

# Capping 기술을 이용한 하천 및 호소 퇴적토의 인 용출 저감 효과 분석 Analysis on the Reduction of Phosphorus Release in River and Lake Sediments through Application of Capping Technology

김석구 · 윤상린<sup>†</sup>  
Seog-ku Kim · Sang-leen Yun<sup>†</sup>

한국건설기술연구원 환경연구실

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Environmental Engineering Research Division

(Received November 11, 2014; Revised November 17, 2014; Accepted November 25, 2014)

**Abstract** : Contaminants such as organic matters, nutrients and toxic chemicals in rivers and lakes with a weak flow rate are first removed from the water and accumulated in the sediments. Subsequently, they are released into the water column again, posing direct/indirect adverse effects on the water quality and aquatic ecosystems. In particular, phosphorus is known to accelerate the eutrophication phenomenon when it is released into the water column via physical disturbance and biological/chemical actions as one of important materials that determine the primary production of aquatic ecosystems and an element that is stored mainly in the sediments in the process of material circulation in the body of water. In this study, the effect on reducing phosphorus release in sediments was analyzed by applying different capping materials to lake water, where the effect of aquatic microorganisms is taken into account, and to distilled water, where the effect of microorganisms is excluded. The experimental results showed that capping with chemical materials such as Fe-gypsum and SiO<sub>2</sub>-gypsum further reduced the phosphorus release by at least 40% compared to the control case. Composite materials like granule gypsum+Sand showed over 50% phosphorus release reduction effect. Therefore, it is determined that capping with chemical materials such as granule-gypsum and eco-friendly materials such as sand is effective in reducing phosphorus release. The changes in phosphorus properties in the sediments before and after capping treatment showed that gypsum input helped to change the phosphorus that is present in lake sediments into apatite-P, a stable form that makes phosphorus release difficult. Based on the above results, it is expected that the application of capping technology will contribute to improving the efficiency of reducing phosphorus release that occurs in river and lake sediments.

**Key Words** : Rivers, Lakes, Sediments, Phosphorus Release, Capping Technology, Internal Loading

**요약** : 유속이 약한 하천이나 호소에 침강된 유기물, 영양염류, 유해화학물질 등의 오염물질은 일단 수층으로부터 제거되어 퇴적물 속에 축적되었다가 확산, 재 부유, 생물교란 등의 물리·화학·생물학적 과정에 의해 다시 수층으로 용출되어 수질 및 수생생태에 직·간접적인 악영향을 미칠 수 있게 된다. 특히 인은 수중생태계의 일차 생산량을 결정하는 중요한 물질중의 하나로 수체 내 물질순환 과정에서 주로 퇴적물에 저장되는 원소로 물리적인 교란 및 생·화학적 작용에 의해 수층으로 용출되어 부영양화현상을 가속시키는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 수중 미생물의 영향을 고려한 경우(호소수)와 미생물의 영향을 배제한(중류수)경우로 구분하여 각각 다른 capping 소재를 적용하여 퇴적물에서의 인 용출 저감 효과를 분석하였다. 실험 결과 화학적소재인 Fe-Gypsum, SiO<sub>2</sub>-Gypsum로 capping을 할 경우, control보다 인 용출을 약 40% 이상 저감시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한 복합소재인 granule gypsum+Sand는 약 50% 이상 용출을 저감 효과가 나타났다. 따라서 화학적 소재인 granule-gypsum과 그 위에 모래와 같은 친환경소재로 capping을 한다면 인 용출 저감에 효과적일 것으로 판단된다. Capping 처리 전후의 퇴적층내의 인 성상변화를 살펴본 결과, gypsum 투입에 의하여 호소 퇴적층에 존재하는 인이 용출되기 어려운 안정한 형태인 apatite-P 변화된 것으로 확인되었다. 이상의 결과를 토대로 capping 기술의 적용을 통하여 하천 및 호소 퇴적물에서 발생하는 인 용출에 대한 저감 효율을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

**주제어** : 하천, 호소, 퇴적물, 인용출, 캡핑, 내부부하

## 1. 서론

육지로부터 유입되어 호소, 하천, 해양, 저수지 등의 수체에 쌓이는 모래, 점토, 유기물질, 광물질을 퇴적물이라 한다.<sup>1)</sup> 이런 퇴적물과 함께 유기물, 영양염류, 유해화학물질 등의 오염물질은 유속이 약한 하천이나 호소에 침강되어 일단 수층으로부터 제거되어 축적된다. 그 후 시간의 경과됨에 따라 확산, 재 부유, 생물교란 등의 물리·화학·생물학적 과정에 의해 다시 수층으로 용출되어 수질 및 수생생태에 직·

간접적인 악영향을 미칠 수 있게 된다.<sup>1)</sup> 이를 호수로부터 영양물질의 내부부하(internal loading)라고 한다. 특히 인은 수중생태계의 일차 생산량을 결정하는 중요한 물질중의 하나로 수체 내 물질순환 과정에서 주로 퇴적물에 저장되는 원소로 물리적인 교란 및 생·화학적 작용에 의해 수층으로 용출되어 부영양화현상을 가속시키는 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 이 경우 부영양화의 조절을 위하여 외부유입수의 수질을 개선한다 할지라도 실제 호수내의 수질은 개선되지 못하는 경우가 많다.<sup>2)</sup> 따라서, 최근 들어 퇴적물로부터 인 용출

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: leeno@kict.re.kr Tel: 031-910-0316 Fax: 031-910-0291

저감을 위한 방안으로 오염퇴적물에 capping 처리법에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>3-5)</sup> In-situ capping의 현장 적용 사례는 캐나다 Hamilton harbour에 모래(100 m×100 m)로 capping을 한 사례가 있으며, 일본의 경우 모래를 이용한 capping 처리법이 히로시마만에 적용된 바 있다.<sup>6)</sup> 모래에 의한 capping은 퇴적물에 함유된 영양분이 diffusion에 의해 수체로 용출되는 것을 효과적으로 차단할 수 있는 것으로 제시되었다. 또한 natural zeolite를 사용하여 ABS (active barrier-system)을 형성하여 Pb 등의 양이온 중금속을 제어하였다.<sup>7)</sup> In-situ chemical treatment의 경우, 독일 Lake Dagowsee에 nitrate storage compound, Lake Epple에 Calcite를 적용하여 퇴적물로부터 인을 효과적으로 차단하였다.<sup>8,9)</sup> 이처럼 퇴적물내 redox potential을 높이기 위해 산화제의 주입 및 인과의 binding partner로서의 Ca, Fe를 첨가하는 방안들이 제시되고 있다. 또 다른 산화제 주입에 따른 연구 중 CaSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O에 의한 인 용출 저감에 대해 Finland에서 연구된 바 있다. 이는 CaSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O을 통한 퇴적물 내 redox potential을 높이고, 인과의 binding partner로서의 Ca이 첨가되고, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도가 퇴적물내 충분히 공급되어 SRB (sulfate reducing bacteria)의 활성이 높아져 methanogenesis의 진행을 저하시킬 수 있다. 또한 빠른 초기속성화작용을 통해 광물화가 촉진되어 apatite-p의 증가가 빠르게 이루어질 수 있다.<sup>10)</sup> 본 연구에서는 최적 capping 소재 선정 실험을 위해, 수층 미생물의 영향을 고려한 경우와 미생물의 영향을 배제한 호소수와 증류수로 구분하여 총 12개 컬럼을 비교·평가하여 capping 소재에 대한 퇴적물에서의 인 용출 저감 효과를 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 호소 퇴적물의 성상분석

본 연구를 위해 사용된 퇴적물 시료는 경기도에 위치한 호수에서 약 200 kg을 채취하였다. 채취지점의 호소수의 성상 분석 및 퇴적물 내 지화학적 성상 분석 결과는 Table 1과 같다. 조사 당시 다항목 수질 측정기인 YSI 556으로 측정된 가을철 표층 호소수의 수온은 18.8℃를 나타내었으며, DO 농도는 6.3 mg/L, pH는 6.9를 나타내었다. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 농도는 표층수에서 0.5 mg/L로 나타났다. 퇴적물내 평균입도는 약 8 φ, 유기물 함량은 9.0%, 유기탄소(Corg)는 2.5%로 매우 세립하고, 유기물 함량이 높은 것으로 나타났으며 퇴적물

Table 1. Geochemical properties of sediment

	Items	Geochemistry properties
Surface water	Temp. (°C)	18.8
	Do (mg/L)	6.3
	pH	6.9
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	0.5
Pore water	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	3.0
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	4.0
Sediment	Mz (phi)	7.9
	LOI (%)	9.0
	Corg (%)	2.6
	Al (%)	7.5
	Fe (%)	4.5
	Cr (μg/g)	106.0
	Cu (μg/g)	480
	Zn (μg/g)	164.0
	Cd (μg/g)	0.75
	Pb (μg/g)	38.0

내 금속의 함량은 평균 Al (7.5%), Fe (4.5%), Cr (106 μg/g), Cu (48 μg/g), Zn (164 μg/g), Cd (0.75 μg/g), Pb (38 μg/g)의 값을 나타내었다. 또한 퇴적물내 공극수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 농도는 3.0 mg/L, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 4.0 mg/L로 나타났다.

