간척담수호 저층퇴적물의 오염물질 용출특성

Pollutants Release from Sediments in Estuarine Reservoir

정광욱* · 윤춘경**† · 이인호*** · 이승일** · 강수만* · 함중화***

Jung, Kwang Wook · Yoon, Chun Gyeong · Lee, In Ho · Lee, Seung Il · Kang, Su Man · Ham, Jong Hwa

ABSTRACT

Sediment pollutants have been considered an important source for the eutrophication of estuarine reservoir. In this study, the effects of pollutants released from bottom sediment to water column were investigated. Sediment samples were collected each two station from Namyang and Sukmoon estuarine reservoirs in August 2013. The fractionation result of sediment phosphorus indicated that Adsorbed-P (36.7 ± 8.84 %) and Nonapatite-P (29.3 ± 12.50 %) are the two dominant phosphorus groups in the sediments. For sediment release test, eight sets of acrylic chamber (0.3 m diameter $\times$ 1 m high, with 0.15 m sediment depth) were used with aerobic and anaerobic environment. Under anaerobic conditions, rates of $\text{NH}_4\text{-N}$ release from the sediments were highly variable, with final concentrations of $\text{NH}_4\text{-N}$ in the overlying water varying from between about 0.69~1.04 in Namyang and 2.58~4.23 mg/L in Sukmoon reservoir. The $\text{NH}_4\text{-N}$ release was active at the upstream around the confluence of tributary compared to downstream near the embankment. The $\text{PO}_4\text{-P}$ release was more obvious than $\text{NH}_4\text{-N}$ in anaerobic condition. The final $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations were approximately from two-fold to eight-fold higher than initial concentration. In terms of reservoir water quality management, not only tributary pollutants but also sediment nutrient loading is necessary to consider the water quality contribution.

Keywords: Estuarine reservoir; sediment release; Eutrophication, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$

1. 서 론

간척담수호는 수자원 확보를 위한 효과적인 방안중 하나이다. 그러나 간척담수호는 유역의 말단에 위치하고 있기 때문에 상류 유역에서 유입되는 생활폐수, 산업폐수, 농축산폐수 등과 같은 다양한 오염부하에 노출될 가능성이 매우 큰 특징을 갖고 있다. 유역에서 유입된 오염물질은 수층에 용존상태로 존재하거나 입자상태의 물질과 함께 수체의 바닥에 침강되어 퇴적된다. 퇴적된 오염물질이 분해, 무기화되어 고농도의 유기물 및 영양염류가 퇴적층에 축적되며, 이러한 오염물질들은 분해, 확산, 재부유, 생물교란, 그리고 이동 등의 물리, 화학, 생물학적 과정에 의해 수중으로 용출되어 내부오염원으로 작용하게 된다.

퇴적된 오염물질들은 지속적인 용출에 의해 식물성 플랑크톤

의 증식을 촉진시킬 수 있는 영양염의 공급처로서 작용하게 되며 수질 및 수생태계변화에 중요한 역할을 담당하게 된다 (Kim, 2002). 즉, 저층의 퇴적물은 항상 재용출에 의한 내부오염 가능성을 내포하고 있으며, 주변 환경 변화에 따라 간척담수호의 수질을 악화시킬 수 있다. 따라서 간척담수호의 수질관리 측면에서 유역의 지형학적, 구조적인 특성과 더불어 퇴적물로부터 용출되는 오염물질의 양을 정량적으로 파악하는 것이 매우 중요하다 (Cho and Chung, 2007).

그러나, 퇴적층 내에 존재하는 영양염이 수층으로 이동하는 것은 여러 가지 복잡한 기작으로 작용하여 나타나기 때문에 어떤 조건이 크게 작용했는지는 정량적으로 밝히기는 어렵다. 그러나 실험실 내에서 용출조건을 인위적으로 변화시키면서 퇴적층의 오염물질 용출이 이루어지는 양을 짐작할 수 있다 (Hakanson and Jansson, 1983).

