

유류오염지역의 생태복원

성기준 · 이석모

부경대학교 환경시스템공학부 생태공학전공

Ecological Restoration of Oil Spilled Shoreline

Ki June Sung · Suk Mo Lee

Ecological Engineering Major, Pukyong National University

1. 서론

해상에서의 유류유출 사고는 정도의 차이는 있지만 해양생태계에 피해를 주고 곧 연안지역의 유류오염도 유발하게 된다.¹⁾ 유류오염에 노출되게 되는 연안지역은 육상과는 달리 생태적으로 민감하기 때문에 기존의 오염지역의 치유 방법과는 다른 접근을 필요로 한다. 일반적으로 오염된 지역에 있어서 대부분의 토지는 치유 후에 원래의 토지이용과는 다른 목적으로 사용되는 경우가 많기 때문에 정화 과정 중에 발생할 수 있는 생태계의 파괴는 크게 문제가 되지 않을 수 있다. 따라서 치유과정에 소요되는 비용과 소요기간 및 목표 정화수준의 달성 여부가 주요 관심사가 된다. 하지만 연안지역의 경우 치유 이후의 연안의 이용도는 거의 변하지 않고, 오염 이전의 용도와 동일하게 사용되기를 기대하는 경우가 대부분이다. 따라서 오염물질의 제거과정에서 생태계에 미치는 영향을 충분히 고려하여 치유 방법이 선정되어야 한다. 기존의 유류정화 과정과 같이 단순히 오염물질의 제거에만 중점을 둔다면 유류에 노출되어 이미 연약해진 연안 생태계의 구조와 기능이 정화 과정 중에 더 큰 타격을 받을 수 있기 때문이다. 따라서 연안지역의 복원에는 생태계의 민감도와 이후의 생태계의 회복이 우선적으로 고려되어야 한다.²⁾ 아직까지 우리나라의 경우 유류로 오염된 연안생태계의 복원에 대한 기준이나 절차 및 방법에 대한 구체적인 방안이 마련되어 있지 않은 형편으로 외국에서 사용되고 있는 방법들을 그대로 수용하고 있는 실정이다. 우리나라 해안의 경우, 외국과는 달리 집약적으로 수산물의 생산에 이용되고 있는 지역으로 안전성의 확보가 우선적으로 고려되어야 하므로 우리나라의 연안특성과 이용특성을 고려한 복원방법의 개발이 시급한 형편이다. 유출사고 이후 방제 종료에 대한 방침이나 명확한 기준이 없는 상황에서 유류 유출 이후 효과적인 복원방법의 선정 및 적용은 생태계의 빠른

회복에 매우 중요한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 고에서는 유류로 오염된 연안생태계의 복원을 위한 기존의 기술 현황들을 살펴보고 우리나라 실정에 적합한 생태복원기술 개발을 위한 복원전략을 제시하고자 한다.

2. 유출 유류의 거동

해양에서 기름이 유출되면 수 mm 두께의 유막을 형성하고 해수면 표면에 퍼져 나가면서 휘발성 성분들은 누출이후 빨리 대기 중으로 휘발하게 된다.³⁾ Exxon Valdez 사건으로 누출된 유류 35,000톤 중 적어도 30% 이상이, 240,000톤이 유출된 Amoco Cadiz 사건의 40% 정도가 대기 중으로 휘발되었다고 추정되었다.^{4,5)} 이러한 휘발은 유출 초기에 주로 일어나며 휘발성분 중에 많은 독성물질을 포함하게 되므로, 초기 방제 혹은 복원 작업 시에 반드시 이에 대비하여 작업자 및 주변 생태계의 안전성을 확보하는 것이 중요하다.

유출된 유류의 일부는 해수에 용해된다. 일반적으로 분자량이 낮은 물질들이 용해되는데 그 양은 전체 유출 양에 비하여 매우 적은 부분이다. 용해된 유류는 해수 중에서 빨리 희석되어지고 이후 해양 생물들에 의하여 분해되게 된다. 용해되지 않는 유류 중 일부는 파랑에 의해 0.01~1 mm 직경의 작은 방울로 부서지며, 이후 oil-in-water의 형태로 해수내에서 해양 생물에 의해 분해될 때까지 존재하게 되는데, 이러한 유류의 분산 과정은 대부분 기름의 자연적 정화에 대해 중요한 역할을 하게 된다. 이러한 과