### 2.2. 실험방법 및 적용 capping 소재

퇴적물로부터 용출되는 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 양에 대한 평가를 위하여 수층을 증류수와 호소수로 채운 후 capping 소재를 도포하여 각 컬럼을 구성하였다. 또한 빠른 용출 효과를 보기 위해 뚜껑으로 밀폐시켰다. 각 분석항목에 대해 외부와의 공기를 차단, 정지한 상태에서 30~50 일간 용출실험을 실시하였다. In-situ capping 소재로는 크게 친환경소재, 화학적소재, 복합소재로 구분하였다. 본 실험에 사용된 capping 소재는 Fig. 1과 같다. 친환경소재로는 모래층(5 cm), 황토층(5 cm)을 적용하였다. 화학적 소재로는 분말형태의 gypsum (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O)을 활용하여 입상화시킨 granule-gypsum과 Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum을 적용하였다. 또한 친환경소재와 화학적 소재를 결합한 복합소재 방법으로는 산화제로 granule-gypsum을 도포하고, 그 위에 모래층을 덮는 방법을 사용하였다. 각각의 컬럼은 아크릴 재질의 원통형 column (14 φ, L : 60 cm)에 퇴적물을 각각 동일하게 20 cm를 채우고, 모래(sand) 5 cm, 황토(loess) 5 cm, Fe-gypsum 80 g, SiO<sub>2</sub>-gypsum 80 g,

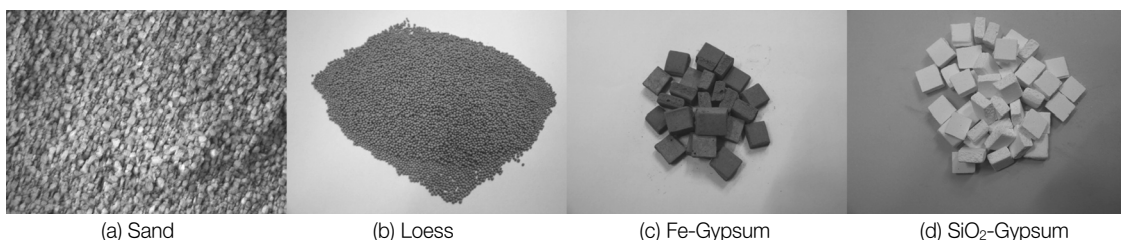


Fig. 1. Capping materials.



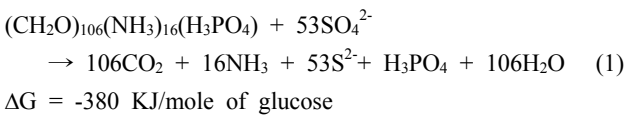
Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup for phosphorus release experiments.

Table 2. Operating parameters for phosphorus release experiments

Items	Conditions
Colume size (cm)	Diameter 14, Higth 60
Sediment depth (cm)	20
Water depth (cm)	60
Solid-Liquid Ratio	1:3
Volume (L)	9.2
Cross Section (cm <sup>2</sup> )	153
Capping material	Sand, Loess, Fe-gypsum, SiO <sub>2</sub> -gypsum, granule-gypsum
Capping material depth (cm)	Sand, loess : 5, Gypsum : 80 g

SiO<sub>2</sub>-gypsum+Sand (80 g+3 cm)를 각각 도포하고 각각 증류수와 호소수를 9.2 L씩 채워 퇴적물과 수층의 비를 1 : 3로 구현하였다(Fig. 2). 5개의 capping제를 이용한 column과 capping을 하지 않은 control 총 6개의 column을 비교·평가하였다. 수온, 용존산소, pH, conductivity는 YSI 556을 이용하여 모니터링 하였으며, 용출되는 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도를 분석하였다. Table 2는 인 용출 특성 실험에 대한 실험조건을 나타낸 것이다.

Gypsum의 주입량은 식 (1)에 의해 산정하였다.<sup>11)</sup> 본 실험에 사용된 퇴적물 내 유기물 함량은 8%, 수층으로 용출되는 퇴적물의 깊이를 약 2 cm로 고려할 경우 퇴적물의 양은 5 kg에 해당한다. 이때의 유기물 함량이 400 g으로 이를 산화시키는데 필요한 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 560 g으로 필요한 gypsum (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O) 주입량은 약 1 kg 이하로 산정하였다.



### 2.3. 분석 방법

수층의 수온, 용존산소(dissolved oxygen), pH, 전기전도도를 YSI (MPS 556)로 측정하였다. Table 1에 제시된 퇴적물 성상 분석 중 퇴적물의 입도 측정은 시료 5 g을 1 L 비이커에 넣고 일차적으로 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>로 반응시켜 유기물을 제거한 후, 0.1 N HCl로 탄산염을 제거하였다. 4 φ (63 μm)

표준체로 습식 체질하여 4 φ 이상의 세립퇴적물과 4 φ 이하의 조립퇴적물로 분리한 후, 조립퇴적물은 1 φ 간격으로 체진탕기(Ro-tap sieve shaker)를 이용한 건식체질 방법으로, 세립퇴적물은 시료 3.5 g 당 0.1% (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 80 mL을 첨가하여 초음파 분쇄기와 자기진동기로 시료를 균일하게 분산시킨 후 X-선 자동입도분석기 Sedigraph-5100 (Micromeritics Instruments Corp.)으로 분석하여 입도 무게 백분율을 구하였다. 퇴적물 중 총 탄소의 함량은 분말화된 시료를 주석 캡슐에 넣어 CHN-분석기(CE Instrument; Flash-1120)를 이용하여 측정하였으며, 무기탄소 함량은 시료를 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 첨가하여 유기탄소를 제거한 후, 같은 방법으로 측정하였다. 유기탄소의 함량은 총 탄소의 함량에서 무기탄소의 함량을 뺀 값으로 하였다. 자료의 정확도와 신뢰도를 위해 sulfanilamide의 표준시료(SRM)가 사용되었다. 퇴적물중 금속의 총 농도는 저압용 테프론용기(Teflon bomb)에 분말화된 퇴적물시료 0.2 g과 65% HNO<sub>3</sub>과 70% HClO<sub>4</sub>을 3 : 1로 혼합한 산 5 mL 넣고 120℃의 가열판에서 가열하여 유기물을 완전히 산화시켜 건조시킨 후, 48% HF과 70% HClO<sub>4</sub>를 4 : 1로 혼합한 산을 5 mL 넣고 가열하여 완전히 녹였다. 이 시료에 HClO<sub>4</sub> 1 mL 그리고 HBO<sub>3</sub> 4 mL와 HClO<sub>4</sub> 1 mL를 순차적으로 넣고 건조시킨 후, 1 N HNO<sub>3</sub> 20 mL를 넣어 가열판에서 10분 동안 반응 시켜 액상상태가 되도록 하였다. 전처리된 시료들에 대한 금속 원소의 정량은 유도결합플라즈마 질량분석기(VG PlasmaQuad ICP-MS, ICP-MS)를 이용하여 측정하였다. 각 금속 원소의 회수율(recovery rate)은 표준시료(SRM)인 MAG-1 (USGS)을 이용하여(SRM 측정값)/(SRM 원시료)×100으로 정확도와 정밀도를 비교하였다. Al (90.4%), Fe (99.2%), Cr (101%), Cu (90.6%), Zn (103%), Cd (110%), Pb(97.4%)으로 모두 높게 나타났다. 영양염류 측정에 있어서 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>는 Hiltje<sup>12)</sup> 시험법에 의해 측정하였으며, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 standard methods 방법으로 분석하였다.<sup>13)</sup>

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 인 용출 특성 분석

최적 in-situ capping 소재 선정을 위해 퇴적물 위에 sand (5 cm), loess (5 cm), Fe-Gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum, granule-gypsum+Sand (3 cm)를 각각 capping한 후, 증류수와 호소수를 채워 30~50일간 수층의 수온, pH, DO, 전기전도도 등을 관찰하였다. 퇴적물로부터 용출되는 오염물질인 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 농도와 gypsum에서 용해되는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 거동 변화를 살펴보았다.

