

# Visual MINTEQ모형을 이용한 인산염의 용해에 미치는 석회석의 영향 규명

김학성<sup>†</sup> · 정연태<sup>\*</sup>

충북대학교 환경공학과

\*한국전력공사 전력연구원 환경구조연구실

## Explanation of the Effect of Limestone on the Dissolution of a Phosphate with the Visual MINTEQ Model

Hag Seong Kim<sup>†</sup> · Yeon Tae Jeong<sup>\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

\*Environment & Structure Lab., Korea Electric Power Research Institute

(Received 30 January 2008, Accepted 22 April 2008)

### Abstract

This study was done to explain the role of limestone which might intervene in the phosphorus cycle in a lake. The effects of limestone on the dissolution of phosphate were estimated by simulations with the computer model Visual MINTEQ, which is designed for the chemical equilibrium calculations. According to the calculations limestone shows remarkable effects for the suppression of phosphate dissolution. The limestone can suppress the dissolution of phosphates by sacrificing themselves to acids, and as a consequence can increase the hardness and alkalinity of the lake. Both hardness and alkalinity play an important role in reducing soluble P and thus alleviate the eutrophication potential.

**keywords** : Alkalinity, Eutrophication, Hardness, Limestone, Modelling, Phosphorus

### 1. 서론

우리나라의 경우 수량확보를 위하여 많은 다목적댐이 건설 운영되고 있다. 이 댐들은 생활, 공업용수, 농업용수 등 용수의 공급 및 하천유지용수 공급에 이용된다. 물꽃현상이 발생하면 수질이 악화되어 용수공급을 위한 수처리에 많은 노력과 비용이 필요하다. 이로 인해 우리나라의 경우 물꽃현상에 의한 폐해를 최소화하고자 조류예보제를 실시하고 있다. 1996년부터 대청호를 시작으로 그리고 1998년부터는 팔당호, 충주호, 그리고 주암호에 대해서 조류예보제가 시행되어 왔으며, 그 기준은 Table 1과 같다.

위와 같은 기준에 의한 그 동안의 대청호와 충주호의 조류예보 발령실적은 Table 2와 같다. 이 표의 내용은 그 동안 단편적으로 발표되어 온 환경부 자료를 입수하여 정리한 것이다.

그 동안의 조류예보실적으로부터 위도상으로 큰 차이가 나지 않는 지역에 위치한 두 호수가 일사량과 같은 에너지 유입에 큰 차이가 없었을 것임에도 조류예보제에 의한 발령실적에 큰 차이가 있음을 관찰할 수 있다. 즉 1998년 이후 대청호의 경우는 조류주의보 207일, 조류경보 92일, 그리고 조류대발생이 7일간으로 총549일간 조류주의보 이상의 발령실적이 있지만 충주호에서는 단 하루도 조류예보가 없었다.

두 호수의 조류예보실적이 주목할 만한 차이를 일으킨

요인이 무엇일까? 이를 알아내기 위해서 두 호수의 수질 자료를 입수하여 비교 검토하였다. 두 호수의 수질조사는 호수의 관리주체인 한국수자원공사 대청댐관리사업소와 충주댐관리사업소에서 매월1회 정기적으로 실시해오고 있다. 여러가지 다양한 조사항목가운데서 조류의 생육에 직접적인 영향을 미치리라고 짐작할 수 있는 수온, 총질소, 총인, 그리고 생육정도의 결과인 클로로필- $\alpha$ 의 함량의 자료를 입수하여 정리한 것이 Fig. 1과 Table 3의 내용이다.

Fig. 1에서 1989년부터 2006년까지 두 호수의 수온의 변화를 볼 수 있다. 지리적으로는 충주호가 대청호보다 약간 북쪽에 위치하고 있지만 수온은 오히려 여름철에는 조금 높고 겨울철에는 조금 낮은 것으로 나타났다. 일반적으로 더운 여름철 수온이 높을 때 물꽃현상이 심해지는 경향이 있다. 수온만을 고려한다면 차라리 충주호에서 물꽃현상이 더 자주 발발해야 할 것이다. 그러나 실제로 나타난 현상은 그와 다르다.

