

호소 저니의 인 용출 제어를 위한 모래 캡핑

Sand Capping for Controlling Phosphorus Release from Lake Sediments

김건하* · 정우혁** · 최승희***

Kim, Geonha · Jeong, Woohyeok · Choe, Seunghee

Abstract

In this research, possibility of sand capping was experimentally evaluated to control phosphorus release from lake sediment into water body. Three acrylic columns without and with 40 and 80 mm of sand capping were prepared. Phosphorus concentrations of overlying water in these columns were measured. Performances of sand capping were evaluated for 0, 40, and 80 mm of capping thickness by measuring DO, ORP, TP, and PO₄-P. For the case without capping, the releasing rate of total phosphorus was higher and dissolved oxygen decreased faster, comparing with those of columns with capping. Total phosphorus concentrations in overlying water were inversely proportional to capping thickness, while phosphate concentration showed no significant differences between both cases. The experiment results suggested that sand capping is effective to retard total phosphorus release from sediment.

Keywords : lake, sediments, phosphorus, release, capping.

요 지

본 연구에서는 호소 바닥의 저니에서 용출된 인이 수질에 악영향을 미치는 것을 제어하기 위하여 모래를 재료로 하는 캡핑을 저니 위에 포설할 때 기대할 수 있는 효과에 대하여 연구하였다. 실험실에서 제작된 칼럼을 외부 공기의 유출입이 없도록 폐쇄하고, 인의 농도가 높은 저니층에서 인의 용출로 인한 상등수의 인농도 변화와 모래로 이루어진 캡핑으로 격리 처리된 저니층에서 인의 용출로 인한 상등수의 인 농도 변화를 비교 분석하였다. 캡핑을 하지 않은 칼럼과 40 mm, 80 mm 캡핑 두께의 3가지 칼럼으로 시험을 수행하였고, DO, ORP, TP, PO₄-P를 측정하였다. 캡핑을 하지 않은 칼럼이 80 mm의 모래 캡핑을 한 칼럼보다 4배 이상의 TP농도 증가가 있는 반면 PO₄-P의 경우는 큰 차이가 나지 않았다. 본 실험조건에서 모래로 캡핑한 저니의 경우 캡핑이 되지 않은 저니 보다 인의 용출로 인한 상등수의 인의 농도를 저감할 수 있음이 확인되었다.

핵심어 : 호소, 저니, 인, 용출, 캡핑

1. 서 론

호소나 하천에서 점원 및 비점원에 의한 영향으로 인, 질소 등의 각종 영양소와 중금속, 농약 등의 물질들이 용존상태에서 입자상태의 물질로 변화하거나 입자상 물질에 부착되어 수체의 바닥에 퇴적되게 되는데 이렇게 퇴적된 물질들을 퇴적물, 저니 또는 저질(sediment)이라 부르며 호소나 하천의 장기적인 내부오염원으로 작용하여 수층을 오염시키게 된다(Abrams 등, 1995). 그리고 외부유입수의 수질을 개선한다고 하여도 내부부하로 작용하는 저니에 축적된 오염원이 용출하여 호소내의 수질은 그대로인 경우가 발생하게 된다(Bengtsson, 1975). 또한 수저퇴적물은 비점오염원의 발생과 수질의 변화관계에서 불확실성의 주원인이기도 하다. 따

라서 오염된 수저 퇴적물이 수체의 오염도에 기여하는 정도를 밝혀내고, 이에 대한 체계적인 관리가 이루어진다면 보다 효율적으로 깨끗하고 안전한 물의 공급을 기대할 수 있을 것이다(환경정책평가연구원, 1998).

호소의 저니는 대부분 수층에서 침강하여 형성된 것으로 일정한 기간 축적되어 있다가 분해, 확산, 재부유, 생물교란 등의 생물학적, 물리화학적 과정에 의해 다시 수층으로 용출되어 수질 및 수생태계에 영향을 미칠 수 있다. 특히 저니의 인은 퇴적된 이후 수층에 용출되어 지표수의 부영양화를 일으킬 수 있는 주요 수질 인자로서 관심의 대상이 되고 있다(Wang, 2005).

퇴적된 저니로부터의 인 용출은 DO, 온도, pH에 따라 변하며, DO의 농도와 용존성 인의 용출률은 반비례관계에 있고, DO 농도가 1 mg/L에 도달하면서 저질토로부터 인의 용

*정회원 · 한남대학교 토목환경공학과 교수(E-mail: kimgh@hannam.ac.kr)

**정회원 · 한남대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail: jeong.wh@hannam.ac.kr)

***고려대학교 환경정책연구소 박사(E-mail: shchoe@korea.ac.kr)

Table 1. Summary of field-scale capping projects (after Palermo, 1998).