담수자원의 효과적인 활용을 위해서 상류유역의 수질개선사업 및 호내 수질개선대책에 대한 평가를 활발하게 진행하고 있으며, 호소모델을 이용해서 그 효과에 대해서 평가하고 있다. 유역에서 유입되는 오염물질의 양은 모니터링 자료를 기반으로 하는 모델링 기법들이 개발되어 적용되고 있지만, 퇴적층에서 용출되는 양을 추정하는데는 많은 어려움을 갖고 있으며, 특히 간척담수호의

* (사)한국수계환경연구소

** 건국대학교 생명환경과학대학 환경과학과

*** 한국농어촌공사 농어촌연구원

† Corresponding author Tel.: +82-2-450-3747

Fax: +82-2-446-2543

E-mail: chunyoona@konkuk.ac.kr

2013년 11월 6일 투고

2013년 12월 2일 심사완료

2013년 12월 4일 게재확정

퇴적층에서 용출되는 양에 대한 연구 (Cho and Chung, 2007; Ki et al., 2011; Choi et al., 2011)는 저수지나 호소를 대상으로 한 연구 (Jang et al., 2003; Lee and Lee, 2000; Lee et al., 2003; Lee et al., 2010; Oh et al., 2007)에 비해 적은 상황이다.

따라서 본 연구에서는 간척담수호인 남양호 및 석문호에서 채취한 퇴적물의 물리·화학적 성상 및 퇴적층으로부터 오염물질 용출특성 분석을 통해 퇴적층이 담수호 수질에 미치는 영향을 평가하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

본 연구의 조사 지점은 경기도 화성시 우정읍에 위치한 남양호와 충남 당진시 송산면에 위치한 석문호를 대상으로 하였으며, 남양호와 석문호의 수체 흐름 특성을 잘 반영할 수 있는 담수호 상류지점과 방조제 배수갑문 앞의 2개 지점을 선정하였다(Fig. 1). 남양호는 1974년 5월에 방조제가 완공되어 남양만 일대는

담수호로 바뀌었으며, 유역면적은 217.38 km²이며, 총저수량은 3,149 만톤, 방조제길이는 2.06 km이다. 남양호의 토지이용은 논이 100.55 km²로 46.3%를 차지하고 있었으며, 주거, 밭, 산림, 기타의 면적이 각각 21.45, 30.91, 46.63, 17.84 km²로 평가되었다. 석문호는 1995년 12월에 방조제가 완공되었으며, 방조제길이는 10.6 km, 유역면적은 264.49 km², 담수면적은 8.74 km², 총저수량은 1,461 만톤이다. 석문호의 120.8 km²로 45.7 %를 차지하고 있으며, 논이 67.4 km², 주거지역과 밭, 기타가 각각 7.4, 26.4, 42.3 km²으로 구성되어 있다.

남양호의 NY1 지점은 호의 유입부에 위치한 지점으로, 수심은 3~5 m 정도이며, 남양호 방조제의 배수갑문 주변인 NY2 지점은 2~3 m의 수심을 나타내었다. 석문호의 SM1 지점은 호의 유입지점에 위치하는 지역으로, 수심이 2~3 m이며, 석문호 방조제의 배수갑문에서 약 200 m 상류에 위치한 SM2 지점은 2~2.5 m로 남양호 보다 조금 낮게 나타났다.

2. 실험방법

용출실험을 위한 현장수는 수평채수기를 이용하여 퇴적물 위의 상등수를 채수 하였으며, 퇴적물의 채취는 Grab Sampler를 이용하였다. 채취한 퇴적물시료 및 현장수는 밀봉하여 실험실로 운반되었다. 퇴적물의 성상을 분석하기 위하여 입도분석, pH, 함수율, 강열감량, COD, T-N, T-P를 분석하였다 (Table 1). COD는 과망간산칼륨에 의한 산화방법으로 측정하였으며, T-N은 킬달분해 (kiel-dahl) 및 증류장치를 이용하여 NH₄-N를 포집하여 적정법으로 측정하였으며, T-P는 Method for P analysis에서 총인 측정방법에 의거하여 HClO₄를 이용하여 용출시킨 다음 버나드법으로 측정하였다.

