



해양 퇴적물에서 인 용출 차단을 위한 반응성 피복 소재로서 제강슬래그의 적용성 검토

Applicability Assessment of Steel Slag as Reactive Capping Material for Blocking Phosphorus Release from Marine Sediment

조성욱* · 박성직*[†]

Jo, Sung-Wook · Park, Seong-Jik

ABSTRACT

We investigated the applicability of steel slag as a capping material in order to minimize phosphorus(P) release into seawater. Steel slag is a byproduct from the iron and steel industries and the use of steel slag has some advantages in respect of both cost and environmental concern. P removal by steel slag were studied in a batch system with respect to changes in contact time and initial concentration. Kinetic adsorption data were described well by pseudo 2nd order model, indicating rate limiting step for P adsorption to steel slag is chemical sorption. Equilibrium adsorption data fitted well to Langmuir isotherm model which describes for single layer adsorption. The maximum P adsorption capacity of steel slag was 7.134 mg-P/L. Increasing the depth of steel slag produced a positive effect on interruption of P release. More than 3 cm of steel slag was effective for blocking P release and 5 cm of steel slag was recommended as the depth for capping of P contaminated marine sediments. Increasing P concentration and flow rate had a negative effect on P removal ratio. It was concluded that the steel slag has a potential capping material for blocking P release from marine sediments.

Keyword: Phosphorus, Capping, Marine sediment, Steel slag, Column experiment

1. 서 론

물은 수문 순환에 따라서 해수 및 호소에서 대기로 증발하고 다시 지상에 강수로 하강하고, 하천유출, 용출, 지하수의 형태로 다시 바다로 유입된다. 물은 수문순환에 따라서 순환되는 반면에, 물속에 오염물질은 수문 순환에 따라서 바다에 지속적으로 유입되고 축적 된다. 바다의 자정작용에 의하여 오염물질의 일부가 분해되지만, 산업의 급속한 발전에 따른 산업폐수가 자연의 자정 작용을 넘어, 다량 방출 유입되고 있으며, 이에 의한 수질 오염은 심각한 실정이다. 또한, 농업 활동, 폐광산에서 발생한 산성광산배수, 그리고 유류에 의한 토양 오염은 지표수 및 지하수를 오염시킨다 (Lee and Cho; 2009; Jung et al., 2012). 토양 환경 오염에 의한 오염된 물은 최종목적지인 해양으로 유입되어 연안 해역의 오염을 가중시키고 있다 (Bae et al., 1999). 그 동안 내륙에서 발생한 슬러지 등 산업 및 생활 폐기물 처리의 상당

부분이 해양 투기에 의해서 이루어졌으며, 이는 또 다른 주요 해양 오염 원인이 되어 왔다 (Kim et al., 2010). 해양 오염 중 퇴적물에 함유된 부영양화 물질의 수계로의 이동은 지속적이며, pH, 온도, DO 등의 환경요인이 복합적으로 작용하여 수질관리의 어려움이 있다(Jung et al., 2014).

해양 오염 퇴적물 정화 기술로는 자연정화, 준설에 의한 오염 퇴적물 제거, 현장 피복 등이 있다 (Kim et al., 2012; Woo, 2011). 자연정화에 의한 오염 퇴적물 정화는 오염퇴적물 처리 과정에서 비용이 발생하지 않아 경제적이고 환경변화에 민감한 생태계에 큰 변화 없이 시행되는 장점이 있지만, 정화에 많은 시간이 소요되고 지속적인 오염원의 유입 시 정화 효과를 기대하기 어렵다. 준설에 의한 오염 퇴적물 정화는 준설 비용이 많이 소요되고, 준설된 토양을 정화하는데 추가적인 비용이 발생한다는 단점이 있다. 현장피복방법은 경제적인 뿐만 아니라 다른 처리 방법에 비하여 상대적으로 단시간에 고농도의 오염퇴적물 처리에 적합하다 (Kim et al., 2012; Lee, 2011). 피복에 의해서 형성된 복토층은 오염물질을 화학적 흡착, 물리적 고립/차단, 생물교란 작용의 감소 등을 통해서 퇴적층 내 오염물질의 수층으로 이동을 억제시킨다(Park et al., 2011). 오염된 퇴적물을 수계에서 고립시키기 위하여 오염된 퇴적물 위를 피복하는 재료로 모래,

* 한경대학교 지역자원시스템공학과
[†] Corresponding author Tel.: +81-31-670-5131
 Fax: +82-31-670-5139
 E-mail: parkseongjik@hknu.ac.kr

2014년 1월 14일 투고
 2014년 3월 27일 심사완료
 2014년 4월 15일 게재확정

자갈, 지오텍스타일, 지오그리드 등이 사용된다 (US EPA, 1994). 일반적으로 사용되는 피복 소재인 모래 혹은 자갈 대신에 반응성 피복 소재를 사용하면 피복 두께를 줄일 수 있고 소요 비용을 경감시킬 수 있다 (US EPA, 1998).

