

해저 오염퇴적물 급속 현장처리 기술 분석 (피복공법)



이 장 근
한국건설기술연구원 기반시설연구본부
지반연구실, 수석연구원 (공학박사)
jlee@kict.re.kr

1. 서론

최근들어 국제적 환경문제에 관한 관심이 고조되고 있는 가운데 국민들의 환경에 대한 인식의 변화로 오염된 퇴적물 등 폐기물 배출해역에서 2차 오염에 대한 우려가 꾸준히 제기 되고 있다. 단위사업별 또는 개인 연구자의 관심에 따라 수행된 오염퇴적물에 대한 기초 조사 자료에 따르면 산업폐수 등 육상기원의 유해물질로부터 영향을 많이 받는 마산만, 낙동강 하구, 경기만 등지의 연안퇴적물에서 유해물질의 농도가 높게 나타났으

려가 꾸준히 제기 되고 있다. 단위사업별 또는 개인 연구자의 관심에 따라 수행된 오염퇴적물에 대한 기초 조사 자료에 따르면 산업폐수 등 육상기원의 유해물질로부터 영향을 많이 받는 마산만, 낙동강 하구, 경기만 등지의 연안퇴적물에서 유해물질의 농도가 높게 나타났으

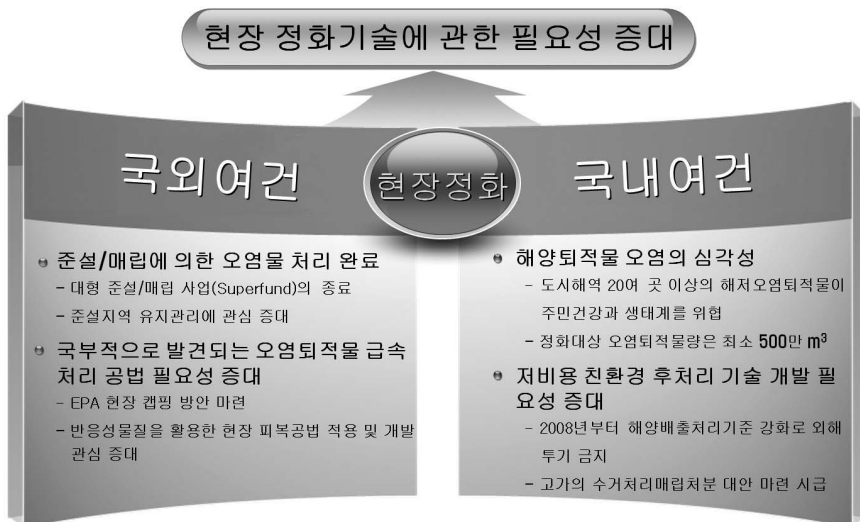


그림 1. 해저 오염퇴적물 현장처리 필요성

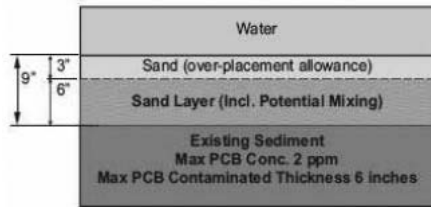
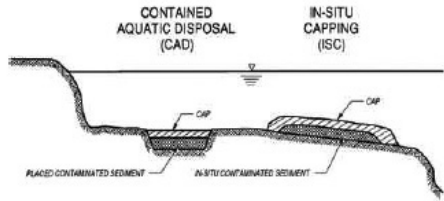


그림 2. 피복공법(In-Situ capping) 개념도 (Schuck, 2010)

며 이러한 오염퇴적물로 인한 악영향도 심각할 것으로 추측된다. 이는 미국 해양대기청의 ERL (Effective Range Low) 기준을 준용하였을 때 아연, 납, 구리 등의 중금속의 경우, 일부지역에서 퇴적물내의 저서생물에 악영향을 끼칠 수 있는 수준의 농도이다.

