

## 세척과 안정화기술을 적용한 오염 준설토의 처리 및 재활용 시스템 개발

김영진<sup>1\*</sup> · 남경필<sup>1</sup> · 이승배<sup>1</sup> · 김병규<sup>2</sup> · 권영호<sup>2</sup> · 황인성<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 건설환경공학부, <sup>2</sup>한라건설 기술연구소, <sup>3</sup>부산대학교 사회환경시스템공학부

## A Tiered Approach of Washing and Stabilization to Decontaminate and Recycle Dredged River Sediment

Young-Jin Kim<sup>1\*</sup> · Kyoungphile Nam<sup>1</sup> · Seungbae Lee<sup>1</sup> · Byeong-Kyu Kim<sup>2</sup>  
Young-Ho Kwon<sup>2</sup> · Inseong Hwang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>Research & Development Center, Halla Engineering & Construction Corp.

<sup>3</sup>Department of Environmental Engineering, Pusan National University

### ABSTRACT

Although the demands for the dredging work have been increasing due to social and industrial reasons including national plan for restoration of four major rivers, environmental standards or management guidelines for the dredged river sediment are limited. The suggested environmental standard for the beneficial use of dredged river sediment consists of two levels, recyclable and concern, and includes eight contaminants such as metals and organic contaminants. The systematic approach to remediate dredged river sediment is also suggested. The system consists of both washing and stabilization processes with continuous multi particle separation. In the early stage, the sediments are separated into two particle sizes. The coarse-grained sediment over 0.075 mm, generally decontaminated with less trouble, follows normal washing steps and is sent for recycling. The fine-grained sediments under 0.075 mm are separated again at 0.025 mm. The particles bigger than this second separation point are treated in two ways, advanced washing for highly contaminated sediments and stabilization for less. The lab test results show that birnessite and apatite are most effective stabilizing agents among tested for Cd and Pb. The most fine residues, down-sized by continuous particle separation, are finally sent for disposal. The system is tested for metals in this study, but is expected to be effective for organic contaminants included in the environmental standard, such as PAH and PCE. The feasibility test on the field site will be followed.

**Key word :** Dredging, River sediment, Environmental standard, Particle separation, Washing, Stabilization

### 1. 서 론

최근 국가적 규모의 하천정비계획이 발표되면서 하천퇴적토의 준설과 처리문제가 관심을 받고 있다. 국토해양부가 2009년 발간한 4대강살리기 마스터플랜에 따르면 네덜란드와 일본 등 선진국의 하도관리사업 사례조사 결과 하천준설로 안정적인 홍수방어능력과 수자원 확보가 가능한 것으로 나타났으며, 이를 바탕으로 준설을 신개념 하도관리를 위한 주요 수단으로 제시하고 있다(국토해양부, 2009). 4대강살리기 사업으로 인하여 발생할 것으로 예상

되는 총 준설물량은 약 5.7억 m<sup>3</sup>이며, 준설 후 가적치장에서 선별작업을 통하여 약 46%에 해당하는 2.6억 m<sup>3</sup>의 물량은 바로 골재로 활용되고 나머지는 사토장으로 운반되어 적절한 처리 후 재활용 되거나 매립하게 된다(국토해양부, 2009). 현재 우리나라의 경우 퇴적물에 대한 환경기준이 마련되어 있지 않으나 미국의 퇴적물 관리기준인 SQGs(Sediment Quality Guidelines, NOAA, 1999)와 비교할 때 국내 일부 하천퇴적토 중 특히 중금속이 SQGs 권고기준을 상회하는 사례가 자주 보고되고 있다(신원식 외, 2006; 황경엽 외, 2007). 이에 따라 지속적인 준설

\*Corresponding author : yk70@snu.ac.kr

원고접수일 : 2010. 3. 10 심사일 : 2010. 3. 13 게재승인일 : 2010. 4. 27

질의 및 토의 : 2010. 6. 30 까지

수요에 맞추어 준설된 하천퇴적토의 효율적인 처리방안이 필요한 실정이다.

일반적으로 오염퇴적토는 생태계에 악영향을 미칠 수 있는 수준의 유해물질을 함유한 토양, 유기물질 및 광물질을 말하는데(USEPA, 1998), 이중 강우와 함께 하천으로 유입되어 운반되다가 낮은 유속으로 하구에 침전된 물질과 수중의 다양한 생화학작용으로 독립적으로 침전된 물질을 모두 하천 퇴적토라 일컫는다(이창희 · 유혜진, 1998). 오염퇴적토의 처리공법은 토양 정화공법과 유사한 점이 많으나, 수계에 직접적인 영향을 끼치고 하천의 형태와 흐름특성과 관련이 있는 등 까다로운 점이 많다(김건하 · 정우혁, 2007). 그 중 처리공정 상의 가장 큰 특징은 퇴적토 처리에 입도분리가 포함되는 점을 들 수 있다. 일반적으로 준설토사는 모래크기 이상의 골재성분과 미립자(실트 및 점토) 성분으로 이루어져 있는데, 이 중 미립자는 큰 비표면적으로 인해 오염물질의 농도가 높으며 일반적인 세척공정에서 효율적으로 처리되지 않는 것으로 알려져 있다(Wenning et al., 2001). 따라서 준설토사 중 골재성분만을 분리하여 적절한 처리를 거쳐 건설용 자재 및 복토재 등으로 재이용 하고, 나머지 미립자는 폐기물로 간주되어 매립하거나 해양에 투기하는 것이 일반적이었다(USEPA, 2005). 그러나 폐기물의 해양투기를 금지한 런던협약 '96의정서'가 발효되면서 단계별로 배출기준이 강화되고 있으며, 이에 실질적인 해양투기가 어려워진 상태이기 때문에 한정된 매립지의 수명 및 처리비용의 상승에 대한 문제가 대두되고 있다. 따라서 하천오염퇴적토의 적절한 처리와 재활용 증대를 통하여 그동안 폐기처분되어왔던 사토의 양을 줄이는 노력이 필요한 시점이다.

