

호수 퇴적물의 호기 및 혐기조건에서의 용출 특성에 대한 연구

윤미혜 · 현준택 · 허남수 · 권성현* · 조대철†

순천대학교 에너지환경공학과 · *경상대학교 해양과학대학 토목환경공학과

(2007년 6월 12일 접수, 2007년 8월 20일 채택)

A Study on Release Characteristics of Lake Sediments under Oxidic and Anoxic Conditions

Mi-hae Yoon · Jun-Taek Hyun · Nam Soo Huh · Sung Hyun Kwon* · Daechul Cho†

Department of Energy & Environmental Engineering, Soonchunhyang University

*Department of Marine Environmental Engineering, Inst. of Marine Industry, Gyeongsang National University

ABSTRACT : In this study, we analyzed the release differences for some critical pollution compounds according to the surrounding conditions in order to predict water quality due to the sedimental releases and the release characteristics at different sedimental locations in Lake Leewon, in Tae-An area. COD, nitrogens and phosphates were analyzed using the standard methods for water quality, based on high chloride ion concentration (greater than 2,000 ppm). For COD, the release rate increased in the anoxic basin but almost the same in the oxidic basin. For NH₃-N, the release rate decreased in the oxidic basin as you go A through C point meanwhile, for NO₃-N and T-N, the tendency was reversed because of nitrification of them. In the anoxic basin, the release rates of NH₃-N and NO₃-N went up with A through C path. However, the release rate of T-N was found to decrease. Also, for PO₄-P and T-P, the release rates in the oxidic basin were lowest at B point mainly because the phosphates were at less released in the highly O₂ concentrated environment. In the anoxic reactor, PO₄-P was released similarly regardless of the sampling points. In summary, the release rates in the oxidic reactor were greater than those in the anoxic reactor for COD and NO₃-N. For the other components, the anoxic basin generated the higher release rates.

Key Words : Lake Sediments, Nitrogen, Phosphate, COD, Release Rate, Oxidic and Anoxic

요약 : 호수 퇴적물의 용출로 인한 수질오염을 예측하고 퇴적 위치에 따른 용출 특성을 파악하기 위해 환경 조건에 따른 용출 차이를 분석하였다. 분석 항목으로는 질소계열, 인계열, COD를 분석하였으며, 모든 시료의 분석 방법은 호수 내부수의 염도가(Cl) 2,000 ppm 이상이므로 해수 수질공정 시험법에 준하여 실시하였다. COD는 혐기조일 경우 A지점에서 C지점으로 갈수록 용출율이 증가한 반면, 호기조일 경우 증·감의 경향성이 없었다. NH₃-N의 호기조일 경우 A지점에서 C지점으로 갈수록 용출율이 감소하였고, 반대로 질산화 작용으로 인해 NO₃-N과 T-N은 A지점에서 C지점으로 갈수록 용출율이 증가하였다. NH₃-N, NO₃-N의 혐기조는 A지점에서 C지점으로 갈수록 용출율이 증가하였으나 탈질화 작용으로 인하여 T-N의 용출율은 감소하는 경향을 보였다. PO₄-P, T-P의 경우 호기조에서 B지점의 용출율이 가장 낮았으며, 이는 용존 산소의 함량이 많아 무기물이 산화되면서 인의 용출이 억제된 것으로 판단된다. PO₄-P의 혐기조일 경우 A지점부터 C지점의 용출율이 서로 유사하였다. COD와 NO₃-N의 경우 혐기조보다 호기조에서 용출율이 높았으며, 그 외의 항목에서는 호기조보다 혐기조에서 용출율이 높았다.

주제어 : 호수 퇴적물, 질소, 인, COD, 용출율, 호기 및 혐기조건

1. 서론

호수의 수질을 오염시키는 것으로는 도시하수, 생활폐수, 산업폐수, 농축산폐수 등의 외부부하에 의한 오염원과, 호수 내부에서 환경조건에 의해 생성이 축적된 오염물질로부터 발생하는 내부부하에 의한 오염을 들 수 있다. 인간 활동, 특히 산업 활동에 의하여 직간접적으로 호수에 들어온 물질 또는 에너지가 인간의 생활환경과 건강 등에 해로운 영향을 미치고, 또한 호수 본래의 수질 및 심미적 정도를 감소시킨다.¹⁾ 특히 인공 호수에서는 자연생태계를 유지하는 충분한

환경이 생성되지 않고, 수중의 정체현상으로 인하여 수심에 따라 온도와 용존산소의 차가 크며, 심수층에서는 거의 무산소층이 되는 상태가 형성되기 쉽다. 그 결과 용존산소의 양은 급격히 떨어지고 저니에서는 중금속과 질소, 인의 용출이 호기성에서 보다 활발하게 되며 이로 인한 적조 등 수질저하 뿐만 아니라, 환경, 수산, 그리고 농업의 피해까지 영향을 미치게 된다.²⁾ 호수의 퇴적물들은 대부분 수층에서 침강하여 형성된 것으로 일정기간 축적되어 있다가 분해, 확산, 재 부유, 생물교란 등의 생물·물리·화학적 과정에 의해 다시 수층으로 용출되어 수질 및 수생태계에 영향을 미칠 수 있다.³⁾ 또한 이러한 퇴적물에는 다양한 오염원이 분포될 수 있는데, 예를 들면 퇴적물 중의 COD 및 유기 탄소 등이 분석되었고⁴⁾ 호수의 성층현상에 따른 염록소의 농도 관계,⁵⁾ 중금속 Mn, Re, Zn, Cd, Pb 등과^{1,6,7)} 퇴적물에 함유된 인의 존

† Corresponding author
E-mail: daechul@sch.ac.kr
Tel: 041-530-1341

Fax: 041-530-4728

재형태 등^{8,9)}의 연구도 이루어졌다. 이렇게 발생된 퇴적물은 성장과 환경조건에 따라 수질에 미치는 영향이 다르며 그 경중에 따라 수질관리 및 대처 방안도 달라져야 한다. 호수에서의 부영양화의 진행은 질소와 인의 농도에 크게 영향을 받고 있다. 그러므로 저니에서 용출되는 영양염의 농도를 분석하는 것은 매우 중요한 일이며, 또한 침전퇴적물의 축적에 의한 심수층 저니에서의 영양염 용출변화를 파악하면 인공 호수 전체의 수질을 검토하기 위한 기초 자료가 될 수 있다.¹⁰⁾

이에 따라 본 연구에서는 퇴적물의 특성을 평가하기 위하여 호수의 수층 흐름 특성상 퇴적물의 특성이 잘 드러날 것으로 판단되는 몇 개 지점을 선정하여 상당기간 축적된 저층환경을 파악하기 위하여 퇴적물의 용출실험을 수행하였다. 퇴적저니의 용존산소의 다소에 따른 환경조건을 모사하기 위하여 두 극단적 환경인 혐기성 및 호기성조건으로 나누고, COD, 질소 및 인 계열의 용출변화를 관찰하고, 물질수지에 의거하여 용출율을 계산하였다. 이 결과는 인공 호수의 수질영향 및 수질보전을 위한 관리 및 평가 자료로서 유용하게 이용될 수 있다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 퇴적물 채취 지점의 선정

퇴적물 채취지역은 충남 태안군 이원면으로서 평균 기온은 14.7°C, 평균최저기온은 11.1°C, 평균최고기온은 18.8°C, 강수량은 약 994 mm인 지역이다. 풍속은 1.6~3.3 m/s로 풍력이고 제2등급에 해당하여 호수에 잔물결이 뚜렷이 나는 수준이다. 호수 주변에는 논과 밭이 분포하며 인공적으로 만든 호수로 호수의 흐름이 제한적이고 한정되어 있어 퇴적물로 인해 수질의 오염이 우려되는 지역이다.

