준설토의 육상 유효활용을 위한 환경위해성평가 및 특성분석 기반 의사결정모델

Decision Making Framework for Beneficial use of Dredged Sediment in the Terrestrial Environment based on Environmental Risk Assessment and Sediment Characterization

김기범 · 남경필 · 강완협* · 최용주[†]

Kibeum Kim · Kyoungphile Nam · Wanhyup Kang* · Yongju Choi[†]

서울대학교 건설환경공학부 · *현대건설 연구개발본부

Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

*Research and Development Division, Hyundai Engineering and Construction

(Received February 10, 2018; Revised April 30, 2018; Accepted May 28, 2018)

Abstract : Dredged sediment is a valuable resource that can be beneficially used for various purposes. However, a massive amount is disposed in the ocean or confined disposal facilities annually due to the lack of a standardized decision-making process for dredged sediment use. In this study, we present a decision-making framework to determine the feasibility and purpose of the use of dredged sediment, and suitability of the purpose. The sediment usage is limited to the terrestrial environment in this study. The purpose of use is divided into two categories: ecological resource including wetland and habitat creation, soil amendment, agricultural soil, and engineering material including filling, land reclamation, and landfill cover. Total contaminant content, short- and long-term contaminant leaching characteristics, sediment physicochemical characteristics and engineering function, and ecotoxicological effects and dispersion characteristics of sediment-derived contaminants are selected as determinants for the decision-making. Requirements for the determinants are analyzed for each of the two categories of the purpose. Based on the analysis, the decision-making framework is developed to most reasonably assess the environmental and ecological impacts of the dredged sediment use and optimize the purpose.

Key Words : Decision Making Framework, Beneficial Use, Sediment, Environmental Risk Assessment, Characterization

요약 : 준설토는 다양한 용도로 유효활용 될 수 있는 가치 있는 자원임에도 불구하고 해마다 많은 양이 단순 투기 및 매립으로 처리되고 있다. 이러한 요인 중 하나로 준설토 유효활용과 관련한 일관된 의사결정 체계의 부족을 꼽을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위해서 준설토 유효활용 가능여부, 활용용도, 용도별 적합성 등을 결정하는 합리적인 의사결정 모델을 제시하고자 하였다. 본 연구의 준설토 유효활용 대상은 육상 재활용으로 한정하고, 유효활용의 용도를 크게 습지조성, 서식지 조성, 토양개량제, 농업용 토양 등 생태자원과 성토재, 복토재, 간척지 조성, 매립지 덮개 등 공학재료로 구분하였다. 각 용도에 따른 의사결정에 필요한 결정인자로 오염물질 전함량, 단기 및 장기용출특성, 이화학적 특성, 공학기능, 생태독성영향, 오염물질 확산특성 등을 제시하였다. 각 결정인자에 대한 분석을 통하여 평가단계를 가장 합리적인 순서로 배치함으로써 주변 환경 및 생태계 영향을 최소화하고 준설토의 가치를 최대한 활용할 수 있는 의사결정모델을 제시하였다.

주제어 : 의사결정모델, 유효활용, 준설토, 환경위해성평가, 특성분석

1. 서론

해상 항로 및 항만 개발, 유지, 관리 등의 목적으로 해마다 많은 양의 준설토가 발생하고 있다.^{1,2)} 기존에 널리 사용되고 있던 해양투기를 통한 준설토 처분 방법^{3,4)}은 런던 협약 '96의정서' 발효 이후 폐기물의 해양 배출 금지 및 제한으로 큰 제약이 따른다. 특히 우리나라와 같이 육상 매립 공간의 확보가 용이하지 않은 국가에서는 준설토 관리를 위한 적절한 대안이 필요하다. 우리나라는 2016년부터 육상 폐기물의 해양배출이 전면 금지되었지만 준설토의 경우 해양환경관리법의 폐기물 해양배출처리기준을 만족할 경우 해양배출이 허용되기도 한다.⁵⁾ 그러나 준설토 및 해양투기의 과정에서 준설토 이전의 퇴적토에 비하여 오염물질의 이동성 및 생물학적 이용성이 증가할 수 있으며, 이로 인해

오염물질의 생물축적이 증가할 가능성이 높다.³⁾ 해양투기 시 부유물질 및 탁도 발생 등으로 수질이 악화되어 해양환경 및 생태계에 악영향을 미칠 가능성도 크다.^{3,6)} 뿐만 아니라, 해양투기 기준을 만족하는 준설토라 할지라도 그 지속적인 유입은 기존 퇴적토의 오염물질 농도를 증가시킬 가능성이 있다. 이러한 이유로 해양투기를 통한 준설토 처분은 지양해야 할 필요가 있으며, 준설토 관리의 보다 근본적인 해결방법을 모색할 필요가 있다.

이에 대한 대안으로 유효활용을 통한 준설토 처리에 대한 관심이 증대되고 있다.^{7,8)} 유효활용을 통해 폐기물로 처분되는 준설토를 유용한 자원으로 활용하면서 매립지 부하량을 감소시킴으로써^{9,10)} 사회적, 경제적, 환경적 이익을 획득할 수 있다. 준설토의 유효활용 방법으로는 성토재, 복토재, 도로 기층재와 같은 건설재료⁸⁾ 등 공학적 기능을 가진

[†] Corresponding author E-mail: ychoi81@snu.ac.kr Tel: 02-880-7376 Fax: 02-873-2684

재료로 사용하는 것이 가장 보편적인 방법으로 알려져 있다. 그러나 생태 수용체가 서식할 수 있는 생태기능을 가진 생태자원¹¹⁾으로 유효활용하는 것 또한 가능하다.

준설토의 유효활용을 통하여 사회적, 경제적, 환경적 가치를 창출하고 유효활용 시 우려되는 환경영향을 예방하기 위하여서는 유효활용 각 단계별로 적절한 의사결정체계를 마련하는 것이 필요하다. 실제 채취가 이루어지는 준설토의 상당 부분은 오염되지 않고 깨끗한 상태인 경우가 많기 때문에^{7,8,12)} 별도의 오염저감 조치 없이 그 특성에 맞는 다양한 용도로 재활용하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 인간 활동의 작간접적인 영향을 받은 준설토의 일부는 여러 경로를 통해 총석유계탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbon, TPH), 다환상방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs), 폴리염화바이페닐(Polychlorinated Biphenyls, PCBs), 농약 등 유기오염물질 또는 As, Cd, Cu, Cr 등의 중금속을 포함한 무기오염물질 등 다양한 종류의 오염물질로 오염될 수 있다.⁸⁾ 따라서, 인간의 건강과 생태계의 안전을 고려한 준설토 유효활용을 위해서는 유효활용 전 오염물질에 대한 분석 및 평가가 반드시 요구되며 이를 바탕으로 필요 시 적절한 개선 및 정화가 이루어져야 한다. 뿐만 아니라, 준설토 자체가 가진 pH, 유기물함량, 염분, 영양분 등의 물리화학적 특성과 다짐강도, 전단강도, 압밀강도 등의 공학기능에 따라 유효활용 방안이 달라질 수 있기 때문에 이에 대한 다각적인 분석 및 평가 결과가 유효활용 의사결정에 반영되어야 한다. 이에 따라 우리나라를 포함한 여러 국가에서 준설토의 유효활용을 위한 관심 및 연구가 활발해지고 있다. 하지만, 준설토에 적용되는 일관된 법적·제도적 체계의 미비 등으로 준설토 유효활용 의사결정을 위한 적절한 가이드라인이 부재한 실정이다.^{7,13)} 특히, 우리나라는 경우에 따라 폐기물 또는 토양 등으로 다르게 취급되는 등 준설토의 법적·제도적 지위가 불분명함으로 인해 일관된 처리 및 유효활용 절차를 적용하지 못하고 있어 혼선을 빚고 있다. 일부 준설토를 폐기물로 취급함에 따른 사회의 부정적 시각, 유효활용 경험의 부족, 낮은 경제성 등으로 인해 준설토의 유효활용이 활발하게 이루어지지 못하고 있는 것 또한 문제이다. 이를 해결하기 위해서는 준설토의 유효활용을 고려한 의사결정모델이 개발되어야 하며, 해당 모델에 준설토 내 유해물질의 존재 및 주변환경 확산에 따른 환경위해성 평가방안 뿐만 아니라 해당 평가기준을 불만족할 경우에 대한 조치사항이 포함될 필요가 있다. 이러한 준설토 유효활용 모델 개발은 준설토의 환경매질로서의 안정성을 확보할 뿐만 아니라, 준설토의 특성을 고려한 최적의 유효활용을 가능케 하여 준설토 유효활용에 대한 사회적 우려를 불식시키고 자원순환의 효용을 극대화하는 데 기여할 수 있다.