#### 3.1.1. 증류수를 이용한 인 용출 특성 분석

Table 3과 Fig. 3은 capping에 의한 수층의 변화를 나타낸 것이다. 30일 동안 수온은 control, sand, loess, Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-Gypsum, granule -gypsum+Sand 모두 평균 18℃로 일정하게 나타났다. DO 농도는 capping을 하지 않은 control의 경우, 초기 5.4 mg/L에서 30일 경과 후 2.0 mg/L로 약 63%

**Table 3.** The change in Temp., DO, pH, Conductivity of water column (distilled water)

Time (day)	Temp (°C)						DO (mg/L)						pH						Conductivity (µs/cm)					
	C	S	L	FG	SG	gG+S	C	S	L	FG	SG	gG+S	C	S	L	FG	SG	gG+S	C	S	L	FG	SG	gG+S
1	19,3	19,4	19,7	19,3	19,4	19,3	5,4	6,2	6,1	5,8	6,5	5,9	6,4	6,0	5,9	6,1	5,7	5,8	5	2	9	53	111	4
2	19,7	19,9	19,7	19,9	19,9	19,9	5,8	5,9	6,1	5,2	5,6	5,2	6,8	6,0	5,9	6,0	7,0	5,6	6	4	9	55	114	6
3	19,8	19,9	19,7	19,9	19,9	19,8	5,6	5,5	6,1	5,1	5,5	5,1	6,1	5,6	5,9	5,9	7,0	5,6	7	4	9	57	114	7
4	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	5,4	5,5	6,0	5,2	5,3	5,5	6,1	5,7	5,9	5,9	6,8	5,6	7	5	9	57	110	8
5	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	5,2	5,5	6,0	5,2	5,1	5,5	6,0	5,7	5,9	5,9	6,8	5,6	8	5	9	56	112	9
6	16,3	16,4	16,4	16,4	16,4	16,3	4,8	5,5	6,0	5,3	5,1	5,9	6,4	5,9	6,0	6,0	6,5	5,7	9	6	10	56	109	10
7	18,1	18,3	19,6	18,3	18,6	18,2	4,4	5,6	5,0	5,2	4,6	5,6	6,2	5,9	5,9	6,0	6,4	5,7	11	9	12	61	118	11
8	18,4	18,7	18,9	18,6	18,9	18,6	4,3	5,2	4,5	4,8	4,3	5,3	6,2	5,9	5,9	5,9	6,4	5,7	13	10	14	62	126	13
9	18,5	18,8	18,9	18,7	18,9	18,6	4,3	5,0	4,5	5,2	4,5	5,8	6,2	6,0	6,0	5,9	6,3	5,7	14	12	15	64	127	14
10	18,5	18,8	18,7	18,6	18,8	18,5	3,8	4,6	4,1	5,0	4,2	5,7	6,3	6,0	6,4	6,1	6,4	5,8	14	15	19	93	131	18
11	17,6	17,6	17,6	17,6	17,7	17,5	3,8	4,6	4,1	5,1	4,3	5,7	6,3	6,0	6,3	6,0	6,3	5,7	15	15	19	95	131	22
12	16,5	16,5	16,5	16,0	16,6	16,0	3,8	4,6	4,1	5,1	4,3	5,7	6,3	6,1	6,2	6,0	6,3	5,7	18	15	19	90	130	24
13	15,5	15,8	15,8	15,6	15,9	15,5	3,9	4,6	4,1	5,3	4,7	6,0	6,4	6,2	6,1	6,0	6,4	5,8	21	15	19	80	130	27
14	16,7	17,0	17,3	16,9	17,3	16,9	3,9	4,1	4,0	5,2	4,7	5,7	6,5	6,1	6,1	6,0	6,4	5,8	19	18	20	73	143	21
15	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	3,5	4,0	3,7	5,2	4,4	5,5	6,5	6,1	6,1	6,0	6,4	5,8	20	19	21	75	148	25
16	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	3,2	3,8	3,3	5,1	4,3	5,4	6,5	6,1	6,1	6,0	6,4	5,8	21	20	22	76	158	27
17	19,1	19,4	19,4	19,1	19,5	19,0	2,8	3,6	3,0	5,0	4,3	5,4	6,6	6,2	6,1	6,1	6,4	5,8	23	20	24	78	162	31
18	19,1	19,4	19,4	19,1	19,5	19,0	2,8	3,6	2,8	5,0	4,3	5,4	6,6	6,2	6,1	6,1	6,4	5,8	22	21	24	79	165	32
19	19,1	19,4	19,4	19,1	19,5	19,0	2,8	3,6	2,7	5,0	4,3	5,4	6,6	6,2	6,1	6,1	6,4	5,8	23	22	25	80	170	35
20	19,1	19,4	19,4	19,1	19,5	19,0	2,8	3,6	2,5	5,0	4,3	5,4	6,6	6,2	6,1	6,1	6,4	5,8	25	21	25	85	175	36
21	17,7	18,1	18,1	17,8	18,2	17,8	2,6	3,4	2,4	4,9	4,5	5,4	6,6	6,2	6,1	6,1	6,3	5,8	27	22	26	87	178	40
22	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	2,5	3,3	2,3	4,8	4,4	5,3	6,6	6,2	6,1	6,1	6,3	5,8	28	23	27	90	185	42
23	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	2,4	3,2	2,2	4,7	4,3	5,2	6,6	6,2	6,1	6,1	6,3	5,8	30	23	28	95	190	44
24	19,3	19,6	19,7	19,4	19,8	19,5	2,1	3,1	1,8	4,6	4,1	5,1	6,7	6,3	6,2	6,1	6,4	5,9	33	24	31	99	201	46
25	19,3	19,6	19,7	19,4	19,8	19,5	2,1	3,1	1,6	4,6	4,0	5,1	6,7	6,3	6,2	6,1	6,4	5,9	34	25	31	99	205	48
26	19,3	19,6	19,7	19,4	19,8	19,5	2,1	3,0	1,5	4,6	4,0	5,1	6,7	6,3	6,2	6,1	6,4	5,9	35	25	32	100	210	50
27	19,3	19,6	19,7	19,4	19,8	19,5	2,1	3,0	1,4	4,6	3,9	5,1	6,7	6,3	6,2	6,1	6,4	5,9	37	25	32	101	220	51
28	19,8	19,9	20,0	19,6	19,9	19,8	2,1	2,8	1,3	4,5	3,9	4,9	6,7	6,3	6,2	6,1	6,4	5,9	38	26	33	103	229	53
29	19,8	19,9	20,0	19,6	19,9	19,8	2,1	2,7	1,2	4,5	3,8	4,8	6,7	6,3	6,2	6,1	6,4	5,9	40	28	35	110	240	60
30	19,9	20,1	20,1	19,7	20,1	19,6	2,0	2,7	1,0	4,4	3,6	4,8	6,8	6,3	6,0	6,2	6,4	5,9	44	30	38	119	250	65
Min	15,5	15,8	15,8	15,6	15,9	15,5	2,0	2,7	1,0	4,4	3,6	4,8	6,0	5,6	5,9	5,9	5,7	5,6	5	2	9	53	109	4
Max	19,9	20,1	20,1	19,9	20,1	19,9	5,8	6,2	6,1	5,8	6,5	6,0	6,8	6,3	6,4	6,2	7,0	5,9	44	30	38	119	250	65
Avg.	18,5	18,7	18,7	18,5	18,7	18,5	3,5	4,2	3,5	5,0	4,5	5,4	6,5	6,1	6,1	6,0	6,4	5,8	22	17	22	81	160	29