인 (P)은 부영양화 물질로 알려져 있으며, 수용액에서 P 제거에 관한 많은 연구가 이미 수행되었다. 수용액에서 P를 제거하는 방법 중 흡착에 의한 P 제거는 에너지가 적게 소요되고, 운전 및 조작이 간편하다는 장점이 있다. 흡착에 의한 P 제거율 및 비용은 흡착 소재의 흡착능 및 가격에 의해서 결정되므로, 가격이 저렴하고 흡착능이 우수한 소재를 선정하는 것이 중요하다. 제강슬래그는 철강 생산 과정에서 발생하는 부산물로, 다량의 Ca, Al, Fe와 같이 P와 강한 화합물을 형성하는 물질을 함유하고 있어 P 제거에 좋은 흡착제로 보고되고 있다 (Lee et al., 2012). 제강슬래그를 이용한 수용액에서 P 제거에 활용된 연구가 몇몇 연구자에 의해서 수행되었다. Sunahara et al. (1987)과 Xie et al. (1987)은 모사 하수 및 활성슬러지의 2차 처리 하수에 존재하는 P 제거를 위한 제강슬래그의 적용성 평가를 위해 칼럼 실험을 수행하였다. Yang et al. (2009)는 하수를 vermifilter를 이용하여 1차 처리한 물에서 P를 제거하는 실험을 수행하였다. Lee et al. (2012)은 제강슬래그를 이용하여 20 mM KNO₃를 바탕 전해질 물질로 사용하는 P 용액에서 P 제거를 회분 실험 및 칼럼 실험을 수행하였다. Claveau-Mallet et al. (2013)은 석고 광산 침출수에서 P를 제강슬래그를 이용하여 제거하였다. 타 연구자들에 의해서 수행된 선행 연구는 하수 및 담수에서 P 제거를 위한 제강슬래그의 사용에 관한 연구가 수행되었다. 반면에 해수에서 P 제거에 관한 연구는 일부 수행되었으나(Kang et al. 2013), 회분 실험에 국한되어 흐름이 없는 조건에서 수행되어 반응성 피복 소재로서 적용성을 평가하는데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 해양 오염 퇴적물에서 P 용출 차단을 위한 반응성 피복 소재로서 제강슬래그의 적용성 검토를 위하여 칼럼 실험을 수행하였다. P의 농도, 유속, 그리고 반응성 피복 소재의 두께를 달리하며 칼럼 실험을 수행하였으며, 제강슬래그 및 해사로 충전된 칼럼을 통과한 유출수를 일정 시간 간격으로 분취하여 파과곡선을 획득하였다. 획득된 파과곡선으로부터, 단위 질량당 P 흡착량, P 차단율, 그리고 흡착계수와 같은 흡착 변수를 정량화 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 재료

본 연구에서 사용된 바다모래와 해수는 충청남도 당진시 석

문면 교로리 왜목항에서 채취하였다. 바다모래는 채취 후 별도의 입도구분 없이 사용하였고, 해수는 사용하기 전 GF/C여과지로 여과한 후 30분간 125 °C 조건에서 고압멸균기 (Autoclave, HB-506, Hanbaek Science, Korea)로 멸균하였다. P의 용출을 차단시키기 위한 피복제로 사용된 제강슬래그는 에코마이스터로부터 제공 받았으며, 사용된 제강슬래그의 입경분포는 1~2 mm (No. 10~18 mesh) 사이에 존재하였다.

2. 배치실험

1~2 mm로 입도 구분한 제강슬래그를 이용하여 동적 흡착실험 (kinetic sorption test), 평형 흡착 실험 (equilibrium sorption test)을 수행하였다. K₂HPO₄를 증류수에 녹여서 표준용액 1000 mg-P/L를 제조한 후, 이를 희석하여 실험에 사용하였다. 동역학적 실험은 1 g의 제강슬래그와 10 mg/L와 100 mg/L 용액 (pH 7) 각각 30 mL를 50 mL 용량의 conical tube에 넣고, 40 min, 1, 3, 6, 12, 24 hr 반응시킨 후 P 용액을 채취하였다. 평형흡착 실험도 동일한 조건에서 24 hr 반응한 후 흡착량을 분석하였고, P 용액의 초기 농도는 10, 20, 50, 200, 300, 600, 1200 mg/L로 설정하였다. 채취한 용액은 제강슬래그와 분리하기 위하여 0.45 µm 여과지 (Polypropylene filter, Whatman, USA)를 이용하여 여과하였다.

