

해양퇴적물 인 용출에 미치는 pH, 온도, 용존 산소 농도의 영향

천효창* · 남세용** · † 김상현

* 대구대학교 환경공학과 대학원, ** 국립한경대학교 환경공학과 교수, † 대구대학교 환경공학과 교수

Effects of pH, Temperature, and Dissolved Oxygen on Phosphorus Release from Marine Sediment to Seawater

Hyo-Chang Cheon* · Se-Yong Nam** · † Sang-Hyun Kim

* Graduate school, Department of Environmental Engineering, Daegu University, Kyeonbok 712-714, Korea

** Department of Environmental Engineering, Hankyong National University, Gyeonggi-do 456-749, Korea

† Department of Environmental Engineering, Daegu University, Kyeonbok 712-714, Korea

요 약 : 오염 원인 물질의 해양 내 거동에 대한 파악은 환경 변화에 따른 부영양화 등 해양 수질 오염에 대한 예측 및 대응 방안 선정 을 위한 전제 조건이다. 본 연구에서는 부영양화 원인 물질인 인의 해양퇴적물에서 해수로의 용출 특성을 조사하였다. 검토된 환경 조건은 pH 7-9, 온도 10-20℃, 용존 산소 농도(dissolved oxygen, DO) 0.7-7.0 mg/L 였다. 생물학적 요인을 배제한 조건에서 회분식 실험을 통해 구해진 인 용출 자료는 1차 반응식으로 해석되었으며, 환경 조건의 영향은 통계학적 방법을 통해 정량화 되었다. 해양 퇴적물로부터 해수로의 인 용출은 pH와 온도가 높고 DO가 낮을수록 증가하였다. 1차 반응 평형 농도 기준으로 검토된 범위의 pH 증가, 온도 증가, DO 감소는 각각 인 용출을 2-3배 증가시켰다.

핵심어 : 해양퇴적물, 인 용출, 부영양화, pH, 온도, 용존산소

Abstract : Understanding the behavior of pollutants in the marine environment is essential for coping with the marine pollution problems such as eutrophication. In this study, the effects of environmental parameters on phosphorus release from marine sediment to sea water were investigated. The environmental parameters such as pH in the range of 7 to 9, temperature from 10 to 20°C and dissolved oxygen levels (DO) ranging 0.7 to 7.0mg/L were examined. Phosphorus release data were taken from batch tests excluding biotic effects, and analyzed using a first-order kinetic model. The effects of environmental parameters were quantified using a statistical methodology. High pH, high temperature, and low DO increased phosphorus release from the sediment to sea water: pH from 7 to 9, temperature from 10 to 20°C, or DO from 7.0 to 0.7 mg/L magnified the equilibrium phosphorus concentration up to 2~3 times.

Key words : Marine sediment, phosphorus release, eutrophication, pH, Temperature, dissolved oxygen (DO)

1. 서 론

연안은 바다와 육지가 접하고 있는 해역공간이자 내륙과 해양을 잇는 완충지역으로서 해역과 육역의 환경이 상호의존적으로 미치는 특수한 환경대를 이루고 있고, 해양오염정화, 수산물의 산란장과 서식지 제공 등 다양한 생태적 순환이 이루어지는 곳이다(조와 강, 2011). 최근에는 도시화와 산업화로 인해 육상 기원의 오염물질들이 하천이나 대기 등 다양한 경로를 통해 연안으로 과도하게 유입되고, 연안의 폐쇄적인 특성으로 해수교환에 제한을 받아 연안 인근 해역에 부영양화 등의 환경 문제가 발생하고 있다(김과 박, 1998; 김 등, 2002; 김 등 2006; 이 등 2009). 또한 육상에서 유입되거나 부영양화 과정에서 생성된 오염물질이 해저에 침전하여 형성된 오염 퇴적물은

저서생물 등 해양생물에 만성 또는 급성 독성을 포함한 악영향을 미치며, 먹이사슬에 따라 상위 생태계 파괴, 생물농축 등 해양환경에 문제를 유발하고 있다(이 등, 2008; 나, 2004).