본 논문에서는 하천, 호소 및 해양에서 발생하는 준설토 내 유해물질의 존재 특성 및 물리화학적 특성에 맞는 적절한 유효활용용도를 결정하고 유효활용 후 주변 환경 및 생태계에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 준설토에 대한

종합적 환경위해성평가 및 특성평가를 통한 준설토 유효활용방안 의사결정모델을 개발하고자 한다. 본 연구에서는 논의의 구체성과 개발된 모델의 적용성을 고려하여 유효활용의 용도를 육상 활용으로 한정하였다. 또한, 준설토를 가공하여 콘크리트, 벽돌 등 새로운 제품을 생산하는 유효활용 용도를 제외하였으며, 특정 부지에 대량으로 유효활용되어 부지특이적인 환경위해성평가가 요구되는 사례를 주요 대상으로 하였다. 본 연구에서 개발하는 의사결정모델의 적용은 국내에 국한되지 않으며, 각국의 법·제도 및 기준에 맞추어 활용할 수 있는 체계를 제시하는 데 초점을 맞추었다.

2. 준설토 국내 발생현황 및 국내외 준설토 관리 방법

Fig. 1에 따르면 2000년 이후로 해마다 평균 약 2천만 m³의¹⁴⁾ 준설토가 항만개발, 수심 유지관리 및 오염퇴적토 제거 등의 목적⁷⁾으로 발생하고 있다. 해양 환경 및 생태계 보호를 위하여 준설토의 해양배출이 제한됨에 따라 국내에서는 발생 준설토를 각 항구에 건설한 준설토 투기장에 처리하는 것이 가장 일반적이다. 하지만, 투기장 건설에 소요되는 막대한 예산과¹⁵⁾ 단순 투기 및 매립 공간의 한계로 매년 발생하는 준설토를 투기장에 처리하는 데에는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하는 지속가능한 방법으로 준설토의 유효활용이 반드시 필요하며, 효과적이고 안전한 준설토 유효활용을 위하여 적절한 기준과 처리방법이 필요하다. 국내의 경우, 오염하천 및 오염해양에서 채취한 준설토를 유효활용하고자 할 경우 폐기물관리법이, 오염 여부와 관련 없이 준설토를 육상에 토양 또는 그 일부로 유효활용하고자 할 경우 토양환경보전법이 적용되는 것으로 해석 가능하다. 폐기물로 분류되는 준설토는 2016년부터 시행된 재활용 환경성평가제도에 따라 유효활용 시 주변 환경에 미치는 영향을 평가하고 최소화하기 위한 조치를 시행할 수 있다.¹⁶⁾ 하지만, 준설토를 자원으로 유효활용 하는 것에 대한 인식 및 관심이 부족하며, 비오염/오염 준설토와 그 다

Fig. 1. Annual generation of marine dredged sediment in Korea (MOF, 2017).

양한 유효활용 용도를 포괄할 수 있는 일관된 제도 및 관리 방법이 마련되어 있지 않아 준설토 유효활용에 큰 제약 요인으로 작용한다.¹⁷⁾ 따라서, 준설토를 효율적으로 유효활용하기 위하여서는 그와 관련된 일관적인 기준 및 관리방안의 개발 및 개선이 필요하다.¹⁷⁾ 특히, 주변 환경에 미치는 영향을 최소화하고 특성을 고려한 용도결정을 통해 최적의 방안으로 준설토를 유효활용하기 위하여 종합적인 환경위해성평가 및 특성분석을 바탕으로 한 준설토 유효활용 의사결정방안이 수립될 필요가 있다.

미국과 유럽의 경우 우리나라에 비하여 다양한 방법으로 준설토가 유효활용 되고 있지만 우리나라와 마찬가지로 준설토에만 적용되는 독립된 법률 및 기준이 존재하지 않는다.^{13,18)} 미국의 경우 미국군공병단(US Army Corps of Engineers, USACE)에서 준설물질 처리 허가권을 발행하고, 미환경청(US Environmental Protection Agency, US EPA)으로부터 허가권에 대한 검토 및 동의를 얻어야 하며, 준설행위의 적합성에 대하여 준설물질이 처리되는 지역의 연방, 주, 지방청에서 검토와 허가를 받아야 한다.¹⁹⁾ 준설토 처리 및 관리에 적용되는 법률은 해양과 관련된 경우 1972년 제정된 Marine Protection, Research, and Sanctuaries Act (MPRSA)가 적용되고, 연안 및 육상수계 적용 시에는 Clean Water Act (CWA)가 적용되며, National Environmental Policy Act (NEPA)는 준설토 처리 및 관리와 관련한 연방정부의 행위에 대하여 주민의 요구를 반영한 환경성평가를 요구한다. 영국은 준설토 처리 및 유효활용을 Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science (CEFAS)에서 관장하고 있으며 준설토 유효활용을 위한 주요 법적규제는 환경적 허용규제(Environmental Permitting Regulations, 2010)를 적용하고 있지만 세부적인 준설토 유효활용용도에 대한 가이드라인은 제공하지 않는다. 준설토 육상 재활용 시 Contaminated Land: Applications in Real Environments (CL : AIRE) code of practice (2008)가 적용되며 준설토 처리 및 유효활용에 대한 가이드라인을 준비하고 있다. 네덜란드는 준설토를 폐기물로 분류하지만 폐기물에 적용되는 규제 중 일부는 제외되며 수질법령을 통해 관리한다. 독일은 국가적 차원에서 준설토 처리를 법제화 하지는 않았으나 준설토는 경우에 따라 수질, 토양, 폐기물법이 적용될 수 있으며 노르웨이와 프랑스는 OSPAR convention에서 정한 준설토 관리 가이드라인을 따르며 국가적으로 정한 관련 법규는 따로 존재하지 않는다.¹³⁾

3. 준설토 유효활용방법 및 국내외 준설토 유효활용비율

3.1. 준설토 유효활용방법

준설토는 건설재료, 서식지 조성, 농업용 토양 등 다양한 용도로 육상 환경에 유효활용 가능한 자원이다. 본 연구에서는 준설토의 육상 유효활용 용도를 크게 공학재료(Engi-

neering materials)와 생태자원(Ecological resources)으로 구분하였다. 생태자원은 생물이 서식할 수 있는 환경을 조성하거나 농작물을 경작하는 것을 수확할 수 있는 주요 또는 보조 목적으로 활용하는, 즉 준설토의 토양으로서의 생태기능을 활용하는 유효활용의 형태로 정의하였다. 준설토는 습지조성, 육상 및 수생태계를 위한 서식지 조성, 토양개량제, 농업용 토양 등으로 활용될 수 있다.^{8,20)} 공학재료는 준설토가 가지는 공학적 특성을 용도에 따라 적절하게 활용하되, 토양으로서의 생태기능을 직접적으로 활용하지는 않는 유효활용의 형태로 정의하였다. 이러한 활용방법으로는 성토재, 복토재, 간척지 조성, 도로기층재, 매립지 덮개 및 준설토 피복(Capping) 등을 들 수 있다.^{8,20)} 유효활용용도는 준설토 내 오염물질 농도 및 존재특성, 이화학적 특성, 공학기능 등의 결정인자들을 종합적으로 분석 및 평가하여 결정하여야 한다.^{17,21)}

