

## 호소퇴적물로부터 인 용출 저감을 위한 In-situ 처리

김석구 · 이미경<sup>†</sup> · 안재환 · 강성원 · 김영임

한국건설기술연구원 국토환경연구부

(2006년 3월 23일 접수, 2006년 5월 29일 채택)

### In-situ Treatment for the Attenuation of Phosphorus Release from Sediments of Lakes

Seogku Kim · Mikyung Lee<sup>†</sup> · Jaehwan Ahn · Sungwon Kang · Youngim Kim

Construction Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology

**ABSTRACT** : In order to propose optimum in-situ treatment for reducing phosphorous release from sediment of stationary lakes, a series of column tests were performed. The sediment used in experiment was very fine clay with a mean grain size 7.7 $\phi$  and high C<sub>org</sub> contents(2.4%). Phosphorous releases were evaluated in two ways : in lake water(with microbial effect) and in distilled water(without microbial effect). As in-situ capping material, sand and loess were used while Fe-Gypsum and SiO<sub>2</sub>-Gypsum were used for in-situ chemical treatment. In case of lake water considering the effect of microorganism, phosphorous concentration rapidly decreased in the early stage of experiment but it was gradually increased after 10 days. Flux of phosphorous release for control was 3.0 mg/m<sup>2</sup> · d. Whereas, those for sand layer capping(5 cm) and loess layer capping(5 cm) were 2.5 mg/m<sup>2</sup> · d and 1.8 mg/m<sup>2</sup> · d, respectively because the latter two were not consolidated sufficiently. For Fe-gypsum and SiO<sub>2</sub>-gypsum the fluxes were 1.4 mg/m<sup>2</sup> · d which meant that reduction efficiency of phosphorous release was more than 40% higher than that of control. The case capping with complex layer was 1.0 mg/m<sup>2</sup> · d, which showed high reduction efficiency over 60%. The addition of gypsum(CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O) into the sediment reduced release of phosphorus from the sediments. Gypsum acted as a slow-releasing source of sulphate in sediment, which enhanced the activity of SRB(sulfate reducing bacteria) and improved the overall mineralization rate of organic matter.

**Key Words** : Sediment, Phosphorous Release Reduction, In-situ Treatment, Capping, Gypsum

**요약** : 정체수역 호소 퇴적물로부터 인 용출 저감을 위한 최적의 In-situ 처리 방법을 제시하고자 실험실 규모의 batch test를 수행하였다. 실험에 사용된 퇴적물의 성상은 평균입도 7.7 $\phi$ (mud)로 매우 세립하고, 유기탄소 함량은 2.4%로 매우 높다. 인 용출 실험은 수층 미생물의 영향을 고려한 경우와 미생물의 영향을 배제한 호소수와 증류수로 구분하여 총 12개 컬럼을 비교·평가하였다. In-situ capping 소재로는 모래와 황토를 사용하였으며, in-situ chemical treatment로는 Fe-Gypsum, SiO<sub>2</sub>-Gypsum의 산화제를 적용하였다. 또한 산화제와 모래층을 결합시킨 복합층에 대해서도 비교·평가하였다. 미생물의 영향을 고려한 호소수의 경우, 실험 초기에는 인의 농도가 급격히 감소하다 10일 이후부터 서서히 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수층의 미생물에 의해 인이 섭취(uptake)되었다가 다시 용출되는데 시간이 소요되는 것으로 나타났다. 30일간 퇴적물로부터 용출된 인의 flux는 control의 경우 3.0 mg/m<sup>2</sup> · d로 매우 높고, 모래층(5 cm), 황토층(5 cm)으로 capping을 한 경우 역시 충분한 압밀이 이루어지지 않아 2.5 mg/m<sup>2</sup> · d, 1.8 mg/m<sup>2</sup> · d로 인 저감 효율이 낮았다. 화학적 소재를 적용한 Fe-gypsum와 SiO<sub>2</sub>-gypsum은 1.4 mg/m<sup>2</sup> · d로 control과 비교시 인 용출 저감 효율이 약 40% 이상으로 나타났다. 복합층으로 capping을 한 경우는 1.0 mg/m<sup>2</sup> · d로 60% 이상의 높은 인 저감 효율을 보였다. 즉, 오염퇴적물에 산화제로서 gypsum(CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O) 적용은 인의 용출을 감소시키며, 퇴적물내 황산염이 서서히 용해되어 SRB(sulfate reducing bacteria)의 활성화와 유기물의 광물화를 촉진시킬 수 있다.

**주제어** : 퇴적물, 인 용출 저감, In-situ 처리, Capping, Gypsum

## 1. 서론

최근들어 퇴적물로부터 인 용출 저감을 위한 방안으로 오염퇴적물에 in-situ capping 처리에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>1~3)</sup> Capping의 현장 처리 방법에는 크게 in-situ capping과 in-situ 처리법이 있다.<sup>3)</sup> In-situ 처리는 화학적 처리방법(chemical treatment)과 생물학적 처리방법(biological treat-

ment)로 구분된다. 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>3,4)</sup> 모래에 의한 capping은 퇴적물에 함유된 오염물질이 diffusion에 의해 수체로 용출되는 것을 효과적으로 차단할 수 있는 것으로 제시되었다. 또한 zeolite를 주재료로 한 ABS(active barrier system)를 형성시켜 Pb 등의 양이온 증금속을 제어한 바 있다.<sup>5)</sup> 화학적 처리방법(chemical treatment)을 현장에 적용한 사례로는 독일 Lake Daggowsee에 Depox<sup>®</sup>Fe(nitrate storage compound), Lake Epple