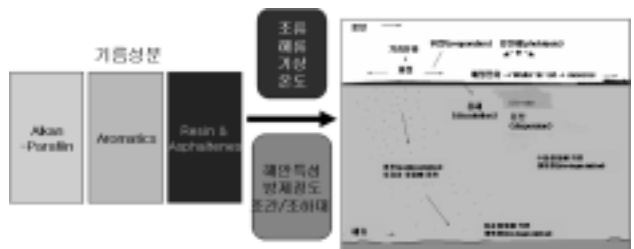


Fig. 1. 유출된 유류의 반응기작과 주요 영향 요인.^{3,4)}

E-mail: ksung@pknu.ac.kr

Tel: 051-620-6444

Fax: 051-621-8166

정 중에 물보다 밀도가 작은 유류라도 일부는 해저로 가라앉게 되는데 이는 유류가 다른 입자성 물질과 결합하여 밀도가 증가하기 때문이다. 이러한 물질들의 축적은 해저로 가라앉은 타르볼의 형성을 야기할 수 있는 것으로 알려져 있다. 분산되지 않은 유류는 반대로 물을 흡수하며 water-in-oil 형태의 에멀전을 형성한다.^{3~5)} 이와 같이 유출된 유류의 운명은 유류의 구성 성분, 조류나 해류와 같은 해양특성, 바람과 온도와 같은 기상조건, 해안특성, 방제정도, 오염위치에 따라 영향을 받게 된다(Fig. 1). 하지만 Fig. 1에 나타난 반응 중 해양생물 혹은 해저생물에 의한 생물학적 분해와 광분해를 제외하면 유류의 회석이나 매체간의 이동 과정으로 실제적인 오염물질의 제거 과정은 아니다. 따라서 유류를 회수하지 않고 방치하면 회석이나 유류의 이동 등에 의하여 오염 지역의 범위가 확산되게 된다. 이러한 유류의 반응과 거동은 크게 회석, 분해, 이동, 풍화로 구분할 수 있는데(Fig. 2) 회석과 분해 등의 과정을 통하여 시간에 따라 유류의 특성이 변하는 풍화과정은 유출과 동시에 일어나며 바람, 조류 및 해류에 영향을 받아 이동하며 해안에 도달하게 된다. 따라서 연안생태계의 복원은 도달한 유류의 양과 더불어 유류의 풍화 정도 및 물리화학적 특성과 같은 유류 특성과 더불어 해안의 민감도, 기질의 종류, 조석의 영향 정도 등과 같은 오염지역의 특성 등에 영향을 받게 된다.

3. 연안생태계의 특성

육지환경과 해양환경의 전이지대인 연안지역은 갯벌, 사빈, 암반 및 사구 등 다양한 생태계로 존재하며, 이러한 생태계는 주변 환경과 연결되어 평형을 유지하고 있다. 지금 우리가 보고 있는 다양한 해안경관은 오랜 시간에 걸친 자연현상의 산물로서, 인위적인 간섭은 이러한 평형관계를 파괴하여 환경의 급격한 변화를 일으킬 수 있다. 유류로 오염된 해안의 치유에 있어서도 이러한 점이 충분히 고려되어야 한다. 다음의 Table 1은 연안생태계에서 흔히 발견되는 경관 유형들을 보여주는데, 크게 자연해안과 인간의 간섭이 있는 인공해안으로 나누어진다. 이중 자연 해안은 해양에너지에 영향권과 기질의 종류에 따라 암반해안과 모래, 자갈, 펄 해안 및 조간대 상부에 위치하는 염습지로 나누어지며, 인공해안은 방파제와 부두와 같은 인공구조물을 포함하게 된다.²⁾



Fig. 2. 유출된 유류의 해양에서의 거동.

Table 1. 해안경관 유형

자연해안	
• 암반/절벽	• Exposed Wave-Cut Cliffs (노출된 바위절벽)
	• Wave Cut Rocky Platform (파도로 풍식된 바위대)
	• Sheltered Rocky Shore (보호된 바위해안)
• 모래/자갈해안	• Sand Beach (모래해안: 세립, 조립)
	• Mixed Sand and Gravel Beach (혼합해안: 모래, 자갈, 조립 등)
	• Gravel and Riprap Structures (자갈 및 사석)
• 갯벌	• Exposed or Sheltered tidal Flat (갯벌)
• 염습지/맹그로브	• Salt Marshes and Mangroves
인공해안	
	• Seawalls and Piers (방파제와 부두)
	• Manmade Structure (기타 인공구조물)

충청남도의 경우 2001년 현재 전체 해안 662 km 중에 자연해안이 327.3 km로 약 49.4%가 자연해안으로 알려져 있다.⁶⁾ 이러한 자연해안은 연안의 특성을 충분히 고려하여야 하며 인공해안보다 더 세심한 복원전략을 필요로 한다. 다음의 Fig. 3은 충남 태안지역의 여러 가지 자연해안의 경관유형을 보여준다.

