

## 오염퇴적물 관리방향 및 처리공법

김건하<sup>1\*</sup> · 정우혁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한남대학교 공과대학 토목환경공학과, <sup>2</sup>대전발전연구원

## Management and Remediation Technologies of Contaminated Sediment

Kim, Geonha<sup>1\*</sup> · Jeong, Wooheok<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Daejeon Development Institute

### ABSTRACT

As Total Maximum Daily Load program is being implemented, needs for the management and treatment of contaminated sediment are rising to attain cleaner water resources. In this paper, impacts and management methods of contaminated sediment were reviewed. Remediation technologies for contaminated sediment including dredging, natural attenuation, *in situ* solidification/stabilization, *in situ* biological remediation, *in situ* chemical remediation and capping were reviewed. Integrated remediation scheme was presented as well.

**Key words:** contaminated sediment, treatment, management, water quality.

### 요 약 문

수질오염 총량제가 시행됨에 따라 깨끗한 수자원을 확보하기 위한 오염퇴적물의 관리 및 처리 필요성이 더욱 높아지고 있다. 본 논문에서는 오염퇴적물의 발생원과 오염퇴적물이 수질에 미치는 영향을 살펴보고, 오염퇴적물의 관리 방향을 제시하였다. 오염퇴적물을 처리하기 위한 공법으로 준설공법과 자연정화법, 현장고정화/안정화, 생물학적 현장처리, 화학적 현장처리 공법에 대하여 요약 제시하였다. 또한 새롭게 대두되고 있는 캡핑공법을 소개하고, 오염퇴적물 처리를 위한 복합공법의 적용에 대한 개념을 제시하였다.

**주제어 :** 오염퇴적물, 처리, 관리, 수질

### 1. 서 론

산업폐수, 생활오수, 폐기물처리장의 침출수, 도시 및 농촌의 강우유출수에 포함되어 하천으로 유입된 유기물, 영양염류, 유해화학물질, 오염 지하수의 유입 등의 점오염원 및 비점오염원은 하류로 운반되다가 비교적 유속이 약한 하천, 호소, 하구, 해양의 바닥에 침전하게 된다(이재수 등, 2003; Wang et al., 2006; Walling et al., 2001). 또한 풍화된 암석 입자, 수중에 용해되어 있던 광물질·염이 침전된 입자, 조류나 분해된 입자, 대기 강하물 등이 물, 대기

등에 의하여 운반되거나 수중에서 다양한 생화학적 반응에 의해 침전하는데 퇴적물은 이와 같이 침전된 모래, 점토, 유기물질, 광물질을 말한다(이창희, 유혜진, 1998).

Fig. 1은 수체 내에서 부유물질과 퇴적물, 오염물질의 순환을 개념적으로 보이고 있다. 생태학적으로 퇴적물은 저서생물이 부착 또는 생활할 수 있는 공간을 제공하는 수생태계의 중요한 요소이므로 퇴적물은 저서생태계 뿐 아니라 수체에 많은 영향을 미친다. 퇴적된 유기물의 혐기성 분해는 오염원이며(이창희, 유혜진, 1998). 퇴적물에 부착되어 있는 유해물질은 물리화학적 환경 변화에 따라

\*Corresponding author : kimgh@hannam.ac.kr

원고접수일 : 2007. 1. 20 게재승인일 : 2007. 5. 23

질의 및 토의 : 2007. 8. 31 까지

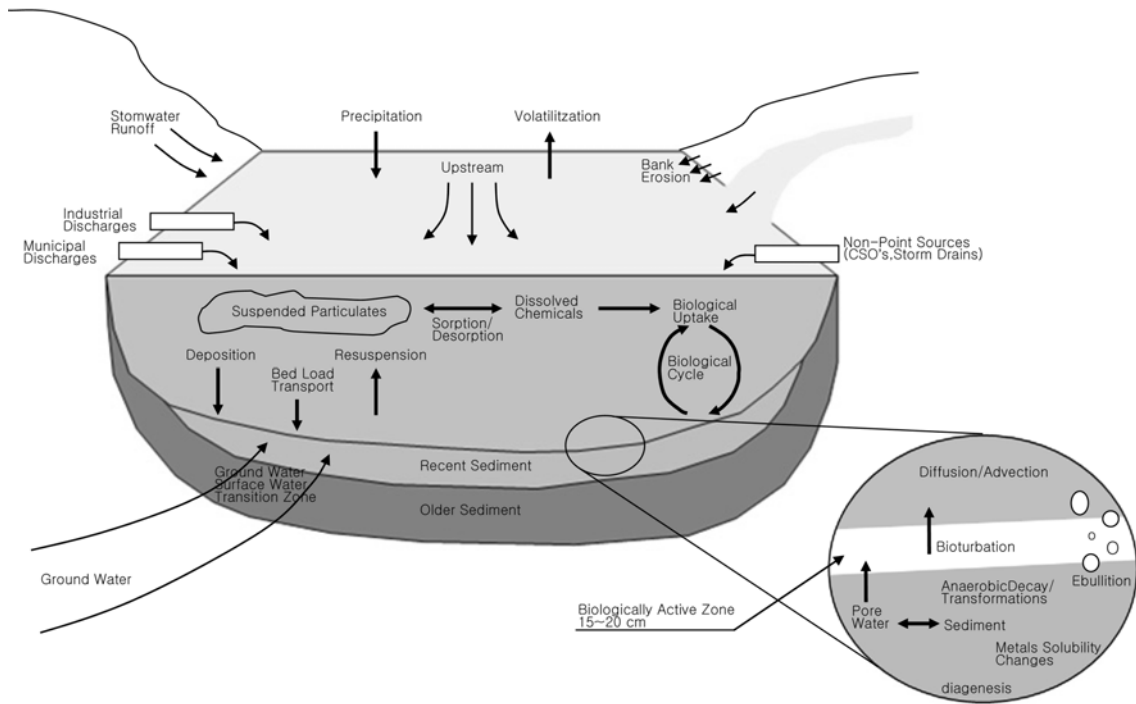


Fig. 1. Sample conceptual site model focusing on sediment-water interaction (modified from USEPA, 2005a).