수심, 유입수의 위치, 오염상태 등을 고려하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 퇴적물 특성을 대표하는 A, B, C의 3지점을 선정하여 퇴적물 시추기(gravity corer)를 이용하여 저니 시료를 채취하였다. 하천의 흐름에 따라 유입부 A지점에서 B지점으로 흘러가면서 퇴적물이 퇴적되었을 것이라 판단하

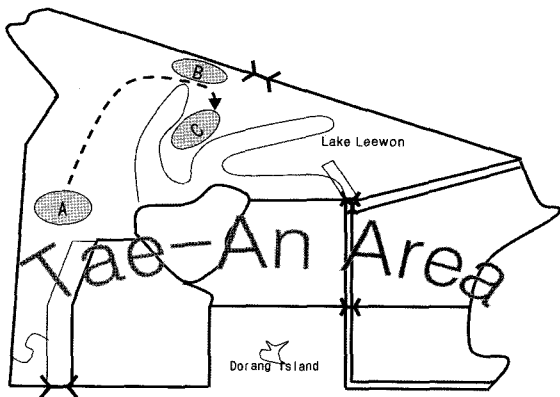


Fig. 1. A map showing three core sampling points for release experiments in Lake Leewon.

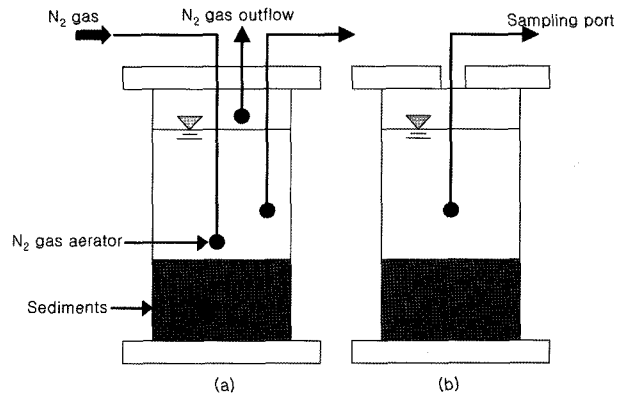


Fig. 2. Two bench-scale reactors for release experiments. (a) anoxic basin (b) oxic basin.

며 각각 수심 3 m지점의 퇴적물을 이용하여 용출실험을 하였다. 최종 퇴적 예측 지점인 C지점은 흐름의 정체구역으로 오염정도가 가장 심할 것으로 판단하였고 수심 5 m지점에서 퇴적 저니를 이용하여 용출실험을 하였다. 채취지점의 수심 선택은 해당지점의 깊이를 감안하였다.

2.2. 실험 장치

수질분석 항목으로는 질소계열(T-N, NH₃-N, NO₃-N), 인계열(총용존인, 용존무기인), COD를 분석하였으며, 모든 시료의 분석 방법은 호수 내부수의 염도(CI)가 2,000 ppm 이상 이므로 해수 수질공정 시험법에 준하여 실시하였다. 단, COD_{Mn} 분석은 Humas사의 HS-3300 수질 분석기를 사용하여 분석하였고, 용출실험 장치로서 혐기성 및 호기성반응조에서 각각 질소 및 산소 분위기에서 20여 일간 실험하였다(Fig. 2).

2.3. 실험 방법

채취한 퇴적물(2 L)을 반응조에 채운 후 퇴적물이 부유되지 않도록 조심스럽게 현장에서 채수한 원수를 주입하여 총 12 L의 용출시료를 준비하였다. 시료를 주입한 후에는 대기로부터의 공기유입을 방지하기 위하여 시험조의 상부에 고무판과 아크릴 덮개를 설치하여 밀폐상태를 유지하여 주었다. 또한 반응조 내에서 조류의 광합성에 의한 산소 발생을 방지하기 위하여 완벽하게 차광시켰다. 시료를 채취한 현장 조건과 같은 혐기성 상태를 만들어 주기 위하여 N₂가스를 주입하여 수중의 용존산소를 방출시켜 혐기성 상태를 유지시켜 주었다. 반응기의 온도는 상온(20~25°C)을 유지하여 주었으며, 호기성 조의 DO 농도는 2~3 mg/L를 유지하였다. 용존 산소의 농도 변화는 수중의 산화-환원 조건을 변화시킴으로써 영양염류의 용출특성에 중요한 역할을 한다.¹¹⁾ 분석 시료채취는 2-3일 간격으로 용출 반응조의 높이 1/2지점에서 채취하였으며, 채취한 시료는 GF/C로 여과 후 COD, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P를 공정시험법에 근거하여 분석하였다.

3. 실험 결과 및 토론

3.1. 퇴적물 채취 위치에 따른 COD 및 용출염 농도 변화

3.1.1. A 지점

혐기성 및 호기성의 조건하에서 A지점의 COD, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P의 영양염의 농도를 산출하였다(Table 1). A 지점의 분석결과를 Fig. 3에 나타내었다.

3.1.1.1. COD 분석

호기성 조건에서 COD농도의 변화는 3.55 mg/L에서 3.75 mg/L로 증가하였으며 혐기성 조건의 경우 3.55 mg/L에서 증감을 반복하다 5.17 mg/L로 약 1.45배 증가하였다. 호기성 조건에서는 산소의 폭기 때문에 COD 감소요인이 생기지만 채수지점의 호소수를 재 충전해주었기 때문에 COD의 농도 변화가 거의 일정한 것으로 판단된다. 특히 폭기조 내 용존산소의 최적 값은 2 mg/L이며 너무 높은 산소를 폭기 시킬 경우 슬러지의 침전이 잘 되지 않기 때문에 용존산소의 값이 2~4 mg/L를 유지하도록 해주어야 한다. 혐기성 조건의 경우 질소가스 분위기로 산소를 소멸시켜 혐기성상태를 유지시켰다. 이때 용출되는 유기성 성분 때문에 COD의 농도가 증가한 것으로 보인다.