연안생태계는 그 형태적인 분류와 더불어 항상 물에 잠겨 있는 조하대와 하루 중 일정기간 공기 중에 노출되는 조간대로 나눌 수 있는데, 조수가 오르내릴 때 발생하는 조류에 의하여 토사를 운반하여 퇴적하거나 침식이 일어나며, 이러한 조류는 모래나 자갈 해안에서 유류가 공극을 통하여 지하로 흘러들어가는 주요한 역할을 한다.⁵⁾ 연안지역은 물리적 환경의 변화가 크기 때문에 종다양성이 전반적으로 낮지만, 해양환경 중에서는 가장 높은 생산력을 가진 곳이며, 해양 생물들의 서식지와 산란지로서의 역할을 하고 있다.⁷⁾ 우리나라의 경우 이곳에서 생산되는 수산물의 경제적 가치가 매우 높다. 특히 갯벌은 자연의 정화조라 할 만큼 정화능력 또한 뛰어난 것으로 알려져 있는데 이러한, 갯벌의 정화능력을 이는 조류와 같은 물리적 기작과 더불어 갯벌을 이루고 있는 생태계의 복잡한 먹이연쇄과정에 기인한다. 하지만 유류에 노출되면 이러한 생태계의 구조가 파괴되기 때문에 오염물질의 정화기능은 물리적 기작에만 주로 의지하게 되므로, 오염된 갯벌의 정화는 오히려 더디게 된다. 특히 모래갯벌과 달리 투수도가 낮아 유류의 침투가 상대적으로 어려운 펄갯벌의 경우에는 오염 이전의 정화작용에 긍정적인 역할을 하던 퇴적물식자의 서식처가 유류 누출시에 유류의 침투 통로가 되어 유류 제거를 더욱 어렵게 할 수 있다.

4. 유류오염지역의 정화기술 현황

연안지역은 위치적인 특성 및 주요 오염요인 등의 차이로 인하여 육상생태계에서 발생하는 일반적인 토양이나 지하수 오염 현상과는 다른 양상을 보이며 복원 전략 또한



Fig. 3. 서해의 다양한 해안경관 유형 (a) exposed wave-cut cliff, (b) wave cut rocky platform, (c) sheltered rocky shore, (d) gravel and riprap structure, (e) mixed sand and gravel, (f) sand beach, (g) exposed tidal flat, (h) sand dune, (i) salt marsh, (j) seawall, (k) pier, (l) manmade structure.

달라져야 한다.⁸⁾ Table 2는 일반적인 토양유류오염과 연안 생태계의 유류오염 특성을 비교한 것이다. 연안지역은 일반적인 토양이나 지하수 오염과는 달리 오염발생 여부를 비교적 빨리 알 수 있어, 초기 대처가 가능한 만큼 초기의 유류 방제정도가 오염지역의 치유에 큰 영향을 주게 된다. 유류로 오염된 연안지역의 복원에 있어서 가장 큰 특징은 유류제거 후에도 대상지역의 이용 목적에 변화가 없다는 것이다. 이전의 이용도가 양식장이었다면 정화 후에도 원래의 양식장으로 사용되어진다. 따라서 오염물질 정화과정에서 발생할 수 있는 생태계의 파괴 가능성을 최소화 하고, 치유 과정 중에 자연적인 요인을 최대한 활용하여야 하며, 생태계의 자가 조직화 능력을 고려하여 접근하여야 한다.

Table 2. 일반적인 토양유류오염과 연안생태계의 유류오염 특성 비교

일반적인 토양의 유류오염	연안생태계의 유류오염
<ul style="list-style-type: none"> •오염발생 후 상당기간 경과 후 먼저 가능성이 높음 •초기 발견(예보)이 중요 •오염물질(유류) 제거를 우선적으로 고려 •오염물질 제거과정에서 생태계 파괴 가능성 •정화과정에 인위적 요소 없음 •오염 처리 후 토지이용에 타 목적으로 변경되는 경우가 많음 	<ul style="list-style-type: none"> •오염 발생 후 인지기 획득 •기상환경 등에 영향 •초기 방제가 중요 •오염물질 제거와 생태계 보호를 함께 고려 •오염물질 제거과정에서 생태계 파괴 가능성 최소화 •정화과정에서 자연 요인을 이용 •생태계의 자기조직화 능력고려 (self-organization) •오염 처리 후 원래 목적으로 사용되기를 기대

