



# 서론

유류유출 직후 정부와 기타 조직들은 사고가 해양 환경에 미치는 영향과 주요 자원의 오염 정도에 대해 알고 싶어한다. 이러한 정보는 인간의 건강이나 민감자원을 보호하기 위해 즉각적인 대응이 필요한지 여부를 결정하는데 중요하다. 의사결정을 촉진하기 위해 모니터링 프로그램을 실시할 수 있고, 이는 주로 현장조사와 화학분석을 위한 유류, 물, 퇴적물 또는 생물상의 시료 수집을 포함할 것이다.

이 문서는 유류 오염의 질적 및 양적 모니터링에 사용될 수 있는 시료 채취와 모니터링 절차에 관한 전체적인 개요를 제공한다. 질적 분석은 유류 오염의 출처를 확인할 수 있는 한편, 모니터링 프로그램은 시간이 지남에 따른 탄화수소의 양적 변화와 관계가 있다. 분석 우수사례에 대한 지침이 제공되고 일반적인 용어가 설명되어 있다. 그러나 특정 생태학적 또는 생물학적 영향을 추적 관찰하고 대기 중의 오염물질을 감시하는데 필요한 기술과 관찰은 여기서 다루지 않는다.

## 개요

기름 유출 후 모니터링은 모니터링 프로그램의 목적에 따라 여러 가지 방법으로 실시될 수 있다. 보트나 해안에 기지를 둔 항공탐색을 이용한 유류오염 정도의 조사는 일반적으로 모든 모니터링 프로그램의 첫번째 단계로 실시된다. 이 조사를 통해 오염의 정도와 분포를 확인할 수 있고, 위험에 처한 자원을 보호하기 위한 대응 전략을 구상할 수 있다. 오염의 정도를 육안으로 상세히 기술하는 것(그림 1)은 모든 모니터링 프로그램의 설계를 돕고, 영향을 받은 지역 안팎에서 모니터링의 구체적인 목적에 따라 시료 채취 지점을 확인할 수 있게 해줄 것이다. 유류유출 후에 모니터링을 하는 이유는 사고마다 다양하다. 모니터링이 항상 필요한 것은 아니다. 특히 유출이 작고 자원이 위험에 처해 있지 않을 때, 또는 유류가 특정 자원에 미치는 영향이 잘 알려져 있을 때가 그런 경우이다. 모니터링은 대체로 다음과 같은 목적으로 실시되어 왔다.

- 유류 오염의 유출원을 확인하기 위해
- 오염물질이 인간의 먹이 사슬로 옮겨질 위험을 입증하기 위해
- 조업 제한 조치에 관한 의사결정을 돕기 위해 상업적 어류 및 조개류에 미치는 오염의 영향을 확인하기 위해
- 원인과 영향을 확인하기 위해, 즉, 관찰된 모든 환경적 영향이 특정 오염 사고로 인한 높은 유류 농도에 직접적으로 기인하는지 아닌지를 확인하기 위해
- 방제를 연장할지 중단할지에 대한 의사결정을 돕기 위해 퇴적물 또는 물 속의 탄화수소 농도를 측정하기 위해
- 해양 환경 내 탄화수소 농도의 감소를 감별하고 회복을 추적 관찰하기 위해
- 복원 조치를 시작하고 지속하기에 적합한 조건을 확인하기 위해



◀ 그림 1: 유류유출 후에, 환경내오염물질수준의 변화를 알아보기 위해 모니터링 프로그램이 필요할 수 있다.

- 기름오염으로 인한 피해가 평가되는 것, 회복이 진행 중인 것, 해양 환경 내 유류 농도가 원래 수준으로 되돌아가고 있는 것을 실증하기 위해
- 국가 기준에 따라 명시된 모니터링 요구사항을 충족시키기 위해

모든 모니터링 프로그램의 목적은 환경 내 유출유의 존재에 관한 구체적이고 합리적인 문제에 대답하기 위해 신뢰할 수 있는 객관적이고 유용한 정보를 제공할 수 있어야 한다. 시간이 지남에 따라 환경 내 오염 물질의 수준과 정도를 식별하는 것은 대부분의 모니터링 프로그램의 기초를 형성하고, 대부분의 사고에서, 측정할 필요가 있는 유일한 매개 변수이다. 유류 오염으로 인한 잠재적인 환경적 영향을 조사하는 더 많은 연구들이 오염물질 모니터링과 함께 실시될 수 있지만, 개별 자원이나 서식지를 연구하는데 적용되는 방법론들은 매우 다양하다. 따라서, 이 기술정보지는 대응하는 동안 의사결정을 돕기 위한 합리적 오염물질

모니터링과 방법론에 초점을 맞추고 있다. 모든 모니터링 프로그램의 목적은 가능한 한 작업시작 전에 정확하게 결정되는 것이 중요하다. 한편, 단계적 접근은 연구의 초기 단계의 결과에 따라 다른 목표를 추가하거나 초기 목표를 조정하는데 유용할 수 있다.

모니터링 프로그램을 실시하는 세 가지 보완적 접근법은 다음과 같다.

- 유출 전 데이터와 유출 후 데이터의 비교
- 오염된 지역의 데이터와 오염되지 않은 지역의 데이터 비교
- 일정 기간 동안의 모니터링 변화

모니터링은 사고의 과학적, 법적, 운영적, 재정적 측면 사이에 중요한 인터페이스를 형성한다. 체계적으로 생산된 결과들로 유출의 오염원과 이를 통한 법적 책임을 확인할 수 있고, 방제 작업 동안 내려진 결정(예를 들면, 적절한 방법과 최적의 종료 시점)의 타당성을 입증하며, 환경 복원을 수행하는데 이용될 수 있다. 모니터링 연구 결과는 보상 및 기타 재정 문제와 큰 관련이 있을 수 있으므로, 모니터링에 대한 가장 건설적인 접근법은 모든 관계자들이 함께 협력하는 것이다. 이것은 독립적인 제3자를 활용하거나, 합동으로 시료 채취와 분석하여 그 결과를 공유함으로써 이루어 질 수 있다. 결과를 해석하는데 의견 차이가 발생하더라도, 이러한 접근법은 비용과 노력의 중복을 줄이고 기초적 사실에 동의할 수 있는 기회를 최대한 확대시킨다.

## 모니터링 프로그램의 설계

유출유의 거동과 영향 그리고 자연자원이 탄화수소에

노출될 가능성이 있는 잠재적인 경로를 이해하면 모니터링 프로그램의 필요성을 쉽게 이해할 수 있고, 모니터링 프로그램의 설계<sup>1</sup>를 도울 것이다. 오염의 지리적 범위는 조사지역을 정확하게 규정할 수 있게 한다. 그러나 지속적인 유류유출이 발생하는 경우, 표착유가 재이동 하는 경우, 최초 시료채취와 분석의 결과가 최초 피해를 받았다고 생각되는 지역과 다른 경우에는 조사지역은 재정립 되어야 한다. 유출유의 종류와 자연 자원이 유출유에 노출될 것으로 예상되는 수준도 모니터링 프로그램을 설계할 때 고려해야 할 핵심 매개 변수이다. 잠재적인 노출 경로뿐만 아니라 이러한 요소들을 고려하여 적절한 공간적, 시간적 매개변수가 적용될 수 있게 한다.

모니터링 프로그램을 설계할 때, 첫 번째 단계는 연구 목적을 명확하게 정의하고, 이러한 목적을 달성하는데 필요한 정보와 데이터를 확인하는 것이다. 이러한 목적은 프로그램의 범위와 내용을 정의할 것이고, 일반적으로 정부 기관에 의해 설정되거나 오염자에 대한 손해배상 청구에 대응하기 위해 설정된다. 어느 경우이든 연구 범위와 실행 계획은 앞서 설명한 것처럼 초기 단계에서 이상적이고 협력적으로 합의되어야 한다.

목적에 합의한 후, 요구되는 데이터의 종류나 정보, 시료 채취 필요성 여부, 시료 채취 지점의 분포와 각 지점에서 채취될 시료의 종류, 개수, 양을 설정하는 상세한 모니터링 계획이 수립될 수 있다. 시료 채취의 빈도, 분석의 유형과 연구의 전체 기간은 모니터링의 목적에 따라 달라질 것이다. 예를 들면, 환경 내 유류 농도가 원래 수준으로 감소하는

<sup>1</sup> ITOPF 기술정보지- 해양 유류유출의 거동(Fate of Marine Oil Spills), 유류 오염이 어업 및 수산업에 미치는 영향(Effects of Oil Pollution on Fisheries and Mariculture), 유류 오염이 사회, 경제 활동에 미치는 영향(Effects of Oil Pollution on Social and Economic Activities), 유류 오염이 환경에 미치는 영향(Effects of Oil Pollution on the Environment) 참조

위치	모니터링 목적	모니터링 활동
남미	유류 오염 정도와 정화 작업 조치의 연장 필요성을 확인하기 위해	물 위에 유류가 있는지 여부와 해안 오염 정도를 육안으로 기록하기 위해 광범위한 보트 및 해안 조사가 실시되었다. 정화 작업이 필요한 오염 지역들을 확인하여 적절한 정화 기술을 권고하였다. 정화 작업 동안의 지속적인 관찰과 작업 완료 후 최종 조사를 바탕으로 정화 작업의 적절한 종료에 관한 조언을 하였다.
유럽	유출 사고로 기름에 뒤덮인 핵심 지역의 퇴적물 내 유류 오염 수준을 확인하기 위해	3개월이 넘는 사고 기간 동안 유류에 오염된 것으로 알려진 핵심 지역들의 해변과 얕은 물에서 퇴적물 시료들을 수집하여 THC와 PAHs에 대해 분석하였다. 모니터링 결과, 대부분의 퇴적물은 비교적 유류유출의 영향을 덜 받았다.
인도양	인산염과 벵커유의 유실로 인해 해안가에 위치한 우물의 마시는 물이 오염되었는지 확인하기 위해	오염된 해안가를 따라 위치한 우물과 그 지역 밖의 우물에서 물 시료들을 채취하여 인산염, PAHs 및 중금속에 대해 분석하였다. 오염된 지역의 우물과 참고 지역의 우물에서 채취한 물에 대한 평균값을 비교한 결과 큰 차이가 없었고, 그 사고가 지역 식수 공급에 오염을 야기하지 않았다는 결론을 내렸다.
대서양	잠재적 오염이 조업에 영향을주는 기간과 공간적 범위를 확인하기 위해	샘플링 프로그램을 통해 수개월간 피해 지역과 참고 지역에서 종 시료를 수집하였다. 시료들은 PAHs의 정화율을 관찰하기 위해 분석되었고, 도달한 배경 수준과 비교되었다.

