

저수지 퇴적물로부터 인의 존재형태가 수질에 미치는 영향에 대한 연구 A Study on the Influence of Water Quality on the Phosphorus Fraction Properties from Reservoir Sediments

이진경 · 안태웅* · 오종민**[†]
Jin-Kyung Lee · Tae-Woong Ahn* · Jong-Min Oh**[†]

한국농어촌공사 농어촌연구원 · *경희대학교 환경응용과학과 · **경희대학교 환경학 및 환경공학과/환경연구센터
Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

*Department of Environment and Applied Chemistry, Kyung Hee University

**Department of Environmental Science and Engineering/Center for Environmental Studies, Kyung Hee University

(2010년 7월 15일 접수, 2010년 9월 17일 채택)

Abstract : The present study was attempted to find the effects of structural properties of phosphorus on the water quality of Gye-hwa reservoir in Saemangeum. Relationship of phosphorus fractions between water and sediment properties was closely examined, and a few types of phosphorus were found from the sample sediment as : Saloid-P, Al-P, Fe-P, Ca-P, Red-P and Occd-P. Saloid-P (1.4%), Al-P (0.5%), Fe-P (39.8%), Ca-P (56.6%), Red-P (0.4%), Occd-P (1.3%) were extracted in a mass basis from the sediment of Gye-hwa reservoir. Approximately more than 97% of phosphorus were calcium related phosphorus (Ca-P, 56%) and iron bound phosphorus (Fe-P, 39.8%). The Fe-P closely relates with water quality of T-N ($r=0.761$, $p<0.05$), $\text{NO}_3\text{-N}$ ($r=0.754$, $p<0.05$), $\text{NH}_4\text{-N}$ ($r=0.728$, $p<0.05$), T-P ($r=0.774$, $p<0.05$) and $\text{PO}_4\text{-P}$ ($r=0.767$, $p<0.05$) while the Ca-P did not show any consistent dependency on the water quality. On the other hand, the correlation of Ca-P with P_2O_5 was high with $r=0.783$ ($p<0.05$) in the sediment. The Fe-P was affected significantly on the Ignition Loss ($r=0.569$, $p<0.05$), T-N ($r=0.715$, $p<0.05$) and T-P ($r=0.983$, $p<0.01$). In the research of correlation between phosphorus fraction and heavy metals in the sediment, Ca-P did not show any specific relationships with heavy metals. The Fe-P showed a significant correlation with As ($r=0.817$, $p<0.01$), Cu ($r=0.793$, $p<0.05$), Cd ($r=0.786$, $p<0.05$), Zn ($r=0.738$, $p<0.05$), so that it can be stated that the presence of Fe-P may implicate the volume of various metallic elements.

Key Words : Phosphorus, Sediment, Water Quality, Heavy Metals, Correlation, Gye-hwa Reservoir

요약 : 새만금호와 인접한 배후지역에 위치하며 새만금 수질에 직·간접적으로 영향을 미치는 간척농지 지구 계화조류지를 대상으로 환경변화에 의해 수계로 용출되어 부영양화의 주원인이 되는 인의 존재형태와 수계내 영향인자 사이의 상관관계를 분석하였다. 계화조류지 퇴적물 내 인의 존재형태 조사 결과, 전체적으로 Saloid-P의 형태가 2.28~7.75 mg/kg(1.4%), Al-P 0.34~5.36 mg/kg (0.5%), Fe-P 31.04~837.25 mg/kg (39.8%), Ca-P 149.91~257.09 mg/kg (56.6%), Red-P 0.29~2.07 mg/kg (0.4%), Occd-P 2.23~8.89 mg/kg (1.3%)를 나타냈다. 퇴적물내 인의 존재형태를 비교하면, 계화조류지는 Ca-P (56.6%)와 Fe-P (39.8%)의 형태가 97% 이상이며, 계화조류지 퇴적물내 인의 형태중 대부분을 차지하는 Ca-P와 Fe-P의 형태에 영향을 미치는 수계내 인자를 분석한 결과, Fe-P는 총질소(T-N) ($r=0.761$, $p<0.05$)와 질산성질소($\text{NO}_3\text{-P}$) ($r=0.754$, $p<0.05$), 암모니아성질소($\text{NH}_4\text{-N}$) ($r=0.728$, $p<0.05$), 총인(T-P) ($r=0.774$, $p<0.05$), 용존성 무기인($\text{PO}_4\text{-P}$) ($r=0.767$, $p<0.05$)과 유의성 있는 상관관계를 나타냈으나 Ca-P의 형태는 조사항목 중 수계내 인자와의 유의성을 발견하지 못하였다. 퇴적물내 중금속이 인의 존재형태에 미치는 영향 조사 결과, Ca-P 형태의 인은 특정 중금속과 상관관계를 나타내지 않았으나, Fe-P 형태의 인은 비소(As) ($r=0.817$, $p<0.01$), 구리(Cu) ($r=0.793$, $p<0.05$), 카드뮴(Cd) ($r=0.786$, $p<0.05$), 아연(Zn) ($r=0.738$, $p<0.05$)과 높은 상관관계를 보였다.

주제어 : 인, 퇴적물, 수질, 중금속, 상관관계, 계화조류지

1. 서론

새만금 개발 사업은 군산에서 부안을 연결하는 33 Km의 방조제를 축조하여 간척토지 28,300 ha와 호소 11,800 ha를 조성함으로써 농지 확보와 농업용수의 공급 목적을 위한 대규모 국책사업으로 시행되었다. 그러나 끝막이 공사가 완료된 현재의 새만금 수역에서는 만경강, 동진강을 통하여 고농도의 영양염류와 유기물질을 함유한 담수가 유입되고 있고, 가력 배수갑문, 신시배수갑문을 통해 수질이 양호한 해수가 유·출입을 하고 있다. 이러한 과정에서 새만금 수역에 위치한 호소수나 하천수의 유입은 새만금 수질

에 직·간접적으로 영향을 미치게 되며 장기간 오염물질이 유입될 경우 새만금 개발 사업을 통해 확보된 농업용수의 수질 악화로 농업용수의 기능을 유지하기 어렵게 될 우려가 있다.