3. 칼럼 실험

실험은 바다모래와 피복소재로서 제강슬래그가 충전된 칼럼에서 수행되었다. 본 연구에서 사용된 칼럼은 아크릴 재질로 내경 5 cm, 높이 30 cm의 것을 사용하였다. 칼럼 실험을 수행함에 앞서 바다모래에 존재하는 부유물질을 제거하기 위해 멸균시킨 해수를 약 8 시간 동안 칼럼 하부에서 상향의 일정한 유량으로 칼럼에 주입하여 바다모래를 세척한 후 실험을 수행하였다. 주입된 P용액은 멸균된 해수에 K₂HPO₄와 KH₂PO₄를 각각 1:1로 섞어 10, 20, 40 mg-P/L의 농도로 각각 제조한 것을 사용하였고, 칼럼 하부에서 상향으로 일정한 유량의 P 용액을 흘려주기 위해 액체정량펌프(Stepdos, KNF Flodos, Switzerland)가 사용되었다. P 용출에 있어 영향을 주는 인자로 제강슬래그의 피복 두께, 유량, P 용액의 농도에 따른 각각의 칼럼 실험이 수행되었다. 제강슬래그의 피복 두께에 따른 P 용출의 영향을 알아보기 위한 실험에서는 제강슬래그의 피복 두께를 0, 1, 3, 5 cm로 각각 달리하여 실험을 수행하였고, 유량에 따른 P 용출의 영향을 알아보기 위하여 유량을 각각 1, 2, 3 mL/min으로 각각 달리하여 실험을 수행하였으며, P의 농도에 따른 용출 특성은 P의 농도 10, 20, 40 mg-P/L에서 실험을 수행하였다. 10 mg-P/L,

5 cm, 1 mL/min을 기준 농도, 피복 두께, 그리고 유량으로 정하여 실험을 수행하였다. 칼럼을 통과한 시료는 자동분취기 (Retriever 500, Teledyne, CA, USA)를 이용하여 채취하고, 채취된 시료는 아스크로빈산 환원법에 의해 발색시킨 후 UV spectrophotometer (Optizen POP QX, Mecasys, Korea)로 710 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다. 그리고 흡광도는 농도로 환산하여 P 용출에 대한 파과곡선을 획득하였다.

4. 데이터 분석

평형흡착 실험결과는 Freundlich model과 Langmuir model을 이용하여 분석하였다.

$$S = K_F C^{1/n} \quad (1)$$

$$S = \frac{Q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (2)$$

S는 단위질량의 흡착제당 흡착된 P의 양 (mg/g), C는 평형 상태에서 액상의 P 농도 (mg/L)이다. K_F 는 분배계수 (L/g)로서 흡착제의 흡착 성능과 가장 주요하게 연관되며, n은 Freundlich 상수로 흡착제의 불균질성의 함수이다. K_L 은 결합 에너지와 관계된 Langmuir 흡착상수 (L/mg)이고, Q_m 은 단위 질량의 흡착제 당 P의 최대 흡착량 (mg/g)으로, 이 값이 클수록 흡착제가 P를 다량 흡착할 수 있어 흡착제 성능을 판별하는 기준이 된다. K_F , n, K_L , Q_m 은 실험 결과에 Freundlich model과 Langmuir model을 적용하여 값을 구하였다 (Summers et al., 2011).

칼럼으로 주입된 P의 총 양은 다음과 같이 산정하였다.

$$M_{total} = \frac{C_0 Q_{total}}{1000} \quad (3)$$

C_0 는 P의 유입 농도, Q는 체적유량, 그리고 t_{total} 은 총 주입 시간이다. 주입되는 P의 농도와 유량이 일정할 때 칼럼에서 P 제거량(q_{total})은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{total}} (C_0 - C_t) dt \quad (4)$$

C_t 는 시간 t에서 P의 농도이다. 실험을 수행하는 동안 P의 제거율(R_c)은 다음에 의해 결정되며, 단위 질량당 P제거를 위한 칼럼에서 필터 여재의 효율을 의미한다.

$$R_c = \left(\frac{q_{total}}{M_{total}} \right) \times 100 \quad (5)$$

III. 결과 및 고찰

1. 제강슬래그의 인 (P) 흡착 특성

제강슬래그의 P흡착에 있어 최대 흡착능을 알아보기 위한 동역학적 실험결과를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 10 mg-P/L에서는 24 시간 후에 평형에 도달하였고, 100 mg-P/L에서는 3 시간 후 평형에 도달하였다. 유사 1차 모델과 2차 모델을 이용하여 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 10 mg-P/L의 경우 유사 1차 모델에서 R^2 값이 0.723, 유사 2차 모델에서는 0.756로 나타났고 100 mg-P/L에서는 유사 1차 모델의 경우 R^2 값이 0.929, 유사 2차 모델에서는 0.937로 나타나 결과적으로 낮은 농도와 높은 농도 모두 유사 2차 모델에 더 잘 부합하는 것으로 나타났다. 이를 통해 제강슬래그의 P 흡착은 화학적 작용이 흡착반응속도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다 (Ho and McKay, 1999).