C / Control, S / Sand, L / Loess, FG / Fe+gypsum, SG / SiO<sub>2</sub>+gypsum, gG+S / granule-gypsum+Sand

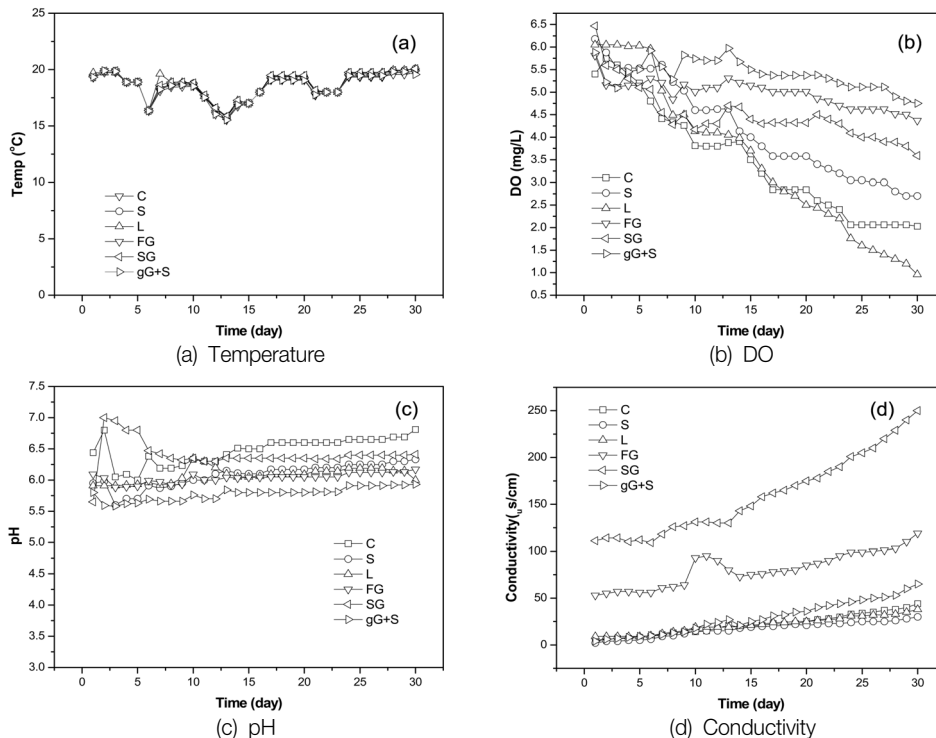


Fig. 3. The change in Temp., DO, pH, Conductivity of water column (distilled water).  
 C / Control, S / Sand, L / Loess, FG / Fe+Gypsum, SG / SiO<sub>2</sub>+Gypsum, gG+S / granule-Gypsum+Sand

가 저감되는 것을 확인할 수 있었다. Capping제에 의한 DO의 농도 변화는 황토의 경우 약 84%, sand 56%, Fe-gypsum 24%, SiO<sub>2</sub>-gypsum 46%로 저감되는 것으로 나타났다. 이에 반하여 granule-gypsum+Sand의 복합소재는 초기 5.9 mg/L에서 4.8 mg/L로 약 19%만 저감되는 것을 알 수 있었다.

pH의 변화는 control의 경우 평균 6.5의 범위로 유지하였으며 capping제를 이용한 모래층, 황토, Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum, granule gypsum+Sand는 각각 평균 6.0을 유지하였다. Conductivity는 30일 경과 후 control은 44 µS/cm, 모래층은 30 µS/cm, 황토층 역시 38 µS/cm로 낮고, 용해도가 큰 gypsum이 함유된 Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum의 경우 119, 255 µS/cm로 다른 capping 소재 보다 높게 나타났다. 반면 granule-gypsum층 위에 모래를 보토한 경우에는 65 µS/cm로 낮은 값을 보였다.

Table 4와 Fig. 4는 capping에 의한 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 변화를 나타낸 것이다. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 경우 control은 30일 동안 약

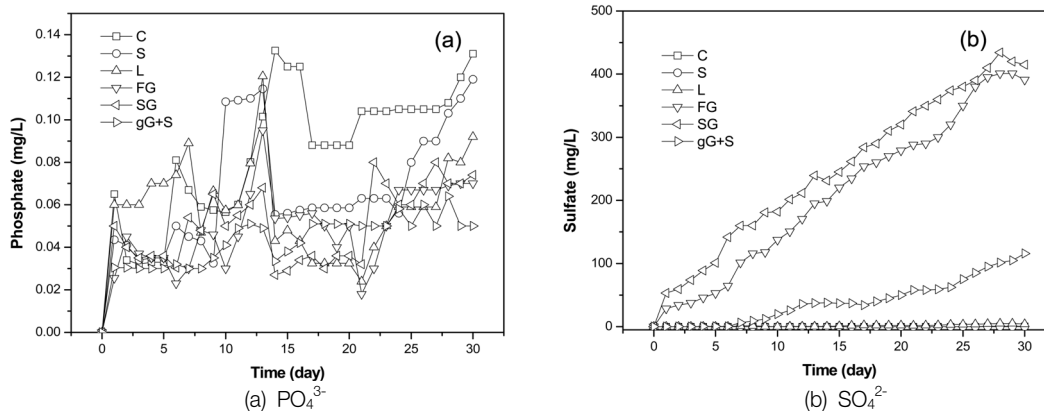
0.13 mg/L가 용출된 것을 알 수 있다(Fig. 4(a)). 모래의 경우 0.12 mg/L로 control과 유사하게 용출되는 것으로 나타났다. 특히, capping 후 10일에서 13일 사이에 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 농도가 0.11 mg/L까지 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 CH<sub>4</sub> gas 발생과 동시에 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>이 함께 용출된 결과로 사료된다. 즉 5 cm의 모래층으로도 충분한 capping이 되지 않음을 알 수 있다. Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum 경우는 약 40%의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 용출을 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 복합소재인 granule gypsum+ sand의 경우는 50% 이상의 차단 효과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 산화제인 granule gypsum 주입과 모래층 3 cm의 복토에 의해 압밀이 이루어져 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 효과가 높은 것으로 사료된다.

Fig. 4(b)는 시간에 따른 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 변화를 나타낸 것이다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 저감을 위해 제작한 Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum은 30일 이후 390, 415 mg/L로 일반적인 granule gypsum 보다 훨씬 용해도가 적은 것을 확인할 수 있었다. 희석 등을 고

Table 4. Variation of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentration on incubation time with various capping materials (distilled water)

