

모래 캡핑 두께가 퇴적물 인 용출에 미치는 영향

김 건 하* · 정 우 혁

(한남대학교 공과대학 토목환경공학과)

Impact of Thickness of Sand Capping on Phosphorus Release Rate from Sediment. Kim, Geonha* and Woohyeok Jeong (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University)

This research was carried out to understand the impacts of thickness of sand capping to control phosphorus release from sediment into overlying water. As capping effectively retards release flux, phosphorus concentration in water body can be maintained if phosphorus release rate was kept under microbial degradation rate. With capping thickness increases, deaeration rate become less, while reaeration coefficient become higher. Phosphorus release rate and capping thickness were linearly correlated. The results of regression analysis indicated that phosphorus release can be controlled effectively by sand capping of least 20~40 mm thickness.

Key words : sediment, overlying water, water quality, capping, control

서 론

퇴적물에 포함되어 있는 오염물질은 환경조건에 따라 수체로 용출되므로 수질을 악화시킨다 (Lijklema *et al.*, 1993; Abrams and Jarrell, 1995; Wu *et al.*, 1997). 호소의 내부오염원인 퇴적물의 인은 부영양화와 조류 과대번성의 직접적인 인자이다 (Abrams and Jarrell, 1995; Xie *et al.*, 2003). 퇴적물로부터의 인 용출은 용존산소, 온도, pH에 따라 변하며, 빛이 없고 혐기성 상태에서 인의 용출률은 증가하고 (Xiangcan *et al.*, 2006), 용존산소 농도가 1 mg L^{-1} 이하가 되면 퇴적물로부터 인 용출이 급격하게 일어난다 (House and Denison, 1998; 이, 1999; Kisand and Noges, 2003). Petticrew와 Arocena (2001)는 성층현상이 빈번하게 발생하여 심층수에 용존산소가 부족한 하절기 호소수의 용존산소와 퇴적물에서 용출되는 인을 분석하였는데 용존인은 심층수의 혐기상태와 아주 밀접하게 관련된다고 하였다. 그리고 퇴적물에서 용출되는 인의

양은 비교적 수량이 적은 봄과 수온이 높은 여름에 가장 많은 것으로 나타났다.

국내에서는 퇴적물에 의한 수질 오염의 저감을 위해 준설에 의한 처리가 가장 많이 사용되고 있으나 퇴적물의 재부상으로 인한 탁도의 증가와 오염물질의 용출 등 2차 오염이 발생할 수 있고, 준설퇴적물 처리가 곤란할 수 있다. 또한 오염퇴적물에 현장 화학처리를 적용할 수 있다. Wauer 등 (2005)은 질산성질소와 Fe (III)가 함유된 물질을 퇴적물 상부에 포설하여 인의 용출을 저감하였으며, Varjo 등 (2003)은 gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)를 포설하여 퇴적물과 인의 용출을 저감하였다. 하지만 이런 기술들은 식수원으로 사용하기 위한 상수원에 대량으로 적용될 경우 처리제 자체가 제2의 오염을 일으킬 가능성을 배제할 수 없다.

퇴적물 준설의 대안 공법 중 하나인 퇴적물 캡핑 (capping)은 캡핑 재료를 오염된 퇴적물층의 상부에 포설하여 오염된 퇴적물과 상층수를 격리하는 공법으로 준설과는 달리 오염원의 수체로의 이동을 최소화하여 오염원의

* Corresponding author: Tel: 042) 629-7534, Fax: 042) 629-8366, E-mail: kimgh@hannam.ac.kr

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

Location	Contaminants	Site conditions	Cap design
Kihama Inner Lake, Japan	Nutrients	3,700 m ²	Fine sand, 5~20 cm thickness
Akanoi Bay, Japan	Nutrients	20,000 m ²	Fine sand, 20 cm thickness
Hamilton Harbor, Ontario	PAHs, Metals, Nutrients	10,000 m ² of an industrial harbor	Sand, 50 cm thickness
Eagle Harbor, Washington	Creosote	220,000 m ² within embayment	Sandy Sediment, 90 cm thickness
Simpson Tacoma, Washington	Creosote, PAHs, Dioxins	68,800 m ² near shore with varying depth	Sandy sediment, 120~610 cm thickness

확산과 용출을 효과적으로 차단할 수 있다 (Palermo, 1998; Mohan, 2000; 김과 정, 2005). 또한 캡핑 재료로 친 환경적인 소재를 사용할 수 있으며, 캡핑 상부에 새롭게 조성되는 수저면 생태계의 빠른 복원이 가능함과 동시에 퇴적물의 인은 캡핑에 의해 용출이 차단 또는 지연될 수 있다 (Azcue, *et al.*, 1998; Patrick and Ulrich, 1999; Ute *et al.*, 2004). Table 1은 국외에서 모래나 모래가 섞인 퇴적물 등을 캡핑재료로 사용하여 오염퇴적물을 처리한 사례들이다 (Palermo, 1998를 보완 수정). 퇴적물이 오염된 지역의 자연적, 사회적 환경요인을 고려하여 준설과 캡핑 공법을 병행하면 보다 효율적이고 경제적이며, 위험성을 감소할 수 있는 퇴적물 처리 체계를 세울 수 있다.

김 등 (2006a)과 김 등 (2006b)의 선행연구에서 퇴적물의 인 용출량을 감소시키기 위하여 모래 캡핑을 실내 실험을 통하여 연구하였다. 두 연구에서 모래를 퇴적물 상부에 포설하여 인 용출을 효과적으로 지연시킬 수 있음을 제시하고 있으나, 초기 상등수의 인 농도가 균일하지 못하고 모래 두께에 따른 성능변화를 찾아내지 못하였으며, 반복실험이 되지 않은 관계로 실험의 정확도, 정밀도를 제시하지 못하였다.