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: mkleee@kict.re.kr  
Tel: 031-910-0395

Fax: 031-910-0291

에 Calcite를 적용하여 퇴적물로부터 인을 효과적으로 차단한 바 있다.<sup>6,7)</sup> 또 다른 산화제 주입에 따른 연구 중 gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )에 의한 인 용출 저감에 대해 Finland에서 연구된 바 있다. 즉, gypsum을 통한 퇴적물 내 redox potential을 높이고, 인과의 binding partner로서의 Ca이 첨가되고,  $\text{SO}_4^{2-}$  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>8)</sup>

이와 같이 국외에서는 최근들어 in-situ 처리법에 있어서 실험실적 microcosm이 아닌 mesocosm에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나,<sup>9)</sup> 국내에서는 오염퇴적물의 기초 조사만이 활발히 이루어지고 있을 뿐, 이를 처리하기 위한 대안으로서 막대한 비용이 소요되는 준설방법 외에는 in-situ 처리를 위한 구체적 방안이 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구 사례에서 인 용출 차단의 효과가 높게 제시되었던 방법들을 비교·평가하여 최적의 in-situ 처리 방법을 제시하고자 모래, 황토, Fe-gypsum,  $\text{SiO}_2$ -gypsum, 복합층(산화제주입 + 모래층) 적용 등을 통하여 약 30일간 용출실험을 실시하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 수층 미생물에 의해 인이 섭취되어 저감되는 부분을 배제하고, capping에 의해 퇴적물로부터 용출되는 인의 저감 부분만을 파악하기 위해 미생물의 영향을 고려한 호소수와 미생물의 영향을 배제시킨 증류수로 구분하여 한 소재당 2개의 컬럼을 비교·평가 하였다(Fig. 1). 반응기는 아크릴 재질의 원통형 column(14  $\phi$ , L: 60 cm)에 퇴적물을 각각 동일하게 20 cm를 채우고, 모래와 황토를 각각 5 cm로 capping 하였으며, Fe-Gypsum과 granule-Gypsum은 퇴적물내 유기물을 산화시키는데 필요한  $\text{SO}_4^{2-}$  양을 정량화하여 각각 80 g씩 주입하였다.<sup>10)</sup> Granule-Gypsum+모래층(80 g+3 cm)를 각각 충전하고 증류수로 9.2 L씩 채워 퇴적물과 수층의 비를 1:3로 구현하였다(Fig. 1). 본 실험에 적용된 Fe-gypsum의 경우, 기존의 논문에서 natural gypsum 적용에 따른 수층  $\text{SO}_4^{2-}$  용해도 증가를 줄이기 위해 3가철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )와 gypsum을

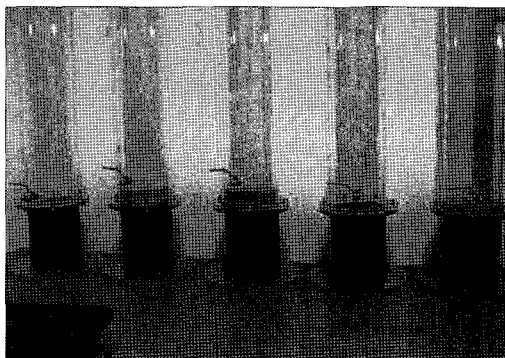


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set up for phosphorus release.

Table 1. Operating conditions

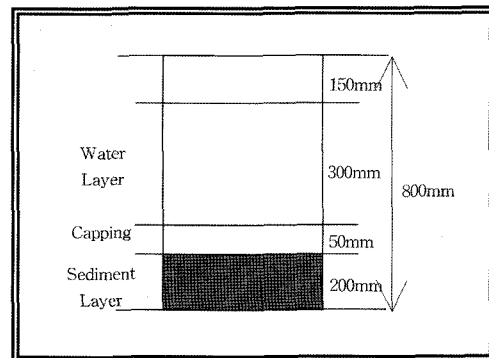
Parameters	Operating condition
reactor size	diameter : 14 cm, height : 60 cm
sediment layer(cm)	20
water column(cm)	60
sediment : water body	1 : 3
water column volume(L)	9.2
capping materials	Sand, Loess, Fe-Gypsum, $\text{SiO}_2$ -Gypsum, Granule-Gypsum
capping layer(cm)	Sand, Loess : 5 cm, Gypsum : 80 g

혼합하여 소재를 제조하였다.<sup>8)</sup> 또한  $\text{SiO}_2$ -gypsum 역시 지각에 높은 함량을 차지하고 있는 산화규소와 gypsum을 혼합·소결시켜  $\text{SO}_4^{2-}$  용해도를 저감시킨 소재를 제작하였다. 5개의 capping제를 이용한 column과 capping을 하지 않은 control 6개를 증류수와 호소수 총 12개 column을 비교·평가하였다. 또한 본 실험에서는 빠른 용출 효과를 보기 위해 뚜껑으로 밀폐시키고, 30일간의 용출실험을 실시하였다. 설치장소는 암실에 빛의 존재를 막았으며, 수온을 일정하게 유지하기 위해 실내온도를 20°C로 유지하였다. 수온, 용존산소, pH, conductivity는 YSI 556을 이용하여 interstitial water에서 모니터링 하였으며,  $\text{PO}_4^{3-}$  농도와 gypsum 주입에 따른 수층으로 용해되는  $\text{SO}_4^{2-}$  농도를 분석하였다. Table 1에 실험조건을 제시하였다.