Project Location	Contaminants	Site Conditions	Cap Design
Kihama Inner Lake, Japan	Nutrients	3700 m ²	Fine sand, 5 and 20 cm
Akanoi Bay, Japan	Nutrients	20,000 m ²	Fine sand, 20 cm
Hamilton Harbor, Ontario	PAHs, Metals, Nutrients	10,000 m ² portion of an industrial harbor	0.5 m sand
Eagle Harbor, Washington	Creosote	220,000 m ² within emphyment	0.9 m of sandy sediment
Simpson Tacoma, Washington	Creosote, PAHs, Dioxins	68,800 m ² near shore with varying depth	1.2 to 6.1m of sandy sediment

출이 급격하게 일어난다고 하였다(이정엽, 1999). 김태웅 등 (1997)은 금강 하류에서 채취한 인의 용출실험결과 높은 온도(25°C)와 용존산소 0.4~0.6 mg/L의 혐기성 조건에서 인의 최대 용출율은 16.6 mg/m²/day이고 낮은 온도(5°C)와 호기성 조건인 용존산소 8.6~9 mg/L에서는 최대 1.7 mg/m²/day의 용출률로 나타난다고 하였다. 대청호 내의 저니 용출율은 혐기성 상태에서 TP의 경우 3.38~9.37 mg/m²/day인 것으로 보고되고 있다(이요상 등, 2000).

국내에서는 저니에 의한 수질 오염의 저감을 위해 준설에 의한 처리가 가장 많이 사용되고 있으나 저니의 재부상으로 인한 탁도의 증가와 오염물질의 용출 등 2차 오염이 발생할 수 있고, 준설 후 발생한 준설 저니의 처리가 또다른 문제로 발생하게 된다. 저니 준설의 대안공법중 하나인 저니 캡핑(capping)은 자연에 무해한 소재로 구성된 캡핑 재료를 오염된 저니층의 상부에 포설하여 오염된 저니와 상층수를 격리하는 공법(Palermo, 1998; Mohan, 2000)으로 준설과는 달리 오염원의 수체로의 이동을 최소화하여 오염원의 확산과 용출을 효과적으로 차단할 수 있다(김건하 등, 2005; Patrick H, 1998). 또한 캡핑재료로 친환경적인 소재를 사용함으로써 캡핑 상부에 새롭게 조성되는 수저면 생태계의 빠른 복원이 가능함과 동시에 저니의 인은 캡핑에 의해 용출이 차단 또는 지연될 수 있다(José M, 1998). Table 1은 국외에서 캡핑을 적용하여 오염퇴적물을 처리한 사례들을 보여주고 있는데(Palermo 1998) 대부분 모래나 모래가 섞인 저니 등을 사용하였으며 저니 오염물질의 위험여부에 따라 캡핑재료를 달리하여 시공하였다.

Fig. 1은 캡핑을 현장에 적용하기 위한 기본 설계 개념도이다(Palermo, 1998). Fig. 1(A)는 저니 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 저니 교란, 캡핑 하중으로 인한 부등침하, 유속증가에 의한 캡핑재의 내구성 문제로 제기될 수 있다. Fig. 1(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, 저니가 캡핑 하중에 의해 압밀이 이루어지면서 침하가 발생할 수 있으며, 저니에서 유기오염물이 혐기 분해를 일으키면서 가스가 생성되어 용기가 일어날 수 있는 경우, 캡핑층의 단층 파괴를

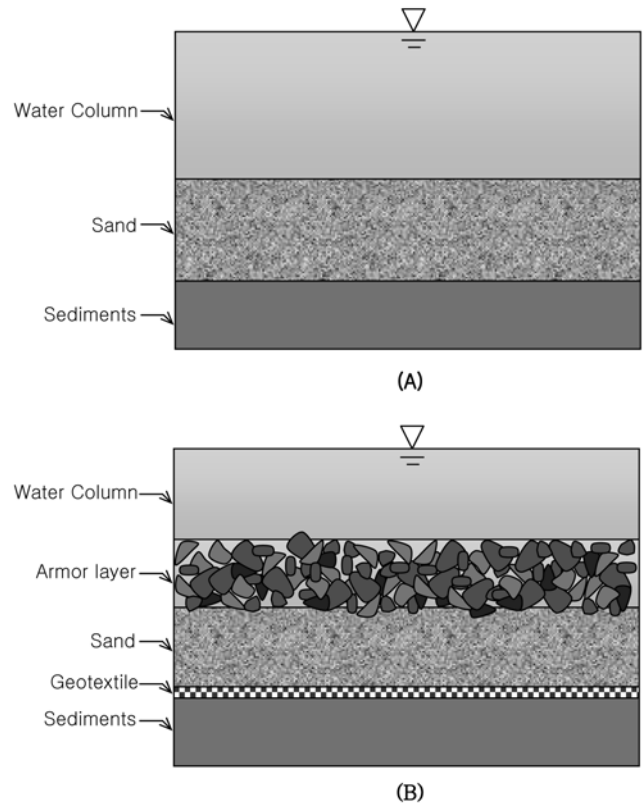


Fig 1. Design Examples of Sediment Cappings using Sand: (A) Simple Sand Capping; (B) Sand Capping with Reinforcements.

지하기 위하여 Geogrid 또는 Geotextile등의 구조적인 보강재를 사용할 수도 있다.

퇴적물이 오염된 지역의 자연적, 사회적 환경요인을 고려하여 준설과 캡핑 공법을 병행하면 보다 효율적이고 경제적이며, 위험성을 감소할 수 있는 퇴적물 처리 체계를 세울 수 있다. 캡핑 또는 이와 유사한 개념의 오염 퇴적물 처리 방안은 준설의 대안으로 거론된 바 있으나(환경관리공단, 1999) 국내에서 구체적인 연구가 진행된 바는 거의 없다.

