

준설토를 활용한 해양환경 복원기술

Restoration of Coastal Environments Using Dredged Materials

조흥연¹, 윤길림¹

Hong Yeon Cho¹, and Gil Lim Yoon¹

1. 서 론

해양환경 복원은 개발로 인하여 훼손된 해양의 환경을 개발이전의 상태로 되돌리는 것을 의미하기 때문에 실질적으로 불가능하다. 연안에서의 개발이 중지되지 않는 한 해양환경의 완벽한 복원은 불가능하고, 또한 개발사업의 전면적인 중지도 실질적으로 불가능한 실정이다.

따라서, 해양환경의 복원사업은 최근 중요한 사안으로 대두되고 있는 ESSD (환경적으로 건전하고 지속가능한 개발) 개념에 근거하여 수행되어야 하며, 개발로 인하여 불가피하게 훼손되는 또는 훼손이 예상되는 해양환경의 영향범위를 최소화하거나 훼손된 해양환경에 상응하는 새로운 해양환경 창조(조성)에 중점을 두고 추진되어야 한다.

본 연구는 해양환경 복원사업 추진에 준설토를 이용하는 기술에 중점을 두어 수행되었다. 우선, 외해투기 및 매립에 의존하는 다량의 항만 준설토를 다방면으로 재활용하는 선진외국의 사례를 파악·분석하였다. 또한, 해양환경 복원사업의 일환으로 추진되는 서식지 조성 측면에서 우리나라의 특성에 적합한 준설토 재활용 기술 및 적용가능성에 대한 검토를 수행하였다.

2. 준설토 재활용

항만공사를 포함한 연안개발사업에서 발생하는 다량의 준설토는 대부분의 경우 매립지 조성에 이용되고 있으며, 항로유지준설 및 오염된 항만(해역)의 환경개선사업에서 발생하는 준설토는 외해투기 등으로 버려지고 있다.

그러나, 선진국에서는 준설토도 자원이라는 시

각을 가지고, 항만에서 정기적 또는 일시적으로 발생하는 준설토에 대하여 검사·처리를 하여 재활용방안을 다각적으로 모색하고 있다. 준설토의 이용(beneficial use)은 준설토의 오염도평가(contamination level)와 준설토사의 특성분석에 따라 체계적으로 처리 및 재활용 여부를 구분하고 있다(PIANC, 1992)

일반적으로, 준설토의 성분에 따른 준설토 활용 방안은 공학적인 이용, 골재로의 이용, 환경개선측면에서의 이용 등으로 분류할 수 있다. 그러나, 최근에는 오염된 준설토를 직접적으로 처분하는 방법에 대응하여 오염 준설토를 유용한 준설토로 변환하는 기술(적정한 복원기술을 이용하여 오염도를 허용범위로 낮추는 기술)을 도입하여 재활용방안을 모색하는 방법도 추진되고 있다. 한편, 준설토의 사용기능에 근거한 재활용 영역은 크게 다음과 같이 분류할 수 있다(Palermo, 1986).

- ◎ 서식지(habitat) 개발 - 조류 및 다른 동물에 의한 이동경로 및 산란지를 포함한 습지, 대지, 섬 및 수중환경개발
- ◎ 양빈(beach nourishment) - 해수욕장 및 해안의 모래공급에 의한 환경개선, 특히, 침식해안의 경우 해안생태계 유지를 위한 차원에서 사업 수행
- ◎ 양식장 환경개선 - 다량의 유기물을 함유한 준설토를 영양분이 부족한 양식장의 양분 공급원으로 활용하여 생산성을 증진하거나, 양질의 준설토를 이용하여 저질의 오염된 양식장의 수질개선에도 사용(sand capping 등)
- ◎ 공원 및 위락시설 조성 - 축구장, 골프장, 산책로 등을 조성하기 위하여 사용

¹ 한국해양연구원, 연안항만공학연구본부 (Coastal & Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea)