▲ 표 1: 과거 유류 오염 사고 시 모니터링 목적과 활동 사례. 분석된 다양한 매개변수들은 나중에 박스 1에서 설명한다

것을 목적으로 설정했다면, 일단 원래 수준에 도달했거나 결과가 만족스러운 감소율을 보여주면 그 연구는 완전한 것으로 간주될 수 있다. 많은 선박기인 유류유출에서, 적절한 유출 전 데이터가 거의 존재하지 않아서 적절한 바탕시료를 얻을 기회가 거의 없을 것이다. 이러한 이유로 모니터링 프로그램은 주로 사고 기간 동안 인근에 영향을 받지 않은 참고 지역에서 수집한 통계 데이터에 의존한다. 선정된 참고 지역들이 영향을 받은 지역 내에서 연구되고 있는 서식지 유형의 대표인지, 그리고 그들이 생물상, 지형 그리고 조류나 파도 작용에의 노출과 같은 물리적 특성의 측면에서 비교 가능한지 확인하는 것이 중요하다. 또한, 양적 데이터를 제공하기 위한 조사는 모든 생태계에서 일반적으로 발생하는 자연적 변동성을 고려해야 한다. 참고 지역과 피해 지역의 시계열 측정을 비교하여 자연적으로 발생하는 변동성과 계절적 변화를 고려한다.

표 1은 과거 오염 사고의 모니터링 목적과 모니터링 활동 사례를 요약하여 보여준다.

## 모니터링 지역의 위치와 개수

현장 조사는 유류의 위치와 범위에 대해 지리적으로 참고되는 정보를 빠르게 수집하는데 유용할 수 있다. 또한 현장 조사는 특히 일정한 간격을 두고 실시한 해안 정화 작업의 효과나 자연적 회복 과정을 질적으로 추적 관찰하는데 유용할 수 있다. 현장 조사나 시료 채취 지점에 반드시 포함되어야 하는 지역의 위치와 수는 영향을 받은 해안의 범위와 변동성, 그리고 영향의 변동에 따라 크게 달라질 것이다. 선택된 지역이 정화 작업을 하고 있는 지역을 대표하는지, 오염이 관찰되었는지 또는 서식지를 주시하고 있는지 항상 확인해야 한다. 그러나 대부분의 유류유출 시나리오의 조사할 지역의 수나 수집할 시료 개수를 확인하기 위해 정교한 통계에 근거한 절차를 요구하지는 않는다. 실제로는 사용 가능한 기간과 재정적인 범위 내에서 복잡한 생태계의 전체적인 시간적, 공간적 변화를 설명하는 현실성과 통계적 신뢰성에 대한 요구를 모두 만족시키기 위해서는 보통 어느 정도의 실용주의와 상호간의 타협이 필요하다.

지점과 개수에 관한 보편적인 규칙은 거의 없다. 대신, 이것은 모니터링 프로그램의 목적과 다음과 같은 많은 사례별 변수에 따라 달라질 것이다.

- 유출유의 종류와 양
- 유류의 풍화 작용 (화산, 용해 등)
- 피해 지역의 물리적 특성 (모래가 많음, 노출됨 등)
- 민감종의 특성과 위치
- 시료 채취와 분석 방법
- 시료 채취를 제약하는 물리적 조건 (접근성 또는 날씨)

가장 간단한 상황에서, 예를 들면 목적이 오염원을 밝히는 것이라면, 확률 기반의 시료 채취 설계는 필요하지 않다. 대신, 유막이나 오염된 해안에서 채취한 매우 적은 수의

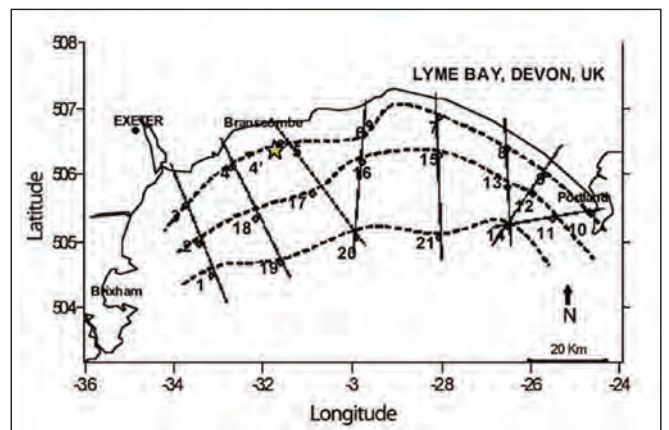
시료는 일반적으로 모든 당사자들에 의해 오염을 대표하는 시료로 인정 받을 것이다.

어떤 경우에는, GPS 좌표로 유류 오염을 나타내는 격자 형태의 안내선을 조사 정점 지도 위에 덮어서 시료 채취 지점의 개수와 최적의 위치를 추정할 수 있다. 하나 또는 일련의 횡단법은 오염원으로부터의 거리(그림 2) 또는 조고와 같은 다른 환경적 변수와 관련된 추세를 확인하는데 유용할 수 있다. 이러한 체계적인 접근법은 넓은 습지나 모래 지역과 같은 비교적 균일한 해안 지역에 특히 유용할 수 있다. 일부 복잡한 물리적 특성(예를 들면, 분리된 만)을 가진 연안 지역이나 해안의 광범위한 지역에 영향을 주는 유출에서, 그 지역은 개별적으로 추적 관찰 될 더 작은 성층 구역으로 분할될 수 있다. 실제로 시료 채취 지점은 유류의 분포와 자연적인 환경변화를 반영하도록 선정되어야 하고, 이를 위해 모니터링 프로그램을 계획할 때 현지의 지식을 이용하는 것이 도움이 된다.

완전히 무작위로 시료를 채취하는 것은 가능 하지만, 모니터링 프로그램에 있어서 오염물질에 대해서만 시료를 채취할 경우에는 거의 사용되지 않는다. 무작위 접근법이 결과도출에 있어서 통계적 추론을 더 많이 사용할 수 있지만, 수집된 데이터의 개선을 위해 훨씬 더 많은 비용을 들여서 많은 수의 시료들을 분석할 필요가 있을 것이다. 대신, 복잡한 경우, 예를 들면, 층별 무작위 채집을 이용하거나 보다 정교한 단계(즉, 집단) 또는 혼합 시료의 채취를 시행하는 것과 같이, 연구의 특정 요소들을 무작위로 만듦으로써 유용한 타협이 이루어질 수 있다. 그런 상황에서 적절한 확률 기반의 시료 채집 방법을 선정하는 것은 환경적 통계 전문가의 참여를 필요로 할 것이다. 시료 채집 계획에 대한 통계적 접근을 설계하는 다양한 접근법들은 표 2에 요약되어 있다.

## 모니터링 프로그램의 시기

유출 후 오염 물질 모니터링과 시료 채취 활동은 확정적인



▲ 그림 2: 선박이 해변에 올라온 자리(노란 별)에 근접한 시료 채취 지점들의 위치. (출처 - 영향 평가와 함께, 2007년 1월 MSC NAPOLI의 좌초 후에 Lyme Bay에서 실시된 환경 모니터링. CEFAS Aquatic Environmental Monitoring Report no. 61 - <http://cefas.defra.gov.uk>).

시료 채집 방법	유출 후 모니터링과 관련된 주요 특징
판단 채취	실행하기 쉬운 '일반적인' 접근법으로, 유지문법과 적은 노력이 필요한 모니터링 프로그램에 적합함. 조사자의 판단에 근거한 비확률적 채취의 예.
단순 무작위 채취	시료들은 더 큰 집단에서 완전히 무작위로 선택됨. 동종 지역(외해, 길게 이어진 해안, 어업)에서 수행하기 쉽고 통계적으로 신뢰성 있는 반면, 다양한 해안 지역과 오염 수준에서는 수행하기 어려움.
층별 무작위 채취	무작위 채취를 위해 케이스별 하위 그룹 (또는 층)으로 분리된 지역에서의 단순 무작위 채취의 판단 변이. 전체 그룹 내 하위 그룹이 다양할 때 이질 지역 (특성이 다양함)에서 수행하기 적합함.
계통 채취	거의 변화가 없는 지역, 특히 횡단법이 사용될 수 있는 조사 지역에서 적합함. 다른 변수들이 체계적으로 연관되어 있을 수 있는 곳(다른 오염원)에서는 통계적으로 어려움.
집단 채취	첫 번째 단계(주로 격자법)에서 확인된 오염 집중 지역(hot-spot areas)에 대한 더 상세한 두 번째 조사를 허용하는 효율적인 다단계 접근법.
혼합 채취	분석을 위해 시료들을 혼합하여 넓은 지역을 선별할 수 있는 매우 효율적인 단계적 접근법. 너무 다양한 오염 지역에서는 부적절함.

▲ 표 2: 유출 후 모니터링 시 시료 채취 지점 분포에 대한 일반적인 통계적 접근법

기한이 없다. 반면에, 모니터링이 더 빨리 시작될수록 일시적인 효과가 더 빨리 감지되고 오염범위의 변동이 기록될 수 있다. 시료채취가 필요한 곳에서는 잠재적인 오염원에서 채취된 유류시료는 영향을 받는 지역의 시료들과 함께 오염원을 확인하고 임시 데이터를 위해 확보되고 보존되어야 한다. 많은 영향 평가들이 모델 예측에 기반을 두고 있기 때문에, 예측을 확인하기 위해 생물상이 노출된 실제 농도를 기록한 데이터가 중요할 수 있다.