네덜란드와 독일 등 유럽 선진국에서는 매년 엄청난 양의 준설토가 항로유지, 건설, 그리고 정화를 위해 수계시스템으로부터 발생되므로 경제적, 환경적으로 효율적인 준설토 관리와 처리가 매우 중요하게 여겨지고 있다. 일반적으로 대부분의 준설토는 수계시스템에서 다른 적합한 장소에 옮겨놓는 것이 가장 선호되는데, 일부 오염도가 높은 퇴적토가 처리와 관리에 있어서 중요하게 다루어져서 적치장소의 환경적, 지형학적, 공간적 적합성을 토대로 대안이 마련되어 있고 이에 따른 비용증감을 고려하고 있다(DGE, 2002). 미국의 경우 전술한 미국의 퇴적물 관리기준인 SQGs(NOAA, 1999)외에 준설토의 투기로 인한 환경 및 저서생물에 미치는 영향을 정확히 판단할 수 있는 기준을 제시하고 있다(US Federal Regulations, 1973). 이렇듯 외국 선진국에서는 오염퇴적물이 수생태계 및 국민건강에 미치는 악영향을 예방하고 건강한 수생태계 및

용수이용 목적에 적합한 수환경을 유지, 보전하기 위해 퇴적물에 대한 관리를 강화해 오고 있으나 우리나라의 경우 준설토에 대한 명확한 환경기준이 존재하지 않고, 오염퇴적토의 영향에 대한 체계적인 조사가 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 준설수요 증대가 예상됨에도 불구하고 초기단계에 머물고 있는 국내 하천준설퇴적토 관리현황과 처리기술을 알아보고, 외국의 사례를 참고하여 국내 실정에 맞는 준설토 재활용 기준 및 재활용을 고려한 하천준설토 처리시스템을 제안하고자 한다.

## 2. 국내 하천준설토 관리현황 및 재활용 기준 제안

### 2.1. 국내 하천준설토 관리현황

국내의 하천 준설사업은 주로 1980년대 이후 국가적인 하도정비사업의 일환으로 진행되어 왔는데, 1987년 환경부에서 시작하여 현재까지 진행 중인 자연형 하천 정비사업이 대표적으로 현재까지 200여개의 하천을 정비하였거나 진행 중이며 그밖에 국토해양부, 소방방재청 등에서 하천 정비사업을 진행하였다. 그러나 각 하천에 대한 사업의 집행이 지방자치단체별로 실시되고 있어 정확한 준설량과 골재 재활용 및 사토 처리물량 등의 종합적인 통계치의 수집은 매우 어려운 실정이다. 가장 최근 관심사로 떠오른 하천 내 오염퇴적토 준설 사례로는 2002년부터 내 5년간에 걸쳐 진행된 울산시의 "태화강 하도정비 및 오염하천 정화사업"이 있는데, 8.8 km에 달 등의전 사업구간에서 깊이 50 cm 이상 오니를 포함한 퇴적토를 준설하여 668,000 m<sup>3</sup>에 달하는 준설물량이 발생하였으며 524,000 m<sup>3</sup>를 골재로 매각, 재활용 한 후 오니를 비롯한 사토를 전량 해양투기 하였다(<http://taehwagang.ulsan.go.kr>). 이후 지속적인 사업추진을 위한 계획이 발표되면서 환경, 시민단체 및 언론은 통하여 사업추진의 적절성에 대한 문제점이 제기되었고 그 논란은 최근까지 이어지고 있다. 이는 전술한 바와 같이 오염퇴적토에 대한 명확한 기준의 부재에 기인한 것으로, 준설 후 법적인 처리근거가 모호하여 민원발생 시 설득력 있는 대응이 어려운 실정이다.

국내의 경우 퇴적물은 '수질 및 수생태계 보전에 관한 법률', '해양환경관리법', '하천법', '폐기물관리법', '토양환경보전법' 등에서 오니, 퇴적물, 침전물, 수저퇴적물, 골재, 토양 등으로 다양하게 언급되고 있으나 아직 직접적인 관리의 대상으로는 취급되지 않았으며, 단지 수질개선을 위한 오염원 관리 차원에서 유기물 또는 영양염류로 오염된 퇴적물을 제거하는 것과 환경기초조사의 일환으로

퇴적물 오염도 조사를 실시한 것이 지금까지 수행된 퇴적물 관리의 전부라 할 수 있다(이창희·유혜진, 2000). 또한, 지금까지 국내에서는 오염된 준설퇴적물을 토양으로 관리할 것인지 폐기물로 관리할 것인지에 대한 경계가 명확하지 않음으로 인해 폐기물로 처리하는 사례가 많았다. 일반적으로 정화를 목적으로 하는 준설의 경우 준설 후 발생하는 오니 및 오염퇴적토는 폐기물관리법을 적용하여 관리하고 있는데, 이러한 기준을 적용할 경우 준설토사를 폐기물로 간주하여 폐기물 관리법 제12조의 폐기물 공정시험 방법에 따른 용출시험 후 적합하게 처리하여야 한다. 용출시험결과 유해물질성분이 폐기물관리법 시행규칙 별표1의 유해물질 기준 이내일 경우 일반 폐기물로 간주되어 폐기물관리법시행령 제7조에서 규정한 처리절차를 거쳐 재활용 될 수 있다. 준설토사의 유해물질성분이 유해물질 기준을 초과할 경우 지정폐기물로 간주되어 폐기물관리법 제17조에 따라 등록된 업체에 의하여 처리된다. 이와 같이, 적절한 처리에 의해 재활용이 가능한 준설토를 폐기물로 간주하여 처분하는 것은 자원의 낭비라고 할 수 있으며 보다 합리적인 관리방안이 필요하다.