본 연구는 퇴적물의 인 용출을 저감하기 위한 캡핑의 설계인자를 도출하기 위한 실험으로, 상수원에서 적용할 수 있는 모래를 캡핑재료로 사용한 실험실 규모 실험을 통하여 모래 캡핑의 두께에 따른 효과를 확인하고자 하였다. 모래 캡핑을 설계할 경우 생물학적교란, 가스의 발생, 압밀 (consolidation), 오염물질의 격리성, 지하수와 수

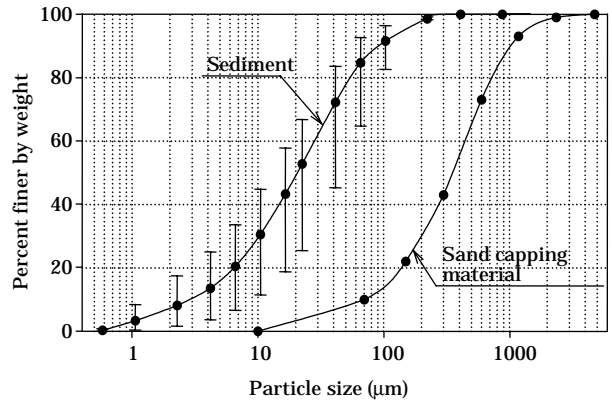


Fig. 1. Particle size distributions of Materials used in this research: Grab-sampled sediment at the Daecheong Reservoir and sand as a capping material.

체의 흐름, 수체의 유속 등 여러 인자를 고려할 필요가 있으나 본 연구에서는 지하수의 흐름이 없고, 수체는 정지된 상태이며, 압밀을 방지 하는 등의 다양한 변수를 제거한 이상적인 조건에서 두께에 따른 퇴적물에서 인 용출을 측정하고 분석하였다.

재료 및 방법

본 연구에서 사용한 퇴적물은 대청댐 수문에서 상류 약 1 km 지점에서 소형보트에서 Van Veen bottom garb sampler (세명엔지니어링)를 내려 40 m 수심에서 교란된 상태의 시료를 채취하였다. 시료채취 즉시 현장에서 20 L 용량의 플라스틱 통에 공기가 들어가지 않도록 밀봉하였으며 냉장상태로 실험실로 운반하여 즉시 분석을 실시하였다.

캡핑 재료인 모래는 깨끗한 물로 3회 이상 세척하여 사용하였다. Fig. 1은 모래의 입도분포를 보이고 있다. 모래의 밀도는 2.58 g cm⁻³이다. 모래의 겉보기 밀도 및 간극비 (n)는 캡핑의 두께가 80 mm일 때 1.37 g cm⁻³ 및 0.4 이고 40 mm일 때는 1.07 g cm⁻³ 및 0.57이었으며, 유효직경 (D₁₀)은 0.09 mm, 곡률계수 (D₃₀²/(D₁₀* D₆₀))는 1, 균등계수 (D₆₀/D₁₀)는 5이다. 모래의 평균입경을 유효직경 (D₁₀)인 0.09 mm이라 할 때 Stoke's법칙 (Jerald, 1996)을 이용한 수중 최종 중속도는 64.3 mm s⁻¹이다.

본 연구는 선행연구에서 밝혀진 인의 용출특성의 주요 인자인 DO, 온도 (김과 임, 1997; Jin *et al.*, 2006a), pH에 (Jin *et al.*, 2006b) 대하여는 변수를 두지 않았고, 캡핑이 어느 정도의 효과를 갖는지를 밝혀내기 위하여 모래 캡핑의 설계인자 중에서 두께에만 변수를 두었다.

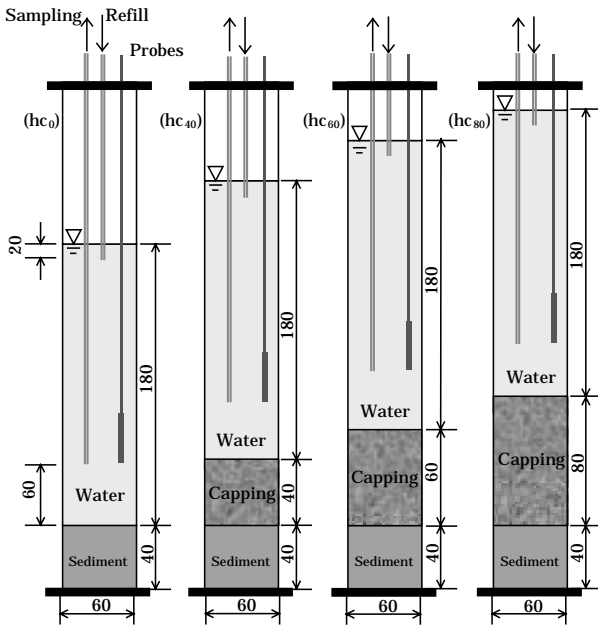


Fig. 2. Schematic of experiment conditions: hc₀=contaminated sediment without capping, hc₄₀=contaminated sediment with 40 mm of sand capping, hc₆₀=contaminated sediment with 60 mm of sand capping and hc₈₀=contaminated sediment with 80 mm of sand capping, respectively.

캡핑의 성능실험을 위하여 직경 60 mm, 높이 320 mm의 원형 아크릴 칼럼을 사용하였다. 4개의 동일한 칼럼에 퇴적물을 높이 40 mm씩 넣고, 모래를 2시간 이상 완전히 침수시킨 습윤상태에서 퇴적물의 교란이 일어나지 않도록 소량씩 긴 수직자로 퇴적물위에 뿌려 hc₀ 칼럼은 0 mm, hc₄₀ 칼럼은 40 mm, hc₈₀ 칼럼은 80 mm 두께로 포설하였고, 다짐과정은 거치지 않았다. 펌프와 튜브를 이용하여 180 mm의 높이로 증류수를 넣었다. 그리고 모든 칼럼의 용존산소 농도와 인 농도를 균일화 하기 위하여 각각의 칼럼의 상등수를 튜브로 연결하여 순환을 통해 혼합하였다. 시료추출구를 삽입하여 수체의 하단 3분의 1 지점에서 추출할 수 있도록 하였고, 시료 추출로 인하여 손실된 수량을 보상하기 위한 유체 주입구를 수위 2 cm 아래 지점에 설치하였다. 마지막으로 용존산소전극과 산화환원전위 전극을 시료추출구와 같은 깊이에 위치시켰다. 상부는 공기의 출입이 없도록 아크릴로 밀폐하였다. Fig. 2는 각 칼럼의 실험조건의 개략을 보이고 있다. 이것은 US EPA에서 제시한 SOD (Sediment Oxygen Demand) 측정방법을 본 실험에 맞게 변형하여 설계한 것이다 (Nolan and Johnson, 1979).