3.2. 국내외 준설토 유효활용비율

국내에서 발생하는 준설토의 대부분은 투기장 투기 방법으로 처리되며 배후부지 매립 등 기타방법으로 활용되는 비율이 9.17%로 낮은 편이다.¹⁸⁾ 유효활용 시 적용되는 적절한 기준 및 가이드라인의 부재는 준설토 유효활용 비율 및 활용용도가 매우 제한적인 큰 원인이 되며³⁾ 준설토 유효활용에 대한 관심 및 인식 부족 또한 그 원인이 될 수 있다. 최근 국내에서도 준설토를 경량기포혼합토 및 지오투브 등 다양한 건설재료로 유효활용하려는 연구가 활발해지고 있으나^{22,23)} 보다 유효활용을 활성화, 다변화하기 위하여서는 국가적 차원의 법적·제도적 정비 및 연구개발 지원이 필요하다. 국외의 경우 국내에 비해 준설토 유효활용 비율이 높고 단순 건설재료 뿐만 아니라 생태자원을 포함한 다양한 용도로 유효활용되고 있다.³⁾ 일본의 경우 90%의 높은 비율로 준설토가 유효활용되고 있으며 공항조성 건설재료, 해안양빈, 토지조성 등^{18,24)}의 용도로 유효활용하거나 기존 오염된 갯벌을 제거하고 저서생태계가 서식할 수 있는 갯벌조성의 재료, 야생생물 서식지 조성 등의 목적으로 유효활용하고 있다.²⁵⁾ 스페인도 76%의 높은 비율로 건설재료 및 해빈양빈의 용도로 유효활용하고 있으며²⁶⁾ 미국의 경우 20% 이상의 준설토가 유효활용 되며 서식지 조성, 농업부지, 간척지 조성, 건설재료, 해수욕장 양빈 등 가장 다양한 용도로 유효활용한 사례가 있다.^{8,20)} 네덜란드는 23%의 준설토를 유효활용하며 그 중 15%를 육상에 매립지 기반조성, 도로건설, 댐건설 등의 건설재료 등의 용도로 활용한다.^{11,24)}

4. 준설토 유효활용 의사결정인자

준설토를 효과적이고 안전한 방법으로 육상에 유효활용하기 위한 의사결정에는 다양한 인자를 고려하여야 한다. 이러한 인자에는 준설토의 오염상태 및 유효활용 시 잠재적 위해요인뿐만 아니라 이화학적 특성 및 공학적 기능 등

Fig. 2. Categorization of the determinants for beneficial use of sediment as engineering material or ecological resource.

의 요소도 포함되어야 한다.⁷⁾ 생태자원과 공학재료의 두 유효활용도 그룹에 대하여 필요할 것으로 판단되는 유효활용 의사결정인자를 Fig. 2에 나타내었으며, 각 의사결정인자에 대하여 아래에 상세하게 기술하였다.

4.1. 오염물질 전함량

준설토 내 오염물질 전함량은 준설토 유효활용 가능여부, 정화수준 및 처분방안을 결정하는데 필요한 인자이다. 국가별, 시험방법별 및 유효활용 목적별로 적용되는 오염물질 전함량 허용농도 수준이 달라질 수 있다. 우리나라는 준설토를 해안, 인공섬, 어장, 항만시설 등에 활용하는 경우 해양환경관리법에 의거한 수저준설토사 유효활용기준이 적용되며, 육상에 토양 또는 그 일부로 활용하는 경우 토양환경보전법의 토양오염우려기준을 판단의 근거로 사용할 필요가 있다.¹⁶⁾ 우리나라를 포함한 여러 국가에서는 부지용도, 인간 활동의 빈도 등에 따라 토양오염의 기준을 달리 설정해 놓고 있고, 일부 국가에서는 준설토의 오염물질 함유농도에 따라 유효활용 용도 및 범위를 제한하고 있는 바,⁷⁾ 오염물질 전함량 농도는 유효활용 가능 여부 판단뿐만 아니라 세부적인 유효활용용도 결정 시에도 중요한 결정인자 중 하나로 작용한다고 볼 수 있다.

오염물질 전함량 분석은 고온, 고압, 강산, 유기용매 등을 이용하여 퇴적토 내에 존재하는 오염물질을 최대한 추출하여 분석하는 방법으로, 중금속에 대해서는 미국의 microwave digestion 법(US EPA 3051A),²⁷⁾ 우리나라 토양오염공정시험기준의 왕수추출법 등이 적용될 수 있다. 유기오염물질의 경우 US EPA 3540C²⁸⁾ 및 우리나라 토양오염공정시험기준의 Soxhlet 법 또는 그와 동등한 추출효율을 보이는 것으로 검증된 방법(ex: US EPA 3545A, pressurized fluid extraction)을 적용할 수 있다.

4.2. 오염물질 단기용출 특성

단기용출 평가는 준설토 내 오염물질의 용출로 인한 잠재

적 위해성을 평가하기 위해 수행된다.²⁹⁾ 단기용출평가는 측정방법이 간단하고 실험기간이 짧으며 저렴한 비용으로 오염물질의 이동성을 평가하여³⁰⁾ 인간, 동식물 및 주변 환경에 미치는 잠재적 위해성을 분석할 수 있다.³¹⁾ 단기용출평가에 사용되는 시험방법으로는 국내의 폐기물용출시험법과 US EPA의 TCLP (Toxicity Characteristics Leaching Procedure; US EPA, 1992)³²⁾ 및 SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure; US EPA, 1994)³³⁾ 시험법 등을 들 수 있다. 단기용출시험법은 폐기물의 잠재적 위해성 평가뿐만 아니라 폐기물 처리의 기준으로도 활용될 수 있다.²⁹⁾ 유효활용이 적용되는 국가의 법제도 및 유효활용방안에 따라 적합한 시험방법 및 기준이 달라질 수 있으며 해당 국가에 관련법규가 없는 경우 활용용도와 현장특성 등을 고려하여 적절한 시험방법 및 기준을 선택하여 단기용출평가를 수행한다.

4.3. 주상시험을 통한 오염물질 용출특성

주상시험을 통하여 단기용출시험에 비하여 보다 현장에 가까운 조건에서 유효활용된 준설토 함유물질의 장기 용출로 인한 주변 환경 및 생태계 영향을 평가할 수 있다.³¹⁾ ISO/TS 21268-3, CEN/TS 14405, DIN 19528 등에서 제시하는 주상시험³⁴⁾은 연속식 흐름으로 매체접촉형 산업부산물 재활용 및 준설토 유효활용을 통해 발생한 용출수 내 유기성 유해물질 및 중금속 등 무기성 유해물질을 정량화하여 오염물질의 용출이 주변 환경에 미치는 영향을 평가한다. 용출수의 pH, 염도, 탁도, COD, DOC 등 수질 측정³⁵⁾을 통해 특정 독성물질 이외의 오염요인들이 주변 환경에 미치는 영향도 함께 예측할 수 있다. 뿐만 아니라, 주상시험에서 발생된 용출수를 이용한 생태독성평가를 통해 용출수가 주변생태계에 미치는 독성영향을 보다 직접적으로 평가할 수 있다. 주상시험을 통해 얻은 용출시험의 고액비 별 오염물질 용출 결과는 세부적인 준설토 유효활용 용도결정 후 현장특성을 고려한 장기적인 오염물질 확산 예측 모델링평가^{36,37)}에 활용될 수 있다.

4.4. 이화학적 특성

이화학적 특성은 준설토의 세부적인 용도결정 시 결정적인 역할을 한다.^{13,20)} Table 1에 각 이화학적 특성인자와 각 인자가 반드시 고려되어야 하는 유효활용 유형을 나타내었

Table 1. Categorization of physicochemical properties based on purpose of beneficial use of sediment

Physicochemical properties	Subject of application
pH	EM ^{a)} /ER ^{b)}
Salinity	EM/ER
Particle size	EM/ER
Nutrients	ER
Organic matter (OM)	ER
Cation exchange capacity (CEC)	ER

^{a)}EM: Engineering material, ^{b)}ER: Ecological resource

다. pH는 공학재료와 생태자원 유효활용 유형 모두에 대하여 고려가 필요한 요소이다. 생태자원의 경우 생태계가 서식할 수 있는 환경을 제공하기 때문에 적정범위(e.g. 6.0-8.5)의 pH를 유지해야 하며 공학재료로 활용될 경우 적용되는 환경에 따라 빗물, 지하수 등이 준설토와 접촉하여 생성된 유출수의 pH가 주변 환경에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 유효활용 시 반드시 분석이 필요하다. 적정 pH 범위를 벗어나는 경우 슬래그, ash 등의 산업부산물³⁸⁾ 또는 석회 등의 중화제⁸⁾를 이용하여 pH를 개선할 수 있다. 준설토의 입자 크기 및 토성은 세부적인 유효활용 용도를 결정하는데 활용되는 인자이다. 입자크기는 투수성, 보수력, 공학기능 등에 영향을 미친다. 모래, 자갈과 같이 큰 입자의 비율이 높은 경우 보수력이 낮고 투수성이 높지만 하중을 지지하는 공학기능이 필요한 공학재료로서의 활용 가치가 높으며¹¹⁾ 점토 등 작은 입자 크기의 비율이 높은 경우 투수성이 낮아 매립지 라이너 및 차수재 등으로 유효활용 될 수 있다. 뿐만 아니라, 생태자원으로 유효활용 시 보수력, 투수성, 영양분 전달 능력 등이 요구되기 때문에 적절한 토성(soil texture)을 확보할 필요가 있다.³⁹⁾ 유효활용용도에 필요한 입자크기 비율이 부족한 경우 적절한 크기의 입자를 추가적으로 공급하여 개선 가능하다.⁸⁾