농업활동으로 인해 발생된 오염원이 강우에 의해 지표 유출수를 거쳐 농지 부근의 호소수로 직접 유입되거나 시비, 물 관리, 토양관리 등의 재배형태를 통한 비점오염원의 작용으로 주변 하천이나 호소로 유입, 부영양화를 일으키는 등 일반 호소와는 다른 특성을 가진다고 할 수 있다. 우리나라의 간척농경지는 거의 대부분 논으로 이루어져 있고 논을 구성하는 토양 역시 바다나 하구의 준설토로 이루어

[†] Corresponding author E-mail: jmoh@knu.ac.kr Tel: 031-201-2461 Fax: 031-203-4589

져 있거나 경작이 이루어지는 동안 작물생육을 최적화할 수 있도록 수많은 객토작업이 이루어지므로 일반적인 논과는 분명한 차이가 있다.¹⁾

연안 유역은 외해와는 달리 여러 인간 활동에 의해 발생되어진 오염물질의 영향에 상당히 민감한 생태계를 이루고 있다.^{2,3)} 유역의 오염물질은 수계 환경으로 유입되어 순환과정을 거치면서 최종적으로 저장고 역할을 하는 퇴적층에 저장되게 되고, 유역으로부터 오염원이 차단되더라도 오염된 퇴적층은 그 수계의 지속적인 오염원으로 작용하게 되는 경우가 상당하다. 여러 가지 요인 중에서도 특히 오염물질의 형태가 용존 상태로 쉽게 변할 수 있는 조성을 갖는다면 상부 수층을 오염시킬 가능성이 그만큼 커지게 된다.

퇴적물에 존재하며 오염물질로 작용하는 여러 물질 중 고농도의 인은 물리, 화학 및 생물학적 변화에 민감하게 반응하여 수중 생태계로 용출됨으로써 수질의 부영양화 현상을 초래하고 수질오염을 악화시키는 주요 원인이 된다.⁴⁾ 인(phosphorus)은 퇴적물 입자로부터 인의 탈착, 용해, 음이온의 치환, 가수분해 및 미생물의 활동 등에 의해 간극수로 이동하게 되며, 간극수로 이동한 인은 확산, 난류와 와류, 저서생물의 활동 및 가스 발생 등에 의해 상부수층으로 이동하게 됨으로써 수질의 악화를 초래하게 된다.⁵⁻⁷⁾ 이들의 용출 및 이동성을 파악하는 데는 인과 중금속의 총함량(total content) 분석만으로는 평가할 수 없으며, 존재형태별 함량 분석이 퇴적물에 의한 수질 오염 가능성을 평가하는데 기본이 된다고 판단된다. 그리고 지금까지 우리나라의 일반 호소 퇴적물에 대한 연구는 활발하게 이루어지고 있으나 간척농지 유역에 대한 연구는 여전히 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 새만금 유역의 전형적인 간척농지 지구 계화유역을 대상으로 수질오염 특성 및 퇴적물의 다양한 특성에 대하여 분석하고, 여러 오염물질 중 환경변화에 따라 수계로 용출, 부영양화의 주원인이 되는 인의 존재형태와 영향인자의 상관관계를 분석함으로써 농업용 호소수의 수질을 개선하고 관리하는데 활용 가능하리라 판단되며, 그 가치가 높을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1. 조사지점

연구의 조사지점은 계화조류지의 용수공급과 배수를 고려하여 오염물질이 유입되는 지점을 중심으로 대표지점을 선정(Fig. 1)하여 분석하였다. 수질 및 퇴적물 특성 분석을 위해 총 9개 지점(GHS 1~9)을 선정하여 조사하였다. 또한, 인의 존재형태 파악을 위해 1, 2차 조사 시 대표지점을 선정하여 분석하였으며 결과 검증을 위해 3차에서는 전 지점에 대하여 분석을 실시하였다.

계화 간척지에 공급된 관개용수 및 강우는 GHS 2지점 상류, GHS 1지점과 GHS 2지점 사이의 배수로, GHS 8 상류의 소하천을 통해 주로 유입이 이루어지고, 배수장 펌핑

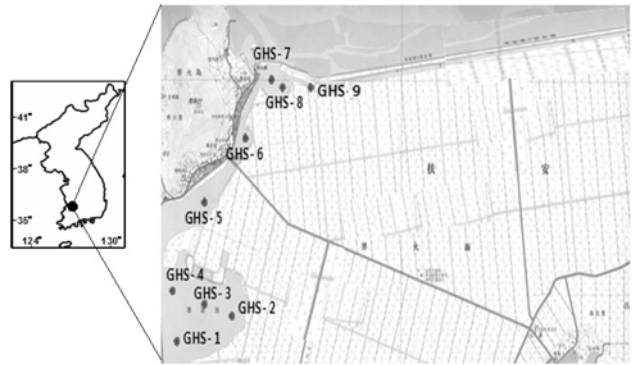


Fig. 1. Sampling points in Gyehwa reservoir.

시 GHS 1~4지점에 유입된다. GHS 5~6 조사지역은 간척지로부터의 유입이 크게 이루어지지 않으며, GHS 5지역은 펌핑 시 GHS 1~4지역의 물이 흘러 유입되고, 호수 GHS 6지역은 GHS 5를 지나온 GHS 1~4지역의 물의 유입과 배수장에서 펌핑하지 않을 경우 호수 GHS 7~9지역의 물이 유입되어 혼합된다.

2.2. 실험방법

2.2.1 수질분석

수질 분석용 시료는 정점 표층에서 채수한 시료를 0.1 N 질산(HNO₃) 용액으로 세척한 1 L 폴리에틸렌 병에 저장한 후 드라이아이스가 채워진 아이스박스에서 보관하였다. DIN (NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N), DIP (PO₄-P)는 현장에서 채수한 시료를 바로 여과한 후 100 mL 폴리에틸렌 병에 넣어 냉동보관 후 실험실로 옮겨 분석하였다. 부유물질농도(SS), 엽록소a 분석을 위한 표층시료 100~1,000 mL 정도를 유리 섬유여과지(GF/C)로 여과하고 그 여과지를 알루미늄 호일로 감싼 후 드라이아이스가 채워진 아이스박스에 넣어 실험실로 옮겼으며 분석 전 까지 냉동 보관하였다. 수질분석은 수질오염공정시험법에 의해 실시하였으며, 분석방법은 Table 1에 나타내었다.