이러한 오염된 퇴적물을 처리하는 방안으로 준설 및 매립이 국내에서는 보편화되어 있다. 그러나 오염토사의 준설과 매립은 상당한 기간과 고비용, 매립지 선정을 위한 사회적 마찰 등의 단점이 있다. 기존의 준설 및 매립의 방법으로는 막대한 양의 오염퇴적토를 처리할 수 없고 런던조약으로 해양투기가 금지되었기 때문에 오염퇴적토 처리를 최소화하기 위해 국토해양부에서는 유용토사를 선별하여 적극 활용하고 잔여 오염퇴적토는 매립하는 방식으로 진행하고 있다. 그러나 각 종 규제 등에 의한 매립 부지의 한계와 사업규모에 따른 막대한 양의 준설퇴적토를 감안하였을 때, 지역적 특성에 따라 준설을 대체 할 수 있는 오염퇴적토 정화기법이 요구 된다.

2. 피복공법

오염퇴적토 처리 기법으로 준설 및 매립에 의한 방법이 일반적으로 많이 이용되고는 있지만, 준설과정에서

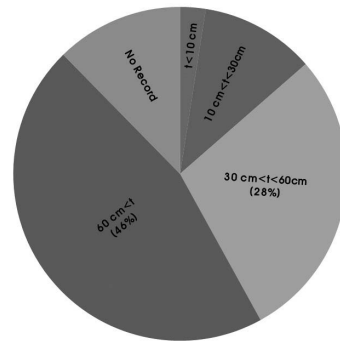


그림 3. 미국의 피복재 두께 사례 분석

발생하는 퇴적층의 교란, 매립지 선정문제, 고비용 공사비 등으로 인한 많은 제약이 따르고 있다. 이러한 문제로 인해 협소한 지역의 오염퇴적토에 대해서는 오염물질의 용출 저감을 위한 현장캡핑 또는 피복공법(in-situ capping)이 근래 들어 많이 사용되고 있다.

피복공법은 기존 퇴적층 위에 오염되지 않은 새로운 층의 모래, 퇴적토, 또는 자갈과 같은 재료를 포설하여 오염물질이 상부 수층으로 이동하는 것을 제한하는 기술로서, 오염된 퇴적물을 상부수층과 물리적으로 분리하거나 퇴적토를 안정화하여 유해물질이 저서생물 또는 상부 수층으로 이동하는 것을 감소시키는 역할을 한다. 미국에서 1970년부터 2010년까지 수행된 피복공법을 분석한 결과 피복층의 두께 60cm 이상이 전체 시공사례의 46%를 차지하였다.

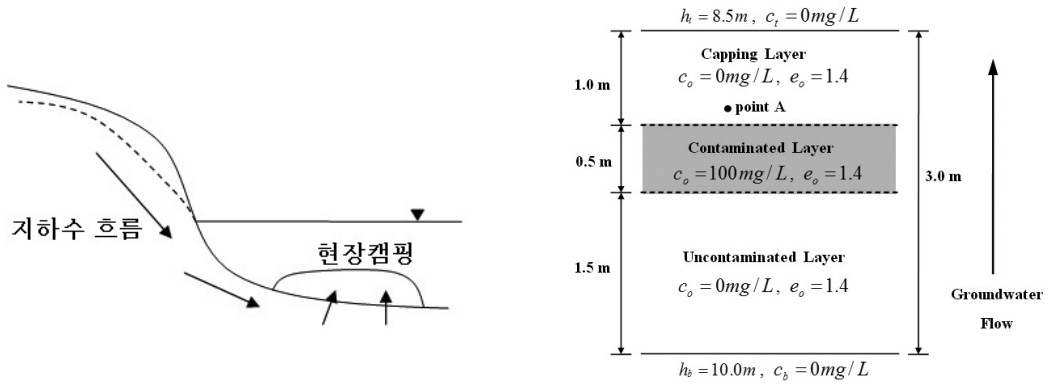


그림 4. 가상의 피복공법: 피복공법 모식도와 수치해석 초기 및 경계조건 (이장근 외, 2011)

