

## 추계 대청호 퇴적물 내 인의 지화학적 특성

심무준\* · 양윤모 · 오다연 · 황윤호<sup>1</sup> · 이수형

국립환경과학원 금강물환경연구소, <sup>1</sup>한국과학기술연구원

**Geochemical Properties of Sedimentary Phosphorus of Daechung Lake in Autumn, Korea. Shim, Moo Joon\*, Yun Mo Yang, Da Yeon Oh, Yun Ho Hwang<sup>1</sup> and Soo Hyung Lee (Geum River Environment Institute, National Institute of Environmental Research, Okcheon 29027, Korea; <sup>1</sup>Korea Institute of Science and Technology, Gangneung 25451, Korea)**

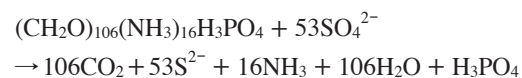
**Abstract** This study was conducted in autumn to determine phosphorus (P) fraction in sediments of Daechung Lake, to elucidate controlling factors for sedimentary P, and to compare with the other areas. For this study, sediment samples were collected at 6 sites only once on November 2014 using ponar grab and analyzed for solid-phase P (Loosely adsorbed, Fe-bound, Al-bound, detrital apatite, and refractory organic P) by sequential extraction. Total phosphorus (TP) was relatively high in front of Daechung Dam and Hoinam where fish farm was run until 1997. The dominant sedimentary P form was Al-bound P, followed by Fe-bound P, which could be released from sediment to water column during suboxic state. Based on principal component analysis, Al-bound P, Fe-bound, and TP were controlled by grain size of sediments. Loosely adsorbed, detrital apatite, and refractory organic P were relatively highly accumulated at the mouth of major tributaries where suspended sediments were delivered. Sedimentary P concentrations in Daechung Lake sediments were not higher than in other lake sediments. Therefore, based on these results, major controlling factors were grain size and input of suspended sediments from tributaries.

**Key words:** Daechung Lake, sedimentary phosphorus, sequential extraction, principal component analysis, Fe-bound P

## 서 론

수층으로 유입된 인은 미생물에 의해 흡취 (uptake)되거나 입자에 흡착 등의 과정을 거쳐서 퇴적물로 제거된다 (Ruttenberg and Berner, 1993; Dapeng *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012). 산화환경에서 퇴적물에 존재하는 인은 주로 철산화물 (iron oxides)과 결합된 형태로 존재한다 (Jensen

*et al.*, 1995; Filippelli and Delaney, 1996; Liu *et al.*, 2013). 그러나 퇴적물에 과도한 유기물 유입이나 수층의 성층화 현상으로 인해 야기되는 저산소 혹은 무산소 환경에서 철산화물은 환원되며 이 과정에서 철산화물에 결합되어 있던 인은 공극수 (porewater)로 용출된다. 또한 환원환경에서 유기물이 분해되면서 다음과 같은 반응식에 의해 인이 방출될 수 있다 (Rittenberg *et al.*, 1955; Richards, 1965).



즉 황산염환원에 의한 유기물 분해나 철산화물 환원은 공극수 내 인의 농도를 조절하는 지화화학적 과정이 될 수

Manuscript received 11 June 2015, revised 22 September 2015, revision accepted 30 September 2015

\* Corresponding author: Tel: +82-43-730-5623, Fax: +82-43-733-9408, E-mail: moojoonshim@gmail.com

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

있다. 일단 공극수로 방출된 인은 농도기울기에 의한 확산(diffusion)이나 퇴적물 재부유 등을 통하여 수층으로 재유입될 수 있다. 이와 같이 철산화물에 결합되어 있는 인은 환경변화에 따라 공극수로 방출될 수 있기 때문에 공극수와 퇴적물 내 인의 함량을 조절할 수 있는 중요한 형태이다. 환경변화에 따라 퇴적물에서 수층으로 재유입되는 인은 2차 수질오염 즉 부영양화를 유발할 수 있기 때문에 퇴적물에 존재하는 인의 형태와 함량을 연구하는 것은 수질 관리 차원에서 매우 중요한 일이다(Zhang *et al.*, 2012).

대청댐이 완공(1980년)됨으로 생긴 대청호는 댐으로 인해 수 체류시간이 증가함에 따라 영양염류가 증가하여 부영양화 현상이 발생되어 왔다(Kim *et al.*, 2012). 또한 대청호는 계절적인 성층현상이 발생해 매년 여름철에 저층에서 저산소층이 발견되어 왔다(Seo, 1998; Lee, 2005; Oh *et al.*, 2013). 따라서 녹조현상이 발생된 후 많은 양의 인이 퇴적될 수 있으며 계절적 환원환경에 따라서 퇴적물로부터 재용출 될 수도 있다. 그러나 퇴적물에서 확산이나 재부유와 같은 기작을 통해 수층으로 재유입되는 인의 양을 정량한 연구는 찾아보기 어려우며 수층으로 돌아갈 수 있는 인의 형태와 퇴적인(sedimentary phosphorus)의 농도를 조절할 수 있는 인자에 관한 연구 역시 부족한 실정이다.