본 연구에서는 현장의 재현성을 높이고, 실험의 불확실성을 줄이기 위해 실험장치의 규모를 직경 0.3 m, 높이 1 m, 그리고 퇴적물 두께 0.15 m로 설치하여 실험을 진행하였다. 용출실험을 위한 실험장치는 아크릴로 제작하였으며, 퇴적물 실험장치에 채운 후, 채수한 현장 저층수를 벽면을 따라 천천히 채워 최대한 교란이 일어나지 않도록 주입한 후 시간에 따른 수질변화를 측정하였다 (Fig. 3). 또한 공기의 유입을 방지하기 위하여 실험장치 상

Fig. 1 Locations and monitoring stations of Namyang and Sukmoon reservoirs

Table 1 Analysis methods of soil parameters

Constituents	Standard method	Remark
Water content (%)	By drying at 110 °C	Korean Standard Methods(Sea water): part2. sediment 171p
Ignition loss (%)	By igniting at 550 °C	Korean Standard Methods(Sea water): part2. sediment 173p
COD	Potassium permanganate method	Korean Standard Methods(Sea water): part2. sediment 184p
T-N	Kjeldahl method	SSSA, 1996, Methods of soil analysis: part3. chemical methods 1103p, 1114p
T-P	Digestion method by HClO ₄ and detecting by Vanadate method	SSSA, 1996, Method of soil analysis: part3. chemical methods 827p

부에 아크릴 덮개를 설치하여 밀폐상태를 유지하였으며, 실험조건은 호기성 및 혐기성 조건에 대하여 실험을 실시하였다.

호기성 조건은 DO의 일정농도가 유지되도록 폭기 장치를 이용하였으며, 혐기조건은 99.9 % 질소가스를 계속 주입하여 혐기상태를 유지하였다. 혐기성조건은 알루미늄 호일로 전체 반응조를 감싸 빛을 차단하여 광합성에 의해 산소조건 변화를 방지하였다. 시료채취는 설치 직후부터 초기에는 0~2일 간격으로 채수하였으며, 이후에는 3~5일 간격으로 총 40일간 15회에 걸쳐 분석하였다. 시료분석을 위한 시료 채취부는 퇴적물 층에서 약 0.1 m 위에 설치하여 퇴적물 바로 위의 상등수를 채수하였으며, 채수한 상등수는 해양환경공정시험법에 따라 DO, pH, COD, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, TN, $\text{PO}_4\text{-P}$, TP의 농도를 측정하였다. 인은 Adsorbed-P (Ads-P), Nonapatite-P (NAI-P), Apatite-P (A-P), Residual-P (Res-P)로 구분하여 분석하였고 (Chang and Jackson, 1957), 유기물과 결합된 Residual-P는 총인으로부터 Ads-P, NAI-P,

A-P를 제외하여 분석하였다 (Fig. 2). Ads-P는 거의 대부분 퇴적물 표면에 오르토인산염 이온이 흡수된 것으로 이루어져있으며, 이는 물에 잘 녹고 결합이 느슨하다. 또한 다른 무기 인보다 주위의 물과 더 친밀하게 접촉하기 때문에 다른 존재형태별 인보다 호수의 상태 변화에 더 민감하게 반응한다. NAI-P 일반적으로 인산철과 알루미늄 인산염으로서 구성되어 있으며 오르토인산염 이온으로서 존재한다 (ki et al., 2010). 산소의 고갈은 NAI-P의 용출이 일어나게 되고, 이는 호수 수질에 영향을 미칠 것으로 예상된다. A-P는 인회석 남철광 같은 미네랄의 크리스털 결정구조에 존재하는 오르토인산염으로 구성되어 있으며, 낮은 용해도를 가진 산성 물질에서 추출된다. 이에 반해 A-P는 극심한 산성조건이 아니면 용출되기 어려운 인형태이다.