## 3. 결과

### 3.1. 퇴적물 시료 채취 및 성상 분석

본 연구를 위해 사용된 퇴적물 시료는 2005년 11월 경기도에 위치한 팔당호 정체수역에서 채취하였다. 시료의 채취는 퇴적물 시료가 교란하지 않도록 내경 60~100 mm 아크릴 파이프가 장착된 소형 gravity corer를 이용하여 채취하였다. 채취된 core 시료의 양 끝단은 완전 밀봉하여 공기수의 배출을 차단하여 시료 원상태를 유지하도록 한 후 실험실로 냉장 운반하여 퇴적물의 물리·화학적 특성을 분석하였다. 퇴적물의 입도 측정은 시료 5 g을 1 L 비이커에 넣고 일차적으로 10%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 로 반응시켜 유기물을 제거한 후, 0.1 N HCl



로 탄산염을 제거하였다. 4  $\phi$ (63  $\mu$ m) 표준체로 습식 체질하여 4  $\phi$  이상의 세립퇴적물과 4  $\phi$  이하의 조립퇴적물로 분리한 후, 조립퇴적물은 1  $\phi$  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, 같

은 방법으로 측정하였다. 유기탄소의 함량은 총 탄소의 함량에서 무기탄소의 함량을 뺀 값으로 하였다. 퇴적물 내 지화학적 성상 분석 결과는 Table 2와 같다. 퇴적물 내 평균입도는 약 8  $\phi$ , 유기물 함량은 9.0%, 유기탄소(C<sub>org</sub>)는 2.5%로 입도는 매우 세립하고, 유기물 함량이 높은 것으로 나타났다.

**Table 2.** Geochemical properties of sediment

Geochemical properties		Values
Sediment	M <sub>z</sub> (Mean grain size, $\phi = -\log_2d$ )	7.8
	LOI(Loss on Ignition, %)	9.0
	C <sub>org</sub> (Organic carbon contents, %)	2.5

**Table 3.** Concentrations of Temp., DO, pH, and Conductivity in distilled water

Time (day)	Temp(°C)						DO(mg/L)						pH						Conductivity( $\mu$ S/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)

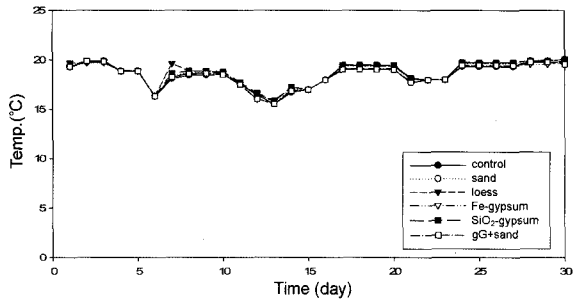


Fig. 2. Variation of temperature on incubation time with various capping materials(Distilled water).

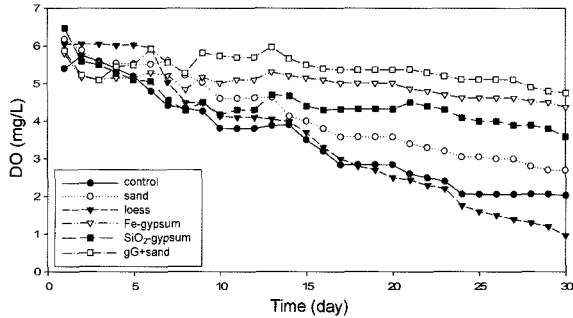


Fig. 3. Variation of D.O. on incubation time with various capping materials(Distilled water).

3.2. 증류수 실험 결과

30일 동안 관측한 수온 변화는 control, 모래층(5 cm), 황토층(5 cm), Fe-Gypsum, SiO<sub>2</sub>-Gypsum, 복합층(granule-Gypsum + Sand(3 cm)) 모두 평균 18°C로 일정하게 나타났다(Table 3, Fig. 2). DO 농도는 capping을 하지 않은 control의 경우, 초기 5.4 mg/L에서 30일 경과 후 2.0 mg/L로 약 63%가 저감되었다. 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 복합층을 적용한 경우, 초기 5.9 mg/L에서 4.8 mg/L로 약 19%만 저감되는 것을 알 수 있었다(Table 3, Fig. 3).

Fig. 4는 시간에 따른 pH의 변화를 나타낸 것으로 증류수의 일반적인 pH 범위인 평균 6.0~6.5의 범위로 control, 모래층, 황토, Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum, 복합층(granule gypsum + Sand)은 각각 평균 6.0을 유지하였다. Conductivity(μS/cm)

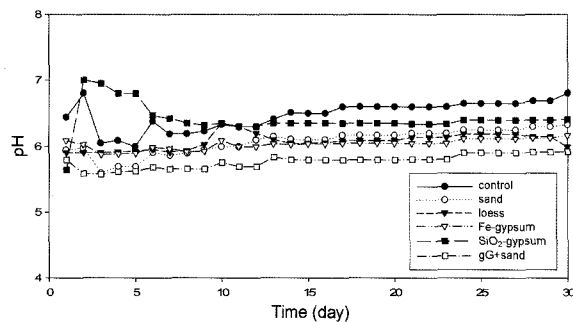


Fig. 4. Variation of pH on incubation time with various capping materials(Distilled water).