대청호 이외의 타 인공호수에서 퇴적인의 존재형태와 그 지화학적 특성에 대한 연구가 이루어졌다. Kim *et al.* (1994)은 소양호의 퇴적물과 어류배설물에서 인 조성에 대해서 보고하였으며, Ryu (2001)는 보령호 퇴적물을 대상으로 인의 형태별 농도와 용출 특성에 대하여 분석하였다. 그러나 Kim *et al.* (1994)과 Ryu (2001)에 의해서 진행된 연구들에서는 인의 형태 중 가장 중요한 철산화물과 관련된 인의 형태를 추출하지 않았다. Shim *et al.* (2001)은 시화호에서의 퇴적층에서 무산소환경이 형성됨에 따라 퇴적층 인의 형태를 파악하고 퇴적물로부터 저층수로 용출되는 인산염의 플럭스를 추정하였다. 비교적 최근에 인공호수 퇴적물을 대상으로 시행된 연구로서 Lee *et al.* (2010)은 간척호수인 계화호 퇴적물 내 인의 특성을 조사함과 동시에 계화호와 비슷한 환경인 남양호와 화성호의 퇴적물 내 인의 농도도 분석하였다. 이 연구에서 저자들은 계화호에서 용출될 수 있는 철산화물 형태의 인의 농도가 높음을 제시하였다.

대청호 퇴적물을 대상으로 인의 형태별 분석은 몇 차례 이루어졌다(Bae *et al.*, 1991; NIER, 1996; Hwang *et al.*, 2001). 그러나 이 연구들은 모두 오래 전에 이루어졌기 때문에 최근 경향을 알 수 없고 다른 인공호수와 비교가 이루어지지 않았다. 더욱이 퇴적물 내 존재하는 인의 함량을 조절하는 인자에 대해서도 많은 연구가 이루어지지 않았

다. 따라서 본 연구에서는 예전 연구보다 더 많은 지점을 선택한 후 최근 경향을 반영할 수 있는 표층퇴적물을 채집하여 대청호 퇴적물에 존재하는 인의 형태를 파악하고 퇴적인의 형태를 조절하는 인자를 파악하고자 하였다. 또한 다른 인공호수와 비교하여 대청호 퇴적인의 특성을 조사하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 퇴적물 채집

대청호 퇴적물에 존재하는 인의 형태와 함량을 조사하기 위하여 2014년 11월에 포나(Ponar) 그래프를 이용하여 퇴적물을 채집하였다. 하천·호수 등 퇴적물 측정망 매뉴얼(2011년 환경부고시 제2011-92호)에 적시된 방법을 이용하여 환경부에서 대청호 수질 관리를 위해 수질 모니터링을 하는 6개 지점(대청댐 앞, 문의, 추동, 장계, 추소, 회남)에서 채집이 이루어졌다(Fig. 1). 또한 대청호와 비교를 위해 보령호와 예당지에서도 각각 3 지점을 선정하여 퇴적물 채집이 이루어졌다. 채집한 시료는 현장에서 호소수와 0.2 mm 눈금체를 이용하여 습식체질하였으며, 그 시료를 다시

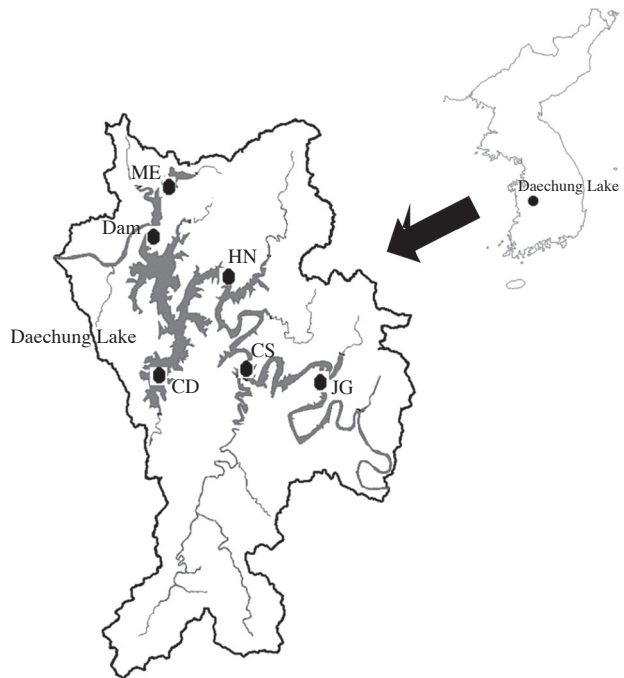


Fig. 1. Study location including sampling stations (Dam: in front of Daechung Dam, ME: Mooneui, CD: Choodong, CS: Chooso, HN, Hoinam, JG: Janggae).

0.15 mm 눈금체로 체질하여 보관용기에 담아 실험실로 운반하였다.