III. 결과 및 고찰

1. 현장측정결과

수질다항목측정기를 이용하여 현장의 온도, pH, DO, EC, Turbidity를 측정하였으며 (Hydrolab, QUANTA), 측정결과는 아래와 같다 (Table 3). 상류지역인 NY1지점이 5 m로 NY2지점보다 깊었으며, 깊이방향으로 온도와 DO가 감소하였다. NY1 지점은 가장깊은 5 m 지점에서 DO의 농도가 1.72 mg/L로 혐기화의 기준인 2 mg/L 이하의 농도를 나타내었다. 저층부로 갈수록 높은 탁도 농도를 나타내었다. 1974년에 완공된 남양방조제는 1995년에 완공된 석문호보다 염분의 농도가 낮은 수준이었으며 5 m의 저층에서도 염분의 농도는 0.45 ‰을 유지하고 있었다. NY2 지점은 깊이가 2 m에서 DO농도가 6.29 mg/L이며 NY1 지점보다 염분의 농도가 0.50 ‰로 약간 높은 수준이었다.

Fig. 2 Measurement procedure for phosphorus fractionation

Fig. 3 Schematic diagram and picture of apparatus used in nutrient release experiment

Table 2 Water quality variables of monitoring station

Station	Depth (m)	Water Temp. (°C)	pH	DO (mg/L)	EC (uS/cm)	Salinity (‰)	Turbidity (NTU)
NY1	0.5	25.13	9.12	10.48	714	0.35	50.8
	1	25.03	8.39	9.26	724	0.35	46.8
	3	21.76	7.55	3.02	957	0.46	38.2
	5	20.01	7.56	1.72	904	0.45	81.8
NY2	0.5	23.85	8.70	9.00	1,007	0.50	22.3
	1	21.95	8.39	8.15	1,012	0.50	23.2
	2	21.28	7.80	6.29	1,032	0.50	27.2
SM1	0.5	22.86	7.96	6.53	1,030	0.51	48.2
	1	22.70	7.93	6.20	1,150	0.55	61.2
	1.5	21.85	7.79	5.60	1,251	0.62	60.5
	2	21.83	7.77	5.00	1,228	0.61	162.0
SM2	1	22.83	8.10	6.02	1,237	0.61	20.4
	2	22.16	7.75	4.68	2,330	1.20	25.5
	2.4	21.07	7.48	2.37	5,800	3.44	99.6

석문호의 SM1지점은 깊이가 2 m였으며, 저층의 DO농도가 5.0 mg/L의 농도를 나타내었으며, SM2지점의 깊이는 2.4 m에 DO 농도가 2.37 mg/L의 농도를 나타내었다. 특히 배수갑문 앞지점인 SM2지점의 염분농도는 3.44 ‰로 배수갑문 주변의 저층에는 일정농도의 염수가 존재하고 있는 것으로 평가되었다.

2. 입도분석 결과

일반적으로 담수호의 퇴적물은 모래 성분보다 점토 및 실트의 함량이 많게 나타난다. 남양호, 석문호 두 곳 모두 배수갑문 인근에서 채취한 퇴적물에서 상류지점보다 모래의 비율이 높았으며, 상류부에는 silt의 비율이 높은 것으로 분석되었다.

함수율은 퇴적물 관점에서 매우 중요한 항목이며, 퇴적물의 성상, 수심, 침전 속도, 압밀의 정도, 경과 시간, 생물학적 작용 등에 따라 달라질 수 있다 (Oh et al., 2007). 남양호의 함수율은 NY1, NY2지점에서 39.3 %, 32.0 %로 대상유역의 상류유역인 NY1지점이 높게 나타났으며, 석문호의 경우에도 상류지점인 SM1 지점에서 함수율 56.6 %로 배수갑문주변인 SM2지점보다 21.9 %로 높은 수준이었다.