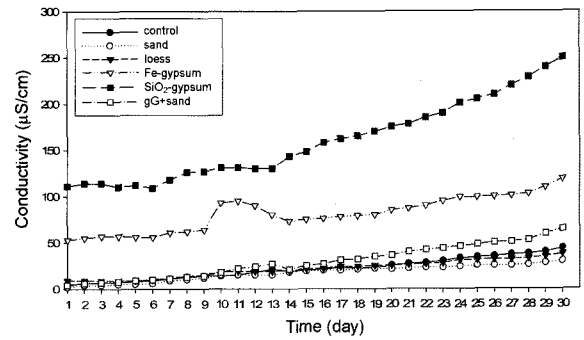


Fig. 5. Variation of conductivity on incubation time with various capping materials(Distilled water).

는 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 capping제 보다 높게 나타났다. 반면 granule-Gypsum층 위에 모래를 복토한 경우에는 65 μS/cm로 낮은값을 보였다(Fig. 5).

Table 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. 6). 모래층 5 cm 역시 0.12 mg/L로 control과 유사하게 용출되는 것으로 나타났다(Fig. 6). 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(Fig. 6). 즉 5 cm의 모래층으로는 충분한 압밀이 되지 않음을 알 수 있다. Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum 만으로는 약 40%의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 용출을 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 복합층을 적용한 granule-gypsum+sand(3 cm)의 경우는 60% 이상의 차단 효과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 산화제인 granule-gypsum으로 인해 SRB의 활성화와 빠른 광물화로 인해 methanogenesis가 저하되어 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 용출이 저하된 것으로 사료된다(Fig. 6). Fig. 7은 gypsum 적용에 따른 수층 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 변화를 나타낸 것이다. Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum은 30일 이후 390, 415 mg/L로 나타났다(Fig. 7). 복합층을 적용한 granule-Gypsum + sand(3 cm)의 경우 30일 경과 후 116 mg/L로 sand 층에 의해 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 용해가 억제되는 것으로 나타났다.

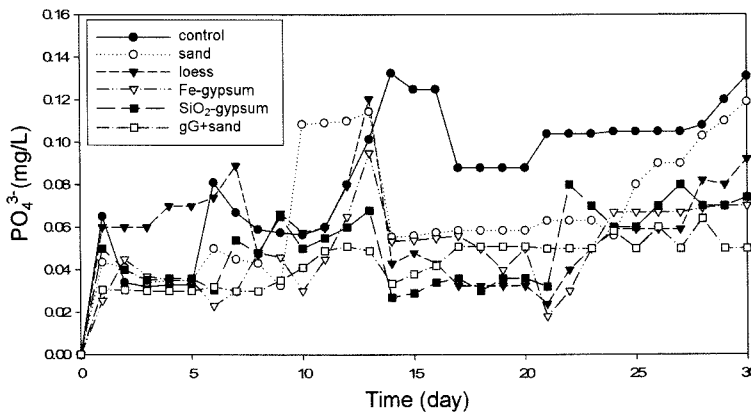
3.3. 호소수 실험 결과

최적 in-situ capping 소재 선정을 위해 증류수 실험과 동일하게 오염 퇴적물 위에 모래층(5 cm), 황토층(5 cm), Fe-Gypsum, SiO<sub>2</sub>-Gypsum, 복합층(granule-Gypsum+Sand(3 cm))를 각각 capping 한 후, 호소수를 채워 30일간 수층의 수온, pH, DO, 전기전도도(conductivity) 등을 관찰하였다. 퇴적물로부터 용출되는 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 30일 동안 평균 18.8°C를 나타내었다(Table 5, Fig. 8). Capping을 하지 않은 control의 경우, DO가 초기 4.9 mg/L에서 1.6 mg/L 이하로 67%가 소모되는 것을 확인할 수 있었다. Capping제에 의

**Table 4.** Concentrations of  $PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^{2-}$  in 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)



**Fig. 6.** Variation of  $PO_4^{3-}$  on incubation time with various capping materials(Distilled water).

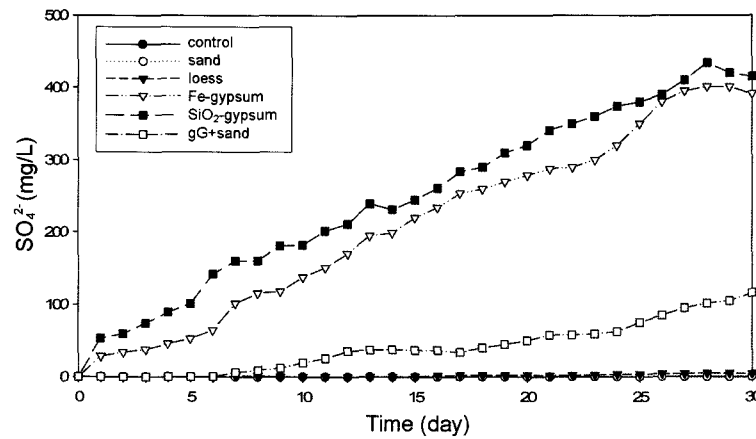


Fig. 7. Variation of  $SO_4^{2-}$  on incubation time with various capping materials(Distilled water).

