

## 소하천형 호수의 수질개선을 위한 퇴적저니 처리방안 연구

배우근 · 이창수\* · 정진욱 · 최동호

한양대학교 토목 · 환경공학과

\*위덕대학교 환경과학과

## Treatment of Contaminated Sediment for Water Quality Improvement of Small-scale Reservoir

Wookeun Bae · Chang-Soo Lee\* · Jin-Wook Chung · Dong-Ho Choi

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

\*Department of Environmental Science, Uiduk University

### ABSTRACT

Pollutants from industry, mining, agriculture, and other sources have contaminated sediments in many surface water bodies. Sediment contamination poses a severe threat to human health and environment because many toxic contaminants that are barely detectable in the water column can accumulate in sediments at much higher levels. The purpose of this study was to make optimal treatment and disposal plan of sediment for water quality improvement in small-scale reservoir based on an evaluation of degree of contamination. The degree of contamination were investigated for 23 samples of 9 site at different depth of sediment in small-scale J river. Results for analysis of contaminated sediments were observed that copper concentration of 4 samples were higher than the regulation of hazardous waste (3 mg/L) and that of all samples were exceeded soil pollution warning levels for agricultural areas. Lead and mercury concentration of all samples were detected below both regulations. Necessary of sediment dredge was evaluated for organic matter and nutrient through standard levels of Paldang lake and the lower Han river in Korea and Tokyo bay and Yokohama bay in Japan. The degree of contamination for organic matter and nutrient was not serious. Compared standard levels of Japan, America, and Canada for heavy metal, contaminated sediment was concluded as lowest effect level or limit of tolerance level because standard levels of America and Canada was established worst effect of benthic organisms. The optimal treatment method of sediment contained heavy metal was cement-based solidification/stabilization to prevent heavy metal leaching.

**Keywords :** sediment, dredging, degree of contamination, remediation, solidification/stabilization

### 요약문

본 연구는 소하천형 호수의 수질개선 및 친환경적 생태공원조성을 위한 퇴적저니 처리방안을 수립하기 위하여 기존에 실시된 기본계획의 타당성 및 퇴적저니의 오염도 등을 검토하고 이를 토대로 최적의 퇴적저니 처리 · 처분계획을 수립하는데 목적이 있다. 퇴적저니의 정확한 오염도 분석을 위하여 총 9개 지점에 대해 저나층별로 23개소에 대한 퇴적저니를 채취하여 오염도를 분석한 결과 Cu의 경우 4개 시료가 지정폐기물 기준(3 mg/L)을 초과하였다. 거의 전 지점의 시료가 농경지에 대한 Cu의 토양오염우려기준(50 mg/kg)을 초과한 것으로 조사되었다. 그외 Pb 및 Hg은 모두 기준이하로 분석되었다. 퇴적저니의 적정 처리방안을 수립하기 위하여 유기물 및 영양염류 오염도에 따른 퇴적저니의 준설필요성 여부를 국내 팔당호 및 한강하류 적용기준과 일본 동경만 및 요코하마만 적용기준에 의거 검토하고, 또한 중금속 오염도에 따른 퇴적저니의 처리여부를 일본, 미국 및 캐나다 기준을 적용하여 검토한 결과, 유기물 및 영양염류에 대한 오염도는 심각한 수준은 아니었으며, 유해물질에 의한 오염도는 일본기준에는 대부분 만족하나 저서생물에 미치는 악영향을 기준으로 설정된 미국 및 캐나다 기준에 대해서는 모두 중간오염 또는 심한오염에 해당하

\*Corresponding author : cslee@mail.uiduk.ac.kr

원고접수일 : 2002. 8. 19 계재승인일 : 2002. 12. 02

는 것으로 판정되었다. 그래서 퇴적저니 처리방안을 검토하기 위하여 선진국에서 많이 사용되고 있는 퇴적저니 정화 방안 중 중금속 안정화에 효과적인 고형화안정화 방안을 검토한 결과 저니내의 Cu의 용출농도를 줄일 수 있었다. 또 한 혼합된 시멘트 고화체는 높은 압축강도를 나타내어 건설용 토사나 재방성토용으로 사용가능할 것으로 생각되었다.

**주제어 :** 퇴적저니, 준설, 오염도평가, 정화방안, 고형화안정화

## 1. 서 론

최근 산업화의 진전과 소비의 증가 및 변화에 따라 각종 생활오수, 공장폐수 및 축산폐수 등과 같은 점오염원에 발생된 오염물질과 강우나 강설에 의해 비점오염원에서 발생된 오염물질이 다량 수계로 유입되면서 호소나 하천, 해양 등의 수질을 극도로 악화시키고 있는 실정이다. 이에 반하여 국민생활의 질적향상과 더불어 더 나은 환경질의 요구됨에 따라 그동안 등한시 해 온 환경보전에 대한 국민들의 인식이 높아지기 시작하였고, 공공수역의 수질회복을 위한 사회간접시설인 환경기초시설의 투자에 대한 관심이 높아지기 시작하였다(국립환경연구원, 1990). 2000년 말 우리나라의 하수도 보급률은 70%, 하수관거 보급률은 65%로 나타났으며(환경부, 2001) 현재에도 공공수역의 수질회복에 노력하고 있지만 이러한 노력에도 불구하고 공공수역의 수질은 점점 악화 일로에 있다. 이처럼 공공수역으로 유입되는 외부오염원의 제어에도 불구하고 수질이 점차 악화되는 것은 내부오염원에 대한 영향도 매우 큼 것으로 사료된다. 내부오염원의 경우 외부오염원과 달리 육안으로 확인되지 않아 관리가 어려울 뿐 아니라 제어하기 쉽지 않다. 하지만 효율적인 공공수역의 수질관리를 위해서는 외부오염원의 제어뿐만 아니라 공공수역의 내부오염원의 제어가 병행되어야만 양질의 수질로 회복될 수 있을 것으로 판단된다.