Table 1. Concentration(mg/L) of analyses with time release experiments under oxic or anoxic conditions. The sediments were sampled at point A

hr		0	48	96	144	192	240	288	336	384	432
COD	oxic	3.55	4.00	5.25	5.15	5.40	6.12	5.30	4.45	3.45	3.75
	anoxic	3.55	3.95	4.05	4.55	3.55	5.70	4.30	5.10	6.30	5.17
T-N	oxic	0.65	0.70	0.71	0.67	0.62	0.67	0.67	0.63	0.66	0.65
	anoxic	0.65	0.79	0.84	1.09	1.03	1.13	1.14	1.20	1.10	1.00
T-P	oxic	0.022	0.278	0.204	0.163	0.221	0.394	0.323	0.256	0.181	0.170
	anoxic	0.022	0.227	0.246	0.850	1.071	1.204	1.223	1.268	1.351	1.392
PO ₄ -P	oxic	0.015	0.094	0.068	0.083	0.146	0.174	0.166	0.157	0.138	0.135
	anoxic	0.015	0.083	0.213	0.359	0.493	0.575	0.616	0.701	0.783	0.795
NH ₃ -N	oxic	0.49	0.52	0.54	0.54	0.57	0.58	0.59	0.57	0.59	0.59
	anoxic	0.49	0.56	0.72	0.96	0.97	1.05	1.07	1.09	1.2	1.38
NO ₃ -N	oxic	0.015	0.198	0.062	0.046	0.044	0.025	0.017	0.014	0.016	0.010
	anoxic	0.015	0.055	0.021	0.013	0.010	0.008	0.009	0.007	0.006	0.003

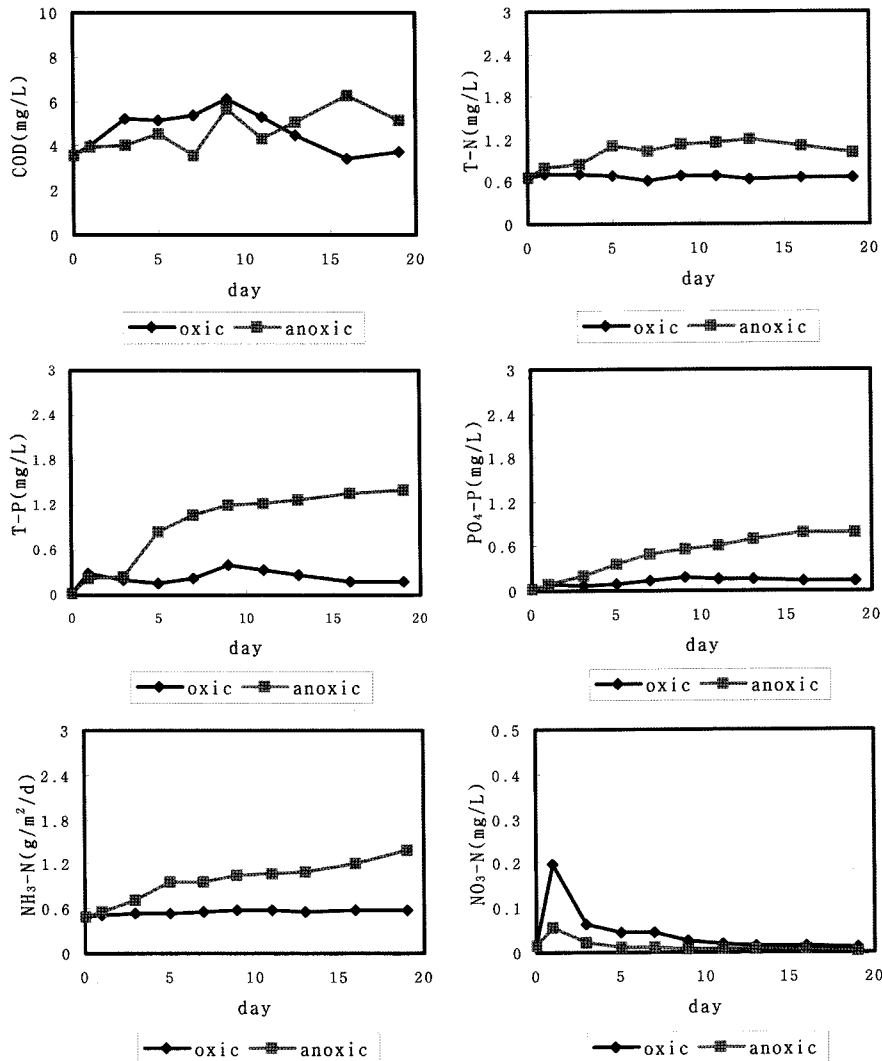


Fig. 3. Graphical presentation of analyses from release experiments under oxic or anoxic conditions. The sediments were sampled at point A.

3.1.1.2. 질소 계열 분석

호기성 조건에서 NH₃-N농도의 변화는 0.49 mg/L에서 0.59 mg/L로 증가폭이 적었으며 혐기성 조건에서는 호기성조건보다 2.5배 더 증가한 1.38 mg/L로 나타났다. NO₃-N농도의 변화는 호기성 조건에서 0.015 mg/L에서 0.010 mg/L로 감소하였으며 혐기성 조건에서는 0.015 mg/L에서 0.003 mg/L로 약 5배 감소하였다. 암모니아는 퇴적물 중에 포획되어 있다가 용출되는 것으로 보이는데 NO_x로의 산화를 동반하는 호기조건에서 보다 혐기성 분위기에서 훨씬 높게 용출되었다.

종합적으로 T-N농도의 변화는 호기성 조건에서 0.65 mg/L에서 거의 변화가 없었으며 혐기성 조건의 경우 1.00 mg/L로 증가한 것으로 나타나 암모니아의 용출에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다.

3.1.1.3. 인 계열 분석

인 계열 분석 결과, T-P 및 PO₄-P가 시간에 따라 지속적으로

로 증가하는 양상을 보였으며 호기성 조건에서 약 7~9배 농도상승이 일어났으며 혐기조건에서는 50~60배 증가로 나타났다. T-N의 경우 증가폭이 작은 반면 인 계열의 농도 증가는 매우 현저하여 용출이 우려되는 성분으로 인 계열을 주목해야 함을 확인할 수 있었다.

인의 경우 pH나 산화·환원 전위(Redox Potential)의 변화로 나타나는 용존산소의 영향이 지대한 것으로 알려져 있다. 본 실험에서 혐기조와 호기조의 pH 상태는 9와 8 정도로 실험기간동안 큰 변화가 없었다. 이로 미루어 ORP는 혐기성 반응조에서 더 낮다고 추정되며 이와 같은 환원 분위기 하에서 무기인의 용출이 가속화될 수 있다고 보여진다. 또한 혐기조건에서 생존하는 미생물이 세포외로 무기인을 방출하는 경향이 강해지므로 인의 용출이 급격히 증가하였다.