Table 5. Concentrations of Temp., DO, pH, and Conductivity in 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	5.9	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	5.8	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	5.5	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	5.5	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	5.4	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	5.1	7.1	7.1	7.2	7.0	7.2	7.1	212	214.1	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	4.5	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	4.2	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	4.0	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	4.1	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	4.1	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	4.2	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	4.3	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	4.1	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	4.3	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	4.2	7.0	7.1	7.2	7.0	6.9	7.0	224	225	241	318	350	289
18	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	2.2	3.5	3.8	3.4	3.4	4.2	7.0	7.1	7.2	7.0	6.9	7.0	220	220	240	320	330	290
19	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	2.0	3.5	3.8	3.5	3.4	4.2	7.0	7.1	7.2	7.0	6.9	7.0	220	220	240	322	335	289
20	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	1.9	3.5	3.8	3.6	3.5	4.2	7.0	7.1	7.2	7.0	6.9	7.0	220	220	240	325	340	290
21	17.1	17.3	17.6	17.5	17.3	17.2	1.8	3.6	3.9	3.8	3.7	4.2	6.9	7.1	7.2	7.0	7.1	7.1	217	218	235	328	350	290
22	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	1.8	3.6	3.9	3.8	3.7	4.2	6.9	7.1	7.2	7.0	7.1	7.1	220	218	234	330	356	300
23	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	1.7	3.6	3.9	3.8	3.7	4.2	6.9	7.1	7.2	7.0	7.1	7.1	230	218	240	340	360	310
24	21.4	22.2	21.9	20.7	19.6	19.7	1.6	3.7	4.1	3.8	3.7	4.1	7.0	7.1	7.2	7.0	7.1	7.2	241	245	261	357	365	324
25	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	1.6	3.7	4.1	3.9	3.7	4.1	7.0	7.1	7.2	7.0	7.1	7.2	240	240	250	360	368	325
26	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	1.7	3.7	4.1	3.9	3.7	4.1	7.0	7.1	7.2	7.0	7.1	7.2	240	240	250	370	369	327
27	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	1.8	3.7	4.2	4.0	3.7	4.1	7.0	7.1	7.2	7.0	7.1	7.2	240	240	251	400	370	328
28	22.0	22.6	22.2	20.8	19.9	20.1	2.0	3.9	4.3	4.2	3.9	4.3	6.9	7.0	7.2	7.1	7.1	7.0	240	251	259	428	372	329
29	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	2.0	3.9	4.4	4.2	4.0	4.3	6.9	7.0	7.2	7.1	7.1	7.0	240	250	260	440	380	350
30	22.1	22.8	22.5	21.2	19.9	20.4	2.5	3.9	4.5	4.4	4.1	4.6	7.0	7.1	7.3	7.1	7.2	7.1	243	254	270	450	391	365
Min.	15.7	16.0	16.2	16.2	16.2	15.8	1.6	3.5	3.8	3.4	3.4	4.0	6.9	7.0	7.2	6.8	6.9	7.0	209	210	219	277	300	261
Max.	22.1	22.8	22.5	21.5	21.5	21.5	4.9	5.5	5.9	5.2	5.5	5.9	7.1	7.3	7.3	7.4	7.4	7.3	243	254	270	450	391	365
Avg.	18.8	19.0	19.0	18.9	18.8	18.7	2.9	4.0	4.3	4.0	3.9	4.5	7.0	7.1	7.2	7.0	7.1	7.1	224	225	238	332	341	293

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

한 DO 변화는 모래층 36%, 황토층 60%, Fe-Gypsum 42%, SiO<sub>2</sub>-Gypsum 38%, 복합층(granule-Gypsum+Sand) 32% 소모 되는 것으로 나타났다(Table 5, Fig. 9).

pH의 경우, Table 5, Fig. 10에 제시한 바와 같이 모든 column에서 평균 7.0을 유지하여 큰 변화가 없었다. 전기전도도는 30일 경과 후, control 243 μS/cm, sand 254 μS/cm, 황토 270 μS/cm를 나타내었다. 반면, 용해도가 큰 gypsum이 함유된 Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum의 경우 450, 391 μS/cm를 나타내었다. 그리고, granule-Gypsum 위에 모래 capping한 복합소재의 경우, 365 μS/cm를 나타내어 천연소재와 gypsum 관련 소재의 중간정도였다(Fig. 11).

퇴적물로부터 용출되는 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>와 gypsum 소재에 기인하여 증가되는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 변화를 Table 6에 나타내었다. 수체로서 호소수를 이용한 경우, 반응조 내부에서의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 거동 변

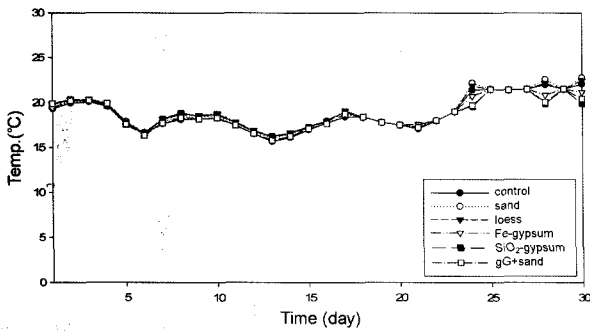


Fig. 8. Variation of Temperature on incubation time with various capping materials(Lake water).