## 2. 분석

입도는 6% 과산화수소로 유기물을 제거한 다음 Micro-trac analyzer (S3500, USA)를 이용하여 모래 (sand, 2-0.063 mm), 실트 (silt, 0.064-0.004 mm)와 점토 (clay, 0.004 mm 이하)로 구별하였다 (Zonta *et al.*, 1994). 지화학적 분석을 위하여 시료를 자연건조시켜 토양분쇄기 (Pluverisette 6, FRITSCH GmbH)로 균질하게 분쇄하여 0.063 mm체를 통과시킨 후 분석을 실시하였다. 총유기탄소 (Total organic carbon)는 무기탄소를 5% H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>를 이용해 제거한 후 오븐에서 건조하여 분석기 (Vario Macro Cube, Elementar)에 넣고 고온으로 연소시켜 발생하는 CO<sub>2</sub>를 정량하였다. 총 질소는 건조시료를 총유기탄소 분석시에 이용했던 분석기에 넣고 고온으로 연소시켜 발생하는 질소기체를 검출하여 정량하였다.

퇴적물 내 인의 존재형태별 (loosely adsorbed, Fe-bound, Al-bound, detrital apatite, refractory organic 인) 분석을 위하여 건조시료 약 1 g을 취해 원심관에 넣은 후 선택적으로 시약을 넣고 적절히 진탕한 다음 원심분리 후 상등액을 이용하는 연속추출법을 이용하였다 (Jensen and Thamdrup, 1993). 총인은 건조시료를 고온에서 연소시킨 후 산으로 인을 추출하였으며 Soluble reactive phosphorus (SRP)는 건조시료에 0.02 M 염화칼륨용액으로 추출되는 인으로 정의하였다. 이와 같이 추출된 인은 아스코르빈산법으로 발색시켜 880 nm에서 흡광도를 측정하였다. 연속추출과정에서 Al-bound를 추출할 시에 추출된 유기물의 영향으로 상

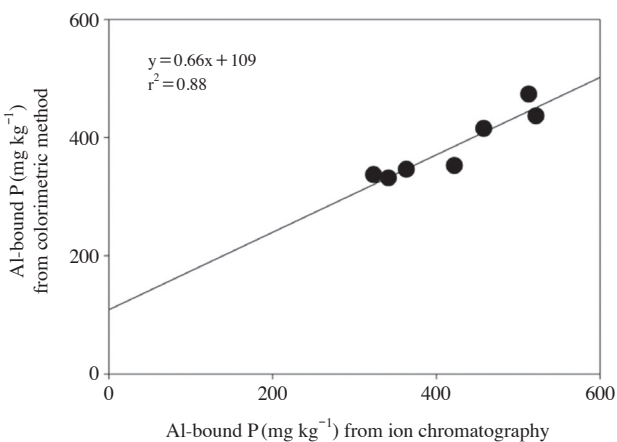


Fig. 2. Comparison of Al-bound P concentrations measured by ion chromatography and colorimetric method.

등액이 갈색을 띠고 있었고, 분석을 위한 적절한 희석 후에도 색깔을 띠고 있었다. 따라서 상등액의 색깔이 발색법에 미치는 영향을 시험하기 위해 몇 개의 시료를 선정하여 이온크로마토그래피로 정량하였다. 그 결과를 비교하였을 때 대체적으로 유사한 결과가 나온 것으로 보아 발색법은 연속추출법으로 추출된 Al-bound 인을 정량할 때 적용될 수 있는 것으로 판단된다 (Fig. 2). 연속추출법의 정밀도를 시험하기 위해 추소 지점의 시료를 이용해 두 번 추출하였다. 그 결과 첫 번째 추출형태인 loosely adsorbed 단계만 상대표준편차가 13%로 다소 높고 나머지 형태는 3% 미만의 상대표준편차를 보여주고 있다 (Table 1).

퇴적인의 농도에 대한 조절인자를 추정하기 위한 주성분분석 (principal component analysis)은 SPSS 18 (varimax rotated factor analysis)을 이용하여 대청호 자료 (n=6)에 대해서만 분석을 하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 퇴적인의 존재 형태

추계 대청호 퇴적물 내 존재하는 총인의 함량은 918~1199 mg kg<sup>-1</sup>까지의 분포를 보였으며 대청댐 앞 지점과 회남 정점에서 높게 나타났다 (Table 1). 회남 지역은 1997년까지 가두리 양식장이 성행했었기 때문에 (NIER, 1996; Hwang *et al.*, 2001) 다량의 인이 함유된 물고기의 먹이와 배설물로 인해 퇴적인의 농도가 높을 것으로 추정할 수 있다. 그러나 철거된 지 17년 정도의 시간이 지났기 때문에 새로운 퇴적물의 퇴적으로 가두리 양식장의 영향을 가늠하기는 어려운 일이다. 또한 가두리 양식장과 큰 상관이 없는 대청댐 앞 지점에서 총인의 농도가 높은 것은 가두리 양식장 이외에 다른 요인이 존재할 것으로 판단된다. Chung and Hwang (2003)의 연구에 의하면 금강분류의 유량이 증가할 때 가벼운 점토가 대청댐과 회남까지 운송되어 침전되며 모래는 무거워서 본류가 유입되는 장계 지역에서 침전이 많이 되는 것으로 나타났다. 즉 대청댐 앞 지점과 회남 지점에서 총인의 함량이 상대적으로 높은 것은 두 지점에서 역시 상대적으로 높은 점토의 함량과 관련이 깊은 것으로 사료된다 (Table 1).