Table 3에서 총인의 경우 대청호 0.022 mg/L, 충주호 0.021 mg/L로서 두 호수 간에 큰 차이가 없어 보이는 반면, 총질소의 경우 대청호 1.46 mg/L, 충주호 2.27 mg/L로서 대청호보다는 충주호가 월등히 높은 것으로 나타났다. 여기에 수온의 효과까지 고려한다면 대청호보다는 충주호의 클로로필 함량이 더욱 크고 나아가서 물꽃현상이 발생할 가능성이 더 클 것이나 실제에 있어서는 정반대 현상이 관찰된 것을 알 수 있다. 같은 기간에 클로로필- $\alpha$ 의 함량의 평균치가 대청호 5.4 mg/m<sup>3</sup>, 충주호 3.6 mg/m<sup>3</sup>로서 충

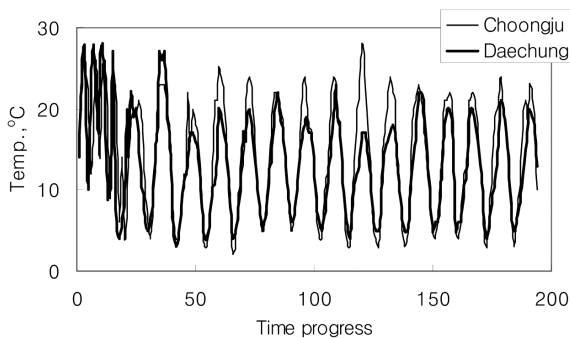
<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kimhags@chungbuk.ac.kr

**Table 1.** Criteria for the algae warning

Categories	Criteria base on two consecutive surveys
Third class	Chlorophyll- $\alpha$ concentration : 15~25 mg/m <sup>3</sup> Counts of blue green algae : 500 to 5,000 cells/mL In case where above two conditions are satisfied
Second class	Chlorophyll- $\alpha$ concentration : greater than 25 mg/m <sup>3</sup> Counts of blue green algae : greater than 5,000 cells/mL In case where above two conditions are satisfied
First class	Chlorophyll- $\alpha$ concentration : over 100 mg/m <sup>3</sup> Count of blue green algae is over 106 cells/mL and scum appears In case where above two conditions are satisfied
Call off	Chlorophyll- $\alpha$ concentration : less than 15 mg/m <sup>3</sup> Count of blue green algae is less than 500 cells/mL

**Table 2.** Records of algae warning since 1997

Daechung Lake	Third class : 96 days in 1997, 31 days in 1998, 28 days in 2000, 35 days in 2001, 16 days in 2002, 90 days in 2003, 7 days in 2004, 67 days in 2005, 64 days in 2006 Second class : 18 days in 2000, 42 days in 2001, 33 days in 2003, 15 days in 2005 First class : 7 days in 2001
Choongju Lake	No records of warning issued



**Fig. 1.** Water temperature variations from 1989 to 2006.

**Table 3.** Comparison of water quality data

	Daechung Lake	Choongju Lake
TP, mg/L	0.022	0.021
TN, mg/L	1.46	2.27
Chlorophyll- $\alpha$ , mg/m <sup>3</sup>	5.4	3.6
Hardness, mg/L as CaCO <sub>3</sub>	45	116
Alkalinity, mg/L as CaCO <sub>3</sub>	33	75
pH Range (in 2006)	5.8~8.8	6.4~9.0
Algae warning records since 1997, days	549	0

주호보다는 대청호에서 월등히 높은 것으로 나타났다.

수질항목에서 중요한 것 중의 하나가 pH이다. 2006년도 두 호수의 pH범위를 보면 충주호의 pH범위가 6.4~9.0으로서 대청호의 pH범위 5.8~8.8보다 비교적 높게 나타났음을 볼 수 있다. pH가 높으면 알칼리도의 차이가 있을 것이고 이는 경도의 차이를 수반할 수 있다.