3.1.2. B지점

혐기성 및 호기성의 조건하에서 B지점의 COD, T-N, NH₃-N,

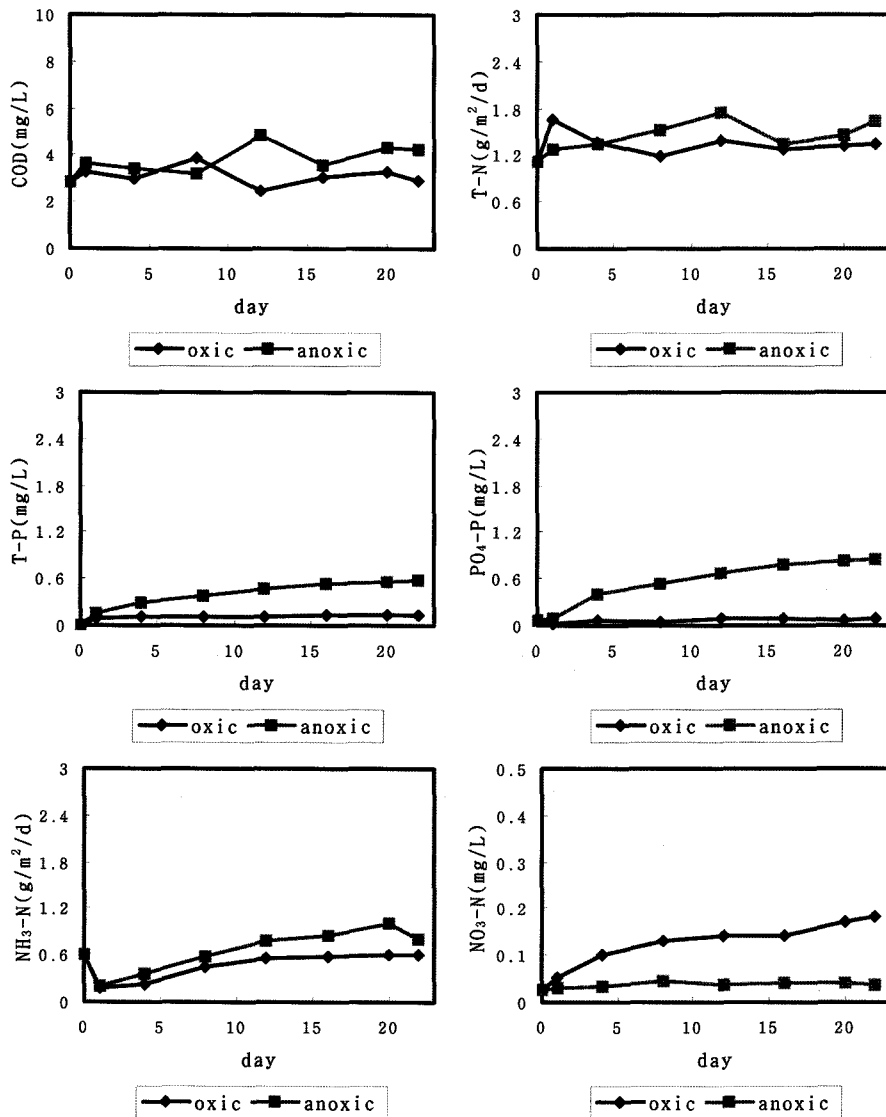


Fig. 4. Graphical presentation of analyses from release experiments under oxic or anoxic conditions. The sediments were sampled at point B.

Table 2. Concentration(mg/L) of analyses with time release experiments under oxic or anoxic conditions. The sediments were sampled at point B.

		hr	0	48	96	144	192	240	288	336
COD	oxic	2.80	3.25	2.98	3.91	2.48	3.04	3.31	2.89	
	anoxic	2.80	3.65	3.42	3.20	4.88	3.61	4.31	4.24	
T-N	oxic	1.13	1.33	1.36	1.18	1.38	1.28	1.32	1.34	
	anoxic	1.13	1.27	1.35	1.52	1.74	1.34	1.46	1.63	
T-P	oxic	0.104	0.090	0.106	0.108	0.110	0.133	0.127	0.134	
	anoxic	0.104	0.152	0.299	0.376	0.459	0.529	0.560	0.585	
PO ₄ -P	oxic	0.06	0.02	0.06	0.05	0.08	0.09	0.07	0.09	
	anoxic	0.06	0.09	0.40	0.54	0.67	0.79	0.83	0.85	
NH ₃ -N	oxic	0.60	0.18	0.22	0.45	0.57	0.59	0.60	0.61	
	anoxic	0.60	0.21	0.36	0.59	0.79	0.85	1.00	0.80	
NO ₃ -N	oxic	0.027	0.052	0.102	0.132	0.142	0.142	0.173	0.183	
	anoxic	0.027	0.030	0.033	0.043	0.037	0.042	0.040	0.039	

NO₃-N, T-P, PO₄-P의 영양염의 농도를 산출하였다(Table 2). B 지점의 영양염의 호기성조건과 혐기성 조건의 농도를 비교해 보기 위해 그래프로 나타냈다(Fig. 4).

3.1.2.1. COD 분석

호기성 조건에서 COD농도의 변화는 2.80 mg/L에서 2.89 mg/L로 증가하였으며 혐기성 조건의 경우 2.80 mg/L에서 증감을 반복하다 약 1.5배 증가하였다. 이는 A지점과 실험방법이 동일한 경우로 같은 경향성을 보이고 있다. 즉, COD의 농도변화가 일정하다.

3.1.2.2. 질소 계열 분석

호기성 조건의 경우 NH₃-N의 농도 변화는 일정하였고 혐기성 조건은 0.60 mg/L에서 0.80 mg/L로 약 1.3배 증가하였다. NO₃-N는 호기성 조건의 경우 0.027 mg/L에서 0.183 mg/L로 약 6.7배 큰 폭으로 증가하였고 혐기성 조건에서는 농도의 증가폭이 작았다. 이는 호기성 조건에 용존 산소에 의한 영향으로 용출이 많이 된 것으로 판단된다.

종합적으로 T-N농도의 변화는 호기성 조건에서 미미한 증가를 보였으며 혐기성조건의 경우 약 1.5배 증가했고 이는 NO₃-N 보다 NH₃-N 농도가 증가했기 때문으로 판단된다.

3.1.2.3. 인 계열 분석

T-P 및 PO₄-P는 지속적으로 증가하는 경향을 보였고 특히 혐기성 조건에서 6~15배 증가로 호기성 조건의 1~1.5배 증가에 비해 매우 큰 폭으로 나타났다. 이는 pH가 높은 혐기성 조건에서 무기인들이 용존 유기인으로 많이 용출된다고 판단된다.

3.1.3. C지점

혐기성 및 호기성의 조건하에서 C지점의 COD, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P의 영양염의 농도를 산출하였다(Table 3).

C지점의 영양염의 호기성 조건과 혐기성 조건의 농도를 비교해 보기 위해 그래프로 나타냈다(Fig. 5).

3.1.3.1. COD 분석

호기성 조건에서 COD농도의 증가는 미미하였으며 혐기성 조건의 경우 2.70 mg/L에서 5.86 mg/L로 호기성 조건에 비해 약 2.2배 큰 폭으로 증가하였다.

3.1.3.2. 질소 계열 분석

호기성 조건에서 NH₃-N농도의 변화는 시간이 지나도 일정하였고 혐기성 조건의 경우 0.60 mg/L에서 1.00 mg/L로 증가하였다. 이는 B, A지점과 비슷한 경향을 보이고 있다. 호기성 조건에서 NO₃-N농도의 변화는 0.027 mg/L에서 0.173 mg/L로 약 6.4배 증가하였으며 혐기성 조건의 경우 0.040 mg/L로 약 1.5배 증가하였다.