- ㉠ 농경지, 산림 및 원예지 조성 - 유기물이 다량 함유된 준설토를 이용하여 식생지를 조성하면, 농경지, 산림 및 원예지의 생산성이 증가. 준설토 또는 준설토와 혼합한 혼합토를 표토(top soil)로 활용
- ㉡ 노천광산의 매립 및 고형물 관리 - 폐광의 매립재로 준설토를 활용
- ㉢ 해안선 안정화 및 침식제어 - 해안침식제어를 위하여 준설토를 활용. 수중 방파제(berm construction)를 조성하여 강한 파랑을 완하하여 해안선 침식을 저감.
- ㉣ 건설 및 산업분야의 활용(항만개발 및 공항, 도시 및 거주지 조성)
- ㉤ 재료전환(material transfer) - 매립재, 둑 및 도로, 주차장 조성에 활용
- ㉥ 다목적 이용 - 골재생산, 제설토, 매립재 등

3. 해양환경 복원기술

해양환경의 복원기술은 해양환경 창조기술, 해양환경 유지기술, 해양환경 복원기술로 구분할 수 있다.

(1) 해양환경의 창조(creation)·조성 기술

해양환경 복원사업에서 가장 적극적인 방식에 해당된다고 할 수 있으나, 민감한 생태계 및 자연환경, 준설토의 특성 등의 제약을 받을 수 있다. 그러나, 대부분의 국가가 경험한 개발단계에서 상실된 자연환경을 새로이 창조하여 복구하자는 개념, 즉 손실된 환경에 대한 보답개념은 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 구체적인 해양환경의 창조는 해양환경에 긍정적인 영향을 주는 모든 사업을 포함한다. 긍정적인 영향에 대해서는 보다 상세한 평가가 필요하겠지만, 일반적으로 동·식물의 서식지 조성이 대표적인 해양환경 복원(창조) 사업이다.

새로운 해양환경의 창조는 위치선정, 조성된 환경의 유지검토를 위한 해양환경 조사, 조성된 환경이 건전하게 유지되고 있는가를 검토하기 위한 사후 환경관리 모니터링이 매우 중요하다. 해양환경 창조사업도 기본적으로는 개발사업이므로 자연환경에 미치는 영향, 사회적인 영향 등을 고려한 환경영향평가를 수행하여야 한다.

(2) 건전한 해양환경의 유지관리 기술

해양환경의 건전한 유지관리는 새로운 해양환경의 창조보다는 수월하게 시작할 수 있는 장점이 있다. 해양환경의 창조가 무에서 유를 창조하는 사업이라면, 해양환경의 건전한 유지관리기술은 생태학적으로 가치가 높은 지역 또는 민감한 지역을 현명하게 보존·보호하는 기술이다(예, 영국 Norfolk, Blakeney Point : 물개서식지 보호를 위하여 접근을 관리; 영국 Northumberland & Dorset : 하구 생태계의 종합관리; Sutherland & Hill, 1995). 한편으로는 기술적인 측면보다 법적·제도적인 규제측면이 대부분을 차지한다고 볼 수 있다. 그러나, 주변환경의 변화에 의하여 직·간접적으로 영향을 받을 수도 있고, 장·단기적인 변화에도 영향을 받을 수 있기 때문에 이 지역의 환경보호를 위한 적절한 대책을 수립하여야 하는 상황이 발생할 수 있다. 이에 대한 적절한 대책을 수립하기 위해서는 해당 지역의 물리·화학·생물학적인 조사가 정기적으로 이루어져야 하며, 발생가능성이 큰 변화, 특히 환경에 악영향을 미칠 수 있는 변화에 대해서 신속하게 대처할 수 있는 방안을 수립하여야 할 것이다.

(3) 훼손된 해양환경의 복원기술

현재 가장 중요하고 시급한 상황이 오염으로 훼손된 해양환경을 복원하는 기술이다. 해양환경의 창조 및 환경적으로 건전한 해양환경의 보존에 비하여 구체적으로 계획이 수립·적용되고 있는 분야이다. 획기적인 계획이 제시되고 있으나, 일반적으로 해양환경 복원을 위하여 적용되는 사업은 오염부하량 저감을 위한 하수처리장 건설 사업과 오염된 저질제거를 위한 준설토사업이 대표적이다. 실질적으로 과도한 유역의 오염부하량 억제사업과 악화된 저질의 개선사업 없이는 오염된 해역의 환경복원은 기대할 수 없다. 그러나, 오염물질의 저감에 의한 수질환경의 개선이 직접적으로 오염이전의 해양환경으로 복원될 수는 없을 것이다. 따라서, 오염물질의 저감에 관한 연구와 병행하여 해양환경의 복원을 지원할 수 있는 사업을 추진하여야 할 것이다.