Time (day)	Phosphate (mg/L)						Sulfate (mg/L)					
	C	S	L	FG	SG	gG+S	C	S	L	FG	SG	gG+S
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.07	0.04	0.06	0.03	0.05	0.03	0.0	0.0	0.0	28.7	53.3	0.2
2	0.03	0.04	0.06	0.05	0.04	0.03	0.0	0.0	0.0	34.0	59.4	0.0
3	0.03	0.03	0.06	0.04	0.04	0.03	0.0	0.0	0.0	37.7	74.0	0.0
4	0.03	0.04	0.07	0.04	0.04	0.03	0.0	0.0	0.0	45.8	89.1	0.3
5	0.03	0.04	0.07	0.04	0.04	0.03	0.0	0.0	0.0	52.9	101.2	0.4
6	0.08	0.05	0.07	0.02	0.03	0.03	0.0	0.0	0.0	64.4	142.0	0.5
7	0.07	0.05	0.09	0.03	0.05	0.03	0.0	0.0	1.4	101.3	160.0	6.1
8	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.0	0.0	1.4	115.8	160.3	9.2
9	0.06	0.03	0.07	0.05	0.07	0.04	0.0	0.0	0.4	118.0	181.0	12.1
10	0.06	0.11	0.06	0.03	0.05	0.04	0.0	0.0	0.0	137.5	182.0	19.7
11	0.06	0.11	0.06	0.05	0.06	0.05	0.0	0.0	0.2	150.8	201.5	25.6
12	0.08	0.11	0.08	0.07	0.06	0.05	0.0	0.0	0.2	170.4	211.5	35.8
13	0.10	0.11	0.12	0.10	0.07	0.05	0.0	0.0	0.2	195.0	239.5	37.3
14	0.13	0.06	0.04	0.05	0.03	0.03	0.0	0.0	0.2	199.0	231.5	37.7
15	0.13	0.06	0.05	0.05	0.03	0.04	0.0	0.0	0.8	220.1	245.1	37.0
16	0.13	0.06	0.04	0.06	0.03	0.04	0.0	0.0	1.8	234.5	261.4	37.0
17	0.09	0.06	0.03	0.06	0.04	0.05	0.0	0.0	2.3	254.0	284.0	34.0
18	0.09	0.06	0.03	0.05	0.03	0.05	0.0	0.0	2.0	260.0	290.0	40.0
19	0.09	0.06	0.03	0.04	0.04	0.05	0.0	0.0	2.1	270.0	310.0	45.0
20	0.09	0.06	0.03	0.05	0.04	0.05	0.0	0.0	2.2	279.0	320.0	50.0
21	0.10	0.06	0.02	0.02	0.03	0.05	0.0	0.0	1.8	288.0	341.0	57.8
22	0.10	0.06	0.04	0.03	0.08	0.05	0.0	0.0	2.0	290.0	350.0	58.0
23	0.10	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	0.0	0.0	2.5	300.0	360.0	59.0
24	0.11	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.0	0.0	3.3	320.0	374.0	62.4
25	0.11	0.08	0.06	0.07	0.06	0.05	0.0	0.0	3.5	350.0	380.0	75.0
26	0.11	0.09	0.06	0.07	0.07	0.06	0.0	0.0	4.0	380.0	390.0	85.0
27	0.11	0.09	0.06	0.07	0.08	0.05	0.5	0.0	4.5	395.0	410.0	95.0
28	0.11	0.10	0.08	0.07	0.07	0.06	0.6	0.0	5.0	401.0	434.0	101.5
29	0.12	0.11	0.08	0.07	0.07	0.05	0.6	0.0	5.0	401.0	420.0	105.0
30	0.13	0.12	0.09	0.07	0.07	0.05	0.6	0.1	4.3	391.0	415.0	116.0
Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Max	0.13	0.12	0.12	0.10	0.08	0.06	0.6	0.1	5.0	401.0	434.0	116.0
Avg.	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.1	0.0	1.6	209.2	247.4	40.1

C / Control, S / Sand, L / Loess, FG / Fe+Gypsum, SG / SiO<sub>2</sub>+Gypsum, gG+S / granule-Gypsum+Sand



C / Control, S / Sand, L / Loess, FG / Fe+Gypsum, SG / SiO<sub>2</sub>+Gypsum, gG+S / granule-Gypsum+Sand  
Fig. 4. Variation of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentration on incubation time with various capping materials (distilled water).

려한다면 상수원보호구역에도 적용 가능할 것으로 판단된다. 복합소재인 granule gypsum+sand의 경우 30일 경과 후 116 mg/L로 sand 층에 의해 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 용출되는 것으로 나타났다. 데이터의 추이를 보면 시간에 따라 계속 변동 가능성이 있는 것으로 나타나 보다 정확한 인자 도출을 위해 장기적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

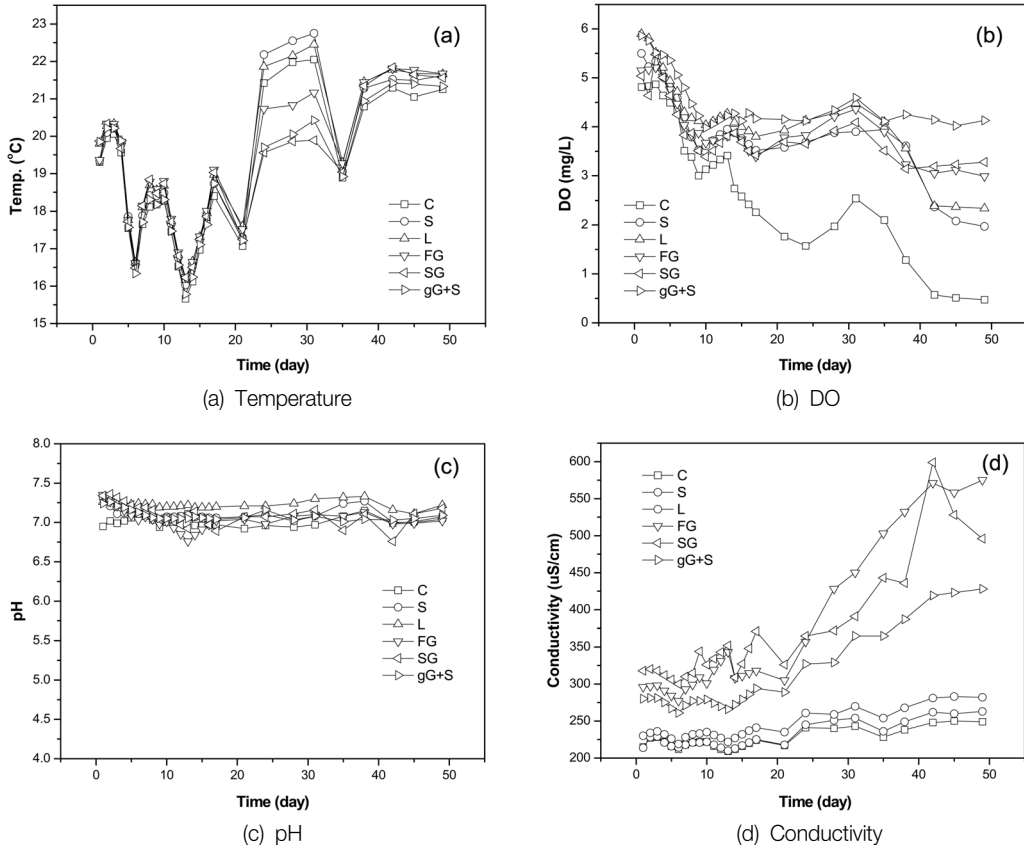
### 3.1.2. 호소수를 이용한 인 용출 특성 분석

최적 in-situ capping 소재 선정을 위해 증류수 실험과 동일하게 오염 퇴적물 위에 sand (5 cm), loess (5 cm), Fe-Gypsum SiO<sub>2</sub>-Gypsum, granule-Gypsum+Sand (3 cm)를 각각 capping 한 후, 호소수를 채워 49일(7주)간 수층의 수온, pH, DO, conductivity 등을 관찰하였다. 또한 퇴적물로부터 용출되는

Table 5. The change in Temp., DO, pH, Conductivity of water column (lake water)