종합적으로 T-N농도의 변화는 호기성 조건과 혐기성 조건의 경우 각각 1.19 mg/L에서 1.29 mg/L와 1.46 mg/L로 약 1~1.5배 증가하였다.

3.1.3.3. 인 계열 분석

호기성 조건의 T-P 및 PO₄-P농도의 변화는 약 1~1.5배 증가하는 경향을 보이고 있으며 혐기성 조건의 경우 약 5.5~14배 증가하였다. 혐기성 조건에서 높은 농도를 나타내고 있어 B지점과 비슷한 추세를 보이며 이러한 요인 중의 하나로 혐기성 상태를 선호하는 미생물의 활성 증가를 생각해 볼 수 있다. 따라서 구체적인 퇴적물에 분포하는 미생물에 대해 향후 추가 연구가 필요하다고 생각된다.

3.1.4. 각 지점의 용출 농도의 분석과 고찰

COD는 A 지점이 호기성 조건에서 3.75 mg/L로 가장 높은 용출 농도를 나타냈지만 혐기성 조건에서는 C 지점이 5.86 mg/L로 호기성 조건보다 약 1.5배 높은 값을 나타냈다.

Table 3. Concentration(mg/L) of analyses with time release experiments under oxic or anoxic conditions. The sediments were sampled at point C

		hr	0	48	96	144	192	240	288
COD	oxic	2.70	2.90	3.16	3.78	3.10	3.75	2.98	
	anoxic	2.70	4.50	5.88	5.77	7.95	5.75	5.86	
T-N	oxic	1.19	1.32	1.36	1.22	1.30	1.32	1.29	
	anoxic	1.19	0.99	1.35	1.53	1.77	1.50	1.46	
T-P	oxic	0.104	0.037	0.217	0.399	0.558	0.133	0.127	
	anoxic	0.104	0.085	0.534	0.637	0.670	0.529	0.560	
PO ₄ -P	oxic	0.003	0.003	0.271	0.595	0.832	0.097	0.070	
	anoxic	0.003	0.076	0.807	0.890	0.933	0.790	0.830	
NH ₃ -N	oxic	0.60	0.20	0.42	0.59	0.52	0.59	0.60	
	anoxic	0.60	0.38	0.45	0.70	0.71	0.85	1.00	
NO ₃ -N	oxic	0.027	0.101	0.156	0.189	0.193	0.142	0.173	
	anoxic	0.027	0.014	0.072	0.124	0.178	0.042	0.040	

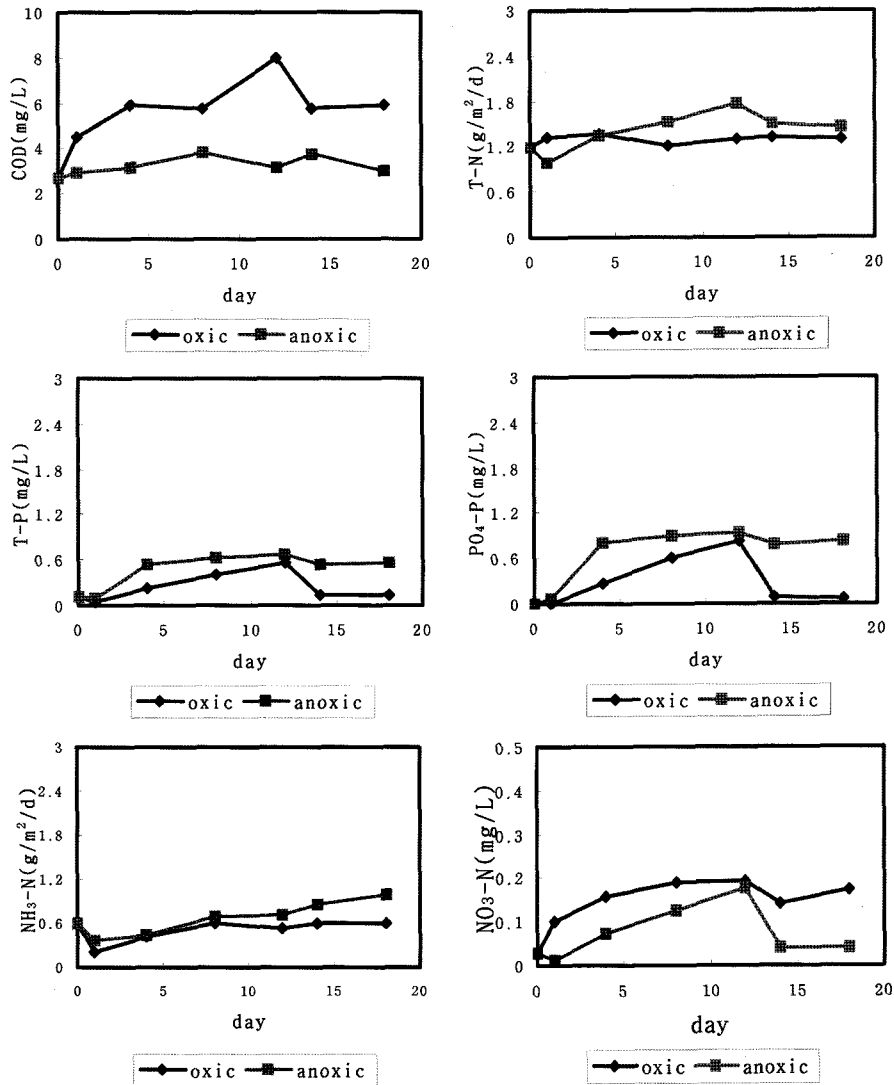


Fig. 5. Graphical presentation of analyses from release experiments under oxic or anoxic conditions. The sediments were sampled at point C.

NH₃-N는 세 지점 모두 호기성 조건에서 용출 농도의 변화가 적은 반면 혐기성조건에서는 A지점이 시간에 따라 최종 약 2.8배나 증가하여 높은 용출 농도를 보였다. NO₃-N는 A지점을 제외하고 호기성 조건에서는 증가폭이 컸다. 특히 B지점의 경우 처음 농도보다 약 6.7배 증가하였다. T-N의 경우 B지점에서 높은 용출 농도를 나타내고 있다.

T-P 및 PO₄-P의 경우 A와 C지점의 용출 농도가 높게 측정되었다. 호기성 조건에서는 A지점의 T-P와 PO₄-P의 용출 농도는 약 7~9배로 높게 나타났다. 혐기성 조건일 경우 PO₄-P의 경우 C지점에서 무려 처음 농도의 약 276배 증가한 높은 용출 농도를 보였으며 T-P의 경우 A지점에서 약 63배 증가하여 높은 용출 농도를 보였다. 이는 Gomez 등의 혐기성 조건에서 인이 높은 용출율을 보였다는 결과와 같다.¹³⁾

각 지점에 따른 용출 농도는 대체적으로 A지점에서 높은 값을 나타냈는데 이는 호수로 물이 유입되면서 퇴적을 방해하고 흐름을 형성하므로 영양염의 축적이 상대적으로 적기

때문이라 판단되며 반대로 B지점은 방조제 근처의 흐름이 완만한 구역으로 영양염들의 퇴적이 큰 편으로 용출이 나타났다고 판단된다. C지점의 경우 정체구역으로 오염도가 높아 B지점보다 영양염이 대부분 높게 측정되었다. 전반적으로 COD의 용출은 작게 나타나는 반면 질소 계열과 특히 인 계열의 용출은 매우 크게 나타났다.