Table 3. 유류오염지역의 정화기술 현황⁸⁾

일반적인 유류오염지역의 정화방법 (물리, 화학, 생물학적 방법)	해안지역의 유류오염 제거방법 ⁹⁾
<ul style="list-style-type: none"> • 연외지 (In-situ) or 현장처리 (on-site) <ul style="list-style-type: none"> • Soil Vapor Extraction (도정증기추출법) • Bioventing • Soil Washing (도양 세척법) • Natural Attenuation (자연정화) • Biocostenuation • Surfactant/Cosolvents Application (계면활성제 적용) • Landfarming (토지경작) • Bioremediation/Phytoremediation(생물/식물 정화) • 연외지처리 (Ex-situ) <ul style="list-style-type: none"> • 열탈착, 바이오몰트, 소각 등 	<ul style="list-style-type: none"> • No Action /Natural Recovery • Manual Removal (수작업제거) • Passive Collection (흡착포, 흡착망, 흡착봉 등) • Debris Removal (오염잔해 제거)/ Cutting Vegetation (오염식물제거) • Trenching (도굴파기) • Sediment Removal/Filling (퇴적물 제거/진적) • Washing (세척) <ul style="list-style-type: none"> • Ambient-Water Flooding (주변해수를 이용한 세척) • Ambient-Water/Low & High Pressure Washing (주변해수를 이용한 저압세척) • Warm-Water/ Moderate-to-High Pressure Washing (온수를 이용한 고압세척) • Hot-Water/High-Pressure Washing (열수를 이용한 고압세척) • Vacuum (진공수거) • Sediment Reworking (오염퇴적물 이동) • Sediment Removal, Cleaning, and Replacement (세척 후 연외지) • Chemical Oxidation/Stabilization/Chemical Protection/Cleaning of Beaches (화학약품 이용한 연외지/해안보호/세척) • In Situ Burning of Shallow (연장연소) • Nutrient Enhancement (영양물질 투입) • Microbial Addition (유리생물에 미생물 투입)

유류오염지역의 정화기술 현황을 Table 3에 소개하였다. 세척과 미생물정화 및 자연정화 등 유사한 토양 오염지역 치유 기술이 해안지역에도 적용되고 있음을 보여주고 있다. 해안의 유류 오염 방제의 경우 초기에 유출된 유류의 직접적인 제거를 위하여 수작업이나 흡착포 등을 통하여 현장에서 인력으로 직접 유류를 제거하거나 세척 및 진공 수거 장비 등을 이용하여 유류를 제거하는 원위치 혹은 현장처리 방법이 주로 사용되고 있다. 경작(tilling)이나 혼합(mixing)은 토양경작과 유사한 방법이고, 오염퇴적물을 파도와 같이 물리적 기작이 큰 지역으로 이동하여 제거하는 오염퇴적물이동(sediment reworking)과 같은 현장처리법은 해안 생태계의 특성을 이용한 방법이라 할 수 있다.^{9,10)} 모래와 자갈의 혼합해안 지역에 있어서 퇴적물의 재배치에 의하여 유류 제거 속도를 증가시킬 수 있음이 관찰되어 파도에 영향을 받지 않는 조상대나 후미진 지역에 적용할 수 있는 방법으로 제안되고 있다.¹¹⁾ 하지만 이차적인 오염을 유발할 수 있으므로 주의하여 적용되어야 한다.

유류오염지역 복원을 위한 자연정화는 주로 광분해와 토착 미생물에 의한 생분해 등의 유류 분해 작용들과 휘발에 의한 대기로의 이동 및 조류의 활동으로 인한 자연적인 세척으로 다시 바다로 이동하는 기작으로 이루어진다. 따라서 이러한 자연정화 기작이 잘 일어나지 않는 후미진 지역이나 자갈 틈새와 같은 곳에 스며든 유류는 다른 정화기술을 적용하지 않으면 상당히 오랜 기간 잔류할 수 있다.¹²⁾ 생물학적 치유는 오염물질의 자연감소를 촉진시키기 위하여 살아있는 생물 특히 미생물을 사용하여 독성화합물과 다른 유해 폐기물에 의해 발생하는 환경적으로 위해한 물질을 감소시키거나 제거시켜 생태적인 영향을 최소화하는 방법이다. 생물정화법은 유류의 자연분해를 촉진하는 방법이므로 공법의 적용과정에 발생할 수 있는 환경영향이 적으며, 타 공법보다 비용적으로 유리한 방법

이다. 회수한 유류의 소각처리가 톤당 300~400\$의 소각비용 외에 운송비용을 추가하면 1000\$까지 들 수 있으나 생물정화법은 소각비용의 1/10 정도의 비용으로 처리가 가능하다고 알려져 있다.¹³⁾ 생물정화 기술에는 기본적인 두 가지 접근방법이 있는데 첫 번째 접근방법은 오염 지역에 이미 존재하는 토착미생물의 대사능력을 증가시키기 위하여 적합한 환경조건을 공급해주는 biostimulation으로 주로 오염물질 분해에 필요한 무기 영양물질이나, 분해과정 중에 부족하기 쉬운 산소의 공급 또는 pH, 염분농도와 수분 조절 등을 통하여 미생물의 활동에 적합한 환경을 만들어 주는 것이다. 두 번째 접근 방법인 bioaugmentation은 토착미생물 대신에 유류분해가 입증된 세균제제를 유류오염지역에 접종하여 오염물질의 분해를 촉진하는 것으로 일반적으로 해당지역에 서식하는 미생물의 유류분해 능력이 낮아 단 시간 내에 효과를 얻을 수 없을 때 적용하는 방법이다.¹⁴⁾ 하지만 현장적용에서의 bioaugmentation은 그다지 큰 효과가 없다는 연구결과가 주로 발표되고 있는데, Exxon Valdez호의 유류유출 지역인 Alaska의 Prince William 만에서의 예를 들 수가 있다. 실험을 통해 효능이 입증된 두 개의 미생물제제를 사용하여 유류오염사고가 발생한지 1.5년이 경과 후에 27일 동안 4개의 현장 구획에서 정화를 시도하였지만 정화 효과는 미미하게 나타났다.¹³⁾ 반면에 미생물 대신에 무기영양물질을 공급하는 biostimulation의 경우 미생물의 활성도가 증가되거나 분해 증진효과가 있음을 보여주는 연구들이 보고되고 있다.^{15~17)} Exxon Valdez 유출지역의 경우 친유성 비료의 사용으로 처리 열흘 만에 기름으로 뒤덮인 해안가의 바위의 기름이 상당량 제거된 상태로 복구된 결과를 보여주었다.¹⁸⁾ Exxon Valdez 유출 지역의 Biostimulation에 의한 유류분해능 증가에 대한 유사한 예로 비료의 적용으로 유류의 생물학적 분해속도가 5 배 정도 향상되고 적용하지 않은 해안에서의 잔존유류의