Table 2. Physicochemical characteristics of sediment used in this research.

pH	Volatile matter (%)	TP (mg kg ⁻¹)	Ads-P (mg kg ⁻¹)	NAI-P (mg kg ⁻¹)	Apatite-P (mg kg ⁻¹)	Residual-P (mg kg ⁻¹)
6.3	8.04%	2097 (100%)	70 (3.3%)	721 (34.4%)	525 (25.1%)	780 (37.2%)

실험기간 동안 실험의 정밀도, 정확도, 재현성을 확보하기 위하여 캡핑의 두께가 다른 4개의 칼럼을 3조로 운전하였다. 2조는 실험결과를 보는데 사용하였으며, 1조는 추가로 운전하였다. 추가로 운전한 1조의 칼럼에서 상등수를 채취하여 2조의 칼럼에 삽입함으로써 시료채취 후 줄어든 상등수의 양을 보충하였다. 빛이 없는 곳에서 25일간 칼럼을 운전하면서 24시간 간격으로 시료를 채취하였다. 실험을 수행한 온도는 20±2°C였다.

퇴적물의 pH는 퇴적물시료 5 g을 증류수 25 mL에 넣어 보정된 pH미터로 측정하였고 (토양오염공정시험법), 입도분포는 미 Malvern사의 입경분석기인 Mastersizer를 사용하여 측정하였으며 (KS F2302), 강열감량은 550 °C의 전기로에 2시간 동안 가열하여 측정하였다 (해양환경공정시험법). 퇴적물에서 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 Hietjes (1980) 등이 제안한 방법으로 측정하였다.

채취한 수질 시료의 분석항목은 퇴적물 상부의 상층수에 대하여 온도, 용존산소 (DO), pH, 산화환원전위 (ORP)는 Orion 710a+를 이용하여 측정하였으며, 총인 (TP), 유기성 인 (PO₄-P)은 Standard Methods (APHA, 1998)에 준하여 분석하였다.

결과 및 고찰

Table 2는 본 실험에 사용된 퇴적물의 물리·화학적 특성을 보여주고 있다. pH는 중성에 가까운 수치를 보여주고, 유기물 함량은 8.04%였으며, TP농도는 2,097 mg kg⁻¹이었으며, 수중에서 쉽게 용출되는 Ads-P, NAI-P의 함량은 37.7%를 차지하고 있다.

Fig. 3은 각 실험조건에 따른 용존산소 농도의 변화를

보이고 있다. 캡핑이 없는 hc₀ 칼럼의 경우, 용존산소의 농도는 1 mg L⁻¹까지 급격히 감소하며 그 이후는 완만히 감소하였다. hc₄₀, hc₆₀, hc₈₀ 칼럼의 경우 용존산소의 양은 초기 5일간 감소하는 추세를 보이지만 4 mg L⁻¹ 미만으로 내려가지 않고 있다. Streeter-Phelps 용존산소 감소공식(Jerald, 1996)을 이용하여 각각의 칼럼에 대하여 탈산소계수를 구하였다.

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

D는 t일 후의 용존산소 부족량(mg L⁻¹), L_a는 최종 BOD(mg L⁻¹), D_a는 t가 0일 때, 즉, 최초산소 부족량(mg L⁻¹), k₁는 탈산소계수(day⁻¹), k₂는 재포기계수(day⁻¹)이다. 식 1에 사용된 상수 중에서 hc₀ 칼럼에 사용된 L_a와 D_a는 7.29 mg L⁻¹와 1.11 mg L⁻¹이고, 캡핑이 된 나머지 칼럼에서는 모두 같은 최종 BOD값과 최초산소 부족량이 측정되었는데, L_a는 5.50 mg L⁻¹ 그리고 D_a는 0.8 mg L⁻¹로 계산하였다. hc₀ 칼럼에서 k₁은 0.397 day⁻¹, hc₄₀ 칼럼에서 k₁은 0.311 day⁻¹, hc₆₀ 칼럼에서 k₁은 0.281 day⁻¹, hc₈₀ 칼럼에서 k₁은 0.262 day⁻¹였다. 그리고 hc₀ 칼럼에서 k₂는 0 day⁻¹, hc₄₀ 칼럼에서 k₂는 0.013 day⁻¹, hc₆₀ 칼럼에서 k₂는 0.016 day⁻¹, hc₈₀ 칼럼에서 k₂는 0.024 day⁻¹였다. 캡핑이 없는 칼럼이 더 많은 산소를 더 빨리 소모하는 것으로 나타났는데 이는 상대적으로 캡핑이 있는 경우에 생물·화학적으로 소모하는 산소량이 적어지는 것을 의미한다.

Fig. 4는 캡핑 두께에 따른 탈산소계수와 재포기 계수의 변화를 보이고 있다. 캡핑된 칼럼은 캡핑 두께가 두꺼

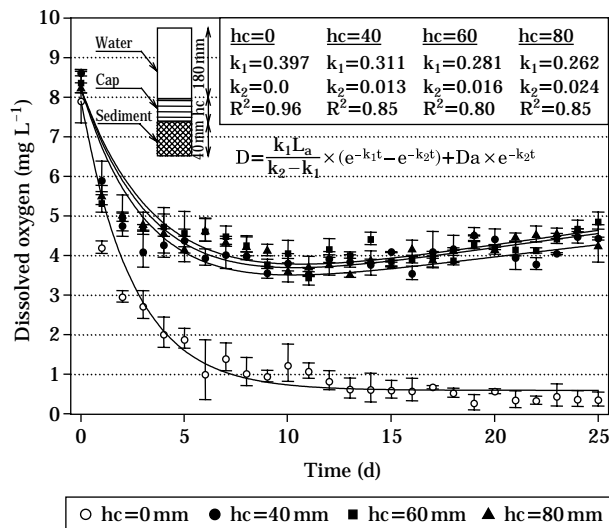


Fig. 3. Dissolved oxygen concentration curves for test conditions.