염분은 육상 생태수용체에 치명적인 생태독성영향을 미칠 수 있는 요소이다.^{8,11)} 특히, 준설토 내 염분농도가 매우 높은 경우(예: 해양 준설토) 육상 생태계가 서식할 수 있는 생태자원으로 활용하는 것은 부적절하므로 유효활용용도 결정 시 상당한 영향을 미친다. 뿐만 아니라, 공학재료로 활용 시에도 염분농도가 매우 높은 경우 주변 토양, 지표수, 지하수 등에 염분이 확산되어 피해를 끼칠 수 있으므로 육상 재활용 시 염분농도의 분석을 실시하고, 필요한 경우 저감 단계가 수행되어야 한다. 토양 내 염분을 측정하는 다양한 방법 중 전기전도도를 이용한 측정법이 간단하고 염분 측정 시 널리 사용되는 방법이다.⁴⁰⁾ 유효활용 시 염분농도를 본 논문에서는 식물의 서식 및 생육 여부에 따라 크게 세 단계로 구분하고자 한다. 첫 단계는 염분이 매우 높아 염분에 강한 식물도 자랄 수 없으며 공학재료로 사용 시에도 주변 환경에 악영향을 미칠 수 있는 단계이다. 이 단계는 준설토를 육상에 유효활용 할 경우 반드시 염분을 육상생물 생육 가능 또는 주변 환경에 영향을 미치지 않을 수 있는 수준까지 제거해야 한다. 하지만, 염분은 용해도가 높으며 물을 이용하여 비교적 쉽고 간단하게 제거 가능한 물질이다. 염분저감 방법으로는 물을 이용한 토양세척법이나^{41,42)} 야적한 준설토의 빗물을 이용한 자연세척^{8,11)} 등이 적용될 수 있다. 빗물을 이용한 염분 저감 시 효율을 높여주기 위해 투수성이 높은 굵은 입자를 혼합하거나 관개를 실시할 수 있다.¹¹⁾ 다른 대안으로 염분을 제거하지 않고 육상환경이 아닌 해안습지 및 갯벌조성 등 해양 환경 조성 용도로 준설토를 재활용하는 것도 적극적으로 고려할 필요가 있다.^{8,43)} 두 번째 단계는 염분에 강한 식물이 자랄 수 있거나 공학재료로 재활용 시 주변 환경에 영향을 크게 미치지 않는 수

준이다. 육상에 생태자원으로 유효활용 시 염분에 내성이 강한 식물 위주로 생육을 시작하며 준설토 내 잔류염분은 빗물을 통해 낮아질 가능성이 높으므로 추후 염분이 낮아졌을 때 다양한 종류의 식물을 재배할 수 있다. 마지막으로 염분에 대한 내성이 중간 또는 약한 정도의 식물이 생육할 수 있는 단계에서는 준설토 내 염분농도에 맞는 식물을 우선적으로 선정하여 재배할 수 있으며 추후 빗물로 염분농도가 낮아짐에 따라 염분농도와 관계없이 다양한 생물이 서식하는 환경을 조성할 수 있는 생태자원으로 유효활용 가능하다. 이러한 염분농도에 따른 준설토의 분류를 위한 표준화된 기준은 아직까지 존재하지 않는 것으로 파악되나, 호주 New South Wales 주 등 일부 지역에서는 식물의 염분 내성에 따른 토양의 전기전도도 가이드라인⁴⁴⁾을 제공하고 있어 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한, 염분에 따른 생태독성 및 성장 평가, 염분 확산으로 인한 주변환경 영향 등에 대한 체계적인 연구를 통하여 적절한 준설토 염분농도 평가기준 마련을 위하여 노력할 필요가 있다.

유기물함량, 양이온 교환능, 질소, 인, 칼륨 등의 영양분은 생물생장에 반드시 필요한 요소이므로 생태자원으로 유효활용 시 반드시 평가해야하는 인자이다.⁸⁾ 준설토 내 해당 인자들이 부족한 경우 공학재료로 유효활용하거나 필요한 인자를 추가로 공급하여¹¹⁾ 개선 후 생태자원으로 유효활용할 필요가 있다.

4.5. 공학기능

공학기능 평가는 공학재료의 용도를 결정하는데 중요한 인자로 사용된다.^{8,20)} 공학재료로 유효활용 하고자 하는 경우 다짐시험, 압밀시험, 전단강도 등의 공학적 기능 분석을 통해 기초지반, 건설재료, 도로기층재 등 용도 별로 준설토의 공학재료로서의 적합성을 판단할 수 있다. 다짐시험을 통해 최적의 함수비를 구하고 다짐정도를 결정하여 필요한 전단강도, 간극비를 얻고 압축성 및 수축성을 줄일 수 있다. 압밀실험을 통해 지반의 침하량 및 침하속도를 조사하여 노상, 기초지반으로서의 적합성을 판단하고 전단시험을 통해 준설토의 직접전단, 하중지지력 및 사면안정을 분석하여 토목공사 자원으로서의 적합성을 평가한다.^{8,20)} 준설토 자체의 하중 지지 기능이 충분하지 못할 경우 건설재료의 보조재로 활용하는 것을 검토하거나 입자크기가 작아 투수성이 낮은 경우 매립지 라이너, 차수층 등으로의 활용 방안을 모색할 필요가 있다.

4.6. 생태독성

생태독성평가는 해당 매질에서 지표생물의 생존, 성장량 등을 측정하여 매질에 존재하는 유해인자가 미치는 독성 영향을 보다 직접적으로 평가할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 생태독성평가를 준설토를 현장에 유효활용하였을 때 용출수가 주변 생태계에 미치는 생태독성영향 평가(Ecotoxicological test I)와 준설토를 생태자원으로 유효활

Fig. 3. Types and examples of ecotoxicological tests using leachate and sediment.

용 시 이에 서식하는 육상 생태수용체에 미치는 생태독성영향을 평가(Ecotoxicological test II)하는 두 단계로 구분하였다(Fig. 3). 첫 번째 생태독성평가단계(Ecotoxicological test I)에서는 주상시험에서 발생하는 용출수를 이용하여 생태자원 또는 공학재료로 유효활용 되었을 때 용출수로 인해 주변 지표수, 지하수, 토양 등에 서식하는 생태 수용체에 미치는 생태독성영향을 평가한다. 이 단계에서는 용출수의 유입으로 주변 수계 내 생태계에 미치는 독성영향과 주변 토양에 서식하는 육상 생태수용체에 미치는 독성영향을 평가할 필요가 있다. 수생태계에 미치는 독성영향을 평가하는 시험법의 예로는 녹조류(*Pseudokirchneriella subcapitata*)를 이용한 성장저해실험(ISO 8692, 2012),^{45,46)} 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용한 급성독성실험(ISO 6341, 1996)^{46,47)} 등이 있으며, 육상 생태수용체에 미치는 독성영향은 수경재배법을 이용한 쌀보리 뿌리길이 생장저해실험(ISO 11269-1, 1993)⁴⁸⁾ 등을 활용할 수 있다. 두 번째 생태독성평가단계(Ecotoxicological test II)는 준설토를 생태자원으로 유효활용할 때 준설토 내 유해인자로 인한 생태독성영향을 평가하며, 여러 영양단계(trophic level)에 있는 생물을 대상으로 평가하여 생물독성의 존재여부를 명확하게 검증할 필요가 있다. 따라서, 미생물, 무척추동물, 식물 등 최소 3가지 이상의 다른 영양단계의 시험종을 이용하여 준설토 내 존재하는 잠재적 유해인자가 육상 생태수용체에 미치는 생태독성영향을 평가하는 것을 제안한다. 각 영양단계에서 사용되는 시험종은 각 종의 대표성을 띄어야 하며 해당 오염물질에 민감도가 높고 국제표준시험기준에 사용되는 종을 이용하는 것이 바람직하다. 또한, 생태독성시험에서 평가하는 독성학적 종말점(ecological endpoint)은 생물종의 치사율(mortality) 뿐만 아니라 유해물질 존재로 인한 생리학적 영향(physiological effect)을 포함할 필요가 있다. 예를 들어, 식물독성시험의 경우 옥수수, 밀, 귀리, 보리 등 국제표준시험 식물종 중 준설토 내 주요 유해인자에 민감한 종을 선택하고, 발아 및 생장뿐만 아니라 광합성, 호흡 증산, 엽록소 함량 등 식물의 생리학적 작용⁴⁹⁾을 분석할 수 있다. 미생물의 경우 탈수소효소활성도,⁵⁰⁾ Microtox 생물검정법⁵¹⁾ 및

기질 유도 미생물 활성(substrate induced respiration)⁵²⁾ 등을 이용하여 오염물질의 생태독성 및 생리학적 영향을 평가하며 무척추동물은 가장 일반적인 시험종인 지렁이⁵³⁾ 등을 이용하여 치사율, 생장율, 회피율 등을 평가할 수 있다.