2.2.2. 퇴적물 분석

퇴적물 분석용 시료는 계화조류지의 퇴적물 특성 및 인 용출실험을 위하여 퇴적물 시료를 채취하였다. 시료를 Grab sampler를 이용하여 채취 후, 공기와 접촉이 없도록 밀봉하여 냉암 상태로 운반하였으며, 실험실로 옮겨 풍건 건조 후, 2 mm 체로 거른 토양시료를 퇴적층 내부의 물리·화학 특성 및 인의 형태 분석 시료로 사용하였다.

pH 측정(H₂O)은 직접측정법을 사용하였으며, 토양과 물의 비율은 1:5로 하여 현탁액을 만들어 pH meter (HW-10P)를 이용하여서 측정하였다. 그리고 함수율 조사는 함수율을 구하는데 있어서는 건식방법과 습식 방법을 병행하였으며 건식 방법은 토양오염공정 시험법에 의거하여 풍건 시료 약 10 g을 취하여 정확한 무게를 알고 있는 수분이 완전히 제거된 알루미늄 접시에 정확히 달아, 110℃로 4시간 건조시킨 후 고형물의 중량을 구하여 함수율을 계산하

Table 1. Parameter and method of water analysis

Parameter	Method	Preservation and pre-treatment	Materials
Water temperature	-	Direct measuring	Thermometer
pH	pH meter	Direct measuring	pH meter (YSI 63)
EC	EC meter	Direct measuring	EC meter (YSI 30)
DO	Modified Winkler's Azide Method or DO meter	Direct measuring, Modified Winkler's Azide Method	DO meter (YSI 95)
COD _{Mn}	Acid digestion by KMnO ₄	add H ₂ SO ₄ conc. (<pH 2) preserved in low temperature	-
SS	Filtering method of GF/C	-	-
TN	Water autoanalyser (BRAN+LUEBBE)	add H ₂ SO ₄ conc. (<pH 2) preserved in low temperature	Photometer (550 nm)
NO ₃ -N	Water autoanalyser (BRAN+LUEBBE)	Direct measuring and preserved in low temperature	Photometer (550 nm)
NO ₂ -N	Water autoanalyser (BRAN+LUEBBE)	Direct measuring and preserved in low temperature	Photometer (550 nm)
NH ₄ -N	Water autoanalyser (BRAN+LUEBBE)	Direct measuring and preserved in low temperature	Photometer (660 nm)
TP	Water autoanalyser (BRAN+LUEBBE)	add H ₂ SO ₄ conc. (<pH 2) preserved in low temperature	Photometer (800 nm)
PO ₄ -P (DIP)	Water autoanalyser (BRAN+LUEBBE)	Direct measuring and preserved in low temperature	Photometer (660 nm)
Chl-a	Spectrophotometric method (Aceton extraction)	Extraction of filtered GF/C by acidified aceton	Spectrophotometer HP 8453

었다. 습식방법은 해양오염공정 실험법에 의거하여 습식 시료 약 20 g을 취하여 건조용 광구병에 시료가 들어 있는 병의 무게를 0.001 g까지 측정하여, 110℃에서 24시간 동안 건조하여 항량이 될 때 까지 건조하여 무게를 측정한다.

강열감량은 해양오염공정실험 법에 의거하여 25 mL 건조된 도가니의 무게를 항량으로 될 때까지 정확히 측정하고, 5 g의 시료를 넣어 550℃에서 2시간 동안 가열 후 전회화로에서 도가니를 꺼낸 후 실온에서 식힌 후 무게를 측정한다.

입도분석은 풍건 시료를 Malvern 입도측정기를 사용하여 구하였으며, 입경크기의 분류에 따른 토성(soil texture)은 Fig. 2를 이용하여 분류하였다.

퇴적물의 T-N 조사에 있어서 우리나라에는 아직까지 공정실험 방법이 없기 때문에, 토양오염 측정 분석방법에 의

거하여 유기태 질소를 진한 황산과 촉매에 의한 분해에 의해 암모니아상태의 질소로 변환시킨 후 알칼리 조건에서 증류에 의한 NH₃의 양에 의해 정량하였다. T-P의 조사 방법은 T-N과 마찬가지로 우리나라에는 아직까지는 공정실험 방법이 없기 때문에 황산 질산법을 사용하였으며 풍건 시료 1 g을 황산의 백연에 격하게 발생시켜 많은 유기물은 그 가열에 의하여 분해하고 분해된 액을 냉각 후 후에 질산을 첨가 가열한 후 식힌 후 흡광도 법에 의해서 측정하였다. 그리고 중금속은 카드뮴, 납, 크롬, 아연, 구리의 5개의 항목을 조사 하였으며, 토양오염공정시험기준 방법에 따라 전처리 후 유도결합플라즈마 분광광도계로 측정하였다.

인 형태 분석방법은 Methods for P Analysis, G.M. pierzynski에 따라 무기인(inorganic phosphorus)을 loosely and soluble P, Al-P, Fe-P, Reductant soluble-P, Ca-P로 나누어 실험하였다. 각 토양시료 1 g을 50 mL Centifuge tubes에 담고 각 단계에 맞는 시약을 주입하여 Shaker를 이용하여 용출시키고 Centifuge기로 상등액을 분리하여 흡광도법으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물 내 인의 존재형태 분석

계화조류지 퇴적물 내 인의 존재형태에 대하여 1~3차까지 조사결과, 조사시기별 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 전체적으로 1~3차 평균 Saloid-P의 형태가 2.28~7.75 mg/kg (1.4%), Al-P 0.34~5.36 mg/kg (0.5%), Fe-P 31.04~837.25 mg/kg (39.8%), Ca-P 149.91~257.09 mg/kg (56.6%), Red-P 0.29~2.07 mg/kg (0.4%), Occd-P 2.23~8.89 mg/kg (1.3%)를 나타냈다(Table 2). 퇴적물 중 Saloid-P와 Al-P, Red-P, Occd-P 형태의 인은 그 양이 매우 적게 조사되었다. 수계

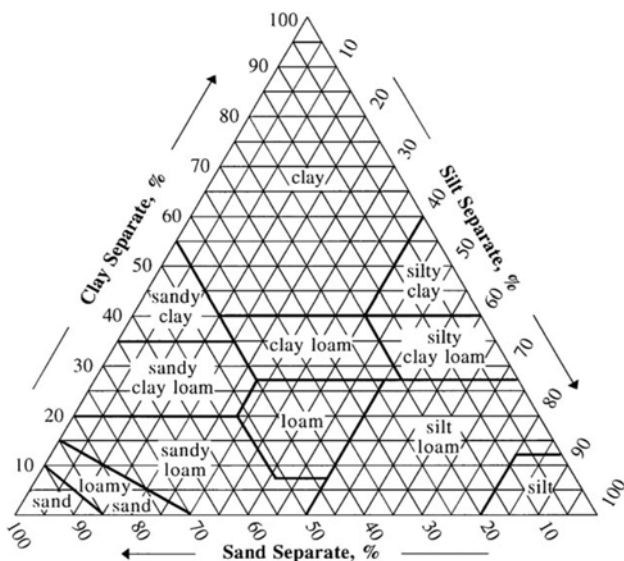


Fig. 2. Classification of sediment according to US Department of Agriculture Textural Classification in Gyehwa reservoir.