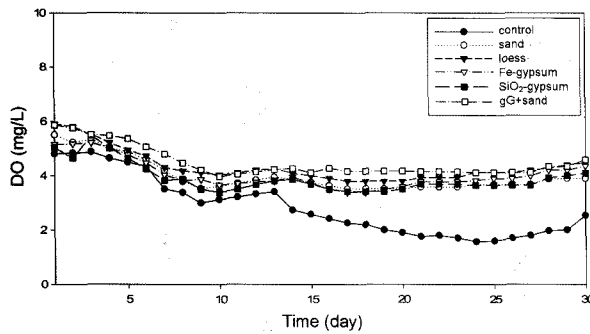


Fig. 9. Variation of D.O. on incubation time with various capping materials(Lake water).

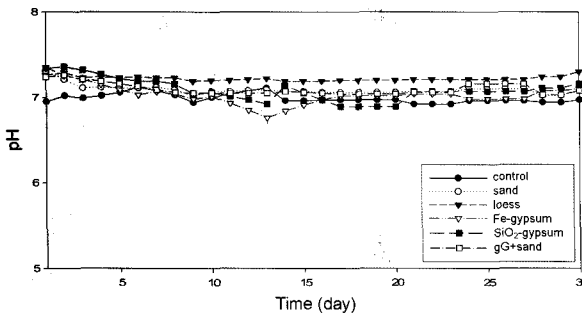


Fig. 10. Variation of pH on incubation time with various capping materials(Lake water).

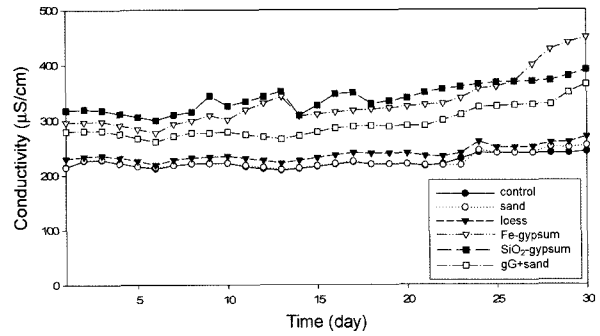


Fig. 11. Variation of conductivity on incubation time with various capping materials(Lake water).

Table 6. Concentrations of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in 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	0.14	0.15	0.31	0.11	0.13	0.20	29.6	31.4	35.9	216.5	279.0	62.1
15	0.15	0.13	0.30	0.10	0.11	0.18	29.4	30.4	35.9	241.5	305.0	67.5
16	0.15	0.12	0.32	0.11	0.10	0.17	29.1	29.5	36.0	270.2	338.0	70.6
17	0.18	0.11	0.31	0.13	0.12	0.16	28.9	28.3	36.0	295.0	365.0	75.0
18	0.18	0.12	0.29	0.13	0.12	0.16	28.8	28.3	36.0	300.0	370.0	76.0
19	0.19	0.11	0.29	0.13	0.12	0.13	28.7	29.9	36.0	305.0	380.0	76.0
20	0.18	0.11	0.29	0.13	0.12	0.13	28.6	30.0	36.0	310.0	390.0	76.0
21	0.18	0.11	0.29	0.11	0.12	0.13	28.5	31.6	37.1	316.3	407.5	77.0
22	0.18	0.16	0.30	0.11	0.10	0.11	28.8	32.0	38.5	316.5	410.0	78.0
23	0.19	0.16	0.30	0.11	0.10	0.11	29.0	32.5	38.5	315.0	420.0	78.0
24	0.17	0.16	0.32	0.14	0.10	0.10	30.4	33.4	38.7	315.0	428.0	78.0
25	0.18	0.16	0.32	0.14	0.10	0.09	30.2	33.4	36.5	318.0	430.0	80.0
26	0.19	0.17	0.32	0.14	0.10	0.09	30.3	33.4	36.5	319.0	432.0	90.0
27	0.20	0.17	0.32	0.14	0.10	0.09	30.4	33.4	36.5	320.0	433.0	100.0
28	0.20	0.18	0.33	0.13	0.13	0.06	31.4	33.1	35.5	324.0	435.0	135.5
29	0.21	0.19	0.33	0.13	0.13	0.05	31.4	33.1	37.0	330.0	440.0	134.0
30	0.21	0.18	0.35	0.15	0.15	0.05	30.6	33.1	38.2	339.0	456.0	133.5
Min.	0.05	0.11	0.29	0.1	0.09	0.08	28.1	28.3	30.1	30.1	30.1	30.1
Max.	0.32	0.33	0.41	0.32	0.39	0.32	33.2	34.7	38.7	463.0	647.0	166.0
Avg.	0.16	0.19	0.33	0.15	0.17	0.16	30.4	32.2	36.4	245.8	323.5	83.9

(C : control, S : sand, L : loess, FG : Fe+Gypsum, SG : SiO<sub>2</sub>-Gypsum, gG+S : granule-Gypsum+ sand)

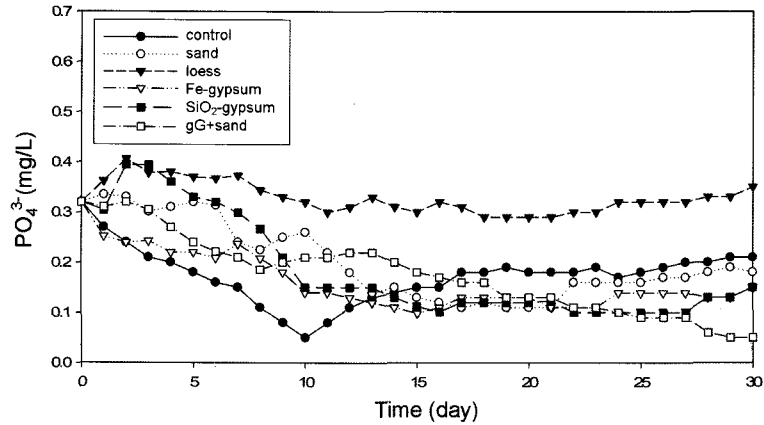


Fig. 12. Variation of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> on incubation time with various capping materials(Lake water).