준설토를 이용한 해양환경 복원기술은 바로 이 부분이다. 즉, 해양생태환경의 복원을 위하여 구체적으로 인공적인 생태환경을 조성하여 자연적으로 성숙할 수 있는 조건을 만들어 주는 것이다. 해양환경창조와도 밀접한 관련이 있으나, 간단하게 분류하면 해양환경 창조는 소멸된 해양환경에 대한

새로운 적정 지점에 대한 보상측면이고, 해양환경 복원은 오염으로 훼손된 해양환경이 복원될 수 있도록 대상 지점에서 지원하는 것이다. 예를 들면, 간척 및 매립으로 인하여 소실된 습지, 갯 등을 적절한 대안지점에 인공적으로 조성하는 사업이 해양환경 창조사업이며, 유역의 오염부하 및 밀집된 양식장의 자가오염 등으로 오염된 해역의 해양환경 복원을 위하여 준설 및 하수처리장 건설사업을 수행하는 것과 병행하여 인공적인 생태환경을 소규모로 조성하는 것이 해양환경 복원사업이다. 대표적인 해양환경 복원사업은 해역으로 유입되는 하천 하구부에 적절한 식생 또는 서식지를 조성하여 조류 및 어류의 서식지·산란지로 제공하는 사업, 다량의 영양염이 함유된 준설토를 이용하여 해역의 생산성을 증진하는 사업, 해안가에 식생을 조성하는 사업, 수중에 수초 등을 이식하여 어류, 패류 등의 서식지를 조성하는 사업 등이 해당된다.

현재 선진국에서는 해양환경 복원의 관점에서 서식처 개발 및 적용에 관한 연구를 활발하게 수행하고 있다. 따라서, 준설토 재활용 연구는 서식처 개발에 적합한가? 적합하지 않은 경우, 적합한 준설토로 개량하면 적합한 재료로 만들 수 있는가? 준설토가 서식처 개발에 적절한 것인가를 판단하는 항목은 무엇인가? 조성된 환경하에서 소실되지 않고 유지할 수 있는가? 준설토를 이용하여 서식지를 조성하면 주변 환경에 미치는 생태학적인 영향은 무엇인가? 등에 관한 연구도 서식지 조성 - 해양환경 복원 사업과 밀접하게 관련되어 추진되고 있다.

4. 연안서식지 조성기술

준설토를 이용한 해양환경의 복원기술은 생물학적인 서식지 조성에 중점을 두어 추진되고 있다. 그러나, 조성된 서식지가 열악한 해양환경에서 유지될 수 있는가에 대한 검토 및 인근 지역에 미치는 영향에 대한 연구도 중요한 부분을 차지하고 있다. 일반적인 준설토 활용기술은 오염도가 허용범위인 경우에는 준설토사의 입경에 따라 개략적인 활용방안이 제시되어 있다. 특히, 해양환경복원의 측면에서는 습지조성(wetland creation), 토지(대지) 서식지 조성(upland habitat), 어업증진(fishery improvement)으로의 활용 등으로 이용되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 해양환경 복원기술 측면에서

분야별 고려사항 및 관련사항을 파악하여야 한다.

(1) 서식지 개발

서식지 개발은 비교적 지속적이고 생물학적으로 생산성이 있는 동·식물의 서식지 조성 및 관리에 해당된다. 따라서, 준설토를 이용한 서식지 개발은 보다 유용하고 수월한 준설토 처리방법으로서 매우 매력적이며 실현가능한 대안으로 인식되는 처리(처분)기술을 제공한다고 할 수 있다. 처리과정 및 지점에서의 다양한 서식지 개발 대안 및 적용성에 대한 내용을 뚜렷한 생물학적 군집이 다양하게 나타날 수 있는 서식지 형태에 대하여 검토하였다. 일반적으로 준설토를 활용하여 조성이 적합한 서식지 형태는 습지(wetland), 육상 또는 대지(upland), 수중(aquatic), 섬(island)으로 구분할 수 있다.