내 물리적 변화에 의해 용출이 잘 일어나는 Saloid-P 형태의 인은 그 양이 적으므로 쉽게 수계내 생태계에 영향을 미치지 않을 것으로 보이며, Al과 착물을 형성하여 침전 형태로 존재하거나 Al(OH)₃ 등의 형성 시 공침되어 존재하다가 산화환원전위가 낮아지거나 수소이온농도(pH) 상승 시 수층으로 용출되어 오염원으로 작용하는 Al-P의 형태, 내부에서 순환(autochthonous)하며 활성도가 높아 용출 가능성이 큰 Red-P의 형태, 유기물과 관련된 인으로 생물체(plankton)의 활동에 의해 흡수되고 남아 존재하는 Occd-P의 형태는 그 농도가 매우 낮아 계화조류지에 영향을 거의 미치지 않을 것으로 판단된다. 대부분이 Ca-P와 Fe-P의 형태로 퇴적물에 존재하고 있으며, Ca-P는 외부에서 유입된(allochthonous) 인으로 도시하수 및 산업폐수, 축산폐수 등 오염물질의 유입이 직접적으로 일어나는 곳에서 주로 높은 함량을 보이는 형태(Paek et al., 1998)로 알려져 있다. 하지만 이 형태의 인은 광물에 가까워 상대적 용출이 어려우므로 계화조류지 유역의 오염원 유입을 제어하고 지속적인 모니터링을 통해 수계관리가 가능할 것으로 사료된다.

지점별로 인의 존재형태에 대하여 1~3차까지의 조사 결과, GHS 1지점은 Ca-P가 63.2%, Fe-P 32.7%로 대부분을 차지했으며, GHS 2지점에서는 Ca-P가 52.1%, Fe-P 45.3%, GHS 3지점은 Ca-P가 58.9%, Fe-P 36.5%, GHS 4지점은 Ca-P가 77.8%, Fe-P 19.0%, GHS 5지점은 Ca-P가 79.8%, Fe-P 15.0%, GHS 6지점에서는 Ca-P가 67.4%, Fe-P 27.6%, GHS 9지점은 Ca-P가 62.8%, Fe-P 33.9%로 비슷한 경향을 보였다.

Table 2. Average phosphorous fraction in sediment of Gyehwa reservoir (Unit = mg/kg)

Sites	Saloid-P	Al-P	Fe-P	Ca-P	Red-P	Occd-P	Sum
GHS 1	3.40	1.59	77.66	149.91	0.29	4.34	237.19
GHS 2	3.83	0.34	188.60	216.75	2.07	4.78	416.38
GHS 3	3.81	5.36	117.92	190.46	0.87	4.94	323.36
GHS 4	2.28	0.18	36.71	150.03	1.44	2.23	192.86
GHS 5	4.49	0.98	31.04	165.11	0.81	4.40	206.83
GHS 6	7.21	0.19	70.94	172.94	0.99	4.44	256.71
GHS 7	6.96	2.40	565.25	228.41	1.15	7.63	811.81
GHS 8	7.75	2.01	837.25	203.35	1.81	8.89	1,061.04
GHS 9	6.09	2.43	138.60	257.09	1.81	3.24	409.26

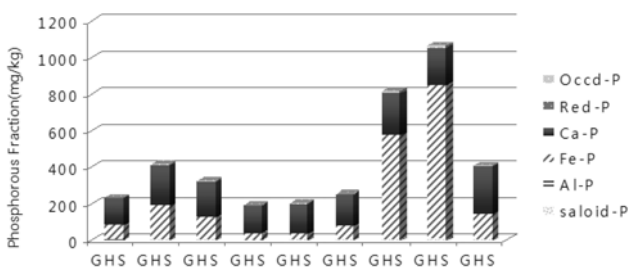


Fig. 3. Composition of Phosphorous fraction in sediment of Gyehwa reservoir.

GHS 7지점은 Ca-P 28.1%, Fe-P 69.6%, GHS 8지점은 Ca-P 19.2%, Fe-P 78.9%로 다른 지점들과는 달리 Fe-P의 형태가 가장 많이 존재하는 것으로 나타났다. 즉 GHS 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9에서 Ca-P와 Fe-P가 대부분으로 Ca-P > Fe-P의 경향을 보였고, GHS 7, 8은 다른 지점들과는 달리 Ca-P와 Fe-P가 대부분이나 Ca-P < Fe-P의 경향을 나타냈다.

상류부에서 하류부에 이르는 GHS 1~6 지점과 방류수 영향을 받는 GHS 7, 8지점까지 전 지점에서 Ca-P과 Fe-P의 형태로 97% 이상 존재하며, Saloid-P와 Al-P, Red-P, Occd-P를 합쳐 5% 미만으로 조사되었다.

3.2. 수질 특성이 인의 존재형태에 미치는 영향

3.2.1. 수온(Temperature) 및 전기전도도(Electric Conductivity, EC)

수온은 조사기간 동안 5.5~32.7℃ 범위의 분포를 나타냈고, 계절적인 특성이 뚜렷하게 나타났다. 2차 조사(8월)에서 가장 높은 평균수온을 나타냈고, 4차 조사(2월)에서 가장 낮은 평균 수온을 나타냈다. 계절의 변화로 수온의 차이는 크게 나타났지만 지점별로는 평균 수온 21.0~21.8℃로 거의 차이를 나타내지 않았다. 전기전도도(EC)는 1.60~11.83 mS/cm의 분포범위를 나타냈고 시기별로는 4차(2월)에서 다른 조사 시기보다 높게 나타났는데, 이는 배수갑문을 통해 해수의 유입으로 인해 전기전도도(EC)가 높게 나타난 것으로 판단된다. 가장 낮은 전기전도도(EC)는 2, 8차(8, 9월) 조사되었으며, 온도가 상대적으로 높은 여름철이 봄철과 가을철에 비해 낮은 전기전도도(EC)를 나타내, 수온과 음의 상관성을 보이는 것으로 조사되었다.