한편, 최근 환경부에서는 준설토를 최종적으로 성토재, 복토재로 재활용하거나 매립처분하는 경우 모두 결국 토양으로 유입되는 것이므로, 준설토를 토양으로 관리하기 위한 환경처리기준 및 재이용 방안 등의 체계적인 관리를 추진하고, 향후 토양정화단지 구축과 연계하여 준설토를 토양정화단지에서 처리함으로써 토양정화시장의 확대 및 활성화하는 계획을 수립하고 있다(환경부, 2009). 이와 비슷하게 최근 토목공사에 따른 준설인 경우 준설된 퇴적토를 토사로 간주하여 토양환경보전법에 따라 처리하는 경우가 많아졌는데, 동법 제14조의 규정에 의한 토양오염우려 기준이내일 경우 성토재, 도로기층재 등으로 재활용이 가능하며 기준을 초과할 경우 기준치이하로 정화하여 사용한다. 이번 4대강살리기 사업의 경우 준설 후 골재활용이 가능한 물량을 '관계법령'에 따라 처리 후 공사 등에 사용하고 나머지 물량은 토사로 간주하여 토양환경보전법에 따라 처리하도록 되어 있다(국토해양부, 2009). 이 또한 퇴적토의 특성 상 악취와 변색 등 주민들에게 막연한 불안감을 제공할 수 있는 점을 감안하여 토양환경보전법상의 단순한 오염물질 함량만을 기준으로 처리여부를 결정하기 보다는 퇴적토의 특성을 고려한 환경기준이 필요하다고 할 수 있다.

**2.2. 하천퇴적토 관리기준 및 재활용 기준 제안**

우선 국내 퇴적토 환경기준 마련을 위하여 가장 광범위

하게 외국과 국내 사례를 분석한 노력으로는 이창희·유혜진(2000)의 보고서가 있는데, 외국에서 사용하고 있는 다양한 퇴적물 관리기준을 취합하여 퇴적물 투기기준, 퇴적물 제거기준(정화기준), 퇴적물질기준으로 분류하였고 이를 근거로 우리나라 호소, 하천 및 연안퇴적물의 오염현황을 분석하였다. 또한 준설퇴적토의 재활용에 관한 연구는 윤길림 외(2008)가 제안한 해양준설토 재활용기준마련을 위한 연구가 있다. 우선 이창희·유혜진(2000)의 보고서는 국내 하천 퇴적토의 관리기준을 마련하기 위한 몇 가지 원칙을 시사하고 있는데, 첫 번째는 대부분의 외국 기준이 두 단계, 주변환경에 악영향을 미치지 않거나 미미한 악영향이 예상되는 수준과 악영향이 뚜렷하거나 빈번하게 나타나는 수준으로 구분되어 있다는 것이다. 이는 현행 토양환경보전법 상의 관리기준, 그리고 윤길림 외(2008)가 제안한 해양준설토사 재활용기준과 같은 접근방법으로 오염물질이 환경에 미치는 영향이 항상 일정농도에서 분명히 나타나는 것이 아니며 기준 설정 시 사용한 오염물질 농도와 악영향간의 관계가 기본적으로 통계적인 확률로 표현되기 때문이다. 또한 관리적인 측면에서 볼 때, 퇴적물 관리에 있어 안전함의 기준이 되는 우려기준(보고서상의 표현은 목표수준)과 더 이상 방치할 경우 악영향이 분명히 예상되어 적극적인 대책이 요구되는 대책기준으로 구분하는 것이 유용할 수 있기 때문이다. 둘째는 국내 퇴적물 오염물질 조사자료 중 중금속이 미흡하나마 다른 유해화학물질에 비하여 외국의 퇴적물처리기준을 이용한 간접적 오염평가가 가능한 수준이므로, 우선적으로 중금속에 대한 퇴적토 처리기준을 만드는 것이 가능할 것이다. 셋째는 국내에 전국적으로 적용할 수 있을 정도로 통계적 유의성이 확보된 자료가 절대적으로 부족하고 세계적으로도 아직까지 과학적으로 신뢰성 있는 일반적인 기준 설정방법이 없는 상황인 만큼 낙동강수계 등 지역에 제한적으로 적용할 수계별 퇴적물처리기준을 우선적으로 만드는 방안도 고려할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 위에서 언급한 두 연구와 같은 방법으로 선진 외국의 기준을 활용하여 국내 하천준설토 재활용 기준을 Table 1과 같이 만들어 보았다. 여기서 제안된 재활용 기준은 미국, 캐나다, 유럽 등 선진국의 담수퇴적물 환경기준을 그 엄격함에 따라 4개 그룹으로 나눈 후 평균한 값으로, 이 중 가장 엄격한 그룹의 기준을 사용하였으며 그룹의 평균값 중 가장 낮은 값을 안전한 재활용이 가능한 재활용 가능기준으로, 그 다음으로 낮은 값을 재활용 전 정화처리가 필요한 우려기준으로 분류하였다. 기준 항목은 금속과 총 PCB, 총 PAH 등 일반적인 하천퇴적토

조사항목 8가지를 포함하였다. 표에 나와있는 기준은 향후 추가적인 노력에 의해 전국 하천퇴적토 현황조사와 용출실험결과를 반영한 보완이 필요한 값으로 그 방법제시에 의미가 있다 하겠다. 이 기준은 국내 하천 퇴적토 오염현황자료가 아닌 외국자료를 인용하였으므로 국내적용에 안전성을 확보하기 위하여 매우 엄격한 기준이 되었는데, 추 후 지속적인 조사와 연구를 통하여 국내하천환경에 맞는 값으로 완성되어야 할 것이다.