4.7. 모델링을 통한 오염물질의 주변지역 확산 특성

유효활용 의사결정을 위하여 유효활용 시 준설토 내 오염물질의 확산으로 인한 주변지역 영향을 예측하고 그 결과를 반영할 필요가 있으며, 이를 위하여 오염물질 거동특성과 부지 특성을 반영한 모델링 평가를 실시할 필요가 있다. 모델링 평가를 통해 주요 오염물질의 확산 방향, 범위 등 이동경로를 예측³⁴⁾하고 오염물질의 탈착, 유출, 확산을 통해 주변 환경 및 생태계에 미치는 영향을 예측한다.^{37,54)} 오염물질 확산 모델링은 부지특이성을 반영하여야 하므로 세부적인 준설토 유효활용 용도 및 그 적용 시나리오가 일차적으로 결정된 후 수행되어야 한다.

우선적으로, 준설토 내 주요 오염물질 특성 및 부지 개황조사를 통하여 모델링 평가의 대상물질을 선정하고, 대상물질 별 주요 이동경로를 파악하여 현장개념모델(conceptual site model)을 구축할 필요가 있다. 이후에는 보다 상세한 현장조사를 통하여 현장의 토양특성, 지하수 흐름특성, 표면유출 특성 등을 파악한다.

위 4.3절에 기술한 주상실험을 통해 얻은 준설토의 고액비에 따른 오염물질 용출 특성 결과는 수학적 모델로 표현하여 준설토 유효활용 시나리오에 따른 현장에서의 오염물질 장기용출을 예측하는 데 활용할 수 있다.³⁷⁾ 준설토가 성복토재, 또는 생태서식지 조성 등의 용도로 유효활용되어 투수성의 토양층을 형성하는 경우(percolation controlled scenario) 강우 침투로 인해 오염물질이 탈착 또는 용해되어 하부토양층 또는 지하수로의 유입되는 농도를 예측할 수 있다.⁵⁵⁾ 한편, 준설토가 도로기층재 또는 매립지 라이너 등 투수성이 낮은 재료로 유효활용되었을 때에는(diffusion controlled scenario) tank leaching 시험 등 표면에서의 오염물질 확산 기작을 모사하는 시험을 실시하여 강우가 매립층 주변을 따라 흐르면서 확산을 통하여 주변지역으로 전

달되는 오염물질의 농도를 예측할 수 있다.⁵⁵⁾ 유효활용된 준설토와 접촉한 강우의 오염물질 농도가 예측되면, 그 오염물질의 주변환경에서의 이동을 통한 확산을 부지특이적인자를 적용한 오염물질 거동 수치해석 모의를 통해 예측 가능하다.

4.8. 선별수준생태위해성평가

우리나라는 토양 생태계를 고려한 생태위해성평가에 대한 정립된 기준이 없지만 미국, 캐나다(Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME), 네덜란드(National Institute for Public Health and the Environment, RIVM) 및 유럽연합 등 선진국에서는 토양 및 생태계 보호를 위해 생태위해성평가를 환경기준에 포함하여 수행하고 있다.^{4,56,57)} 유럽연합에서는 생물독성시험 데이터베이스를 통하여 통계적으로 생태독성영향이 거의 나타나지 않는다고 예측되는 농도인 예측무영향농도(Predicted No Effect Concentration, PNEC)를 기준값으로 사용하며 네덜란드, 호주, 영국 등 선진국에서는 나라별로 생태허용농도를 정하여 사용하고 있다.^{4,58)} 최근 국내에서도 토양 생태계의 독성영향에 대한 중요성이 대두되고 있으며 토양 생태위해성평가 기준을 개발하는 연구가 점차 활발해지고 있다.^{4,58)} 실제 현장에서 부지특이적인 지표종(receptor)을 선정하고, 그 지표종의 각 오염물질 노출경로와 생태학적 특성을 반영하여 생태위해성평가를 실시하는 작업은 상당한 노력과 시간, 전문적 지식, 충분한 데이터베이스가 요구되므로 현실적인 제약이 크다고 볼 수 있다. 따라서, 간단한 선별수준(screening level)의 생태위해성 평가를 실시하고, 여기에서 충분히 고려되지 못하는 위해우려를 위 4.6절에서 서술한 생태독성평가를 통하여 보완하는 것이 보다 현실적인 것으로 판단된다. 이 방법은 각 오염물질에 대하여 독성시험 문헌자료를 통하여 통계적으로 도출한 PNEC 값을 현장의 대표농도(Predicted Environmental Concentration, PEC), 즉 준설토의 오염물질 농도와 비교하여 다음과 같이 위해도(Hazard Quotient, HQ)를 계산한다.⁴⁾

$$HQ = \frac{PEC}{PNEC} \quad (1)$$

계산된 HQ의 값이 1 이상인 경우 대상 오염물질이 생태학적으로 위해가 우려되는 수준으로 존재한다고 판단할 수 있다. 선별 수준 생태위해성 평가에서 사용하는 PNEC 값은 일반적으로 상당히 보수적인 농도가 산출되며^{4,51)} 전함량 기준으로 인체위해도 및 농업용 토양의 기준을 만족하더라도 생태위해도가 있는 것으로 평가될 가능성이 상당하다.

5. 준설토 유효활용방안 의사결정모델

준설토 유효활용 시 고려되는 다양한 결정인자를 바탕으

로 본 연구에서는 Fig. 4에 제시한 바와 같은 준설토 유효활용방안 의사결정모델을 제시한다. 제시한 모델은 크게 두 단계로 나뉘며, 첫 번째 단계(Phase I)에서는 준설토의 유효활용 가능여부를 결정하고, 두 번째 단계(Phase II)에서는 준설토의 유효활용 세부용도 결정 및 결정된 용도의 적합성 여부를 평가한다.

Phase I에서는 우선적으로 오염물질 전함량 분석을 통해 해당 국가, 관련 시험법, 활용목적에 따른 기준의 만족여부를 평가한다. 이 전함량 분석의 결과는 추후 Phase II에서 세부적인 유효활용용도 의사결정 시에도 활용된다. 전함량 평가 후 오염 물질의 잠재적 위해성을 확인하기 위해 단기용출평가를 수행한다. 오염물질 전함량 기준을 만족하지만 경우에 따라 오염물질의 이동가능성이 높아 주변 환경을 위해할 가능성이 존재한다.³⁰⁾ 따라서, 폐기물용출시험법, US EPA의 TCLP, SPLP 등과 같은 회분식 용출시험을 통해 오염물질의 이동가능성을 분석하고 각 시험법 또는 유효활용 대상지역에 적용되는 기준의 만족 여부를 확인한다. 전함량평가와 단기용출평가 단계를 만족하지 못할 경우 오염저감 단계(Decontamination)를 통해 해당 기준을 만족할 수 있는 정화율에 초점을 맞추어 토양세척, 열탈착 등 효율이 높은 정화방법을 선택, 유효활용 가능한 수준으로 정화한다. 하지만, 경제성, 심각한 오염수준 등을 고려한 타당성 분석을 통해 정화처리가 적절하지 않는 경우 매립지에 처분할 수 있다. 다음 단계는 보다 현장과 유사한 조건에서 오염물질의 용출 및 용출 오염물질의 환경·생태적 영향을 평가하는 주상시험을 수행한다. 주상시험을 통해 준설토 내 오염물질의 장기용출 특성을 파악할 수 있으며 용출수를 이용한 생태독성평가와 수질평가를 통해 유효활용 후 주변 환경 및 생태계에 미칠 수 있는 영향을 평가할 수 있다. 주상시험을 통하여 용출수의 생태독성 또는 수질이 유효활용에 부적합한 것으로 판명될 경우 주요 우려 오염물질에 대한 안정화 능력을 갖춘 물질을 혼합하는 안정화 단계(Stabilization)를 실시하고, 주상시험을 통하여 개선된 특성을 재평가한다. 오염저감 단계와 마찬가지로 안정화 단계도 타당성 평가 수행 후 적절하지 않은 경우 해당 시료를 매립지에 처분할 수 있다.