Table 3 Physical and chemical characteristics of sediments

Reservoir	Site	Particiles (%)			Water content (%)	Ignition loss (%)	COD (mg/kg)	T-N (mg/kg)	T-P (mg/kg)
		Sand	Silt	Clay					
Namyang Reservoir	NY1	27.11	67.51	5.39	39.3	2.5	15,592	1,395	734
	NY2	58.81	32.90	8.29	32.0	2.0	9,863	1,363	679
Sukmoon Reservoir	SM1	1.82	63.56	34.62	56.6	6.3	27,916	3,494	1,461
	SM2	71.99	23.38	4.63	21.9	1.4	7,194	1,393	568

Silt와 clay의 함이 높은 순서는 SM1, NY1, NY2, SM2 순으로 나타났으며, 함수율, 강열감량, 퇴적물의 COD, T-P, T-N에서 동일한 순으로 조사되었다 (Table 3). 이는 모래성분이 많은 퇴적층보다 silt와 clay성분을 많이 포함하고 있는 퇴적층에 더 많은 유기물질 및 영양물질이 포함되어 있는 것으로 평가할 수 있다.

3. 존재형태별 인 분석 결과

퇴적물 내에 존재하는 인은 다양한 형태로 존재하며, 대부분 퇴적물에 포함되어 있다. 퇴적물 내의 인을 Adsorbed-P (Ads-P), Nonapatite-P (NAI-P), Apatite-P (A-P), Residual-P (Res-P)의 형태별로 분석하였다. Ads-P는 퇴적물 토양표면에 흡착되어 있으며, 물에 잘 녹고 결합이 느슨하여 쉽게 용출되며, 따라서 다른 형태의 인보다 호수의 상태에 더 민감하게 반응한다. NAI-P는 인산철과 알루미늄인산염으로 분류되며, 혐기조건에서 2가 철과 분리되어 오르토인산염이 용출되어 수질에 영향을 미친다. A-P는 인회석, 남철광 같은 결정구조에 존재하는 오르토인산염으로 구성되며, 극심한 산성조건에서 용출이 일어난다. Res-P는 유기물과 결합한 인의 형태로 유기물 산화시 용출될 수 있다 (Hietjes and Lijkelema, 1980). 인의 형태별 분석 결과는 아래와 같다 (Table 4).

남양호 NY1지점에서는 Ads-P 형태 36.5 %로 나타났으며, NY2 지점에서는 Ads-P 형태 35.0 %로 다른 존재형태에 비해 가장 높게 평가되었다. 석문호 SM1지점에서는 NAI-P 형태 44.3 %로 가장 높게 나타났으며, SM2지점에서는 Ads-P 형태 48.3 %로 가장 높게 나타났다.

Ads-P는 수중의 인 농도와와의 차이, pH, 교란 등에 의해 토양

Table 4 Phosphorus fraction of bottom sediments (unit: mg/kg)

Site	Ads-P	NAI-P	A-P	Res-P
NY1	268.2 (36.5 %)	255.8 (34.9 %)	169.0 (23.0 %)	40.9 (5.6 %)
NY2	237.2 (35.0 %)	137.9 (20.3 %)	162.8 (24.0 %)	140.7 (20.7 %)
SM1	392.2 (26.9 %)	646.5 (44.3 %)	255.8 (17.5 %)	166.1 (11.4 %)
SM2	274.4 (48.3 %)	100.7 (17.7 %)	57.3 (10.1 %)	135.6 (23.9 %)

입자와 분리되어 수층으로 이동할 수 있다. 퇴적물에서 인은 호기성 조건에서는 NAI-P 형태로 침전하여 존재하지만, 혐기성 조건이 되는 경우 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 등이 황에 의해 Fe^{2+} 와 결합되어 있던 인이 용출된다 (Moore and Reddy, 1994). 따라서 남양호, 석문호 두 유역모두 우기 시에 퇴적물이 교란되는 상황 또는 성층현상에 의한 퇴적물의 상등수가 혐기성 조건이 될 경우, 퇴적물 층에서 인의 용출이 일어날 가능성이 높을 것으로 판단된다.