3. 문제점 분석

지금까지의 피복공법에 따른 오염물 이동은 분자확산(diffusion)에 의한 오염물질의 거동만으로 한정하여 해석되었다. 하지만, 오염된 퇴적층에 피복공법이 적용되면 오염물질의 거동은 피복재의 자중과 퇴적물 자체의 높은 초기 함수율로 인해 발생하는 압밀현상과 병행하여 일어난다 (Peter and Smith 2002; Alshwabkeh and Rahbar 2006; Fox 2007; Lee and Fox 2009). 압밀에 의한 오염물질 이동은 피복재의 자중 작용 시 발생하는 과잉간극수압으로 인한 동수경사로 시간에 따라 간극수의 흐름에 변화가 발생하는 것이 기존의 오염물질 분자확산으로 인한 이동과 가장 큰 차이점이다. 따라서 오염물질의 이동을 해석할 때에 압밀에 의한 영향을 같이 고려하여야만 기존의 이동방정식을 바탕으로 한 분자확산에 의한 해석보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

피복공법이 오염물 이동에 미치는 영향을 분석하기 위해 그림 4에서 예시된 가상의 피복공법 적용을 살펴 보았다(이장근 외, 2011). 오염되지 않은 퇴적층의 두께(uncontaminated layer)는 1.5m, 오염 퇴적층

(contaminated layer)은 0.5m, 오염되지 않은 퇴적토를 활용한 피복층(capping layer)은 1m로 전체 복합층의 두께는 3m로 설정하였다. 또한, 하저 또는 해저로 유입되는 지하수 흐름의 특성을 고려하여 압밀이 발생하지 않을 경우 복합층 하부에서 상부방향으로 지하수가 이동한다고 가정하였다.

그림 5는 관측점(그림 3)에서 확인된 오염물질 농도 변화 곡선(breakthrough curve)을 압밀이 일어나지 않는 경우(Case I)와 압밀이 일어나는 경우(Case II)에 대해서 보여주고 있다. 압밀이 일어나는 경우(Case II), 오염물질은 36.5일까지 압밀이 일어나지 않는 경우(Case I)에 비해 빠르게 오염물질이 이동하였다. 이는 침투유속의 변화와 밀접한 관계를 갖고 있다. 기존의 연구결과인 오염물질이 확산에 의한 이동 방향과 압밀에 따른 간극수 흐름이 동일한 경우에 압밀은 오염물질 이동을 가속 시킨다는 연구 결과를 뒷받침하고 있다 (Alshwabkeh and Rahbar 2006; Fox 2007). 그러나 100% 압밀이 진행 된 후에는 오히려 오염물질 이동이 느려지는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 크게 두 가지 원인에 기인한다.

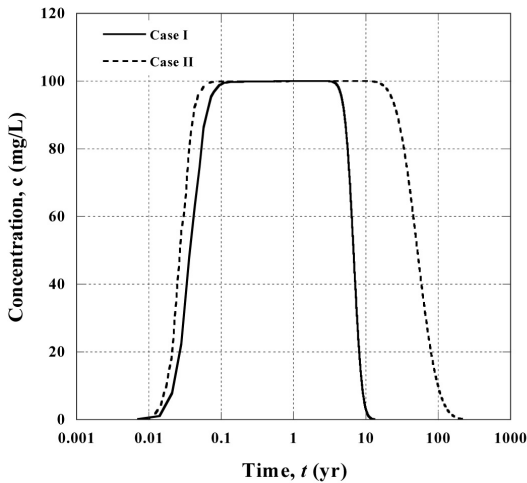


그림 5. 오염물질 농도 변화 곡선 (이장근 외, 2011)

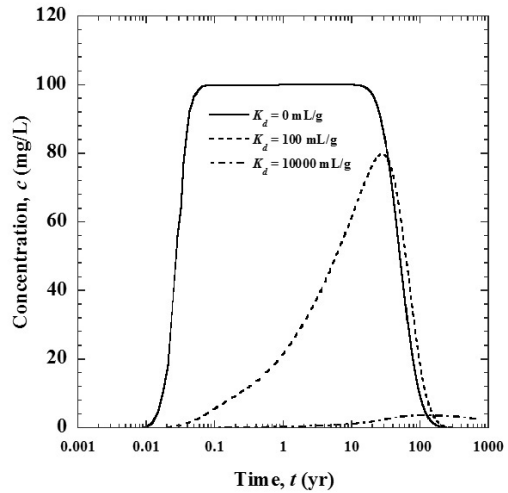


그림 6. 반응성물질을 활용한 다층형 피복공법의 효율성 분석

첫째는 압밀 진행 과정에서 침투유속의 감소로 인해 오염물질 이동이 느려졌고, 이는 오염물질 이류(advection)에 의한 이동을 감소시킨다. 둘째는 압밀이 진행됨에 따라 퇴적토의 공극이 감소하여 수차효과를 높인다. 오염물질의 이동 속도를 정량적으로 표현하는 방법으로 지연계수(retardation factor, R)를 사용하며, 지연계수는 압밀이 진행됨에 따라 증가하고 지연계수가 증가함에 따라 오염물질 이동 속도는 감소한다.

