잃고 그 수가 낮아진다.^{8,9)} 최종적으로 환경내에 존재하는 통상의 유류분해미생물농도로 줄어 들에 따라 생태계에 미치는 영향이 없다.

또한 유류화합물중 자연계에서 분해능이 매우 낮은 다환방향족 화합물을 분해하기 위해서는 일반적인 유류분해미생물과 달리 다환방향족화합물 분해미생물의 첨가가 매우 유용하게 활용된다.^{10,11)} 이와 같은 미생물의 첨가는 사전평가를 통하여 유류분해미생물이 제한요인일 경우에만 수행하고 있고 반드시 앞에서 기술한 여러 가지 환경제한요인을 해결하는 방법을 병행하여야 한다. 따라서 미생물첨가 만을 통한 생물정화방법으로는 만족할 만한 결과를 기대할 수 없는 경우가 많다.

이와 같은 환경제한요인들을 분석하고 제한요인 및 문제점을 해결, 처방하기 위하여 사전처리가능성평가를 하게 된다.^{12,13)} 이 결과로부터 생물정화 실시를 어떻게 수행할지를 결정하고, 적용하는 기간 중에도 지속적인 모니터링을 통해 다른 문제점은 없는지 찾아내고 해결하는 과정을 거쳐야 하며 이를 수행하는 데는 고도의 전문적 지식과 기술이 요구된다.

4.3. 생물정화기술의 분류

생물정화기술은 그 방법에 따라 다음과 같이 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

4.3.1. 자연정화법(natural attenuation)

자연의 미생물자정능력을 이용하여 생태계에 오염된 오염물질을 분해하는 방법이다. 국내 해양유류오염방제계획에 긴급방제 후 유일하게 환경회복을 위해 사용하는 방법이기도 하다. 본 방법의 장점은 무엇보다 인위적인 개입을 하지 않으므로 어떠한 변화도 모두 자연에 의해 결정

된다는 것이다. 그러나 자연계에 다량의 유류가 오염되면 유류분해능력을 제한하는 여러 가지 환경요인으로 인하여 자연계의 미생물에 의한 분해속도는 매우 낮을 수밖에 없다. 그러므로 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.

4.3.2. 생물활성화법(biostimulation)

4.2. 항에서 설명한 바와 같이 자연계에서 미생물에 의해 오염유류가 분해되는 과정에서 제한요인으로 작용하는 질소, 인과 같은 무기영양물질, 산소, 수분, 유화제 등을 첨가하거나 공급함으로써 자연계의 미생물활성을 높이는 방법을 생물활성화법이라 한다. 위에서 언급한 바와 같이 다양한 환경제한요인을 해결하여 주기 위해 개발된 제제의 종류에는 무기 영양물질제제, 효소제제, 생물유화제 등이 있고 이를 검증하기 위하여 생물정화제제 형식승인제도의 골격도 크게 미생물이 포함된 미생물처리제와 미생물이 포함되지 않은 영양염제제, 효소제제 등으로 나누고 있다.

4.3.3. 생물접종법(bioaugmentation)

생물활성법만으로 해결이 되지 않는 경우 즉 위에서 설명한 바와 같이 유류분해미생물의 적절한 수가 존재하지 않아 제한요인으로 작용하는 경우 사용한다. 이를 해결하기 위하여 유류분해 미생물을 적절히 추가하여 접종하는 방법을 생물접종법이라 한다. 생물접종법은 생물활성화법