퇴적된 오염물질 중 환경적으로는 질소, 인과 같은 영양염류와 중금속, 특정 유기화합물질 등이 주 관심대상으로서 퇴적층의 산소 농도, 온도, pH 등 환경 조건 변화에 따라 수증으로 용출될 수 있다(Lee·Lee, 2000). 퇴적물은 성상과 환경조건에 따라 수질에 미치는 영향이 다르므로 그 정도에 따라 수질관리 및 대처방안도 달라져야 한다. 그 기초가 되는 자료는 영양염류의 용출관련 농도 및 용출율(용출속도)이며 해역의 주변 환경조건과의 연관성을 찾으면 해당해역의 수질관리가 보다 용이해질 것이다.(조 등, 2011).

해양의 영양물질 중 하나인 인은 해양에서 매우 중요한 생

† 교신저자 : 연희원, sanghkim1@daegu.ac.kr 053)850-6691

* 연희원, bluesky2497@hanmail.net 053)850-4475

** 연희원, namsy@hknu.ac.kr 031)670-5177

물순환의 한 부분을 차지하고 있으며 영양소 인의 중요성 때문에 바다 안에서의 인의 저장소와 그 근원에 대한 정량화를 위해서 여러 가지 방법들을 이용한 연구가 시도되어 왔다 (Ingall et al., 1990; Carman et al., 2000). 해양퇴적물은 이러한 해양의 인의 가장 중요한 저장소의 역할을 하며 많은 인들이 해양퇴적물의 광물들과 함께 유기인 및 무기인의 형태로 공존하고 있다. 특히 유기인의 경우 어느 정도의 속성작용이 일어나는 동안에도 분해에 저항력이 있으며 이러한 유기화합물의 매장이 인의 저장소로서 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 왔다(Ingall et al., 1990). 퇴적물 내의 인이 퇴적물로부터 수층으로 이동하는 것에는 여러 가지 작용이 복합적으로 작용한다(Ryding and Forsberg, 1977; Hakanson and Jansson, 1983; Böstrom et al., 1983). 그러나, 해양퇴적물 중 인의 용출에 미치는 환경 영향은 아직까지 알려진 것이 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 pH, 온도, dissolved oxygen (DO) 등의 환경 조건이 연안 부영양화 유발 물질인 인의 퇴적물에서 해수로의 용출에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 퇴적물 및 해수

퇴적물 및 해수는 서해 연안에서 채취하였으며, 퇴적물은 간조 시 표층 10 cm 이내, 해수는 만조 시 해수면 50 cm 이내에서 채취하였다. Table 1에 해수 및 퇴적물 특성을 나타내었다. 한편, 해당 연안 해역의 수질 관련 통계자료(국가해양환경통합정보시스템, 1997~2011)에 따르면 평균 pH는 7.4~8.4이며, 수온은 2, 5, 8, 11월 각각 평균 3, 14, 24, 16℃, DO는 평균 최소 5.3 mg/L, 최대 12.7mg/L이다.

본 연구에 사용된 해수의 총인 농도는 해역별 수질기준의 III 등급에 해당되어 매우 오염된 상태라 할 수 있다(국토해양부, 2008). 한편, 퇴적물에 함유된 인의 농도나 존재형태는 수중 생태계에서 인의 농도를 결정하는데 매우 중요한 요인이다(Williams et al., 1976). 퇴적물에 함유된 인은 일반적으로 미립자의 표면에 흡착된 인(adsorbed P; Ads-P), 철이나 알루미늄 등과 착물을 이룬(nonapatite inorganic phorus; NAI-P), 인회석과 같은 광물에 포함된 인(apatite P; A-P) 유기물과 관련되어 있는 인(residual P; R-P), 등으로 분류된다(전과 박, 1989). Williams et al. (1976)이 제안한 방법에 따라 실험에 사

용된 퇴적물을 분석한 결과 A-P, R-P, Ads-P, NAI-P의 순으로 인이 분포하고 있는 것으로 파악되었다.

2.2 용출실험 방법

본 연구에서는 계절에 따른 수온 차이로 인해 용출 특성이 변화하는 것을 고찰하기 위해 10, 15, 20℃에서 인의 용출 특성을 파악하였다. pH의 경우 해당 해역에서 최소 6.1, 최대 8.9로 보고됨에 따라, pH 7.0±0.5, 9.0±0.5 에서 용출 특성을 분석하였다. DO는 대체로 5 mg/L 이상인 것으로 보고되나, 서해 연안 일부 해역의 DO가 2 mg/L 이하인 것으로 보고되고 있고, 퇴적층의 DO는 해역 평균보다 낮을 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 7±1 mg/L와 0.7±0.1 mg/L를 각각 호기와 혐기 조건으로 설정하여 실험을 수행하였다.