추계 대청호 퇴적물에서 가장 높은 존재형태를 보이는 것은 Al-bound 인의 형태로 전 지점에서 45.6~62.7%의 범위를 보이고 있다 (Table 1). 다음은 Fe-bound 인으로서 19.8~28.9%의 범위를 나타냈다. 세 번째로 높게 존재하는 인의 형태는 refractory organic 인으로서 10.0~17.6%의

**Table 1.** Geochemical and textural parameters collected in Daechung Lake sediments (\*: a duplicate sample; Dam: in front of Daechung Dam, ME: Mooneui, CD: Choodong, CS: Chooso, HN, Hoinam, JG: Janggae, BR: Boryong Lake, YD: Yedang Lake).

Stn. ID	Conc. (mg kg <sup>-1</sup> )										Fraction (%)					Grain size (%)		
	Loosely ad.	Fe-bound	Al-bound	Apatite	Ref. org.	TP	TOC (%)	TN	SRP	Loosely ad.	Fe-bound	Al-bound	Apatite	Ref. org.	Sand	Silt	Clay	
CD	0.34	184	356	12.6	84.2	928	1.93	3123	3.8	0.05	28.85	55.92	1.97	13.20	4.4	77	18.7	
Dam	0.73	239	533	7.02	87.0	1199	2.25	4075	5.7	0.08	27.60	61.48	0.81	10.03	4.7	64.6	30.7	
ME	0.57	143	346	35.1	92.0	918	1.94	2867	3.1	0.09	23.26	56.04	5.69	14.92	8.1	86.1	5.8	
JG	0.54	170	321	88.7	124	987	2.4	3797	3.6	0.08	24.17	45.55	12.61	17.60	10	78.5	11.6	
HN	0.50	157	494	21.0	116	1151	2.04	3460	2.8	0.06	19.93	62.66	2.66	14.68	3.9	72.6	23.5	
CS	1.00	144	337	130	112	987	1.89	2664	3.8	0.14	19.90	46.48	17.99	15.50	12	80.2	7.8	
CS*	0.83	141	331	129	116	987				0.12	19.63	46.13	17.98	16.14				
CS aver.	0.92	143	334	130	114					0.13	19.77	46.30	17.98	15.82				
CS RSD (%)	13	2	1	1	2					12.33	0.95	0.54	0.03	2.89				
YD1	0.28	257	498	24.5	81.1	1345				0.03	29.83	57.87	2.84	9.43				
YD2	2.03	236	352	74.0	69.5	1255				0.28	32.15	48.01	10.09	9.47				
YD3	1.70	202	450	120	109	1419				0.19	22.88	50.97	13.61	12.35				
BR1	0.24	107	463	4.21	121	1208				0.03	15.45	66.59	0.61	17.32				
BR2	0.82	105	386	20.6	94.9	1229				0.14	17.22	63.63	3.39	15.63				
BR3	0.45	44	216	14.7	71.8	691				0.13	12.74	62.21	4.24	20.67				

범위를 보였다. 그 다음으로 detrital apatite는 0.81~18.0%의 범위를 나타냈으며 다른 존재형태에 비해 지점간 큰 차이를 보였다. 마지막으로 loosely adsorbed 인은 전 지점에서 1% 미만으로 존재하였기 때문에 큰 비중을 차지하지는 않았다. 본 연구의 결과는 대청호와 같이 저산소층을 보이는 미국 메인주에 존재하는 6개 호수들의 인의 존재형태와 비슷하다 (Lake *et al.*, 2007). 즉 미국 메인주 호수들에서도 가장 중요한 존재형태는 Al-bound와 Fe-bound이었다. 또한 중국 양쯔강 중·하류 지역의 9개 호수에서도 유사한 결과가 나타났다 (Wang *et al.*, 2006).

Fe-bound 인은 철산화물에 흡착되어 있는 형태이며 철산화물은 환원환경에서 쉽게 환원되기 때문에 Fe-bound 인은 여러 형태의 인중에서 수층으로 용출될 수 있는 가장 큰 형태이다 (Paludan and Jensen, 1995). 또한 Al-bound 인은 알루미늄 산화물 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 유기물에 흡착되어 있는 형태이다 (Jensen and Thamdrup, 1993; Paludan and Jensen, 1995). 이 형태의 인 역시 산화환원 전위가 낮아지거나 pH가 증가할 때 수층으로 용출되는 것으로 알려져 있다 (Lee *et al.*, 2010). 대청호에는 여름에 저산소층이 형성되는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 추계 퇴적물만을 대상으로 했기 때문에 수층으로 용출될 수 있는 Fe-bound와 Al-bound 인의 농도변화를 추적하기 위해서는 여름을 비롯한 각 계절별로 퇴적물 채집이 이루어져야 할 것이다. 즉 계절별 채집은 수층의 조건에 따른 인의 존재형태 변화를 추적할 수 있으므로 보다 더 정확한 인의 지화학적 특성을 연구하는데 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