알칼리도와 경도는 호수수질 법정조사항목이 아니다. 따라서 대청댐 관리단과 충주권 관리단의 자료를 사용할 수 없기 때문에 두 호수를 상수원으로 이용하는 청주정수장과 충주정수장의 자료를 입수하여 분석하였다. 2006년도 대청

호의 경도와 알칼리도의 평균값은 각각 45 mg/L as CaCO<sub>3</sub>와 33 mg/L as CaCO<sub>3</sub>이고, 충주호의 경우는 각각 116 mg/L as CaCO<sub>3</sub>와 75 mg/L as CaCO<sub>3</sub>로 나타났다. 충주호의 경도와 알칼리도 모두 대청호에 비해 대략 두 배 이상의 값을 가진다. 경도를 나타내는 주된 성분은 칼슘이온일 것이고, 두 호수의 경도와 알칼리도가 차이나는 것은 충주호 상류의 석회암이 우세한 지질학적 이유에서 기인하는 것으로 해석할 수 있다(국토정보지리원, 2003).

이상의 논의를 종합하면 대청호와 충주호에서 물꽃현상의 발발은 수온과 영양성분의 농도 등에 의하면 충주호에서 그 빈도가 높을 것으로 예상할 수 있지만 실제로는 그렇지 않다는 것이다. 이와 같은 차이가 나타나는 원인이 두 호수 수질항목 중 두드러진 차이를 보이는 경도와 알칼리도의 차이에서 연유한다고 가정할 수 있다.

두 수질항목의 차이를 일으키는 원인물질이 석회석일 것으로 보고 실험을 통해서 이를 입증하기 위한 노력의 하나가 혐기성 조건하에서 석회석이 인산염의 용해에 미치는 영향을 규명한 논문이다(김학성과 박주현, 2007). 이 연구는 그 결론에서 석회석의 존재는 인산염의 용출을 억제하는 동시에 경도와 알칼리도를 높여 인의 침전을 촉진시켜 호수에서 인의 내부부하를 감소시키는 효과가 있다고 주장하였다. 본 연구는 화학평형모델을 이용하여 이 같은 주장을 이론적으로 뒷받침하고자 한다.

## 2. 연구방법

현존하는 지구화학평형모델 중에서 MINTEQA가 가장 다양한 적용이 가능하다. MINTEQA는 미국 환경보호청(US EPA)이 보급하는 지구화학적 평형을 이루는 계의 화학종을 산출하는 모델로서 환경중에서 일어나는 용해된 상태,

흡착된 상태, 기체상, 그리고 고체상 간에 이루어지는 평형을 계산할 수 있다(Allison et al., 1991). 본 연구에서는 미국 환경보호청의 홈페이지에서 내려 받은 Visual MINTEQ를 이용하여 다양한 조건에서 석회석과 인산염간에 이루어지는 평형에서 존재하는 화학종들의 농도를 계산하여 그 결과를 비교 검토하였다.

MINTEQ 프로그램의 데이터베이스에는 탄산칼슘 결정체는 calcite와 aragonite에 관련된 자료만이 존재한다. 석회석은 주성분이 탄산칼슘이고 불순물로 이산화규소, 점토성분을 미량포함하고 있는 광물질로서, 본 연구에서는 자연에서 가장 풍부하게 존재하는 탄산칼슘인 방해석(calcite)을 입력하였다. 또한 인산염으로는 열역학적으로 가장 안정한 형태로 알려진 calcium hydroxyapatite를 입력하였다(Koutsopoulst, 2001).