제강슬래그의 P 평형흡착실험 결과를 Fig. 2에 제시하였고, Freundlich 모델과 Langmuir 모델을 적용한 모델 변수 값들은 Table 2에 나타내었다. Freundlich 모델과 Langmuir 모델의 R^2 값을 비교해보면, Langmuir 모델의 R^2 값은 0.943로 Freundlich 모델의 R^2 값 0.873보다 큰 것으로 나타났다. 따라서, 평형 흡착

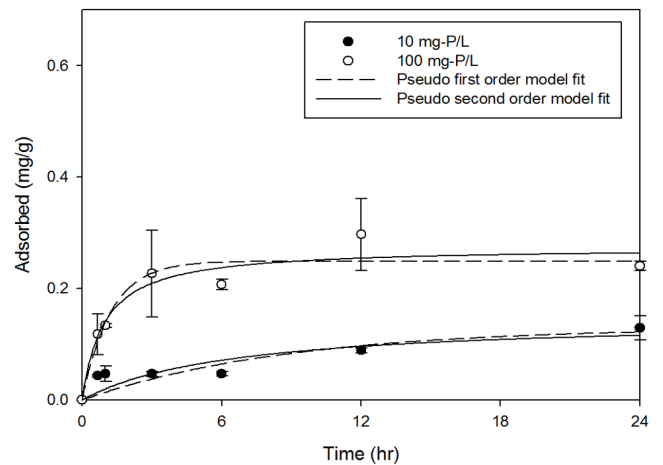


Fig. 1 Kinetic adsorption data and model fits for P adsorption to steel slag

Table 1 Model parameters for pseudo first-order and pseudo second-order model obtained from kinetic sorption experiments

Initial Concentration (mg-P/L)	Pseudo first-order model			Pseudo second-order model		
	q_e (mg/g)	k_1 (1/h)	R^2	q_e (mg/g)	k_2 (g/mg/h)	R^2
10	0.130	0.114	0.723	0.146	1.081	0.756
100	0.249	0.822	0.929	0.274	3.943	0.937

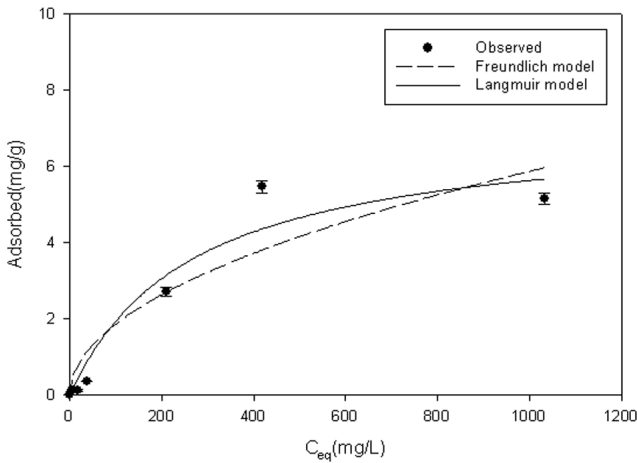


Fig. 2 Equilibrium adsorption data and model fits for P adsorption to steel slag

Table 2 Model parameters for Langmuir and Freundlich models obtained from equilibrium sorption experiment

Langmuir model			Freundlich model		
Q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
7.134	266.5	0.943	0.188	0.499	0.873

실험 결과 Freundlich 모델 보다 Langmuir 모델에 더 적합함을 알 수 있다. 본 결과를 통해 제강슬래그의 P 흡착은 다층 흡착보다는 단일층 흡착으로 일어남을 알 수 있다 (Summers et al., 2011). Freundlich 모델의 $1/n$ 값은 로 1보다 작으므로 제강슬래그의 P 흡착은 강하게 형성되어 있다 (Summers et al., 2011). Langmuir 모델에서 단위 질량당 제강슬래그의 P 흡착량은 7.134 mg-P/g으로 나타났다. 본 연구의 결과를 타 문헌의 연구와 비교한 결과, 본 연구에서 사용된 제강슬래그의 P 흡착량은 타 연구에서 사용된 흡착제 보다 높게 나타났다. Lee et al. (2012)는 구형의 제강슬래그를 이용하여 P 흡착 실험 결과 P 흡착량은 6.65 mg-P/g으로 나타났고, Xiong et al.은 제강슬래그를 이용한 P 흡착시 단위 질량당 P 흡착량은 5.3 mg-P/g으로 보고하였다. 또한, 나노 magnetite를 이용한 P 제거시, 단위 질량당 P 흡착량은 5.2 mg-P/g (Daou et al., 2007)과 3.2 mg-P/g (Pan et al., 2010)으로 나타났으며, 나노 자성 철산화물을 이용한 P 제거시 P 흡착량은 5.03 mg-P/g (Yoon et al., 2014)으로 나타났다. 선행 연구에서 사용된 흡착제가 나노 입자이므로, 입자의 비표면적은 입자 크기에 반비례한다는