Detrital apatite 인은 Ca<sub>5</sub>[F(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]의 구조를 가지며 이 형태의 인은 광물형태이기 때문에 상대적으로 용출이 어렵고, refractory organic 인 역시도 유기물과 결합이 강해서 수층으로 용출이 크지 않을 것으로 사료된다 (Son *et al.*, 1999). Loosely adsorbed 인은 약하게 결합되어 있는 형태이기 때문에 퇴적물 재부유가 일어날 시 쉽게 용출될 수는 있으나 (Son *et al.*, 1999) 대청호에서는 그 농도가 아주 낮아서 수층의 수질에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

## 2. 인 형태를 조절하는 인자

대청호 추계 퇴적물에 존재하는 인의 형태를 조절하는 인자를 찾기 위해 주성분분석 (principal component analysis)을 하였다. Eigenvalue가 1 이상인 주성분은 4개가 추출되었으며 각각의 주성분에 대한 loading은 Table 2에 나타났다. 또한 각각의 주성분에 대한 해석을 보충하기 위하여 각각의 분석된 항목에 대하여 상관계수를 Table 3에

나타났다. 주성분 1은 총분산에서 55.6%를 설명하며 Al-bound 인과 점토(clay)가 높은 양(positive)의 loading을 보였다. 반면 실트는 높은 음(negative)의 loading을 보였다. 따라서 주성분 1은 세립질 퇴적물에 의한 흡착에 의해서 총인과 Al-bound 인이 영향을 받는 것으로 생각된다. 앞서 언급하였듯이, 실제로 총인의 농도가 높은 곳은 점토의 함량이 상대적으로 높은 대청댐 앞과 회남 지점이었으며, 회남 지점은 가두리 양식장의 영향도 있을 것으로 판단된다(NIER, 1996; Hwang *et al.*, 2001). 실트의 경우 총인과 Al-bound 인뿐만 아니라 다른 형태의 인과도 음의 상관성을 보이기 때문에(Table 3) 퇴적되는 인은 주로 점토에 더 많이 축적되는 것으로 사료된다. 점토는 입자의 크기가 세립하기 때문에 표면적이 넓어서 유기물이나 인 등을 비롯한

지화학적 원소들이 많이 축적된다(Zhu *et al.*, 2013).

주성분 2는 총분산의 20.5%를 차지하며 loosely adsorbed 인, detrital apatite와 모래에서 높은 loading을 보였다(Table 2). Detrital apatite는 풍화에 의해 쇄설되어 육상에서 유입되는 것으로 간주된다(Son *et al.*, 1999). Detrital apatite가 높은 지역은 장계와 추소로서 타지점에 비해 상대적으로 모래의 함량이(10% 이상) 많은 곳이다. 추소는 대청호 유입지천 중 최대규모인 소옥천이 유입되는 곳이며 장계는 금강분류가 대청호에 유입되는 지역이기 때문에 다른 지점에 비해 부유퇴적물이 상대적으로 많이 유입되는 지점들이다(NIER, 2012). 따라서 주성분 2에서 설명되어지는 원소들은 육상기원 즉 같은 기원에 의해 유입되어지는 것으로 판단된다. 보다 더 정확한 해석을 위해서는 대청호 퇴적물의 기원에 대한 조사가 필요할 것이다.

주성분 3은 총분산의 12.7%를 설명하며 TOC와 TN만이 높은 loading을 보였다(Table 2). 즉 주성분 3으로는 퇴적인의 분포를 설명하기에 무리가 있다. 총분산의 9.6%를 차지하는 주성분 4는 soluble reactive phosphorus (SRP)와 Fe-bound 인이 양의 loading을 보여주고 있으며 refractory organic 인은 음의 loading을 나타내고 있다(Table 2). Refractory organic 인은 마지막 단계에서 추출되는 것이기 때문에 쉽게 분해되는 유기인이 아니라 난분해성 유기인이다(Son *et al.*, 1999). 이 난분해성 유기인은 장계, 추소와 회남 지점에서 대체적으로 높게 나타났다(Table 1). 장계와 추소에는 소옥천과 금강분류가 유입되는 곳이므로 난분해성 유기인 역시 하천을 통해 유입되어 축적되는 것으로 사료된다. 실제로 refractory organic 인은 주성분 2에서 높은 loading을 보인 detrital apatite와 모래와 높은 상관성을 보임으로서(Table 3) 같은 경로를 통해 축적되는 것으로 판