평형을 이루고 있는 계의 온도는 25°C로 가정하였고 계와 접하고 있는 대기의 압력은 1 atm, 그리고 공기중 이산화탄소의 농도는 모델의 default 값인 380 ppm을 사용하였다. pH는 특별한 언급이 없는 경우 모두 물질수지로부터 산출하도록 선택하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 석회물질의 존재가 인산염의 용해에 미치는 영향

물이 calcium hydroxyapatite와 접촉할 때 공기에 대하여 닫힌 상태 또는 열린 상태에서 이루어지는 평형상태에서 용액의 특성을 Table 4에 나타내었다. 그 내용을 보면 닫힌 계의 경우 pH는 8.74이고 인산성분의 농도는  $4.07 \times 10^{-6}$  M 그리고  $Ca^{2+}$ 의 농도는  $6.78 \times 10^{-6}$  M이었으나 열린계의 경우 pH 7.09, 인산성분  $3.81 \times 10^{-5}$  M, 그리고  $Ca^{2+}$ 이온의 경우  $6.35 \times 10^{-5}$  M로서 닫힌계에 비해 열린계에서는 pH가 8.74에서 7.09로 강하하고 인산이온과 칼슘이온의 농도는 대략 9배정도 상승하였다. 이는 공기중의 탄산가스가 녹아들어 탄산이 생성되고 이 탄산이 인산염의 용해를 촉진시킨 때문이다.

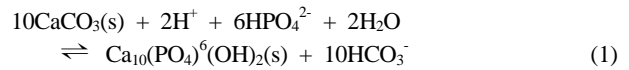
**Table 4.** Properties of the aqueous solution in equilibrium with hydroxyapatite

	pH	[Soluble P]/M	[Soluble Ca]/M	[Soluble CO <sub>2</sub> ]/M
Closed system	8.74	$4.07 \times 10^{-6}$	$6.78 \times 10^{-6}$	0.0000
Open system	7.09	$3.81 \times 10^{-5}$	$6.35 \times 10^{-5}$	$8.44 \times 10^{-5}$

**Table 5.** Dissolution of hydroxyapatite in the presence of calcite

[Calcite]/mM	pH	[Soluble P]/M	[Soluble Ca]/M	[Soluble C]/M
0.0	7.09	$3.81 \times 10^{-5}$	$6.35 \times 10^{-5}$	$8.44 \times 10^{-5}$
0.1	7.54	$2.78 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^{-4}$	$2.17 \times 10^{-4}$
0.2	7.83	$3.76 \times 10^{-7}$	$2.01 \times 10^{-4}$	$4.11 \times 10^{-4}$
0.3	8.00	$1.20 \times 10^{-7}$	$3.00 \times 10^{-4}$	$6.05 \times 10^{-4}$
0.4	8.11	$5.51 \times 10^{-8}$	$4.00 \times 10^{-4}$	$8.04 \times 10^{-4}$
0.5	8.21	$3.09 \times 10^{-8}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$9.98 \times 10^{-4}$
0.6	8.23	$2.73 \times 10^{-8}$	$5.26 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-3}$
1.0	8.23	$2.73 \times 10^{-8}$	$5.26 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-3}$
10.0	8.23	$2.73 \times 10^{-8}$	$5.26 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-3}$
infinite	8.23	$2.73 \times 10^{-8}$	$5.26 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-3}$

만일 동일한 계에 탄산칼슘이 존재한다면 평형에 도달한 후의 결과는 어떠할가를 평형계산을 통해서 알아보기로 한다. 하이드록시 아파타이트는 반응식 (1)에서 볼 수 있듯이 그 용해가 pH에 영향을 받을 것이므로 수생태계 화학평형의 연구에 기타 인산염들보다 훨씬 적합한 연구대상물이라 볼 수 있다. 또한 본 연구의 대상은 석회석의 주성분인 calcite로 한정하였다.



