

## 혐기성 퇴적물에서 석회석이 인산염용해에 미치는 영향

김학성<sup>†</sup> · 박주현

충북대학교 환경공학과

## Effects of Limestone on the Dissolution of Phosphate from Sediments under Anaerobic Condition

Hag Seong Kim<sup>†</sup> · Juhyun Park

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 17 October 2006, Accepted 28 November 2006)

### Abstract

This paper describes a study on the role of limestone which might affect the dissolution of phosphates when phosphate containing sediments are put under anaerobic conditions. A small quantity of calcium hydroxy-apatite, alone or mixed with limestone powder, was put in contact with aqueous solution of acetic acid or carbonic acid, and variations of phosphate concentration were determined time dependantly. The results showed that the concentration was remarkably low in the presence of limestone, signifying that the coexistence of limestone suppresses the dissolution of phosphate by organic acid and/or carbonic acid. Separate experiments conducted by developing an anaerobic condition, after mixing lake sediments with dried leaves and limestone, showed that the existence of limestone suppressed the dissolution of phosphate. These results show that the application of limestone might be a useful measure to prevent deterioration of water quality originated from eutrophication by inhibiting the internal loading of P in eutrophic water-bodies.

**keywords** : Anaerobic condition, Dissolution of phosphates, Eutrophication, Limestone, Sediments

### 1. 서론

수화현상이란 녹조류가 호수의 부영양화로 인해 수표면을 뒤덮을 정도로 과대번식하는 현상을 뜻한다. 수화현상이 발생하면 물이 나쁜 냄새와 맛을 띠게 되어 물의 경제적인 이용을 어렵게 한다(Wu, 1999; Herath, 1997; Hayes et al., 1989). 또한 밤에는 물고기와 같은 수중생물이 필요로 하는 용존산소를 고갈시킴으로서 물고기의 집단 폐사를 초래하기도 한다(Lansberg, 2002). 이는 가두어진 수체 즉 호수 또는 저수지와 같은 수체에서 오랜 시간이 경과하면 나타나는 현상이다. 또한 육지 인근 해역에서 볼 수 있는 적조 현상도 해당해역의 부영양화의 결과로 나타나는 현상이다(Edwards et al., 2003; Carstensen et al., 2005).

이 같은 부영양화를 방지하기 위해서 하폐수처리장 방류수의 인과 질소 함량을 법적으로 규제하고 있고, 이러한 법적규제에 따르기 위해서 탈인공정 또는 탈질공정과 같은 고도처리공정이 하폐수처리공정의 일부분으로 자리잡고 있는 현실이다(Owens et al., 1968; Converti et al., 1993; Wang et al., 2006; Voorthuizen et al., 2005). 그러나 하폐수처리장의 방류수가 법적 기준치를 만족시킨다고 해도 이는 부영양화에 도달하는 시간을 지연시킬 뿐이고 오랜 시

간이 지나면 결국 강과 호수는 부영양화를 피할 수 없다.

부영양화를 방지하기 위한 인위적인 노력으로는 인의 고정이 중요하다. 왜냐하면 자연중에는 공기중에 존재하는 질소를 고정하여 수중으로 유입시키는 메카니즘이 있기 때문이다. 인이 호소의 생태계로 유입되는 경로는 크게 유입수에 섞여 유입되는 것과 퇴적물로부터의 용출에 의하여 수생태계로 유입되는 것으로 구분된다(Sondergaard et al., 2001). 퇴적된 인성분이 호수내 녹조류에 의해서 활용되지 않도록 할 수 있다면 수화현상은 그만큼 일어나기 어려워질 것이다.

호수의 인성분은 주로 녹조 또는 무기질 입자에 흡수 또는 흡착된 상태인 부유물질로 존재한다. 이러한 부유물질은 호소바닥에 퇴적되고 퇴적층 내 혐기성 상태에서 인이 재용출하여 녹조류의 성장에 이용될 수 있다. 이 같은 이유로 부영양화된 호수에서는 질소와 인성분의 유입을 줄인다고 해도 수화현상의 발현을 곧바로 방지하기 어렵다. 인의 용출문제를 해결하기 위해서 여러 가지 방법이 고안되고 연구되었다. 그 같은 노력의 일환으로 호수에 황산알루미늄과 석회와 같은 약품을 살포하기도 한다(Reitzel et al., 2006; Dittrich et al., 2002; Zhang et al., 1996).