내부오염원의 주된 오염물질은 퇴적물인데, 이는 집수 유역내 비점오염원과 점오염원에서 발생된 오염물질과 토사가 강우시 하천이나 호수, 연안 등으로 유입되어 하저나 해저에 퇴적되어 저수량을 감소시킬 뿐만 아니라 퇴적물 내에 함유된 유기물질, 질소나 인, 중금속류 등과 같은 각종 오염물질로 용존산소를 고갈시켜 호수나 해수 저층을 무산소 상태 형성하여 영양염류나 중금속들의 재용출 가능성을 높이고 있으며, 이들 오염물질로 인해 호수나 연안이 부영양화되어 수환경을 파괴시키고 수자원으로서의 가치가 상실되어지고 있다(박영동, 1988; 전상호등, 1998; 조규송등, 1997; 국립환경연구원, 1997).

국내에서의 퇴적 오니의 제거는 1980년 후반에 들어서야 관심을 갖기 시작하였는데, 마산항의 퇴적물 제거사업을 비롯하여 1993년에는 팔당호 수질개선을 목적으로

‘팔당호 퇴적물 준설사업 기본계획’의 수립시에 외국 사례를 중심으로 하여 준설기준을 제시한 바 있다(환경처, 1993). 동 계획은 여러 사정으로 무산되었으며, 현재 서울시에서 한강의 수질개선을 목적으로 1994년부터 한강하류의 퇴적오니 준설사업을 시행중에 있다(서울시 한강관리사업소, 1993). 외국의 경우 준설에 의한 오니토의 제거는 60년대부터 시행되었다. 특히 미국은 60년대 이후 Washington의 Green호에서 준설을 시작한 이래부터 지금 까지 저수지의 저수용량유지 및 수질 개선사업의 일환으로 준설사업을 시행하였다(U.S.EPA, 1990a; U.S.EPA, 1990b; U.S.ACE, 1993; U.S.EPA, 1993b). 일본 역시 70년대 초반 하천수질개선을 위해 취방초의 준설을 시작으로 현재까지 준설사업을 실시하고 있다. 특히 일본은 과거 20년간의 축적된 기술을 이용하여 오니준설에 의해 발생되는 2차 오염 방지 방법과 준설오니토의 효율적인 처리방법, 준설 후의 사후관리 등에 대한 지속적인 연구가 병행되고 있다(日本土木學會, 1975; 角田省吾, 1997).

소하천형 호수의 퇴적저니의 처리를 위해서는 우선적으로 오염도 평가가 필요하다. 유기물 및 영양염류 오염토에 대한 준설 필요성 여부는 국내 팔당호 및 한강하류 적용기준과 일본 동경만(水質法令研究會, 1996)과 요코하마만 적용기준(環境廳環境法令研究會, 1998)에 의거하여 검토하고 중금속 오염도에 따른 퇴적저니 처리여부는 일본의 담수퇴적물 제거기준, 미국환경보호청 기준(U.S.EPA, 1993a)과 해양대기청 기준(NOAA, 1998) 및 캐나다 환경부의 담수퇴적물 기준(Environment Canada, 1998)을 적용하여 검토하고자 하였다.

일반적으로 정체수역의 오염퇴적물을 정화에 사용가능한 방법으로는 자연정화, 현위치 안정화처리, 퇴적물 제거, 표면파복, 주위환경과의 차단등의 기술이 있다. 그러나 오염퇴적층 복원처리기술은 오염물질의 종류, 퇴적물의 특성 등 지역의 특성에 따라 적용기술이 달라지므로, 복원처리기술을 적용하기 위해서는 사전 현장조사 기법의 개발과 기초 실험 및 현장 pilot-scale test를 수행하여 처리장치 설계를 위한 자료를 확보해야 한다. 특히, 중금속과 유기물질 등의 혼합물질로 오염된 퇴적물을 정화할 수 있는 적절한 기술개발이 필요하다. 본 연구에서는 오염도 평가 결과를 토대로 소하천형 호수의 수질개선을 위해 중금속

안정화에 유리한 고형화/안정화 방법을 선정하여 퇴적저니를 처리해 보고자 하였다.

## 2. 시료 및 실험방법

### 2.1. 국내외 퇴적저니 오염도 평가기준

#### 2.1.1 생활환경 기준항목

퇴적저니의 준설여부에 대한 국내 기준은 아직 설정되어 있지 않지만, 국내 사례 중 필당호 및 한강하류에 대한 준설여부 결정시 기준으로 하였던 유기물이나 영양염류 등에 의해 오염된 유기퇴적물의 제거기준에 적용되는 항목은 총인(T-P), 총질소(T-N) 및 화학적 산소요구량(COD)과 강열감량 및 황화물농도이다(환경처, 1993; 이와 김, 1998).

#### 2.1.2 건강보호 기준항목

퇴적저니의 준설여부 결정시 유기물이나 영양염류 등의 유기퇴적물 제거기준이외에 중금속 및 poly chlorinated biphenyls (PCBs)등의 유해물질이 수생식물 및 국민건강에 크게 악영향을 미치므로 이들 물질에 대한 검토도 필요하다. 중금속 및 PCBs 등에 대한 퇴적저니 기준은 국내에는 아직 설정되어 있지 않은 실정이며, 더욱이 이에 대한 처리사례도 없어 부득이 미국, 캐나다 및 일본 기준에 준거하여 준설여부를 검토하였다.