공기와 접촉하고 있는 물에 아파타이트를 포화상태에 도달하기에 충분한 양을 가한 후 calcite의 양을 변화시켜 첨가하여 평형에 도달한 것으로 가정한 경우에 대하여 계산한 결과로 얻은 pH 및 용액조성의 변화를 Table 5와 Fig. 2와 3에 나타내었다. Calcite 농도가 0.6 mM까지 증가함에 따라서 용액의 pH가 상승하고 그 이상이 되면 pH가 8.23에서 더 이상 변화가 없는 것으로 나타났다. 마찬가지로 탄산칼슘의 양이 0.6 mM인 상태에서 수용액의 총인, 총칼슘, 그리고 총탄산의 농도 즉 [P], [Ca], [C]가 각각  $2.73 \times 10^{-8}$  M,  $5.26 \times 10^{-4}$  M, 그리고  $1.05 \times 10^{-3}$  M에 도달한 후 탄산칼슘 양의 증가에 따른 추가적인 변화는 없는 것으로 나타났다. 공기와 평형을 이루는 시스템에서 탄산칼슘의 존재는 인의 농도를  $3.81 \times 10^{-5}$  M에서  $2.73 \times 10^{-8}$  M으로 1,500배나 감소시킬 수 있다. 총칼슘의 농도 [Ca]와 총탄산농도 [C]는 각각 용액의 경도와 알칼리도의 주성분이다.

#### 3.2. 인의 내부부하에 미치는 석회석의 영향

호수의 인수지에서 바닥에 퇴적된 인산염으로부터 인산이 용출하여 수생태계로 유입되는 것을 인의 내부부하라 한다. 이와 같은 내부부하에 의해 부영양 상태는 더욱 심화된다. 퇴적층의 인산염의 용해는 용해도곱에 의해 제한된다. 그러나 산이 존재하면 수소이온의 농도가 커지고 이 수소이온은 반응식 (2), (3), 그리고 (4)에 의해 정인산이온( $PO_4^{3-}$ )을 일수소인산이온( $HPO_4^{2-}$ ) 또는 이수소인산이온( $H_2PO_4^-$ )

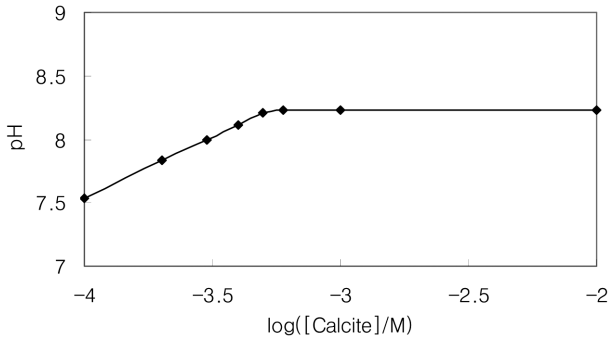


Fig. 2. pH variations as a function of calcite concentration.

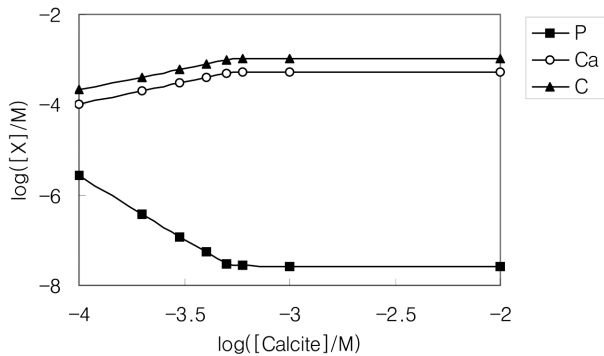


Fig. 3. Variations of [P], [Ca], and [C] as a function of calcite concentration.

더욱 나아가서 인산(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) 형태까지 변화시키므로 물속에 용존하는 인의 농도는 산의 세기와 농도에 따라 증가할 수 있다.



퇴적층에서는 용존산소농도가 0에 가까운 혐기성 상태가 유지되고 이로 인해 혐기성미생물이 유기물질을 분해한다. 이때 유기물이 혐기성 분해되면 최종적으로 탄산가스와 메탄가스로 변화하는데 이때 중간과정에서 유기산이 발생한다(Kusel and Drake, 1999; Miyajima et al., 1997). 이 유기산이 퇴적층의 인산염 용해를 촉진시켜 인산이온의 농도증가를 초래할 수 있다.