생화학적인 반응 과정을 통해 수중으로 재용출되어 수생 생물뿐만 아니라 먹이사슬에 의한 농축으로 인하여 공공위생에 위해를 미칠 수 있다(Abrams and Jarrell, 1995). 지하수와 지표수는 물의 순환으로 인하여 혼합되는데, 따라서 오염된 퇴적물은 광역 지하수의 오염까지도 초래할 수 있다(Lensyl et al., 2006). 오염된 퇴적물은 강우, 바람, 배의 움직임, 저서생물들의 움직임에 의하여 재부유 되거나 물의 흐름에 따라 이동한다(Hammerschmidt et al., 2004).

수체외부 점원, 비점원으로부터 유입된 오염물질은 수체와 퇴적물 사이에서 물리, 화학, 생물학적인 요인에 의해 교환된다(Santschi et al., 1990). 수체에서 오염원의 유입은 크게 외부 오염원과 내부 오염원으로 분류할 수 있다. 내부 오염원으로는 유속이 낮은 수변 지역에 퇴적된 오염물질과 수체의 바닥에 침전되어 있는 오염물질이 있다. 부유 상태의 오염물질은 침전과 재부유를 통해 내부 오염원인 퇴적물로부터 교환이 일어나며, 지하수와 수체간의 흐름이 있는 경우, 퇴적물에서 오염물질의 이동이 발생한다(Lensyl et al., 2005). 수체에서 생물로 옮겨진 오염물질은 생물의 먹이 사슬과 사멸에 의해 퇴적물과 수체 사이에서 교환하게 된다(Ali et al., 1999).

이 논문에서는 오염된 퇴적물을 관리하는 방안을 제시하고 처리할 수 있는 정화공법을 고찰, 제시하고자 하였다.

## 2. 오염퇴적물의 관리

미국에서는 1970년대 이후부터 오염퇴적물 문제가 지속적으로 제기되어 이에 대한 관리가 수행되었음에도 뚜렷한 성과를 얻지 못했다는 자체적인 평가가 있었다. 이에 대한 근본적인 원인 중 하나로 지적된 것은 오염퇴적물의 평가가 기형어류 발생, 오염에 강한 종의 출현, 특정 저서생물 종의 사멸 등의 생태학적인 현상에만 의존하였기 때문에 생태계 및 국민건강에 미치는 악영향을 근거로 설정된 정부차원의 퇴적물 평가기준이 부재하였다는 것이다(USEPA, 1998).

실제로 퇴적물 오염평가 프로그램마다 다양한 방법들이 사용된 바 있으나, 퇴적물 오염은 수질오염의 경우와는 달리 같은 오염물질 농도라 할지라도 지역적인 특성, 퇴적물 특성, 생물에 의한 이용성 등에 따라 실제 생물에 미치는 독성이 달라지기 때문이다. 따라서 미환경청은 일반적인 퇴적물 오염평가를 위해 전 산하기관이 공통으로 사용할 수 있는 표준화된 화학적, 생물학적 분석방법을 지속적으로 개발하고 있다. Fig. 2는 미환경청과 산하기관의 다단계 검사구조의 모형을 나타내고 있다. 현재 미환경청에서 사용중인 방법은 퇴적물 오염현황 파악을 위한 스크린 단계에서부터 최종적인 유해성평가까지 각 단계마다 오

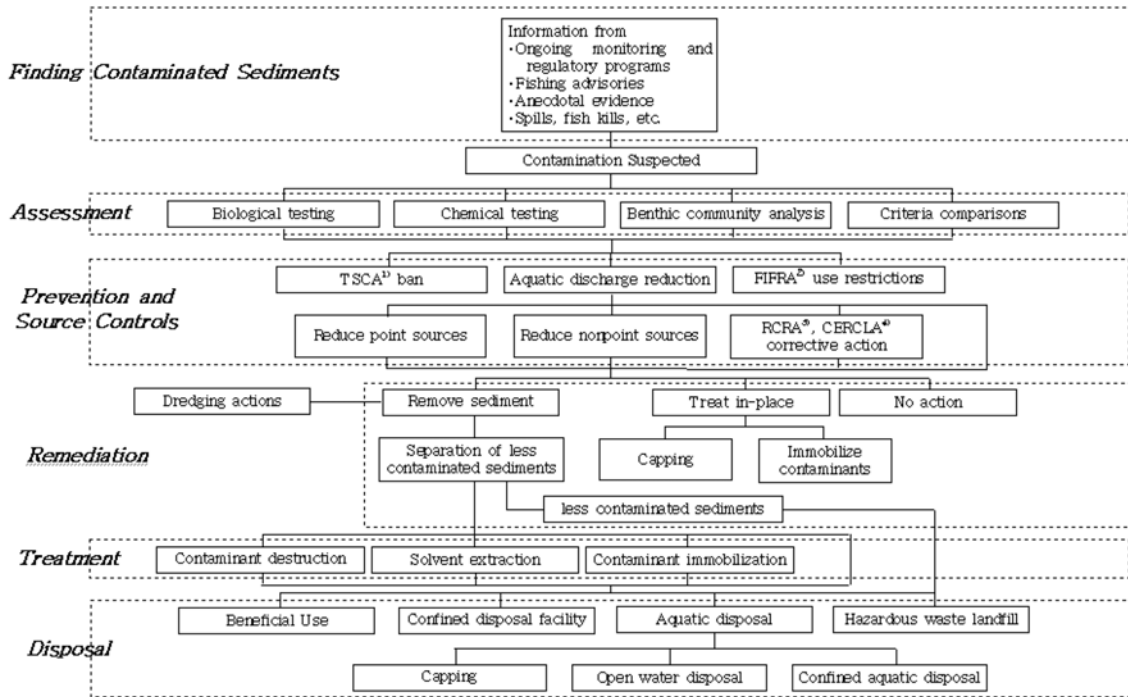


Fig. 2. Contaminated sediments issues framework (USEPA, 1990).