습지로 형성되는 서식지는 축축한 토양에서 생존하는 식생(vegetation) 및 주기적으로 범람하는 군집을 포함하는 매우 광범위한 영역을 포함하고 있다. 대표적인 습지 서식지는 조석의 유출입에 의하여 형성되는 염수 및 담수 습지(tidal freshwater and saltwater marshes), 비교적 장기간 침수되어있는 담수습지(freshwater marshes & swamps), 물가 및 호수 서식지, 저지대 관목(bottomland hardwoods) 등이 해당된다.

육상에 형성되는 서식지인 육상서식지(upland habitat)는 보통 범람(inundation)과 무관한 식생에 의하여 특징지어지는 육상 군집의 매우 광범위한 영역이 해당된다. 보통 맨 땅(bare ground)에서 풍성한 산림(mature forest)까지를 포함한다. 반면 수중 서식지(aquatic habitat)는 육상서식지와 대비되는 것으로 물가에서 수중으로 일정 깊이까지 확장된 전형적인 수중의 서식처(submerged habitats)이다. 예를 들면, 조간대(tidal flats), 굴 양식장(oyster beds), seagrass meadows, fishing reefs, calm flats, 담수 수중식물 양식장(freshwater aquatic plant beds) 등이 포함된다.

섬 서식지(island habitats)는 물 또는 습지로 완전히 둘러 싸인 서식지로 특정한 목적 및 고립성(isolation)으로 구별되는 서식지이다. 고립성은 인간의 접근성을 제한하는 관계로 인간의 접근에 의하여 쉽게 침해를 받을 수 있는 조류 생태계의 형성에 큰 도움을 줄 수 있는 서식지이다(Sutherland & Hill, 1998; Gilbert & Anderson, 1998). 특히, 섬으로 형성되는 서식지는 인간 및 육상동물의 접근이 불

가능하기 때문에 조류의 산란지, 서식지 등으로 유용하게 이용될 수 있으며, 선진국에서도 섬 서식지의 형성에 많은 연구와 인공섬 조성사업을 추진하고 있다. 우리나라의 광범위한 습지 및 섬(을속도, 천수만 등) 등의 자연적인 철새 도래지 및 서식지 등은 인공적인 것은 아니지만 해양환경 복원을 위한 서식지 조성에 기본적인 지침을 제시해주는 표본이라고 할 수 있다.

(2) 서식지 개발의 조건

준설토의 재활용은 지반공학적, 화학적, 생물학적 특성 분석을 선행한 후, 분석된 준설토의 특성과 재활용 환경조건에 따라 모색하여야 한다. 준설토의 재활용을 위한 특성분석인자 및 준설토의 재활용 가능성은 토지(대지)환경, 습지환경, 수생환경의 측면에서 세분할 수 있다.

▣ 습지서식지

습지(wetland & marsh)가 대안으로 선택된 경우, 습지서식지를 개발하는 첫째 단계는 습지의 형태(wetland type)를 결정하는 것이다. 습지서식지의 형태를 결정하고 설계하는 과정에서 위치, 고도, 주변환경의 생성기원 및 형태, 규모 등에 대하여 구체적으로 상세하게 고려하여야 한다. 습지서식지의 개발에서 위치는 가장 중요한 인자이다. 낮은 에너지 영역이 습지서식지 개발에는 최적이며, 인근 항만에서 모래성분이 많은 준설토가 발생하는 경우에는 이상적이다. 이러한 조건을 벗어나는 경우에는 주의깊은 평가가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 주변의 환경오염, 수중 서식지 및 준설토의 운반거리 등도 중요한 인자이다. 고도는 습지서식지의 식생결정에 매우 중요한 인자이며, 침전 및 압밀(settlement & consolidation)에 의한 영향을 받는

다. 또한, 조성하고자 하는 습지서식지의 형태 및 규모는 비용, 준설토 처분장으로서의 효용성 및 자연환경에 부가되는 생물학적 영향 등에 대한 검토가 수행되어야 한다. 기본적인 검토가 서식지 건설이전에 수행하고, 적합한 경우에는 환경의 변화를 감시하면서 서식지를 개발·건설하고, 유지하여야 한다.