#### (1) 일본의 담수퇴적물에 대한 유해폐기물 판정기준

일본은 시안(1.0 mg/L), 알킬수은(불검출), 유기인(1.0 mg/L), 카드뮴(0.1 mg/L), 납(1.0 mg/L), 6가 크롬(0.5 mg/L), 비소(0.5 mg/L), 총수은(0.05 mg/L), PCBs (0.003 mg/L)등 9종의 유해물질에 의해 오염된 퇴적물은 수생생물 및 인체 건강에 대한 악영향이 매우 크기 때문에 1972년 퇴적물 잠정제거기준을 제정하였다(이와 김, 1998; 環境廳

環境法令研究會, 1998).

#### (2) 미국환경청의 담수퇴적물 오염분류를 위한 기준

미국 5대호유역의 지역환경보호청은 지역적인 특성 및 관리의 필요성에 의해 퇴적물 관련기준을 개발하였는데 국내 여러 문헌에서 자주 인용되고 있는 미국 지역환경보호청의 퇴적물 오염분류 기준은 Table 1(Anon, 1977; U.S.EPA, 1993a)과 같다.

#### (3) 미국 해양대기청의 퇴적물 환경권고지

미국 해양 대기청은 퇴적물 오염지역 선별, 오염평가, 오염퇴적물 정화 등의 오염퇴적물 관리를 위해 「오염현황 및 오염추이 파악을 위한 조사 프로그램」에서 퇴적물 오염평가를 위해 환경보호청의 해양퇴적물 기준치와 더불어 중금속, PAHs, PCBs 및 농약성분에 대해 자체적인 퇴적물 환경권고지(Sediment Quality Guideline)을 설정해 놓고 있다(이와 김, 1998; NOAA, 1998)(Table 1 참조).

#### (4) 캐나다 환경부의 담수퇴적물의 잠정환경기준

캐나다 환경부는 수생생물 보호를 위해 오염물질 및 해양퇴적물과 관련 퇴적물 환경기준 개발을 위한 프로토콜을 발표한 후, 1998년에 잠정 퇴적물 환경권고지(Interim Sediment Quality Guidelines, ISQGs)와 악영향 기대수준(Probable Effect Level, PEL)을 발표하였다. 이 퇴적물 환경지침(Environment Canada, 1998; 1994)은 기본적으로 미국 해양대기청의 「전국 오염현황 및 전망 프로그램」에서 사용하는 방법에 의해 개발되었기 때문에 저서생물에 미치는 악영향을 확률적으로 제시하고 있다. 잠정 퇴적물 환경권고지미만의 농도는 저서생물에 대한 악영향이 거의 없는 오염되지 않은 퇴적물의 상태를 나타낸다. 악영향 기대수준이상의 농도는 수생생물에 대한 악영향이 빈번하게 나타날 수 있는 수준으로 퇴적물 오염이 상당히

**Table 1.** Regulation values of U.S. EPA, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) and Environment Canada for contamination evaluation of sediments

항목	비오염 <sup>1)</sup> (mg/kg)	중간오염 <sup>1)</sup> (mg/kg)	심한오염 <sup>1)</sup> (mg/kg)	ERL <sup>2)*</sup> (mg/kg dry wt)	ERM <sup>2)**</sup> (mg/kg dry wt)	ISQG <sup>3)***</sup> (mg/kg)	PEL <sup>3)****</sup> (mg/kg)
Cu	<25	25~50	>50	34	270	35.7	197
Pb	<40	40~60	>60	47	220	35.0	91.3
Hg	-	-	>1.0	0.15	0.71	0.17	0.49

1) 미국환경청의 담수퇴적물 오염분류 기준.

2) 미국해양대기청의 퇴적물 환경권고지.

3) 캐나다 환경부의 담수퇴적물 잠정기준.

\*ERL(Effects Range Low): 악영향을 끼칠 수 있는 범위의 최소농도.

\*\*ERM(Effects Range Median): 악영향을 끼칠 수 있는 범위의 중간농도.

\*\*\*ISQG(Interim Sediment Quality Guidelines): 잠정퇴적물 환경권고지.

\*\*\*\*PEL(Probable Effect Level): 악영향 기대수준.

진행된 상태를 나타낸다. 또한 ISQGs와 PEL사이의 농도는 악영향이 가끔 발생하는 정도로 오염된 상태를 나타낸다(Table 1 참조).

## 2.2. 퇴적저니 오염도 분석

일반적으로 호소 또는 하천의 퇴적저니 관리수준은 대상저니의 오염도에 크게 의존한다. 오염이 경미한 경우 별 다른 관리가 필요하지 않은 반면, 오염이 심한 경우 준설 등 적극적인 조치가 요구된다. 따라서 퇴적저니의 오염도 분석은 저니의 처리처분방안 수립을 위한 중요한 초기단계 작업이다. 경기도 인근 소규모 하천내의 9개 지점 23개 채취시료에 대한 심도별 시료채취 및 분석을 수행하게 되었다(시료채취지점 Fig. 1 참조). 대상하천의 총면적은  $193,895 m^2$ (지목상면적:  $107,105 m^2$ , 수면적:  $86,840 m^2$ )이며 평균수심은  $2.77 m$ 로 소규모 하천이다. 모든 시료에 대해 담수 퇴적물 기준항목인 강열감량 및 유해폐기물 기준항목인 중금속 등에 대한 오염도를 평가하였다. 오염도에 대한 평가는 아직까지 국내에서는 퇴적저니 처리에 대한 기준이 설정되어 있지 않기 때문에 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 지정폐기물 기준(폐기물공정시험방법) 및 토양오염 우려기준(토양오염공정시험방법)(환경부, 2002)을 적용하여 평가하였다.