화는 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 점차적으로 감소되어 10일경에 0.05 mg/L로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 12). 기존의 연구에서는 대부분 용출 실험 초기부터 인의 농도가 증가하는 양상을 보인다고 제시되었으나, 본 연구에서는 호소수내 존재하는 미

생물에 의해 초기에 인이 섭취되고 약 10일 경과 후부터 재용출이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.<sup>11)</sup> 한편 수층에서의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도는 Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum은 약 50일 후, 각각 339 mg/L, 456 mg/L로 나타났다(Fig. 13). 복합층을 적용한 granule-Gypsum+sand의 경우 약 30일 경과 후 134 mg/L로 gypsum에 의해 용출되는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>를 모래층이 효과적으로 차단하는 것으로 나타났다.

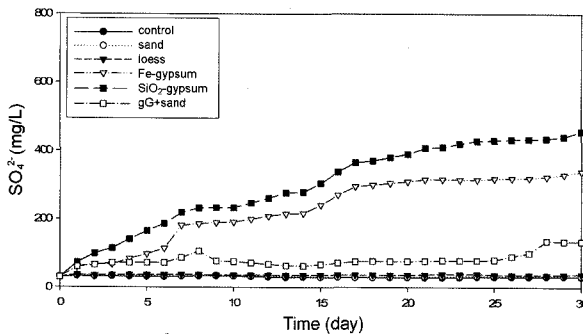


Fig. 13. Variation of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> on incubation time with various capping materials(Lake water).

#### 4. 고찰

##### 4.1. 퇴적물로부터의 인 용출량

수층미생물의 영향을 고려한 호소수 batch 실험 결과는 약 10일 동안 수층에 존재하는 미생물(microorganism)에 의해 인이 섭취되는 것을 확인할 수 있었다.<sup>11)</sup> 그러나 증류수로 수층을 채운 경우, 처음부터 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 농도가 증가되는 양상을 관측할 수 있었다. 즉, 퇴적물로부터 용출되는 순수한 인산염의 농도는 30일 이후 약 0.1 mg/L로 인산염의 용출율이 2 mg/m<sup>2</sup>·d에 해당한다. 따라서 호소수는 처음 약 0.3 mg/L의 농도가 10일경 0.05 mg/L로 감소되어 30일 이후 0.2 mg/L

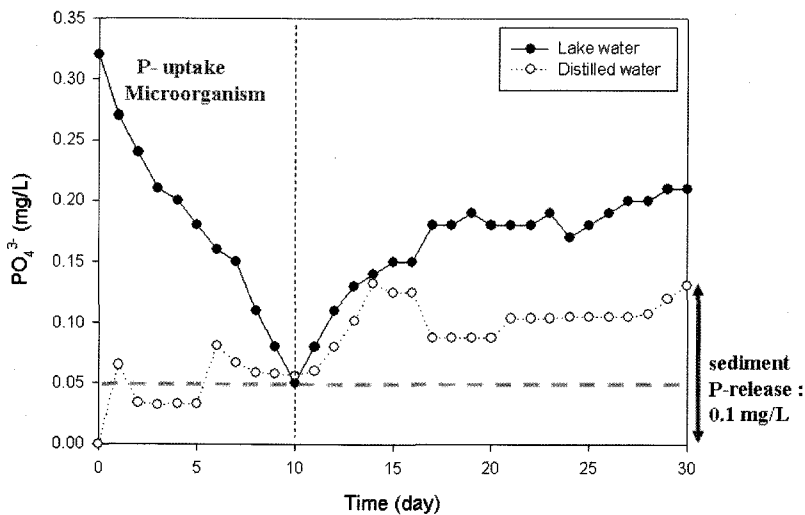


Fig. 14. Comparison between lake water and distilled water in phosphate-release.



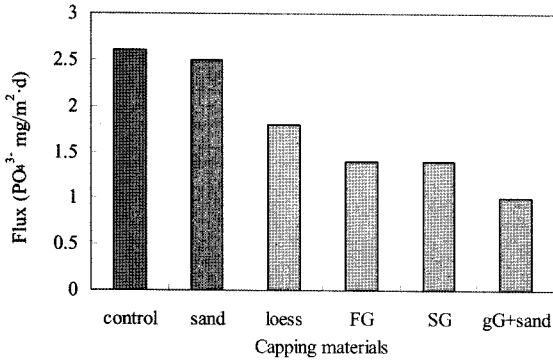


Fig. 15. Flux of phosphate release from sediments for 30 days.