용출실험은 1 L LDPE bottle(Nalgene, USA)에 해수 800 mL, 오염퇴적물 200 g, chloroform 10 mL를 주입하고, 이를 shaking incubator(두리과학, DF-94F model)에서 100 rpm으로 교반하면서 실시하였다. 호기조건 실험에서는 12시간 air purging 한 해수를 사용하였으며, 혐기조건 실험은 해수를 4시간 N₂ purging한 후 수행하였다.

샘플링은 실험 시작 후 1, 2, 6, 12, 24, 48, 72시간이 경과하여 실시하였으며, 모든 경우에 있어 직후 1분 이하의 시간 동안 알칼리 주입, 폭기, N₂ sparging 등을 통해 pH, DO 농도를 원하는 수준으로 조절하였다. 채취한 시료는 즉시 2,000 rpm 조건에서 원심분리(hanil, 514R model) 후 분석하였다. 해수 분석 항목은 pH, 온도, DO, 인산 인이며, pH는 thermo orion사(USA)의 420 model을 사용하였고, DO는 Hanna사(Italia)의 HI 9828 model을 사용하였다. 인산 인은 해양환경공정시험법에 따라 측정하였다.

2.3 인산 인 용출 해석

용출에 따른 해수 내의 시간 별 인산 인 농도는 아래의 일차식을 통해 묘사되었다. 식 (1)에서 C 는 시간 별 용출 농도($\text{PO}_4\text{-P}$ mg/L), C_{eq} 는 평형 용출 농도($\text{PO}_4\text{-P}$ mg/L), t 는 시간(hr), k 는 일차 반응 속도 상수(hr^{-1})를 나타낸다.

$$\frac{dC}{dt} = k(C_{eq} - C) \quad (1)$$

식(1)을 통해 도출된 동력학적 상수에 pH, 온도, DO가 미

Table 1 Characteristics of sea water and sediment

Sea water					
pH	T-P (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	T-N (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	
8.12	0.08	0.02	0.71	1.1	
Sediment					
Ignition loss (%)	T-P (mg/kg.wet)	Ads-P (mg/kg.wet)	NAI-P (mg/kg.wet)	A-P (mg/kg.wet)	R-P (mg/kg.wet)
54.1	785 (100 %)	97 (12 %)	45 (6 %)	315 (40 %)	328 (42 %)