호수바닥의 저니에서는 용존산소의 공급이 어려워 혐기성박테리아의 활동이 활발하며, 침적된 유기물질이 혐기성 분해를 함으로서 유기산이 생성되고 더 나아가서는 탄산가

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kimhags@chungbuk.ac.kr

스와 메탄가스를 발생시키기도 한다(Kusel et al., 1999; Miyajima et al., 1997). 이 유기산과 탄산이 저니 pH를 낮추어 저니에 함유된 염들로부터 특정성분의 용해도에 변화를 줄 수 있다. 퇴적층으로부터 인의 용출은 혐기성분위에서 유기물질의 분해로부터 발생하는 유기산과 탄산가스에 의해 촉진될 것이다. 따라서 이와 같은 산성물질을 중화시킨다면 인의 용출이 감소할 것으로 기대할 수 있다(Jin et al., 2006).

본 연구에서는 석회석의 존재 하에서 저니로부터 인성분의 용출이 억제될 수 있다는 것을 증명하고자 하였다. 이를 위해서 유기산과 탄산에 의한 난용성 인산염인 칼슘 하이드록시 아파타이트로부터 인의 용출이 석회석의 존재 유무에 따라 어떻게 변화하는가를 실험을 통해서 밝히고, 나아가 자연에서의 실제상황을 모의한 실험을 통하여 인 용출을 억제하는 석회석의 효과를 설명하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 석회석이 인산염의 용출에 미치는 영향

유기산 또는 탄산에 의한 인산염의 용출이 석회석의 존재여부에 따라 어떠한 영향을 받는가를 규명하기 위해서 네가지 조합으로 상온에서 용출실험을 하였다. 첫째로 인산염 0.01 mol을 비이커에 넣고 0.001 M 아세트산 1 L를 가한 후 자석젓개로 저어주면서 시간이 경과함에 따른 인산이온농도와 알칼리도를 측정하였다. 이를 위해서 정해진 시간 간격에 따라 비이커내의 시료 50 mL를 채취하여 기공이 0.45  $\mu\text{m}$ 인 여과지를 통해 진공여과 후 여액을 분석에 사용하였다. 둘째는 증류수를 가하기 전에 석회석분말 0.01 mol을 가한 것이 첫째 실험과의 차이점이다. 셋째와 넷째는 각각 첫째 실험과 둘째 실험에서 아세트산을 탄산으로 바꾸어 실험하였다. 이 경우 인산염 0.01 mol을 증류수 1 L에 넣고 이를 탄산과 접촉시켰다. 탄산의 경우 1기압의 탄산가스를 5 L/min의 유량으로 흘려 넣으면서 시간에 따른 인의 농도변화를 결정하였다. 인산염으로는 열역학적으로 가장 안정한 형태로 알려진 칼슘 하이드록시 아파타이트를 택하였다(Koutsopoulst, 2001). 실험에 사용한 칼슘 하이드록시 아파타이트와 석회석은 SIGMA 회사로부터 구매하였다. 이상의 실험조건을 종합하면 Table 1과 같다.

### 2.2. 알칼리도가 칼슘이온과 인산이온의 거동에 미치는 영향

칼슘이온과 인산이온이 반응하여 칼슘인산염을 형성할

때 알칼리도의 영향을 알아보기 위해 다음과 같은 실험을 행하였다. 즉  $\text{CaCl}_2$ 와  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 를 증류수에 녹여 그 농도가 각각 0.03 M과 0.02 M이 되도록 조절된 5개의 시료에  $\text{NaHCO}_3$  분말을 취하여  $\text{HCO}_3^-$ 의 농도가 0, 0.01, 0.02, 0.03, 그리고 0.04 M이 되도록 가한 후 잘 저어주고 24시간 정치한 후 생성된 침전물을 기공이 0.45  $\mu\text{m}$ 인 멤브레인 여과지를 이용 제거하고 여액 중 칼슘이온과 인산이온 그리고 알칼리도를 각각 이온크로마토그래피(DX-100, DIONEX)와 적정법으로 결정하였다(APHA, 1992).