<sup>1)</sup>Toxic Substances Control Act (1976); <sup>2)</sup>Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act (1972); <sup>3)</sup>Resource Conservation and Recovery Act; <sup>4)</sup>Comprehensive Emergency Response, Compensation, and Liability Act (1980).

염퇴적물 영향을 평가할 수 있는 다단계 검사구조를 기본으로 한다. 이러한 경우 각 단계마다의 검사방법을 표준화해야 한다는 어려움은 있으나 일단 완성되면 지역적 특성 및 관리 목적에 따라 유연하게 적용할 수 있고 평가에 일관성을 유지할 수 있는 장점이 있다. 또한 표준 퇴적물 평가방법 외에 추가적으로 프로그램의 특성에 맞는 평가방법을 선택하여 사용하기도 한다(이창희, 유혜진, 1998).

유럽과 같이 지중해와 대서양 인근에 여러 국가가 있는 경우에는 한 지역에서 오염된 퇴적물이 다른 국가로 유입되기 쉬우므로 공동으로 오염퇴적물을 처리할 필요성이 있다. SEDNET은 EU 국가에서 공동으로 퇴적물 관리를 하는 기관으로서 지속적인 R&D를 수행한다(김건하, 2003).

우리나라의 경우 오염퇴적물이 발생할 가능성이 있는 곳은 주요 상수자원인 4대강 유역의 호소와 유속이 감소하는 하천 하류, 폐수의 유출이 빈번한 산업용수 배수지, 항만, 해안투기지역 등 다양한 곳을 들 수 있다. 또한 최근 시설되고 있는 농지-임야 유역의 비점원 저감시설에서 침전된 부유물질 또한 오염원으로 작용할 수 있다. 이러한 다양한 곳에서 오염퇴적물이 발생할 경우 이를 효과적으로 대처하기 위하여 오염된 퇴적물을 관리하기 위한 지침을 수립하고, 각각의 특성에 따라 지역적 특색과 사회

적인 여론을 충분히 반영할 수 있는 세부 관리 모델의 수립이 필요할 것으로 생각된다. 또한 현재 시행중인 수질오염총량관리와 관련하여 유역으로부터 하천으로 배출되는 배출부하량 이외의 퇴적물로 인한 오염부하량을 산정하고 이를 저감할 수 있는 방안이 필요하다.

### 3. 오염퇴적물 정화 기술

일반적인 오염퇴적물 정화방법으로는 준설, 자연정화, 퇴적물 제거, 캡핑, 생물/화학적 처리, 고정/안정화 등이 있다. Fig. 3은 다양한 퇴적물 정화 공법을 선정하는 순서도를 보이고 있다. 퇴적물 제거를 위하여 준설을 우선적으로 검토하고, 준설이외 공법을 적용할 경우, 적용효과 검증에 위하여 장기간 모니터링을 실시한다.

국내에서 오염퇴적물이 발생하였을 경우, 퇴적물을 제거하는 방법인 준설이 유일한 방안으로 활용되었으나, 퇴적물의 오염상황과 현지 조건에 따라 다양한 방법을 적절히 조합하여 사용할 수 있다. 정화방법의 선정은 특정 오염물질의 존재 및 유해성, 정화 기간 중 용수이용 문제, 영향을 받는 지역의 면적, 복구 방안의 실용 가능성, 해당 지역의 수리특성, 자연정화에 소요되는 시간, 정화와 관련

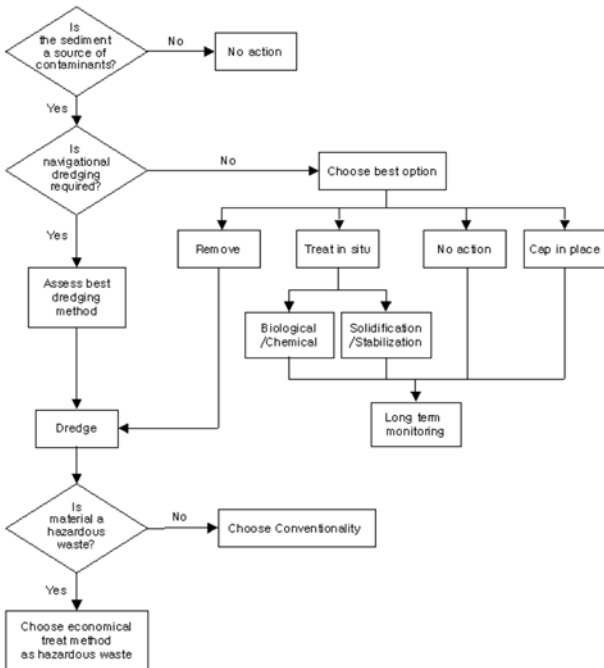


Fig. 3. Applicable treatment options for contaminated sediment (USEPA, 1993).

된 책임 소재, 사회적인 여론과 같은 많은 요인에 좌우된다. 다양한 항목에 대하여 오염지역을 특성화 지움에 따라서 오염지역의 문제점을 구체적이고 명확하게 파악하여 이를 해결하기 위한 보다 효과적인 기술을 적용함으로써 비용이 절감되고, 장기적으로도 안정하게 유지될 수 있는 복원을 실시하게 된다.