본 연구는 호소 수질오염의 주요한 원인인 저니의 인 용출을 저감하기 위한 캡핑공법의 기초적인 성능실험으로, 캡핑 재료로 가장 빈번하게 제시되는 모래를 이용하여 실험실 규모의 실험을 통하여 캡핑의 효과를 확인하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 사용한 저니는 대청댐 수문에서 상류 약 1 km 지점에서 소형보트에서 그랩샘플러를 내려 40 m 수심에서 교란된 상태의 시료를 채취하였다. 시료채취 즉시 현장에

Table 2. Comparison of physicochemical characteristics of Sediment used in this research with literatures

Site	pH	Volatile matter (%)	TP (mg/kg)	Ads-P (mg/kg)	NAI-P (mg/kg)	Apatite-P (mg/kg)	Residual-P (mg/kg)	Reference
Daechung Reservoir	6.3	8.04%	2097 (100%)	70 (3.3%)	721 (34.4%)	525 (25.1%)	780 (37.2%)	
Geum River	7.9	-	1174 (100%)	2 (0.2%)	511 (43.5%)	48 (4.1%)	613 (52.2%)	Kim <i>et al.</i> (1997)
Jamsil in-stream weir	-	4.2%	883 (100%)	10 (1.1%)	289 (32.7%)	282 (32.0%)	302 (34.2%)	Kim <i>et al.</i> (2003)
Chungpyung Lake	-	3.4%	480 (100%)	28 (5.8%)	100 (20.8%)	112 (23.4%)	240 (50.0%)	Kim <i>et al.</i> (2003)

서 20 L 용량의 플라스틱 통에 공기가 들어가지 않도록 밀봉하였으며 냉장상태로 실험실로 운반하여 즉시 분석을 실시하였다. 저니의 pH는 저니시료 5 g을 증류수 25 ml에 넣어 보정된 pH미터로 측정하였고(토양오염공정시험법), 입도 분포는 미 Malvern사의 입경분석기인 Mastersizer를 사용하여 측정하였고(KS F2302), 강열감량은 550°C의 전기로에 2 시간 동안 가열하여 측정하였다(해양환경공정시험법). 인은 존재형태에 따라 다양한 분석방법이 있으나, 일반적으로는 총인(TP), 토양이나 기타 다양한 미립자의 표면에 흡착되어 NH₄Cl로 용출되는 Adsorbed-P(Ads-P), 철이나 알루미늄과 같은 금속과 착물을 이루고 있고 NaOH에 의해 용출되는 Nonapatite-P(NAI-P), 광물의 결정속에 포함되어 있는 Apatite-P(A-P), 유기물과 결합된 residual-P로 분류된다. NAI-P, Apatite-P, Abs-P, residual-P는 Hieltjes 등(1980)이 제안한 방법으로 측정하였다.

Table 2는 본 연구에 사용된 저니의 물리적 특성 및 인 존재 형태별 특성을 문헌상의 자료와 비교한 것이다. 착물형태인 NAI-P가 총인의 34.4%를 차지하고 있는데, 이는 저니와 상등수간에 산화환원전위 및 pH의 변화에 따라 상당량의 인이 용출될 가능성을 잠재하고 있음을 나타낸다. 금강, 잠실수중보, 청평댐에서 채취한 저니와 비교해 볼 때 본 연구에서 사용된 저니는 높은 인 농도를 보여주고 있다. 시료채취시 5개의 분리된 저니를 채취하였는데 입도분포를 분석한 결과 Fig. 2의 (A)와 같은 분포를 나타내고 있으며, 미국 농무성의 토양분류법에 따라 (B)에는 실트류로 분류 된다. 저니의 함수율은 70.4%였다.

캡핑 재료는 모래를 선택하였고 물에 침수시켜 깨끗한 물로 3회 이상 세척하여 사용하였다. Fig. 2(A)는 모래의 입도분포를 보이고 있다. 모래의 밀도는 2.58이었다. 모래의 겉보기 밀도 및 간극비(n)는 캡핑의 두께가 80 mm일 때 1.37 g/cm³ 및 0.4이고 40 mm일때는 1.07 g/cm³ 및 0.57이였으며, 유효직경(D₁₀)은 0.09 mm, 곡률계수(D₃₀²/(D₁₀*D₆₀))는 1, 균등계수(D₆₀/D₁₀)는 5 이다. 모래의 평균입경을 유효 직경(D₁₀)인 0.09 mm이라 할 때 Stroke법칙을 이용한 수중 최종 중속도는 64.3 mm/s이다.

본 연구는 선행연구에서 밝혀진 인의 용출특성의 주요 인자인 DO, 온도, pH에 대하여는 변수를 두지 않았고, 캡핑이 어느 정도의 효과를 갖는지를 밝혀내기 위하여 캡핑의 두께에만 변수를 두었다.