농도에 비해 약 3~4배 낮았다는 보고도 있다.¹³⁾ 이러한 결과들은 대상지역에 영양물질이 유류분해의 속도를 제한하는 요소였음을 보여주어 이러한 지역에 있어서는 비료의 공급이 유용한 생분해 전략이 될 수 있다는 것을 시사한다. 하지만 반대로 기존에 영양물질이 충분히 공급되고 있는 지역에 있어서는 영양물질의 공급이 유류분해의 촉진에 큰 효과가 없을 수 있으며 오히려 적조와 같은 부작용을 일으킬 수도 있음을 시사한다. 따라서 생물학적 복원을 적용하기 위하여 저질이나 수질조사와 더불어 유류분해 미생물의 농도 등 오염지역의 특성 조사가 선행되어야 하며, 적용 또한 신중해야 함을 알 수 있다.

유류오염지역의 생물학적 정화는 직접적인 유류의 분해와 더불어 적용 이후 타 기술의 도입을 용이하게 할 수도 있다. 2002년도에 발생한 스페인의 *Presige* 유류 유출 지역의 자갈층에 친유성 무기영양제제를 적용한 후 알칸 및 방향족 화합물의 30% 이상을 감소시켰을 뿐 아니라 퇴적물에 부착된 유류의 점도를 감소시킴으로써 오염된 자갈 지역을 완전하게 정화하기 위한 이차적인 세척을 가능하게 하였다.¹⁹⁾ 이러한 연구들은 생물학적 정화와 타 자연정화 기작을 순차적으로 이용하거나 병행하여 적용하는 방법이 해안유류 오염지역에서 유용한 치유 방법이 될 수 있음을 보여준다. 식물정화법은 유류 분해에 있어서 효과적인 방법으로 관심을 끌고 있다. 식물정화가 관심을 끄는 이유는 복원이 어려운 염습지에 적용이 가능하다는 것이다. 이러한 식물정화법의 적용에 있어서 단순히 식물을 식재하는 것 외에 영양물질을 동시에 공급하여 식물의 성장 및 미생물의 활성을 증진시켜 유류분해에 기여하는 방법들이 제안되고 있다. 사초과 식물인 *Spartina. alterniflora*와 영양물질을 주입한 습지에서 지방족 및 방향족 물질의 분해가 증진되었음을 보고된 바 있다.²⁰⁾

5. 유류오염지역의 생태복원 전략

유류오염지역의 복원전략은 생태계의 기능에 영향을 주지 않는 농도수준으로 오염물질이 제거되며 아울러 생태계의 기능을 정상적으로 수행할 수 있는 생물군집의 회복을 요구한다. 아울러 우리나라의 경우 연안의 경제적 이용도가 매우 높아 이곳에서 생산되는 수산물이나 이용하는 이용객들의 안전성의 확보가 함께 이루어 져야한다(Fig. 4).

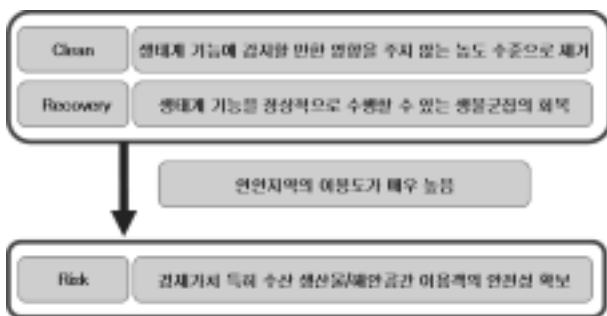


Fig. 4. 연안지역의 생태복원의 목표.