**3. 재활용을 고려한 오염준설토 정화기법**

**3.1. 준설 하천퇴적토의 일반적 처리공정**

통상적으로 준설 작업을 통해 발생하는 준설토는 많은 양의 이물질과 함수율로 인해 중간처리과정이 필요한 폐기물이다. 자연정화, 현장처리를 포함한 오염퇴적토의 정화공법은 기존 퇴적토 연구논문 (김건하 · 정우혁, 2007;

**Table 1.** An example of the environmental standard for the beneficial use of dredged river sediment

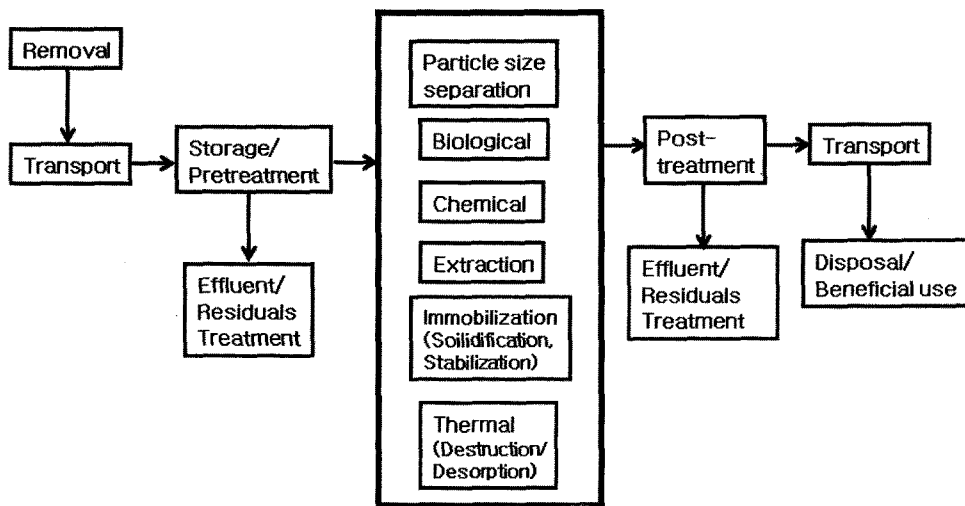
Item	Environmental Standard (mg/kg)	
	Recyclable Level	Worrisome Level
As	6.8	25
Cd	0.833	6.42
Cr	36.1	100
Cu	39.9	154
Pb	37.7	124
Hg	0.22	1.1
Total PAH	5,733	17,000
Total PCB	116	411

최상일 외, 2008)에 주로 미국의 사례를 기준으로 소개되어 있다. 본 논문은 준설 후 처리과정에 초점을 맞추고 미국 공병단(2000)이 제시한 준설퇴적토 처리공정(Fig. 1) 중 오염준설토 정화처리 공법을 가장 최근 자료인 미국 EPA의 보고서(USEPA, 2005)를 바탕으로 정리하였다.

준설된 하천퇴적토는 Fig. 1과 같이 준설 후 이송 및 탈수과정 등의 전처리 과정, 입도분리를 포함한 오염퇴적토 처리과정, 그리고 폐수 처리 및 매립까지의 후처리 공정으로 크게 구분할 수 있다 (US Army, 2000). 여기서 함수율이 높은 준설토의 특성과 처리 후 배출되는 폐수처리, 그리고 처리 전후의 운반작업을 포함하여 고려해야 되는 전, 후처리 과정이 포함된다는 점이 준설토처리의 특징이라 할 수 있고 오염준설토의 처리과정은 오염토양 처리과정과 비슷하다. 본 논문에서 초점을 맞추고 있는 오염퇴적토 처리과정은 입도분리, 생물학적 처리, 화학적 처리, 세척, 안정화, 열처리 등 여섯 개의 대표적인 기술이 있으며 미국 EPA 보고서(USEPA, 2005)에 정리된 내용을 바탕으로 첨삭하여 다시 정리하면 Table 2와 같이 요약할 수 있다. 국내에는 우선적으로 국가적 차원에서, 혹은 공신력 있는 기관에 의한 Fig. 1과 같은 일반적 처리 절차 확립이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 틀 안에서 재활용을 극대화 시킬 수 있는 처리시스템을 제안하였고 다음 장에 서술 하였다.