### 2.3. 혐기성조건 모의실험

혐기성조건에서 석회석의 존재가 유기물 분해에 따른 인산이온의 용출에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다. 우선 낙엽을 채취하여 건조한 후 분쇄기를 이용하여 낙엽분말을 만들었다. 대청호 바닥의 저니를 채취한 후 젖은 상태의 저니 2 Kg을 단독, 저니 2 Kg에 낙엽분말 20 g을 섞은 것, 저니 2 Kg에 낙엽분말 20 g과 석회석 1 g을 혼합한 것, 그리고 저니 2 Kg에 낙엽분말 20 g과 석회석 1 g을 혼합한 것 네가지로 구분하여 각각 원통형 용기에 담은 후 윗부분을 호수물 1.8 L로 채우고 마개를 하여 공기와의 접촉을 차단하였다(Fig. 1). 원통형 용기의 내경, 유효공간의 높이, 저니층의 두께는 각각 10.5, 30, 그리고 8 cm 정도이었고 낙엽분말과 석회석을 혼합시킨 저니층의 두께는 상부에서 5 cm 정도였다. 마개에 구멍을 뚫고 튜브를 연결하여 발생하는 가스를 수상치환으로 포집하고 매일 한차례 정해진 시간에 그 부피변화를 측정하여 기록하였다. 30일이 경과한 후 상정수를 채취하여 pH를 측정하고 진공여과 후 경도, 알칼리도와 인의 농도를 결정하였다.

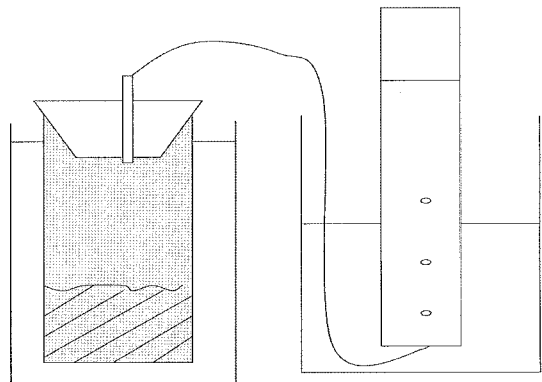


Fig. 1. Schematic representation of the experimental system simulating an anaerobic condition.

Table 1. Experimental conditions

Run	Phosphate salt	Limestone	Acid
1	$\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$ 0.01 mol	None	[Acetic Acid]=0.001 M
2	$\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$ 0.01 mol	0.01 mol	[Acetic Acid]=0.001 M
3	$\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$ 0.01 mol	None	Carbonic acid
4	$\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$ 0.01 mol	0.01 mol	Carbonic acid

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. 아세트산에 의한 인산칼슘의 용출과 석회석의 영향

0.001 M 아세트산 용액 1 L에 칼슘하이드록시아파타이트 0.01 mol을 가지고 여기에 CaCO<sub>3</sub>를 0.01 mol 가한 계와 그렇지 않은 계에 대해서 교반시간에 따른 알칼리도와 인의 농도변화를 측정된 결과를 각각 Fig. 2와 3에 나타내었다. 석회석이 공존하는 경우 알칼리도는 대략 80 mg/L as CaCO<sub>3</sub>정도이고 인의 농도는 대략 1 mg/L 정도 용출되는 것으로 나타났다. 반면에 석회석이 없는 경우에는 알칼리도는 대략 34 mg/L as CaCO<sub>3</sub>정도이고 인의 농도는 대략 8 mg/L 정도 용출되는 것으로 나타났다. 5시간 동안 교반 후 pH는 석회석이 공존하는 경우 7.6, 공존하지 않는 경우는 6.2 정도로 나타났다.

위 두가지 결과를 종합하면 석회석이 존재할 때 약산에 의한 인산이온 용출은 저해를 받는 것으로 나타났다. 이는 석회석이 수소이온 수용체로 작용하므로서 인산염이 녹아드는 것을 억제하기 때문으로 이해되며 호수 저부에 석회석이 혼합되면 저니로부터 인성분의 용출을 감소시킬 수 있음을 시사한다.