여기서 생태계의 회복(Recovery)은 단지 생물개체 또는 개체군의 구조의 회복과 더불어 생태계의 기능의 관점에서 판단되어야 하며, 안전성 확보를 위해서는 농도의 감소와 더불어 오염지역의 복원기간 동안의 이용규제 및 생산물 규제가 고려되어야 한다.⁴⁾ 따라서 연안지역 특히 연안생태계의 이용이 큰 우리나라의 생태복원은 3S(Soft, Satisfactory, Safe)의 원칙이 적용 되어져야 한다. 우선 가능한 Soft한 접근이 이루어져야 한다.²¹⁾ 무리한 유류제거 노력이 생태계의 회복을 더디게 한 경우들을 과거의 교훈으로부터 찾아볼 수 있다. 우리나라 서해는 활발한 조류활동으로 자연적인 정화능이 높은 지역으로 이를 충분히 고려한다면 soft한 복원방법의 적용이 가능할 것이다. 둘째는 그 결과가 만족스러워야 한다는 것이다(Satisfactory). 방치하는 것이 아니라 충분히 생태계의 회복이 있도록 도움을 주어야 한다. 셋째로 그 결과로 이용되는 수산물이나 해안이 안전해야 한다는 것이다(Safe). 이를 위하여 적절한 모니터링이 수반되어야 하며, 복원의 평가기법의 개발도 필요하다. 생태복원에 있어서 고려되어야 할 중요한 요소 중 하나가 시간이다. 다소간의 차이는 있지만 시간이 필요하다는 것이 분명하며, 복원에 소요되는 시간을 인정하여야 한다. 하지만 단순히 오염초기의 유류제거율만을 이용하여 복원기간을 예측하는 것은 매우 부정확한 방법이다. 분해가 상대적으로 용이한 성분의 분해 및 휘발 이후에는 분해가 느리게 일어나기 때문이다. Exxon Valdez 사건 이후 계속해서 예상보다 높은 농도가 지속되고 있다는 연구 결과들이 그 예다.^{22,23)} 유출이후 1992년까지는 연 68%의 제거율로 예측되었으나 그 이후 2001년까지 모니터링 결과로는 4% 미만의 제거율을 보여주었다.²⁴⁾

복원에 상당한 시간이 소요될 수 있다는 사실은 차별화된 복원방법의 적용을 고려하도록 한다. 모든 연안생태계가 동일한 시간을 요구하거나 민감한 것은 아니므로 차별적인 치유방법을 적용함으로써 이러한 복원 시간을 줄일 수 있다. 인공해안이나 수산물의 생산기능이 적은 해수욕장의 경우 전략적으로는 부분적인 인위적 정화방법의 도입을 고려하는 것도 필요하다. 또한 민감한 지역인 경우라도 오염범위가 넓다면 부분적으로 집약적인 치유 방법의 적용은 고려될 수 있다. 해당지역의 생태특성을 충분히 고려하여 자연정화 및 인위적인 정화법의 복합 정화 방식의 도입이 필요할 수도 있을 것이다.

연안지역에서의 생태복원에 고려하여야 할 중요한 요인은 바로 지역 주민들이다.²⁵⁾ 주민들은 이미 연안 생태계의 일부로 오랜 기간 동안 그들의 활동은 해당 지역의 생태계를 유지하는 구성요소가 되어있다. 갯벌에서의 수산물의 생산은 바다로 유입된 영양물질을 다시 육지로 되돌리는 역할을 하며, 바지락이나 낙지와 같은 수산물을 채취하는 일들은 갯벌 생물의 활동과 더불어 정화기작에 도움을 줄 수 있다. 다음의 Fig. 5는 유류오염 지역의 생태복원 절차를 제안한 것이다. 지역 주민들이 생태복원에 어떻게 참여할 수 있는지를 잘 보여주고 있다. 특별한 환경기준이 없는 현



Fig. 5. 유류오염지역의 생태복원의 절차.



Fig. 6. 유류오염 생태복원 기술의 예.

재의 상황에서 연안생태계의 복원목표 즉 복원기준을 설정하는 데에도 전문가와 더불어 복원 지역을 이용할 주민의 의견 수렴은 중요하다. 복원방법의 결정에도 해당 지역을 잘 알고 적극적 협력이 가능한 주민의 의견이 충분히 반영되어 복원방법이 결정되는 것이 바람직하며, 복원시행 및 모니터링에 있어서도 주민들의 참여는 바람직하다고 할 수 있다.

주민참여와 함께 복원기술의 선정에 반드시 고려해야 할 것은 생태계의 자가복원력 향상을 고려하여 확실적인 복원방법의 적용이 아닌 경관 유형에 따라 해당지역의 자연치유능력을 극대화 하는 방법을 선정하여야 한다. 아울러 복원기술의 선정에는 3R(Reduction, Reuse, Restoration)의 원칙이 필요하다. 이 중 Reduction은 복원기술의 적용으로 인하여 유류의 제거와 위해도의 실질적인 감소를 수반하여야 하며, Reuse는 복원기술 적용 중에 발생할 수 있는 폐기물의 양을 최소화하며 가능한 재활용할 수 있어야 한다. 끝으로 Restoration은 유류 제거시에 생태계의 피해를 최소화 할 수 있으며 궁극적으로 오염물질의 제거 후 생태계의 기능 및 구조의 복원이 가능한 방법이어야 한다.