4. 퇴적물의 영양염류 용출

가. DO 분석

호기성상태를 유지하기 위해서 지속적인 폭기를 실시한 결과 약 6 mg/L의 DO농도를 유지하였으며, 혐기성 상태를 유지하기 위해 질소가스를 주입한 혐기상태의 경우 DO농도가 1.5 mg/L 이하로 유지되었다.

Fig. 4 Variations of DO concentrations in the water column at the release experiment

Fig. 5 Variations of COD concentrations in the water column at the release experiment

Fig. 6 Variations of nitrogen concentrations ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, T-N) in the water column at the release experiment

나. COD 분석

남양호 NY1 지점의 경우, 호기성 조건에서 COD는 초기 2일 경 8.2 mg/L까지 증가한 후 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 혐기성 조건에서는 2일경 약 5.0 mg/L까지 감소하였다가 15일후 9.2 mg/L까지 증가하였으며, 이후 시간이 지날수록 감소하는 경향을 나타내었다. NY2 지점도 NY1 지점과 동일한 경향을 보이며, 30일 이후 호기성 조건과 혐기성 조건의 농도가 5.0 mg/L의 농도를 나타내었다.

석문호 SM1지점의 COD농도는 호기성 조건에서는 초기 10.0 mg/L에서 10일경 4.3 mg/L 정도에서 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 혐기성에서는 15일경 이후 약 8.0mg/L의 농도를 유지하는 것으로 평가되었다. SM2지점의 COD는 호기성과 혐기성

조건 모두 20일경부터 점차 감소하는 경향으로 나타내었으며, 호기성 조건과 혐기성 조건의 농도 차이는 평균 2.9 mg/L이다.

남양호와 석문호 모두 호기조건보다는 혐기조건에서 높은 수준의 COD농도를 나타냈으나, 시간이 지남에 따라 유기물질인 COD농도가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 퇴적층으로부터 용출 뿐만 아니라, 입자성질의 침강, 분해 등 다양한 반응이 복합적으로 나타난 것으로 판단된다.

다. 질소계열 ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, T-N) 분석

남양호 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 경우, NY1 지점의 호기성 조건에서는 초기 0.23 mg/L이후부터 지속적으로 감소하여 15일 이후 0.03 mg/L 정도를 유지하였으며, 혐기성 조건에서는 10일 이후 점차 증가

(a) NY1

(b) NY2

(c) SM1

(d) SM2

Fig. 7 Variations of phosphorus concentrations ($\text{PO}_4\text{-P}$, T-P) in the water column at the release experiment

하여 40일경에는 1.50 mg/L로 조사되었다. NY2 지점도 NY1지점과 동일한 경향을 나타냈으며, 혐기성 조건에서의 40일경의 농도는 0.70 mg/L로 NY1지점의 1.53 mg/L 보다 작게 나타났다.

퇴적물의 T-N농도가 높았던 NY1의 경우 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 용출량이 NY2보다 높은 수준을 유지하였으며, 이는 저층 퇴적물의 농도가 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 용출물에 영향을 미치고 있음을 의미한다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 혐기성 상태에서는 실험초기 급격하게 감소하여 매우 낮은 수준을 유지하였으며, 호기성에서는 1.0 mg/L의 수준을 유지하는 것으로 평가되었는데, 혐기성 상태에서는 탈질과정이 호기성상태에서는 질산화 과정이 진행되고 있는 것으로 판단된다.