앞서 설명한 결과들을 아세트산의 존재하에서 인산염으로부터 용출되는 인성분 농도의 시간에 따른 변화를 석회석이 있는 경우와 없는 경우로 재구성한 것이 Fig. 4이다. Fig. 4에서 w/ Limestone과 w/o Limestone은 각각 석회석이 첨가된 경우와 첨가되지 않은 경우를 뜻한다. 석회석의

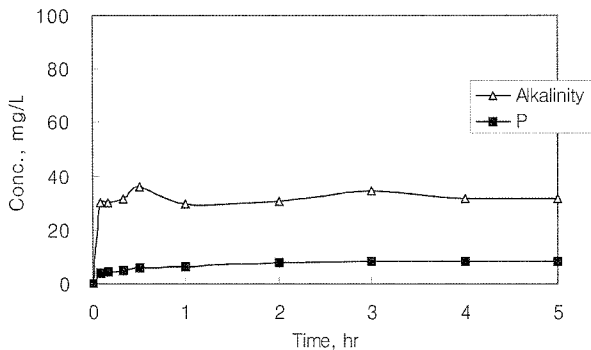


Fig. 2. Dissolution of calcium hydroxyapatite by acetic acid.

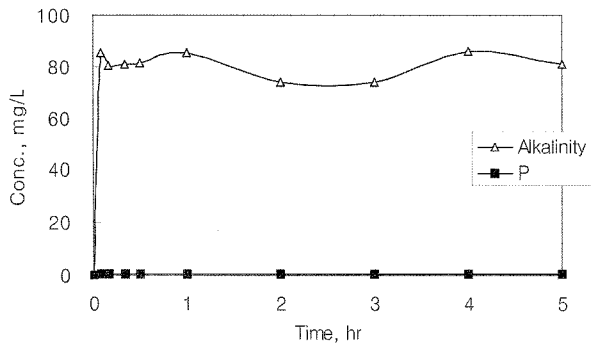


Fig. 3. Dissolution of calcium hydroxyapatite by acetic acid in the presence of limestone.

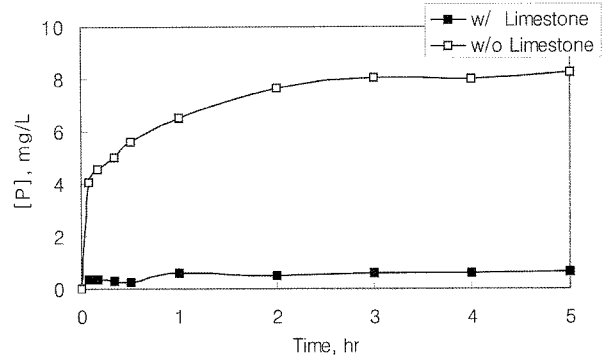


Fig. 4. The effect of limestone on the leaching of calcium hydroxyapatite by acetic acid.

존재는 그렇지 않은 경우에 비하여 인의 용출을 현저하게 낮춤을 알 수 있다.

#### 3.2. 탄산에 의한 인산칼슘의 용출과 석회석의 영향

혐기성조건에서 혐기성박테리아에 의한 유기물질 분해의 여러 가지 최종생성물 중 탄소를 함유하고 있는 기체상물질은 이산화탄소와 메탄가스이다. 이산화탄소가 물에 녹으면 탄산이 되고 이 또한 인산염의 용출에 영향을 미칠 수 있을 것이다. 인산칼슘염 또는 인산칼슘염과 석회석의 혼합물에 탄산가스를 불어 넣어 인의 농도변화를 측정된 실험 결과를 Fig. 5, 6, 그리고 7에 나타내었다. 탄산가스를 불어 넣었을 때 석회석이 첨가되지 않은 경우는 석회석이 첨가된 경우에 비해 거의 10배정도의 인이 용출함을 확인할 수 있다. 5시간 동안 교반 후 pH는 석회석이 첨가된 경우 7.8,

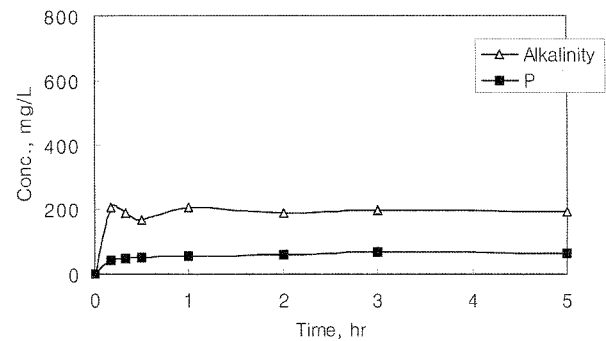


Fig. 5. Dissolution of calcium hydroxyapatite by carbonic acid.