**Table 2.** Rotated factors extracted from principal component analysis.

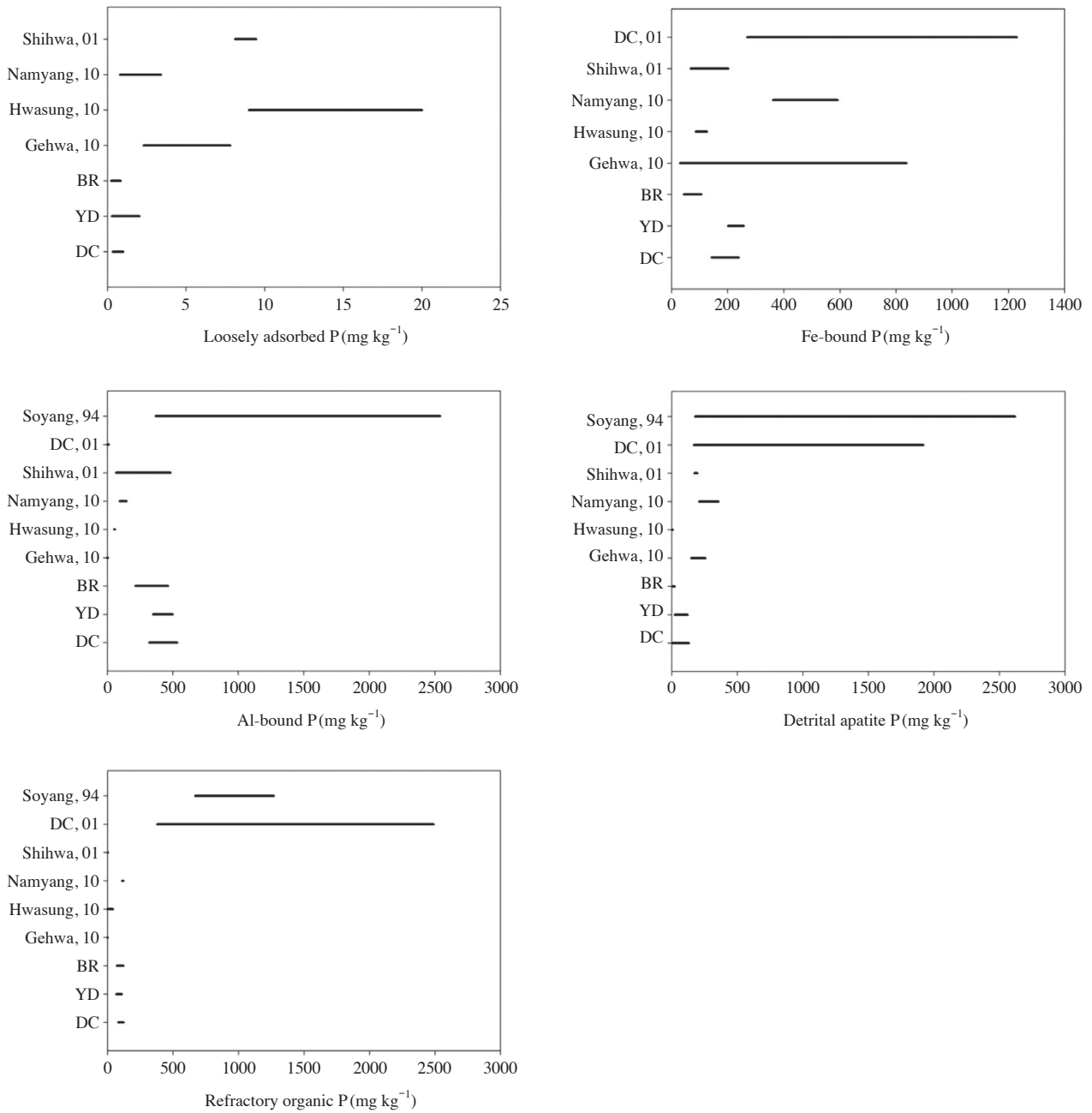
	Principal component			
	1	2	3	4
Al-bound	<b>.949</b>	-.200	.055	.175
Silt	<b>-.844</b>	.083	-.351	-.345
Clay	<b>.829</b>	-.344	.249	.319
Loosely ads.	.167	<b>.951</b>	-.187	.139
Apatite	-.398	<b>.845</b>	.038	-.304
Sand	-.564	<b>.804</b>	.052	-.167
TOC	.145	.027	<b>.981</b>	.021
TN	.498	-.213	<b>.816</b>	.188
SRP	.364	.221	.315	<b>.848</b>
Ref. org.	-.006	.447	.376	<b>-.804</b>
Fe-bound	.490	-.179	.449	<b>.722</b>
Eigenvalue	6.67	2.45	1.53	1.16
Variance (%)	55.6	20.5	12.7	9.6
Cumulative variance (%)	55.6	76.1	88.8	98.4

**Table 3.** Correlation matrix between phosphorus and sediment properties.

	Sand	Silt	Clay	TOC	TN	TP	SRP	Loosely ads.	Fe-bound	Al-bound	Apatite	Ref. org.
Sand	1.00											
Silt	.60	1.00										
Clay	-.80*	-.96**	1.00									
TOC	.00	-.45	.34	1.00								
TN	-.44	-.77	.74	.88*	1.00							
TP	-.48	-.89*	.84	.41	.69	1.00						
SRP	-.15	-.70	.58	.38	.55	.48	1.00					
Loosely ads.	.64	-.02	-.21	-.12	-.24	.18	.33	1.00				
Fe-bound	-.52	-.85*	.82*	.51	.78	.60	.89*	-.08	1.00			
Al-bound	-.71	-.87*	.90*	.21	.60	.94**	.46	.00	.64	1.00		
Apatite	.95**	.46	-.68	-.03	-.42	-.36	-.20	.67	-.54	-.63	1.00	
Ref. org.	.51	.17	-.30	.35	.05	.07	-.46	.23	-.49	-.23	.66	1.00

\*\* : significant at 99% level

\* : significant at 95% level



**Fig. 3.** Comparison of this study with other studies reported previously. DC, YD, and BR show data generated in this study, representing Daechung Lake, Yedang Lake, and Boryung Lake, respectively. Soyang, 94 (Kim *et al.*, 1994); DC, 01 (Hwang *et al.*, 2001); Shihwa, 01 (Shim *et al.*, 2001); Namyang, Hwasung, Gehwa, 01 (Lee *et al.*, 2010).