T-N의 경우, NY1 지점의 호기성 조건에서는 초기 농도는 2.74 mg/L였으며, 점차 감소하여 15일경 이후에는 2.22 mg/L로 감소하여 안정화되었으며, 혐기성 조건은 5일경까지 1.36 mg/L로 감소 후, 증가하여 15일경에는 2.16 mg/L의 농도를 보였다. NY2 지점의 호기성 조건에서 농도는 지속적으로 감소하여 20일경에는 0.67 mg/L이 농도를 나타내었으며, 혐기성 조건에서는 5일경까지 1.24 mg/L까지 감소한 후 큰 변화를 나타내지 않았다.

석문호에서 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 경우, 호기성 조건에서 SM1, SM2 지점 모두 지속적으로 증가하며 15일경 SM1지점은 3.99 mg/L, SM2 지점은 1.74 mg/L에서의 농도를 나타내었다. 상대적으로 silt와 clay의 성분이 높은 SM1지점에서 SM2지점보다 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 용출량이 많은 것으로 평가되었으며, 이는 퇴적층의 높은 T-N농도가 영향을 미친 것으로 평가할 수 있다. T-N의 경우, SM1 지점의 호기성의 평균 농도는 3.93 mg/L, 혐기성의 평균농도는 4.28 mg/L로 나타났으며, SM2지역의 경우 호기성 평균농도는 2.71 mg/L, 혐기성 2.56mg/L로 조사되었다.

남양호의 T-N농도는 초기농도보다 낮은 수준을 유지하는 것으로 평가되었는데, 석문호의 경우에는 전체 T-N농도가 초기농도보다 높은 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 높은 석문호 퇴적물의 T-N농도가 영향을 미친 것으로 판단된다.

라. P계열 ($\text{PO}_4\text{-P}$, T-P) 분석

남양호의 경우, 지점별로 유사한 경향으로 $\text{PO}_4\text{-P}$, T-P 변화가 나타났으며, 혐기성 조건에서 15일경부터 NY1지점은 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 0.36 mg/L, T-P는 0.44 mg/L로 증가하였다. NY2 지점은 15일 측정에서 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 0.27 mg/L, T-P는 0.34 mg/L로 증가하는 것으로 평가되었다.

석문호의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 T-P의 경우, 지점별로 유사한 경향으로 나타났다. 호기성조건의 경우 시간이 지남에 따라 뚜렷하게 감소하였으며, 혐기성의 경우 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. SM1 지점의 호기성과 혐기성조건에서 측정 기간동안 평균

$\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도가 각각 0.12과 0.34 mg/L로 나타났으며, SM2지점에서는 호기성과 혐기성상태에서 각각 0.17과 0.43 mg/L의 농도를 나타내었다.

T-P의 농도변화는 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 경향과 매우 유사한 것으로 나타났다. 혐기성 상태에서는 퇴적물 내 생물학적 대사작용이 미미해지고 흡수되는 인은 적어지는 반면에 퇴적물 내 화학적으로 결합되어 있는 산소가 소모되면서 인 성분이 수중으로 방출되기 때문에 수체의 인 농도가 증가하는 것으로 해석 된다 (Choi et al., 2011). 반면에, $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 호기성에서는 거의 용출이 일어나지 않고 혐기성에서 용출이 일어나는 것을 볼 수 있는데 이는 호기성 조건에서 용존산소가 풍부하므로 미생물의 활성도가 증가하면서 인의 용출을 억제하고 흡수하였기 때문으로 판단된다.

IV. 결 론

퇴적물에 함유된 인이 수체로 용출될 경우 부영양화의 원인 물질로 작용한다. 인이 퇴적물에서 수계로 이동하는 현상에는 pH, 온도 DO 등 환경 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 알려져 있으나, 퇴적물과 수체 간의 이동에 대한 과학적 정보는 극히 제한적이다.