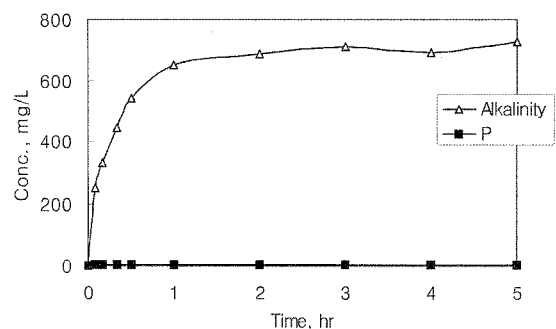


Fig. 6. Dissolution of calcium hydroxyapatite by carbonic acid in the presence of limestone.

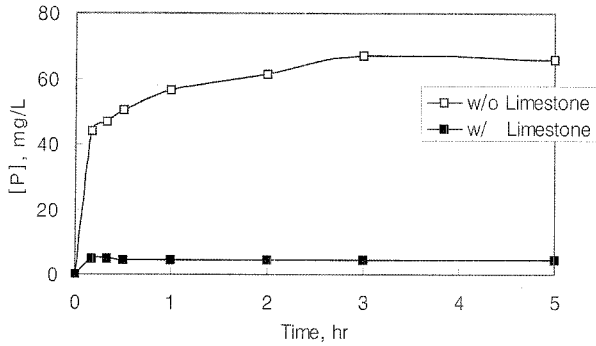


Fig. 7. The effect of limestone on the leaching of calcium hydroxyapatite by carbonic acid.

첨가하지 않은 경우 5.1 정도로 나타났다.

이상에서 아세트산과 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>를 첨가한 경우 인산칼슘염에서 인의 용출이 증가하며 두 경우 모두 석회석이 존재하면 인의 용출이 현저히 감소함을 확인하였다. 이는 마치 산화에 의해서 철판이 부식되는 것을 방지하기 위해서 철판에 각각 주석과 아연을 입힌 양철과 합석의 경우에 비교할 수 있다. 주석과 아연이 산화에 의해 먼저 녹아나면서 철판이 보호되듯이 석회석이 산에 의해 먼저 녹아나면서 인산염의 용출이 억제되는 것이다.

이를 화학양론적으로 설명하면 다음과 같다. 석회석과 칼슘아파타이트는 모두 난용성염이다. 물과 접촉시키면 비록 미량이지만 각각 탄산이온과 인산이온을 생성한다. 탄산이온과 인산이온은 수소이온을 받아들여 수소탄산이온과 일수소인산이온을 생성한다. 이 같이 수소이온을 받아들이는 성질을 염기도라 하며 흔히 pK<sub>B</sub> 값으로 나타낸다. pK<sub>B</sub> 값이 작을수록 염기도가 크다(Sawyer et al., 2003). pK<sub>B</sub> 값만을 비교한다면 수소이온에 의해 인산염이 더 잘 녹아들어야 할 것이다.



그러나 탄산칼슘 용해도는 칼슘하이드록시 아파타이트의 그 것에 비해 대략 1,300배정도로서 물에 훨씬 잘 녹아 칼슘이온의 농도를 크게 증가시키므로서 아파타이트가 녹아드는 속도를 크게 지연시킬 수 있다. 탄산칼슘의 용해도곱은 10<sup>-8.48</sup> 이고, 칼슘하이드록시 아파타이트의 용해도곱은 10<sup>-114</sup>이며 이를 이용해서 각각의 용해도를 구할 수 있다(Stumm et al., 1996).