3.2.2. 용존산소농도(DO) 및 수소이온농도(pH)

용존산소농도(DO)는 조사기간 동안 5.1~18.1 mg/L 범위의 분포를 나타냈다. 조사시기별 용존산소농도(DO)는 4차 조사(2월)에서 다른 조사에 비해 상대적으로 높게 나타났고, 1차 조사(5월)에서 다른 조사에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 지점별 용존산소농도(DO)는 11.9~13.1 mg/L의 범위 분포를 보였으며, 평균 용존산소농도(DO)는 지점에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 수소이온농도(pH)는 7.5~10.0의 분포 범위를 나타냈다. 조사 시기별 평균 수소이온농도(pH)는 7.5~9.8의 범위로, 6차 조사(9월)에서 가장 높은 평균치를 나타냈다. 조사 지점별 평균 수소이온농도(pH)는 8.2~9.2의 범위를 나타내 지점에 따른 수소이온농도(pH)의 변화가 크지 않은 것으로 조사되었다.

3.2.3. 염분도(Salinity) 및 엽록소 a

본 연구기간동안 염분도는 0.80~6.59%의 분포 범위를 나타냈다. 조사 지점별 평균 염분도는 2.19~2.90%의 범위로 조사되었고, GHS 7, 8지점에서 가장 높은 평균치를, GHS 2, 3지점에서 가장 낮은 평균치를 나타냈다. 이는 새만금호 유역의 GHS 7, 8지점이 부근의 하수처리장의 방류수 유입과 조사지점 위치 특성으로 인해 염분도가 높게 나타난 것

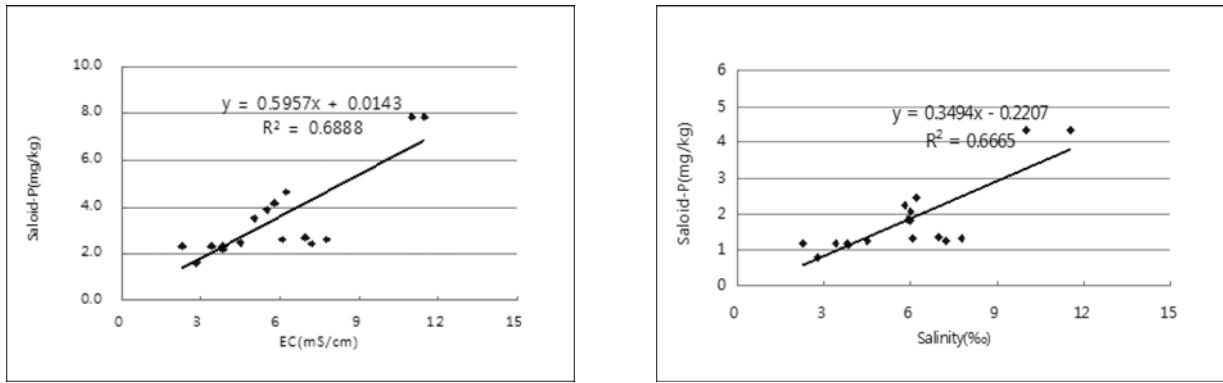


Fig. 4. Correlation between EC and Salinity in water and Saloid-P in sediment of Gyehwa reservoir.

으로 사료된다. 또한 1, 2차의 염분도가 다른 조사 시기에 비해 높게 조사 되었는데, 이는 관개용수 유입의 중단과 하수처리장 방류수 유입량 증가로 인하여 염분도 농축이 일어났기 때문으로 판단된다(기상청, 2008~2009년). Fig. 4에는 염분도는 엽록소 a ($r=0.791$, $p<0.05$)와 전기전도도(EC) ($r=0.999$, $p<0.01$), 수소이온농도(pH) ($r=-0.830$, $p<0.05$)에 대해 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났으며, 퇴적물내인의 존재 형태 중 Saloid-P와 $r=0.817$ ($P<0.05$)의 상관관계를 나타내 염분도에 의해 영향을 받는 것으로 조사되었다.

엽록소 a 농도는 19.6~368.0 mg/m³의 분포 범위를 나타냈다. 조사 지점별 평균 엽록소 a 농도는 86.7~142.6 mg/m³의 범위로 조사되었고, GHS 7, 8지점에서 가장 높은 평균치를, GHS 3지점에서 가장 낮은 평균치를 나타냈다. 엽록소 a 농도는 전기전도도(EC) ($r=0.787$, $p<0.05$)와 염분도($r=0.791$, $p<0.05$)에 대해 높은 상관성을 보이는 것으로 조사되었는데, 이는 염분도가 식물플랑크톤의 성장에 직접적인 영향을 주기보다는 풍부한 영양염 조건에서 염분도에 내성이 강한 규조류의 bloom을 발생시키며, 총질소(T-N)를 영양으로 조류성장이 촉진되었기 때문이라 판단된다.

3.2.4. 화학적 산소 요구량(COD)

본 연구기간동안 화학적산소요구량(COD)은 14.8~32.8 mg/L의 분포 범위를 나타냈다. 조사 시기별 평균 화학적산소요구량(COD)은 17.0~28.7 mg/L의 범위를 나타냈고, 5차 조사(6월)에서 가장 높은 평균치를, 2차 조사(8월)에서 가장 낮은 평균치를 나타냈다. 조사 지점별 평균 화학적산소요구량(COD)은 18.0~22.3 mg/L의 범위로 전 지점에서 화학적산소요구량(COD)의 차이는 크지 않았다. 화학적산소요구량(COD)의 증가와 함께 5차(6월) 조사 시기에 총질소(T-N)의 농도 또한 다른 조사시기와 달리 급격히 높아진 것으로 보아 영양을 위한 시비 기간에 계화조류지 유역으로부터 오염물질의 유입이 있었을 것으로 판단된다.

3.2.5. 부유물질(SS)

본 연구기간동안 부유물질(SS) 농도는 15.6~44.4 mg/L의 분포 범위를 나타냈다. 조사 시기별 평균 부유물질(SS) 농도는 21.0~32.6 mg/L의 범위를 나타냈고, 2차 조사(8월)에

서 가장 높은 평균치를, 6차 조사(9월)에서 가장 낮은 평균치를 나타냈다. 조사 지점별 평균 농도는 24.2~30.8 mg/L의 범위를 보였는데, GHS 7, 8지점이 다른 지점에 비해 상대적으로 높은 경향을 나타낸 것은 바람 또는 배수장의 펌핑 시 발생하는 흐름에 의해 퇴적물의 부유가 일어난 것으로 판단된다. 2차(8월), 3차(10월) 조사에서 부유물질(SS) 농도가 높게 나타난 것은 조사 시기 전후의 강우에 의해 수계내에서 퇴적물의 순환이 발생하였기 때문으로 사료된다.