### (1) 시료채취

현황측량도(축적 1:300) 상에서 수동식 시료채취 지점

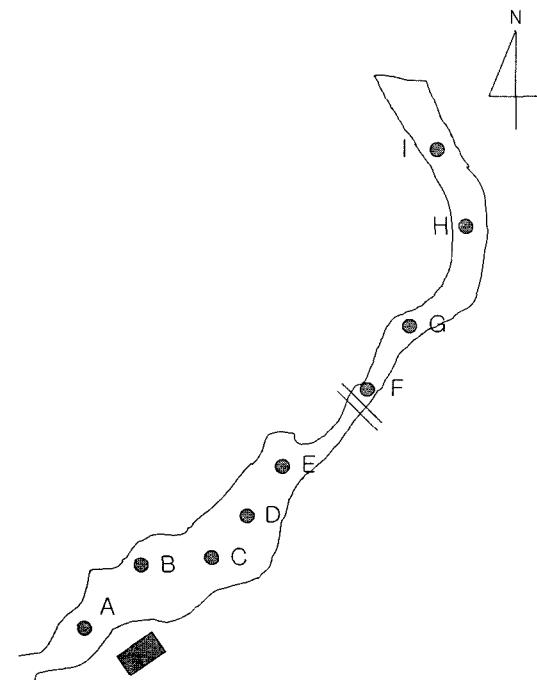


Fig. 1. Sampling point of sediments.

을 계획한 후 현장을 답사하여 조사에 적합한 위치를 선정하였으며, 수동식 시추조사는 시료채취를 목적으로 연질의 퇴적물인 시료를 채취할 수 있는 기구를 이용하여 퇴적지층조사와 병행하였다. 시추조사는 소형 바지선을 이용하여 이동하고 인력에 의한 수동작업으로 작업이 진행되었으며 시추조사의 작업범위는 유기물 퇴적층이하 기존 퇴적층(사질토층 및 자갈함유 하상퇴적층) 상부까지 조사하였다. 시료채취 구간은 유기퇴적물을 주 대상으로 실시하였으며 유기물층 두께에 따라 개소당 2회 내지 3회의 시료를 채취하였다.

시료채취는 목표지점의 시료가 타지점의 시료와 혼합되지 않도록 고안된 특수 시료채취기를 이용하였다. 즉, 회전방향에 따라 개폐되는 측구식 채취를 이용하여 채취된 시료를 인양하는 과정에서 인접시료와 혼합 및 손실을 방지하여 자연상태 그대로 보존하면서 채취하는 방법이다.

### (2) 강열감량

강열감량은 건조한 시료를 정확히  $5 g$  이상 대형 도가니에 담고 전기로  $600 \pm 25^\circ C$ 에서 정량이 될 때까지 강열(보통 2시간)하고 건조기(desiccator) 속에서 냉각하여 고형물 중량을 구한 후, 처음 측정한 중량으로부터 마지막 중량을 측정 채취한 시료에 대한 중량백분율로 계산한다.

### (3) 용출시험 I(폐기물공정시험법)

용출시험은 폐기물 공정시험방법(환경부, 1995)의 용출시험방법의 기준을 적용하여 플라스크에 저니시료를 적당량 채운 다음 pH를 5.8~6.2로 맞춘 중류수를 용매로 사용하여 용출하였다. 용출시료의 탁도가 낮고 방해물질이 없는 것으로 판단되어 용출시료를 산분해없이 기기분석하였다.

조사항목은  $Cr^{6+}$ ,  $Cd$ ,  $Pb$ ,  $Cu$  및  $Hg$  등 5개 항목이었다. 항목별 시험방법은 폐기물공정시험방법에 따라 분석하였으며, 원자흡광도계(Atomic Absorption Spectrophotometry (AAs), Varian SpectraAA220FS) 또는 유도결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy(ICP), Hewlett Packard 4500)법으로 분석하였다.

### (4) 용출시험 II(토양오염공정시험방법)

토양오염공정시험방법(환경부, 1999)에 따라 눈금간격 2 mm(8 mesh)체를 통과한 시료 각각을 일정량씩 취하여 사분법에 의해 균일하게 혼합하여 분석용 시료로 하여 시험방법에 따라 0.1 N 염산용액으로 추출한 후, AAs를 사용하여 분석하였다.

## 2.3. 고형화/안정화 실험

본 연구에서 사용한 원시료는 J하천 하·중류에서 채취한 저니 sample A-1과 sample E-1로 하였으며, 각 시

Table 2. Mixture ratio of solidified matrix

Specimen Number	Cement/Sediment Ratio	Water/Cement Ratio*	Curing Method
I-1	0.15	2.45	wet curing
I-2	0.3	1.23	
I-3	0.6	0.63	
I-4	0.9	0.41	
I-5	1.2	0.30	
II-1	0.15	2.45	dry curing
II-2	0.3	1.23	
II-3	0.6	0.63	
II-4	0.9	0.41	
II-5	1.2	0.30	

\*물/시멘트비는 시멘트 수화반응에 필요한 이론적 수분함량 30% 이상을 적용하였으며, 이때 원시료 자체 함수량(36.8%)을 고려하여 계산하였다.

료의 함수율은 각각 36.7%와 36.8%, pH는 7.55와 7.54로 나타났다. 중금속의 경우는 예비실험을 통해 중금속양이 비교적 높게 나타난 구리(Cu), 납(Pb), 수은(Hg)을 대상으로 측정하였다. 고형화제로는 국내 H사 제품(40 kg 방습포 제품)의 보통 포틀랜드 시멘트만을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 공시체의 제작을 위한 시편들은 비흡수성이며 시멘트의 화학적 반응에 잘 견디는 PVC판( $\phi 50 \text{ mm} \times H 100 \text{ mm} \times t 5 \text{ mm}$ )을 사용하였다. 공시체 제작은 시료를 계량한 후 Table 2와 같은 배합비에 따라 시멘트, 폐기물, 물을 H사에서 제작한 고형화용 혼합기에 넣고 30분간 교반한 다음 손비빔을 거쳐 콘크리트용 공시체 제작의 기준인 KS F 2329(한국공업표준협회, 1994a)에 준하여 제작하였다.