유기산이 인산염의 용해에 미치는 영향을 보기 위하여 유기산의 한 종류인 아세트산이 인산염과 공존하는 경우에 대하여 MINTEQ 프로그램을 사용하여 모의계산한 결과를 소개한다. 이를 위해서 MINTEQ 프로그램 초기화면에서 Show organic components 상자를 클릭하고 Component name에서 Acetate-1을 선택하여 농도를 입력한다. 아파타이트와 calcite 농도는 유한한 양을 입력하여 각각의 농도가 0.01 M이 되도록 입력한다(김학성과 박주현, 2007). 물론 석회석이 없는 경우는 calcite 항목을 생략하면 되고, pH는

Table 6. Simulated results for the apatite-calcite-acetic acid system (open to the atmosphere)\*

	Without calcite	With calcite
[apatite] <sub>i</sub> /M	1.00×10 <sup>-2</sup>	1.00×10 <sup>-2</sup>
[apatite] <sub>e</sub> /M	9.86×10 <sup>-3</sup>	1.00×10 <sup>-2</sup>
[calcite] <sub>i</sub> /M	-	1.00×10 <sup>-2</sup>
[calcite] <sub>e</sub> /M	-	9.08×10 <sup>-3</sup>
pH	5.86	8.12
[P] /M	4.11×10 <sup>-4</sup>	1.92×10 <sup>-8</sup>
[Ca] /M	6.84×10 <sup>-4</sup>	9.16×10 <sup>-4</sup>

\*[HAc]=0.001 M, P<sub>CO<sub>2</sub></sub>= 0.000380 atm, i: initial, e: equilibrium

물질수지와 전하균형으로부터 산출하도록 한다. 이와 같이 하여 얻은 결과를 정리하여 Table 6에 나타내었다.

Table 6의 내용을 살펴보면 아세트산(HAc)의 존재하에서 탄산칼슘이 없는 경우 아파타이트의 1.4% 가량이 용해하지만 그 반대의 경우 아파타이트 용해가 매우 제한된다는 점이다. 인의 농도는 탄산칼슘이 없는 경우 4.11×10<sup>-4</sup> M이고 공존하는 경우 1.92×10<sup>-8</sup>으로서 그 비가 21,400배인 것으로 나타났다. 칼슘의 농도는 탄산칼슘이 공존하는 경우 9.16×10<sup>-4</sup> M이고 없는 경우 6.84×10<sup>-4</sup> M로서 1.3배에 달하며 공통이온효과로 인해 아파타이트 용해가 제한되어 인 농도의 차이가 커지는 것으로 이해할 수 있다.

호수에서 인의 내부부하는 퇴적된 인이 용출하여 생태계로 유입됨에 따른 것이다. 한 여름 물꽃현상이 심화되어 번성한 조류들이 수온이 낮아지면 사멸하고 호수 바닥으로 가라앉는다. 호수바닥에는 용존산소가 거의 없고 조류 사체로 이루어진 유기물이 많기 때문에 혐기성 분해가 일어나고 이때 유기산과 탄산가스가 생성됨으로 pH가 낮아진다. 이 산들로부터 유래한 수소이온들이 인산염을 용출시키면 호수바닥부근의 물 즉 정체층의 인 농도가 높아진다. 봄철과 가을철에 수온구조의 변화로 전도(overturn)현상이 일어나면 인 농도가 높은 정체층의 물이 호수전체로 섞이면서 인이 조류들에 의해서 재이용될 수 있게 되어 이를 인의 내부부하라 칭한다. 위의 모의계산에서 보았듯이 석회석이 공존하면 인의 농도를 적어도 20,000배 정도 낮출 수 있을 것으로 기대할 수 있으며 이로서 물꽃현상의 발생확률이 그만큼 감소할 것이다.

### 3.3. 알칼리도가 인의 용출에 미치는 영향

알칼리도란 물이 산을 중화시키는 능력으로 정의된다. 석회석이 물에 녹으면 Ca<sup>2+</sup> 이온과 탄산이온이 생성되며 이 탄산이온은 수소이온을 수용할 능력이 있으므로 알칼리도를 나타내는 중요한 성분이다. 또한 수소이온들은 인산이온의 존재형태에 영향을 미침으로서 석회석의 용해에 따른 알칼리도의 변화는 인산염의 용해도에도 영향을 미칠 것이다. 퇴적층에서 혐기성반응에 의해 유기산과 탄산이 생성된다 해도 주변의 알칼리도가 높다면 그들에 의해 생성된 수소이온이 중화됨으로 인산염의 용출이 감소할 수도 있을 것이다.