Time (day)	Temp. (°C)						DO (mg/L)						pH						Conductivity (μS/cm)					
	C	S	L	FG	SG	gG+S	C	S	L	FG	SG	gG+S	C	S	L	FG	SG	gG+S	C	S	L	FG	SG	gG+S
1	19.3	19.3	19.8	19.4	19.9	19.9	4.8	5.5	5.9	5.2	5.0	5.86	7.0	7.3	7.3	7.4	7.3	7.2	215	214	230	296	318	280
2	20.0	20.1	20.3	20.3	20.3	20.2	4.8	5.2	5.8	5.2	4.6	5.76	7.0	7.2	7.3	7.3	7.4	7.3	227	228	234	297	320	281
3	20.1	20.2	20.3	20.3	20.2	20.2	4.9	5.3	5.5	5.2	5.5	5.51	7.0	7.1	7.2	7.2	7.3	7.2	228	229	236	298	318	281
4	19.6	19.8	19.9	19.9	19.7	19.9	4.6	5.0	5.2	5.0	5.0	5.47	7.0	7.1	7.2	7.2	7.3	7.2	222	221	232	291	312	275
5	17.6	17.9	17.8	17.8	17.7	17.6	4.5	4.9	4.9	4.8	4.6	5.36	7.1	7.1	7.2	7.1	7.2	7.2	216	216	226	284	306	267
6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.5	16.3	4.4	4.6	4.7	4.5	4.3	5.06	7.1	7.1	7.2	7.0	7.2	7.1	212	214	219	277	300	261
7	17.7	17.9	18.1	18.2	18.2	17.7	3.5	4.2	4.3	4.0	3.8	4.8	7.1	7.1	7.2	7.1	7.2	7.1	218	218	228	293	310	271
8	18.1	18.4	18.7	18.8	18.8	18.3	3.4	3.8	4.2	3.8	3.9	4.47	7.0	7.1	7.2	7.0	7.2	7.1	221	221	232	299	315	277
9	18.2	18.4	18.6	18.6	18.5	18.2	3.0	3.5	4.1	3.9	3.5	4.22	6.9	7.0	7.2	7.0	7.0	7.1	222	221	233	309	344	277
10	18.3	18.5	18.7	18.8	18.7	18.3	3.1	3.6	4.0	3.7	3.4	3.98	7.0	7.1	7.2	7.0	7.1	7.1	222	222	235	301	326	279
11	17.5	17.7	17.7	17.8	17.7	17.5	3.2	3.7	4.1	3.7	3.5	4.06	7.0	7.1	7.2	6.9	7.0	7.1	216	218	231	319	334	274
12	16.5	16.8	16.8	16.9	16.8	16.6	3.3	3.8	4.2	3.8	3.7	4.14	7.1	7.1	7.2	6.9	7.0	7.1	212	214	227	331	343	270
13	15.7	16.0	16.2	16.2	16.2	15.8	3.4	4.0	4.3	3.8	3.8	4.23	7.1	7.1	7.2	6.8	6.9	7.1	209	210	222	343	352	266
14	16.1	16.5	16.7	16.6	16.5	16.2	2.7	3.9	4.1	4.0	3.9	4.27	7.0	7.1	7.2	6.8	7.1	7.1	212	213	227	308	309	272
15	17.0	17.2	17.3	17.3	17.3	17.1	2.6	3.8	4.0	3.7	3.7	4.12	7.0	7.1	7.2	6.9	7.1	7.1	216	217	232	311	327	279
16	17.8	17.9	18.0	18.0	17.9	17.6	2.4	3.6	3.9	3.5	3.5	4.28	7.0	7.1	7.2	7.0	7.0	7.1	220	221	237	315	348	286
17	18.4	18.7	19.0	19.1	19.0	18.7	2.3	3.5	3.8	3.4	3.4	4.17	7.0	7.1	7.2	7.0	6.9	7.0	224	225	241	318	371	294
21	17.1	17.3	17.6	17.5	17.3	17.2	1.8	3.6	3.9	3.8	3.7	4.15	6.9	7.1	7.2	7.0	7.1	7.1	217	218	235	305	326	289
24	21.4	22.2	21.9	20.7	19.6	19.7	1.6	3.7	4.1	3.8	3.7	4.12	7.0	7.1	7.2	7.0	7.1	7.2	241	245	261	357	365	327
28	22.0	22.6	22.2	20.8	19.9	20.1	2.0	3.9	4.3	4.2	3.9	4.34	6.9	7.0	7.2	7.1	7.1	7.0	240	251	259	428	372	329
31	22.1	22.8	22.5	21.2	19.9	20.4	2.5	3.9	4.5	4.4	4.1	4.59	7.0	7.1	7.3	7.1	7.2	7.1	243	254	270	450	391	365
35	18.9	19.1	19.3	19.3	19.0	18.9	2.1	3.9	4.1	3.9	3.5	4.11	7.1	7.2	7.3	7.1	6.9	7.0	228	236	254	503	443	365
38	20.8	21.3	21.5	21.4	21.3	20.9	1.3	3.6	3.6	3.2	3.1	4.25	7.2	7.3	7.3	7.1	7.1	7.0	238	249	268	532	436	387
42	21.3	21.5	21.8	21.8	21.8	21.4	0.6	2.4	2.4	3.1	3.2	4.14	7.0	7.0	7.2	7.0	6.8	7.0	248	262	281	571	599	419
45	21.1	21.5	21.7	21.8	21.7	21.4	0.5	2.1	2.4	3.1	3.2	4.02	7.0	7.0	7.1	7.0	7.1	7.1	250	260	283	558	528	423
49	21.3	21.6	21.7	21.7	21.6	21.3	0.5	2.0	2.3	3.0	3.3	4.13	7.1	7.0	7.2	7.0	7.2	7.1	249	263	282	575	496	428
Min.	15.7	16.0	16.2	16.2	16.2	15.8	0.5	2.0	2.3	3.0	3.1	4.0	6.9	7.0	7.1	6.8	6.8	7.0	209	210	219	277	300	261
Max.	22.1	22.8	22.5	21.2	21.8	21.4	4.9	5.5	5.9	5.2	5.5	5.9	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.3	250	263	283	575	599	428
Avg.	18.8	19.1	19.2	19.1	18.9	18.7	2.8	3.9	4.2	4.0	3.9	4.5	7.0	7.1	7.2	7.0	7.1	7.1	226	229	243	364	366	309

C / Control, S / Sand, L / Loess, FG / Fe+Gypsum, SG / SiO<sub>2</sub>+Gypsum, gG+S / granule-Gypsum+Sand



C / Control, S / Sand, L / Loess, FG / Fe+Gypsum, SG / SiO<sub>2</sub>+Gypsum, gG+S / granule-Gypsum+Sand

Fig. 5. The change in Temp., DO, pH, Conductivity of water column (lake water).

오염물질인 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 농도와 gypsum에서 용해되는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 거동 변화를 살펴보았다.

수온은 6개의 반응조 모두 모니터링 기간 중 평균 18.8°C를 나타내었다(Table 5, Fig. 5). Capping을 하지 않은 control의 경우, DO가 초기 4.9 mg/L에서 0.5 mg/L 이하로 90%가 감소되는 것을 확인할 수 있었다. Capping제에 의한 DO 변화는 Sand 64%, 황토 60%, Fe-gypsum 42%, SiO<sub>2</sub>-gypsum 35%, granule-gypsum+Sand 32% 감소되는 것으로 나타났다.

pH 변화는 Table 5와 Fig. 5(c)에 제시한 바와 같이 모든 column에서 평균 7.0을 유지하여 호소수 pH에 큰 변화를 없는 것으로 나타났다. 전기전도도는 50일 경과 후, control 250 μS/cm, sand 263 μS/cm, 황토 283 μS/cm를 나타내었다. 반면, 용해도가 큰 gypsum이 함유된 Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum의 경우 각각 575, 509 μS/cm를 나타내었다. Granule-Gypsum 위에 모래를 capping한 복합소재의 경우, 428 μS/cm를 나타내어 천연소재와 gypsum 관련 소재의 중간정도에 해당하는 증가를 나타내었다.

퇴적물로부터 용출되는 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>와 gypsum 소재에 기인하여 증가되는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 변화를 Table 6과 Fig. 6에 나타내었다. 반응조 내부에서의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 거동 변화는 증류수와 비교하여 다른 변화 양상을 나타내었다. Capping 소재를 적용하지 않은 control의 경우 실험초기 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 농도가 0.32 mg/L를 나타내었으나, 시간이 경과함에 따라 증가하기 보다는 점차적으

로 감소되어 10일경에 0.05 mg/L로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 호소수내 존재하는 미생물에 의해 인이 섭취되어 나타나는 현상으로 사료된다.

한편 수층에서의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 저감 및 장기간에 걸쳐 퇴적물내에 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>를 제공하기 위해 제작한 Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum은 약 50일 후, 각각 463 mg/L, 647 mg/L를 나타내어 powder 및 granule gypsum에 비해 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 용출이 적은 것으로 나타났다. 복합소재인 granule gypsum+sand의 경우 약 50일 경과 후 166 mg/L로 gypsum에 의해 용출되는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>를 모래층이 효과적으로 차단하는 것으로 나타났다.