3.1. 자연정화

미환경청의 경우 조건이 충족하는 경우 자연정화법을 오염퇴적물 처리를 위한 방법 중 한가지로 정하고 있다. 자연정화는 오염퇴적물이 자연적으로 유입되는 부유물질의 퇴적과정에 따라 새로운 퇴적물로 덮여서 수체에 직접적으로 노출되지 않은 경우 오염된 퇴적물을 그대로 방치한 상태로 모니터링 하는 것을 말한다. 이러한 방법은 오염이 지속되지 않고, 자연적 현상에 의해 오염물질이 이동하지 않으며, 상류로부터 오염되지 않은 상등수와 퇴적물이 유입됨으로서 오염퇴적물의 오염정도가 호전되는 경우, 그리고 인위적인 처리를 할 경우 환경적으로 미치는 파장이 오히려 커질 수 있는 경우에 적용할 수 있다. 자연정화는 오염물질의 확산, 생물학적인 분해, 자연적 환경 등에 의해 효과가 크게 달라질 수 있고 이를 확인하기 위한 구체적인 모니터링 방안을 확립하는 것이 가장 중요할 것이다. 자연정화를 통한 퇴적물 처리의 가장 큰 장점

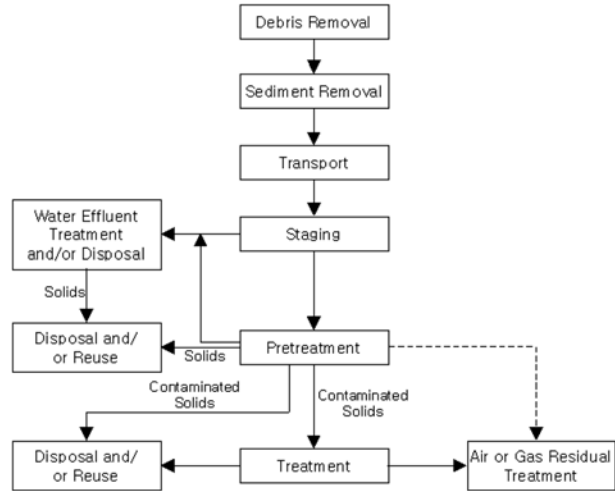


Fig. 4. Flow chart for dredging (USEPA, 2005b).

은 비용이 매우 저렴하고, 오염물질 확산의 위험이 적다는 것이다. 그러나 오염퇴적물은 수층에 계속 오염물질을 방출하므로 퇴적층으로부터의 오염물질 공급을 차단하지 않고는 수체의 수질개선효과를 기대하기 어렵고 특히 만과 같은 반폐쇄 유역에서는 오염물질의 축적으로 인한 농도증가가 발생할 수 있다(안재환 등, 2005).

3.2. 준설

현재까지 다양한 오염퇴적물의 처리방법이 개발되었으나, 수저에서 오염퇴적물을 제거한다는 점에서 준설은 가장 근본적이고 기본적인 처리방법이라고 볼 수 있다. 수로 확보를 위한 퇴적물 준설과는 다르게 오염퇴적물의 준설은 준설시 발생하는 오염물질의 재부유 및 확산을 방지할 수 있는 높은 기술 수준을 요구한다. 준설 방법은 기계식 준설과 압력식 준설로 나눌 수 있는데 기계식 준설은 버킷을 사용하여 오염된 퇴적물을 직접 파내는 방식이고, 압력식 준설은 원심 펌프를 이용하여 오염된 퇴적물을 물과 함께 끌어올리는 방식이고, 압축공기식 준설은 공기압을 이용하여 오염된 퇴적물을 흡입하는 방식이다.

Fig. 4는 준설을 시공하는 단계를 간략히 보이고 있다. 준설한 퇴적물을 육지로 운송한 후 적치하고 처리하는 공정이 필요하다. 퇴적물에서 발생하는 유출수를 처리하여야 하며, 고형물은 폐기하거나 또는 블록이나 시멘트 재료 등으로 재활용하기도 한다(안재환 등, 2004). 준설은 오염퇴적물에 대한 근본적인 처리방안이겠으나 예산이 많이 소요되고 준설후 처리 과정이 복잡하여 효율성이 떨어지며 준설로 인하여 발생한 부유물질이 다시 침전하여 여전히 퇴적물 최상층에는 준설 전과 같은 높은 농도의 오

염퇴적물이 존재할 수 있는 등 단점 또한 많다. 호수의 부영양화를 제어하기 위하여 준설을 실시한 외국의 사례가 다수 있으며(Andersson et al., 1973; Hanson et al., 1984; Murphy et al., 1983; Pokorny et al., 2002), 우리나라에서도 준설로 수질개선을 달성하기 위한 연구가 다수 보고되고 있다(조흥제 등, 2002; 이성재 등, 2003; 전상호, 김휘중, 1990).

### 3.3. 현장 고정화/안정화

현장 고정화/안정화 처리방법은 화학물질로 오염물이나 오염퇴적물을 고체화하거나 고정시키는 방법을 말한다. 화학적으로 위해한 오염물질을 중성화시키거나, 시멘트, 포졸란, 열가소성플라스틱(thermoplastic)과 같은 고화제를 이용하여 결합시키는 방법으로 퇴적물의 물리·화학적 성질을 변화시켜 오염물질이 더 이상 용출되지 않게 하는 방법이다(나유미, 2005; Cullinane et al., 1986; Myers and Zappi, 1989).

그러나 고정화/안정화 방법을 통한 시공은 여러 단점이 있는데, 하천이나 해안의 경우 고화제 투여 위치를 선정하기 어렵고, 고화제 부식의 위험이 수반되며, 수중에서 고화제와 퇴적물의 혼합 및 적절한 반응을 유도하기가 어려우며, 고화제가 일으킬 수 있는 환경문제에 대하여 검증된 바가 없으며, 이후 준설이 필요할지라도 이를 적용하기 어렵다(USEPA, 1993).