모니터링 프로그램의 기간과 반복적인 시료 채취의 빈도는 프로그램 목적과 측정되고 있는 특정 매개변수의 고유한 특성에 달려있다. 예를 들면, 오염된 환경 내 전체 유류 농도의 측정은 배경 농도가 재정립되기 전에 수주 또는 수개월의 모니터링을 필요로 하는 매개변수다. 반면에, 목적이 유처리제 사용과 같은 특정 방제 기술의 효과를 확인하는 것이라면, 모니터링의 즉각적인 실행과 결과분석은 결정을 시기적절하게 하는데 필수적이다.

관련된 실행 계획과 비용뿐만 아니라, 훈련된 직원, 적합한 시료 채취 선박과 같은 자원의 유용성 또한 고려할 필요가 있다. 시료들이 안전하고 정확하게 채취되는 비율은 날씨, 바다 생태, 그리고 시료 채취 지역의 접근성에 따라 다르다. 또한, 일시적 효과가 측정되는 곳에서는 가능한 시간 안에 시료들을 채취하기 위해 대상 지역이 조정되거나 원하는 시료 채취의 정도가 조정되어야 할 것이다. 모든 경우에, 타이밍과 전반적인 프로그램 설계는 분석 실험실에서 시료 분석과정에서 요구되는 시간과 요구되는 결과의 시기를

고려해야 한다. 예를 들면, 어업이 유출의 영향을 받을 수 있었는지 여부를 조사할 때, 시료 채취와 분석의 타이밍은 조업 중단과 재개에 관한 결정을 알리기 위한 데이터의 요구에 영향을 받을 가능성이 크다.

### 비용에 대한 예산 편성

모니터링 프로그램에 대한 비용 지불 책임은 사고나 손상이 발생한 국가 내에서 적용할 수 있는 법적 체제에 따른다. 누가 지불하는가와 상관없이, 과정 초기에 항목별 예산을 포함한 제안서를 생성하는 것은 좋은 관행이다(표 3). 관련된 곳에서, 이것은 작업을 시작하기 전에 보상을 지불하는 기관과 논의될 수 있다.

일반적으로, 모니터링의 전체 비용은 요구되는 분석의 종류, 시료 채취 지점이나 시료의 수, 조사 수행 빈도, 관련된 노력의 수준을 반영해야 하고, 다루고 있는 문제들의 규모에 비례해야 한다. 그러나 선박 임대료와 같은 일부 비용은 고정되어 있기 때문에, 시료 당 최종 비용은 반드시 시료의 총 개수의 영향을 받지 않고, 약간의 추가 비용으로 최소 시료 개수보다 더 많이 채취할 수 있는 기회가 있을 수 있다. 그럼에도 불구하고, 분석 비용은 시료 수와 직접적으로 연관되는 경향이 있기 때문에, 종종 최소한의 시료 수만 분석하고 나머지 시료들은 나중에 필요한 경우에 대비하여 적절하게 보관하는 것이 좋다.

단계적 접근법의 사용은 모니터링 비용을 균형 있게 유지하는 또 다른 전략이다. 유출 후 곧바로 실시한 시료 채취의 맨

배경	시료 채취	분석	운송
<ul style="list-style-type: none"> <li>사고명, 날짜, 위치</li> <li>과학팀명 및 소속</li> <li>목적, 방법 및 절차</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>기간 및 빈도</li> <li>지리적 범위</li> <li>시료 종류</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>분석 실험실</li> <li>분석 계획 및 관련 비용</li> <li>보고서 출간 날짜 엄수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>설명, 장비 및 재료 비용</li> <li>모든 특별한 실행 계획 지원의 비용 산출</li> <li>출장 및 숙박시설 요구 사항의 비용 산출</li> </ul>

▲ 표 3: 예산 제안서의 일반적인 구성요소

처음 단계와 비교하면, 다음 단계의 범위는 보다 좁아질 수 있다. 모니터링 프로그램의 종료 기준은 초기에 고려될 필요가 있으나, 오염 물질 모니터링은 대개 일단 원래 수준으로 돌아간 것이 감지되면 끝날 것이다.

## 실험실 선택

시료 분석을 실시하는 실험실은 프로그램 설계 단계에서 모든 이해관계자들의 동의하에 선택되어야 한다. 실험실은 예상 시료 수를 수용할 수 있어야 하고 프로그램 목적을 달성하는데 필요한 기술을 제공해야 한다. 어느 특정 실험실의 적합성을 판단하기 위해 실시될 예비 조사 항목 중 일부는 다음과 같다.

- 실험실 기술자들은 탄화수소 분석 경험이 있고 자격을 갖추었는가?
- 실험실은 필요한 장비, 주로 UVF, GC-FID, GC-MS(뒤에서 설명됨)를 갖추었는가?
- 실험실은 국가의 승인을 받거나 국제적으로 인정되는가?
- 어떤 품질 보증과 품질 관리 절차가 있는가?
- 유류유출 작업은 일상 활동보다 우선 순위가 될 수 있는가?
- 시료 선별 및 분석과 관련된 비용은 무엇인가?
- 결과가 어떻게 보고될 것인가?
- 필요한 경우 법정에서 실험 결과를 설명하고 방어할 수 있는가?

## 품질 관리

시료 채취와 분석의 높은 품질을 유지하기 위해, 모든 모니터링 계획은 다음 두 가지 핵심 요소를 포함해야 한다.

- 시료 채취 및 분석과 같은 모니터링 계획의 양상이 정확한 방법으로 수행되고 있는지 점검하기 위한 과정과 절차를 보장하는 품질 보증(QA) (과정 감사)
- 모니터링 계획이 계획된 목적들을 성취하기 위한 품질 관리(QC) (제품 검사)

시료들은 품질 관리 목적에 따라 다양한 방법으로 분리될 수 있고, 이는 시료 수집 전에 결정된다.

- 분리된 시료들: 각각의 완전히 균질화된 시료는 채취된 후에 분리되어, 둘 이상의 당사자들에게 독립적인 분석을 수행할 기회를 준다.
- 현장 복수 시료: 두 개 이상의 동일한 시료를 채취하기 위해 동일한 위치에서 동일한 장치와 절차가 사용된다. 그러한 시료들은 시료 변화를 시험하는데 사용되고, 그들의 동일성이 항상 실험실에서 확인되지 않는다.
- 실험실 복수 시료: 분석을 위해 똑 같은 실험실로 보내진, 아직 두 개의 서로 다른 시료라고 알려진 분리된 시료들. 이들은 실험실 분석의 정확성을 점검하는데 사용될 수 있다.

## 시료 채취 및 모니터링 프로그램 수행

수집된 현장 데이터와 정보의 유형과 범위는 시행 중인 모니터링의 목적에 따라 다르다. 예를 들면, 유처리제 적용 효과를 관찰하기 위해, 훈련된 관찰자를 통한 육안 관찰에 더하여 수중 유류 농도<sup>2</sup>에 대한 데이터를 수집하기 위해 자외선 형광분석법(UVF)이 사용될 수 있다. 명확하게, 의사결정에 활용할 수 있도록, 현장 조사 결과는 시기 적절하게 지휘본부에 전달되어야 한다.

해안과 바다에서 유류의 전체적인 지리적 범위에 대한 정보를 수집하는데 항공 탐색이 유용하긴 하지만, 해안의 유류 오염을 빠르게 기록하는 것이 목적인 더 상세한 해안 조사는 적절한 방제 기술을 결정하는데 도움이 되는 중요한 정보를 제공한다. 서면으로 된 메모 및 스케치와 더불어, 해안 조사에서 사진과 비디오를 이용하여 조사 결과를 기록하는 것도 일반적인 관행이다. 항공 탐색과 해안 조사 모두에 있어서, GPS 데이터를 이용하여 이미지를 기록하는 것이 유용하며, 이를 통해 데이터와 정보<sup>3</sup>를 간단하게 표시할 수 있다.

유출 당시 환경 조건과 유류의 특성상 상당한 양의 유류가 가라앉았을 것으로 보이는 곳에서는 침강이 발생했는지 여부를 확인하고 영향을 받은 모든 지역의 범위를 결정하기 위해 수중 조사가 필요할 수 있다. 이러한 조사들은 육안 평가, 잠수부나 무인잠수정(ROV), 음향 센서와 수중 음파 탐지기, 또는 기계적 방법 등 다양한 방법을 통해 할 수 있다. 고정된 자리에 머물러 있거나 해저에서 예인된 흡착재 형태의 기계적 방법(그림 3) 과거 사고에서 침강유의 존재 여부를 감지하기 위해 사용되었었다.

<sup>2</sup> ITOPF 기술정보지-기름오염 방제시 유처리제 사용 지침 참조

<sup>3</sup> ITOPF 기술정보지-기름오염 항공탐색 지침



▲ 그림 3: 조하대 시료 채취를 위해 흡착재를 사용함. 흡착재가 부착된 틀이 해저에서 예인된다. 흡착재가 올라왔을 때 유류의 존재 여부를 보고 침강유의 지리적 범위를 결정할 수 있다.

상세 설명	최소 요구치 (시료 당)
순수한 유류 원료 시료	30-50 ml
오염된 유류 (예, 유화된 유류, 바다 또는 해안의 유류, 모래와 섞인 타르블 등)	10-20 g
유류 찌꺼기, 유류가 스며든 모래	유류를 약 10g 정도 포함하고 있는 충분한 양
기름에 오염된 깃털	기름양에 따라 5-10개의 깃털이 필요함
어류, 조개류 (어육 및 조직)	총 30 g에 이르는 동일종의 여러 개체들
육안으로 보이는 기름이 있는 물 시료	1 리터
육안으로 보이는 기름이 없는 물 시료	3-5 리터

▲ 표 4: 일반적으로 탄화수소 분석에 필요한 시료 양에 대한 지침

수집 중인 현장 데이터와 정보의 유형에 관계없이, 데이터와 정보를 수집하는 방법의 정확성과 일관성을 보장하기 위해 SCAT(해안오염평가)과 같은 규정이 개발되어야 한다. 또한, 조사를 수행하는 인력은 적절하게 훈련되어야 한다. 수집된 모든 현장 데이터나 정보는 시행 예정인 모든 다른 모니터링 연구 결과와 연계될 수 있게 하면서 적합하게 범주화되고 보관되어야 한다.