3.2.6. 총질소(Total Nitrogen, T-N)

본 연구기간동안 총질소(T-N) 농도는 0.661~6.427 mg/L의 분포 범위를 나타냈다. 조사 시기별 평균 총질소(T-N) 농도는 0.938~3.951 mg/L의 범위로 조사되었으며, 1차(5월)와 5차(6월) 조사에서 가장 높은 평균치를 나타냈고, 다른 조사시기에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 영양을 위한 시비 기간인 5~6월에 공급된 관개용수와 함께 배출되는 질소 양의 증가 때문으로 판단된다. 조사 지점별 평균 농도는 1.367~3.031 mg/L의 범위를 나타냈으며, GHS 7, 8지점에서 가장 높은 평균치를, GHS 1지점에서 가장 낮은 평균치를 보였다. GHS 1~5지점이 낮은 질소 농도를 나타낸 데 비해 GHS 7, 8지점으로 갈수록 높아지는 경향을 나타냈다. 총질소(T-N) 농도는 총인(T-P) ($r=0.707$, $p<0.05$)과 염분도($r=0.842$, $p<0.01$), 질산성질소(NO₃-N) ($r=0.983$, $p<0.01$), 아질산성 질소(NO₂-N) ($r=0.857$, $p<0.05$), 암모니아성 질소(NH₄-N) ($r=0.986$, $p<0.01$)에 대하여 유의성 있는 정의 상관관계를 나타냈으며, 퇴적물내 존재하는 인의 형태 중 Fe-P와 $r=0.761$ ($P<0.05$)의 유의성 있는 상관관계를 보였다. 이는 계화조류지에 존재하는 대부분의 인의 형태인 Fe-P에 총질소(T-N)가 미치는 영향이 큼을 의미하므로 총질소(T-N) 농도의 저감을 통해 Fe-P로 존재하는 인의 제어가 가능할 것으로 사료된다.

총질소(T-N)에 대하여 질산성 질소(NO₃-N), 아질산성 질소(NO₂-N), 암모니아성 질소(NH₄-N)의 평균 분율(fraction)을 조사한 결과, 조사 시기에 따라 차이는 있으나 전 지점에서 평균적으로 NH₄-N (25%)>NO₃-N (9%)>NO₂-N (3%)의 경향을 나타냈다.

전 지점의 암모니아성 질소(NH₄-N)의 농도가 높은 것으로

불 때, 유역으로부터 오염물질의 유입 후 시간이 오래 경과하지 않았으며 지속적으로 유입이 되고 있는 것으로 판단된다. 또한 GHS 1지점에서 총질소(T-N)에 대한 무기성질소 비율이 가장 낮게 나타났다. 퇴적물내 존재하는 인의 형태 중 Fe-P는 질산성질소(NO₃-N)와 r=0.754 (p<0.05), 암모니아성질소(NH₄-N)와 r=0.728 (p<0.05)의 유의성 있는 상관관계를 보였으며, 암모니아성질소(NH₄-N)는 Saloid-P (r=0.758, p<0.05)의 형태에도 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

3.2.7. 총인(Total Phosphorus, T-P)

본 연구기간동안 총인(T-P) 농도는 0.091~0.318 mg/L의 분포 범위를 나타냈다. 조사 시기별 평균 총인(T-P) 농도는 0.123~0.268 mg/L의 범위로 조사되었고, 6차 조사(9월)에서 가장 높은 평균치를 보였으며 다른 시기의 조사에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 총질소(T-N)의 농도가 영농 시 비기간인 5차(6월) 조사에서 가장 높는데 반해 총인(T-P)의 경우 GHS 7, 8을 제외하고는 6차(9월) 조사에서 높게 나타났다. 이는 다른 해에 비해 9월 강우량이 적고 저수량이 낮은 2009년의 기후특성과 퇴적물내 인의 용출에 기인한 것으로 사료된다. 5차에 비해 6차 조사에서 수소이온농도(pH) 상승이 두드러지고 용존산소농도(DO)가 대체로 가장 낮게 나타난 6차의 GHS 1~6지점에서 다른 조사 시기에 비해 급격히 총인(T-P)의 농도가 증가하는 것은 오염물질의 유입 원인과 함께 퇴적물내 인의 용출로 인해 수계내의 인 농도가 증가한 것으로 판단된다. 조사 지점별 평균 농도는 0.136~0.191 mg/L의 범위를 나타냈고, GHS 6, 7, 8지점에서 높은 평균치를 나타냈다.

총인(T-P)은 총질소(T-N) (r=0.707, p<0.05)와 염분도(r=0.857, p<0.01)에 대하여 유의성 있는 상관관계를 나타냈으며, 이는 총질소(T-N) 농도의 증가 이유와 마찬가지로 유역으로부터의 오염물질 유입과 하수처리장 방류수의 혼합으로 인하여 증가한 것으로 보인다.

3.3. 퇴적물 특성이 인의 존재형태에 미치는 영향

3.3.1. 강열감량(Ignition Loss)

본 연구기간동안 강열감량은 0.8~7.2%의 분포 범위를 나

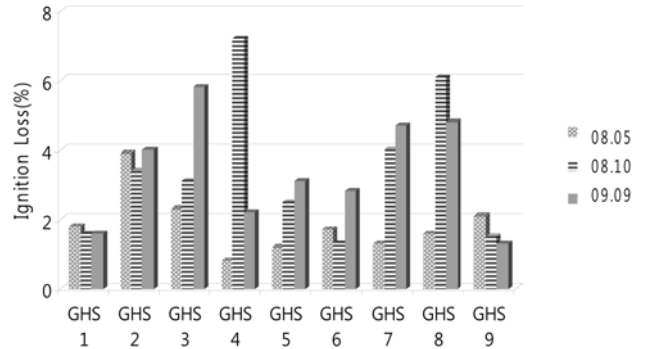


Fig. 5. Variation of Ignition Loss in sediment of each sampling site.

타냈다(Fig. 5). 조사 시기별 평균 강열감량은 1.86~3.37%의 범위로 조사되었고, 3차(9월) 조사에서 높은 평균치를, 1차 조사(5월)에서 낮은 평균치를 나타냈다. 조사 지점별 평균 농도는 1.63~4.17%의 범위를 나타냈으며, GHS 2, 3지점이 높게 조사되었고, GHS 1, 6, 9지점에서 낮은 평균치를 보였다. 퇴적물의 강열감량은 총질소(T-N) (r=0.892, p<0.01)와 유기물(r=0.957, p<0.01), 총인(T-P) (r=0.613, p<0.05)에 대해 유의성 있는 정의 상관관계를 나타냈으며(Fig. 6), 이는 총질소(T-N) 농도의 증가 이유와 마찬가지로 유역으로부터 오염물질이 유입되어 유기물과 총질소(T-N) 농도가 증가하게 되고, 수체의 내부 순환에 의해 부유가 일어나 부영양화를 발생시키는 원인이 될 것으로 생각된다. 또한 실트(Silt) 함유 토성에 대해 강열감량(r=0.712, p<0.05)과 유기물(r=0.807, p<0.01)이 높은 상관관계를 보였고, 이는 실트(Silt)를 많이 함유하는 퇴적물일수록 유기물을 흡착하는 능력이 클을 의미하는 것으로 사료된다.