▣ 육상서식지

육상서식지가 대안으로 선택된 경우에는 위치와 관리에 대하여 설계과정에서 고려하여야 한다. 위치는 지역적으로 필요로 하는가? 어떤 종(species)을 고려하여 개발할 것인가? 제한인자는 무엇인가? 등을 감안하여 가능한 서식처와 규모를 결정하는 중요한 인자이다. 관리차원에서는 준설토를 이용하여 형성되는 서식지의 식생을 선택하는 문제와 향후 이용계획, 서식처 조성, 이용된 준설토의 처리문제 등을 지속적으로 고려하여야 한다.

▣ 섬 서식지

준설토를 이용하여 형성하는 섬 서식지는 고립성(isolation)의 특성으로 인하여 서식지 조성 때 매우 중요하고 빈번한 대안으로 제시되고 있다. 철새 및 바닷새 등의 산란지, 경유지 등으로 이용될 수 있으며, 적절한 식생 및 유기물이 함유된 준설토를 활용하면 자연스럽게 건전한 생태계를 유지할 수 있다. 섬 서식지도 대상 위치에 대하여 에너지, 준설토 운송거리 및 습지 및 수중서식지에 대한 검토사·검토가 수행되어야 하며 고립성에 대한 검토도 반드시 포함되어야 한다. 서식지의 형태는 조성될 지점에서의 해양환경에 대한 노출정도, 보호방법, 둑 조성, 의한 유실 보호 등을 고



그림 1. 준설토를 이용한 조류서식지 및 습지조성(Mobile Bay, Alabama, USA)



그림 2. 준설토를 이용한 인공섬 조성 (Florida, USA)

려하여야 한다. 또한, 준설토 발생량 및 투기양상을 고려하여 서식지의 규모를 고려하여야 한다.

■ 수중 서식지

수중서식지는 수중저서생물의 환경개선 측면에서 수행되고 있다. 따라서, 중금속 및 유해화학물질로 오염되어 있지 않으면서, 유기물이 풍부한 준설토를 이용하여 어장의 환경개선 목적으로 사용하여 생산성을 증대할 수 있다. 그러나, 수중서식지 조성에 대한 구체적인 공학적·환경적인 지침이 부족하기 때문에 다른 서식지 조성방법에 비하면 초보적인 단계에 있다.

(3) 선진국의 해양환경복원을 위한 사업

선진국에서는 해양환경 복원 사업의 측면에서 다양하게 준설토가 활용되고 있다. 준설토 활용여부에 관계없이 서식지 조성사업이 활발하게 추진되어 왔으며, 최근에는 준설토를 재활용하는 측면에서도 활발하게 수행되고 있다. 대표적인 서식지 조성사례를 살펴보면, 미국의 경우에는 습지 및 인공서식지 조성사업, 영국의 경우에도 다양한 서식환경의 조성사업이 추진되고 있다. 선진국의 준설토 재활용에 의한 다양한 사례 및 자연환경의 보호, 대표적인 복원사업 등은 다음과 같다.

- ◎ Florida(USA) - 인공섬 조성 (PIANC, 1992)
- ◎ Alabama(USA), Mobile Bay - 습지 및 인공서식지 조성 (PIANC, 1992)
- ◎ River Tees (UK) - 하천 하구에 조성한 조류 서식지 (PIANC, 1992)
- ◎ Thames Valley (UK) - 인공조성된 급경사제방 (조류 서식지) (Gilbert & Anderson, 1998)
- ◎ Venice Lagoon (Italy) - 인공 염습지(salt marshes) (Cecconi, 1997)
- ◎ Georgia, Altamaha River (USA) - Buttermink Sound 서식지 (US Army COE, 1987)
- ◎ South San Francisco Bay, California (USA) - Salt Pond 3 서식지 (US Army COE, 1987)
- ◎ Galveston Bay, Texas (USA) - Bolivar 반도 서식지 (US Army COE, 1987)
- ◎ Connecticut River, Connecticut (USA) - 조류, 사슴 및 작은 포유류를 위한 Nott Island 서식지 (US Army COE, 1987)
- ◎ Gaillard Island CDF, Alabama (USA) - 멸종위기에 처한 Pelican 둥지조성 (US Army COE, 1987)