울수록 탈산소계수가 작아지고 있으며, 두께가 증가함에 따라 재포기 계수가 커지는 것으로 나타났다. 캡핑의 두께가 증가됨에 따라 탈산소계수가 작아지는 것은 퇴적물에서 용출되는 용존산소를 소모하는 생물·화학적인 물질의 양이 캡핑의 두께에 따라 감소한다는 것을 보여주고 있다. 그리고 낮은 수치의 재포기 계수를 나타내고 있는데 이것은 캡핑된 칼럼에서 용존산소가 급격하게 소모되는 반응이 멈추어 용존산소 농도가 균형을 이루었고, 그 다음에 용존산소가 미세하게 증가하고 있는 반응이 발생하고 있는 것으로 추측할 수 있다. 이러한 반응의 경우 캡핑된 칼럼과 캡핑되지 않은 칼럼에서 모두 발생할 가능성이 있는 반응임에도, 완전 혐기 상태인 캡핑되지 않은 칼럼에서는 나타나지 않았다. 수중에서 용존산소가 천천히 증가할 수 있는 반응은 광물 또는 유기물과 결합되어 있던 산소들이 분해되는 경우 등을 들 수 있으며, 생물·화학적 반응으로 이루어진다. 그리고 용존산소가 감소하는 결과는 물리화학적 영향에 의한 변수 중 한가지인 캡핑재료의 하중으로 인하여 압밀이 발생함으로써 용출량이 증가되는 현상 등이 본 칼럼 실험에서 고려되지 않은 변수로 제기 될 수 있다. 캡핑재의 하중으로 인하여 하부 퇴적물층의 압밀이 발생함으로써 이에 따른 공극수의 상부 유출(Mohan et al., 2000)로 인하여 다른 결과가 나타날 수도 있다.

Fig. 5는 각 실험조건에 따른 산화환원전위 변화를 보이고 있다. 캡핑이 없는 칼럼의 경우 DO와 ORP가 함께 낮은 수치를 보여줌으로써 상등수가 혐기상태인 것으로 나타났다. 캡핑의 두께에 따른 ORP의 차이는 많지 않으나 DO와 비슷한 경향을 보이고 있다. 초기의 ORP는 350~400 mV이었으며, 초기에 감소하다가 천천히 증가하여, 최종 ORP는 캡핑 되지 않은 칼럼에서 약 300 mV,

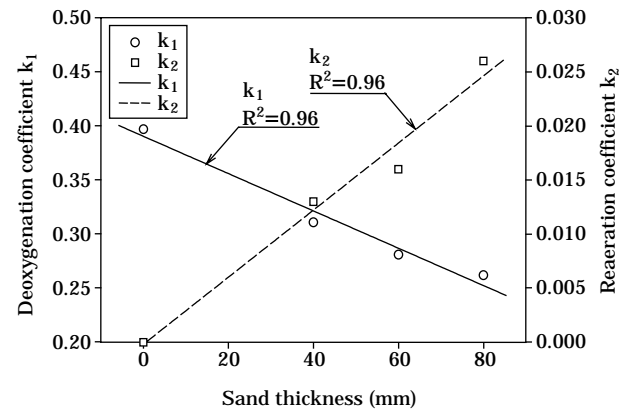


Fig. 4. Deoxygenation coefficient and reaeration coefficient for test conditions as capping thickness.

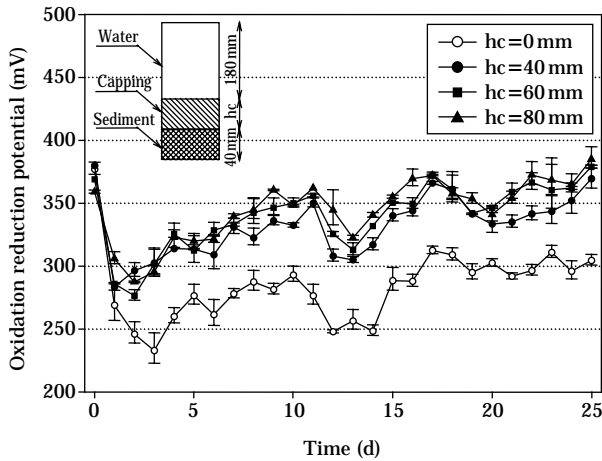


Fig. 5. Oxidation reduction potential (ORP) for test conditions.

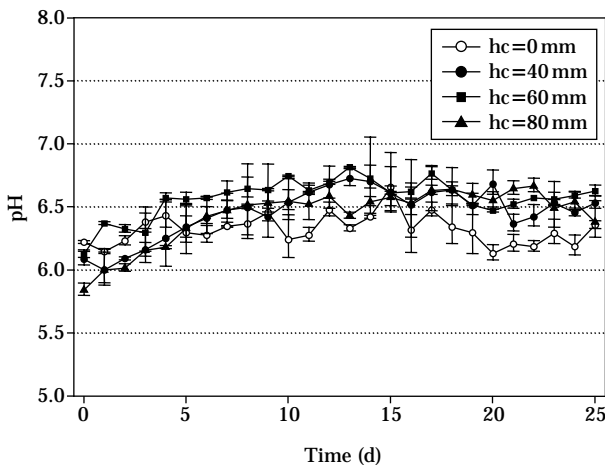


Fig. 6. pH change curves for test conditions.

캡핑된 칼럼에서 350~400 mV의 초기와 같은 범위로 나타났다.