**3.2. 재활용을 고려한 준설토 처리시스템 개요**

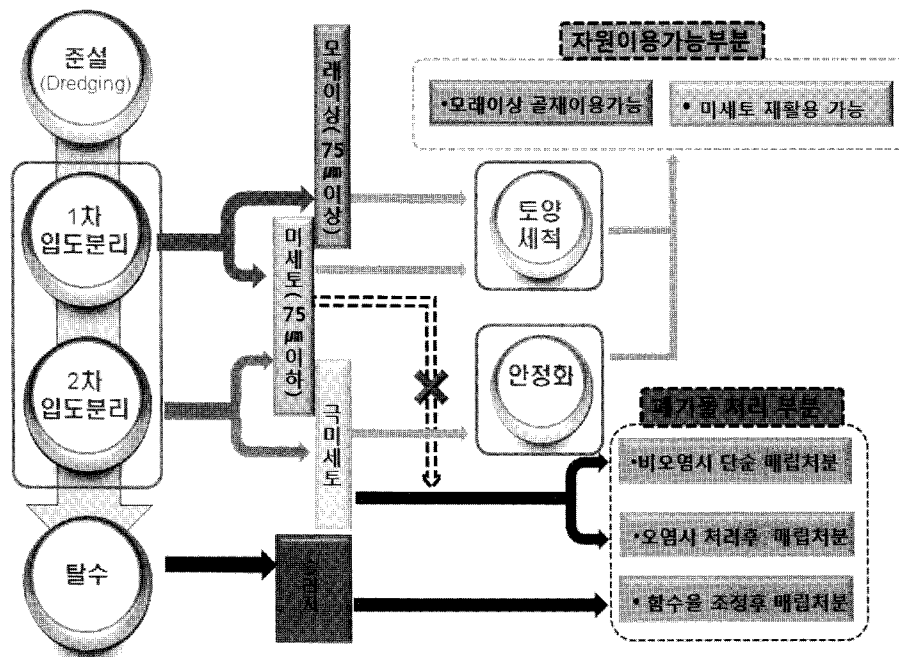
본 연구에서는 오염퇴적토 처리공법 중 세척, 안정화, 그리고 입도분리 공법을 적용하여 복합적인 준설퇴적토 정화시스템을 제안하고자 한다. 시스템 개발의 지향점은



**Fig. 1.** The treatment procedure for dredged sediment (U.S. Army, 2000).

**Table 2.** Remediation technologies for contaminated dredged sediments (USEPA, 2005)

Technologies	Operational Characteristics
Bioremediation	1. Environmental-friendly 2. Site-specific information required
Chemical Treatment	1. Quick response 2. Concern for secondary contamination
Extraction/Washing	1. Contaminants essentially removed 2. Sludge and wastewater treatment required
Immobilization or Solidification/Stabilization	1. Reduced risk by applying stabilizing agent 2. Applicable to fine sediment
Thermal Treatment	1. Complete removal 2. High energy & cost
Particle Size Separation	Limited application upon contamination characteristics



**Fig. 2.** The schematic view of dredged sediment remediation system suggested in this study.

첫째, 입도 및 오염도별로 선별적인 공법적용으로 처리효율을 높여 앞으로 기준확립이 필요시 되는 재활용 환경기준을 만족시키고, 둘째로 입도분리를 통하여 정화대상물량을 늘리고 이를 통하여 재활용물량의 증대와 최종폐기 대상 사토의 양을 최소화 하는 것이다.

본 정화시스템은 연속적으로 준설토의 입도를 분리하여 처리가 용이한 조립질 퇴적토는 통상적인 세척공정으로 정화시키고, 미세토는 오염특성 및 재활용 용도에 따른 심화 처리하는 기술 개발을 포함하고 있다(Fig. 2). 우선 1차 선별 및 분리 과정을 통해 1차 입도분리 기준 보다 큰 입자는 일반적인 습식선별세척을 통해 정화시키고, 1차 입도분리 기준 이하의 입자에 대해서는 2차 입도분리

를 실시하여 오염도에 따라 안정화 공법과 고도세척 공법을 선택적으로 적용한다. 이때, 1차 입도분리 기준은 한국의 골재 품질기준, 세척공정의 효율 및 재활용을 위한 규격을 고려하여 0.074 mm로 결정하는 것이 합리적으로 판단되었다. 한국공업규격의 잔골재 입경기준이 0.074 mm 이고 모래(0.075~2 mm)에 대해 통상적인 습식선별 세척 기술의 효율이 일반적으로 70~80% 이상임을 근거로 이와 같이 결정하였다. 기존에 폐기처분되던 1차 입도분리 기준 이하의 준설잔토(사토)에 대해서는 2차 입도분리를 실시하여 오염농도 특성과 재활용 방안에 따라 안정화와 고도세척처리 기술을 선택적으로 적용할 수 있는 시스템을 구축하여 재활용율을 극대화하고 동시에 폐기되는 사

토의 양을 최소화 할 수 있다. 즉, 고농도 오염준설토로 오염물질의 근본적인 제거가 필요할 경우에 미세토 고도 세척을 적용하고, 상대적으로 중, 저농도의 오염 퇴적토가 광범위하게 분포할 경우에는 생물학적 이용성을 저감시키는 안정화 처리기술을 적용하는 것으로 한다. 2차 입도분리 기준은 외국의 하천퇴적토 입도분포 및 오염도를 조사한 결과를 분석한 결과(Detzner et al., 1995) 80% 내외의 오염물질이 집적되어있는 0.025 mm가 적용되었으나, 체계적인 국내 하천퇴적토 조사를 바탕으로 보다 국내 실정에 맞는 기준으로 재조정 되어야 할 것이다.