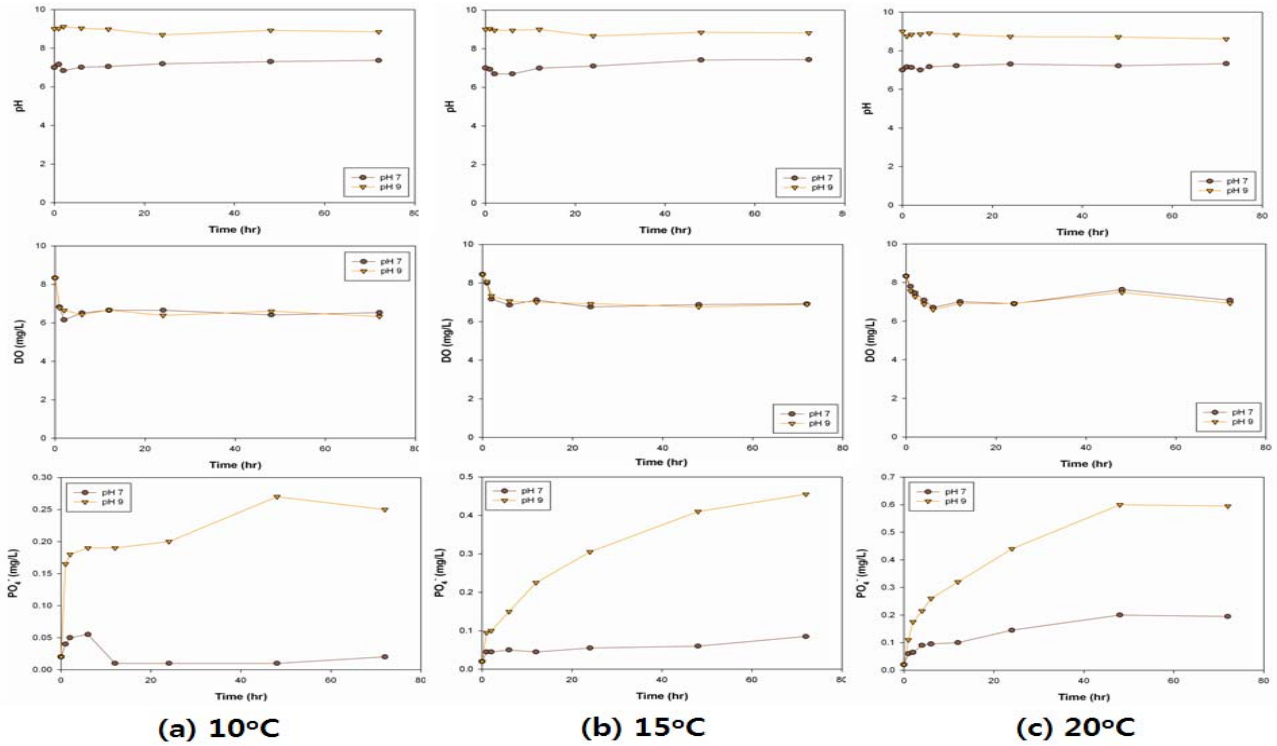


Fig. 1 pH, DO, and PO_4 -P profiles in aerobic conditions ($DO\ 7\pm1\ mg/L$)

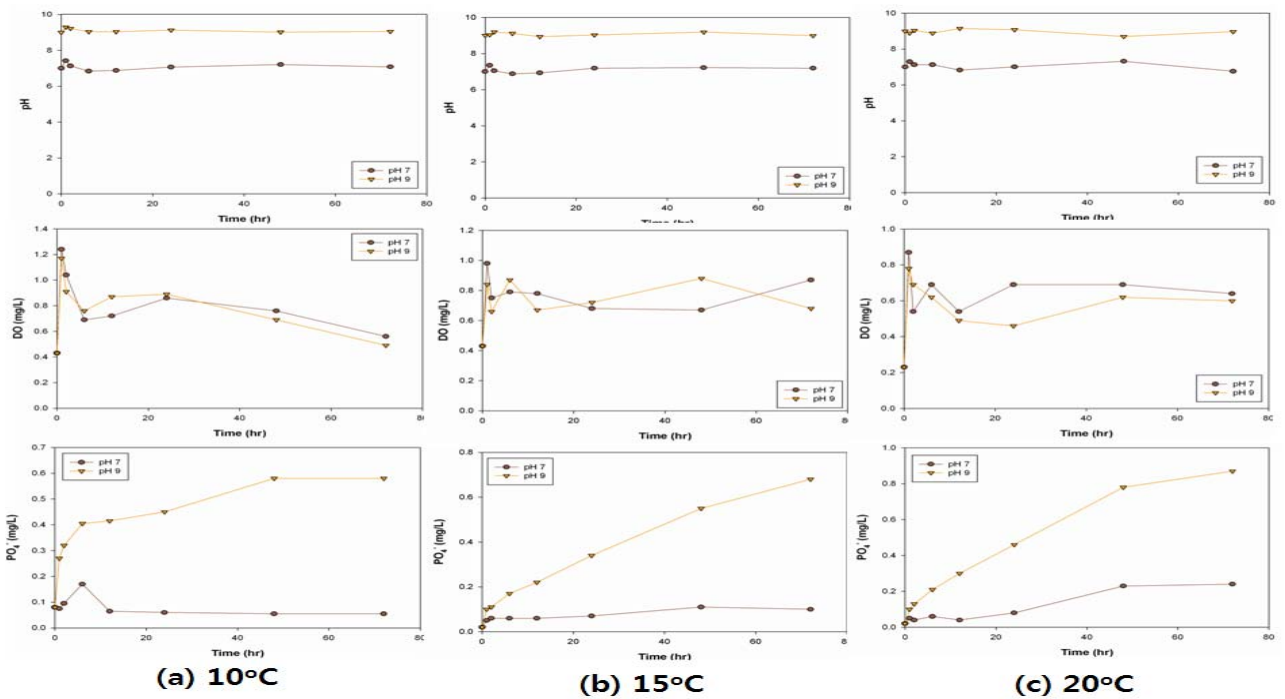


Fig. 2 pH, DO, and PO_4 -P profiles in anaerobic conditions ($DO\ 0.7\pm0.2\ mg/L$)