3.2. 퇴적물의 COD 및 영양염 용출율 계산

3.2.1. 용출율 계산식

퇴적물로부터 분석 항목에 대한 용출율 산정은 현재 용출 평가에 널리 사용되는 Hiltje와 Lijklema의 방법을 사용하였다.¹⁴⁾

퇴적물에서의 용출율은 반응조가 완전 혼합되며 반응조내의 농도 변화가 유입, 유출, 퇴적물의 직상수 접촉면으로부터의 용출에만 관계된다고 가정하고 대상물질에 대한 다음과 같은 물질수지식에 의해 산정하였다.²⁾

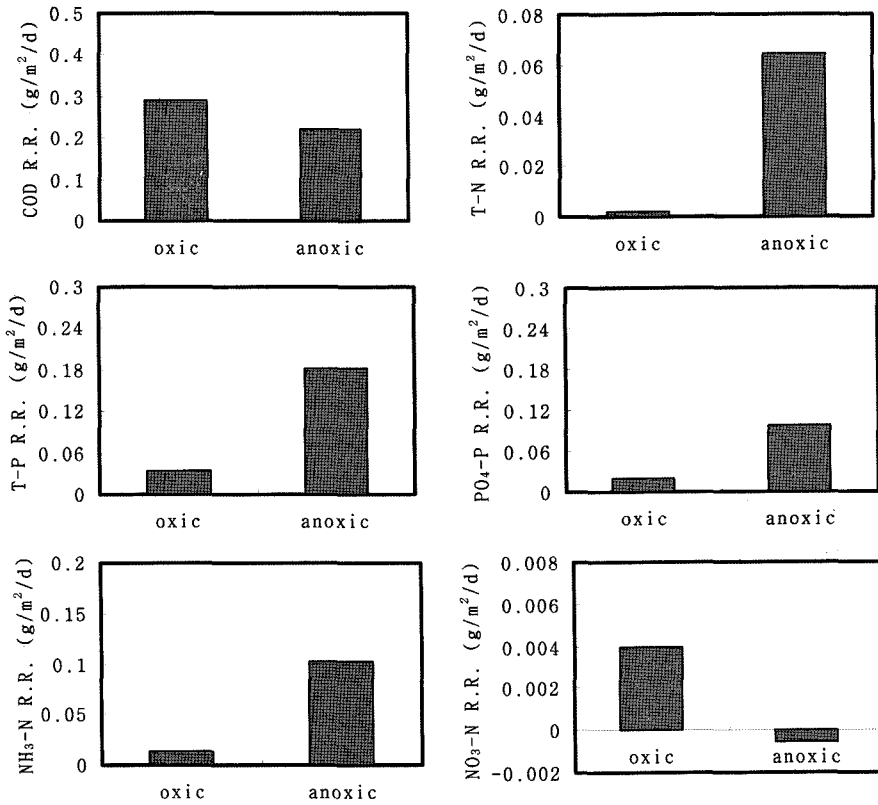


Fig. 6. Release rates(R. R.) of pollution substances sampled at point A calculated from Eq.(1).

$$r(g/m^2/d) = \frac{V_1(C_n - C_0) + \sum V_2(C_{n-1} - C_a)}{At} \quad (1)$$

- r : 용출율(g/m²/d)
- V₁ : 코아상등수의 체적(m³)
- C_n : n회 채수시의 상등수 영양염의 농도(mg/L)
- C₀ : 상등수의 초기 영양염의 농도(mg/L)
- C_a : 첨가된 호수의 영양염 농도(mg/L)
- V₂ : 분석하기 위하여 채수한 체적(m³)
- A : 상등수와 접하는 core의 저니 면적(m²)
- t : 평균 채수 일 간격(day)

3.2.2. 용출속도 산출

3.2.2.1. A지점

A지점의 혐기성 및 호기성의 조건하에서 COD, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P, 유기인의 영양염의 용출속도를 산출하였다(Table 4, Fig. 6).

COD는 호기성 조건에서 0.291 g/m²/d로 혐기성 조건에서 보다 높은 용출율을 보였다.

NH₃-N은 혐기성 조건에서 용출율은 호기성 조건보다 약 7.3배 높은 0.103 g/m²/d이고, 호기성 조건에서 거의 용출이 없는 상태로, NO₃-N, NO₂-N으로 용출되는 질산화 작용에 의한 것이라 판단된다. NO₃-N는 질산화 작용에 의해 호기성 조건에서 높은 용출율이 나타났다. T-N은 호기성 조건에서 0.002 g/m²/d이고 혐기성 조건 보다 약 32.5배 많이 나타났

는데 이는 탈질반응으로 인한 것이라 판단된다.

혐기성 조건의 경우 PO₄-P는 0.097 g/m²/d이고, 호기성 조건에서는 0.020 g/m²/d로 거의 용출이 없는 상태로 나타났다. 이와 같은 결과는 호기성 조건에서는 용존산소의 과량으로 인하여 무기물이 산화되면서 인의 용출이 억제됨에 의한 것으로 판단되며 혐기성 조건에서 pH가 높기 때문에 무기인들이 용존 유기인으로 많이 용출된다고 생각된다. T-P는 혐기성조건에서 용출율은 호기성 조건 보다 약 5.2배 높은 0.182 g/m²/d으로 나타났다.

Table 4. Release rates summarized at all three locations(A, B and C)

		A	B	C
COD	oxic	0.291	0.022	0.248
	anoxic	0.222	0.108	0.037
T-N	oxic	0.002	0.006	0.008
	anoxic	0.065	0.035	0.019
T-P	oxic	0.035	0.001	0.008
	anoxic	0.182	0.033	0.032
PO ₄ -P	oxic	0.020	0.001	0.018
	anoxic	0.097	0.055	0.058
NH ₃ -N	oxic	0.014	-0.009	-0.006
	anoxic	0.103	0.009	0.014
NO ₃ -N	oxic	0.004	0.010	0.010
	anoxic	-0.0005	0.001	0.003