단된다. 반면 SRP와 Fe-bound 인은 refractory organic 인과는 반대로 점토와 상대적으로 높은 상관성을 나타냈다 (Table 3). 즉 점토가 높은 loading을 보인 주성분 1에서 높은 loading을 보이지는 않았지만 상관성 분석을 통해 SRP와 Fe-bound 인도 역시 점토에 조절이 되는 것으로 판단된다.

### 3. 타 지역과 비교

Bae *et al.* (1991)의 연구에서 대청호 퇴적인의 함량은 양식장 및 도시하수 유입지점에서 높은 것으로 보고되었다. 이 결과는 본 연구와 더불어 다른 연구 결과 (NIER, 1996; Hwang *et al.*, 2001)와도 유사하다. Hwang *et al.* (2001)은

대청호에서 가장 많은 인의 형태는 Ca와 결합된 인과 Fe-bound 인으로 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 Al-bound 인의 형태가 가장 우점하는 것으로 나타났으며 Hwang *et al.* (2001)에서 보고된 Al-bound 인의 농도보다 약 100~200배 가량 높았다. 또한 두 연구 결과가 공통적으로 회남 지점에서 퇴적인의 농도가 높은 것을 보여주지만 유기인의 농도 역시 큰 차이를 보였다. 즉 본 연구에서 회남 지점의 유기인은  $116 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 나타났지만 Hwang *et al.* (2001)의 보고에는 약  $2000 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 약 20배 가까이 높은 것으로 나타났다. Hwang *et al.* (2001)의 연구가 시행된 이후로 회남 지점의 유기인이 분해되었을 가능성도 있으나 우선적으로 두 연구 간에 이용된 연속추출법이 다른 것도 농도 차이에 대한 이유가 될 것으로 판단된다. 또한 두 연구 간 Al-bound 인의 농도 차이도 추출에 이용되었던 시약이 다르기 때문에 직접적인 비교는 어려울 수 있다. 따라서 두 연구에서 이용한 방법을 비교하는 조사가 이루어진 다음에 보다 더 정확한 대청호 퇴적인의 지화학적 특성이 밝혀질 것이다.

비교된 각 연구마다 분석방법의 차이로 인해서 직접적인 비교가 어려울 수 있으나 본 연구에서 분석된 대청호 퇴적인의 농도는 모든 형태에서 타 인공호수보다 크게 높지는 않았다 (Fig. 3). 수층으로 쉽게 용출될 수 있는 형태인 Fe-bound 인의 경우 2001년도에 진행된 대청호 결과를 제외하고 계화지 (Lee *et al.*, 2010)에서 월등하게 높았다. Refractory organic 인, Al-bound 인, detrital apatite의 경우에도 대청호 (Hwang *et al.*, 2001)와 소양호 (Kim *et al.*, 1994)에서 높게 나타났다. 앞서 언급한대로 2001년도에 대청호에서 진행된 연구에서는 회남 지점의 유기인 농도가 높았기 때문에 Fig. 3과 같이 대청호의 유기인 농도가 타 인공호수보다 월등히 높은 것으로 판단된다. 소양호에서 분석된 인의 형태는 양어장 퇴적물이 포함되었기 때문에 타 인공호수보다 현저히 높은 것으로 판단된다. Kim *et al.* (1994)은 소양호 양어장 퇴적물에 apatite가 많은 것은 물고기 배설물에 높은 apatite 함량과 연관이 있을 것으로 보고하였으며 양어장 퇴적물에 수층으로 용출될 수 있는 형태의 인 함량이 양어장과 거리가 먼 곳에 위치한 퇴적물보다 높다고 제시하였다.

## 적 요

추계 대청호 퇴적물에서 가장 많이 존재하는 인의 형태는 환원환경이 되면 용출될 수 있는 Al-bound와 Fe-bound 인으로 나타났다. 총인, Al-bound와 Fe-bound 인은 가두리

양식장이 분포하였던 회남 지점과 대청댐 앞에서 높게 나타났다. 그 이유는 가두리 양식장 같은 인위적인 활동보다는 세립질 퇴적물의 이동과 연관이 있는 것으로 판단된다. 대청호 퇴적인의 농도는 그 어느 존재형태도 타 인공호수에 비해 높지 않았다. 그러나 보다 더 객관적인 비교를 위해서 존재형태별 연속추출법을 표준화해야 할 것이다.