4. 반응성물질을 이용한 다층형 피복공법

앞에서 살펴본 바와 같이 기존의 깨끗한 모래나 퇴적물을 피복재로 이용한 피복공법은 물리적인 격리에는 효과적이지만 피복재의 자중에 의한 압밀과 오염물 농도구배로 인한 오염물의 이동을 초기에는 가속시키며, 압밀 후에는 간극비 감소로 인한 침투유속의 감소로 장기적인 오염물 유출을 야기시킨다. 이러

한 문제점을 보완하기 위해 반응성물질을 포함한 다층형 피복공법이 개발되었다. 다층형 피복공법은 피복층(capping layer)에 비교적 얇은 두께의 반응층을 추가하여 화학적 격리 효과를 높이는 공법이다. 다층형 피복공법의 효과를 정량적으로 분석하기 위해 그림 4에서 피복층(capping layer)내에 20mm 두께의 분배계수(distribution coefficient, K_d)가 100mL/g과 10,000mL/g인 가상의 반응층을 두고 추가적인 수치해석을 실시하였다. 관측점에서 오염물 농도 변화를 관찰한 결과(그림 6), 분배계수가 100mL/g일 경우에는 약 28년 후에 최고농도 79.7 mg/L를 보였다. 압밀에 의한 오염물 이동이 가속됨에도 불구하고 반응층의 화학적 격리 효과로 인해 오염물의 최고농도는 감소하였다. 분배계수가 10,000mg/L일 경우 약 114년 후에 5mg/L 이하의 최고농도가 나타났다.

5. 결론

피복공법은 오염퇴적물을 “덮어준다”는 물리적 격리에 중점을 두고 깨끗한 모래나 퇴적물을 이용하여 시공되었다. 그러나 초기 높은 함수율의 오염된 퇴적토에 피복재의 자중이 작용하면 압밀과 병행하여 오염물질이 이동한다. 압밀 중에는 침투유속으로 인해 오염물질의 이동이 가속되고 압밀 후에는 간극비의 감소로 인해 침투유속이 감소하여 장기적으로 오염물 유출이 발생하는 피복공법 전반에 걸친 문제점을 확인하였다. 이러한 기존의 피복공법의 문제점을 보완하기 위해 다층형 피복공법이 개발되었으며, 비교적 얇은 두께의 반응성 피복층은 물리적 격리와 더불어 화학적 격리로 피복재의 오염물 차단에 효과적이다. 향후 국내에서도 다층형 피복공법의 핵심기술인 반응성물질 개발뿐만 아니라 오염퇴적토의 생물학적 분해성을 높이는 재료 개발에 중점을 둔다면 피복공법 선진국에 진입할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이장근, 김도윤, 박재우(2011), 압밀이 오염물질 이동에 미치는 장기적 영향, 한국지반공학회 논문집, Vol. 27, No. 1, pp. 35-40.
2. Alshawabkeh, A. N. & Rahbar, N. 2006. Parametric study of one-dimensional solute transport in deformable porous media, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 8: 1001-1010.
3. Fox, P. J. (2007) “Coupled large strain consolidation and solute transport II: Model verification and simulation results.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(1), 16-29.
4. Lee, J. and Fox, P. J. (2009) “Investigation of consolidation-induced solute transport II: Experimental and numerical results,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(9), pp 1239-1253.
5. Peters, G. P. and Smith, D. W. (2002). “Solute transport through a deforming porous medium,” International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 26(7), pp. 683-717.
6. Schuck P.G. (2010) “In-situ sediment capping,” NEWMOA Workshop: Remediation of Contaminated Sediment Site.

기획: smk@ksae.re.kr (사무국)