캡핑의 성능실험을 위하여 직경 60 mm, 높이 320 mm의 원형 이크릴 칼럼을 사용하였다. 3개의 동일한 칼럼에 저니

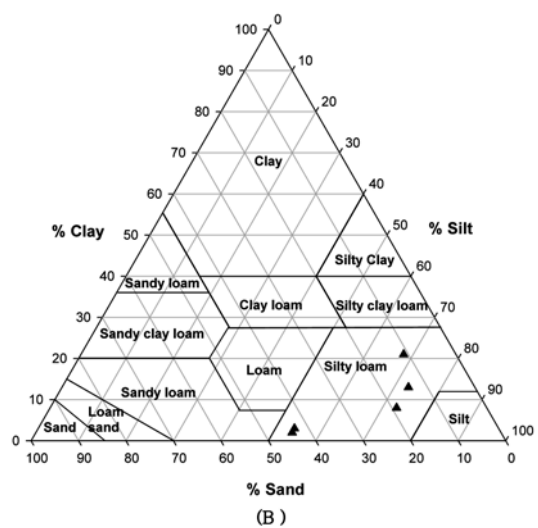
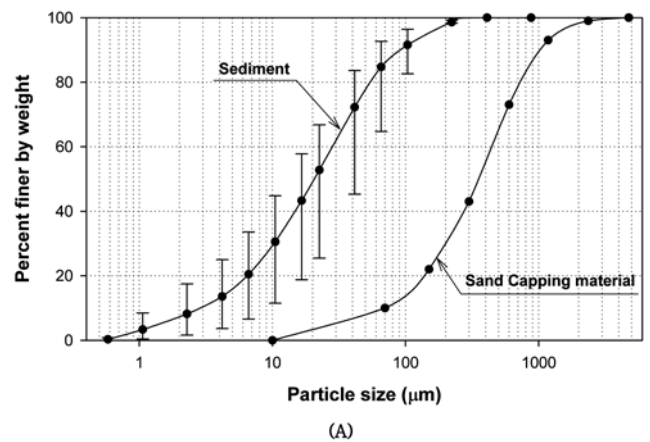


Fig 2. Particle size distributions of Materials used in this research: (A) Grab-sampled Sediment at the Daechung Reservoir and Sand as a capping material; (B) Sediment particle distributions(US Department of Agriculture Textural Classification).

를 높이 40 mm씩 넣고, 모래를 2시간 이상 완전히 침수시킨 습윤상태에서 저니의 교란이 일어나지 않도록 소량씩 긴 수약저로 저니위에 뿌려 hc₀ 칼럼은 0 mm, hc₄₀ 칼럼은 40 mm, hc₈₀ 칼럼은 80 mm 두께로 포설하였고, 다짐과정은 거치지 않았다. 증류수의 용존산소 농도를 조절하기 위하여 질소가 충전된 글로브 박스 안에서 질소로 증류수를 포기하여 용존산소의 농도를 낮게 만든 후, 박스에서 꺼내어 용존산소의 농도를 측정하면서 다시 산소로 포기시켜 용존산소의 농도를 6 mg/L가 되도록 조정하였다. 펌프와 튜브를 이용하여 180 mm의 높이로 증류수를 넣었다. 시료추출구를 삽