Fig. 6은 3R을 고려한 유류오염지역의 생태복원 기술의 예를 보여준다. 천연흡착제를 이용하여 유류를 흡착하여 오염지역에서 일차적으로 고농도의 유류를 제거하며, 천연흡착제에서 제공되는 영양물질을 이용하여 토착미생물의 정화능력을 증진시켜 오염물질을 이차적으로 제거하여 유류오염지역의 생태복원을 가능하게 한다. 유류를 흡착한 천연흡착제는 고체연료화 등으로 자원화하여 재활용하여 폐기물의 발생을 최소화하는 기술이다. 천연흡착제나 미생물의 변화양상으로 복원효과를 모니터링 할 수 있는 기술도 함께 적용할 수 있다.

6. 결론

육상과 해양의 전이지대인 연안지역은 육상과는 달리 생태적으로 민감한 지역으로 육상지역 유류 오염 치유 방법

과는 다른 접근이 필요하다. 기존의 유류정화 과정과 같이 단순히 오염물질의 제거에만 중점을 두는 것이 아니라 오염물질의 제거 과정에서 생태계에 미치는 영향을 충분히 고려하여 치유 방법이 선정되어야 하며, 각 생태계의 민감도와 이후의 생태계의 회복 즉 생물개체 또는 개체군의 구조의 회복과 더불어 생태계의 기능의 회복을 우선적으로 고려되어야 한다. 우리나라의 경우 유류로 오염된 연안생태계의 복원에 대한 기준이나 절차 및 방법에 대한 구체적인 방안이 마련되어 있지 않으며, 외국에서 사용되고 있는 방법들을 그대로 수용하고 있는 실정이다. 우리나라의 경우 외국의 해안과는 달리 집약적으로 수산물의 생산에 이용되고 있는 지역으로 안전성이 확보가 우선적으로 고려되어야 하므로 우리나라의 연안특성과 이용특성을 고려한 복원방법의 개발이 시급한 편이다. 아울러 이미 연안 생태계의 일부가 되어 해당 지역의 생태계를 유지하는 구성요소가 되어버린 지역주민들의 생태복원과정의 참여는 매우 바람직하다.

연안지역 특히 연안생태계의 이용이 큰 우리나라의 생태복원은 3S(Soft, Satisfactory, Safe)의 원칙이 적용 되어져야 하며, 생태복원 기술의 개발에는 3R(Reduction, Reuse, Restoration)의 방안이 고려되는 것이 바람직하다. 하지만 이러한 복원전략이나 기술의 개발과 함께 해안특성 및 연안 이용 목적에 따른 정화목표와 복원기준 마련 또한 시급하다. 유류오염이 발생되면 유출된 유류의 양과 물리화학적 특성과 더불어 오염지역의 특성 및 향후 연안이용도에 따라 복원목표가 설정되어야 하는데, 복원목표를 설정함에 있어서 오염지역의 위해성 평가와 참고지역의 특성이 충분히 고려되어야 한다. 이후 연안 이용이나 복원 목적에 따라 차별화된 기술 적용이 필요하다. 조류와 기상조건이나 연안 특성이 다른 외국의 복원 예들을 그대로 따라하는 것보다는 우리연안에 맞는 기술들을 개발하여야 하며, 이를 위한 현장실험이 시급하다.

자연은 스스로 회복하는 놀라운 능력을 가지고 있다. 우리는 그 회복과정을 도울 수 있다. 외과적인 수술로 오염

된 부분을 제거할 수도, 한방적인 치료로 생태계의 자가 복원력을 향상시킬 수도 있다. 오염된 생태계를 잘 이해하여 효과적이며 생태적으로 건전한 방법을 선택하는 것이 중요하다. 생태계의 복원에는 어느 접근 방법이든 시간이 필요하다. 따라서 자연의 회복이 느리다고 조급해하기 보다는 복원에 소요되는 시간을 인정하고 잘 회복되고 있는지를 정확히 진단할 모니터링 방안과 복원평가 방법의 개발 또한 필요하다. 정확한 진단과 평가를 수행하기 위하여 참고할 건강한 생태계의 보전 또한 병행되어야 할 것이다. 질병도 오염도 예방이 최선이다. 그렇다고 이미 병에 걸렸다고 낙심할 필요는 없다. 회복하도록 치료할 방법이 있다면 희망은 있기 때문이다. 아픈 생태계를 이해하고 치료할 수 있는 방법을 찾아 자연의 회복과정을 돕는 것이 바로 생태공학의 한부분인 생태복원이기 때문이다.