## REFERENCES

- Bae, J.O., J.H. Kim, H.K. Lee and S.H. Jun. 1991. Amount of sedimentary phosphorus and metals in sediments of Daechung Lake. *Korean Journal of Limnology* **24**: 137.
- Chung, T.S., J.H. Hwang. 2003. Estimation of transport of particulate pollutants inflowing into Lake Daechung. *Proceeding of spring meeting for Korean Society on Water Environment and Korean Society of water and Wastewater* 173-176.
- Dapeng, L., H. Yong, F. Chengxin and Y. Yan. 2011. Contributions of phosphorus on sedimentary phosphorus bioavailability under sediment resuspension conditions. *Chemical Engineering Journal* **168**: 1049-1054.
- Filippelli, G.M. and M.L. Delaney. 1996. Phosphorus geochemistry of equatorial pacific sediments. *Geochimica Cosmochimica Acta* **60**: 1479-1495.
- Hawang, J., W. Chung, and Y. Chung. 2001. Phosphorus and metal content in the sediments from Daechung and Keum-River estuary reservoirs. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis* **4**: 85-91.
- Jensen, H.S. and B. Thamdrup. 1993. Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction. *Hydrobiologia* **253**: 47-59.
- Jensen, H.S., P.B. Mortensen, F.Ø. Andersen, E. Rasmussen and A. Jensen. 1995. Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark. *Limnology and Oceanography* **40**: 908-917.
- Kim, B.C., J.H. Park and S.H. Jun. 1994. Phosphorus composition and release from Lake sediment and fecal deposit of fish culture. *Korean Journal of Limnology* **27**: 275-283.
- Kim, K.H., J.H. Lee and K.G. Ahn. 2012. Spatio-temporal fluctuations with influences of inflowing tributary streams on water quality in Daechung Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **45**: 158-173.
- Lake B.J., K.M. Coolidge, S.A. Norton, and A. Amirbahman. 2007. Factors contributing to the internal loading of phosphorus from anoxic sediments in six Maine, USA, lakes. *Science of Total Environment* **373**: 534-541.
- Lee, J.K., T.W. Ahn and J.M. Oh. 2010. A study on the influence of water quality on the phosphorus fraction properties from reservoir sediments. *Journal of Korean Society of Environmental Engineering* **32**: 840-850.

- Lee, Y.S. 2005. Water quality effect of sediment release on reservoir. *Proceeding of spring meeting Korean Society of Environmental Engineering* 1149-1152.
- Liu, E., J. Shen, H. Yuan, E. Zhang and C. Du. 2013. The spatio-temporal variations of sedimentary phosphorus in Taihu Lake and the implications for internal loading change and recent eutrophication. *Hydrobiologia* **711**: 87-98.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 1996. A comprehensive study on the water quality of Daechung Reservoir (II). NIER NO. 96-19-490.
- Oh, K.H., D.H. Jeong, S.Y. Yang, T.W. Jeon and Y.C. Cho. 2013. Effects of submerged aerator on the growth of algae in Daechung Reservoir. *Journal of Korean Society of Environmental Engineering* **35**: 268-275.
- Paludan, C. and H.S. Jensen. 1995. Sequential extraction of phosphorus in freshwater wetland and lake sediment: significance of humic acids. *Wetlands* **15**: 365-373.
- Richards, F.A. 1965. Anoxic basin and fjords. In: Riley, J.P. and G. Skirrow (Eds). *Chemical Oceanography*. V.1. Academic. 611-645.
- Rittenberg, S.C., K.O. Emery and W.L. Orr. Regeneration of nutrients in sediments of marine basin. *Deep-sea Research* **3**: 23-45.
- Ruttenberg, K.C. and R.A. Berner. 1993. Authigenic apatite formation and burial in sediments from non-upwelling, continental margin environments. *Geochimica Cosmochimica Acta* **57**: 991-1007.
- Ryu, B.R. 2001. Releasing characteristics of nitrogen, phosphorus and metals of the sediments in Boryung Lake. *Journal of Korean Geo-Environmental Society* **2**: 29-38.
- Seo, D.I. 1998. Stratification characteristics and water quality management strategies of Daechung Lake. *Journal of Korean Society of Environmental Engineering* **20**: 1219-1234.
- Shim, M.J., S.R. Cho, K.T. Na, J.S. Shin and E.S. Kim. 2001. The geochemical properties of phosphorus from sediments of Lake Shihwa. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* **4**: 16-27.
- Son, J., T. Lee and H.S. Yang. 1999. Phosphorus phases in the surface sediment of the South Sea. *Journal of Korean Fish Society* **32**: 680-687.
- Wang, S., X. Jin, H. Zhao and F. Wu. 2006. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reach of Yangtze River area in China. *Colloids and Surfaces: Physicochemical Engineering Aspects* **273**: 109-116.
- Zhang, Z., X. Tan, L. Wei, S. Yu and D. Wu. 2012. Comparison between the lower Nansi Lake and its inflow rivers in sedimentary phosphorus fractions and phosphorus adsorption characteristics. *Environmental Earth Science* **68**: 1569-1576.
- Zhu, Y., R. Zhang, F. Wu, X. Qu, F. Xie and Z. Fu. 2013. Phosphorus fraction and bioavailability in relation to particle size characteristics in sediments from Lake Hongfeng, Southwest China. *Environmental Earth Science* **68**: 1041-1052.
- Zonta, R., L. Zaggia and E. Argese. 1994. Heavy metal and grain-size distributions in estuarine water sediments of the Cona Marsh (Venice Lagoon, Italy). *The Science of Total Environment* **151**: 19-28.