치는 영향은 독립 변수의 여러 조건에서 실험을 수행하여 자료를 얻은 후 Design-Expert 7.1 (Star-Ease, Inc.)을 사용하여 독립변수의 변화에 다른 반응변수의 변화 정도를 분석하여 반응변수를 최소화하는 독립변수의 수준조합을 찾아내어 다음

과 같은 상호작용을 고려한 선형 회귀 분석식을 도출하였다. 식 (2)에서 y 는 동력학 상수(C_{eq} 또는 k), x_1 은 pH, x_2 는 온도 ($^{\circ}C$), x_3 는 DO (mg/L), β 는 각 항에 대한 회귀분석 계수를 의미한다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{13} x_1 x_3 \quad (2)$$

다시 선형 회귀 분석을 통해 해석하였다. 먼저, 평형 용출 농도에 대해 고찰한 결과, Table 3에 도시한 바와 같이 본 연구에서 검토된 환경 조건과 유의미하게 연관이 있으며, 식 (2)와 같이 환경 조건들 간의 상호작용을 고려한 선형 모델(2FI)이 가장 적합한 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도, pH, DO에 따른 인산 인 용출 특성

Fig. 1, 2에 온도, pH, DO 변화에 따른 pH, DO, 인산 인 농도 변화를 나타내었다. 모든 실험 조건에서 샘플링 직후 1분 이내의 조절 과정을 통해 pH와 DO가 원하는 수준으로 유지되었다.

호기 조건에서는 온도가 높아질수록 인산 인 용출이 많이 진행되는 것으로 나타났다. pH에 따라서는 pH 9 조건이 pH 7에 비해 용출이 용이하게 진행되었다.

혐기조건에서의 인산 인 용출 특성은 호기 조건과 유사하게 온도와 pH가 높을수록 용출 농도가 높게 분석되었으며, pH 7 조건에서는 온도 변화에 따른 용출 특성 변화가 미미한 것으로 파악된다. 또한, 전체적으로 혐기 조건이 호기 조건에 비해 용출 농도가 0.2 mg/L 이상 높게 관찰되었다.

3.2 인산 인 용출의 동력학적 분석

인의 용출은 일반적으로 1차 반응으로 해석된다(김 등, 2005). 본 연구에서도 식 (1)의 1차식을 사용하여 퇴적물에서 해수로 유기인의 용출 농도 및 용출 속도를 도출하였다.

Table 2에 1차식 모사 결과를 나타내었으며, 대부분 조건에서 R^2 값이 0.90이 넘어 1차식을 이용한 해석이 타당한 것으로 사료된다. 도출된 1차식 파라미터, 즉 평형 용출 농도와 반응 속도 상수에 미치는 해수 환경 조건 (pH, 온도, DO)의 영향을

Table 2 Equilibrium concentrations and first-order rate constants for phosphate release from marine sediment to seawater at different pH values, temperatures, and dissolved oxygen levels

Condition		C _{eq} (mg/L)	k (mg/hr)	R ²
Aerobic (DO 7 mg/L)	pH 7 (10℃)	0.0551	0.8933	0.9989
	pH 9 (10℃)	0.1918	1.7748	0.9946
	pH 7 (15℃)	0.0828	0.0691	0.9079
	pH 9 (15℃)	0.4701	0.0416	0.9876
	pH 7 (20℃)	0.2045	0.0480	0.9478
	pH 9 (20℃)	0.6080	0.0575	0.9737
Anaerobic (DO 0.7 mg/L)	pH 7 (10℃)	0.1734	0.2127	0.9031
	pH 9 (10℃)	0.5117	0.2662	0.8613
	pH 7 (15℃)	0.1111	0.0349	0.8149
	pH 9 (15℃)	0.9548	0.0163	0.9911
	pH 7 (20℃)	0.3203	0.0160	0.9393
	pH 9 (20℃)	1.0761	0.0232	0.9921

Table 3 Model summary statistics for the effects of pH, temperature, and DO on the equilibrium concentration for phosphate release from marine sediment to seawater