대청호와 충주호의 경도와 알칼리도 값을 Table 3의 값

으로 고정시키고, 두 호수의 pH를 7.5으로부터 9.0까지 변화시키면서 하이드록시 아파타이트와 접촉시킨 경우를 가정하여 MINTEQ 프로그램으로 계산하여 얻은 용존 인의 농도를 비교하여 보았다. 이때 공기에 대해서 열린계 즉 이산화탄소의 영향을 받는 것으로 가정하고 계산하였다. 그 결과를 Table 7과 Fig. 4에 나타내었다.

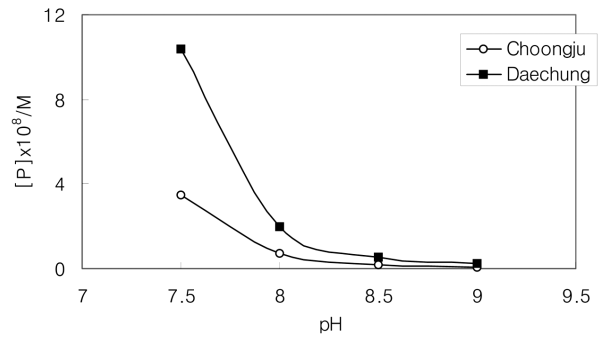
Table 7의 내용을 보면 pH 7~9의 범위에서 대청호의 용존 인 농도가 충주호의 그것에 비해 높게 나타났으며, 그 비는 pH 7에서 2.99배, 그리고 pH 9.0에서 2.67배이다. 경도가 높은 물에서 pH가 높아질수록 불용성 인산염의 형성이 용이하므로 충주호의 용존 인의 농도가 대청호의 인의 농도에 비해 낮게 나타날 것으로 예상할 수 있고 계산 결과는 이를 뒷받침한다. 자연수에서 pH가 높아진다는 것은 알칼리도가 커지는 것을 의미하므로 경도와 알칼리도는 인의 농도를 낮추는데 상승작용을 한다고 볼 수 있다.

**Table 7.** Effects of hardness and alkalinity on the dissolution of hydroxyapatite

pH	[P]/M		Ratio of [P]
	Daechung Lake	Choongju Lake	
7.5	$1.04 \times 10^{-7}$	$3.48 \times 10^{-8}$	2.99
8.0	$2.08 \times 10^{-8}$	$7.11 \times 10^{-9}$	2.82
8.5	$5.11 \times 10^{-9}$	$1.91 \times 10^{-9}$	2.68
9.0	$2.31 \times 10^{-9}$	$8.66 \times 10^{-10}$	2.67