### 3.4. 생물학적 현장 처리

생물학적 현장 처리는 광범위한 지역의 퇴적물에 존재하는 다양한 유기화합물을 생물학적으로 처리하는 방법이다. 미생물을 활용하는 방법은 정화속도가 화학적 처리에 비하여 비교적 느리고 위험성이 적은 방법으로서, 유기물 처리에는 유용하지만 농약과 같이 난분해성 물질은 분해하기 힘들며 온도, 전자수용체 농도 등에 영향을 받는다(Baudo et al., 1990; Jafvert and Rogers, 1991; Brooks et al., 2003). 또한 생물학적 처리를 적용하기 위해선 적용되는 미생물들이 현장에서 우점종으로 생존할 수 있는지, 생태계에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 선행 연구가 이루어져야 할 것이다. 특정 식물을 식생하여 영양염류, 유기물, 중금속 등으로 오염된 지역을 복원하는(Robinson et al., 2003) 방법도 있으며, 이러한 경우 지속적인 식물의 수확과 관리가 필요하다.

### 3.5. 화학적 현장 처리

화학적 현장 처리방법은 오염물질의 농도가 높거나 긴

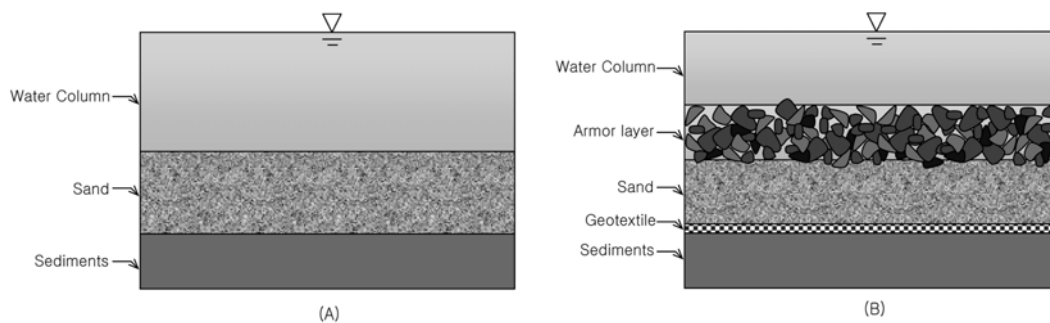
급하게 복구할 필요성이 있는 지역에 오염된 퇴적물을 과산화수소, 영가철, 기타 산화제 등의 화학물질을 이용하여 중화·침전·탈염소화 등의 반응을 통해 처리하는 방법을 말한다(김건하 등, 2006; Eggen and Majcherczyk, 2006; Levitt et al., 2003; N'Guessan et al., 2004; USEPA, 1993). 또한 화학적 처리는 빠른 복원이 가능하고 그 종류가 다양하기 때문에 복원에 사용되는 화학물질의 효율성과 2차적인 위해성이 개선된다면 상당히 뛰어난 효과를 기대할 수 있을 것이다. Table 1은 화학적 현장처리의 처리 메커니즘과 대상 오염물질, 약품 및 잠재적인 문제점에 대하여 구체적으로 기술하고 있다(USEPA, 1985). 화학적 현장 처리에 사용되는 화학물질은 독성을 띠거나 그 독성이 낮은 지라도 환경에 영향을 미칠 수 있으므로 오염퇴적물 정화를 위하여 적용할 경우, 포설한 화학물질에 의한 부차적인 오염이 발생할 가능성이 있다. 또한 직류전류를 이용하여 퇴적물 중의 오염물질을 분리하는 동전기(electrokinetic) 공법을 적용할 수 있다. 독일 eps사는 500 m<sup>3</sup>의 격리된 오염퇴적물을 2 kW의 동력비로 처리할 수 있다고 한다(김건하, 2003).

### 3.6. 캡핑

캡핑(sediment capping)은 오염된 퇴적물 위에 모래, 오염되지 않은 퇴적물, 자갈 등과 같은 재료를 포설하는 방법이다(Palermo, 1998; Mohan et al., 2000). Fig. 5는 캡핑을 현장에 적용하기 위한 기본 설계 개념도이다. Fig. 5(A)는 퇴적물 상부에 모래를 캡핑 재료로 사용하여 포설하는 것을 보여주고 있다. 모래는 공극이 크기 때문에 지표수-지하수간의 연직 이동이 큰 경우에는 효과가 적을 수 있으나, 준설사 등 적용지역의 기준에 부합하는 경제적인 소재가 가용한 경우는 타당한 대안이 될 수 있다. 그러나 캡핑재 포설시 퇴적물 교란, 캡핑 하중으로 인한 부등침하, 유속증가에 의한 캡핑재의 내구성 문제도 제기될 수 있다. Fig. 5(B)는 호우 및 홍수기에 수체의 흐름에 의한 영향으로 캡핑재의 전단 내구성이 필요할 경우 캡핑을 구조적으로 보호하기 위하여 캡핑재의 상부에 입도분포가 양호한 골재를 캡핑 보호층으로 포설하는 것을 보이고 있다. 수체와 지하수간의 지속적인 흐름이 있는 경우 캡핑 구간의 침하 또는 용기가 발생할 수 있고, 퇴적물이 캡핑 하중에 의해 압밀이 이루어지면서 침하가 발생할 수 있으며, 퇴적물에서 유기오염물이 혐기 분해를 일으키면서 가스가 생성되어 용기가 일어날 수 있는 경우, 캡핑층의 단층 파괴를 방지하기 위하여 Geogrid 또는 Geotextile등의 구조적인 보강재를 사용할 수도 있다.