강열감량은 퇴적물내 존재하는 인의 형태 중 Fe-P에 대해 r=0.569 (p<0.05), Red-P에 대해 r=0.468 (p<0.05), Occd-P에 대해 r=0.512 (p<0.05)의 상관관계를 나타냈다. 이를 통해 강열감량이 Fe-P, Red-P, Occd-P 형태의 인 농도를 결정하는데 영향이 있음을 알 수 있다.

3.3.2. 입도분석

입도 분석결과 1차 조사 퇴적물에서 GHS 2 지점(38%)을

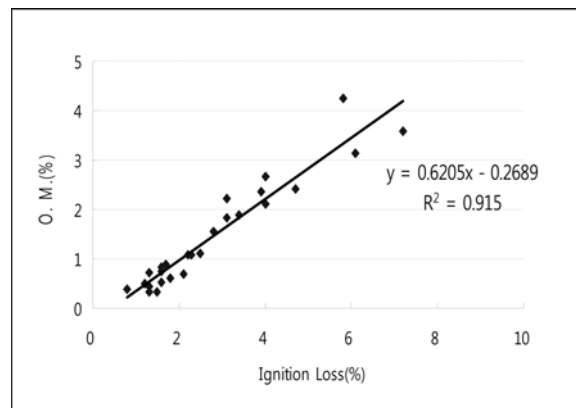
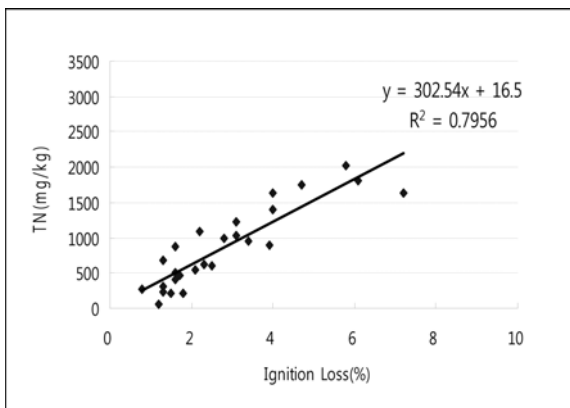


Fig. 6. Correlation between Ignition Loss and sediment properties (T-N, O.M) in Gyeonha reservoir.

Table 3. Soil texture in sediment of Gyehwa reservoir

Sites	GHS 1	GHS 2	GHS 3	GHS 4	GHS 5	GHS 6	GHS 7	GHS 8	GHS 9	
08.05	Sand %	70.0	38.0	62.0	93.0	79.0	51.0	79.0	61.0	75.0
	Silt %	29.0	59.0	35.0	5.0	19.0	42.0	19.0	37.0	22.0
	Clay %	1.0	3.0	3.0	2.0	2.0	7.0	2.0	2.0	3.0
	Soil Texture	SL	SiL	SL	S	LS	L/SL	LS	SL	LS
08.10	Sand %	50.0	42.0	24.0	46.0	46.0	79.0	41.0	46.0	76.0
	Silt %	46.0	51.0	69.0	43.0	47.0	16.0	51.0	45.0	19.0
	Clay %	4.0	7.0	7.0	11.0	7.0	5.0	8.0	9.0	5.0
	Soil Texture	SL	SiL	SiL	L	L/SL	LS	SiL	L	LS
09.09	Sand %	64.0	48.0	48.0	59.0	49.0	81.0	55.0	47.0	91.0
	Silt %	33.0	47.0	45.0	36.0	44.0	14.0	39.0	46.0	5.0
	Clay %	3.0	5.0	7.0	5.0	7.0	5.0	6.0	7.0	4.0
	Soil Texture	SL	SL	L/SL	SL	L/SL	LS	SL	L/SL	S

제외하고 모두 모래(Sand) 성분이 50%이상으로 나타났으며, 진흙함량(Clay)은 GHS 6지점(7%)을 제외하고, 모든 지점에서 3% 미만으로 조사되었다(Table 3). 2차 조사에서는 다소 차이를 보였으며, 모래(Sand)가 24~76% 범위로 1차 조사보다 낮게 나타났는데, GHS 6 지점의 모래(Sand) 함유량이 가장 높게 나타났고, 다른 지역은 실트(Silt)와 모래(Sand)의 함유량이 비슷한 것으로 조사되었다. 또한, 3차 조사의 경우는 모래(Sand)함량이 47~91% 범위로 1차 조사와 비슷한 경향을 보였다. 계화조류지 퇴적물의 토성 분석결과, 대체로 모래(Sand) 성분 비율이 높아 오염물질에 대한 흡착력이 상대적으로 떨어지므로 오염물질의 수계내 용출 및 부유가 쉽게 일어날 가능성이 있을 것으로 판단된다.

퇴적물의 유기물은 총질소(T-N) ($r=0.919, p<0.01$)와 강열감량($r=0.957, p<0.01$)에 대해 유의성 있는 정의 상관관계를 나타냈는데, 이는 총질소(T-N) 농도의 증가 이유와 같을 것으로 판단되며 부영양화의 원인으로 작용될 수 있다고 사료된다. 또한 유기물은 퇴적물내 존재하는 인의 형태 중 Fe-P에 대해 $r=0.417 (p<0.05)$, Occd-P에 대해 $r=0.442 (p<0.05)$ 로 상관관계를 나타냈다. 이를 통해 유기물의 증감에 따라 인의 존재형태가 영향을 받을 수 있다. 여러 형태의 유기물이 퇴적물내 축적되어 있다가 용출된 인과 결합하거나 수계내 용존인과 다양한 결합을 통해 침전될 것으로 사료된다.

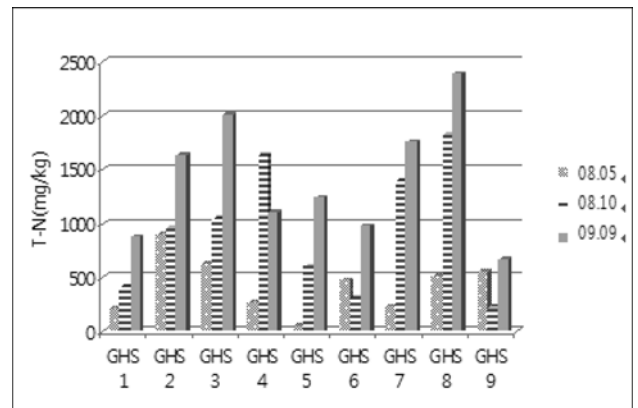


Fig. 7. Variation of T-N concentration in sediment of each sampling site.