Fit tests					
Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F
Mean vs Total	1.89	1	1.89	—	—
Linear vs Mean	1.08	3	0.36	15.77	0.0010
2FI vs Linear	0.15	3	0.049	6.56	0.0348
Quadratic vs 2FI	3.896	1	3.896	0.042	0.8469
Cubic vs Quadratic	0.031	3	0.010	1.95	0.4744
Residual	5.367	1	5.367	—	—
Total	3.16	12	0.26	—	—
Model summary statistics					
Source	Std. Dev.	R-squared	Adjusted R-squared	Predicted R-squared	PRESS
Linear	0.15	0.8553	0.8011	0.6737	0.41
2FI	0.086	0.9707	0.9355	0.8271	0.22
Quadratic	0.096	0.9710	0.9203	0.7502	0.32
Cubic	0.073	0.9958	0.9534	0.0855	1.16

Table 4 Model summary statistics for the effects of pH, temperature, and DO on the first-order rate constant for phosphate release from marine sediment to seawater

Fit tests					
Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F
Mean vs Total	0.99	1	0.99	–	–
Linear vs Mean	1.64	3	0.55	3.03	0.0930
2FI vs Linear	0.72	3	0.24	1.68	0.2846
Quadratic vs 2FI	0.37	1	0.37	4.19	0.1102
Cubic vs Quadratic	0.32	3	0.11	3.57	0.3668
Residual	0.03	1	0.03	–	–
Total	4.08	12	0.34	–	–
Model summary statistics					
Source	Std. Dev.	R-squared	Adjusted R-squared	Predicted R-squared	PRESS
Linear	0.42	0.5322	0.3568	-0.0956	3.38
2FI	0.38	0.7673	0.4880	-0.4360	4.43
Quadratic	0.30	0.8863	0.6872	-0.1309	3.49
Cubic	0.17	0.9903	0.8931	-1.0987	6.47

도출된 식을 식 (3)에 표기하였다. 모델의 p값과 R²값은 각각 0.0348(판정기준 : > 0.05)과 0.9707로 높은 유의성을 보였다.(Table 3 참조)

$$\begin{aligned} \text{인산 인 평형 용출 농도(PO}_4\text{-P mg/L)} = & -0.67313 \quad (3) \\ & + 0.085063x_1 - 0.10049x_2 + 0.19055x_3 \\ & + 0.017108x_1x_2 - 0.026728x_1x_3 - 1.15635x_2x_3 \end{aligned}$$

본 실험에서 사용한 해수를 채취한 해역의 평균 pH, 온도, DO를 기준으로, 각 환경 조건의 변화에 따른 퇴적물로부터의 인산 인 평형 용출 농도의 변화를 Fig. 3에 도시하였다. DO가 낮고 온도와 pH가 높을 수록, 평형 용출 농도가 확연히 증가하는 경향을 보였다. pH 증가 (7.0→9.0), 온도 증가 (10 → 20℃), DO 감소 (7 → 0.7 mg/L)는 각각 인산 인 평형 용출 농도를 2-3 배 증가시켰다.

한편, 용출 속도는 회귀 분석 결과 상호작용을 고려하지 않은 선형회귀(Linear) 모델이 가장 적절한 것으로 나타났다. 그러나 도출된 모델의 p값과 R²값이 각각 0.0930, 0.5322로 유의성 기준을 만족하지 못하여, 본 연구에서 검토된 pH, 온도, DO 범위에서는 환경 조건과 특별한 상관관계를 갖지 않는 것으로 나타났다.

일반적으로 인의 용출은 생물학적, 또는 비생물학적 요인에 의해 영향을 받는다(조 등, 2011). 본 연구에서는 해수 내 chloroform 주입으로 미생물 활동이 배제되었으므로, pH, 온도, DO의 변화가 비생물학적 요인으로 인 용출에 영향을 미친 것으로 판단된다. 환경 조건에 따른 퇴적물 내 인의 비생물학적인 용출 변화는 일반적으로 퇴적물과 결합한 인의 용출 특

성 변화로 설명된다(Bostrom et al., 1983). pH의 증가는 퇴적물 내 흡착 부위가 인산 인 대신 하이드록실기와 결합하게 하여 인 용출을 증대 시킨다(Derrick and Kin, 2009). 온도의 증가 역시 인 분자의 운동에너지를 증가시켜 퇴적물과의 흡착을 방해한다(Christophoris and Fytianos, 2005). 조 등(2011)은 DO의 감소가 퇴적물의 산화-환원 값을 낮추고 이로 인해 퇴적물 표면의 안정한 구조를 취하던 다원자의 금속 이온들이 환원 상태에서 인과의 결합이 해체된다고 보고한 바 있다.