**Table 1.** Summary of *In Situ* Chemical Treatment (USEPA, 1985)

Treatment method	waste types amenable	Treatment reagents	Potential problems
Neutralization	Acids and bases	<ul style="list-style-type: none"> <li>• weak acids and bases</li> <li>• To neutralize acids: calcium carbonate, sodium carbonate, or sodium bicarbonate; limestone or greenstone may be applied as active cover material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicity to pH-sensitive benthos if not properly placed on the spill.</li> <li>• Use of ferric sulfate under aerobic conditions may result in the formation of hydrous iron oxides which can scavenge heavy metals from water and may coat the gills of bottom feeders.</li> </ul>
Precipitation	Inorganic cations and anions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sulfide precipitation is most promising since metal sulfides are the least soluble metal compounds likely to form over a broad pH range. Calcium sulfide, iron sulfide, or sodium sulfide may be used.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potential for formation of H<sub>2</sub>S gas; likelihood increase as the reactivity of sulfide and metals decrease.</li> <li>• Effective only under reduced conditions, oxidation to more soluble sulfide species could occur under aerobic conditions.</li> </ul>
Oxidation	Wide range of organics; highly chlorinated compounds and nitroaromatics are not well suited	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxygen and/or ozone and hydrogen peroxide.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxidation can result in more mobile degradation products.</li> <li>• Both ozone and hydrogen peroxide may react with organics in the water column or sediments which are not target compounds, thereby reducing effectiveness.</li> <li>• Compounds which are sorbed to sediments may be difficult to oxidize.</li> <li>• Ozone will decompose back to oxygen rapidly in the presence of organics; stability of hydrogen peroxide is not well known.</li> </ul>
Chemical dechlorination (e.g., PCB, dioxins)	Highly chlorinated organics	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polyethylene glycol and potassium hydroxide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Treatment system can tolerate some water but limits have not been established.</li> <li>• Degradation is temperature dependent and may proceed slowly at ambient temperatures.</li> </ul>

**Fig. 5.** Design Examples of Sediment Cappings using Sand: (A) Simple Sand Capping; (B) Sand Capping with Reinforcements (Kim and Jeong, 2005).

캡핑 공법을 시공하기 위하여 오염지역에 대한 다양한 정보가 수집 되어야 한다. 오염지역의 범위, 심도 등 측량이 필요하며 수심, 수저면 퇴적물의 특성, 선박 등의 항로, 홍수 등 자세한 현장 조사가 필요하다. 그리고 현장의 퇴적물의 밀도, 소성, 전단응력, 압밀도, 입도분포 등 물리화학적 특성이 설계인자로 필요하다.

현장의 환경과 특성이 정의되었다면 그 다음은 오염물질에 대하여 가장 저렴하고 취급이 용이하며 비용대비 효과를 증대시킬 수 있는 캡핑 재료를 선정해야 할 것이다. 캡핑 재료로 사용할 수 있는 재료로는 오염되지 않은 준설퇴적물, 자갈, 모래, 점토, 유기점토, geotextile, grout mattress 등을 활용할 수 있다. 반응성 캡핑재를 사용하여

퇴적물내 오염물질의 분해를 유도할 수 있는데, 이러한 반응성 캡핑재료로서 Ambersorb®, XAD-2R®, Aquablok® 과 같은 상품도 있으며, 유기점토, 영가철, 알루미늄, bauxite과 같은 소재를 사용할 수 있다(김, 2003). 특히 준설 된 퇴적물을 포설하는 경우, 해당 퇴적물은 다양한 생물들이 포함되어 있는 상태에서 준설된 지역의 생물군을 집중시키는 효과가 있으므로 캡핑 포설 후 빠른 생태계 복원 효과를 기대할 수 있다(김건하, 정우혁, 2005; Wang et al., 1991; Thoma et al., 1993; Zeeman et al., 1993). 다양한 기능의 향상을 기대할 수 있는 유기점토는 보다 높은 안전율을 요구하는 캡핑을 설계할 때 유효할 것이다. 그리고 다양한 재료들을 조합함으로써 비용을 절감하고 보다 견고한 캡핑을 설계할 수 있다. 다음으로 캡핑의 설계를 결정해야 하는데 주로 캡핑의 두께는 오염물질을 격리하는데 있어서 안전율을 적용함에 따라 크게 달라지며, 현장의 생물군에 의해 발생하는 생물학적 교란, 퇴적물의 부유, 압밀, 유기물 분해에 의한 가스의 발생 등에 따라 달라진다.

캡핑의 시공은 퇴적물위에 캡핑 재료를 포설하는 것이 가장 중요한 공정이라고 볼 수 있다. 하천이나 해안의 경우 유속에 의해 수저면까지 캡핑 재료가 의도대로 퇴적되지 않을 수 있으며, 수저면이 균일하지 못하고, 수위 차이가 심하며, 수저면이 밀도가 낮은 연약지반일 경우, 캡핑의 시공이 어려워질 것이다. 캡핑 시공 면적과 현장 상황에 따라 다양한 방법의 시공이 가능하다. Fig. 6은 다양한 캡핑 시공 방법을 개략적으로 보이고 있다. 캡핑 시공 방법의 결정은 캡핑의 계획과 시공을 통합한 모든 공정 중에서 품질과 가장 직접적이고도 큰 비중을 차지하는 과정으로서 캡핑 시공의 성패를 결정한다.

캡핑을 이용하여 오염퇴적물 복원을 할 경우 준설, 생물학적처리, 화학적처리 및 캡핑공법을 조합하여 적용할 수 있다. 준설을 이용하여 퇴적물 총량을 줄인 후 캡핑을 시공할 경우 캡핑에 따른 저류량 감소를 상쇄할 수 있으며 준설의 부족한 복원 효과를 보완하고, 오염되지 않은 지역의 퇴적물을 포설할 경우 퇴적물에 포함되어 있는 생물군의 이주로 인하여 오염퇴적물의 신속한 정화를 도모할 수 있을 것이다. 오염물질이 생물학적, 화학적 처리로 분해가 가능한 물질일 경우에도 2차 오염의 우려 때문에 실제 적용이 어려웠으나 캡핑공법과 병행하는 경우 가능할 수 있다. Fig. 7과 같이 오염퇴적물의 복원을 위하여 캡핑층 하부에서 오염퇴적물과 처리 반응제만이 접촉할 수 있도록 캡핑을 시공하고, 잔류물을 회수하는 공법을 제시하고 있다.