제작된 공시체는 1~3일 경과 후 탈형하여 상대습도 100%인 습윤양생실에서 각각 3일, 7일, 14일과 28일 KS F 2328(한국공업표준협회, 1994b)에 준하여 양생시켰으며 별도로 기건양생용 고형화체를 제작하여 실외 대기 중에서 습윤양생일수와 같이 양생시켜 비교하였다.

### (1) 일축압축강도 측정

대상 공시체를 양생기간별로 양생시킨 후 KS F 2328(한국공업표준협회, 1994b)에 준하여 압축강도식(Strength = 하중(P, kg)/몰드단면적(A, cm<sup>2</sup>))으로 측정하였다. 고형화체 특성상 최대하중용량이 5 ton인 K사제품 일축압축강도기를 사용하였다.

### (2) 고형화체의 용출시험

유해 폐기물 고형화물이 시간이 지남에 따라 물리적·화학적으로 안정화 정도를 평가해보고자 폐기물공정시험법으로 용출시험을 하였으며 용출항목은 본 시료에 비교

적 함유량이 많고 유해성이 있는 Pb, Cu, Hg 등 3항목과 시멘트 고형화시 pH 변화에 따라 용출될 가능성이 있는 Cd과 Cr<sup>6+</sup> 2항목에 대하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 국내외 퇴적저니의 오염도 평가기준에 따른 검토

#### 3.1.1 생활환경 기준항목에 의한 검토

퇴적저니의 준설여부에 대한 국내 기준은 아직 설정되어 있지 않지만, 국내 사례 중 팔당호 및 한강하류에 대한 준설여부 결정시 기준으로 하였던 유기물이나 영양염류 등에 의해 오염된 유기퇴적물의 제거기준에 적용하였다. 국내 팔당호 및 한강하류 퇴적물 준설기준에 따른 J하천 퇴적저니의 준설여부를 검토한 결과, 총 질소의 경우 팔당호 준설기준인 1,100 µg/g의 약 1/3인 300 µg/g이었으며, 총인은 팔당호 준설기준인 800 µg/g에 훨씬 못 미치는 것으로 분석되었다. 강열감량은 약 1.9~5.5%(평균 4.5%)로서 팔당호 준설기준의 약 60%정도로 측정되었다. 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand: COD)은 팔당호 및 한강하류의 준설기준인 20,000 mg/kg 이하인 1,415~5,655 mg/kg으로 분석되어, 하나의 항목도 이들 기준을 초과하지 않았다. 팔당호 및 한강하류는 준설시 이들 항목에 대한 평가를 실시하여 총 4~5개 항목 중 2~3개 항목이 기준을 초과하거나 또는 다른 항목은 기준이하나 특정항목의 농도가 매우 높을 경우 퇴적저니의 준설을 실시한 것을 미루어 판단하여 볼 때, J하천 퇴적저니는 한 가지의 항목도 기준을 초과하지 않았다.

일본 동경만 및 요꼬하마만의 준설기준에 따른 J하천 퇴적저니의 준설여부를 검토한 결과, 강열감량은 1.9~5.6%로서 동경만 및 요꼬하마만의 준설기준의 평가점이 0점이었으며, 화학적 산소요구량(COD)은 1,415~5,655 mg/kg으로서 동경만 및 요꼬하마만의 준설기준의 평가점이 0점으로 판정되었다. 동경만 및 요꼬하마만의 준설기준은 이들 항목에 대한 평가를 실시하여 평가점이 6점이상인 경우에 대하여 퇴적저니의 준설을 실시한 것을 미루어 판단하여 볼 때, J하천 퇴적저니는 평가점이 0점으로 평가되었다.

#### 3.1.2 건강보호 기준항목에 의한 검토

퇴적저니의 준설여부 결정시 유기물이나 영양염류 등의 유기퇴적물 제거기준이외에 중금속 및 poly chlorinated biphenyls(PCBs)등의 유해물질이 수생식물 및 국민건강에 크게 악영향을 미치므로 이들 물질에 대한 검토도 필요하다. 중금속 및 PCBs 등에 대한 퇴적저니 기준은 국내에

는 아직 설정되어 있지 않은 설정이며, 더욱이 이에 대한 처리사례도 없어 부득이 미국, 캐나다 및 일본 기준에 준거하여 준설여부를 검토하였다.

(1) 일본의 퇴적물의 유해폐기물 판정기준에 따른 검토  
기준에 의해 J하천 퇴적저니의 오염도를 적용하여 본 결과, 비소 및 화합물의 농도가 0.526 mg/L로서 일본의 퇴적물에 대한 유해폐기물 판정기준인 0.5 mg/L를 초과하고 국내 지정폐기물 기준인 1.5 mg/L는 초과하지 않았으며, 납 및 화합물의 농도가 1.17 mg/L로서 일본의 퇴적물에 대한 유해폐기물 판정기준인 1.0 mg/L를 초과하고 국내 지정폐기물 기준인 3.0 mg/L는 초과하지 않는 것으로 판정되었다. 그 외 측정되지 않은 알킬수은, 유기인 및 PCBs를 제외한 다른 유해물질들은 일본 퇴적물의 유해폐기물 판정기준 및 국내 지정폐기물 기준을 초과하지 않았다.

(2) 미국환경청의 담수퇴적물 오염분류와 미국 해양대기청의 퇴적물환경권고치에 따른 검토

우선적으로 미국 환경보호청의 퇴적물 오염분류 기준인 Table 1에 따라 예비조사를 통해 오염도가 높은 물질로 판정되었던 Cu, Hg 및 Pb에 대하여 검토하여 보았다. 검토한 결과, Cu는 심한 오염의 기준인 50 mg/kg보다 약 15배 이상 높았으며, Pb의 경우는 중간오염의 수준이었으며, Hg는 심한 오염 기준을 초과하였다.