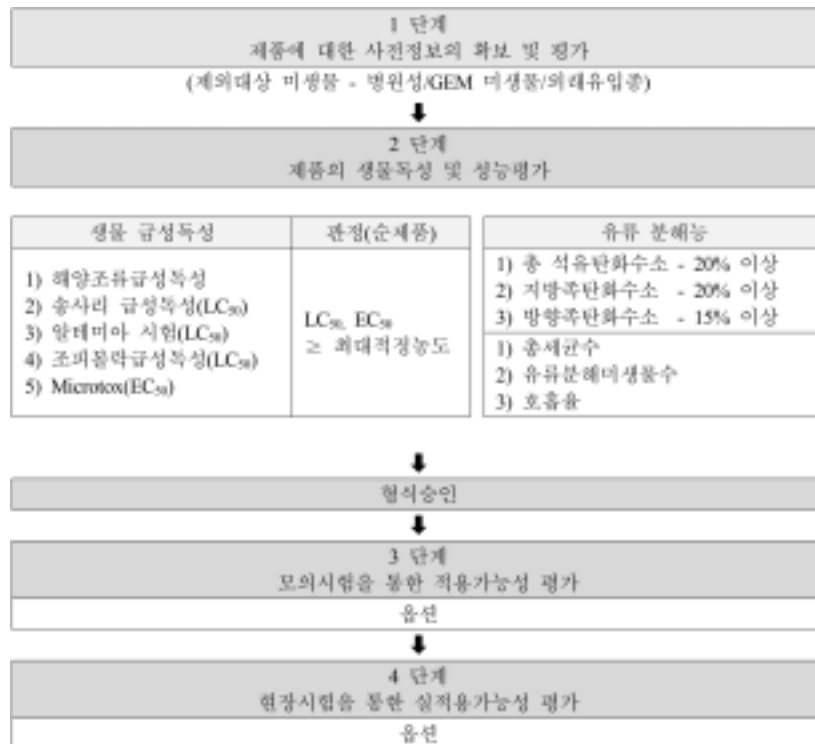


Fig. 1. 생물정화제제의 특성 및 성능평가 흐름도.

의 개념이 포함되어 있다. 현재 생물정화제제의 형식승인 제도가 채택되어 형식승인(안)이 준비 중이고 대략적인 독성 및 성능평가 흐름도는 Fig. 1과 같다.¹⁴⁾

5. 유류오염방제 체계의 문제점 및 대안

국내 유류오염방제 체계의 문제점은 전술한 바와 같이 다양한 측면에서 재점검할 필요가 있다. 그러나 근본적인 문제점은 우선 국가방제계획이 긴급방제 위주로 되어 있다는 것이다. 전술한바와 같이 육안으로 보이는 유류오염 제거가 끝나면 생태계에 대한 정확한 평가없이 방제종료를 선언한다. 실제로 방제계획에 방제종료를 결정할 수 있는 기준이 없거나 매우 모호한 형편이다. 이는 육안으로 보이는 오염유류를 기준으로 하는 것이 가장 큰 요인이고, 눈에 보이지 않는 기름의 양이 얼마정도 잔류하고 있고, 잔류량이 생태계에 얼마나 영향을 미칠지 등에 대한 정확한 평가체계가 없다. 물론 이와 같은 평가체계는 생태적 혹은 경제적, 사회적 가치기준에 의해 세분화되어야 한다.

한편 긴급방제가 종료되면 국내에서는 자연정화법에 맡긴다. 그러나 장기적인 모니터링이 없이 자연정화에 의존하는 것은 오염을 방지하는 것이나 다를 바 없다. 따라서 학계에서는 해양유류오염사고에 생물정화기술 도입을 제안하였으나 적절치 않은 이유로 도입이 계속 지연되어 왔다. 개발된 청정해양생태계에 20년간 대량의 폐기물 해양투기를 실시하면서도 생물정화기술이 생태계에 대해 부정적 영향을 미친다는 과학적인 근거도 없는 문제점을 제기하며 생물정화기술 도입에는 그동안 매우 소극적이었다. 다행히 2008년 해양환경관리법이 개정, 발효되어 생물정화제제 형식승인제도가 도입되게 되었다. 그러나 후속 준비를 위한 소요시간으로 인해 허베이 스프리트호에 활용하기에는 아직도 요원한 상황이다. 따라서 조속한 후속조치를 취해 생물정화기술을 적용하여 허베이 스프리트호 사고지역의 생태계 복원이 하루빨리 이루어지는데 도움이 되기를 바란다.

또한 다음과 같은 사항을 재점검하여 향후 긴급방제체계의 개선을 꾀할 것을 제안한다.

- 약천후시 초등긴급방제방안 수립
- 국가 방제능력 재검토
- 방제전문가위원회 가동의 효율적 운영
- 방제종료기준 수립
- 생태계 복원방법 수립
- 방제관련기관의 협조체계 구축
- 생물정화 후속기술개발
- 유류오염방제연구 활성화

6. 맺음말

금번 허베이 스프리트호 사고를 계기로 대형유류오염사고에 대한 근본적인 점검을 할 필요가 있다. 허베이 스프

리트호 사고를 타산지석으로 삼아 향후 사고를 최소화시키고, 사고가 발생하여도 피해를 최소화할 수 있는 방안을 강구해야 한다. 따라서 크게 사고최소화 방안, 피해최소화방안, 주민 및 국민 보호방안 으로 나누어 아래와 같이 정리하였다.