Phase I을 만족하여 유효활용이 가능한 것으로 판정한 준설토는 Phase II 평가를 실시한다. 준설토의 이화학적 특성 및 공학기능 평가를 통해 세부적인 유효활용 방법을 결정하되, 준설토 내 잔류 오염물질의 전함량평가 결과 또한 판단에 반영한다. 앞서 기술한 바와 같이 이화학적특성 인자로는 pH, 입도, 염분, 유기물함량, 양이온교환능, 영양분함량 등이 포함될 필요가 있으며, 공학기능 평가에는 입도, 다짐특성, 압밀특성, 전단강도 등이 포함된다. 이러한 특성들은 생태자원 및 공학재료로의 유효활용용도 구분뿐만 아니라 보다 구체적인 용도에 대한 일차적인 결정의 근거가 된다. Phase I을 통하여 유효활용이 가능한 것으로 판단되고 대부분의 특성기준을 만족하나 부분적으로 이화학적특성 및 공학기능에 관련된 필수인자가 부족한 경우 개선단

Fig 4. Decision making framework for beneficial use of dredged sediment considering the environmental risk assessment and sediment characterization. EM: Engineering material, ER: Ecological resource.

Table 2. Potential beneficial uses of dredged sediment

Engineering material	Ecological resources
Land reclamation/creation	Habitat creation
Coastal protection	Wetland
Filling material	Soil enhancement
Landfill cover/Capping material	Agriculture
Road subbase construction	Aquaculture

계를 통해 원하는 용도의 기능을 갖춘 자원으로 유효활용할 수 있다. 예를 들어, 영양분, 유기물 등이 부족한 경우 비료 등을 추가 공급하여 필요한 생태기능을 갖춘 후 생태자원으로 유효활용할 수 있으며 공학재료의 경우 자갈, 모래 또는 공학기능을 갖춘 다른 무기성폐자원을 추가 및 혼합하여 압축강도, 압밀강도, 전단강도 등 요구되는 공학적 특성을 보완한 뒤 공학재료로 유효활용할 수 있다. 개선단계 후, 해당 인자가 세부 유효활용용도에 만족할 만한 수준으로 개선되었는지 확인하기 위해 특성분석 단계로 돌아가 이를 재평가한다. 개선과정에서 준설토의 다른 이화학적 특성도 변화할 수 있으므로 재평가 시에는 개선인자 이외에 Table 2에 제시된 유효활용 목적에 요구되는 필수인자들도 함께 측정한다.

특성분석 후 공학재료(e.g. 성복토재, 도로기층재)로 유효활용 하는 경우 추가적인 평가 없이 세부용도에 적합한 유효활용 시나리오에 따라 모델링평가를 수행한다. 반면, 생태자원으로 유효활용하는 경우 잔류하는 오염물질이 육상 생태수용체에 미치는 생태독성 및 위해성을 분석하기 위해 생태적합성평가를 수행한다. 생태적합성평가는 생태위해성평가와 생태독성평가로 구성되어 있다. 첫 번째로 잔류하는 오염물질이 육상 생태수용체에 미치는 잠재적 생태위해성을 평가하기 위해 선별적 수준의 생태위해성평가를 수행한다. 그러나 선별수준 생태위해성평가는 불확실성을 내포하고 있으며, 오염물질 전함량을 기준으로 하므로 실제 준설토 내 오염물질의 생물학적 이용성을 반영할 수 없다. 또한, 평가 대상 오염물질 이외 유해인자(stressor)의 영향을 반영하지 못하는 한계도 있다. 따라서, 이를 보완하기 위하여 생태독성평가를 실시한다. 생태독성평가는 최소 3개의 서로 다른 영양단계의 생물군(예: 미생물, 식물, 육상무척추동물)을 대상으로 각 생물군의 대표성을 띠는 종을 선정하여 육상 생태수용체에 미치는 생태독성영향을 평가한다. 생태독성평가 또한 각 영양단계의 생물군을 대표하는 소수의 시험종을 대상으로 수행한다는 한계가 있으므로, 다양한 생물종의 독성자료에 기반한 선별수준 생태위해성평가 결과 또한 의미를 지닌다. 다만, 앞서 서술한 바대로 선별수준 생태위해성평가는 일반적으로 상당히 보수적인 특성이 있으므로, 준설토의 생태자원으로서의 적합성은 생태독성평가를 통해 실제 육상 생태수용체에 미치는 생태독성영향을 기반으로 판단하며 선별수준 생태위해성평가 결과를 참고 자료로 사용하여 생태독성평가의 한계점을 보충하는 것이 적절하다고 판단된다. 첫 번째로 생태독성평가와 생태위해

성평가를 모두 만족하는 경우 생태위해성과 독성영향이 모두 낮아 준설토를 생태자원으로 유효활용할 수 있다고 판단한다. 두 번째는 생태독성평가는 통과하지만 생태위해성평가를 만족하지 못하는 경우로, 준설토가 실제 육상 생태수용체에 미치는 독성영향이 크지 않다고 판단하여 생태자원으로 유효활용하되, 사후관리 및 모니터링 계획수립 시 생태위해성 존재우려를 고려할 필요가 있다. 이에선 생태수용체에 미치는 장기적 생태독성영향 모니터링 및 오염물질 생물축적량 분석 등이 포함될 수 있다. 세 번째로 생태독성평가를 통과하지 못하는 경우에는 생태위해성 만족 여부와 관계없이 실제 유효활용에 사용될 준설토 내 잔류오염물질의 생태독성영향으로 서식지 및 육상 생물의 생육을 위한 생태자원으로 적합하지 못하다고 판단하고, 특성분석 단계로 돌아가 공학기능을 고려하여 특성에 맞는 용도를 선택하여 공학재료로 유효활용한다.

본 논문은 준설토의 육상 유효활용을 대상으로 한 의사결정모델 개발을 목적으로 하고 있으므로, 위 생태적합성평가는 육상 생태수용체를 대상으로 하는 평가방법에 한정하여 기술하였다. 그러나 준설토의 해양 유효활용에 대해서도 동일한 방식의 생태적합성평가가 가능하리라 판단된다. 다만, 준설토를 해양에 생태자원으로 유효활용할 때에는 해양환경의 생태학적 특성을 고려한 시험종을 이용한 생태독성 평가를 실시하고, 생태위해성평가 시에도 해양생물을 대상으로 한 독성시험 문헌자료를 이용하여 PNEC 값을 도출하고 이를 이용하여 위해도 값을 산정할 필요가 있다.

Phase II의 다음 단계는 세부적인 유효활용용도 결정 후 활용용도 및 현장특성을 반영하여 오염물질의 용출, 확산, 축적으로 주변 토양, 지하수 및 지표수 등 주변 환경을 오염시킬 가능성을 평가하기 위한 모델링평가이다. 여기에서는 구체적인 유효활용 시나리오를 바탕으로 주상시험 또는 tank leaching 시험 결과와 오염물질 거동모델을 활용, 오염물질의 이동경로를 예측하고 오염물질의 장기적인 거동을 예측한다. 모델링평가의 결과 해당 세부 유효활용용도에 부적합한 것으로 판단되면 안정화 단계를 수행하여 준설토의 특성 파괴를 최소화하고 주변 환경 및 생태계에 미치는 영향을 저감한다. 안정화 단계가 적용된 준설토는 특성분석 단계로 돌아가 그 이화학적, 공학적 특성 변화여부를 재평가한다. Phase II에서의 안정화 단계도 타당성 평가 수행 후 적절하지 않은 경우 해당 시료를 매립지에 처분하도록 한다.