## 시료 수집

시료 수집 절차는 국제적인 사례에 따라야 하고 모니터링 계획에서 상세하게 기술되어야 한다. 이러한 접근은 시료 채취 팀들이 현장에서 반드시 동일한 규정을 따르고, 결과를 정확하게 분석하기 위해 충분한 정보가 사용될 수 있게 한다. 만약 국제적으로 인정된 사례를 따른다면, 필요한 경우, 그 결과는 법정에서 사용될 수 있다. 다양한 종류의 시료 양에 대한 지침은 (표 4)와 같다.

### 오염원 시료

모든 잠재적인 오염원에서 채취된 유류 시료는 모니터링

프로그램에서 초기에 채취하는 가장 중요한 시료에 속한다(그림 4). 파열된 파이프라인이나 선박 탱크와 같은 오염원이 알려지고 그곳에 접근이 가능하면, 자격을 갖춘 인력이 바로 시료를 채취할 수 있다(그림 5). 오염원이 알려지지 않은 곳에서는 여러 오염원 후보지에서 시료를 채취해야 할 수도 있다. 화물 탱크에 있는 유류는 일반적으로 한 위치에서 채취될 수 있는 반면, 병커 탱크나 빌지에 있는 내용물은 한 지점에서만 채취해도 될 만큼 충분히 균질적이지 못하기 때문에 맨 위, 중간, 그리고 바닥 등 탱크 전체에 걸쳐 여러 깊이에서 시료들을 채취한다.

유류 시료는 일반적으로 화물이나 병커유가 선박에 적재될 때 채취되고, 이것은 상업적 분쟁이 발생할 경우 표준 작업 관행으로써 보관되어야 한다. 이러한 시료들은 오염원 시료로서 유용할 수 있지만, 그들을 이용하는 것과 관련해서 특히 플라스틱 용기에 보관할 경우 보관의 질이 중요하다. 유류의 오염원이 가라앉은 잔해이고 시료 채취를 위한 접근이 불가능할 때, 유류가 잔해 바로 위의 해수면으로 올라올 때 유류 시료를 수집할 수 있다. 사고선박에서 유류 제거 작업이 나중에 진행된다면, 구난팀으로부터 적은 양의 유류를 얻을 수 있다. 오염원에서 시료를 얻을 수 없는 경우, 오염된 해안에서 여러 유류 시료들을 대리 오염원



▲ 그림 4: 선상에서 병커유 오염원 시료를 채취.



▲ 그림 5: 선박 오염원 시료 채취는 매우 기술적이고, 반드시 선원, 해사검사인 또는 해난구조자가 수행해야 하는 잠재적으로 위험한 작업이다.



▲ 그림 6: 깨끗한 흡착패드에 부유 유류를 포집함.

시료로 사용할 수 있다.

## 유출유 시료 채취

부유 유류나 표착유의 시료는 일반적으로 양적으로 농도를 파악하기 보다는 유류의 오염원을 확인하기 위한 질적 목적으로 채취된다. 보통 분석에는 아주 적은 양(예를 들면, 10-20 g)의 유류만 필요하다. 수면의 시료는 시료 채취병이나 흡착패드에서 바로 얻을 수 있다(그림 6). 만약 접근이 제한된다면, 밧줄에 양동이를 매달아 이용하거나 막대를 이용하여 시료를 채취할 수 있다. 시료 채취 선박의 선체, 엔진 배기나 냉각수에서 나오는 모든 기름을 피하기 위해, 시료는 반드시 시료 채취 선박의 뱃머리에서 채취되어야 한다.

때때로, 얇은 유막의 시료가 필요한데, 가는 시료 채취 그물망과 같은 특수 시료 채취 장비가 있다. 유막에서는 매우 적은 양의 유류만 얻고, 시료로 채취할 유막이 더 얇을수록(예를 들면, 시료 채취 선박 또는 장비에 인한) 시료 오염의 위험이 더 크다. 품질 관리를 위해, 시료와 함께 분석을 위한 참고자료로 사용하지 않은 그물이나 흡착패드가 제공되어야 한다.

해안가에 표착한 유류나 조간대 안의 시료를 채취하는 절차는 일반적으로 모래와 찌꺼기를 최소화하도록 주의하면서 유류를 긁거나 시료병에 모으는 작업을 포함한다(그림 7).

## 환경 시료 채취

탄화수소 오염을 정량화하기 위한 시료 채취와 모니터링은 유출유에 목적을 두는 것에서 잠재적으로 오염된 매개물을 시료 채취하는 것으로 이동하는 것이다. 유류는 수중을 통해 해안, 퇴적물, 생물상에 도달하기 때문에, 초기 접근법으로 주로 수중에서 시료를 채취한다. 모니터링을 시작할 때 결정된 목적에 따라, 수중에서 상승된 유류 농도의 증거는 시료 채취 체계를 생물상과 같은 다른 표적으로 확장하는 계기가 될 것이다. 어떤 경우에, 물, 생물군, 퇴적물의 일련의 시료들을 요구하면서 집중적인



▲ 그림 7: 해안가의 표착유를 채취함.

환경 모니터링 프로그램(오염물질 모니터링 및 생물 영향 평가)이 시작될 수 있지만, 이것은 대개 오염이 심각하고 영향이 잠재적으로 상당한 경우에만 필요하다.

시료 채취를 하는 동안 일관성을 유지하는 것이 중요하고, 가능한 곳에서는 비교 시료를 표적으로 삼아야 한다. 예를 들면, 많은 지역에서 갑각류 오염을 관찰할 때, 의미 있고 양적인 비교를 하기 위해 모든 지역에서 같은 단계의 생활사에 있는 갑각류의 동일종을 표적으로 삼아야 한다.

각 시료에 요구되는 부피나 질량은 계획된 분석의 수와 종류, 시료의 유류 농도, 시료 분할에 사용되는 개체수, 그리고 품질 관리 목적으로 필요한 동일 시료의 수에 따라 다르다. 최근에는 테스트 절차에 매우 적은 양의 시료만 필요하다(표 4).

## 물 시료 채취

수중 모니터링은 현장 측정이나, 분석을 위해 보존되고 실험실로 운반되는 샘플들의 수작업 수거를 통해 실시될 수 있다. 현장 측정은 기본 수질과 유류의 특정적 감식을 포함하고, 이 둘은 모두 실시간 결과를 제공하는 이동식 현장 센서에 의해 측정된다.

- 전자 수질 센서는 pH, 염도, 전도율, 화학적 산소 요구량(COD) 또는 생물학적 산소 요구량(BOD) 등의 화학적 및 물리적 변수들을 측정한다. 이들은 유류 오염물질 모니터링과 직접적인 연관은 없지만, 생태학적 모니터링 연구에서 유용하다.
- 형광광도계(towed multi-wavelength fluorometers)와 같은 유류유출에 특수한 현장 센서는 분산유 농도 등을 측정하기 위해 환경 모니터링보다는 대응 작업에 많이 적용된다.





▲ 그림 8: 시료 분리를 위해, 물 시료들을 시료 수집 장치에서 유리병으로 나눠 담음

원하는 수심의 폐쇄된 지점에서 전문 샘플링 장치를 이용하여 물 시료들을 수작업으로 수집할 수 있다(그림 8). 원하는 지점에서 수중 시료를 채취하기 위해 장치가 열리고 나면, 해수면 위에 있을 수 있는 유막에 의한 오염을 피하기 위해 회수시 장치는 닫힌다. 연속적인 이후 실험실 분석을 위한 수작업수거는 오염물질 모니터링의 주된 방법으로 남아있다.

## 퇴적물 시료 채취

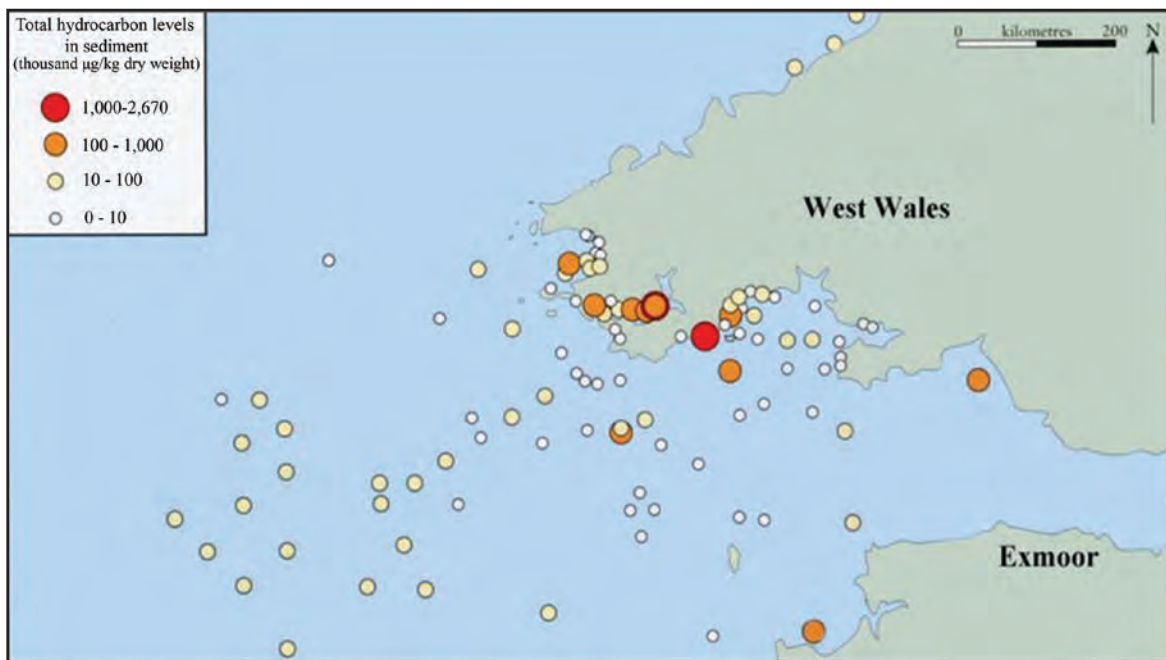
오염물질 모니터링 프로그램에 종종 전체 유류의 양적 측정 또는 퇴적물이 분해될 때 퇴적물 내 유류의 조성 변화가 포함된다(그림 9). 조하대 퇴적물은 일반적으로 선박에서 채취되고, 유류가 이러한 종류의 퇴적물로 이동하는 속도가 느리기 때문에 천해역 그라브(grab)가 자주 사용된다. 잘 설계된 그라브는 회수하는 동안 내용물이 씻겨나가는

것을 막아주고, 시료들을 채취하는 중간 중간에 적절한 용제로 그라브를 행구는 것이 좋다. 특히 이전에 다른 오염원에 의해 발생한 오염이 존재하는 것으로 의심될 때에는 다이버가 직접 시료를 채취한다. 조간대 퇴적물의 시료 채취는 보통 표면 스크래퍼나 표본 채취기를 이용하여 실시된다. 그 결과는 방제작업 중단 시기의 결정을 돕는데 사용될 수 있다.