Table 3 Chemical composition of steel slag

	Element Wt.(%)												
	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	SO ₃	LOI	Total
SS	32.20	29.80	15.10	11.00	6.18	3.04	1.02	0.49	0.36	0.18	0.18	0.45	100

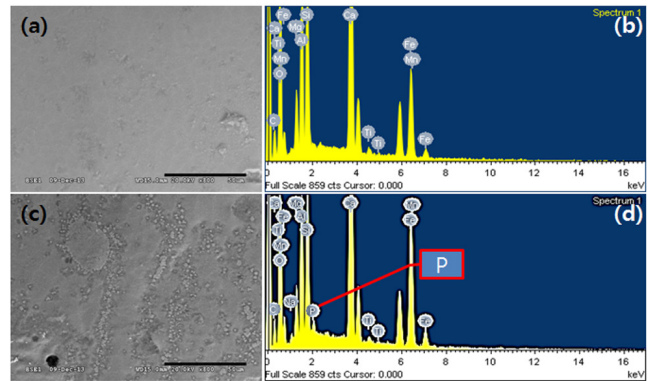


Fig. 3 SEM and EDS micrograph of the particles of steel slag before (a), (b) and after (c), (d) P adsorption

것을 고려할 때, 본 실험에 사용된 제강슬래그의 입경이 나노 입자 보다 크에도 불구하고 단위 질량당 P 흡착량은 상대적으로 높게 나타났다.

P은 Ca, Fe, Al과 반응하여 불용성 화합물을 만들면서 P을 흡착할 수 있다(Lindsay, 1979). XRF 분석 결과 Table 3에 나타난 것처럼 제강슬래그는 CaO, Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃가 주요 성분으로 P에 강하게 흡착할 수 있는 Ca, Fe, Al 성분을 다량 함유하고 있어, 제강슬래그의 단위 질량당 P 흡착량이 높은 것으로 사료된다.

SEM EDS를 이용한 P을 흡착하기 전과 후의 제강슬래그 표면의 특성을 Fig. 3에 나타내었다. SEM 사진에서 P 흡착 전과 비교하여 흡착 후 제강슬래그의 표면에 많은 양의 미세 입자들이 붙어있는 것을 확인할 수 있다. EDS 결과를 보면 흡착 실험 전과 달리 흡착 실험 후 P가 검출되었다는 것을 확인할 수 있다. 이로써 제강슬래그가 P을 흡착하였다는 것을 알 수 있다.

3.2. 제강슬래그의 인(P) 용출 차단 특성

제강슬래그의 피복 두께에 따른 영향을 알아보기 위해 피복 두께를 각각 0, 1, 3, 5 cm로 달리하였고, P의 초기농도는 10 mg-P/L, 유량은 1 mL/min으로 실험 조건을 설정하여 수행하였다 (Fig. 4). 제강슬래그를 피복하지 않은 조건하에 순수 모래로만 칼럼을 충전 하였을 경우, P의 상대농도가 0.5에 도달하는데 5시간이 걸렸으며, 제강슬래그의 피복 두께가 1, 3, 5 cm로 증가함에 따라서 0.5 C/C₀에 도달하는데 5, 69, 141 시간이 소요되었다. 0, 1, 3, 5 cm로 각각 피복 두께로 설정하였을 때

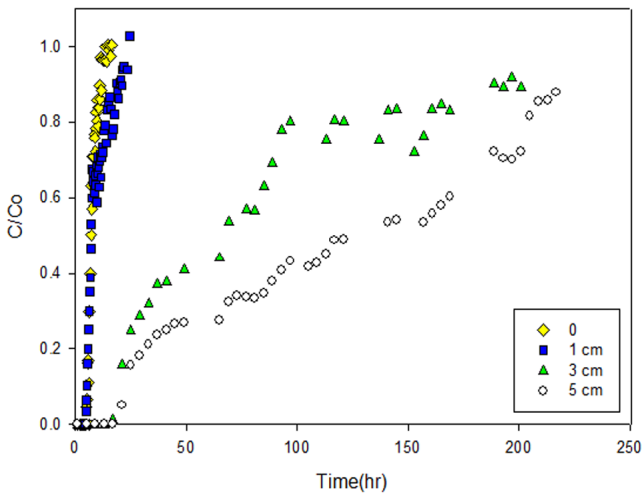


Fig. 4 Bacterial breakthrough curves for phosphorus removal in the steel slag with variations of steel slag depth