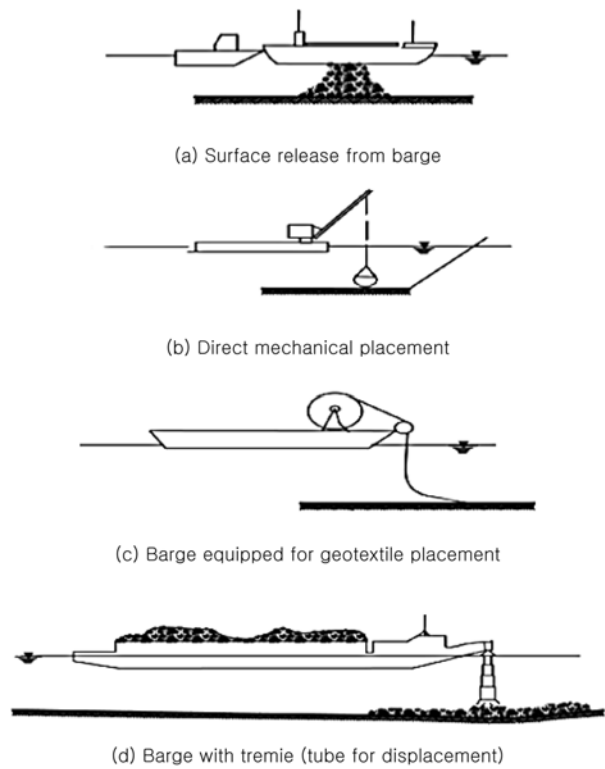


Fig. 6. Field deploy of capping materials (modified from US EPA, 2005a).

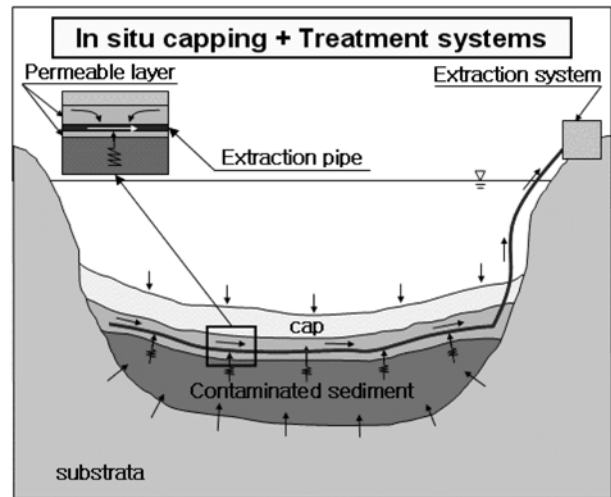


Fig. 7. Application of *in situ* capping with treatment systems (Kim and Jeong, 2005).

#### 4. 결 론

강우시 유실된 토사는 오염물질과 결합된 상태로 배출되어 수체에 유입하며, 조류와 같은 내부발생 부유물질과 같이 퇴적하며, 오염도가 높아진 퇴적물은 다시 오염원으

로 작용하므로 지표수 수질관리에 있어서 오염퇴적물의 관리 및 처리는 필수적이다. 많이 쓰이는 준설로는 오염된 퇴적물을 적절히 처리할 수 없으므로 다양한 처리 공법을 연구, 적용할 필요가 있다. 특히 수질오염총량제의 시행에 있어서 비점오염원 발생 부하량을 저감하여야 할 필요가 있으므로 오염퇴적물로 인한 오염부하 및 그 저감은 많은 연구가 필요하다.

퇴적물의 처리공법은 지하수-토양 정화공법과 유사한 점이 많으나, 상층수의 수질 및 공공보건을 고려할 필요가 있는 등 까다로운 점이 많다. 국내에서 수질보전을 위한 퇴적물 처리에 대한 연구는 초기 단계라 평가할 수 있으므로 퇴적물 오염도 조사, 정화방법, 사후 모니터링 등에 대한 활발한 연구 개발이 필요하다.