**3.4. 용존 인 제어를 위한 석회석의 적용량 산정**

앞서 평형농도의 계산에서 석회석의 농도가 0.6 mM 이상일 때 용존인의 농도는 같은 값을 나타내었다. 이로부터 부영양 호수에 실제로 석회물질을 투입한다면 어떤 비율로 해야 할 것인가를 생각해 보기로 한다. 석회석의 경우 분자량이 100이므로 0.6 mM은 60 mg/L에 해당한다. 즉 경도로 환산하면 60 mg/L as CaCO<sub>3</sub>와 같다. Table 3에 의하면 충주호는 경도가 116 mg/L as CaCO<sub>3</sub>로서 이미 0.6 mM 이상이 유지되고 있는 것으로 나타났고, 대청호의 경우는 경도가 45 mg/L as CaCO<sub>3</sub>로서 0.6 mM에 조금 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 두 호수의 경도를 나타내는 다가금속이온이 모두 칼슘이온이라는 가정아래 이론상으로는 대청호의 경도를 15 mg/L as CaCO<sub>3</sub>만큼 더 증가시키면 한계치 60 mg/L as CaCO<sub>3</sub>에 도달하게 되고 이는 CaCO<sub>3</sub>를 호수물에 15 g/m<sup>3</sup>의 비율로 가하면 적정량이 될 것으로 보인다. 대청호의 부피가 1.49×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>이므로 필요한 석회석의 최소량은 22,350 ton 정도가 되며, 만약 이의 2배를 필요로 한다면 대략 44,700 ton의 석회석을 가하여 경도를 75 mg/L as CaCO<sub>3</sub>로 끌어 올릴 수 있을 것으로 추산된다. 이와 같이 석회석을 가하여 경도를 증가시키면 알칼리도도 동시에 증가하기 때문에 용존 인이 크게 감소할 수 있는 환경이 될 것이다. 또한 앞으로 두 호수의 경도를 나타내는 다가금속이온들의 농도를 조사한다면 용존 인 제어를 위한 석회석의 적용량 산정에 보다 현실적인 답을 제공할 수 있을 것이다.



**Fig. 4.** Variations of [P] as a function of pH.

**4. 결론**

대청호와 충주호의 수질자료 분석으로부터 얻은 정보는 조류 생장에 영향을 미칠 수질인자 즉 수온, TP, TN등에는 두 호수간에 뚜렷한 차이가 없음에도 불구하고 클로로필-α 함량과 그에 근거한 녹조예보 실적에는 두드러진 차이가 있다는 점이다. 즉 대청호와 충주호에서 물꽃현상의 발생은 수온과 영양성분의 농도 등에 의하면 충주호에서 그 빈도가 높을 것으로 예상할 수 있지만 실체는 그렇지 않다는 것이다. 이와 같은 차이가 나타나는 원인이 두 호수 수질 항목 중 두드러진 차이를 보이는 경도와 알칼리도의 차이에서 기인하였다고 가정하는 한편 석회석이 두 수질변수의 차이를 일으키는 원인물질이라 보고 이를 모델링을 통하여 입증하고자 했던 본 연구의 결론은 다음과 같다.

석회석은 인산염의 용해를 억제함과 동시에 경도 및 알칼리도의 증가를 초래하는 효과를 가지고 있음을 모델링을 통해 확인하였다. 높은 경도와 알칼리도는 인산염의 용해를 방해하거나 용존 인을 인산염 형태로 바꾸어 침전시킴으로써 용존 인의 농도를 감소시킬 수 있다.

또한 현 상태에서 대청호의 경도를 75 mg/L as CaCO<sub>3</sub>로 끌어올리기 위해서 필요한 석회석은 44,700 ton 가량으로 추산된다. 이와 같이 석회석을 가하여 경도와 알칼리도를 동시에 증가시키면 용존 인의 농도가 크게 감소하여 물꽃현상의 발발을 줄일 수 있는 환경이 될 수 있을 것이다.

**사 사**

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

**참고문헌**

국토정보지리원(2003). 한국지리지 충청권.  
 김학성, 박주현(2007). 혐기성 저지에서 석회석이 인산염 용해에 미치는 영향. 한국물환경학회지, 23(1), pp. 81-86.  
 Allison, J. D., Brown, D. S. and Novo-Gradac, K. J. (1991). MINTEQA2/PRODEFA2, A Geochemical Assessment Model for Environmental Systems : Version 3.0 User's Manual, EPA/ 600/3-91/021.

- Koutsopoulst, S. (2001). Kinetic study on the crystal growth of hydroxyapatite. *Langmuir*, **17**, pp. 8092-8097.
- Kusel, K. and Drake, H. L. (1999). Microbial turnover of low molecular weight organic acids during leaf litter decomposition. *Soil Biol. Biochem.*, **31**, pp. 107-118.
- Miyajima, T., Wada, E., Hanba, Y. T. and Vijarnsorn, P. (1997). Anaerobic mineralization of indigenous organic matters and methanogenesis in tropical wetland soils. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, pp. 3739-3751.