### 3.3. 입도분리의 효율성과 1차 입도분리 후 세척공정

1차 입도분리 기준인 0.074 mm 이상의 준설퇴적토는 일반적으로 시행중인 습식 선별세척공정을 거쳐 재활용되며 일반적으로 처리효율이 높은 편이다. 국내에서 일반적으로 오염토 정화를 위해 적용되는 토양세척공법은 전처리인 선별단계, 화학적 분리기술을 포함하는 토양세척 단계, 후처리인 수처리 단계를 모두 포함하는 광의의 의미인 토양세척공법으로 사용된다. 화학적 분리기술이 배제된 협의의 의미로서 토양세척의 기본원리는 다음의 두가지 가정에 근거를 두고 있다. 첫째는 오염물질이 입자가 작은 토양에 많이 분포되어 있어 이것만을 분리하여 부피를 감소시킨 후 처리할 수 있다는 것과, 둘째는 토양입자와 화학적으로 결합되지 않은 오염물질이 물리적인 방법으로 쉽게 토양과 분리할 수 있다는 것이다. 따라서 협의의 의미로서 토양세척의 주된 목적은 완전한 토양재생이 아니고 오염된 토양의 부피를 감소시키는 것이라고 하겠다.

하상퇴적토의 경우, 일반적으로 중금속 오염농도는 전체적으로 육상의 오염토양에 비해 낮은 편이지만, 재활용 가능한 하상골재가 구간별로 구분되지 않고 주로 총상으로 분포하며 특히 지천 합류부에서는 복합적인 퇴적 현상에 의하여 자갈, 모래 및 실트층이 매우 복잡하고 불규칙적으로 수평 및 수직방향으로 섞여 있으므로 준설토 자체로는 규격화된 골재 활용이 어렵다. 또한 하상퇴적토 내에 포함되는 진한색의 유기불순물은 골재로서의 강도, 내구성, 안정성을 저하시킨다. 따라서 유기불순물과 미세토를 포함하는 준설토를 골재로서 재활용하기 위해서는 협의의 의미로서 토양세척공정인 준설토 세척 및 선별이 필요할 것이다. 이러한 준설토 처리방법은 종래 일반적으로 시행되던 폐기물 매립처리의 여러 가지 문제점을 개선하여 불용토로 분류되던 준설토에 포함된 모래를 깨끗이 분리하여 골재로 이용하여 폐기물 재활용과 감량의 효과를 가져 올 수 있다.

### 3.4. 2차 입도분리 후 고도세척공정

지금까지 0.075 mm 이하의 준설토사가 폐기처분되었던 이유는 일반적으로 하상 퇴적물 내에서 오염물질은 미세입자에 더 많이 농축되고 미세입자가 많을수록 세척효율도 낮은 특성으로 인해 이러한 퇴적물의 처리에 있어서는 시간과 비용이 많이 들기 때문이었다. 미세입경 입자는 점토광물, 유기물, 석영, 장석, 탄산염 광물, 철이나 망간산화물, 수산화물 입자로 구성되며, 비표면적이 크고 이온교환능이 높으므로 하천수계 시스템에 배출된 오염물질을 효과적으로 흡착, 제거하는 기능도 있는 반면에 준설 후에는 준설토 내에서 축적된 오염물질의 제거가 그만큼 더 어려운 측면도 있다. 이러한 미세입자들을 기존의 기술로 정화가능한 입도별로 다시 분리하면 폐기처분되는 사토의 양을 그만큼 줄일 수 있을 것이다.

미세토에 대한 고도세척처리는 적용멀티사이클론 혹은 울트라사이클론을 이용하여 중금속 축적량이 많고 처리효율이 저하되는 극미립토(0.025 mm 이하)를 분리하는 2차 선별과정 후 2차 분리 기준점 이상의 미세토 중 오염도가 높은 오염도가 에 대하여 적용한다. 현재 국내에서 제작, 생산되는 습식 사이클론은 고액분리 후  $D_{90}$ (전체의 90%를 차지하는 입경)이 대략 0.045 mm,  $D_{50}$ (전체의 50%를 차지하는 입경)이 0.013 mm로 나타나 적절한 압력과 규격으로 운전한다면 모래를 분리하여 재활용하고, 오염도가 높은 극미립토를 분리하는 공정에 적합한 것으로 판단된다. 중금속 추출, 제거를 위해 일반적으로 쓰이는 방법은 산 분해법으로, 중금속을 산용액과 반응시켜 중금속을 용출시키는 방법이다. 그러나 일반적으로 하구언 근처의 준설토는 pH 8 정도의 알칼리성을 띄고 있으며, 중금속의 존재형태가 입자형의 안정한 형태(residual type) 혹은 혐기성 환경에서 황화물 결합의 형태로 존재하는 경우가 많아 산 분해법 적용 시 고농도의 산용액을 과다 투입해야 하므로 경제성 및 폐수처리 문제가 발생된다. 따라서 본 연구에서는 고농도의 산용액의 사용을 억제하고 중금속 정화효율을 향상시키기 위한 방법을 연구 개발중에 있다.

### 3.5. 2차 입도분리 후 안정화공정

본 연구가 제안하는 시스템은 세척공정과 더불어 2차 입도분리 기준 이상의 미세토 중 오염도가 낮은 준설퇴적토에 대해서 안정화 공법을 적용한다. 오염물질을 퇴적토에 포함한 채 불용화 시키는 기술인 안정화공법은, 오염물질을 근원적으로 제거하는 세척에 비하여 2차오염에 대한 우려가 존재할 수 있는 점을 고려하여 오염도가 낮은 경우에 적용하도록 하였다.