준설토가 의사결정모델의 Phase I과 II 평가 단계를 모두 만족하면 해당 준설토의 잠재적 환경위해성이 최소화되고 특성분석이 고려된 합리적인 유효활용용도가 결정되었다고 판단되어 현장에 적용할 수 있다. 의사결정모델을 통해 장단기용출특성평가, 생태위해성 및 생태독성평가, 모델링평가를 포함한 종합적인 환경위해성 평가와 특성분석 후 적절한 정화 및 개선을 통해 유효활용용도에 필요한 조건을 충족하더라도 현장 여건의 변화, 평가의 불확실성 등으로 예측하지 못한 환경영향이 발생할 수 있으며, 폐자원 할

용에 대한 사회적 우려를 불식시킬 필요도 있다. 따라서, 유효활용 후 잔류하는 오염물질로 인한 주변 환경 및 생태계 피해를 예방하기 위해 정기적인 모니터링 및 사후관리가 필요하다. 생태자원으로 유효활용된 준설토는 오염물질 뿐만 아니라, pH 및 영양분 등 이화학적 특성도 지속적으로 관리하여 그 기능을 유지할 필요가 있다. 본 논문에서 개발된 유효활용 의사결정 모델을 통해 효과적이고 안전한 방법으로 준설토를 특성에 맞게 유효활용하고 폐자원 유효활용에 대한 대중의 선입견¹¹⁾을 해결할 수 있을 것으로 기대한다.

6. 결론

본 연구에서는 준설토의 유효활용으로 발생할 우려가 있는 환경위해성과 용도별 적합성을 평가하고, 유효활용 가능성 여부 및 그 용도를 결정하며, 필요시 오염도 및 물성 개선을 실시하기 위한 유효활용 의사결정 모델을 개발하였다. 용도에 적합한 환경위해성 평가를 위하여 유효활용 용도를 크게 생태자원과 공학재료로 구분하였으며, 의사결정 단계를 크게 준설토의 유효활용 가능성 여부 자체를 판별하는 Phase I과 유효활용 용도 결정과 용도 및 유효활용 시나리오에 따른 생태적합성, 주변환경영향을 평가하는 Phase II로 구성하였다. 의사결정모델은 준설토 내 오염물질의 전함량 및 단기·장기 용출가능성, 유효활용으로 인한 생태독성영향, 자원으로서의 기능적 측면, 오염물질 확산으로 인한 주변 환경 영향 등의 다양한 인자를 분석하고, 그 특성에 따라 각 인자에 대한 세부평가단계를 가장 합리적인 순서로 배치하고자 하였다.

본 논문에서는 준설토 내 유해물질의 환경위해성을 평가하는 시험방법으로 전함량 분석, 단기 용출시험, 주상용출시험, 생태독성시험 등 현재 토양 및 폐기물 관리에 일반적으로 활용되고 유해물질 확산 및 생태영향의 직접적인 지표가 되는 방법론을 위주로 하여 제시하였다. 근래 들어 토양 및 수계의 인체 및 생태위해성 평가에 오염물질의 생물학적 이용성(bioavailability), 생물학적 접근성(bioaccessibility) 및 존재형태를 고려하여 보다 합리적인 평가가 이루어질 필요성이 제기되고 있다. 따라서, 준설토 유효활용에 있어서도 이러한 개념을 도입한 평가가 심도 있게 고려되어야 할 필요가 있다. 토양 및 퇴적토 내 오염물질의 생물학적 이용성, 생물학적 접근성을 평가하는 시험방법으로 solubility bioavailability research consortium (SBRC), unified BARGE method (UBM) 등이 제시된 바 있으며, 중금속의 존재형태를 평가하는 다양한 연속추출 방법 또한 수십년 동안 개발, 개선 및 적용이 이루어져 왔다. 이와 같은 시험법의 결과를 오염물질 인체 및 생태위해성 평가에 도입하여 위해도를 보다 합리적으로 산출하는 방안이 확립된다면, 본 연구에서 개발한 모델에 이를 적용하여 유효활용 의사결정의 신뢰성을 보다 더 향상시킬 수 있을 것이다.

폐자원의 유효활용은 그 처분공간의 한계와 고갈되는 천연자원의 문제를 동시에 해결할 수 있는 효과적인 대안이다. 본 연구에서 개발한 의사결정모델은 준설토 뿐만 아니라 슬래그, 석탄재 등의 무기성폐기물, 정화토 등 타 고형 폐자원의 유효활용 시에도 적용될 수 있다. 본 연구를 통하여 개발된 의사결정모델은 준설토를 포함한 폐자원의 유효활용에 따른 환경영향 우려를 최소화하고 그 특성에 맞는 용도를 결정할 수 있도록 함으로써 유효활용을 보다 활성화하고, 각 평가단계의 지속적인 개선을 위한 연구를 실시하는 근거가 될 것으로 기대된다.

준설토 유효활용이 활발하게 이루어지지 못하는 원인으로 일관된 관리체계 및 의사결정체계의 미비뿐만 아니라 준설토를 폐기물로 인식함에 따른 사회의 부정적 시각 또한 상당한 비중을 차지한다. 따라서, 본 연구에서 제시한 바와 같은 합리적 의사결정모델의 개발과 함께 준설토 유효활용에 대한 대중의 선입견을 해결할 수 있는 교육, 공청회, 환경영향평가 공개 등의 활동⁵⁹⁾도 반드시 수반되어야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 토양지하수오염방지기술개발사업(GAIA)의 지원과 환경부의 폐자원에너지화 전문인력양성사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Meade, R. H., "Landward transport of Bottom sediments in Etuaries of the atlantic coastal plain," *J. Sediment. Petrol.*, **39**, 222~234(1969).
2. Hamer, K. and Karius, V., "Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment," *Waste. Manag.*, **22**, 521~530(2002).
3. Sheehan, C. and Harrington, J., "Management of dredge material in the Republic of Ireland-A review," *Waste. Manag.*, **32**(5), 1031~1044(2012).
4. Kim, M., Kim, K., Choi, Y. and Nam, K., "Screening-Level Ecological Risk Assessment for Beneficial Reuse as Soil of Dredged Sediment Contaminated with Heavy Metals," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(5), 236~241(2016).
5. MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), "Standard for ocean disposal of wastes," http://dms.kcg.go.kr/dms/05sub/05_04.jsp (accessed 24 January 2018)(2018).
6. Essink, K., "Ecological effects of dumping of dredged sediments; options for management," *J. Coast. Conserv.*, **5**(1), 69~80(1999).
7. IMO (International Maritime Organisation), "Waste Assessment Guidelines Training Set Extension for the Application of Low-Technology Techniques for Assessing Dredged Material,"