## 생물상 시료 채취

생물상 시료 채취 절차는 다양하고, 조류와 포유류뿐만 아니라 저층종과 원양종(해저면 부근 또는 수중에 사는 생물), 저서종(해저면 또는 퇴적물에 사는 생물) 등 생물과 서식지에 따라 다르다. 조사 시 기준과 다른 모든 변이를 기록하려고 하기보다는 생태계 내 경향에 초점을 맞추어야 하고, 핵심 지표종을 이용하는 것이 가장 좋은 접근법으로 여겨진다. 지표종은 주로 상업적으로 중요하거나, 그들의 특성에 의해 오염을 기록하기에 좋다(예. 홍합 및 다른 여과섭식생물). 시료들은 종특정적(예. 많은 개체의 동일한 기관)이거나 균질화된 부드러운 부분들을 가진 모든 생물일 수 있다(그림 10).

생물상 시료들은 자연산종과 바다양식 시설에서 발견되는 양식산종 모두를 포함할 수 있다. 바다양식에서의 시료 채취는 시료 채취팀이 지정한 대표 위치에서 시설 운영자와 함께 이루어져야 한다. 상업적으로 이용되는 종들 중 자연산 자원에 대한 시료들은 어민들에게서 구할 수 있지만, 이러한 방법은 언제, 어디에서 어류가 잡혔는지에 관한 여러 가지 품질 관리 문제와 교차 오염 위험을 수반한다. 어민들과 함께 시료를 채집하는 것은 이러한 문제를 없애주고, 지역적이고 일일단위의 해안어획이 수행되는 영세어업에



▲ 그림 9: 영국, 웨일즈에서 SEA EMPRESS 유류유출이 발생한 후에 해저 퇴적물이 유류에 오염되었는지 평가하기 위해 선정된 시료 채취 위치. 이러한 대형 유출 이후, 유출 6개월 후에 주로 연안에 가까운 천해의 퇴적물이 오염된 것을 볼 수 있다. (출처: The Environmental Impact of the SEA EMPRESS Oil Spill; SEA EMPRESS Environmental Evaluation Committee (SEEC) 1998).

가장 적절하다.

조류, 포유류 또는 다른 고등 생물들은 대개 육안으로 오염을 알 수 있고 혼합과 같은 하등 지표종 보다 다양성이 더 크기 때문에, 유류 오염 모니터링에서 대표적인 시험 대상이 아니다. 기름에 오염된 동물의 시료는 주로 사체에서 채취하거나 살아있는 동물의 기름 묻은 깃털이나 털을 채취한다.

### 시료 취급

많은 경우에, 시료의 최종 사용과 분석 결과는 시료가 채취될 때는 알려져 있지 않다. 시료를 나중에 사용할 수 있도록 온전하게 보존하기 위해, 적절한 취급 및 보관 규정을 따라야 한다. 현장에서의 시료 취급은 보관, 라벨 붙이기, 실험실 운반 전 안정화, 포장, 운송 및 관리의 과정을 포함한다. 관련된 시간순서대로 기록된 문서는 보관 과정에서 참고된다.

### 보관

시료는 교차 오염과 분해를 최소화하기 위해 즉시 보관 용기에 담기 때문에, 보관은 시료 채취의 본질적인 부분이다. 부유 유류를 걷어내거나 기름 묻은 모래를 유리병에 담은 경우처럼 어떤 경우에는 용기 자체가 채취 도구로 사용될 수 있다. 보관에 적합한 용기를 사전에 준비해야 한다. 다른 적합한 용기를 사용할 수 없는 경우가 아니라면 플라스틱 물병과 같은 비전문적인 용기의 사용을 피해야 한다. 용해 플라스틱으로부터 오염될 위험이 있는 경우에, 용기 자체가 분석될 수 있고 분석 결과에 대한 대조자료로 사용될 수 있다. 표 5, 그림 11과 12에서 적절한 보관 용기의 여러 특징을 설명해 놓았다.

### 라벨 붙이기

보관 과정은 시료를 용기에 넣자마자 효과적으로 시작되기 때문에, 보관과 라벨 붙이기는 함께 고려되어야 한다. 공간적 또는 시간적 시료 채취 프로그램에서는 여러 용기가

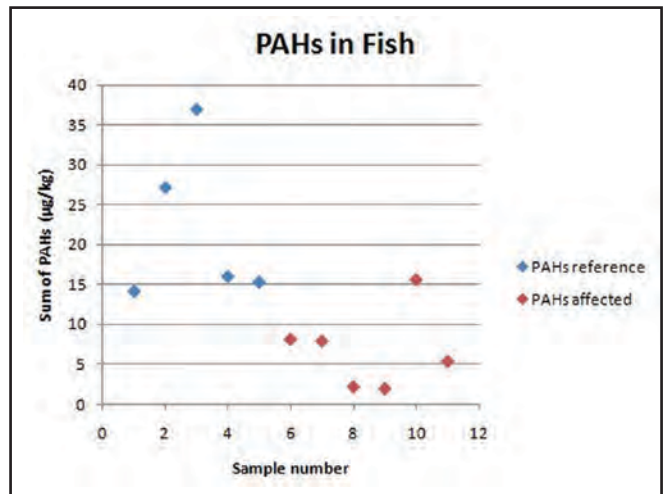
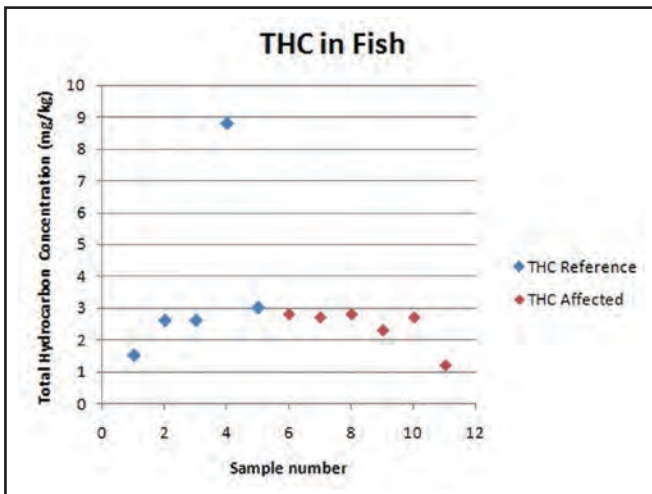
사용되므로 부주의로 용기가 섞이는 일이 많다. 이러한 문제를 피하기 위해, 표준 시료 라벨을 준비해서 그 시료가 언제, 어디에서, 누구에 의해 채취되었는지에 대한 상세한 정보와 함께 사용자가 시료를 식별할 수 있는 고유한 표시를 해야 한다. 공동 시료 채취 작업에서 얻은 시료의 경우, 시료 채취를 지켜본 사람의 이름과 연락처를 표시해야 한다. 동일한 정보를 기록하여 복사본을 이해당사자와 분석 실험실에서 사용할 수 있도록 해주는 스프레드시트 등으로 병렬적 시료 목록을 유지하여야 한다. 순수하게 과학적 변수들을 기록하는 것과 더불어, 시료가 한 곳에서 다른 곳으로 이동될 때 시료 채취 팀은 시료의 이름, 날짜, 장소 및 기타 보관과 관련된 세부사항을 기록해야 한다. 보관 과정을 보호하여 고의든 아니든 시료들이 어떤 물리적 간섭, 교차 오염 또는 모든 다른 변화의 위험에도 노출되지 않도록 해야 한다.

### 안정화

많은 시료들은 풍화된 타르볼이나 순수한 원유와 같이 분해에 특별히 민감하지 않거나 어류 조직 시료처럼 냉장 또는 냉동되기 때문에 원래 시료 용기에 담겨서 보관될 수 있다. 모니터링 규정에 따르면, 물과 퇴적물 시료들은 실험실로의 운반이 지연될 경우 온전한 상태를 유지하기 위해 현장에서 안정화되어야 한다. 시료들이 산성화되거나 살생물제를 첨가할 수 있는 한편, 시료를 채취한 날에 용매 추출을 실시하는 것이 일반적이다. 심지어 냉동되었을 때도 시료 상태가 나빠질 위험이 있고, 물질이 용기 벽에 달라붙을 수도 있다. 그 결과, 시료 보관 가능 시간은 일부 분석 규정에 따라 엄격하게 정해질 수 있다. 또한 추출을 위한 가장 순수한 용매를 구하는데 주의를 기울여야 한다. 용매 내 오염물질은 특히 관심 화합물의 농도가 매우 낮을 때 그 화합물의 검출을 혼동시키거나 감출 수 있다.

### 포장 및 운송

시료는 주로 유리 용기에 보관되므로 시료의 손상이나 부패를 막고 용기가 깨지지 않도록 운송 전에 주의해서 포장해야 한다. 칸막이로 속을 채운 박스는 분석 실험실로



▲ 그림 10: 어류 내 총탄화수소(THC) 및 다환방향족탄화수소(PAH) 농도를 측정하기 위해 실시한 테스트 결과

안전하게 운송될 수 있다면 딱딱한 아이스박스만큼 유용하다. 모든 경우에, 유류 시료 내 자유수(free water) 최소화하기, 생물학적 물질에 적절 온도 유지하기, 모든 외부 용기에 사고명 라벨 붙이기, 포장물 안에 시료 목록 동봉하기 등은 좋은 사례이다. 국내 배송 요건은 나라마다 다르므로 지역에 따라 자문을 구해야 한다. 시료의 국제 운송은 일반적으로 더 복잡하고, 발화점과 같은 유류의 특성이 포장 및 운송 방법에 영향을 줄 경우 엄격한 포장 및 라벨 표시 규정을 준수해야 할 것이다.