4. 결 론

해양퇴적물에 함유된 인이 해수로 용출될 경우 부영양화의 원인 물질로 작용한다. 인이 퇴적물에서 수계로 이동하는 현상에는 pH, 온도, DO 등 환경 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 알려져 있으나, 해양 퇴적물과 해수 간의 이동에 대한 과학적 정보는 극히 제한적이다. 본 연구에서는 생물학적 영향을 배제한 상태에서 해양 퇴적층의 pH, 온도, DO변화에 따른 부영양화 물질인 인의 해수로의 용출 특성을 고찰하였으며, 이를 동력학, 통계학적으로 해석하였다. 퇴적물에서의 인 용출은 1차 반응으로 해석되며, 평형 용출 농도는 pH, 온도, DO 농도에 따라 통계학적으로 선형적 정량관계에 있는 것으로 나타났다. pH 증가 (7.0→9.0), 온도 증가 (10 → 20℃), DO 감소 (7 → 0.7 mg/L)는 각각 인산 인 평형 용출 농도를 2-3 배 증가시켰다. 해역 내 환경 조건 변동에 따른 해양퇴적물의 부영양화 유발 특성에 대한 본 연구의 결과는 향후 해역 수질 개선 방안 수립, 해양 퇴적물 정화 필요성 평가, 해양 퇴적물 정화 기술 선정/설계/시공에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(지속가능 해양오염퇴적물 정화기술 개발). 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 국가해양환경통합정보시스템, 1997~2011년 평균, <http://www.meis.go.kr>.
- [2] 김덕찬, 배재호, 문경환(2005), "환경화학", 동화기술, pp. 94.
- [3] 김도희, 박청길(1998), "특량만 퇴적물로부터 영양염 용출 평가", 한국환경과학회지, 7(4), pp.425-431.
- [4] 김순오, 정영일, 조현구(2006), "삼산제일·삼본 동광산 주변 수계의 중금속 오염도 평가", 한국광물학회지, 19(3), pp.171-187.
- [5] 김창제, 김미금, 손창배, 강성진(2002), "당항만의 해수유동에 관한 연구", 한국항해항만학회지, 26(2), pp.227-233.
- [6] 나춘기(2004), "목표연안 갯벌 acl 서식생물에서의 중금속 함량", 자원환경지질, 37(3), pp.335-345.
- [7] 이준기, 김석구, 송재홍, 이태운(2009), "부산시 하천퇴적물의 유기 오염도 평가", 대한환경공학회지, 31(11), pp. 975-982.
- [8] 이찬원, 전홍표, 하경애(2008), "마산만 오염 준설토사의 생태회복", 한국환경과학회지, 17(1), pp.29-36.
- [9] 전상호, 박용안(1989), "소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출가능성에 대하여", 한국육수학회, 22(3), pp. 261-271.
- [10] 조대철, 이은미, 박병기, 권성현(2011), "퇴적물의 영양염류 용출과 호기적 조건과의 상관성 분석", 한국환경과학회지, 20(7), pp.845-855.
- [11] 조우정, 강신범(2011), "해양레저이벤트의 경제적 파급효과 분석", 한국항해항만학회지, 35(5), pp.412-421.
- [12] 국토해양부고시(2008), 해역별 수질등급기준. p. 1.
- [13] Boström, B., Jansson, M. and Forsberg, C.(1983), "Phosphorus release from lake sediment", Arch. Hydrobiol. Beih, 18, pp.5-59.
- [14] Carman, R., Edlund, G. and Damberg, C.(2000), "Distribution of organic and phosphorus compounds in marine and lacustrine sediment: a ^{31}P NMR study", Chem. Geol., 163, pp.101-114.
- [15] Christophordis, C. and Fytianos, K.(2005), "Study of conditions affecting the release of phosphorus from the top sediments of two lakes of NORTHERN GREECE", proceeding of the 9th international conference on environmental science and technology, pp.A-225-229.