### 3.3. 알칼리도가 칼슘이온과 인산이온의 거동에 미치는 영향

석회석의 용출로 칼슘이온농도와 알칼리도가 증가하게 된다. 이 같은 증가는 다른 성분들의 활동도에 영향을 미칠 것이다. 칼슘이온과 인산이온이 반응하여 칼슘인산염을 형성할 때 알칼리도의 영향을 알아보기 위해 행한 실험의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 알칼리도가 증가

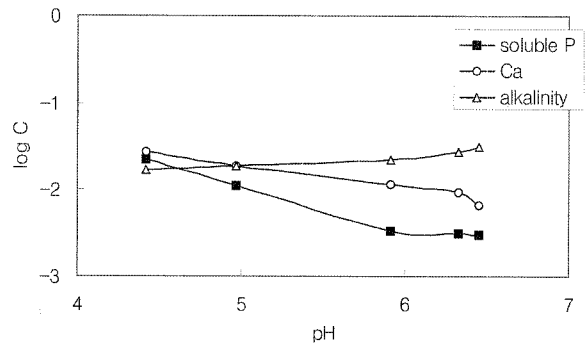


Fig. 8. Log concentration-pH diagram of CaCl<sub>2</sub>-KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>-NaHCO<sub>3</sub> system.

하면서 칼슘이온과 인산이온의 농도가 함께 감소함을 알 수 있고, 이는 두 이온이 반응하여 인산칼슘염을 형성한 후 침전되어 용액으로부터 제거되기 때문에 나타나는 결과로 설명할 수 있다. 이 같은 결과는 경도와 알칼리도가 높은 물에서 인산칼슘염의 형성이 용이한 것을 뜻한다(Song et al., 2006; House, 1999; Dittrich et al., 1997).

탄산이온은 이수소인산이온과 공존할 경우 반응 3에 의해서 자신은 수소탄산이온으로 변화하면서 일수소인산이온을 생성시킨다. 알칼리도가 커질 때 탄산이온의 농도가 증가하여 일수소인산이온의 농도는 더욱 커진다. 이 이온은 반응 4와 같이 칼슘이온과 결합하여 일수소인산칼슘염을 생성하여 침전시키므로서 인성분이 용액으로부터 제거될 수 있다. 문헌에 나타난 평형상수 값으로부터 반응 3에 대한 평형상수를 계산하면 그 값이 1.32×10<sup>3</sup> 정도로서 반응식 오른쪽 성분의 농도가 훨씬 큰 것을 알 수 있다(Sawyer et al., 2003). 다만 반응 4는 위와 같은 계에서 나타날 수 있는 여러 가지 복잡한 반응의 한 예일 뿐이다.



### 3.4. 혐기성분해 모의실험 결과

유기산과 탄산이 인산칼슘염의 용출을 촉진시켜 인산이온의 농도를 높일 수 있고 석회석이 공존하면 인산이온의 용출을 저해함이 실험을 통해 밝혀졌다. 또한 알칼리도의 증가는 인산칼슘염의 형성을 촉진시키는 효과가 있음을 알게 되었다. 이를 종합하면 저니에 석회석이 존재할 때 저니로부터 인의 용출은 억제되고 수중의 인성분은 칼슘염으로 침전될 가능성이 커진다는 것이다(Neal, 2001). 이를 실험적으로 증명하기 위해 수행한 혐기성분해 모의실험결과를 Table 2에 나타내었다.

혐기성 모의실험에서 30일이 경과 후 반응기내부가 혐기성조건에 도달했는지의 여부를 확인하기 위하여 포집된 가스에 불을 붙여 연소불꽃이 일어남을 확인하였다. 이는 반응기 내부가 혐기성 조건이 되었고 메탄가스가 생성되었음을 뜻한다. 가스는 실험시작 1주일 후부터 발생하기 시작하여 30일까지 끊임없이 발생하였다.