## 유류 오염 분석 기술

일단 적합한 실험실이 정해지고 시료들이 현장에서 수집되면, 유류의 출처나 오염 수준을 식별하기 위한 시료 분석이 시작될 수 있다. 여러 가지 분석 기술과 그들의 목적에 대한 평가는 모니터링 프로그램의 계획 및 실시와 관련해서 유용하다.

시료의 유류오염 수준을 결정하기 위한 특정 분석 기술 사용의 합리성을 평가하기 위해, 그리고 특정 유류의 출처를 확인하기 위해, 박스 1에 요약된 것처럼 유류의 화학조성에

대한 지식이 도움이 될 수 있다.

한 가지 국제 기준이나 일련의 가이드라인이 전 세계 유류 오염 시료 분석에 적용되는 것은 아니다. 그러나 시료 분석 시 다음과 같은 기관에서 발간된 많은 국제 및 국내 관련 규정들을 따를 수 있다.

- 미국재료시험협회(ASTM)
- 미국석유협회(API)
- 미국환경보호청(EPA)
- 캐나다환경위원회(CCME)
- 유럽표준화위원회(CEN)
- 러시아표준화를 위한 유라시아협회(EASC)

실험실에 도착하여 분석 작업을 시작하기 전에, 시료들이 이 물질을 제거하고 탄화수소 화합물을 농축하기 위해 세척되어야 한다. 가장 일반적인 기술은 용매추출법과 크로마토그래피이다. 이러한 준비 단계의 특성은 나중에 사용될 최종 분석 기술과 시료 상태에 의존한다. 예를 들면, 비록 겉보기에는 완벽히 깨끗할지라도, 퇴적물 시료에서 잔해물을 제거하여야 하고, 에틸렌을 분해하여야 할 것이며(즉, 수분을 배출시킴), 유류 시료는 추출되어야 한다(그림 13).



▲ 그림 11: 라벨을 잘 붙인, 입구가 넓은 유리병의 병커유 시료들 (이 경우 하나의 탱크에서 시료들을 나누어 담음).



▲ 그림 12: 깨끗하고 입구가 좁은 병(좌) 또는 플라스틱 병(우)은 모니터링 목적에 적합한 용기가 아니다.



일반 지침	비고
시료를 테플론 뚜껑이나 깨끗한 알루미늄 호일로 안을댄 뚜껑이 달린 깨끗한 유리병에 담아야 함. 유체 유류는 스테인리스강 용기에 채취할 수 있음. 고체나 반고체 시료는 사용하지 않은 나무 막대거나 설압자로 운송할 수 있음. 니트릴 장갑을 착용해야 함(그림 7).	플라스틱 용기는 시료를 오염시킬 수 있음. 시료병은 처음 사용할 때 적절한 용제로 행구어야 함. 각 시료마다 새로운 시료 채취 막대를 사용해야 함. 장갑은 시료 채취 동안 피부에 기름이 묻을 위험을 막아줌.
갈색병을 이용하거나 운송 및 보관 시 시료를 어두운 곳에 두어야 함.	수중 시료를 광산화와 분해으로부터 보호해야 함.
순수한 유류와 유류에 오염된 퇴적물에 30 ml 이상의 시료병을 사용해야 함. 넓은 주입구와 틀어서 여는 뚜껑이 좋음.	주입구가 좁고 얇은 유리병은 시료를 담기 어렵고 운송 중에 깨질 수 있음.
시료병을 액체 또는 유류 찌꺼기로 가득 채우지 말 것.	열팽창을 감안한 약간의 공간을 남겨두어야 함. 특히 얼 위험이 있는 경우.
시료병에 고유한 참조 번호, 위치, 시간 및 날짜, 시료유형 및 기타 관련 정보(예, 깊이)를 담은 라벨을 정확하게 붙여야 함.	시료 채취 직전에 가능한 한 많은 정보를 담고 있는 표준 라벨을 준비해야 함. 가독성을 유지하기 위해 유성펜을 사용하고, 라벨 위에 투명 테이프를 붙여야 함.
쏟지 않도록 뚜껑을 잘 닫고, 관리 과정 중에 변질되지 않도록 잘 밀봉해야 함.	뚜껑을 고정시키기 위해 테이프를 사용해야 함.
오염을 피할 것.	시료 채취 사이에 채취 장치를 용매로 세척해야 함. 금연! 보트 배기관에서 멀리 떨어져 있을 것.

▲ 표 5: 시료 보관에 관한 일반 지침

크로마토그래피는 이동상(정화될 시료 포함)이 고정상을 빠져나가는 많은 기술들 중 하나이다. 탄화수소 분자 그룹을 분별 및 분리하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 기술들 중 두 개는 실리카 컬럼 기체 크로마토 그래피(GC)와 고성능 액체 크로마토그래피(HPLC)이다. GC는 비교적 널리 사용 가능한 반면에, HPLC는 매우 정교한 장비와 매우 순수한 용매를 필요로 하기 때문에 널리 사용되지 않는다. 그러나 HPLC는 PAHs를 안정적으로 식별할 수 있는 능력과 향상된 민감도를 제공한다.

비용 대비 효율성을 향상시키고 전체 프로세스를 신속하게 처리하기 위해, 더 자세한 조사가 필요한 시료들을 선별하여

불필요하게 많은 시료들을 분석하지 않도록 한다. 기체 크로마토그래피와 불꽃 이온화 검출기의 결합 기술(GC-FID)은 대표적인 선별 기술이고, UVF 분광기와 관능검사로 사용될 것이다. 관능검사는 숙련된 관능평가원들이 통제된 환경에서 의심스러운 통제 시료들의 맛과 냄새, 외관<sup>4</sup>을 평가하는 것이다.

## 자외선 형광분석법(UVF)

자외선 형광분석 분광학은 이동 장비를 갖춘 현장의 수중이나

<sup>4</sup> ITOPF 방제기술정보집-어업 및 양식업에 대한 기름 유출의 영향 참조

### Box 1: 유류 조성

유류는 단순한 저분자량 탄화수소 분자에서 수지 및 기타 금속 등을 포함하는 고밀도 고분자에 이르는 매우 복잡한 조성들의 혼합물이다. 많은 유류유출 사고에서, 모니터링 프로그램의 초점은 총탄화수소(THC), 또는 동의어로 쓰이는 석유계 총탄화수소(TPH)를 확인하는 것이고, 이들은 지방족 및 방향족 화합물의 총량을 나타낸다. THC는 일반적으로 환경 시료에 존재하는 측정 가능한 탄화수소 양을 설명하지만, 개별 성분에 대한 정보를 제공하지는 않는다. 측정된 THC의 양은 사용된 추출 방법과 추출물에 의한 적외선 흡수율에 따라 다르고, 그 결과는 사용된 방법에 따라 다르다. 해산물 등의 시료 내 유류 오염의 특성에 관해, 또는 유류유출 출처의 확인을 위해 더 상세한 정보가 필요할 경우, 특정 탄화수소 화합물이 개별적으로 분석될 수 있다.

Normal **alkanes**(n-alkanes)은 직쇄 탄소 원자로 구성된 화합물로, 일반적으로 갓 추출한 원유 또는 증류 제품의 많은 부분을 차지한다. 저분자량 n-alkanes은 증발과 생분해에 민감하다. 따라서, 풍화된 유류는 갓 추출한 대응물 보다 n-alkanes을 적게 포함하는 경향이 있다. 소위 분기 사슬 화합물이라고 불리는 iso-alkanes는 갓 추출한 유류에서도 동일하게 풍부하고, 역시 생분해에 민감하다. 일부 iso-alkanes 화합물은 생분해의 지표로 유용할 수 있다.

**지환식** 화합물은 생분해에 비교적 강한 순환식 포화 화합물이다. 포화되는 기간은 완전히 수소화되어 오직 하나의 탄소-탄소 결합을 가진 분자를 의미한다. 그들의 상대적 안정성은 특히 개별 유류를 식별할 수 있게 해주는 독특한 특성으로 유용한 고분자량 지환식 화합물의 일부를 만든다. 이러한 화합물은 유류 형성의 지질학적 과정 동안 생물학적 물질로부터 변형되기 때문에 생물지표\*로 참조된다.

**지방족** 탄화수소는 직쇄, 분기 사슬, 또는 (비방향족) 순환식 체인의 탄소 원자로 구성되고, n-alkanes와 지환식 화합물 모두를 포함한다.

**방향족** 화합물은 일반적으로 두 개 및 한 개의 탄소-탄소 결합과 6개 탄소 원자의 한 개 이상의 고리(벤젠 고리)를 번갈아 생성하는 불포화된 순환식 탄화수소로, 휘발성유기화합물(VOCs)과 다환방향족탄화수소(PAHs)를 포함한다. VOCs는 벤젠과 톨루엔과 같은 저분자량 화합물을 포함하고, 이들은 빠르게 증발하여 VOCs의 시료 채취 및 분석은 전문 기술이 필요한 어려운 작업이다.

**다환방향족탄화수소(PAH)**는 독성 및 발암성 화합물이므로 많은 환경 모니터링 프로그램의 집중 대상이다. 특히, 미국 EPA(환경보호청)에서 '우선관리대상 오염물질'로 분류한 16종 PAHs는 일반적으로 측정되고, ITOPF 기술정보지 '유류 오염이 어업 및 수산업에 미치는 영향'에서 더 자세히 다룬다. 유류가 형성될 때 발생하는 PAH 혼합물의 변화는 각 유류가 고유한 특성이나 PAH 단면을 가지고 있음을 의미한다. 이것은 풍화에 대한 저항이 높아서 PAH가 다양한 유류를 구분하는 중요한 방법이 된다. PAH에 대한 연구는 분석을 통해 발열성(연소 제품), 조암(원유에서 생성됨) 및 생물 기원(생물학적 과정에서 생성됨)의 유류의 출처를 구분할 수 있게 해주기 때문에 수질오염의 가능한 출처를 구분하는데 사용될 수도 있다.