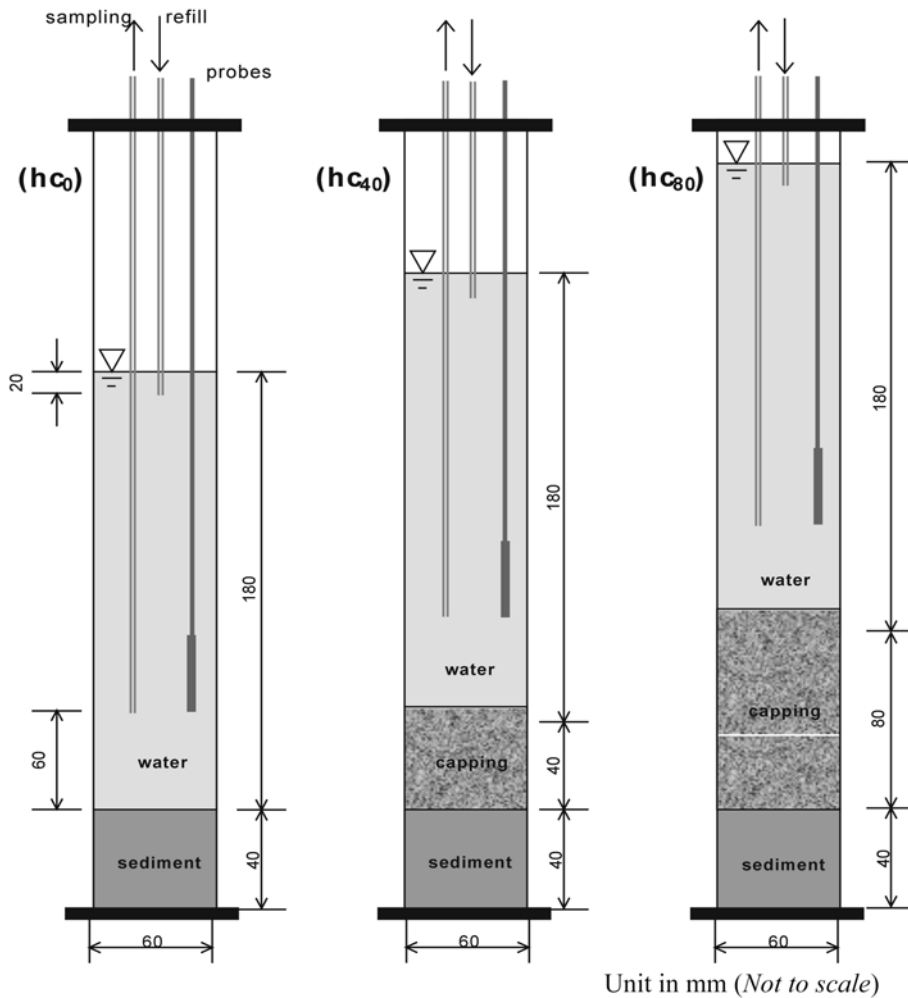


Fig 3. Schematic Experiment Conditions: (hc₀) Contaminated sediment with no capping; (hc₄₀) Contaminated sediment layer with sand capping on top; (hc₈₀) Contaminated sediment layer with double capping thickness.

입하여 수체의 하단 3분의 1 지점에서 추출할 수 있도록 하였고, 시료 추출로 인하여 손실된 수량을 보상하기 위한 유체 주입구를 수위 20 mm 아래 지점에 설치하였다. 마지막으로 용존산소전극과 산화환원전위 전극을 시료추출구와 같은 깊이에 위치시켰다. 상부는 공기의 출입이 없도록 아크릴로 밀폐하였다. Fig. 3은 3개 칼럼의 개략을 보이고 있다.

실험기간 동안 캡핑의 두께가 다른 3개의 칼럼을 1조로 하여 2조를 운전하였으며 1조의 칼럼에서 시료채취 후 줄어드는 상등수의 양은 같이 운전하고 있는 2조의 칼럼에서 채취하여 보충하였다. 빛이 없는 곳에서 15일간 칼럼을 운전하면서 24시간 간격으로 시료를 채취하였다. 실험을 수행한 온도는 20±2°C였다.

채취한 시료의 분석항목은 저니 상부의 상등수에 대하여 온도, 용존산소(DO), pH, 산화환원전위(ORP)는 Orion 710a를 이용하여 측정하였으며, 총인(TP), 유기성 인(PO₄-P)은 Standard Methods 18th.⁶⁾에 준하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 각 실험조건에 따른 용존산소 농도의 변화를 보이고 있다. 캡핑이 없는 hc₀ 칼럼의 경우, 용존산소의 농도는 1 mg/L까지 급격히 감소하며 그 이후는 완만히 감소한다. hc₄₀ 칼럼과 hc₈₀ 칼럼의 경우 용존산소의 양은 완만히 감소

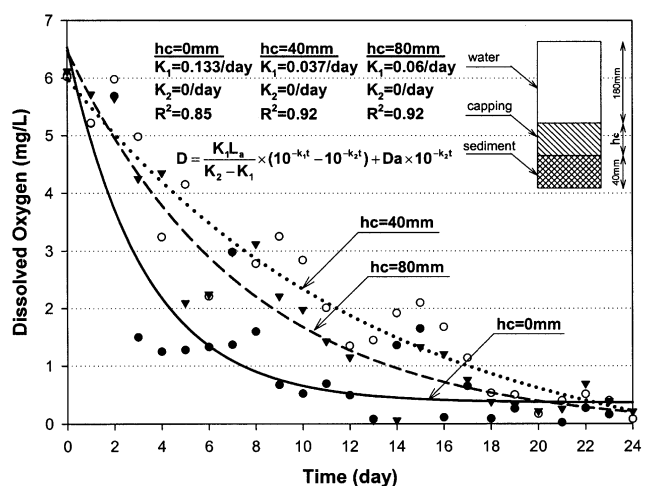


Fig 4. Dissolved Oxygen Concentration Curves for Test Conditions.

하는 추세를 보여 캡핑이 없는 경우와 농도까지 감소되되, 그 속도에 차이가 있었다. Streeter-Phelps 용존산소 감소공식(식 1)을 이용하여 각각의 칼럼에 대하여 탈산소계수를 구하였다(Jerald, 1996).

$$D = \frac{K_1 L_a}{K_2 - K_1} \times (10^{-k_1 t} - 10^{-k_2 t}) + D_a \times 10^{-k_2 t} \quad (\text{식 1})$$