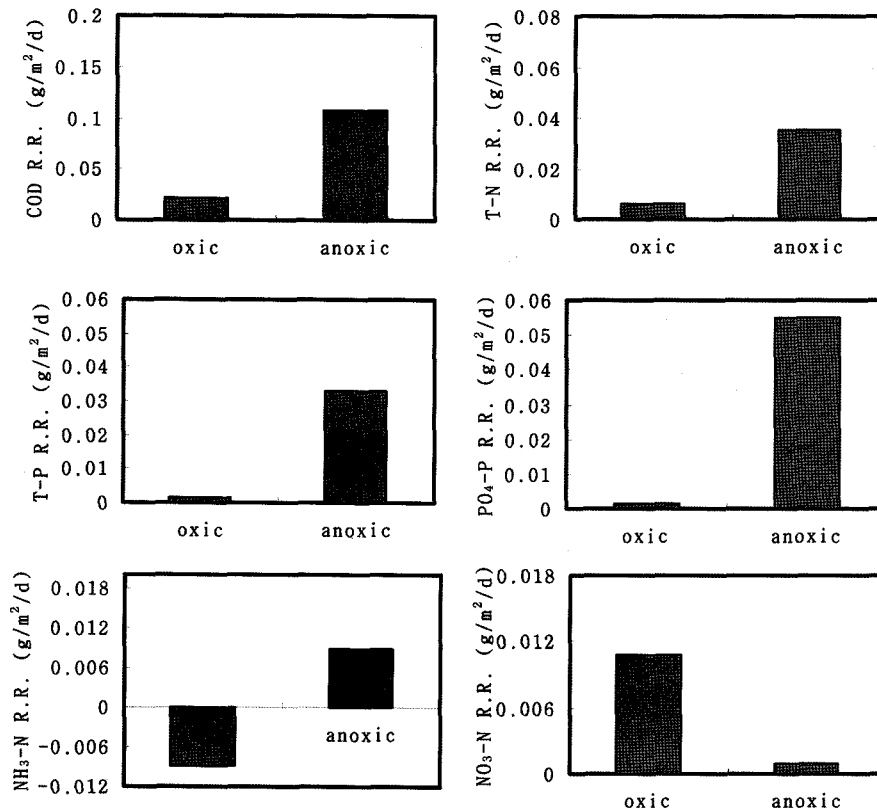


Fig. 7. Release rates(R. R.) of pollution substances sampled at point B calculated from Eq.(1).

3.2.2.2. B지점

B지점의 혐기성 및 호기성의 조건하에서 COD, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P, 유기인의 영양염의 용출속도를 산출하였다(Table 4, Fig. 7).

COD의 용출율은 0.108 g/m²/d로 혐기성 조건에서 더 높았으며 호기성 조건의 용출율이 높았던 A지점과는 다른 경향을 보이고 있다.

NH₃-N은 혐기성 조건에서 용출율이 0.009 g/m²/d이고, 호기성 조건에서는 용출이 없는 상태로 나타났다. A지점과 마찬가지로 질산화 작용에 의한 것이라 판단된다. NO₃-N의 경우 혐기성조건에서 0.001 g/m²/d, 호기성조건에서 0.010 g/m²/d로 약 10배 용출율이 많이 나타났다. T-N의 혐기성조건에서는 호기성 조건의 경우보다 약 5.8배 높은 0.035 g/m²/d로 혐기성조건에서 용출율이 높았다.

PO₄-P의 경우 혐기성 조건에서의 용출율은 호기성 조건일 경우보다 약 55배 높은 0.055 g/m²/d이고, 호기성 조건에서는 거의 용출이 없는 상태로 나타났는데, A지점과 마찬가지로 호기성조건에서는 용존산소의 과량으로 판단된다. 혐기성에서 T-P의 혐기성 조건의 용출율은 호기성에서보다 약 33배 높은 0.033 g/m²/d로 혐기성에서 더 높은 용출율을 나타냈다.

3.2.2.3. C지점

C지점의 혐기성 및 호기성의 조건하에서 COD, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P, 유기인의 영양염의 용출속도를 산출하

였다(Table 4, Fig. 8).

호기성 및 혐기성 조건하에서의 COD는 호기성 조건의 경우 혐기성 조건보다 용출율이 더 높았다.

NH₃-N은 혐기성 조건에 용출율이 0.014 g/m²/d이고, 호기성 조건에서는 용출이 없는 상태로 나타났다. NO₃-N의 용출율은 혐기성조건보다 호기성조건에서 용출율 3배 가량 높았고 이는 폭기로 인하여 NH₃-N 등의 질소가 NO₃-N, NO₂-N으로 질산화 되었기 때문이다. T-N는 혐기성조건의 경우 0.019 g/m²/d로 약 2.4배 용출율이 높았는데 이는 탈질반응으로 판단된다.

혐기성조건에서 PO₄-P의 용출율은 0.058 g/m²/d로 호기성 조건에 비해 약 3.2배 높았으며 호기성조건에서는 거의 용출이 없는 상태로 나타났다. 이와 같은 결과는 호기성조건에서 과량의 용존산소로 인하여 인의 세포내 축적이 이루어지면서 인의 용출이 억제 된 것으로 판단된다. T-P는 혐기성조건에서의 용출율은 0.032 g/m²/d로 호기성조건에서의 용출율에 비해 약 4배 높은 용출율을 나타냈다.

3.3. 용출특성 및 용출율 계산에 대한 고찰

COD의 경우 A, B, C 지점의 용출율은 매우 난해한 양상을 보였는데 폭기에 의한 혼합효과와 DO 농도가 잔류하는 표층의 COD성분에 큰 영향을 준 것으로 사료된다.

NH₃-N의 경우 호기성 조건에서 용출율은 B, C지점에서 거의 0이었으며 혐기조건에서는 A, C, B순으로 점차 낮아졌다. NO₃-N은 호기조건에서 질산화 경향이 커진 것을 보여주고 있

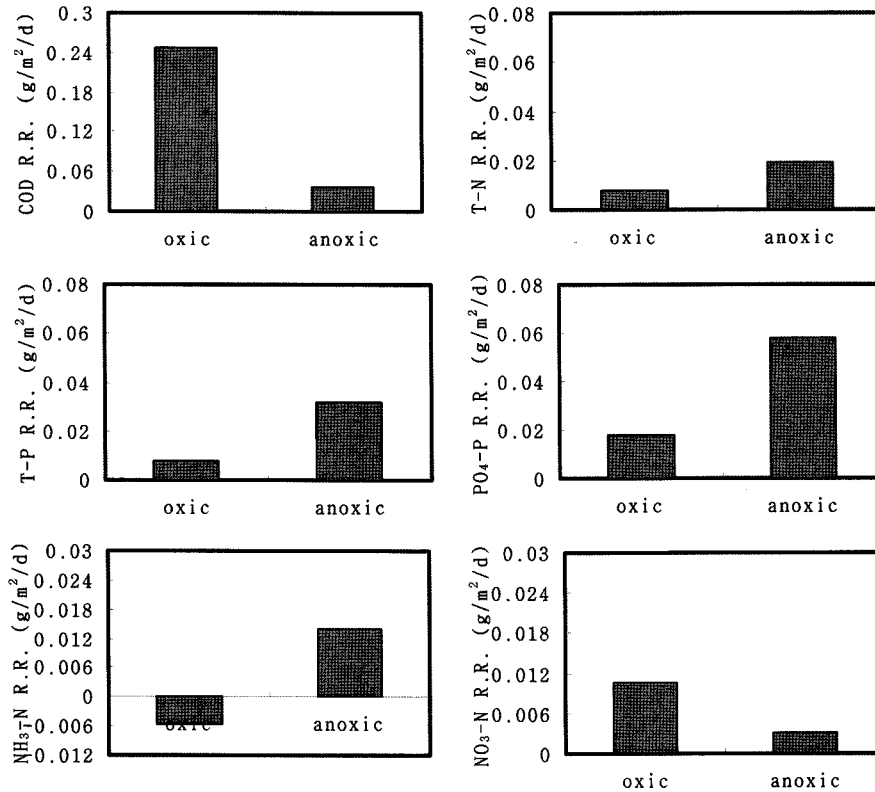


Fig. 8. Release rates(R. R.) of pollution substances sampled at point C, calculated from Eq.(1).