- London, UK(2005).
8. USACE (U.S. Army Corps of Engineers), "Dredging and Dredged Material Management," Washington, DC, USA(2015).
  9. Heise, S., "Sustainable management of sediment resources: sediment risk management and communication (Vol. 3)," Elsevier, Amsterdam, Netherlands(2007).
  10. Zentar, R., Dubois, V. and Abriak, N. E., "Mechanical behaviour and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments," *Resour. Conserv. Recycl.*, **52**, 947~954(2008).
  11. Sheehan, C., Harrington, J. and Murphy, J. D., "A technical assessment of topsoil production from dredged material," *Resour. Conserv. Recycl.*, **54**(12), 1377~1385(2010).
  12. Bray, R. N., "Environmental aspects of dredging," Taylor and Francis, Leiden, Netherlands(2008).
  13. Harrington, J. and Smith, G., "Guidance on the beneficial use of dredge material in Ireland report commissioned by the Irish Environmental Protection Agency," Ireland(2013).
  14. MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), "MOF Statistics Portal," <https://www.mof.go.kr/statPortal/cate/statView.do> (accessed 16 December 2017)(2017).
  15. MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), "MOF News," <http://www.mof.go.kr/article/view.do?menuKey=376&boardKey=10&articleKey=15193> (accessed 25 December 2017)(2017).
  16. MOE (Ministry of Environment), "Comprehensive guideline of recycling management system," Incheon, Korea(2016).
  17. KEI (Korea Environment Institute), "Stream, lake sediment management and beneficial use of dredged materials," Seoul, Korea(2010).
  18. MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), "Environmental Standard and Treated Method for Beneficial Use of Dredged Materials," Korea(2007).
  19. USACE (U.S. Army Corps of Engineers)/ USEPA(U.S. United States Environmental Protection Agency), "Identifying, Planning, and Financing Beneficial Use Projects Using Dredged Material," Washington, DC, USA(2007).
  20. DOER (Dredging Operations and Environmental Research Programme), "Dredged material characterisation tests for beneficial use suitability," Washington, DC, USA(1999).
  21. USACE (U.S. Army Corps of Engineers)/USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), "Evaluating environmental effects of dredged material management alternatives - a technical framework," Washington, DC, USA(2004).
  22. Yoon, G. L., Kim, D.W., Kim, M. S., Lee, S. H., Kim, S. B. and Shim, J. S., "Geotube Applications to Coastal Erosion Reduction in Korea," *The Magazine of the Korean Society of Civil*, **63**(3), 34~42.
  23. Kim, D. G., Yoon, Y. W. and Yoon, G. L., "Compressive Strength Characteristics of Light-weight Air Foamed Soil Using Dredged Silty Soils," *J. Korea Geo-Environ. Soc.*, **18** (5), 27~33(2017).
  24. PIANC (Permanent. International Association of Navigation Congresses), "Dredged material as a resource—options and constraints," Brussels, Belgium(2009).
  25. Imai, D., Kaneco, S., Dabwan, A. H., Katsumata, H., Suzuki, T., Kato, T. and Ohta, K., "Construction of biologically productive artificial tidal flats with solidified sea bottom sediments," *Int. J. Soil. Sediment. Water.*, **1**(2), 5(2008).
  26. Vidal, R., "Dredging in Spanish Coastal Waters. In: Eisma, D. Dredging in Coastal Waters," Taylor and Francis Group, London, pp. 125~136(2006).
  27. USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), "Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils (method 3051A) in SW-846," Washington DC, USA(1995).
  28. USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), "Soxhlet extraction (method 3540C) in SW-846," Washington DC, USA (1996).
  29. Chang, E. E., Chiang, P. C., Lu, P. H. and Ko, Y. W., "Comparisons of metal leachability for various wastes by extraction and leaching methods," *Chemosphere*, **45**(1), 91~99(2001).
  30. Hartley, W., Edwards, R. and Lepp, N. W., "Arsenic and heavy metal mobility in iron oxide-amended contaminated soils as evaluated by short-and long-term leaching tests," *Environ. Pollut.*, **131**(3), 495~504(2004).
  31. Naka, A., Yasutaka, T., Sakanakura, H., Kalbe, U., Watanabe, Y., Inoba, S., Takeo, M., Inui, T., Katsumi, T., Fujikawa, T. and Sato, K., "Column percolation test for contaminated soils: Key factors for standardization," *J. Hazard. Mater.*, **320**, 326~340(2016).
  32. USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), "Toxicity Characteristic Leaching Procedure (method 1311) in SW-846," Washington DC, USA(1992).
  33. USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), "Synthetic Precipitation Leaching Procedure (method 1312) in SW-846," Washington DC, USA(1994).
  34. MOE (Ministry of Environment), "Methodology of the Environmental Assessment on the Recycled Products and Wastes (II)," Incheon, Korea(2015).
  35. MOE (Ministry of Environment), "The Guideline of Environmental Hazardous Impact Assessment of Recycled Products and Wastes(III)," Korea (2016).
  36. Dijkstra, J. J., Meeussen, J. C. L. and Comans, R. N. J., "Leaching of heavy metals from contaminated soils: an experimental and modelling study," *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 4390~4395(2004).
  37. Lee, H., Yu, G., Choi, Y., Jho, E. H. and Nam, K., "Long-term leaching prediction of constituents in coal bottom ash used as a structural fill material," *J. Soils. Sediments.*, **17**, 2742~2751(2017).
  38. Jala, S. and Goyal, D., "Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production—a review," *Bioresour. Technol.*, **97**(9), 1136~1147(2006).
  39. Shin, Y., "Soil ecology and Soil resource. Hanlim Publication," Seoul, Korea(1992).
  40. USDA (United States Department of Agriculture), "Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handbook No. 60.," USA(1954).
  41. Makino, T., Sugahara, K., Sakurai, Y., Takano, H., Kamiya, T., Sasaki, K., Itou, T. and Sekiya, N., "Remediation of cadmium contamination in paddy soils by washing with chemicals:

- selection of washing chemicals,” *Environ. Pollut.*, **144**(1), 2~10(2006).
42. Makino, T., Kamiya, T., Takano, H., Itou, T., Sekiya, N., Sasaki, K., Maejima, Y. and Sugahara, K., “Remediation of cadmium-contaminated paddy soils by washing with calcium chloride: verification of on-site washing,” *Environ. Pollut.*, **47**(1), 112~119(2007).
43. Bolam, S. G., Rees, H. L., Somerfield, P., Smith, R., Clarke, K. R., Warwick, R. M., Atkins, M. and Garnacho, E., “Ecological consequences of dredged material disposal in the marine environment: a holistic assessment of activities around the England and Wales coastline,” *Mar. Pollut. Bull.*, **52**(4), 415~426(2006).
44. CMA (Catchment Management Authority, New South Wales, Australia) “Calculating electrical conductivity and salinity,” https://archive.ils.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0010/495370/archive-calculating-electrical-conductivity-and-salinity.pdf (accessed 1st February 2018)(2018).
45. ISO (International Organization for Standardization), “Water Quality - Fresh Water Algal Growth Inhibition Test with Unicellular Green Algae. ISO 8692,” Geneve, Switzerland(2012).
46. Krüger, O., Kalbe, U., Richter, E., Egeler, P., Römbke, J. and Berger, W., “New approach to the ecotoxicological risk assessment of artificial outdoor sporting grounds,” *Environ. Pollut.*, **175**, 69~74(2013).
47. ISO (International Organization for Standardization.), “Water Quality - Determination of the Inhibition of the Mobility of *Daphnia Magna* Straus (Cladocera, Crustacea) - Acute Toxicity Test, ISO 6341,” Geneve, Switzerland(1996).
48. ISO (International Organisation for Standardisation), “Soil Quality - Determination of the Effects of Pollutants on Soil Flora. Part 1. Method for the Measurement of Inhibition of Root Growth. ISO 11269-1,” Geneve, Switzerland(1993).
49. Pålsson, A. M. B., “Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants,” *Water. Air. Soil. Pollut.*, **47**(3-4), 287~319(1989).
50. Balba, M. T., Al-Awadhi, N. and Al-Daher, R., “Bioremediation of oil-contaminated soil: microbiological methods for feasibility assessment and field evaluation,” *J. Microbiol. Methods.*, **32**(2), 155~164(1998).
51. Dorn, P. B. and Salanitro, J. P., “Temporal ecological assessment of oil contaminated soils before and after bioremediation,” *Chemosphere.*, **40**(4), 419~426(2000).
52. Killham, K., “A physiological determination of the impact of environmental stress on the activity of microbial biomass,” *Environ. Pollut. A.*, **38**(3), 283~294(1985).
53. ISO (International Organization for Standardization), “Soil quality - Guidance on the Ecotoxicological Characterization of Soils and Soil Materials. ISO 15799,” Geneve, Switzerland (2003).
54. Susset, B. and Grathwohl, P., “Leaching standards for mineral recycling materials-A harmonized regulatory concept for the upcoming German Recycling Decree,” *Waste. Manag.*, **31**(2), 201~214(2011).
55. Kosson, D. S., van der Sloot, H. A., Sanchez, F. and Garbrants, A. C., “An Integrated Framework for Evaluating Leaching in Waste Management and Utilization of Secondary Materials,” *Environ. Eng. Sci.*, **19**, 159~204(2002).
56. Hope, B. K., “An Estimation of Ecological Risk Assessment and Management Practices,” *Environ. Int.*, **32**(8), 983~995(2006).
57. Lee, W. M., Kim, S. W., Jeong, S. W. and An, Y. J., “Comparative study of Ecological Risk Assessment: Deriving Soil Ecological Criteria,” *J. Soil and Groundwater Environ.*, **17**(5), 1~9(2012).
58. An, Y.-J., Kim, S. W., Moon, J., Jeong, S.-W., Kim, R.-Y., Yoon, J.-K. and Kim, T.-S., “An Introductory Research for Development of Soil Ecological Risk Assessment in Korea,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(6), 348~355(2017).
59. Sheehan, C., Harrington, J. and Murphy, J. D., “A technical assessment of topsoil production from dredged material,” *Resour. Conserv. Recy.*, **54**(12), 1377~1385(2010).