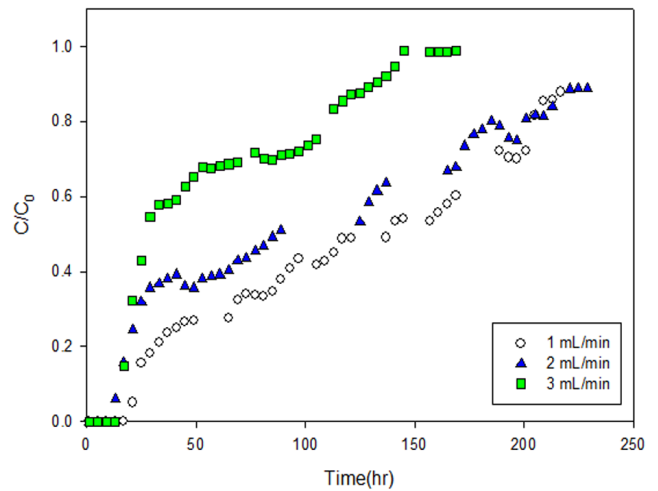


Fig. 9 Bacterial breakthrough curves for phosphorus removal in the steel slag with variations of flow rate

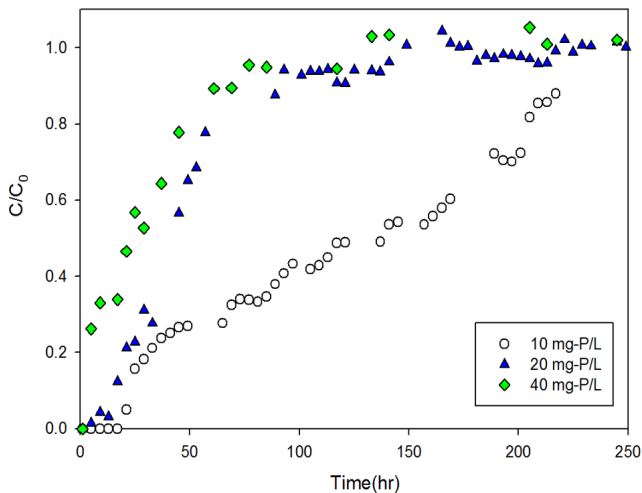


Fig. 5 Bacterial breakthrough curves for phosphorus removal in the steel slag with variations of influent P concentration

완전히 파괴되는데 걸리는 시간은 14, 24, 201, 207 시간이 각각 소요되었다. P의 파괴곡선은 제강슬래그의 피복 두께가 증가함에 따라서 지연되며, 피복 두께가 1 cm와 3 cm의 경우 파괴곡선의 뚜렷한 차이가 나타났다.

유입수 농도에 따른 영향을 알아보기 위해 농도를 각각 10, 20, 40 mg-P/L로 달리하였고, 제강슬래그 피복 두께는 5 cm, 유량은 1 mL/min으로 실험 조건을 설정하여 수행한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 유입수 농도 10 mg-P/L의 경우 상대농도 (Relative Concentration)가 0.5에 도달하는데 141 시간이 소요되었고, 20 mg-P/L의 경우 45시간, 40 mg-P/L의 경우 25시간이 각각 소요되었다. 파괴에 도달하는데 걸리는 시간은 217 시간 (10mg-P/L), 125 시간 (20 mg-P/L), 117 시간 (40 mg-P/L)가

각각 소요되었다. 파괴에 소요되는 시간을 살펴보면 20 mg-P/L와 40 mg-P/L는 큰 차이를 나타내지 않았다.

유입수의 유량에 따른 영향을 알아보기 위해 유량을 각각 1, 2, 3 mL/min로 달리하고, P의 초기농도는 10 mg-P/L, 제강슬래그의 피복 두께는 5 cm로 실험 조건을 설정하여 수행한 칼럼 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 칼럼에 유입되는 유량을 각각 1, 2, 3 mL/min으로 각각하였을 때, 0.5 C/C₀에 도달하는 시간은 각각 141, 89, 29 시간으로 나타났다. 파괴에 도달하는 시간은 1, 2, 3 mL/min 유량의 경우에 대하여 각각 217, 221, 169 시간으로 나타났다.