\* 환경 모니터링에서, 생물지표라는 용어는, 여기서와 마찬가지로, 유지문법 유류에서 사용되는 화합물이나 동물의 효소 활동 수준을 나타내는 화합물과 관련이 있다. 후자에 대해서는 ITOPF 기술정보지 '유류 오염이 해양환경에 미치는 영향'을 참조하기 바란다.

실험실에서 준비된 시료에서 유류의 존재를 감지하기 위해 사용되는 정성 및 정량 분석법이다. 시험될 재료는 자외선 방사선의 특정 주파수에 노출되는데, 이는 방향족 분자가 형광을 내도록(즉, 낮은 빛 에너지 방출) 자극하여 분광계에 의해 감지한다. 유류별 PAHs의 조성은 UVF를 통해 서로 다른 유종을 식별하고(그림 14) 시료에서 THC를 감지하는 좋은 기술로 만들어준다. 이는 알려진 참고 시료로 보정이 될 경우, 일반적으로 현장에서 1.0  $\mu\text{g/l}$  (즉, ppb) 이하, 실험실에서 0.1  $\mu\text{g/l}$  이하, 퇴적물에서 1.0 mg/kg (즉, ppm) 이하의 매우 낮은 농도의 유류도 감지할 수 있다. UVF는 빠르고 유용한 선별 기법으로 간주되지만, 박스 1에서 강조되었던 것처럼 개별 유류 화합물의 분석을 필요로 하기 때문에 오염원 시료를 확인하는데에는 일상적으로 사용되지 않는다. 비 탄화수소 분자들은 동일한 자극 파장에서 여기되어 PAH 신호를 방해할 수 있기 때문에, UVF는 유지분 분석 연구에 적합하지 않다.

### 기체 크로마토그래피-불꽃 이온화 검출기(GC-FID)

GC는 유류 내 복잡한 탄화수소 혼합물을 부분적인 분자 그룹으로 분리시키는 분석 기법이다. 작은 액체 시료는 미리 정해진 온도 범위에서 통제된 속도로 가열되는 길고 좁은 금속 컬럼으로 주입된다. 보통 그 컬럼에 헬륨과 같은 운반 기체가 지속적으로 주입된다. 증발된 화합물이 빠져나갈 때 컬럼 내 특수 코팅은 이 화합물과 상호작용하여, 휘발성 등 그들의 화학적 특성에 따라 분자를 분리시키고, 각 화합물이 서로 다른 시간 간격으로 또는 지체시간에 컬럼에서 용리되게 한다.

불꽃 이온화 검출기(FID)는 분자가 수소 불꽃에서 불타면 GC 컬럼에서 용리된 분자의 연소 시 방출된 이온에 반응하는 센서이다. 분자가 가벼울수록 무거운 것보다 컬럼을 더 빠르게 지나가므로, 컬럼에 머무르는 시간은 분자량과 연관될 수 있다. 표준시료의 도입으로 개별 탄화수소가 구분될 수 있다. 특정 화합물의 농도가 높을수록 FID 신호는 더 강하고, 컴퓨터 프로세싱 후에 이는 결과



▲ 그림 13: 분별 깔대기를 이용한 유류 시료 추출(그림 출처 CEFAS)

크로마토그램에서 피크로 나타난다. GC-FID는 비교적 빠른 결합 선별법 및 유지분법 기술로 사용될 수 있고, 또한 이것은 탄화수소의 정량적 측정에 적합한 기술이다.

각각의 유류 종류가 고유한 분포 패턴이나 유지분을 가지고 있기 때문에, 유출 및 출처 시료에 대한 GC-FID 크로마토그램의 비교 연구를 통해 많은 유류 시료들을 구분할 수 있다. 어떤 경우에는, 특히 비교적 잘 추출한 유류에 대해서 GC-FID만으로 두 개의 시료가 일치하지 않는다는 것(예, 유출 시료는 출처 시료와 일치되지 않음)을 확인하기에 충분하다. 결론에 이르지 못하고 단지 가능한 일치만 있는 경우이거나 특정 화합물을 양적으로 표시해야 할 필요가 있는 경우, GC-MS의 더 높은 해상도에 의한 추가 연구가 필요할 수 있다.

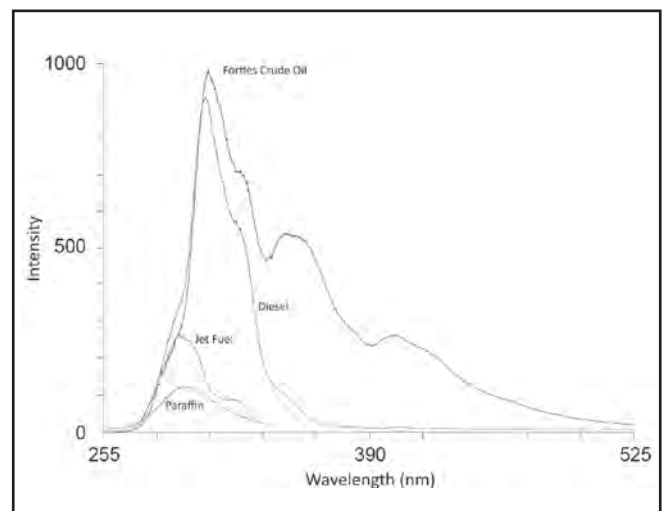
### 기체 크로마토그래피-질량분석법(GC-MS)

결합된 GC-MS 프로세스는 질량분석법(MS)과 연결된 기체 크로마토그래프로 구성되어 있다. 이는 각 분자를 따로따로 감지 및 분석하여 분자의 정확하고 높은 해상도 감지와 식별을 가능하게 한다. 질량분광학은 이온화, 분절, 자기 편향, 양이온 검출의 4단계 과정을 포함한다. 서로 다른 이온 단면을 그래픽으로 산출하고 표현함으로써, 분자의 전체 구조가 드러난다.(그림 15).

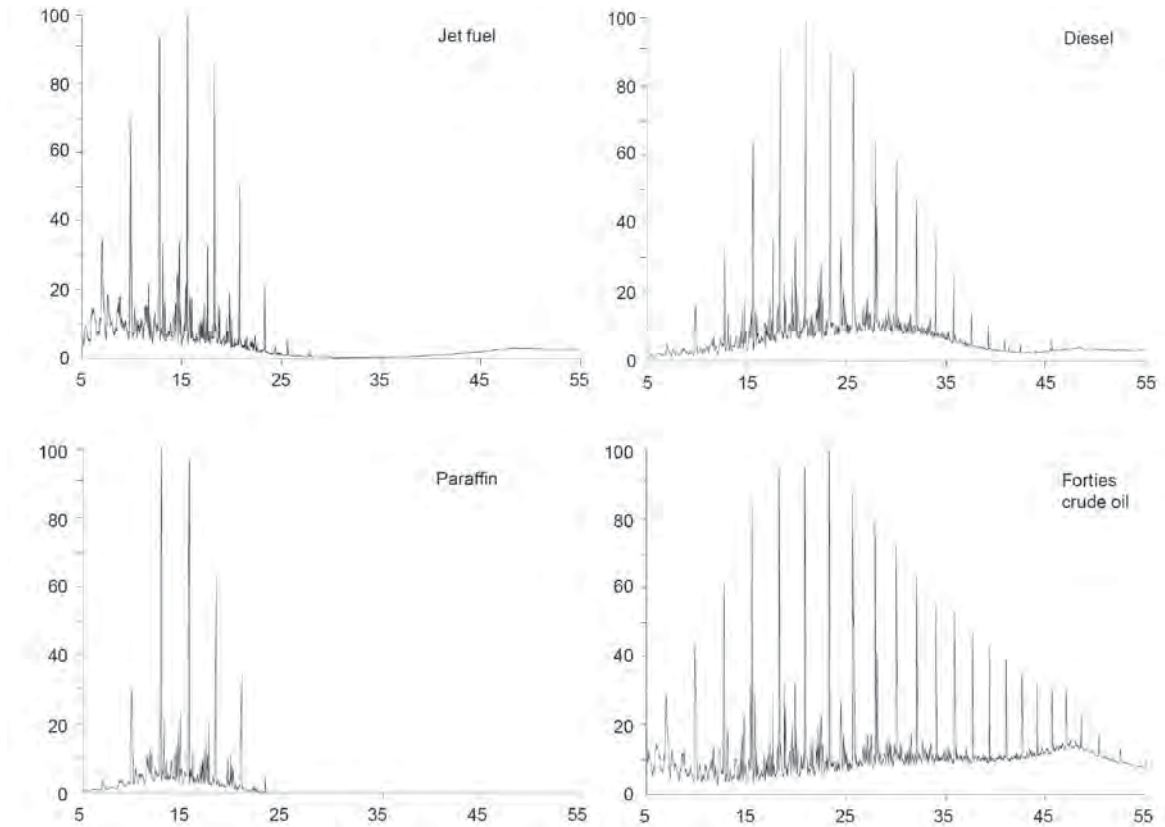
높은 해상도 때문에, GC-MS는 생물지표, VOCs 및 특정 PAHs를 식별하는 주요 기술이다. GC-MS에 대한 검출 한계는 일반적으로 0.1  $\mu\text{g/kg}$ 이지만, 조 단위당 부분(즉, ng/kg)아래 수준을 검출할 수 있는 기술들이 사용 가능하다. 선박기인 해양오염의 측면에서 이러한 검출수준은 논쟁의 여지가 있다.

### 분석 기술 선정

적절한 기술 선정은 모니터링 프로그램의 목적에 따라



▲ 그림 14: 4가지 혼합유에 대한 UVF 방출 스펙트라. 뒷장의 동일한 유류에 대한 GC-MS 크로마토그램과 대조할 수 있음. (CEFAS Aquatic Environmental Report No.12-Methods for Analysis for Hydrocarbons and PAH in Marine Samples, 2000)



▲ 그림 15: 제트 연료유, 디젤, 등유, 포티스유에 대한 4가지 전형적인 총 이온 크로마토그램(GC-MS). 디젤은 가벼운 화합물이 우세하고, 포스티유는 경유와 중유의 두 가지 패턴을 보인다. (출처: CEFAS Aquatic Environmental Report No.12-Methods for Analysis for Hydrocarbons and PAH in Marine Samples, 2000).