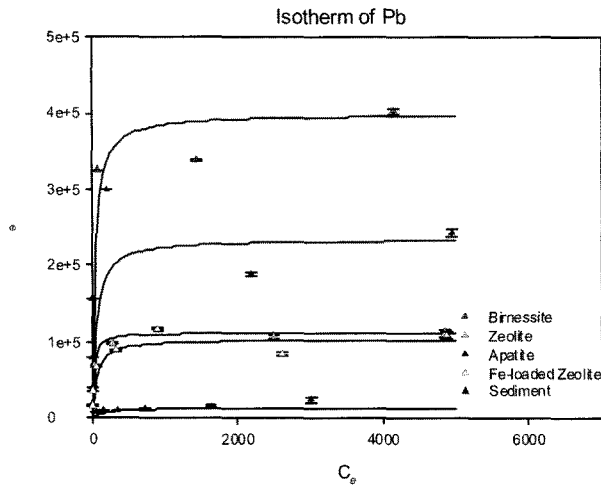


Fig. 3. The sorption isotherm chart for Pb (Lee et al., 2009).

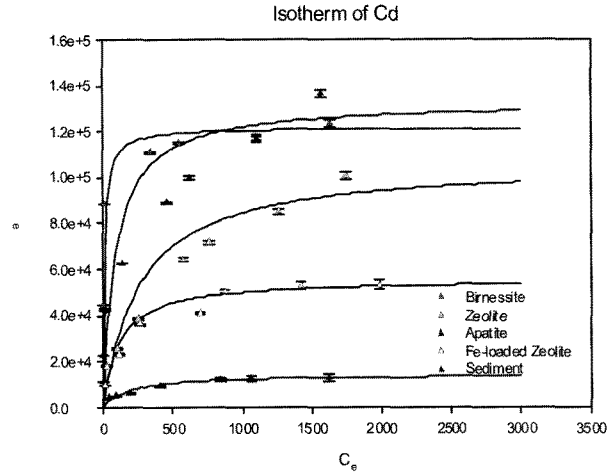


Fig. 4. The sorption isotherm chart for Cd (Lee et al., 2009).

Table 3. Langmuir sorption isotherm parameters for tested stabilizing agents (Lee et al., 2009)

		Birnessite	Zeolite	Apatite	Fe-loaded Zeolite
Pb	C <sub>sm</sub> (mg/kg)	5.38 × 10 <sup>5</sup>	1.13 × 10 <sup>5</sup>	3.74 × 10 <sup>5</sup>	1.04 × 10 <sup>5</sup>
	b (l/kg)	2.90 × 10 <sup>-1</sup>	5.10 × 10 <sup>-2</sup>	6.00 × 10 <sup>-1</sup>	1.80 × 10 <sup>-2</sup>
Cd	C <sub>sm</sub> (mg/kg)	1.22 × 10 <sup>5</sup>	1.07 × 10 <sup>5</sup>	1.33 × 10 <sup>5</sup>	5.55 × 10 <sup>5</sup>
	b (l/kg)	8.31 × 10 <sup>-2</sup>	3.82 × 10 <sup>-3</sup>	1.11 × 10 <sup>-2</sup>	9.04 × 10 <sup>-3</sup>

중금속 오염 퇴적토를 안정화 공법으로 처리하기 위해서는 최적안정화제의 선정이 가장 중요한데, 납과 카드뮴으로 오염된 퇴적토를 대상으로 birnessite, zeolite, apatite, Fe-loaded zeolite의 안정화 효율을 비교한 결과 birnessite와 apatite가 가장 효율적인 안정화제로 나타났다 (Lee et al., 2009). 이 연구에서 특이한 점은 Fig. 3과 Fig. 4와 같은 실험결과를 해석할 때, 최대흡착량과 흡착 강도를 함께 고려하여 최적안정화제를 선정하였다는 점이다. Lee et al.(2009)의 등온흡착 실험결과에 Langmuir 모형을 적용하여 도출한 실험대상 안정화제 별 최대 흡착량(C<sub>sm</sub>)과 흡착 강도(b)는 Table 3과 같다. 각 중금속에 대한 안정화제의 최대흡착량은 대략 비슷한 범위(약 10<sup>5</sup> mg/kg)에서 측정되었으나, 흡착강도는 납에 대하여 0.018~0.6 l/kg, 카드뮴에 대하여 0.0038~0.083 l/kg으로 차이를 보였다. 이 중 안정화제에 의한 흡착이 쉽게 탈착되지 않도록 강한 결합에 의해 오염물질을 구속하기 위해서는 등온 흡착 곡선의 기울기와 상관있는 흡착강도 계수 b가 클수록 유리할 것으로 판단하여 두 중금속에 대하여 가장 큰 b값을 가지는 birnessite와 apatite를 최적 안정화제로 선정하였다. 또한 birnessite와 apatite의 안정화 효율을 연속식 추출법(sequential extraction)을 통하여 검증하였는데

(Tessier et al., 1979), 연속식 추출법은 1g의 추출 대상 매질을 단계적으로 서로 다른 용매를 이용하여 추출함으로써 물질의 결합(흡착) 강도를 살펴보는 방법으로 널리 사용되고 있다. 추출은 5단계로 나누어 수행하였으며, 추출 용매의 중금속 농도를 분석한 결과 birnessite와 apatite가 Zeolite와 Fe-loaded zeolite에 비하여 상당히 강하고 안정적인 결합을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 검증절차를 통하여 납과 카드뮴에 오염된 준설퇴적토의 안정화제로 birnessite와 apatite가 가장 적합함을 확인 하였다(Lee et al., 2009).