칼럼 실험 조건에 따른 파괴곡선 분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 제강슬래그의 두께가 증가함에 따라서 (Exp. 1-4), 칼럼에서 P 제거량(q_{total})은 증가하였다. 제거율은 제강슬래그의 두께가 5 cm인 경우, 다른 실험 조건과 뚜렷한 차이를 나타냈다. 파괴곡선과 파괴곡선 분석 결과를 통해 반응성 피복 소재인 제강슬래그가 P 용출을 차단하기 위해서는 피복 두께가 최소 3 cm 이상이 되어야 P 용출 차단 효과가 있으며, 5 cm를 적정 피복 두께로 판단된다.

P 유입 농도에 따른 파괴곡선 분석 결과 (Exp. 4-6), 유입 농도가 증가함에 따라서 제거율은 감소하는 것으로 나타났다. 높은 P 농도에서 제강슬래그의 제거율이 감소하는 결과는 타 연구자의 선행 연구 결과 (Lee et al., 2012)와 일치한다. 이는 평형 흡착 실험 결과 P는 제강슬래그에 단층으로 흡착되기 때문에, 제강슬래그의 P 흡착능은 한정적이다. 따라서 높은 농도에서는 제강슬래그의 P 제거율이 감소하게 된다.

P의 주입 유량에 따른 칼럼 실험 결과 (Exp. 4, 7, 8) 제거율은 주입 유량의 증가에 따라서 제거율이 감소함을 알 수 있다.

Table 4 Column experimental conditions and results

Exp.	Steel slag depth (cm)	Influent concentration (mg/L)	Flow rate (mL/min)	m _{total} (mg)	q _{total} (mg)	Re (%)
1	0	10	1	9.9	4.6	46.7
2	1	10	1	14.7	6.0	40.6
3	3	10	1	120.6	48.1	39.6
4	5	10	1	130.2	76.9	59.1
5	5	20	1	298.8	58.9	19.7
6	5	40	1	607.2	64.5	10.6
7	5	10	2	274.8	125.4	45.7
8	5	10	3	304.2	97.9	32.2

유량의 증가에 따라서 P과 제강슬래그의 접촉 시간이 감소하기 때문이다. 유량 1, 2, 3 mL/min일 때 제강슬래그와의 접촉시간은 각각 30, 15, 10 min으로, 동역학적 흡착 실험 결과 평형에 도달하는데 필요한 시간인 3시간 이상이므로 본 실험 조건에서 유량에 따른 P의 제거율이 다르다. 타 문헌에서도 칼럼에서 오염물질 제거는 유량의 영향을 많이 받으며, 유량이 클 경우 칼럼 길이 또는 흡착제의 깊이를 크게 하여 제거 효율을 높일 수 있다(Han et al., 2008; Park et al., 2012).

IV. 결 론

본 연구에서는 P 용출 차단을 위한 반응성 피복 소재로서 산업부산물인 제강슬래그의 해양저층에서 적용성을 검토하였다. 제강슬래그의 P 평형흡착 결과 단층 흡착을 가정한 모델인 Langmuir model에 잘 부합하였고, 단위 질량당 최대 P 흡착량은 7.134 mg-P/L로 나타났다. 제강슬래그에 존재하는 다량의 Ca, Fe, Al과 같은 원소들이 P과 화합물을 형성하여 제강슬래그의 P 흡착량이 큰 것으로 판단된다. 칼럼 실험 결과 제강슬래그의 피복 두께가 3 cm이상일 경우 P 용출 차단 효과가 나타났다. 5 cm가 P 용출 차단을 위한 적정 피복 두께로 판단된다. P의 유입 농도의 증가에 따라서 P의 제거율이 감소하였으며, 이는 P의 제강슬래그에 단층으로 흡착되어 제강슬래그의 P 흡착능이 한정적이기 때문이다. P 유입 유량에 따른 실험 결과 P 유입 유량이 증가할수록 접촉시간이 감소하여 P의 제거율이 감소하였다. 본 연구 결과 제강슬래그는 해양 저층에서 P 용출 차단을 위한 적정 피복 소재로 판단된다.

이 논문은 2013년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(지속가능 해양오염퇴적물 정화기술 개발).