**Table 2.** Results of the model experiments

Experimental conditions			Results			
Sediment (Kg)	Dead leaf (g)	Limestone (g)	pH	Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	PO <sub>4</sub> -P (μg/L)
2	-	-	5.9	108	116	17
2	20	-	5.9	436	399	691
2	20	1	6.1	568	595	2.8
2	20	10	6.2	628	624	0.7

실험결과는 낙엽 즉 혐기성 분해반응의 에너지원인 유기물이 있을 경우 그렇지 않은 경우에 비해 인이 훨씬 많이 용출되는 것을 보여준다(Table 2). 또한 석회석이 있을 경우 그렇지 않은 경우에 비해 용출된 인의 농도가 훨씬 낮음을 보여주고 있고 석회석 양이 클수록 인의 농도는 더욱 낮아지는 것을 보여준다. 반면에 경도와 알칼리도가 증가함과 동시에 인의 농도는 낮아지는 것을 볼 수 있다. 인의 농도가 낮아지면 조류의 성장은 저해될 것으로 기대할 수 있다.

**3.5. 본 연구결과와 대청호 및 충주호의 수질 비교**

대청호와 충주호는 충청북도에 위치하고 있으며 인근지역에 생활용수와 농업용수, 공업용수를 공급하는 인공호수이다. 한국수자원공사에서 두 호수를 관리하고 있으며 정기적으로 수질조사를 실시하고 있다. 정보공개 요구를 통해서 얻은 지난 10년간 수질조사결과를 평균한 것을 Table 3에서 볼 수 있다. 특이한 것은 충주호의 영양염류 농도가 대청호에 비해 조류의 성장에 크게 불리하지 않음에도 불구하고 클로로필-*a*의 농도가 훨씬 낮다는 점이다.

아마도 이 같은 현상은 본 연구의 실험을 통해서 얻은 결과와 Table 3의 내용을 비교해 보면 설명이 가능하다. 즉 충주호의 경도와 알칼리도가 대청호보다 거의 두배 정도로 크기 때문에 충주호에서는 용존성 인의 농도가 낮아 조류에 의한 흡수가 용이하지 않으므로 충주호에서 조류의 생장이 대청호에 비해 상대적으로 어려울 수 있다.

**Table 3.** Comparison of the water quality data of Daechung Lake and Choongju Lake

	Daechung Lake	Choongju Lake
TP, mg/L	0.023	0.022
TN, mg/L	1.51	2.23
Chl- <i>a</i> , mg/m <sup>3</sup>	5.1	3.6
Hardness, mg/L as CaCO <sub>3</sub>	49	99
Alkalinity, mg/L as CaCO <sub>3</sub>	33	71
pH Range (in 2004)	7.5-8.4	7.9-9.0

**4. 결론**

위의 여러 가지 결과로부터 석회석은 저니로부터 인의 용출을 억제함과 동시에 경도 및 알칼리도의 증가를 초래하는 효과를 가지고 있음을 확인하였다. 높은 경도와 알칼리도는 인산이온을 인산염의 형태로 바꾸어 침전시키므로서 용존성 인의 농도를 감소시킬 수 있다. 이 모든 결과는

석회석을 저니로부터 인의 용출을 억제하는 수단으로 사용할 수 있음을 보여준다. 이는 나아가서 호소의 부영양화로 인한 수화현상을 억제하는 기술개발의 단초를 제공할 수도 있다고 본다.

**사 사**

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

**참고문헌**

APHA, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 18ed, New York, Amer. Publ. Health Ass., (1992).

Carstensen, J., Frohn, L. M., Hasager, C. B. and Gustafsson, B. G., Summer Algal Blooms in a Coastal ecosystem: The Role of Atmospheric Deposition Versus Entrainment Fluxes, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **62**, pp. 595-608 (2005).

Converti, A., Zilli, M., Poloniecki, R. H., Del Borghi, M. and Ferraiolo, G., Influence of Nutrient Concentration in New Operating Criteria for Biological Removal of Phosphorus from Wastewaters, *Water Research*, **27**, pp. 791-798 (1993).

Dittrich, M., Dittrich, T., Sieber, I. and Koschel, R., A Balance Analysis of Phosphorus Elimination by Artificial Calcite Precipitation in a Stratified Hardwater Lake, *Water Research*, **31**, pp. 237-248 (1997).

Dittrich, M. and Koschel, R., Interactions between Calcite Precipitation (Natural and Artificial) and Phosphorous Cycle in the Hardwater Lake, *Hydrobiologia*, **469**, pp. 49-57 (2002).