퇴적물 오염평가를 위해 환경보호청의 해양퇴적물 준거치와 더불어 중금속, polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs), PCBs 및 농약성분에 대해 자체적인 퇴적물 환경권고치(Sediment Quality Guideline)을 설정한 미국 해양대기청의 환경권고치(Table 1 참조)에 따라 검토한 결과 Cu 및 Hg는 악영향을 끼칠 수 있는 범위의 중간농도(ERM)을 약 3배정도 초과하였으며, Pb은 악영향을 끼칠 수 있는 범위의 최소농도 ERL을 약간 초과하는 것으로 검토되었다.

(3) 캐나다 환경부의 담수퇴적물의 잠정환경기준에 따른 검토

캐나다 환경부의 담수퇴적물 환경지침(Table 1 참조)과 J하천의 결과를 비교한 결과 구리와 수은은 PEL을 약 3 배 이상 초과하였으며, 납은 잠정 퇴적물 환경권고치 (ISQGs)는 초과하고 악영향 기대수준(PEL)에는 미치지 못하는 수준이었다.

### 3.2. 퇴적저니 오염도 분석

일반적으로 호수 또는 하천의 퇴적저니 관리수준은 대상저니의 오염도에 크게 의존한다. 오염이 경미한 경우 별 다른 관리가 필요하지 않은 반면, 오염이 심한 경우 준설

**Table 3. Heavy metal in sediments analyzed by Korea standard method for waste**

Item Sampling point	Depth (m)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Hg (mg/L)
A-1	0.5	0.17	0.98	ND
A-2	1.0	0.17	1.17	ND
B-1	0.5	0.24	0.17	ND
B-2	1.5	0.14	0.08	ND
B-3	2.5	0.18	0.15	ND
C-1	0.5	0.21	1.16	ND
C-2	1.5	0.44	0.10	ND
C-3	2.5	0.14	1.10	ND
D-1	0.5	0.06	0.88	ND
D-2	1.5	0.27	0.91	ND
E-1	0.5	0.60	0.95	ND
E-2	1.5	0.18	0.96	ND
F-1	0.5	4.14	1.07	ND
F-2	1.5	1.89	0.97	ND
G-1	0.5	3.87	0.83	ND
G-2	1.5	3.96	0.81	ND
G-3	2.5	2.57	0.93	ND
H-1	0.5	1.58	0.65	ND
H-2	1.5	1.09	0.95	ND
H-3	2.5	0.41	0.68	ND
I-1	0.5	2.91	1.00	ND
I-2	1.5	7.07	1.07	ND
I-3	2.5	1.08	1.08	ND

주 : 음영표시는 지정폐기물 기준(Cu, 3 mg/L)를 초과한 것임.  
ND : Non-detectable.

등 적극적인 조치가 요구된다. 따라서 퇴적저니의 오염도 분석은 저니의 처리처분방안 수립을 위한 중요한 초기단계 작업이다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 하천내 9개지점에서 심도별로 총 23개의 시료를 채취한 후 폐기물공정시험법(Table 3)과 토양오염공정시험법(Table 4)에 따라 각각 분석하였다. Table 3에 나타내었듯이 폐기물공정시험법으로 용출한 후 분석한 결과 Cu는 지정폐기물 기준(3 mg/L)을 초과한 시료가 4개이었고 이중 3개는 기준을 약간초과 하는 것으로 분석되었다. 한편, 거의 전지점의 시료가 농경지에 대한 Cu의 토양오염 우려기준(50 mg/kg)을 초과한 것으로 판정되었다(Table 4). 그외 Pb 및 Hg은 모두 기준이하로 판정되었다.

### 3.3. 고형화 실험 결과

3.3.1 시멘트량 변화에 따른 고형화체의 압축강도 특성 관찰

시멘트를 폐기물(저니)대비 0.15~1.2 비율(Cement/Waste)

**Table 4.** Heavy metal in sediments analyzed by Korea standard method for soil

Item Sampling point	Depth (m)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)
A-1	0.5	109.0	1.97	0.44
A-2	1.0	33.8	1.27	2.20
B-1	0.5	266.0	1.81	0.42
B-2	1.5	34.0	1.05	0.68
B-3	2.5	33.4	0.98	0.28
C-1	0.5	80.7	1.62	0.19
C-2	1.5	87.0	1.95	0.66
C-3	2.5	319.0	2.03	0.35
D-1	0.5	78.7	1.88	0.13
D-2	1.5	38.8	1.32	0.11
E-1	0.5	50.8	1.38	0.20
E-2	1.5	285.0	2.57	0.47
F-1	0.5	351.0	3.72	1.83
F-2	1.5	221.0	3.06	0.68
G-1	0.5	214.0	0.82	0.37
G-2	1.5	316.0	1.15	0.50
G-3	2.5	210.0	2.08	1.03
H-1	0.5	229.0	1.30	0.88
H-2	1.5	216.0	3.40	0.30
H-3	2.5	141.0	2.14	0.22
I-1	0.5	198.0	2.71	1.06
I-2	1.5	96.4	0.70	1.12
I-3	2.5	311.0	3.43	0.91

주 : 음영은 농경지 토양오염 우려기준(Cu, 50 mg/kg) 초과지점.