Fig. 6은 각 칼럼에서 측정된 pH를 보여주고 있다. 모든 칼럼에서 pH는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 퇴적물이 혐기화되는 경우 초기 유기물의 분해에 의하여 산이 생성되어 pH가 낮아질 수 있다. 하지만 본 실험에서는 초기혐기화 기간에 pH가 떨어지지 않은 것으로 나타났다. 그 이유는 본 실험에 사용된 퇴적물이 어느 정도 부숙화가 진행된 상태의 퇴적물이 사용되었기 때문이다. 만약 부숙화가 진행되지 않은 상태의 퇴적물일 경우, 유기물의 분해와 함께 pH가 낮아지기 때문에 퇴적물에 존재하는 Fe(II)와 결합된 상태의 인이 분해를 통해 인 용출이 증가하게 된다(김 등, 2005).

Fig. 7(A)는 각 실험조건에 따라 운전하고 있는 4개의 칼럼 총인의 농도변화를 보이고 있다. 모든 칼럼에서 상등수의 초기 TP농도는 0.01~0.03 mg L⁻¹이었다. 상등수의 초기농도가 0 mg L⁻¹가 아닌 것은 수체와 캡핑재를 위치시킬 때 퇴적물의 상부에 발생하는 교란으로 퇴적물의 인이 수체에 유입되었기 때문이다. hc₀ 칼럼은 실험 초기부터 TP의 농도가 지속적으로 증가하다가 7일 이후 감소하는 것으로 나타났고, 캡핑된 다른 칼럼들은 5일 이후에 0.8 mg L⁻¹ 미만으로 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7(B)-(D)는 Fig. 8에 나타난 hc₄₀, hc₆₀, hc₈₀ 칼럼의 TP농도 변화를 보기 쉽도록 y축 스케일을 조정하여 나타낸 그래프이다. 캡핑된 칼럼은 캡핑 되지 않은 칼럼보다 상당히 낮은 상등수의 인농도를 보여주고 있다. 3개의 캡핑된 칼럼은 서로 비슷한 양상의 TP농도 변화를 보여주고 있으며, 5일부터 증가하는 것으로 나타났다. hc₀ 칼럼의 경우, 초기 0일부터 TP농도의 급격한 증가가 일어난 것에 비하여 캡핑이 되어 있는 경우 퇴적물에서 TP의 용출이 지연되는 것을 확인할 수가 있었다. 여기에서 용출된 TP는 대부분 퇴적물에 존재하는 인중에서 쉽게 용출이 일어나는 간극수에 존재하는 인, 광물 표면에 흡착되어 있는 인, Fe(III), Fe(II), Al 등과 결합되어 있던 인이 분해되면서 용출된 인으로 추측할 수 있다. 그리고 이러한 양상은 캡핑이 설치된 칼럼에서도 나타나고 있으나, TP 농도가 증가하는 현상이 지연되어 나타났다. 캡핑이 포설되지 않은 hc₀ 칼럼의 경우 최고 0.457 mg L⁻¹까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 9일 이후부터 16일까지 감소하다가, 이후에 평균 0.056 mg L⁻¹의 농도로 평형을 보이고 있는데, 퇴적물내 기질의 용출과 미생물의 성장 및 화학적인 평형을 이루고 있기 때문이다. 8일까지의 TP의 용출율을 계산하면 37.8 mgTP m⁻² d⁻¹이다. 이는 Berg 등(2004)이 독일의 Epple호에서 채취한 퇴적물을 이용하여 인 용출률을 측정된 결과인 17.01 mg m⁻² d⁻¹와 비교하여 큰 값이다. hc₀ 칼럼에 대하여 hc₄₀, hc₆₀, hc₈₀ 칼럼의 최종 평형 농도를 비교해볼 때 hc₄₀ 칼럼은 85.2%, hc₆₀ 칼럼은 87.4%, hc₈₀ 칼럼은 89.1%로의 낮은 농도를 나타내어, 캡핑이 TP의 용출을 제어하는데 있어서 효과를 나타내고 있음을 보여주고 있다. 이러한 실험 결과로 캡핑은 퇴적물의 인을 수체로 용출시키는 속도를 저감시키며, 미생물의 기질소모 이하로(구체적 수치 제시 필요) 그 속도를 낮추면 수체내의 인의 농도를 일정하게 유지할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8(A)는 모든 칼럼의 상등수에서 PO₄-P의 농도를 보여주고 있고, Fig. 7(B)-(D)는 hc₄₀, hc₆₀, hc₈₀ 칼럼 PO₄-P농도 변화를 스케일을 달리하여 다시 나타내었는데, 4