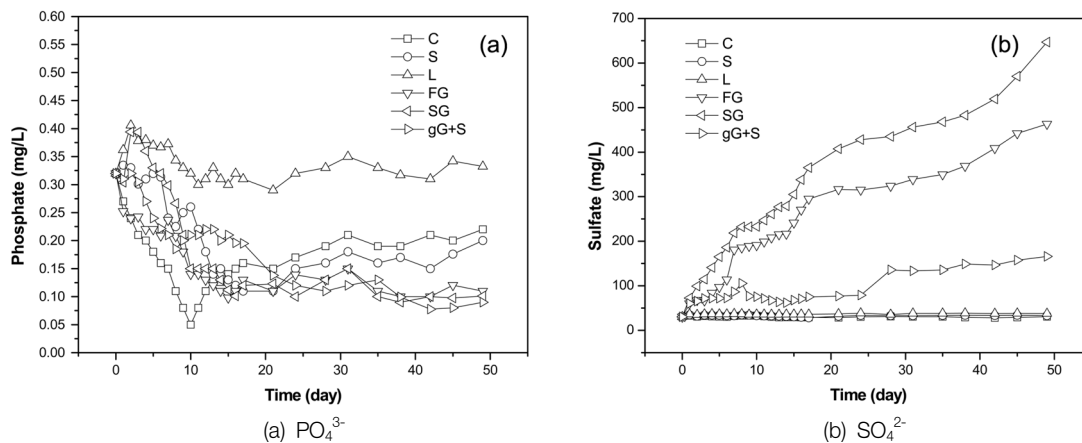
수체 미생물의 영향을 고려한 호소수 실험 결과 초기 10일 동안 미생물의 uptake에 의해 인의 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 퇴적물로부터 인 용출 차단 효과는 복합소재인 granule-gypsum+sand, Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum이 control과 비교하여 50% 저감 효과를 볼 수 있었다. 반면 친환경소재인 황토와 sand의 경우, 압밀이 충분히 이루어지지 않아 capping의 효과가 없는 것으로 나타났다. 따라서 향후 최적 두께 산정을 위한 실험이 이루어질 예정이다.

퇴적물로부터 순(net) 인 용출에 대한 경향을 파악하기 위한 증류수 실험 결과, 화학적소재인 Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum으로 capping을 할 경우, control과 친환경소재인 sand보다 인 용출을 약 40% 이상 저감시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한 복합소재인 granule-gypsum+sand (3 cm)는 약 50% 이

**Table 6.** Variation of  $PO_4^{3-}$  and  $SO_4^{2-}$  concentration on incubation time with various capping materials (lake water)

Time (day)	Phosphate (mg/L)						Sulfate (mg/L)					
	C	S	L	FG	SG	gG+S	C	S	L	FG	SG	gG+S
0	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	30.1	30.1	30.1	30.1	30.1	30.1
1	0.27	0.33	0.36	0.25	0.30	0.31	33.2	34.7	36.6	60.1	72.6	60.1
2	0.24	0.33	0.41	0.24	0.39	0.32	31.0	32.2	35.1	67.7	99.0	65.2
3	0.21	0.30	0.38	0.24	0.39	0.30	32.0	34.1	36.3	67.0	114.6	71.5
4	0.20	0.31	0.38	0.22	0.36	0.27	31.2	34.2	36.7	83.7	140.8	71.8
5	0.18	0.32	0.37	0.22	0.33	0.24	30.8	33.7	36.4	97.2	165.1	72.1
6	0.16	0.31	0.37	0.21	0.32	0.22	30.3	33.0	36.7	113.8	186.3	72.3
7	0.15	0.24	0.37	0.24	0.30	0.21	32.0	33.0	37.4	181.0	218.8	86.5
8	0.11	0.23	0.34	0.21	0.27	0.19	32.9	34.7	37.1	185.5	232.3	105.3
9	0.08	0.25	0.33	0.18	0.21	0.20	32.9	34.2	35.6	189.2	232.8	76.8
10	0.05	0.26	0.32	0.14	0.15	0.21	32.9	32.9	35.8	191.0	233.0	75.6
11	0.08	0.22	0.30	0.14	0.15	0.21	31.6	32.6	35.8	199.0	247.0	71.4
12	0.11	0.18	0.31	0.13	0.15	0.22	30.2	32.4	35.7	208.0	261.0	67.2
13	0.13	0.14	0.33	0.12	0.15	0.22	29.0	32.2	35.7	215.0	277.0	63.6
14	0.13	0.15	0.31	0.11	0.13	0.20	29.6	31.4	35.9	216.5	279.0	62.1
15	0.14	0.13	0.30	0.10	0.11	0.21	29.4	30.4	35.9	241.5	305.0	67.5
16	0.15	0.12	0.32	0.11	0.10	0.20	29.1	29.5	36.0	270.2	338.0	70.6
17	0.16	0.11	0.31	0.13	0.12	0.20	28.9	28.3	36.0	295.0	365.0	75.0
21	0.15	0.11	0.29	0.11	0.12	0.14	28.5	31.6	37.1	316.3	407.5	77.0
24	0.17	0.15	0.32	0.14	0.10	0.12	30.4	33.4	38.7	315.0	428.0	79.0
28	0.19	0.16	0.33	0.13	0.13	0.11	31.4	33.1	35.5	324.0	435.0	135.5
31	0.21	0.18	0.35	0.15	0.15	0.12	30.6	33.1	38.2	339.0	456.0	133.5
35	0.19	0.16	0.33	0.11	0.10	0.13	30.9	33.5	38.0	350.0	468.0	135.8
38	0.19	0.17	0.32	0.10	0.09	0.10	29.1	33.7	38.5	368.5	482.6	149.0
42	0.21	0.15	0.31	0.10	0.10	0.08	28.1	33.2	37.9	408.5	519.0	146.5
45	0.20	0.18	0.34	0.12	0.10	0.08	29.2	34.0	38.4	442.0	570.0	157.5
49	0.22	0.20	0.33	0.11	0.10	0.09	30.8	33.0	37.6	463.0	647.0	166.0
<b>Min</b>	<b>0.05</b>	<b>0.11</b>	<b>0.29</b>	<b>0.1</b>	<b>0.09</b>	<b>0.08</b>	<b>28.1</b>	<b>28.3</b>	<b>30.1</b>	<b>30.1</b>	<b>30.1</b>	<b>30.1</b>
<b>Max</b>	<b>0.32</b>	<b>0.33</b>	<b>0.41</b>	<b>0.32</b>	<b>0.39</b>	<b>0.32</b>	<b>33.2</b>	<b>34.7</b>	<b>38.7</b>	<b>463</b>	<b>647</b>	<b>166</b>
<b>Avg</b>	<b>0.16</b>	<b>0.20</b>	<b>0.33</b>	<b>0.15</b>	<b>0.18</b>	<b>0.18</b>	<b>30.5</b>	<b>32.6</b>	<b>36.6</b>	<b>252.8</b>	<b>334.1</b>	<b>95.58</b>

C / Control, S / Sand, L / Loess, FG / Fe+Gypsum, SG /  $SiO_2$ +Gypsum, gG+S / granule-Gypsum+Sand



C / Control, S / Sand, L / Loess, FG / Fe+Gypsum, SG /  $SiO_2$ +Gypsum, gG+S / granule-Gypsum+Sand

**Fig. 6.** Variation of  $PO_4^{3-}$  and  $SO_4^{2-}$  concentration on incubation time with various capping materials (lake water).



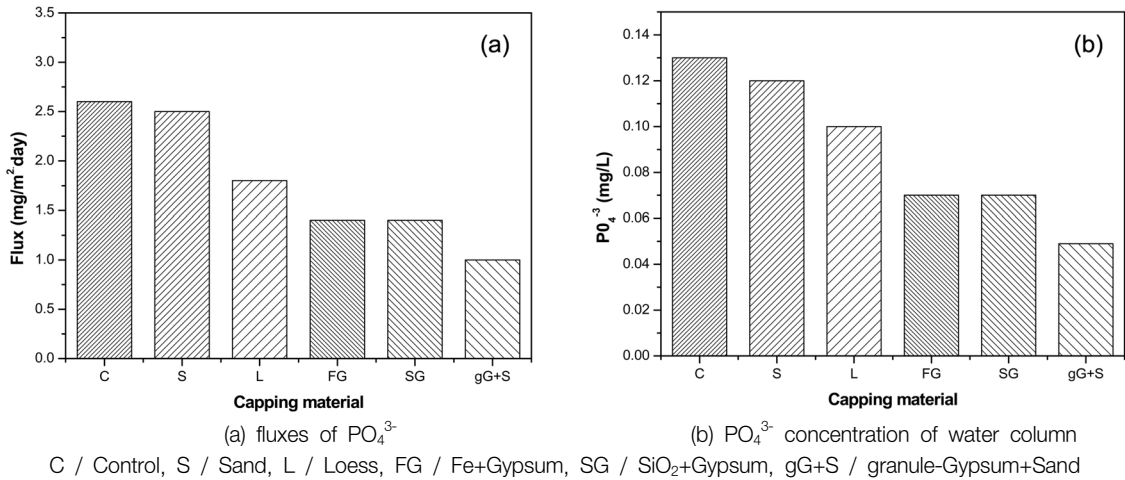


Fig. 7. Variation of  $PO_4^{3-}$  concentration and fluxes of  $PO_4^{3-}$  with various capping materials.