로 첨가하여 3, 7, 14, 28일 양생 후 일축압축강도(Unconfined Compressive Strength, UCS)를 측정한 결과는 양생방법(습윤양생, 기건양생)에 따라 Fig. 2에 나타내었다. 이때 수분 주입량은 시멘트 수화반응에 필요한 이론적 수분함량 30%를 적용하였으며, 폐기물(저니)이 함유하고 있는 수분 함량 36.8%를 고려하여 계산하였다. Fig. 2에 나타내었듯 압축강도는 시멘트의 양이 증가함에 따라 증가하였으며, 특히 시멘트/폐기물 비가 1.2인 경우 28일 양생일수 경과 후 압축강도가 습윤양생과 기건양생 각각 239.5 kg/cm<sup>2</sup>와 214.4 kg/cm<sup>2</sup>로서 가장 높은 강도발현을 보였다.

양생방법에 따른 압축강도 변화는 시멘트/폐기물 비가 0.15인 경우와 0.6인 경우를 제외하고는 습윤양생한 경우가 기건양생한 경우보다 대체로 높게 나타났다. 시멘트/폐기물 비가 0.6인 경우 기건양생하였을 때 28일 압축강도가 182.3 kg/cm<sup>2</sup>로서 시멘트/폐기물 비 1.2인 경우 압축강도 보다는 다소 약하지만 시멘트의 양을 반으로 절감하였음에도 불구하고 압축강도의 저감이 큰 폭으로 나타나지

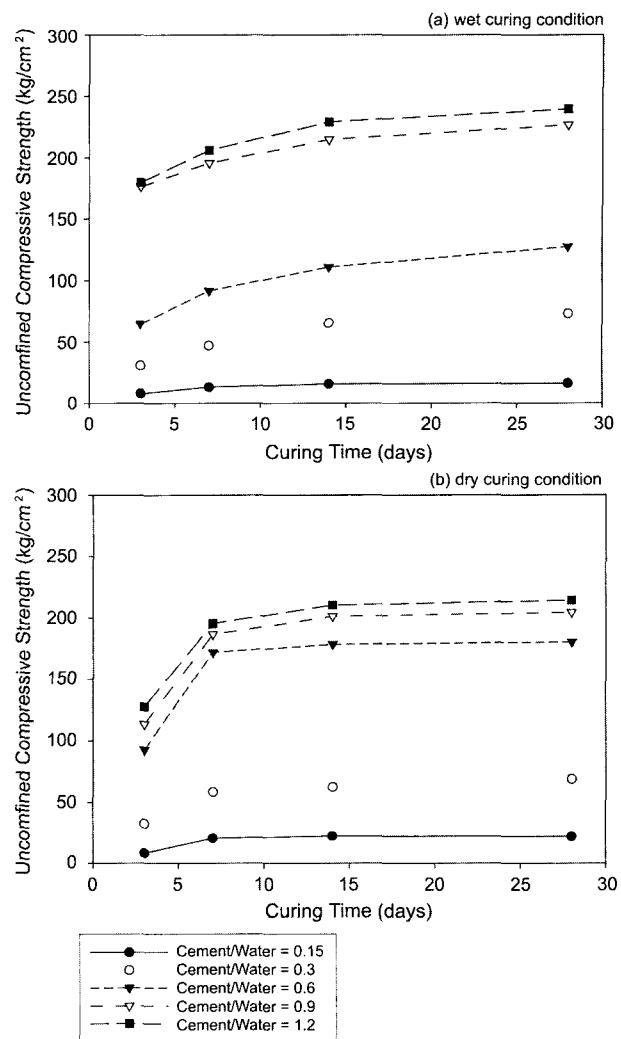


Fig. 2. Compressive strength at different mixed ratio.

않았다. 폐기물 법상 고형화/안정화 처리시 시멘트 첨가 기준량인 150 kg/m<sup>3</sup>을 적용한 경우(Cement/Water = 0.15)에도 일본의 고형화 압축강도 기준인 10 kg/cm<sup>2</sup>을 만족하는 것으로 나타났다.

### 3.3.2 용출시험 및 분석

수분함량과 폐기물의 양을 일정하게 유지시키고 시멘트량을 변화시켜 혼합후 7, 14, 28일 양생시킨 고형화물의 용출시험결과는 Table 5에 나타내었다. 원시료를 포함하여 모든 고화체의 중금속 용출농도는 폐기물 용출기준치 이내로 측정되었다(Cu이외의 항목은 용출농도가 용출기준치 이하였으며 그 변화도 미미하여 나타내지 않았다). 고형화/안정화 처리로서 중금속 용출농도의 저감효과를 확인하기에는 원시료 자체의 중금속 농도가 그다지 높지 않았기 때문에 뚜렷한 경향을 알아보기 힘들었지만 대체적으로 시멘트량과 양생일수의 증가에 따라 중금속 용출농

Table 5. Leaching concentration of copper in solidified waste materials

		Concentration of heavy metal (mg/L)					curing condition
		Pb	Cu	Hg	Cr	Cd	
Raw sample	A-1	0.002	0.282	0.00136	0.006	N.D.	
	E-1	0.008	0.358	0.00055	0.002	N.D.	
Average		0.005	0.320	0.00096	0.004	N.D.	
Cement		0.018	0.015	0.00145	0.007	N.D.	
		Cu leaching concentration at various curing period					
		7	14	28			
1 (C/W=0.15)		0.004	N.D.	N.D.		wet curing	
2 (C/W=0.30)		0.005	N.D.	N.D.			
3 (C/W=0.60)		0.004	N.D.	N.D.			
4 (C/W=0.90)		0.005	N.D.	N.D.			
5 (C/W=0.12)		0.005	N.D.	N.D.			
1 (C/W=0.15)		0.001	N.D.	N.D.		dry curing	
2 (C/W=0.30)		0.005	N.D.	N.D.			
3 (C/W=0.60)		0.003	N.D.	N.D.			
4 (C/W=0.90)		0.004	N.D.	N.D.			
5 (C/W=0.12)		0.003	N.D.	N.D.			

ND : Non-detectable.