여기서 D=t일 후의 용존산소 부족량(mg/L), L_a=최종

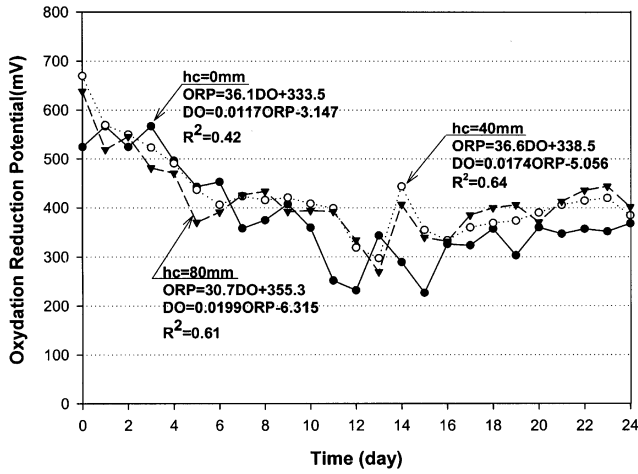


Fig 5. Oxidation Reduction Potential (ORP) for Test Conditions

BOD(mg/L), D_a 가 0일 때, 즉, 최초산소 부족량(mg/L), K_1 =탈산소계수(/day), K_2 =재포기계수 (/day)이다. hc_0 칼럼에서 K_1 은 0.133/day, hc_{40} 칼럼에서 K_1 는 0.037/day, hc_{80} 칼럼에서 K_1 은 0.06/day 이었다. 캡핑이 두께가 증가함에 따라 탈산소계수가 작아야 하지만, hc_{80} 칼럼의 경우 hc_{40} 칼럼보다 더 빠른 용존산소의 감소가 일어나 더 높은 탈산소계수를 나타낸다. 이것은 캡핑제의 하중으로 인한 허부 저니층의 압밀과 이에 따른 공극수의 상부 유출(Mohan *et al.*, 2000)을 생각해 볼 수 있으며, 본 연구의 실험조건으로는 이 가설을 검증할 수 없으므로 후속연구가 필요하다.

실험기간동안 BOD₅의 평균치는 캡핑의 두께에 따른 차이가 나타나지 않았으며 도리어 캡핑의 두께가 두배일 때 용존산소의 감소량이 많았다. 캡핑제의 하중으로 인한 허부 저니층의 압밀과 이에 따른 공극수의 상부 유출을 생각해 볼 수 있으나 본 연구의 실험조건으로는 이 가설을 검증할 수 없으므로 후속연구가 필요하다.

Fig. 5는 각 실험조건에 따른 산화환원전위 변화를 보이고 있다. 캡핑의 두께에 따른 ORP의 차이는 많지 않으나 DO와 비슷한 경향을 보이고 있다. 초기의 ORP는 520~680 mV이었으나 최종 ORP는 350~410 mV로 나타났고, ORP와 DO의 회귀분석 결과 상관관계가 존재함을 알 수 있다.

DO의 변화는 미생물의 활동과 밀접한 관계가 있다. ORP의 변화 역시 미생물과 관계가 있다. ORP가 변화하는 요인을 크게 두가지로 분류하면, DO의 변화에 따른 미생물의 활동으로 인하여 발생하는 ORP의 변화가 있고, 이외의 화학적인 영향에 기인하는 ORP의 변화를 고려할 수 있다. DO와 ORP의 상관식을 분석해 볼 때 DO와 ORP가 상대적으로 상관성이 높으면, 미생물에 의해 ORP의 변화가 주도적으로 이루어지고, DO와 ORP의 상관성이 낮을 경우는 상대적으로 화학적인 영향에 의하여 ORP의 변화가 주도적으로 이루어지고 있다고 추측할 수 있다. 캡핑이 있는 경우 ORP와 DO의 상관식에서 단위 DO에 대한 ORP의 변화량이 커지는 것은 캡핑을 포설함으로써 미생물이 인의 용출에 미치는 영향이 상대적으로 감소하는 것을 의미한다. 만약 캡핑층이 ORP를 변화시킬 수 있는 물질이라면 인 용출이 훨씬 더 저감될 것이다. Wauer *et al.*(2005)는 nitrate와 Fe(III)가 함유된 물질을 퇴적물 상부에 포설하여 인의 용출을 저감하

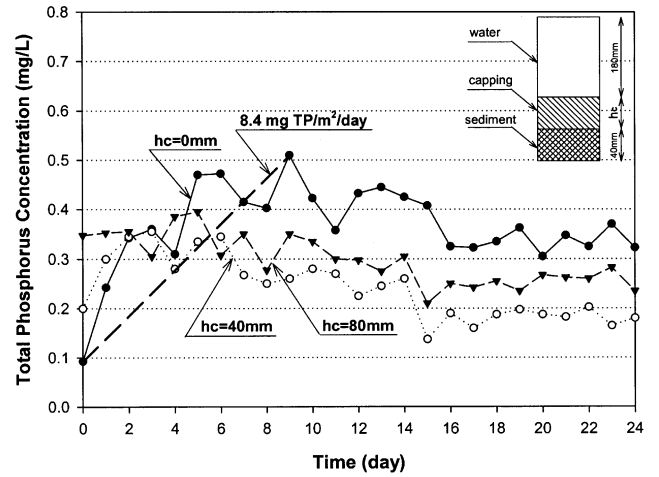


Fig 6. Total Phosphorus Concentration Curves for Test Conditions.

였으며, Varjo *et al.*(2003)은 gypsum($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)를 포설하여 퇴적물과 인의 용출을 저감하였다.