참고문헌

1. 목용욱, 박용욱, 유류오염사고 대비 해안방재체제 구축방안, 한국해양수산개발원(2001).
2. National Oceanic & Atmospheric Administration, Shoreline countermeasures manual(1992).
3. Cormack, D., Response to marine oil pollution-review and assessment, Kluwer Academic Publishers(1999).
4. Kingston, P. F., "Long-term environmental impact of oil spills," *Spill Science & Technology Bulletin*, 7(1-2), 53~61(2002).
5. Spies, R. B., Long-term ecological change in the Northern gulf of Alaska, Elsevier(2007).
6. 고찰환, 한국의 갯벌, 서울대학교 출판부(2001).
7. 홍재상, 한국의 갯벌, 대원사(1998).
8. 성기준, 유류오염 생태복원기술 현황과 발전방향, 태안 해양오염실태분석 및 대책토론회, 지역환경기술개발센터연합회(2008).
9. Sergy, G. A., Guenette, C. C., Owens, E. H., Prince, R. C., Lee, K., "In-site treatment of oiled sediment shorelines," *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(3), 237~244(2003).
10. Owens, E. H., Sergy, G. A., Guenette, C. C., Prince, R. C., Lee, K., "The reduction of stranded oil by in situ shoreline treatment options," *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(3), 257~272(2003).
11. Ebuehi, O. A. T., Abibo, I. B., Shekwolo, P. D., Sigismund, K. I., Adoki, A., Okoro, I. C., "Remediation of crude oil contaminated soil by enhanced natural attenuation technique," *J. Appl. Sci. Environ. Mgt.*, 9(1), 103~106(2005).
12. Irvine, G. V., Mann, D. H., Short, J. W., "Persistence of 10-year old Exxon Valdez oil on gulf of Alaska beaches: the importance of boulder-armoring," *Mar. Pollut. Bull.*, 52, 1011~1022(2006).
13. Atlas, R. M., "Bioremediation of petroleum pollutants," *International Biodeterioration & Biodegradation*, 317~327(1995).
14. Venosa, A. D. and Zhu, X., "Biodegradation of crude oil contamination marine shorelines and freshwater wetlands," *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(2), 162~178(2003).
15. Maki, H., Hirayama, N., Hiwatari, T., Kohata, K., Uchiyama, H., Watanabe, M., Yamasaki, F., Furuki, M., "Crude oil bioremediation field experiment in the sea of Japan," *Mar. Pollut. Bull.*, 47, 74~77(2003).
16. Venosa, A. D., Suidan, M. T., Wrenn, M. T., Strohmeier, K. L., Haines, J. R., Eberhart, B. L., King, D., Holder, E., "Bioremediation of an experimental oil spill on the shoreline of Delaware bay," *Environ. Sci. Technol.*, 30, 1764~1775(1996).
17. Lindstrom, J. E., Prince, R. C., Clark, J. C., Grossman, M. J., Yeager, Th. R., Braddock, J. F., Brown, E. J., "Microbial population and hydrocarbon biodegradation potentials in fertilized shoreline sediments affected by the T/V Exxon Valdez oil spill," *Appl. Environ. Microbiol.*, 57(9), 2514~2522(1991).
18. Pritchard, P. H., and Costa, C. F., "EPA's Alaska oil spill bioremediation project," *Environ. Sci. & Technol.*, 25(3), 372~379(1991).
19. Gallego, J. R., Fernandez, J. R., Diez-Sanz, F., Ordonez, S., Sastre, H., Gonzalez-Rojas, E., Pelaez, A. I., Canchez, J., "Bioremediation for shoreline cleanup: in site vs. on-site treatments," *Environ. Eng. Sci.*, 24(4), 493~504(2007).
20. Mendelsohn I. and Lin, Q., Development of bioremediation for oil spill cleanup in coastal wetlands, U.S. Department of Interior. MMS 2002~048(2002).
21. National Oceanic & Atmospheric Administration, "How to clean a beach," *Nature*, 422(3), 464~466(2003).
22. Carls, M. G., Babcock, M. M., Harris, P. M., Irvine, G. V., Cusick, J. A., Rice, S. D., "Persistence of oiling in mussel beds after the Exxon Valdez oil spill," *Mar. Environ. Res.*, 51, 167~190(2001).
23. Short, J. W., Lindeberg, M. R., Harris, P. M., Maselko, J. M., Pella J. J., Rice, S. D., "Estimate of oil persisting on the beaches of Prince William Sound 12 years after Exxon Valdez oil spill," *Environ. Sci. Technol.*, 38, 19~25(2004).
24. Short, J. W., Irvine, G. A., Mann, D. H., Maselko J. M., Pella, J. J., Payne, J. R., Driskell, W. B., Rice, S. D., "Slightly weathered Exxon Valdez oil persists in Gulf of Alaska beach sediments after 16 years," *Environ. Sci. Technol.*, 41, 1245~1250(2007).
25. 이석모, 주민참여형 복원사업 추진방안, 태안 해양오염실태분석 및 대책토론회, 지역환경기술개발센터연합회(2008).