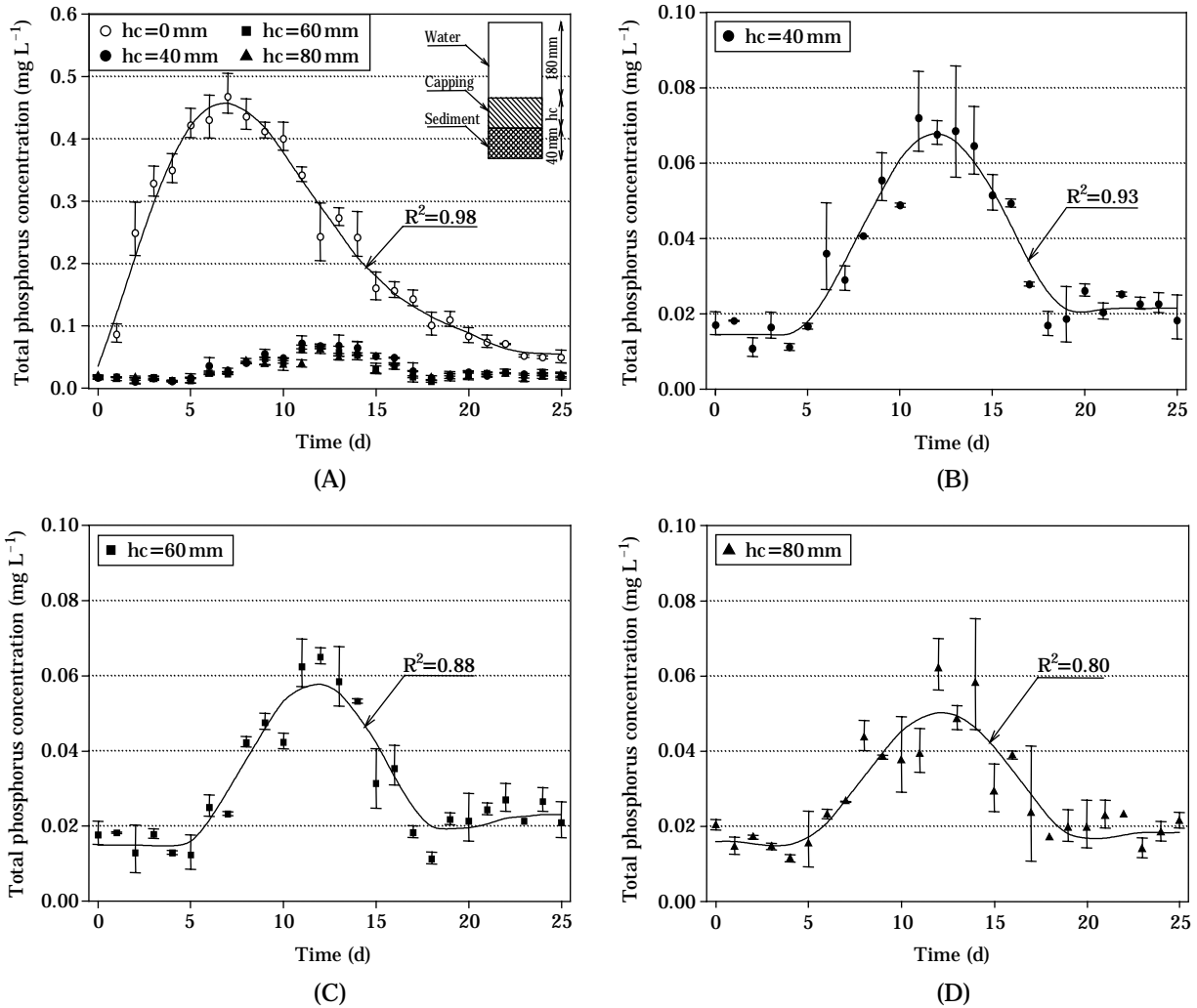


Fig. 7. Total phosphorus concentration curves for test conditions: (A) all column; (B) hc (capping thickness)=40 mm; (C) hc=60 mm; (D) hc=80 mm.

개의 모든 칼럼은 TP와 유사한 양상을 보여주고 있다. hc_0 칼럼의 경우 시험 초기부터 8일간 지속적인 증가가 이루어지고 이후 감소되어 16일 이후 평형상태를 보여주고 있고, hc_{40} , hc_{60} , hc_{80} 칼럼의 경우 시험 9일차부터 $PO_4\text{-P}$ 의 농도가 증가하기 시작하였으나 11일 이후 다시 낮아졌으며, 20일 이후 낮아진 농도로 평형 상태를 이루는 것을 확인 할 수 있다. TP의 용출율과 같이 hc_0 칼럼의 $PO_4\text{-P}$ 의 용출율을 계산하면 $27.1 \text{ mgPO}_4\text{-P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로, 퇴적물에서 용출되는 인의 대부분은 $PO_4\text{-P}$ 의 형태임을 알 수 있다. 이는 모래를 재료로한 캡핑이 인산염 형태의 반응성인 보다 비반응성인의 용출제어에 보다 효과적임을 나타내고, hc_0 칼럼에서 용존산소가 가장 먼저 감소한 것과 관련지어 볼 수 있으며, 캡핑을 하였을 경우 퇴적물

에 포함된 인의 용출 및 수체의 혐기화가 지연되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 실험기간 동안 상등수 TP농도와 $PO_4\text{-P}$ 농도의 평균을 모래캡핑의 두께에 따라 비교한 그래프이다. 캡핑이 포설되지 않은 hc_0 의 상등수 농도와 비교하여 hc_{40} 의 상등수 농도 감소율은 84.9%이었으며 hc_{60} 와 hc_{80} 의 감소율은 각각 86.7%, 87.8%이었다. 평균 농도를 회귀분석한 결과 상당히 높은 상관성을 보여주고 있으므로 설계 인자를 도출하기 위한 자료로 사용이 가능할 것으로 생각된다. 회귀분석한 결과에 의하면 최소한 20~40 mm의 모래캡핑을 실시하더라도 인 용출량을 급격하게 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 생물학적교란, 압밀에 의한 간극수 용출의 가속화, 퇴적물 침하에 따