## 참 고 문 헌

- 김건하, 2003, International Conference on Remediation of Contaminated Sediments 참가기, 한국수자원학회지, **37**(1), 104-107.
- 김건하, 정우혁, 2005, 低泥 캡핑 (Sediment Capping)을 활용한 오염퇴적물의 효율적인 처리, 대한토목학회, 자연과 문명의 조화, **53**, 122-127.
- 김건하, 정우혁, 최승희, 2006, 영가철( $Fe^0$ )을 이용한 퇴적물내 Atrazine의 탈염소화, 한국지하수토양환경학회지, **11**, 33-40.
- 나유미, 2005, 호소퇴적물 인 용출 제어를 위한 현장 처리제 개발 및 모델 연구, 이화여자대학교 환경공학과 박사학위논문.
- 안재환, 지재성, 배우근, 이미경, 2004, 준설퇴적물의 블록화를 위한 타당성 연구. 한국폐기물학회지, **21**(1), 43-49.
- 안재환, 김미경, 이미경, 황병기, 2005, 퇴적물 준설에 따른 수환경 영향 예측 모의, 대한환경공학학회지, **27**(11), 1228-1237.
- 이성재, 배범한, 박규홍, 강성원, 황규대, 지재성, 2003, 준설퇴적물 분류 및 오염물질의 물리화학적 전처리, 대한환경공학학회지, **25**(1), 55-63.
- 이재수, 김영철, 황길순, 2003, 장마 전후의 농업용 저수지 퇴적물의 변화분석, 대한토목학회논문집, **23**(4B), 359-368.
- 이창희, 유혜진. 1998. 호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안, 한국환경정책·평가연구원.
- 전상호, 김휘중, 1990, 경포호의 준설에 의한 수질개선가능성에 관하여, 한국지구과학회지, **11**, 174-180.
- 조홍제, 이병호, 김정식, 이근배, 2002, 도시하천의 하상퇴적토 준설에 따른 수질변화예측, 한국수자원학회논문집, **35**, 137-148.
- Abrams, M.M. and Jarrell, W.M., 1995. Soil phosphorus as a potential nonpoint source for elevated stream phosphorus levels, *Journal of Environmental Quality*, **24**, 132-138.
- Ali, M.B., Tripathi, R.D., Rai, U.N., Pal, A., and Singh S.P., 1999, Physico-chemical characteristics and pollution level of lake Nainital (U.P., India): Role of macrophytes and phytoplankton in biomonitoring and phytoremediation of toxic metal ions, *Chemosphere*, **39**, 2171-2182.
- Andersson, G. Cronberg, G., and Gelin, C., 1973, Planktocin changes following the restoration of lake Trummen, *Sweden, Ambio*, **2**, 44-47.
- Baudo, R., Giesy, J.P., and Muntau, H., 1990, *Sediment: Chemistry and Toxicity of In-Place Pollutants*. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI.
- Brooks, K.M., Stierms, A.R., Mahnken, C.V.W., Blackburn, D.B., 2003, Chemical and biological remediation of the benthos near Atlantic salmon farms, *Aquaculture*, **219**, 355-377.
- Cullinane, M.K., Jones, L.W., and Malone, P.G., 1986, Handbook for stabilization/solidification of hazardous waste, EPA/540/2-86/001, Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH.
- Eggen, T. and Majcherczyk, A., 2006, Effects zero-valent iron ( $Fe^0$ ) and temperature on the transformation of DDT and its metabolites in lake sediment, *Chemosphere*, **62**, 1116-1125.
- Hammerschmidt, C.R., Fitzgerald, W.F., Lamborg, C.H., Balcom, P.H., and Visscher, P.T., 2004, Biogeochemistry of methylmercury in sediments of Long Island Sound, *Marine Chemistry*, **90**, 31-52.
- Hanson, M.J. and Stefan, H.G., 1984, Shallow lake water quality improvement by dredging. In: Proceeding of the 4th Annual Conference International Symposium Lake Watershed management, *North American lake Management Society*.
- Jafvert, C.T. and Rogers, J.E., 1991, Biological remediation of contaminated sediment with special emphasis on the Great Lakes. EPA/600/9-91/001. Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
- Lensyl Urbano, Brian Waldron, Dan Larsen, Heather Shook, 2006, Groundwater-surfacewater interactions at the transition of an aquifer from unconfined to confined, *Journal of Hydrology*, **321**, 200-212.
- Levitt, J.S., N'Guessan, A.L., Rapp, K.L., and Nyman, M.C., 2003, Remediation of  $\alpha$ -methyl-naphthalene-contaminated sediments using peroxy acid, *Water Research*, **37**, 3016-3022.
- Myers, T.E. and Zappi, M.E., 1989, New Bedford Harbor Superfund project, Acushnet River estuary engineering feasibility study of dredging and dredged material disposal alternatives. In: Report No. 9, Laboratory-Scale Application of Solidification/ Stabilization Technology. Technical Report EL-8815. US Army Engineer Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Mohan, R.K., Brown, M.P., and Barnes, C.R., 2000, Design criteria and theoretical basis for capping contaminated marine sed-



- iments, *Applied Ocean Research*, **22**, 85-93.
- Murphy, T.P., Hall, K.J., and Yesaki, I., 1983, Coprecipitation of phosphate with calcite in a naturally eutrophic lake, *Limnology and Oceanography*, **28**, 58-69.
- N'Guessan, A.L., Levitt, J.S., and Nyman, M.C., 2004, Remediation of benzo(a) pyrene in contaminated sediments using peroxy-acid, *Chemosphere*, **55**, 1413-1420.
- Palermo, M.R., 1998, Design considerations for in-situ capping of contaminated sediments, *Water Science and Technology*, **37**(6-7), 315-321.
- Pokorn, J. and Hauser, V., 2002, The restoration of fish ponds in agricultural landscapes, *Ecological Engineering*, **18**, 555-574.
- Robinson, B., Duwig, C., Bolan, N., Kannathasan, M., and Saravanan, A., 2003, Uptake of arsenic by New Zealand watercress (*Lepidium sativum*), *The Science of The Total Environment*, **301**, 67-73
- Santschi, P., Honener, P., Beniot, G., and Buchholtz-ten-Brink, M., 1990, *Marine Chemistry*, **30**, 269-315.
- Thoma, G.J., Reible, D.D., Valsaraj, K.T., and Thibodeaux, L.J., 1993, Efficiency of capping contaminated sediments in situ-2: mathematics of diffusion-adsorption in the capping layer, *Environment Science Technology*, **27**, 2412-2419.
- USEPA, 1985, Removal and Mitigation of Contaminated Sediments., Cincinnati, Ohio.
- USEPA, 1998, EPA's Contaminated Sediment Management Strategy: Reinventing Government to Streamline Decision-Making, <http://www.epa.gov/ostwater/cs/manage>.
- USEPA, 1993, Selection remediation techniques for contaminated sediment, EPA/823/B93/001, U.S. Environmental Research Agency, Office of Water, Washington, DC. and Office of Research and Development, Cincinnati, OH.
- USEPA, 2005a, Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites, EPA/540/R/05/012, U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response.
- USEPA, 2005b, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program, EPA/905/B94/003, Great Lakes National Program Office, Chicago, IL.
- Walling, D.E., Russell, M.A., and Webb, B.W., 2001, Controls on the nutrient content of suspended sediment transport by British rivers, *the Science of the Total Environment*, **266**, 113-123.
- Wang, S., Jin, X., Bu, Q., Zhou, X., and Wu, F., 2006, Effects of particle size, organic matter and ionic strength on the phosphate sorption in different trophic lake sediments. *Journal of Hazardous Materials*, **128**, 95-105.
- Wang, X.Q., Thibodeaux, L.J., Valsaraj, K.T., and Reible, D.D., 1991, Efficiency of capping contaminated sediments in situ-1: laboratory scale experiments on diffusion-adsorption in the capping layer, *Environment Science Technology*, **25**, 1578-1584.
- Zeeman, A.J., 1993, Subaqueous capping of contaminated sediments, *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, 570-577.