으며 혐기조건에서는 A에서 C지점으로 갈수록 증가하였다. 이는 탈질화 작용으로 인한 환원 작용이라 판단된다. T-N은 호기조건에서 증감은 미미한 편이었으며 혐기성에서는 A에서 C지점 순으로 감소하였다.

PO₄-P의 용출율은 호기성 조건에서 B지점을 제외하고 용출을 변화의 폭이 적고 비슷한 용출율을 보이고 있으며 T-P의 용출율은 B지점일 경우 0.001 g/m²/d로 낮았으며 A지점의 용출율이 가장 높게 나왔다.

PO₄-P의 혐기성조건에서 용출율은 A지점에서 높게 측정되었고 나머지 두 지점은 비슷한 경향을 보이고 있다. Lee 등이 댐 저수지의 인 용출이 재침강과 이후 수내 침층 퇴적과정 때문에 억제 된다³⁾는 평가는 수심이 상대적으로 매우 낮고 상당한 물의 흐름이 존재하는 이원호의 경우와는 구별된다고 하겠다. T-P의 혐기성조건에서 용출율은 A지점에서 C지점으로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 흐름이 많은 A지점에서의 인 용출은 바다와 인접해 있는 호수의 특성상 염분의 농도가 더 높을 것으로 사료되며 Paulo 등의 바닷물 농도에 따른 실험을 통해 염분이 높을수록 인의 용출이 높다¹²⁾는 결론과 일치한다.

전체적으로 혐기성 조건에서 용출이 잘 일어나며, 유속이 큰 호수 입구(A지점)에서 B와 C의 안쪽지역보다 용출이 크게 나타났다. 즉 입구 지역은 유속으로 대변되는 물의 유동성이 큰 지역이어서 용출이 상대적으로 클 것으로 기대되지만, 오히려 유입부이기 때문에 퇴적도 커질 가능성이 높다. 퇴적물의 총인 측정결과를 보면 A지점이 0.18±0.06 mg/g-

sediment로 B, C지점보다 약 1.5~3.4배 큰 것으로 나타나 본질적으로 퇴적에 의한 인의 축적이 유속 등의 다른 요인보다 인의 용출에 결정적으로 기여함을 알 수 있었다. 혐기성 조건에서의 용출은 호수의 연령을 감안할 때 특히 토착 미생물에 의한 인의 방출과 산화·환원전위의 감소와 관계가 깊다고 생각된다(실험 조건에서 혐기조의 pH는 약 9에 가까움).

4. 결론

COD는 혐기조일 경우 A지점에서 C지점으로 갈수록 용출율이 증가한 반면, 호기조일 경우 증·감의 경향성이 없어 매우 난해한 양상을 보였다. NH₃-N의 호기조일 경우 용출율이 미미하였으며 A에서 C지점으로 갈수록 감소하였고, 반대로 NO₃-N과 T-N은 A에서 C지점으로 갈수록 용출율이 증가하였다. NH₃-N, NO₃-N의 혐기조는 A지점에서 C지점으로 갈수록 용출율이 증가하였으나 T-N의 용출율은 감소하였다. PO₄-P, T-P의 경우 호기조에서 B지점의 용출율이 가장 낮았다. 혐기성 조건에서 PO₄-P는 A에서 C지점의 용출율이 서로 유사하였으며 T-P의 용출율은 A에서 C지점으로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

각 지점에 따른 용출 농도와 용출율은 대체적으로 A지점에서 높은 값을 나타냈으며 반대로 B지점은 용출 농도와 용출율이 낮았다. C지점의 경우 B지점보다 영양염이 대부분 높게 측정되었다.

참고문헌

1. Hong, H. J., Park, J. M., Kim, D. H., and Lim, H. B., "Determination of Heavy Metals in Surface Sediments of Lake Shihwa," *J. Korean Sci Environ. Analysis*, **8**(1), 1~6(2005).
2. Lee, S. H. and Kim, Y. H., "A Study on the Nutrient Release in Artificial lake Sediments," *Environ. Res.*, **15**(2), 25~33(1996).
3. Lee, Y. S., Lee, K. S., "A Study on Release Characteristics of Sediment and its Impacts on Water Quality in Daechong dam Reservoir," *Korean, Sci. Environ. Impact Assessment*, **9**(2), 99~107(2000).
4. Lee, S. D., Lee, G. Y., and Park, J. K., "A Study on the Physicochemical Characteristics of sediments in the Estuary of Geumgang(River)," *J. Korea Sci. Environ. Administration*, **11**(3), 189~197(2005).
5. Seo, D. I., "Stratification Characteristics and Water Quality Management Strategies of the Daechung Lake," *Department Environ. Engineering*, Chungnam National University(1998).
6. M, D. Y., Kim, B. Y., Jeung, J. J., Son, J. B., Kwon, J. H., Kim, T. H., Jin, S. Y., and Kwack, M. J., "A Study on the Correlation between the Water Pollution and Sediments," *Public Health Environ. institute of Jeollabuk-do Industrial Waste Analysis Division*(2001).
7. 김봉진, 박동규 외, "Phosphorus Fractionation and Metals Speciation in the Sediments of Southern Coastal Area of Korea," *J. Korean Sci. Environ. Engineers*, **17**(7), 661~674(1995).
8. Jun, S. H. and Park, Y. A., "Forms and Mobility of Sediment Phosphorus in Lake soyang," *Korean J. Limnology*, **22**(3), 261~271(1989).
9. 전상호, "소양호의 표층퇴적물에 함유된 인의 존재형태에 대하여," *한국지구과학회지*, **6**(2), 57~62(1985).
10. Lee, Y. S. and Lee, K. S., "Organic Sediment Distribution and Release Characteristics on Lake Daechung," *Korea Institute of Water and Environ., Korean Sci. Environ. Engineers*, **26**(6), 665~669(2004).
11. Nurnburg, G. K., "prediction of release rates from total and reductant-soluble phosphorus in anoxic lake sediments," *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **45**, 453~462(1988).
12. Paulo, C. F. C., Paul, J., Worsfold, Ian D., and McKelvic., "Seawater induced release and transformation of organic and inorganic phosphorus from river sediments," *Water Res.*, **38**, 688~692(2004).
13. Gomez, E., Durillon, C., Rofes, G., and Picot, B., "Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons: pH, O₂, and loading influence," *Water Res.*, **33**(10), 2437~2447(1999).
14. Hieltjes, A. H. M. and Lijklema. L., "Fractrionation of inorganic phosphates in calcareous sediments," *J. Environ. Qual.*, **9**, 405~407(1980).