Edwards, V. R., Tett, P. and Jones, K. J., Changes in the Yield of Chlorophyll *a* from Dissolved Available Inorganic Nitrogen after an Enrichment Event-applications for Predicting Eutrophication in Costal Waters, *Continental Shelf Research*, **23**, pp. 1771-1785 (2003).

Hayes, K. P. and Burch, M. D., Odorous Compounds Associated with Algal Blooms in South Australian Waters, *Water Research*, **23**, pp. 115-121 (1989).

Herath, G., Freshwater Algal Blooms and Their Control: Comparison of the European and Australian Experience, *Journal of Environmental Management*, **51**, pp. 217-227 (1997).

House, W. A., The Physico-chemical Conditions for the Precipitation of Phosphate with Calcium, *Environmental*

- Technology*, **20**, pp. 727-734 (1999).
- Jin, X., Wang, S., Pang, Y. and Wu, F. C., Phosphorus Fractions and the Effect of pH on the Phosphorus Release of the Sediments from Different Trophic Areas in Taihu Lake, China, *Environment Pollution*, **139**, pp. 288-295 (2006).
- Koutsopoulst, S., Kinetic Study on the Crystal Growth of Hydroxyapatite, *Langmuir*, **17**, pp. 8092-8097 (2001).
- Kusel, K. and Drake, H. L., Microbial Turnover of Low Molecular Weight Organic Acids During Leaf Litter Decomposition, *Soil Biology and Biochemistry*, **31**, pp. 107-118 (1999).
- Landsberg, J. H., The Effects of Harmful Algal Blooms on Aquatic Organisms, *Rev. Fish. Sci.*, **10**(2), pp. 113-390 (2002).
- Miyajima, T., Wada, E., Hanba, Y., T. and Vijarnsorn, P., Anaerobic Mineralization of Indigenous Organic Matters and Methanogenesis in Tropical Wetland Soils, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **61**, pp. 3739-3751 (1997).
- Neal, C., The Precipitation for Phosphorus Pollution Remediation by Calcite Precipitation in UK Freshwaters, *Hydrology and Earth System Sciences*, **5**, p. 119-131 (2001).
- Owens, M. and Wood, G., Some Aspects of the Eutrophication of Water, *Water Research*, **2**, pp. 151-159 (1968).
- Reitzel, K., Ahlgren, J., Gogoll, A. and Rydin, E., Effects of Aluminum Treatment on Phosphorus, Carbon, and Nitrogen Distribution in Lake Sediment: A  $^{31}\text{P}$  NMR Study, *Water Research*, **40**, pp. 647-654 (2006).
- Sawyer, C. N., McCarthy, P. L. and Parkin, G. F., Chemistry for Environmental Engineering and Science, McGraw-Hill Co., Boston, USA, p. 123 (2003).
- Sondergaard, M., Jensen, J. P. and Jeppesen, E., Retention and Internal Loading of Phosphorus in Shallow, Eutrophic Lakes, *The Scientific World*, **1**, pp. 427-442 (2001).
- Song, Y., Weidler, P. G., Berg, U., Nuesch, R. and Donnert, D., Calcite-seeded Crystallization of Calcium Phosphate for Phosphorus Recovery, *Chemosphere*, **63**, pp. 236-243 (2006).
- Stumm, W. and Morgan, J. J., Aquatic Chemistry, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, pp. 363-407 (1996).
- Van Voorthuizen, E. M., Zwijnenburg, A. and Wessling, M., Nutrient Removal by NF and RO Membranes in a Decentralized Sanitation System, *Water Research*, **39**, pp. 3657-3667 (2005).
- Wang, X. J., Xia, S. Q., Chen, L., Zhao, J. F., Renault, N. J. and Chovelon, J. M., Nutrients Removal from Municipal Wastewater by Chemical Precipitation in a Moving Bed Biofilm Reactor, *Process Biochemistry*, **41**, pp. 824-828 (2006).
- Wu, R. S. S., Eutrophication, Water Borne Pathogens and Xenobiotic Compounds: Environmental Risks and Challenges, *Marine Pollution Bulletin*, **39**, pp. 11-22 (1999).
- Zhang, Y. and Prepas, E. E., Short-term Effects of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Additions on Phytoplankton Biomass : A Comparison of Laboratory and in situ Experiments, *Water Research*, **30**, pp. 1285-1294 (1996).