#### 4. 결론 및 제언

본 논문을 통하여 국내 하천 준설퇴적토 관리 및 재활용 기준 확립의 필요성을 알아보았고 재활용 기준과 재활용을 고려한 준설토 처리시스템을 제안하였다. 제안된 하천준설퇴적토 재활용 기준은 금속과 총 PAH, 총 PCB 등 8가지를 항목을 포함하였고 바로 재활용이 가능한 활용가능기준과 정화가 필요한 우려기준으로 나누었는데, 향후 합리적으로 보완, 발전시켜 국내실정에 맞는 기준으로 발전시켜야 할 것이다. 더불어 제안된 준설퇴적토 정화시

시스템은 입도분리 후 정화공법을 분리 적용함으로써 재활용량을 늘리고 정화효율을 높이기 위하여 개발되었다. 정화공정은 우선 1차 선별 및 분리 과정을 통해 1차 입도분리 기준인 0.074 mm 보다 큰 입자는 일반적인 습식선별세척을 통해 정화시키고, 이보다 작은 입자에 대해서는 2차 입도분리(기준점 0.025 mm)를 실시하여 오염도에 따라 안정화 공법과 고도세척 공법을 선택적으로 적용한다. 1차 입도분리 후 오염도가 높은 준설퇴적토에는 화학적 추출을 가미한 고도세척을, 오염도가 낮은 퇴적토에는 안정화공법을 적용하는데, 실험결과 중금속에 대하여 birnessite와 apatite가 가장 우수한 안정화제로 나타났다. 이러한 연속적인 입도분리 및 오염도별 분류작업으로, 최종적으로 정화처리 후 재활용이 가능한 부분과 단순폐기 처리 될 오염도 높은 극미립토가 분리되어 재활용기준을 만족시키는 안전한 재활용과 재활용물 증대의 두가지 효과를 기대할 수 있다. 제안된 시스템은 우선적으로 중금속을 대상으로 그 효율을 검증하였으나, 시스템의 주요 요소기술인 세척과 안정화가 유기오염물질 제거에 우수한 공법으로 알려져 있는 만큼 PAH, PCE 등 Table 1에 제안된 모든 재활용 기준 항목에 대해서 적용이 가능할 것으로 판단된다. 현재까지 파일럿 규모의 장치를 통하여 처리효율과 경제성을 검증하였으며, 향후 현장실증실험을 통하여 현장적용성을 평가할 예정이다. 이러한 노력을 바탕으로 한 지속적인 연구를 통하여 오염현황조사, 재활용 기준확립 및 기준에 맞는 준설퇴적토 처리 등 국가적인 하천 준설수요 증대에 대응하는 체계적이고 합리적인 하천 준설퇴적토 관리방안이 완성될 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 자연과 함께 하는 하천복원기술개발(ECORIVER21)연구단(06건설핵심B01)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 국토해양부, 2009, 4대강살리기 마스터플랜.  
 김건하, 정우혁, 2007, 오염퇴적물 관리방향 및 처리공법, 지하수토양환경, 12(3), 1-9.  
 박준범, 김세중, 2007, 국내 오염퇴적토사 준설의 현황, 대한토목학회지, 55(4), 58-65.  
 박준범, 김세중, 2007, 해상 오염준설토사의 처리, 처분 및 재활용 방안, 대한토목학회지, 55(4), 66-74.

신원식, 김좌관, 이남주, 김영훈, 황인성, 2006, 낙동강 및 호스퇴적물이 수체에 미치는 영향, 낙동강물환경연구소.

윤길림, 이찬원, 정우섭, 2008, 준설토 유효활용을 위한 한국형 환경기준개발, 한국지반공학회논문집, 24(5), 5-13.

이창희, 유혜진, 1998, 호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안, 한국환경정책·평가연구원.

이창희, 유혜진, 2000, 수저퇴적물 환경기준 개발에 관한 연구, 한국환경정책·평가연구원.

황경엽, 박성열, 정재호, 김영훈, 백원석, 신원식, 이남주, 황인성, 2007, 낙동강 퇴적물 내 중금속 존재 형태 및 용출 가능성, 상하수도학회지, 21(1), 113-122.

환경부, 2009, 토양보전기본계획.

환경부, 2007, 폐기물관리법.

Detzner, H.D., Strom, Hafenbau, 1995, The Hamburg Project METHA: large scale separation, dewatering and reuse of polluted sediments, *European Water Pollution Control*, 5(5), 38-42.

DGE, 2002, Dutch-German Exchange on Dredged Material - Part 2 Treatment and Confined Disposal of Dredged Material.

Lee, S., An, J. Kim, Y.-J., and Nam, K., 2009, Birnessite as an immobilizing agent in heavy metals contaminated sediments, *SETAC Conference*, New Orleans, LA, USA, p. 19-23.

NOAA, 1999, Sediment Quality Guidelines Developed for the National Status and Trends Program.

Palermo, M.R., Schroeder, P.R., Estes, T.J., and Francingues, N.R., 2008, Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, ERDC/EL TR-08-29.

Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M., 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal, *Anal chem*, 51(7), 844-850.

US Federal Register, 1973, Ocean dumping: Final regulations and criteria, 38(198).

USACE, 2000, Dredging and dredged materials disposal, US Army Corps Engineers, Washington, DC., EMI110-2-5025.

USEPA, 1998, EPA's Contaminated Sediment Management Strategy, USEPA, Office of Water, Washington DC, EPA 823/R-98/001.

USEPA, 2005, Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites, USEPA, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC, EPA-540-R-05-012.

Wenning, R.J., Stern, E.A., Jones, K.W., and Douglas, W.S., 2001, The WDR program and emerging decontamination technologies for contaminated sediments, *Contaminated Soil Sediment and Water*.