결정된다(표 5). 유류 시료가 의심되는 오염원에서 파생된 것인지 증명하는 것이 목적이려면, GC-FID 선별 및 생물지표의 GC-MS 분석을 이용한 정성 분석이 가장 자주 사용되는 방법이다. 모니터링 프로그램이 단순히 환경 시료의 총 탄화수소 농도를 측정하여 배경 수준으로의 회복과 관련된다면, UVF 또는 GC-FID 기술이 사용될 수 있다. GC-MS는 보통 PAH의 농도 측정이 요구될 때, 생물상 분석, 특히 인간 섭취하는 생물종들의 분석에 이용될 것이다.

## 분석 결과 해석 및 보고

위에서 설명된 분석 기술에서 얻은 결과의 해석은 사용된 방법에 대한 철저한 지식과 분석결과 검토경험이 필요하기 때문에 전문가가 수행해야 한다. 결과 분석 시 문제점은 유류가 채취되기 전에 겪은 풍화 과정뿐만 아니라 유류에서 일반적으로 발견되는 탄화수소 화합물의 다른 조암적 요소와 생물학적 기인의 존재가 포함된다.

유류 분석의 결과와 결론은 사고 후 현장에서 진행된 관측을 고려하여 해석되어야 한다. 유류유출에 의한 오염의 정도와 경로를 완전히 이해하기 위해서, 여러 위치의 퇴적물, 생물상 및 수중에서 얻은 시료들의 결과를 각 위치에 대한 배경 탄화수소 수준과 연결하여 해석할 필요가 있다.

모니터링 프로그램의 결과를 보고할 때, 적용된 시료 채취와 분석 프로토콜을 자세히 알려주는 것이 중요하다. 결과의 해석은 크로마토그램과 같은 수집된 원 데이터가 수반되어야 한다.

비교적 적은 수의 시료가 분석된 경우, 시각적 관찰 및 정량 데이터의 결과보고를 위해 수치 표, 그래프 및 글자 설명이 적절할 것이다(그림 16). 그러나 유류 오염이 복잡한 지형에 걸쳐 분포된 곳에서, 수치 표는 개별 시료 위치에서 얻은 결과나 관찰된 오염 정도를 표시하는 지도로서 보완될 수 있다.

## 모니터링 활동 실시

모니터링 프로그램의 설계 단계에서 모든 현장 시료 채취의 예상 기간과 프로그램의 종료를 결정할 기준을 고려해야

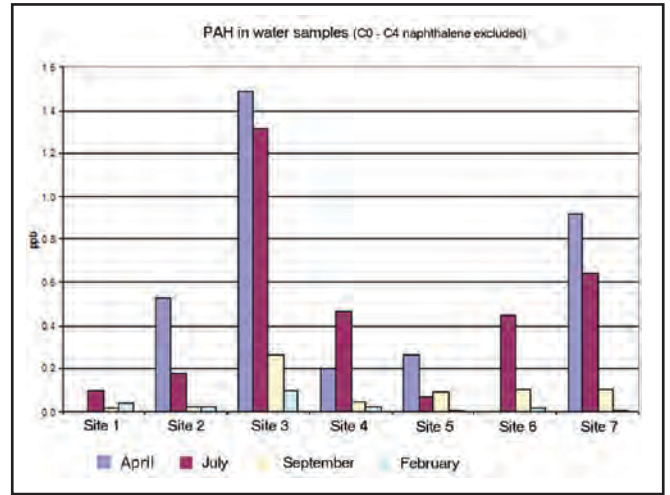
화합물	UVF	GC-FID	GC-MS
n-alkane		X	X
iso-alkane		X	X
생물지표		X	X
VOCs		X	X
PAHs	X	X	X
THC	X	X	

▲ 표 6: 분자 그룹 분석에 사용된 분석 기술

한다. 자연적인 영향이나 방제과정의 여러유인에 의해 해양 환경 내 유류 오염의 지속성에 영향을 줄 많은 요소들을 감안하면, 모니터링에 적합한 기간을 예측하는 것은 어려울 수 있다. 결과적으로, 모니터링 프로그램은 종종 반복적이므로 이전의 시료 채취 활동 결과가 다음 시료 채취 활동의 규모와 요구사항을 결정하는 기초로 사용되고, 언제 모니터링 프로그램을 종료할지 의사결정하는데 도움을 줄 수 있다.

환경 내 유류에 대한 모니터링 프로그램이 모든 유출 후에 반드시 필요한 것은 아니며, 일반적으로 유류가 넓은 지리적 지역에 퍼지고 심각한 환경 손상과 해산물 안전 위협을 가져올 잠재성이 있으며 모니터링이 방제 활동에 직접적인 도움이 될 수 있는 대형 사고의 경우 가장 적절하다. 모니터링은 유류 오염의 규모와 정도를 평가하는데 사용될 수 있는 신뢰할 수 있는 정보를 제공할 목적으로 과학적 엄격함, 객관성과 균형을 가지고 실시하는 것이 중요하다. 잘 수행된 오염물질 시료 채취와 모니터링 프로그램의 결과는 일부 경우에 환경 영향에 대한 더 길고 복잡한 연구와 함께 또는 그러한 연구의 타당성을 뒷받침하기 위해 사용될 수 있다.

사고 후에 광범위한 모니터링 프로그램을 실시하는데



▲ 그림 16: 해안방제 작업중 연안해상과의 PAHs의 배경농도 수준으로의 회복을 모니터링한 연구결과

정치적, 대중적 압력이 있겠지만, 영향을 받을 수 있거나 받지 않는 모든 자원과 생태계를 모니터링 할 필요는 없다. ITOPF의 경험상, 사고와 직접 관련된 분명한 목적을 가진 잘 계획된 집중적인 모니터링 프로그램이 가장 효과적인 것이다.

## Key points

- 유출이 작고 자원이 위험에 처하지 않은 경우, 또는 유류가 특정 자원에 미치는 영향이 잘 알려진 경우 모니터링할 필요는 없다.
- 합동 시료 채취 및 분석은 모니터링에 있어 건설적인 협력 방안이다.
- 모니터링 프로그램은 연구 목적과 이러한 목적을 달성하기 위해 필요한 정보와 데이터를 명확하게 정의해야 한다.
- 목적과 사고의 특정 요인들은 시료 채취의 최적 위치와 그 수를 결정한다.
- 프로그램 비용은 명확하게 예산을 세우고, 작업을 시작하기 전에 보상금 지불 기관과 논의해야 한다.
- 선정된 참조 지역들은 영향을 받아서 연구되고 있는 서식지 유형을 대표해야 한다.
- 오염원 시료들의 수집은 우선시되어야 하지만, 폐쇄된 공간에 출입할 수 있는 자격을 갖춘 인력의 활용이 필요하다.
- 분석을 위한 시료를 온전하게 보존하기 위해 시료의 취급과 보관에 관한 적절한 규정을 따라야 한다.
- 모니터링 프로그램에서 일찍 채취한 시료들의 분석 결과는 추가 모니터링의 범위와 기간을 결정한다.
- 시료 분석에 사용되는 기술들은 모니터링 목적에 따라 달라지지만, 선별 기술은 더 정교한 분석을 필요로 하는 시료의 수를 제한하는데 유용하다.

## ITOPF 기술정보지침서 목록

- 1 기름오염 항공탐색 지침
- 2 해상 유출기름의 특성변화
- 3 기름오염방제시 오일펜스 사용지침
- 4 기름오염방제시 유처리제 사용지침
- 5 기름오염방제시 유회수기 사용지침
- 6 해안오염 식별지침
- 7 해안방제 지침
- 8 기름오염방제시 유흡착재 사용지침
- 9 기름 및 폐기물의 처리 지침
- 10 기름유출 대응의 리더쉽, 지휘 및 관리
- 11 어업 및 양식업에 대한 기름유출의 영향
- 12 사회·경제적 활동에 대한 기름유출의 영향
- 13 환경에 대한 기름유출의 영향
- 14 해상유출기름의 시료채취 및 모니터링 지침
- 15 기름오염에 대한 보상청구 지침
- 16 기름오염에 대한 긴급방제계획 수립지침
- 17 해상에서의 화학오염사고 대응 지침

국제유조선선주오염연맹(ITOPF)은 유류, 화학물질 및 기타 유해물질의 해양 유출에 효과적으로 대응하기 위해 전 세계 선주들과 그들의 보험사를 대표하여 설립된 비영리 조직입니다. 긴급 사고대응, 방제기술에 대한 권고, 피해 평가, 방제계획 수립 지원 및 교육훈련 제공 등의 기술적 서비스를 제공합니다.

본 방제기술정보집은 국제유조선선주오염연맹(ITOPF)의 기술진들의 경험을 바탕으로 개발되었고, 국제유조선선주오염연맹(ITOPF)의 승인 하에 해양경찰청에서 국문으로 번역하였습니다.



### ITOPF Ltd

1 Oliver's Yard, 55 City Road, London EC1Y 1HQ, United Kingdom

Tel: +44 (0)20 7566 6999  
 Fax: +44 (0)20 7566 6950  
 24hr: +44 (0)20 7566 6998

E-mail: [central@itopf.org](mailto:central@itopf.org)  
 Web: [www.itopf.org](http://www.itopf.org)

#### 번역기관



### 해양경찰청

인천광역시 연수구 해돋이로 130  
 Tel: 032-835-2293 Fax: 032-835-2991  
 Web: [www.kcg.go.kr](http://www.kcg.go.kr)



### 한국해양과학기술원

대전시 유성구 유성대로 1312길 32  
 Tel: 042-866-3114 Fax: 042-866-3106  
 Web: [moeri.kiost.ac](http://moeri.kiost.ac)

※ 본 정보집에 수록된 해양오염 방제기술은 다양한 오염사고 특성 및 환경에 따라 다르게 적용될 수 있으며, 내용중 일부는 생략 또는 의역되어 있을 수 있으므로 해당부분은 원문을 참고 하시길 바랍니다.