REFERENCES

- Bae, S. W., S. Y. Han, B. J. Lee, and Y. B. Kwon, 1999. Characteristics of cement based solidification process for municipal solid wastes incineration plant fly ash. *Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society* 16(1): 67-72 (in Korean).
- Claveau-Mallet, D., S. Wallace, and Y. Comeau, 2013. Removal of phosphorus, fluoride and metals from a gypsum mining leachate using steel slag filters. *Water research* 47(4): 1512-1520.
- Daou, T. J., S. Begin-Colin, J. M. Grenèche, F. Thomas, A. Derory, P. Bernhardt, P. Legaré, and G. Pourroy, 2007. Phosphate adsorption properties of magnetite-based nanoparticles. *Chemistry of Materials* 19: 4505-4994.
- Han, R., D. Ding., Y. Xu., W. Zou., Y. Wang, Y. Li, and L. Zou, 2008. Use of rice husk for the adsorption of congo red from aqueous solution in column mode. *Bioresource Technology* 99: 2938-2946.
- Ho, Y. S, and G. McKay, 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry* 34(5): 451-465.
- Jung, G. B., S. I. Kwon, S. C. Hong, M. K. Kim, M. J. Chae, W. I. Kim, J. S. Lee, and K. K. Kang, 2012. Contamination assessment of water quality and stream sediments affected by mine drainage in the Sambo mine creek. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 31(2): 122-128 (in Korean).
- Jung, K. W., C. G. Yoon., I. H. Lww., S. I. Lee., S. M. Kang, and J. H. Ham, 2014. Pollutants release from sediments in estuarine reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56 : 1-9.
- Kang, K., Y. K. Kim, and S. J. Park, 2013. Phosphate removal of aqueous solutions using industrial wastes. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(1): 49-57 (in Korean).
- Kim, K. R., K. Y. Choi, S. H. Kim, and G. H. Hong, 2010. Feasibility of present soil remediation technologies in Korea for the control of contaminated marine sediment: Heavy Metals. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 32(12): 1076-1086 (in Korean).
- Kim, K. R., S. H. Kim, and G. H. Hong, 2012. Remediation technologies for contaminated marine sediments. *Journal of Korean Environmental Dredging Society* 2(1): 20-25

- (in Korean).
11. Lee, C. G., J. A. Park and S. B. Kim, 2012. Phosphate removal from aqueous solutions using slag microspheres. *Desalination and Water Treatment* 44(1-3): 229-236.
 12. Lee, C. G., J. A. Park, and S. B. Kim, 2012. Phosphate removal from aqueous solutions using slag microspheres. *Desalination and Water Treatment* 44: 229-236.
 13. Lee, J. K, 2011. Analysis of fast in-situ treatment technologies for contaminated marine sediment. *Rural Resources* 53: 34-38.
 14. Lee, S. H., and J. H. Cho, 2009. In-situ stabilization of heavy metal contaminated farmland soils near abandoned mine, using various stabilizing agent: Column test study. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment* 14(4): 45-53 (in Korean).
 15. Lindsay, W. L., 1979. *Chemical equilibria in soils*, Wiley, New York.
 16. Pan, G., L. Li. D. Zhao, and H. Chen, 2010. Immobilization of non-point phosphorus using stabilized magnetite nanoparticles with enhanced transportability and reactivity in soils. *Environmental Pollution* 158: 35-40.
 17. Park, K. S, 2011. Capping remediation using steel slag for the treatment of contaminated bottom sediment. *Rural Resources* 53: 22-33.
 18. Park, S. J., C. G. Lee., S. B. Kim., Y. Y. Chang, and J. K. Yang, 2012. Bacterial removal in flow-through columns packed with iron-manganese bimetallic oxide-coated sand. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 47(10): 1364-1371.
 19. Summers, R. S., D. R. U. Knappe, and V. L. Snoeyink, 2011. Adsorption of organic compounds by activated carbon. *In: Water quality and treatment: A handbook on drinking water, 6th Edition*. Edited by J. K. Edzwald. McGraw-Hill.
 20. Sunahara, H., W. M. Xie, and M. Kayama, 1987. Phosphate removal by column packed blast furnace slag—I. fundamental research by synthetic wastewater. *Environmental Technology* 8: 589-598.
 21. U.S. EPA. 1994. *Assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS) Program Remediation guidance*.
 22. U.S. EPA. 1998. *Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program guidance for in-situ subaqueous capping of contaminated sediments*.
 23. Woo, J. H, 2011. Treatment problem and remediation technologies of contaminated marine sediment. *Rural Resources* 53: 14-21.
 24. Xie, W. M., X. C. Zhang., T. Kitaide, and H. Sunahara, 1987. Phosphate removal by column packed blast furnace slag—II. practical application of secondary effluent. *Environmental Technology* 8: 599-608.
 25. Xiong, J., Z. He., Q. Mahmood., D. Liu., X. Yang, and E. Islam, 2008. Phosphate removal from solution using steel slag through magnetic separation. *Journal of Hazardous Materials* 152 : 211-215.
 26. Yang, J., S. Wang., Z. Lu., J. Yang, and S. Lou, 2009. Converter slag-coal cinder columns for the removal of phosphorous and other pollutants. *Journal of Hazardous Materials* 168: 331-337.
 27. Yoon, S. Y., C. G. Lee., J. A. Park., J. H. Kim, S. B. Kim., S. H. Lee, and J. W. Choi, 2014. Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies for phosphate adsorption to magnetic iron oxide nanoparticles. *Chemical Engineering Journal* 236: 341-347.