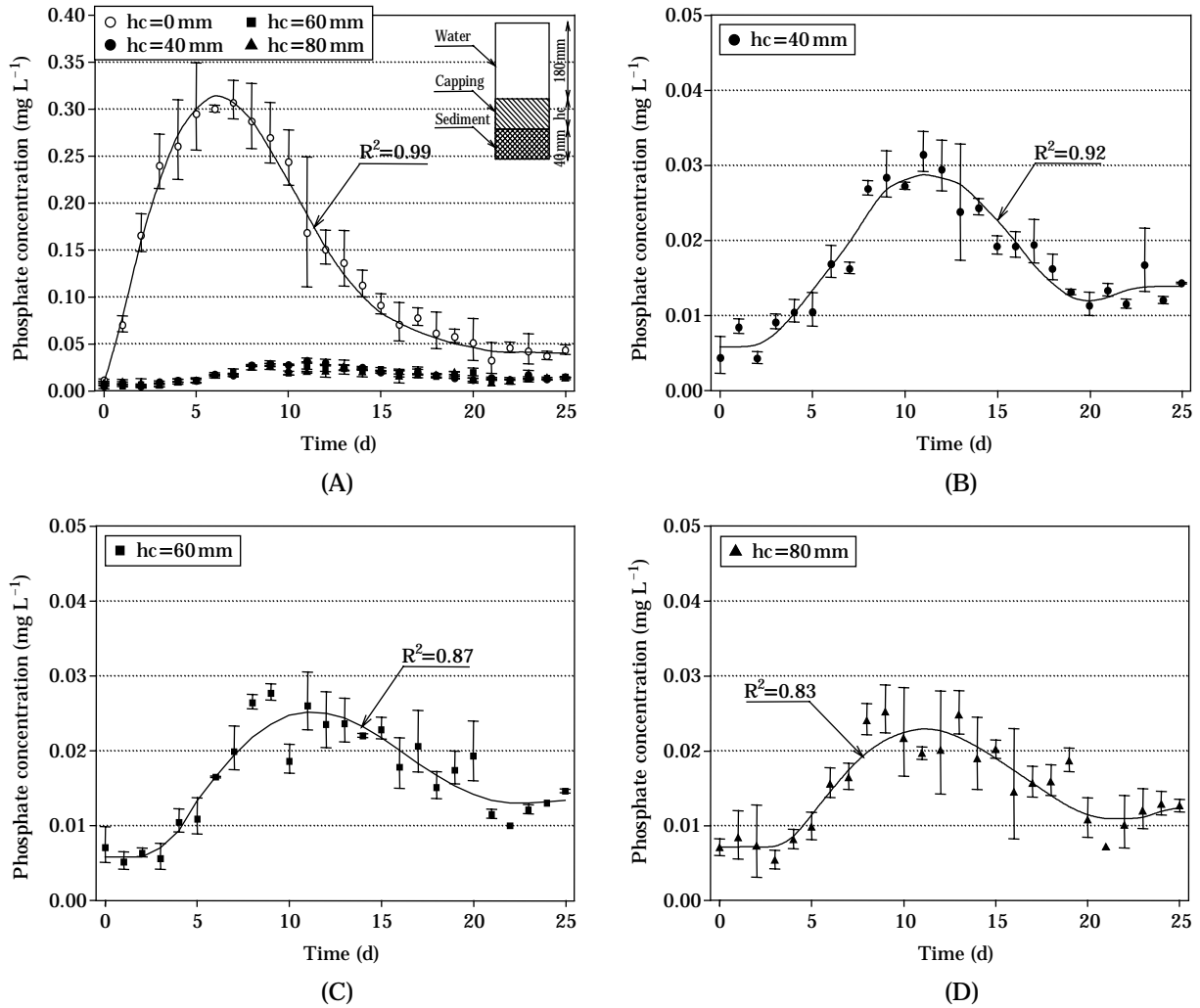


Fig. 8. Phosphate concentration curves for test conditions: (A) all columns; (B) hc (capping thickness)=40 mm; (C) hc=60 mm; (D) hc=80 mm.

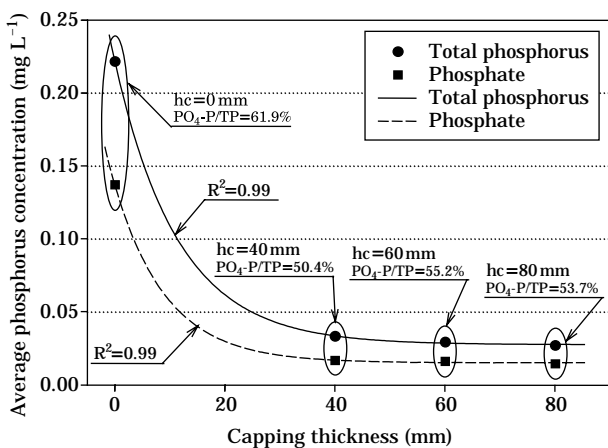


Fig. 9. Average concentration of total phosphorus and phosphate for test conditions as capping thickness.

른 캡핑층간의 단차, 지하수와 수체간의 흐름, 수체가 흐르는 경우 등의 다양한 인자에 대한 안전율을 고려한다면 더 두꺼운 캡핑이 설계되어야 할 것이다. 각 칼럼의 TP농도에서 PO₄-P가 차지하는 비율을 백분율로 비교해 본 결과, hc₀은 61.9%, hc₄₀은 50.4%, hc₆₀은 55.2%, hc₈₀은 53.7%로 캡핑을 한 경우 반응성인의 농도가 차지하는 비율이 감소하는 것으로 나타났다.

결론

본 연구는 퇴적물의 인 용출을 제어하기 위한 방법으로 모래 캡핑을 포설할 경우 두께에 따른 인 용출저감 효과를 파악하기 위하여 실험실 규모 실험연구로 수행되

었다. 캡핑이 없는 칼럼이 더 많은 산소를 더 빨리 소모하는 것으로 나타났는데 이는 상대적으로 캡핑이 있는 경우에 생물·화학적으로 소모하는 산소량이 적어지는 것을 의미한다. 이러한 실험결과로 캡핑은 퇴적물의 인을 수체로 용출시키는 속도를 저감시키며, 미생물의 기질소모 이하로 그 속도를 낮추면 수체내의 인의 농도를 일정하게 유지할 수 있음을 알 수 있다. 모래 캡핑의 두께를 40, 60, 80 cm로 하였을 때 퇴적물로부터 인의 용출은 캡핑이 없을 경우와 비교하여 84.9~87.8% 감소되었다. 캡핑의 두께와 용출저감은 선형상관관계를 보이며 캡핑 두께가 두꺼울수록 탈산소계수가 작아지고 있으며, 두께가 증가함에 따라 재폭기 계수가 커지는 것으로 나타났다. 회귀분석한 결과에 의하면 최소한 20~40 mm의 모래캡핑을 실시하더라도 인 용출량을 급격하게 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