Fig. 6는 각 실험조건에 따라 운전하고 있는 3개의 칼럼 상등수의 초기농도 대비 총인의 농도변화를 보이고 있다. hc_0 칼럼 상등수의 초기 TP농도는 0.09 mg/L였고, hc_{40} 칼럼의 경우는 0.2 mg/L, hc_{80} 칼럼의 경우는 0.35 mg/L이다. 상등수의 초기농도가 0 mg/L이 아닌 것은 수체와 캡핑제를 위치시킬 때 저니의 상부에 발생하는 교란으로 저니의 인이 수체에 유입되었기 때문이다. 그리고 캡핑이 이루어진 칼럼에서 농도가 높게 나타나는데, 이는 캡핑의 현장적용시에도 발생할 수 있는 경우로써, 모래의 종속도가 64 mm/s로 포설되어 저니의 교란에 따른 인이 용출된 것으로 볼 수 있다. 또한 hc_{40} 칼럼 보다 hc_{80} 칼럼에서 TP의 농도가 높게 나타나는데 이것은 모래의 퇴적시 발생하는 교란 효과와 더불어, 앞에서 거론한 압밀에 의한 저니에서의 공극수의 용출로 초기 TP가 높게 나타난것으로 추정할 수 있다. 캡핑이 이루어지지 않은 hc_0 칼럼의 경우 초기부터 급격하게 TP의 농도가 증가하여 실험 9일에 상등수는 최고 0.51 mg/L까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 9일 이후부터 16일까지 감소 하다가, 이후에 평균 0.34 mg/L의 농도로 평형을 보이고 있는데, 저니내 기질의 용출과 미생물의 성장이 평형을 이루고 있기 때문이다. 9일까지의 인의 용출율을 계산하면 8.4 mgTP/m²/d인데 이는 문헌상의 값보다 큰 값을 보이고 있다. hc_{40} 칼럼의 경우 초기 5일간 증가하여 0.34 mg/L의 농도를 나타내고 있으나 지속적으로 감소하여 15일 이후 평균 0.18 mg/L의 농도로 평형을 이루고 있으며, hc_{80} 칼럼에서 상등수의 TP농도는 초기 농도에서 지속적으로 감소하여 15일 이후 0.25 mg/L에서 평형을 이루고 있는 것을 볼 수 있다. hc_0 칼럼에 대하여 hc_{40} , hc_{80} 칼럼의 최종 평형 농도를 비교해볼 때 hc_{40} 칼럼은 53%, hc_{80} 칼럼은 74%로의 낮은 농도를 나타내어, 캡핑이 TP의 용출을 제어하는데 있어서 효과를 나타내고 있음을 보여주고 있다. 이러한 실험결과로 캡핑은 저니의 인을 수체로 용출시키는 속도를 저감시키며, 미생물의 기질소모 이하로 그 속도를 낮추면 수체내의 인의 농도를 일정하게 유지할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 각 칼럼의 상등수에서 PO₄-P의 초기농도에 대한

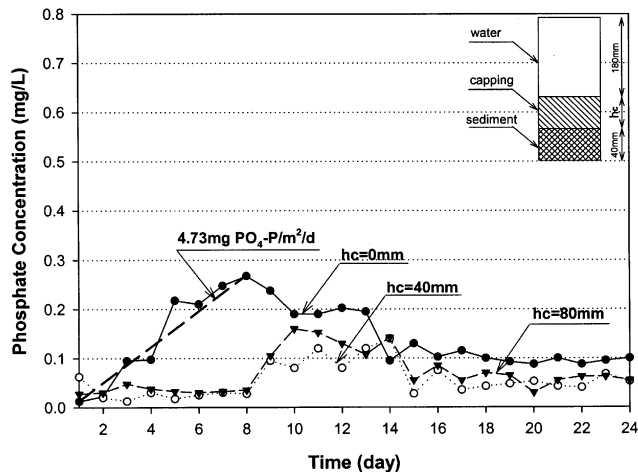


Fig 7. Phosphate Concentration Curves for Test Conditions

시간에 따른 농도를 보여주고 있는데 $PO_4\text{-P}$ 는 TP와 다른 양상을 보여주고 있다. hc_0 칼럼의 경우 시험 초기부터 8일간 지속적인 증가가 이루어지고 이후 감소되어 16일 이후 평형상태를 보여주고 있고, hc_{40} , hc_{80} 칼럼의 경우 시험 9일차부터 $PO_4\text{-P}$ 의 농도가 증가하기 시작하였으나 15일 이후 다시 낮아진 농도로 평형 상태를 이루는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 6의 경우와 같이 hc_0 칼럼의 $PO_4\text{-P}$ 의 용출률을 계산하면 $4.73 \text{ mg}PO_4\text{-P}/\text{m}^2/\text{day}$ 로, 저니에서 용출되는 인의 대부분은 $PO_4\text{-P}$ 의 형태임을 알 수 있다. 이는 모래를 재료로한 캡핑이 인산염 형태의 용존인 보다 불용성인의 용출제어에 보다 효과적임을 나타내고, hc_0 칼럼에서 용존산소가 가장 먼저 감소한 것과 관련지어 볼 수 있으며, 캡핑을 하였을 경우 저니에 포함된 인의 용출 및 수체의 혐기화가 지연되는 것을 알 수 있다. 하지만 장기적인 모니터링의 경우 이와는 다른 결과를 초래할 수도 있기 때문에 장기 관측 결과가 필요하다고 볼 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 저니의 인 용출을 제어하기 위한 방법으로 모래를 이용한 캡핑을 포설할 경우 인의 용출을 및 제반 인자간의 관계를 알아보기 위해 수행되었고 다음과 같은 결론을 얻었다.