상 용출을 저감 시키는 것으로 나타났다(Fig. 7). 따라서 화학적 소재인 granule-gypsum과 그 위에 모래와 같은 친환경 소재로 capping을 한다면 인 용출 저감에 효과적일 것으로 판단된다.

### 3.2. Capping처리에 따른 퇴적물의 성상변화

하천 호수의 퇴적물내 인의 존재형태 변화를 Fig. 8에 나타내었다. Residual P의 경우 약 5~11%의 점유율을 보여주었고 운전 전후에 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 gypsum ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )으로 capping을 할 경우, 주로 Ca-p의 형태로 결합되어 있는 apatite P의 점유율이 17.5%에서 32.1%로 크게 증가하는 것이 확인되었다. 반면 control조와 sand처리조의 경우 동일한 연구기간동안 각각 16.7%에서 18.1%, 22.6%에서 17.5%로 변화하여 gypsum처리조에 보다 apatite P 점유율이 낮은 것으로 나타났다. 선행 연구에 의하면 gypsum 처리의 경우 gypsum에서 용출된 칼슘이온이 인산염과 화학적으로 결합하여 인 용출이 저감되는 것으로 보고되었다.

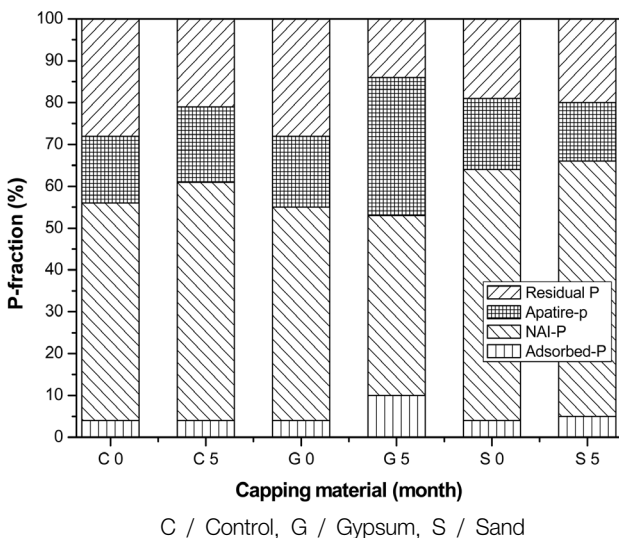


Fig. 8. Phosphorus existence types of sediment.

칼슘이온과 인산염의 화학적 결합체인 hydroapatite는 일반적인 자연 호소수와 같은 중성영역의 pH에서 매우 안정적인 물질로 알려져 있다.<sup>14,15)</sup> 즉 퇴적물내 빠른 초기속성화 작용(early diagenesis)으로 인해 광물화(mineralization rate)가 빠르게 진행되어 인회석과 같은 광물질로 변화되어 인 용출이 저감되는 것이라고 판단할 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 최적 capping 소재 선정 실험을 위해, 수층 미생물의 영향을 고려한 경우와 미생물의 영향을 배제한 호소수와 증류수로 구분하여 비교·평가하였다. 친환경소재로는 모래, 황토를 적용하였으며, 화학적 소재로는 granule-Gypsum과 Fe-Gypsum,  $SiO_2$ -Gypsum을 적용하였다. 친환경소재와 화학적 소재를 결합한 복합소재 방법으로는 산화제로 granule-Gypsum을 도포하고, 그 위에 모래 3 cm를 덮는 방법을 사용하였다. 연구 결과, 친환경소재인 모래와 황토의 경우, 충분한 압밀이 이루어지지 않아  $CH_4$  gas가 발생하여 이때 인이 함께 용출되어 인 용출 차단 효과가 높지 않은 것으로 나타났다. 화학적소재인 Fe-Gypsum,  $SiO_2$ -Gypsum으로 capping을 한 경우, control과 친환경소재인 sand보다 인 용출을 약 40% 저감시키는 것으로 나타났다. 또한 복합소재인 granule-Gypsum+Sand는 약 50% 이상 용출 저감 효과를 나타내었다. 따라서 화학적 소재인 granule-Gypsum과 그 위에 모래와 같은 친환경소재로 capping을 한다면 퇴적물로부터 인 용출을 크게 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한 capping처리 전후의 퇴적물 층의 성상변화를 살펴본 결과, gypsum투입에 의하여 퇴적물층에 존재하는 인이 용출되기 어려운 안정한 형태로 변화되는 것으로 확인되었다. 이상의 결과를 토대로 gypsum은 하천 및 호소내 퇴적물의 안정화에 매우 효과적으로 적용될 수 있는 capping 소재로 평가되었으며, 인 용출에 대한 저감 효율을 기대할 수 있을 것이다.

## Acknowledgement

본 연구는 한국건설기술연구원 2014년 주요사업(2014-0109) 연구비로 수행되었습니다.

KSEE

## References

1. Leeder, M. R., "Sedimentology," George, Allen & Unwin (Published) Ltd. ISBN 0-04-551053-9(1982).
2. Hakanson, L. and Janson, M., "Principles of lake sedimentology," *Springer-Verlag*, **109**, 24~31(1983).
3. James, D. Q., Heather, M. V., Joseph, E. M. and Lawrence, J. M., "Pilot-scale demonstration of in-situ capping of PCB-containing sediments in the lower grasses river," *Remediation*, **14**, 33~53(2003).
4. Ute, B., Thomas, N., Dietfried D., Rolf, N. and Doris, S., "Sediment capping in eutrophic lakes-efficiency of undisturbed calcite barriers to immobilize phosphorus," *Appl. Geochem.*, **19**, 1759~1771(2004).
5. Anonymous, "Assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS) program remediation guidance document, III : Great lakes national program," US EPA (EPA 905-B94-003), Chicago(1994).
6. José, M., Azcue, Alex, J. Z., Alena, M., Fernando, R. and Tim, P., "Assessment of sediment and porewater after one year of subaqueous capping of contaminated sediments in Hamilton Harbour, Canada," *Water Sci. Technol.*, **37**, 323~329 (1998).
7. Patrick, H. J. and Ulrich, F., "Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with active barrier systems (ABS) using natural and modified zeolites," *Water Res.*, **33**(9), 2083~2087(1999).
8. Gerlinds, W., Thomas, G. and Klaus, K., "Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release," *Water Res.*, **39**, 494~500(2005).
9. Ute, B., Thomas N., Dietfried D., Rolf, N. and Doris, S., "Sediment capping in eutrophic lakes-efficiency of undisturbed calcite barriers to immobilize phosphorus," *Appl. Geochem.*, **19**, 1759~1771(2004).
10. Eila, V., Anu L., Veli-Pekka, S. and Pertti, J. M., "A new gypsum-based technique to reduce methane and phosphorus release from sediments of eutrophied lakes: (Gypsum treatment to reduce internal loading)," *Water Res.*, **37**, 1~10(2003).
11. Froelich, P. N., Klinkhammer, G. P., Bender, N. A., Luedtke, Heath, G. R. and Cullen, D., "Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern Equator Atlantic: suboxic diagenesis," *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**, 1075~1090(1979).
12. Hieltjes, A. H. M., Likhlema, L., "Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments," *Hour. Environ. Qual.*, **9**(3), 405~407(1980).
13. APHA, AWWA, WEF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edition," American Public Health Association, Washington, D.C.(1998).
14. Salonen, V. P. and Varjo, E., "Gypsum treatment as a restoration method for sediments of eutrophied lakes-experiments from southern Finland," *Environ. Geol.*, **39**, 353~359(2000).
15. Wang, S., Jin, X., Zhao, H. and Wu, F., "Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China," *Colloid. Surf.*, **273**, 109~116(2006).