적 요

본 연구는 퇴적물의 인 용출을 제어하기 위한 방법으로 모래를 이용한 캡핑을 포설할 경우 두께에 따른 인 용출을 저감 효과를 파악하기 위하여 수행되었다. 캡핑은 퇴적물의 인이 수체로 용출되는 속도를 저감시키며, 미생물의 기질소모 이하로 그 속도를 낮추면 수체내의 인의 농도를 일정하게 유지할 수 있음을 알 수 있었다. 모래 캡핑의 두께와 용출저감은 선형의 상관관계를 보이며 캡핑 두께가 40 mm에서 80 mm로 두꺼울수록 탈산소계수가 0.311 day^{-1} 에서 0.262 day^{-1} 으로 작아지고 있으며, 두께가 증가함에 따라 재폭기 계수는 0.013 day^{-1} 에서 0.024 day^{-1} 으로 커지는 것으로 나타났다. 회귀분석한 결과에 의하면 최소한 20~40 mm의 모래캡핑을 실시하더라도 인 용출량을 효율적으로 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

인 용 문 헌

김건하, 정우혁. 2005. 低泥 캡핑 (Sediment Capping)을 활용한 오염퇴적물의 효율적인 처리. 대한토목학회지 **53**: 122-127.
 김건하, 정우혁, 최승희. 2005. 호수의 물 순환이 저니의 인 용출에 미치는 영향. 한국물환경학회지 **21**: 595-601.
 김건하, 정우혁, 최승희. 2006a. 호소 저니의 인 용출 제어를 위한 모래 캡핑. 대한토목학회지 **26**: 125-130.
 김석구, 이미경, 안재환, 윤상린, 김소정. 2006b. 호소퇴적물로부터

터 인 용출 저감을 위한 Capping. 처리. 대한환경공학회지 **28**: 438-446.
 김태웅, 임봉수. 1997. 금강하구호 Sediments로부터 수질오염 물질 용출특성에 관한 연구. 한국수질보전학회지 **13**: 245-253.
 이정엽, 강선홍. 1999. 저질토로부터의 인의 용출거동 예측 및 제거기술 개발-I, 저질토로부터의 인의 용출거동 예측. 대한상하수도학회지 **12**: 89-94.
 이요상, 이경식. 2000. 대청댐 저수지 퇴적물의 용출특성과 수질에 미치는 영향에 관한 연구. 환경영향평가 **9**: 99-107.
 한국표준협회. 1995. 한국산업규격.
 환경관리공단. 1999. 팔당호 퇴적물 현황 및 수리특성 조사보고서.
 환경부. 2002. 토양오염공정시험법.
 해양수산부. 2002. 해양환경공정시험법.
 Abrams, M.M. and W.M. Jarrell. 1995. Soil-phosphorus as a potential non-point source for elevated stream phosphorus levels. *Journal of Environmental Quality* **24**: 132-138.
 APHA, AWWA, WEF, WPCF. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 18th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
 Azcue, J.M., A.J. Zeman, A. Mudroch, F. Rosa and T. Patterson. 1998. Assessment of sediment and pore-water after one year of subaqueous capping of contaminated sediments in Hamilton Harbour, Canada. *Water Science Technology* **37**: 323-329.
 Berg, U., T. Neumann, D. Donnert, R. Nüesch and D. Stüben. 2004. Sediment capping in eutrophic lakes—efficiency of undisturbed calcite barriers to immobilize phosphorus. *Applied Geochemistry* **19**: 1759-1771.
 Hieltjes, A.H.M. and L. Lijklema. 1980. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *Journal of Environmental Quality* **9**: 405-407.
 House, W.A. and F.H. Denison. 1998. Phosphorus dynamics in a lowland river. *Water Research* **32**: 1819-1830.
 Jin, X., X. Jiang, Y. Yao, L. Li and F.C. Wu. 2006a. Effects of light and oxygen on the uptake and distribution of phosphorus at the sediment-water interface. *Science of the Total Environment* **357**: 231-236.
 Jin, X., S. Wang, Y. Pang, F.C. Wu. 2006b. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution* **139**: 288-295.
 Kсанд, A. and P. Noges. 2003. Sediment phosphorus release in phytoplankton dominated versus macrophyte dominated shallow lakes: importance of oxygen conditions. *Hydrobiologia* **506**: 129-133.
 Lijklema, L., A.A. Koelmans and R. Portielje. 1993. Water

- quality impacts of sediment pollution and the role of early diagenesis. *Water Science and Technology* **28**: 1-12.
- Mohan, R.K., M.P. Brown and C.R. Barnes. 2000. Design criteria and theoretical basis for capping contaminated marine sediments. *Applied Ocean Research* **22**: 85-93.
- Nolan, P.M. and A.F. Johnson. 1979. A Method for Measuring Sediment Oxygen Demand Using a Bench Model Benthic Respirometer. U.S. EPA Region I New England Regional Laboratory 60 Westview Street Lexington, Massachusetts 02173.
- Palermo, M.R. 1998. Design considerations for in-situ capping of contaminated sediments. *Water Science and Technology* **37**: 315-321.
- Patrick, H.J. and F. Ulrich. 1999. Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with active barrier systems (ABS) using natural and modified zeolites. *Water Research* **33**: 2083-2087.
- Schnoor, J.L. 1996. Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil. New York, John Wiley & Sons. 682p.
- Ute, B., N. Thomas, D. Dietfried, N. Rolf and S. Doris. 2004. Sediment capping in utrophic lakes-efficiency of undisturbed calcite barriers to immobilize phosphorus. *Applied Geochemistry* **19**: 1759-1771.
- Varjo, E., A. Liikanen, V. Salonen and P.J. Martikainen. 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* **37**: 1-10.
- Wauer, G., T. Gonsiorczyk, K. Kretschmer, P. Casper and R. Koschel. 2005. Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release. *Water Research* **39**: 494-500.
- Wu, F.C., H.R. Qing, G.J. Wan, R.G. Huang and Y.R. Cai. 1997. Geochemistry of HCO_3^- in the sediment-water interface of lakes from China Southwestern Plateau. *Water, Air and Soil Pollution* **99**: 381-390.
- Xie, L.Q., P. Xie and H.J. Tang. 2003. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by Microcystis blooms-an enclosure eaperiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake. *Environmental Pollution* **122**: 391-399.

(Manuscript received 5 June 2006,
Revision accepted 25 July 2006)