칼럼 시험 결과 초기 용존산소의 농도가 6 mg/L 인 수체에서 모래로 캡핑을 하였을 경우 용존산소의 농도가 8일 이후에 2 mg/L 미만으로 감소하였으며, 캡핑을 하지 않은 경우 4일 이후에 용존산소가 2 mg/L 미만으로 감소하였다. 수체가 인용출의 좋은 조건인 혐기화됨에 있어 모래 캡핑이 시간을 지연시켜주는 것을 기대할 수 있을 것으로 보인다. 또한 용존산소와 ORP의 높은 상관관계로부터 인용출을 위한 저니와 수체의 환경조건을 예측하고 모니터링 할 수 있는 근거를 마련하였다.

칼럼의 TP농도는 캡핑을 하지 않은 hc_0 칼럼에 대하여 40 mm 캡핑된 hc_{40} 칼럼, 80 mm 캡핑된 hc_{80} 칼럼의 최종 평형 농도를 비교해볼 때 hc_{40} 칼럼은 53%, hc_{80} 칼럼은 74%로 낮은 농도를 나타냈다. 모래캡핑을 통하여 TP의 용출을 제어할 경우 효과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

hc_0 칼럼의 $PO_4\text{-P}$ 의 용출률을 계산하면 $4.73 \text{ mg}PO_4\text{-P}/\text{m}^2/\text{day}$ 로, 저니에서 용출되는 인의 대부분은 $PO_4\text{-P}$ 의 형태

임을 알 수 있다. 이것은 모래를 재료로한 캡핑이 인산염 형태의 용존인 보다 불용성인의 용출제어에 보다 효과적임을 나타내고, hc_0 칼럼에서 용존산소가 가장 먼저 감소한 것과 관련지어 볼 수 있다. 그리고 캡핑을 하였을 경우 저니에 포함된 인의 용출 및 수체의 혐기화가 단기적으로 지연되는 것이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 중소기업청 산학연 콘소시엄 사업 및 2005년도 금강수계 환경기초조사 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김건하, 정우혁(2005) 低泥 캡핑(Sediment Capping)을 활용한 오염퇴적물의 효율적인 처리. *대한토목학회지*, 대한토목학회, 제53권, 제4호, pp. 92-97.
- 김태웅, 임봉수(1997) 금강하구호 Sediments로부터 수질오염물질 용출특성에 관한연구. *한국수질보전학회지*, 한국수질보전학회, 제13권, 제3호, pp. 245-253.
- 이요상, 이경식(2000) 대청댐 저수지 퇴적물의 용출특성과 수질에 미치는 영향에 관한 연구. *환경영향평가*, 제9권, 제2호, pp. 99-107.
- 이정영, 강선홍(1999) 저질토로부터의 인의 용출거동 예측 및 제거기술 개발-1, 저질토로부터의 인의 용출거동 예측. *대한상하수도학회지*, 대한상하수도학회, 제12권, 제2호, pp. 89-94.
- 환경관리공단(1999) *팔당호 퇴적물 현황 및 수리특성 조사보고서*.
- Abrams, M.M. and Jarrell, W.M. (1995) Soil phosphorus as a potential nonpoint source for elevated stream phosphorus levels. *J. Environ. Qual.*, Vol. 24, pp. 132-138.
- Hieltjes, A.H.M. and Lijklema, L. (1980) Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *J. Environ. Qual.*, Vol. 9, pp. 405-407.
- Kim, L., Choi, E., and Stenstrom, M.K. (2003) Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments. *Chemosphere*, Vol. 50, pp. 53-61.
- Mohan, R.K., Brown, M.P. and Barnes, C.R. (2000) Design criteria and theoretical basis for capping contaminated marine sediments. *Applied Ocean Research*, Vol. 22, pp. 85-93.
- Palermo, M.R. (1998). Design considerations for in-situ capping of contaminated sediments. *Water Science and Technology*, Vol. 37, No. 6-7, pp. 315-321.
- Schnoor, J.L. (1996) *Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil*. New York, John Wiley & Sons.
- Stumm, W. and Morgan, J.J. (1996) *Aquatic chemistry*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Varjo, E., Liikanen, A., Salonen, V., and Martikainen, P. (2003). A new gypsum-based technique to reduce methane and phosphorus release from sediments of eutrophied lakes (Gypsum treatment to reduce internal loading). *Water Research*, Vol. 37, pp. 1-10.
- Wang, S., Jin, X., Pang, Y., Zhao, H., and Zhou, X. (2005) The study of the effect of pH on phosphate sorption by different trophic lake sediments", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 285, No. 2, pp. 448-57
- Wauer, G., Gonsiorczyk, T., Kretschmer, K., Casper, P., and Koschel, R. (2005) Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release. *Water Research*, Vol. 39, pp.494-500.

(접수일:2005.9.26/심사일:2005.12.11/심사완료일:2005.12.19)