도가 낮아지는 경향을 보였다. 상기 결과는 고형화/안정화 처리된 고화체를 재활용 측면에서 사용하더라도 중금속 용출의 위험이 없다는 것을 나타내 주고 있다.

한편, J하천 저니의 지역별, 심로별 용출 분석 결과를 보면 23개 시료 중 4개 시료에서 Cu의 용출 농도가 7.07 mg/L, 4.14 mg/L, 3.96 mg/L, 3.87 mg/L 등으로 폐기물 용출 기준인 3 mg/L를 초과하는 것으로 나타났다. 상기 실험 결과 중 위 Cu에 대한 용출량 저감률을 보면 시멘트 폐기물 비 1.2(28일 기간양생)인 경우 87.5%로서 상당히 높은 용출량 저감율을 보였다. 결론적으로 저니를 시멘트를 이용하여 고형화/안정화시킨 상기 고화체의 경우 강도증진 및 용출허용기준 준수 등에 대하여 좀 더 검토 보완한다면 도로 기층재 또는 건축자재 등으로 재활용할 수도 있을 것이라고 사료된다. 또한 시멘트 고형화 물질의 압축강도가 높고 중금속 용출농도도 감소되었으므로 이 방법은 J하천 저니토를 준설하여 처리하려하는 경우 처리 대안의 하나가 될 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

소규모 J하천의 수질개선을 위하여 퇴적저니 처리·처분 계획을 수립하고자 퇴적저니의 오염도 분석결과와 처리방안들을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. J하천 9개 지점에 대한 심도별 시료채취 및 분석을

실시한 결과, Cu 항목에서 23개 시료 중 4개가 지정폐기물 기준(3 mg/L)을 초과하였다. 토양오염기준에서도 Cu 항목에서 거의 전 지점의 시료가 농경지에 대한 토양오염 우려기준(50 mg/kg)을 초과하였고 그 중 11개 시료는 공장·산업지역에 대한 토양오염 우려기준(200 mg/kg)을 초과한 것으로 나타났다. 그러나 Pb 및 Hg은 각각 기준이 하이었다.

2. J하천 퇴적저니에 대한 오염도를 평가한 결과, 유기물 및 영양염류에 대한 오염도는 심각한 수준은 아니었으나, 유해물질에 의한 오염도는 저서생물에 미치는 악영향을 기준으로 설정된 미국 및 캐나다 기준에 의거할 때 모두 “중간오염” 이상의 오염도에 해당하는 것으로 판정되어 보다 적극적으로 처리할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3. 시멘트를 이용한 고형화/안정화 처리를 이용한 준설한 저니의 처리방안은 중금속 용출에 효과적인 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- 국립환경연구원, 팔당 상수원 보호 종합대책에 관한 연구 (III), NIER No. 90-17-291, 1990.
- 국립환경연구원, 호수, 하천 퇴적물의 조사, 1997.
- 박영동, 오염된 퇴적물 준설을 위한 퇴적물 환경기준 설정에 관한 연구, 강원대학교, 석사논문, 1988.
- 이창희, 김은정, “호수 및 하천오염 퇴적물 관리방안”, 한국

- 환경정책평가연구원, 1998.
5. 서울특별시 한강관리사업소, 한강하류 수질보전 대책수립 조사보고서, pp. 374-404, 1993.
  6. 전상호, 박영동, 김상옥, 국내외 호수 퇴적물의 준설 현황 및 전망, 팔당호 퇴적물 준설타당성검토 공청회, 1998
  7. 조규송, 이찬기, 나규환, 안태석, 김범철, 강인구, 권오길, 이해금, 전상호, 이종범, 호수환경조사법, 동화기술, 1997.
  8. 한국공업표준협회, KS F 2329a(흙 시멘트의 압축 및 휨 강도 시험용 고형화물을 제작하는 방법), 1994a.
  9. 한국공업표준협회, KS F 2328(흙 시멘트의 압축강도 시험 방법), 1994b.
  10. 환경부, 토양오염공정시험방법, 1999.
  11. 환경부, 토양환경보전법, 2002.
  12. 환경부, 폐기물공정시험방법, 1995.
  13. 환경부, 2000 하수도통계, 2001.
  14. 환경처, 팔당호 퇴적물 준설사업 기본설계보고서, pp. 235-312, 1993.
  15. 日本土木學會, 廢棄物の處理技術開発に關する調査研究; コンクリート固型化標準化に關する研究, 1975.
  16. 水質法令研究會, 水質汚濁防止法, 中央法規出版 (日本), 1996.
  17. 環境廳環境法令研究會, 環境六法, 中央法規出版 (日本), 1998.
  18. 角田省吾, 日本における底質淨化技術の變遷, 第18回 有害底質の處理處分に關する日美専門家協議會, 1997.
  19. Anon, Ocean dumping: final regulations and criteria, U.S. Federal register 38(198), 1977.
  20. Environment Canada, Contaminated sediment removal program, University Center, Mich. Consortium for international earth science information network, 1994
  21. Environment Canada, Canadian Water Quality Guidelines, 1998.
  22. NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration), NOAA's National Status & Trend program: Sediment Quality Guidelines, 1998.
  23. U.S.ACE, Dredging and dredged materials disposal, EM1110-2-5025, U.S.Army Corps Engineers Washington, D.C., 1993
  24. U.S.EPA, Managing contaminated sediments: EPA decision-making processes, EPA 506/6-90/002, 1990a
  25. U.S.EPA, Contaminated sediments-relevant statutes and EPA program activities, EPA 506/6-90/003, 1990b
  26. U.S.EPA, Selecting remediation techniques for contaminated sediment, EPA 823-B93-001, 1993a.
  27. U.S.EPA, Sediments quality criteria for the profecctional benthic organism, EPA fact sheets (822F93003-822F93008), 1993b.