- ◎ North Carolina (USA) - 조류 산란지 조성(섬 서식지) (US Army COE, 1987)
 - ◎ Hillsborough Bay, Florida (USA) - Sea-bird nesting 서식지 : Sunken Island (US Army COE, 1987)
- (주) * COE : Corps of Engineers

5. 결론 및 제언

준설토의 재활용 기술은 매우 다양하게 제시되어 있으며, 해양환경복원을 위한 서식지 조성이 매우 활발하게 추진되고 있다. 따라서, 우리나라의 경우도 보다 적극적인 준설토 재활용 방안에 대한 연구 및 적용사업을 추진하여야 할 것으로 사료된다. 특히, 해양환경 복원의 관점에서 준설토를 이용한 인공서식지 조성은 적용이 수월할 것으로 사료된다. 예를 들면, 청초호는 현재 환경개선을 위한 준설을 수행하고 있으며, 발생되는 준설토 또는 준설토와 일반토양과의 혼합토를 이용하여 청초호내에 소규모의 인공섬을 조성하고, 적절한 식생지를 조성하면 조류 서식지로 적절하게 이용될 수 있으리라 생각된다. 특히, 잔잔한 호수내에 조성되기 때문에 서식지 유실위험이 파랑조건이 혹독한 해양환경에 비하여 거의 없을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 국책과제인 “준설토 재활용 방안연구” 사업의 일환으로 2000년도에 추진되었으며, 연구가 가능하도록 연구비를 지원한 해양수산부에 감사드립니다.

참고문헌

- Amdur, J. and Jones, R., 1997. Issues and Conflict related to the Beneficial Reuse of Contaminated Dredged Material in California, USA. International Conf. on Contaminated Sediments, Rotterdam, The Netherlands.
- Bray, R.N., Bates, A.D. and Land, J.M., 1997. Dredging : A Handbook for Engineers, Second Edition, Chap. 5, Arnold : A member of the Hodder Headline Group.
- Cecconi, G., 1997. Beneficial Use of Dredged Material for Re-Creating Marshes in the Venice Lagoon,

- International Conf. on Contaminated Sediments, Rotterdam, The Netherlands.
- Frankel, E.G., 1987. Port Planning and Development, John & Wiley & Sons.
- Gilbert, O.L. and Anderson, P., 1998. Habitat Creation and Repair, Oxford Univ. Press
- Hakstege, A.L., Heynen, J.J.M, Eenhoorn, J.K. and Versteeg, H.P., 1997. Management of Contaminated Sediments within the Meuse River-System, International Conf. on Contaminated Sediments, Rotterdam, The Netherlands.
- Palermo, M.R., 1986. Dredged material disposal, Handbook of Coastal and Ocean Engineering (Edited by J.B. Herbich), Vol. 3. pp.393-464.
- PIANC, 1992, Beneficial Uses of Dredged Material, A Practical Guide, Report of PIANC Working Group 19, IADC.
- PIANC, 1996. Handling and treatment of contaminated dredged material from ports and inland waterways "CDM", Vol. 1, Report of Working Group 17
- Sutherland, W.J. and Hill, D.A., 1998. Managing Habitats for Conservation, Cambridge Univ. Press.
- US Army Corps of Engineers, 1987. Engineering and Design : Beneficial Uses of Dredged Material, Engineer Manual No. 1110-2-5026.
- US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1998. Dredged material screening tests for beneficial use stability, Technical Note DOER-C2.
- van Leeuwen, J.L.M., Pepels, A.H.M. and Zwakhals, J.W., 1997. The Production of Sand and Clay out of Contaminated Sediments, International Conf. on Contaminated Sediments, Rotterdam, The Netherlands.
- 磯部雅彦(編著), 1994. 海岸の環境創造 : ウォ-ター-フロント學入門, 朝倉書店.