로 약 0.15 mg/L가 증가되었다. 이는 3 mg/m<sup>2</sup>·d의 인의 용출율로 이중 순수하게 퇴적물로부터 용출된 부분은 2 mg/m<sup>2</sup>·d에 해당하며, 0.05 mg/L는 수층에 존재하는 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 농도로 보인다. 즉, capping을 통해 퇴적물로부터 용출되는 인의 농도를 완벽히 저감시킬 수 있다면 수층 인의 농도는 약 60% 이상 저감될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 수층에 존재하는 인의 농도는 외부로부터 유입되는 오염원 및 계절적 영향에 의한 식물플랑크톤의 대증식(phytoplankton bloom) 등에 의해 변화될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4.2. 인 용출 저감을 위한 최적 in-situ 처리방법

30일간 퇴적물로부터 용출된 인의 flux는 control 2.6 mg/m<sup>2</sup>·d, 친환경소재인 모래와 황토는 각각 2.5 mg/m<sup>2</sup>·d, 1.8 mg/m<sup>2</sup>·d, 화학적 소재인 Fe-gypsum 1.4 mg/m<sup>2</sup>·d, SiO<sub>2</sub>-gypsum 1.4 mg/m<sup>2</sup>·d로 나타났으며, 복합소재는 1 mg/m<sup>2</sup>·d로 나타났다(Fig. 15). 즉, 화학적소재인 Fe-Gypsum, SiO<sub>2</sub>-Gypsum로 capping을 할 경우, control과 친환경소재인 sand 보다 인 용출을 약 40% 이상 저감시키는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 복합소재인 granule Gypsum+Sand는 약 60% 이상 용출을 저감시키는 것으로 나타났다. 따라서 화학적 소재인 granule-Gypsum과 그 위에 모래와 같은 친환경소재로 capping을 한다면 인 용출 저감에 있어서 효과적인 것으로 판단된다.

### 5. 결론

1) 오염된 퇴적물로부터 인 용출 저감을 위한 최적의 in-situ 처리 방법을 제시하고자 모래, 황토, Fe-gypsum, SiO<sub>2</sub>-gypsum, 복합층(산화제주입 + 모래층) 적용 등을 통하여 약 30일간 용출실험을 실시하였다. 수층 미생물에 의해 인이 섭취되어 저감되는 부분을 배제하고, capping에 의해 퇴적물로부터 용출되는 인의 저감 부분만을 파악하기 위해 미생물의 영향을 고려한 호소수와 미생물의 영향을 배제시킨 증류수로 구분하여 총 12개의 컬럼을 비교·평가 하였다.

2) 미생물의 영향을 고려한 호소수의 경우, 실험 초기에는 인의 농도가 급격히 감소하다 10일 이후부터 서서히 증가되

는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수층의 미생물에 의해 인이 섭취(uptake)되었다가 다시 용출되는데 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

3) 30일간 퇴적물로부터 용출된 인의 flux는 control의 경우 3.0 mg/m<sup>2</sup>·d로 매우 높고, 모래층(5 cm), 황토층(5 cm)으로 capping을 한 경우 역시 충분한 압밀이 이루어지지 않아 2.5 mg/m<sup>2</sup>·d, 1.8 mg/m<sup>2</sup>·d로 인 저감 효율이 낮았다. 화학적 소재를 적용한 Fe-gypsum과 SiO<sub>2</sub>-gypsum은 1.4 mg/m<sup>2</sup>·d로 control과 비교시 인 용출 저감 효율이 약 40% 이상으로 나타났다. 복합층으로 capping을 한 경우는 1.0 mg/m<sup>2</sup>·d로 약 60% 이상의 높은 인 저감 효율을 보였다.

4) 즉, 이상의 결과로부터 오염퇴적물에 산화제로서 gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) 소재를 적용한다면 SRB(sulfate reducing bacteria)의 활성으로 인한 methanogenesis의 진행 저하와 빠른 초기속성화작용(early diagenesis)을 통한 apatite-P의 증가로 인의 저감 효과를 얻을 수 있다.

### 사 사

본 연구는 “환경부 차세대 핵심환경기술개발사업(2005-01361-1)” 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- 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, Inc.* 33~53(2003).
- Ute, B., Thomas, N., Dietfried D., Rolf, N., and Doris, S., “Sediment capping in eutrophic lakes-efficiency of undisturbed calcite barriers to immobilize phosphorus,” *Applied Geochemistry*, **19**, 1759~1771(2004).
- Assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS) program remediation guidance document, III : Great lakes national program, US EPA(EPA 905-B94-003), Chicago(1994).
- 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).
- 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).
- Gerlinds, W., Thomas, G., and Klaus, K., “Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release,” *Water Res.*, **39**, 494~500(2005).

7. Ute, B., Thomas, N., Dietfried, D., Rolf, N., and Doris, S., "Sediment capping in eutrophic lakes-efficiency of undisturbed calcite barriers to immobilize phosphorus," *Applied Geochemistry*, **19**, 1759~1771(2004).
8. 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).
9. Schaaanning, M., Breyholtz, B., and Skei, J., "Experimental results on effects of capping on fluxes of persistent organic pollutants(POPs) from historically contaminated sediments," *Marine Chemistry*, **3**, 14~28(2006).
10. 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).
11. Xia, J., Xiangcan, J., Yang, Y., Lihe, L., and Fengchang, W., "Effects of oxygen on the release and distribution of phosphorus in the sediments under the light condition," *Environmental pollution*, 1~6(2005).