- 사고 최소화 방안
 - 유조선 안전운항 조치 강구
 - 이중선체 유조선 사용 의무화 조기시행
- 피해 최소화방안
 - 긴급방제체계 재점검 및 개선(5항 참조)
 - 긴급방제기술 개발
- 주민 및 국민 보호 방안
 - 보상제도의 국가적 시스템 강구
 - 환경회복 및 복원 중심으로 국가방제계획 전환
 - 해양오염영향조사를 통한 주민 및 국민의 보호방안 도입

이를 위해서 전반적인 법제도 및 정책방향 재점검과 개선이 추진하여야 하며 이를 효율적으로 수행하기 위하여 차기 정부에서는 관련 부처간에 TFT를 구성하여 철저한 관리가 요구된다.

참고 문헌

1. 해양수산부, “해양오염방지법,” (1997).
2. 해양수산부, “해양오염방지법,” (2000).
3. 환경부, “환경백서,” (2007).
4. 해양수산부, “해양환경관리법,” “해양환경관리법 시행령,” “해양환경관리법 시행규칙,” (2008).
5. 김상진, 이정현, 권개경, 현정호, 이홍금, 오영숙, 손재학, 최동혁, 고성환, V. Svetashev, 정홍배, 강지현, 목진숙, 심두섭, 최우영, 정성영, 김윤자, 배승섭, 이정희, 이기분, 황인영, “환경친화적 유류오염 저감을 위한 상용화기술 개발 - 해양오염방제 및 환경회복기술개발-,” 환경부(2002).
6. Oh, Y.-S., Sim, D.-S., and Kim, S.-J., “Effects of nutrients on crude oil biodegradation in the upper intertidal zone,” *Marine Pollution Bulletin*, **42**(12), 1377~1383(2001).
7. Choi, S.-C., Kwon, K. K., Sohn, J. H., and Kim, S.-J., “Evaluation of fertilizer additions to stimulate oil biodegradation in sand seashore mesocosms,” *J. Microbiol. and Biotech.*, **12**(3), 431~436(2002).
8. Lee, J.-H., Jung, S.-Y., and Kim, S.-J., “Specific detection of an oil-degrading bacterium, *Corynebacterium* sp. IC10, in sand microcosms, using PCR by species-specific primers based on 16S rRNA gene sequences,” *Biotech. Letters*, **23**(21), 1741~1748(2001).
9. Jung, S.-Y., Lee, J.-H., Chai, Y.-G., and Kim, S.-J., “Monitoring of microorganisms added into oil-contaminated microenvironments by terminal-restriction fragment length polymorphism analysis,” *J. Microbiol. and Biotech.*,

- 15(6), 1170~1177(2005).
10. Kim, S.-J., Kwon, K. K., Hyun, J.-H., and Svetashev, V. I., "Bioremediation of PAHs in marine sediment," *J. Ocean Sci. and Technol.*, **1**(1), 7~13(2004).
 11. 김상진, 권개경, 손재학, 현정호, 이정현, 정홍배, 강지현, 이희순, 신은영, 이숙영, 목진숙, Zhang Yong, Yun Tian, Vasiilli Svetashev, 오영숙, 최성찬, 이연희, 김명수, 이 상호, Bach Quan Lung, "독성 유기화합물 오염 퇴적토의 생물정화기술 개발 -자연환경·오염토양(지하수)의 정화·복원기술-", 환경부(2005).
 12. Oh, Y.-S., Sim, D.-S., and Kim, S.-J., "Effectiveness of bioremediation on oil-contaminated sand in lower intertidal zone," *J. Microbiol. and Biotech.*, **13**(3), 437~443(2003).
 13. Kim, S.-J., Choi, D. H., Sim, D. S., and Oh, Y.-S., "Evaluation of the bioremediation effectiveness on crude oil contaminated sand," *Chemosphere*, **59**(6), 845~852 (2005).
 14. 김상진, 이정현, 권개경, 현정호, 이홍금, 손재학, 정홍배, 강지현, V. Svetachev, 목진숙, 배승섭, 이정희, 이기분, "미생물처리제(생물정화제) 형식승인제도 도입을 위한 연구," 해양경찰청(2002).