대상 간척담수호는 남양호와 석문호의 퇴적물의 특성을 대표할 수 있는 2개의 지점을 선정하여 퇴적물 성상분석 및 용출실험을 진행하였다. 본 연구에서는 타 연구에 비해 큰 실험장치(0.3 m × 1 m)를 이용하여 용출실험을 실시하였으며, 현장에서 채수한 저층수를 이용하여 보다 현장상황과 유사한 환경을 유지하기 위해 노력하였다. 입도분석결과 남양호의 NY1 지점의 퇴적물은 silt loam으로 나타났으며, NY2 지점의 퇴적물은 모래성분이 많은 sand loam의 형태로 나타났다. 석문호의 경우 SM1 지점에서 silty clay loam, SM2 지점에서 sand loam의 형태로 나타났다.

인의 형태분석에서는 남양호의 NY1, NY2 지점에서 Ads-P (36.5 %), Ads-P (35 %)로 나타났으며, 석문호의 SM1, SM2 지점에서 NAI-P (44.3 %), Ads-P (48.3 %)로 존재하고 있으므로, 남양호와 석문호는 수중의 pH 상승이나, 퇴적층의 유기물 분해, 산소고갈에 의한 혐기성 상태로의 전환 등에 의해 다량의 인이 퇴적물에서 용출되어 수체의 부영양화에 영향을 줄 수 있는 가능성이 있을 것으로 판단된다.

T-N의 경우 혐기성 상태에서는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 용출이 일정량 발생하는 것으로 평가되었다. 인의 경우 혐기성 상태에서 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 용출이 큰 것으로 평가되었는데, 퇴적층이 혐기성상태로 유지될 경우 다량의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 가 용출되어 수체의 부영양화 현상을 가속시킬 수 있는 가능성이 있다고 판단된다. 남양호와 석문호의 하상 바닥에 침전되어 퇴적된 오염물질이 잠재적 오염원으로 작용할

수 있는 환경을 가지고 있으므로 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Cho, Y. J., and S. W. Chung, 2007. Sediment Release Rate of Nutrients from Namyang Reservoir. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 29(12): 1345-1352 (in Korea).
2. Choi, L. S., S. E. Lee, and J. M. Oh, 2011. Study on Water quality and Release Rate of Sediment in Lake. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(215): 42-48 (in Korea).
3. Chang, S. C. and M. L. Jackson, 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science* 84(2): 133-144.
4. Hieltjes, A. H. M., and L. Lijklema, 1980. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *Journal of Environmental Quality* 9(3): 405-407.
5. Hakanson, L. and M. Jansson. 1983. Principles of lake sedimentology. Blackburn Press.
6. Jang, B. W., C. W. Woo, and S. P. Kim, 2003. A Study on the Degree of Pollution of Stream and Reservoir Sediments in Rural Area. *Journal of Korean Society of Rural Planning* 9(2): 1-6 (in Korea).
7. Ki, B. M., B. M. Lim, E. H. Na, and J. H. Choi, 2010. A Study on the Nutrient Release Characteristics from Sediments in the Asan Reservoir. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 32(1): 1-8 (in Korea).
8. Kim, D. H. 2002. A study on the measurement of nutrients release from sediment. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* 11(12): 1333-1337 (in Korea).
9. 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 Engineers* 32(9): 840-850 (in Korea).
10. Lee, J. S., Y. C. Kim, and G. S. Hwang, 2003. Changes of the Sediment Properties in Small Agricultural Reservoirs before and after Rainy Season. *Journal of the Korean society of civil engineers* 23(4): 359-368 (in Korea).
11. Lee, Y. S., and K. S. Lee, 2000. A Study on Release Characteristics of Sediment and its Impacts on Water Quality in Daecheong Dam Reservoir. *Korean Society of Environmental Impact Assessment* 9(2): 99-107 (in Korea).
12. Moore, P. A., and K. R. Reddy, 1994. Role of Eh and pH on Phosphorus Geochemistry in Sediments of Lake Okeechobee Florida. *Journal of Environmental Quality* 23: 955-964.
13. Oh, J. M., and Y. C. Cho, 2007. Effects of Nutrients Release from Sediments on Water Quality in a Small-size Reservoir. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 29(11): 1217-1222 (in Korea).