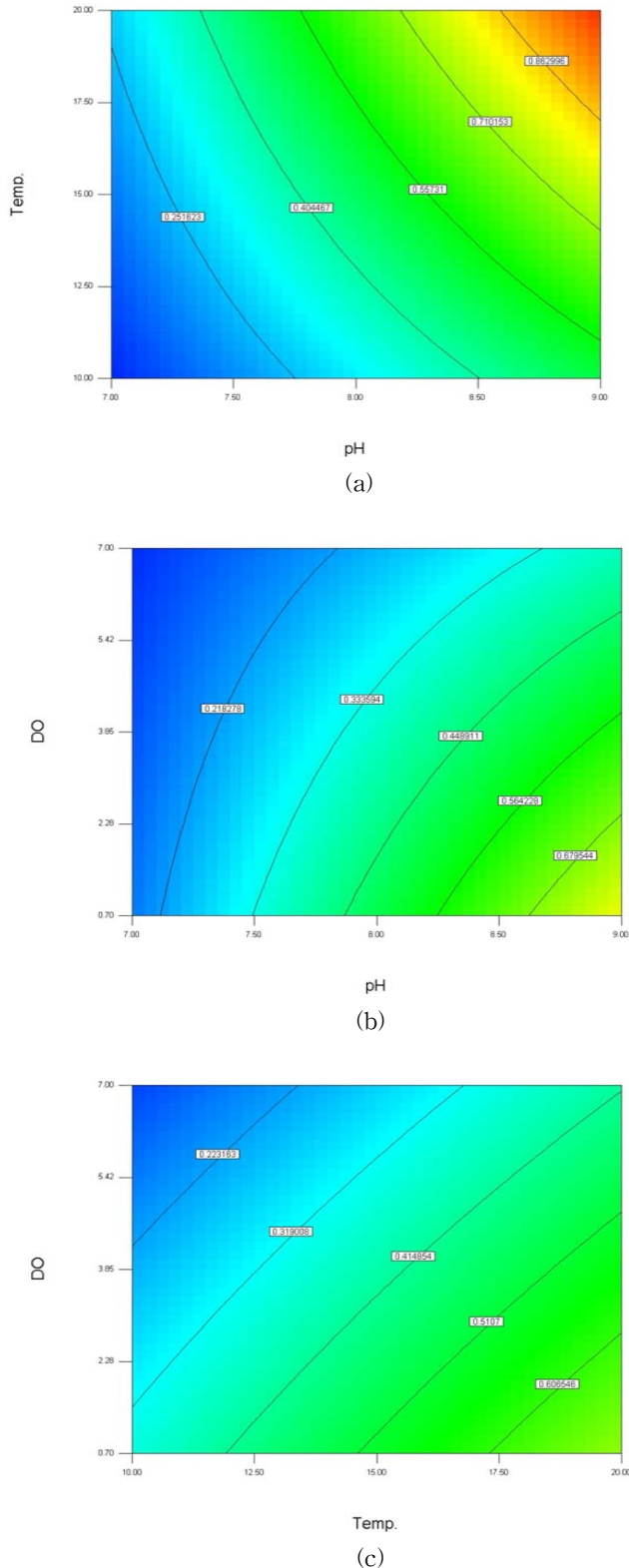


Fig. 3 Contour lines of constant equilibrium concentration for phosphate release from marine sediment to seawater ($\text{PO}_4\text{-P}$ mg/L) versus (a) pH and temperature at DO 2.0 mg/L, (b) pH and DO at 14°C , and (c) temperature and DO at pH 8.0

- [16] Derrick, Y.F.Lai, and Kin, C.L.(2009), "Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff", *Ecological engineering*, 35, pp.735-743.
- [17] Hakanson, L. and Jansson, M.(1983), "Principles of lake sedimentology", Springer-Verlag, Berlin, pp.316.
- [18] Ingall, E.D., Schroeder, P.A., and Berner, R.A.(1990), "The nature of organic phosphorus in marine sediment: New insights from ^{31}P NMR", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54, pp.2617-2620.
- [19] Lee, Y.S. and Lee, K.S.(2000). "A study on release characteristics of sediment and its impacts on water quality in Daechong Dam reservoir, Kor. *Sci. Environ. Impact Assess.*, 9(2), pp.99-107.
- [20] Ryding, S.O. and Forsberg, C.(1977), "Sediments as a nutrient source in shallow lake", InGolterman H.L. (ed.), *Interactions between sediments and freshwater*, Junk, The Hague, pp.227-234.
- [21] Williams, J.D.H., Jaquet, J.M. and Thomas, R.L.(1976), "Forms of phosphorus in the surficial sediments of lake Erie", *J. Fish. Res. Board Can.*, 333, pp.413-429.

원고접수일 : 2012년 6월 25일
심사완료일 : 2012년 8월 16일
원고채택일 : 2012년 8월 16일