3.3.3. 총질소(Total Nitrogen, T-N)

본 연구기간동안 총질소(T-N) 농도는 50.6~2,381.9 mg/kg의 분포 범위를 나타냈다. 조사 시기별 평균 총질소(T-N) 농도는 1차에서 424.6 mg/kg, 2차에서 931.4 mg/kg, 3차 1,406.9 mg/kg로 조사되어 1차에서 3차 조사로 진행될수록 점차 농도가 증가하여 1차보다 2, 3차 조사에서 약 2, 3배 정도 높은 농도를 보였다(Fig. 7). 조사 지점별 평균 총질소(T-N) 농도는 478.9~1,569.3 mg/kg의 범위를 나타냈고, GHS 2, 3, 7, 8지점에서 높은 평균치를, GHS 1, 9지점에서 가장 낮은

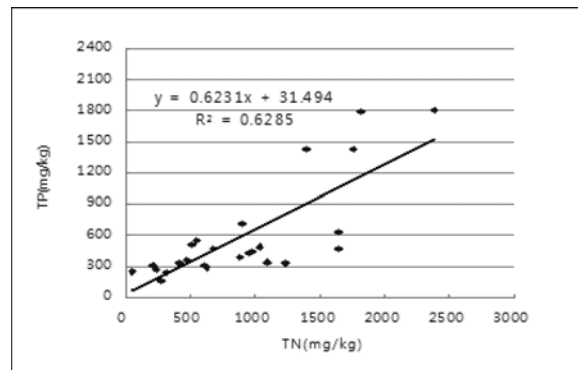
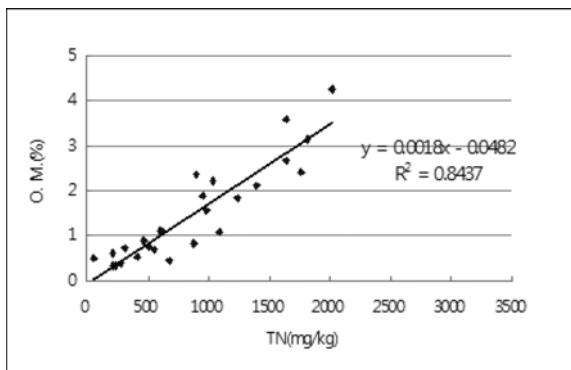


Fig. 8. Correlation between T-N and sediment properties (Organic matter, T-P) in Gyehwa reservoir.

평균치를 보여 유기물과 같은 경향을 나타냈다.

퇴적물의 총질소(T-N)는 유기물($r=0.919, p<0.01$)과 총인(T-P) ($r=0.793, p<0.05$), 강열감량($r=0.892, p<0.01$)에 대해 유의성 있는 정의 상관관계를 나타냈으며(Fig. 8), 이는 농경지의 시비량 증가와 수계로의 방류수 유입에 의한 유기물 및 총질소(T-N)의 퇴적물 잔류가 원인으로 사료된다. 또한 총질소(T-N) 농도는 퇴적물내 존재하는 인의 형태 중 Fe-P에 대해 $r=0.715 (p<0.05)$, Ocdd-P의 형태에 대해 $r=0.659 (p<0.05)$ 로 유의성 있는 상관관계를 보여, 앞 절의 강열감량, 유기물과 함께 총질소(T-N) 농도의 증감이 인의 존재형태별 함량을 결정하는데 큰 영향이 있음을 추정할 수 있다.

3.3.4. 총인(Total Phosphorus, T-P)

본 연구기간동안 총인(T-P)의 농도는 160.2~1,805.6 mg/kg의 분포 범위를 Fig. 9에 나타내었다. 조사 시기별 평균 총인(T-P)의 농도는 1차에서 379.8 mg/kg, 2차에서 643.1 mg/kg, 3차 713.1 mg/kg로 조사되어 1차에 비해 2, 3차 조사에서 약 2배 정도 증가하였는데, 이는 GHS 7, 8의 농도가 3~6배 정도 증가하였기 때문이다.

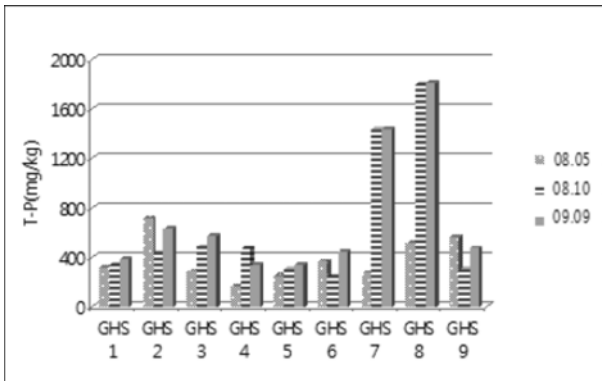


Fig. 9. Variation of T-P concentration in sediment of each sampling site.

조사 지점별 평균 총인(T-P)의 농도는 295.8~1,369.0 mg/kg의 범위를 나타냈고, GHS 7, 8지점에서 가장 높은 평균치를, GHS 5지점에서 가장 낮은 평균치를 보여 유효인산(P_2O_5) 농도 분포와 비슷한 경향을 나타냈다. 외부로부터 농경지의 시비량 증가와 수계로의 방류수 유입으로 인한 인의 축적이 일어난 것으로 판단된다. 퇴적물의 총인(T-P)은 총질소(T-N) ($r=0.793, p<0.05$)와 강열감량($r=0.613, p<0.05$)에 대해 유의성 있는 정의 상관관계를 나타냈다.

총인(T-P)과 높은 상관관계를 나타낸 인의 존재형태는 Saloid-P ($r=0.647, p<0.05$)와 Fe-P ($r=0.983, p<0.01$), Ocdd-P ($r=0.920, p<0.01$)로 다른 인의 형태보다 높은 상관관계를 보여, 계화조류지에 많이 존재하는 Fe-P의 함량을 결정하는데 총인(T-P)이 중요한 영향 인자임을 알 수 있으며, 퇴적물내 총인(T-P) 농도 제어를 통해 Fe-P의 형태로 존재하는 인의 농도를 저감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3.3.5. 중금속

퇴적물 내의 중금속 중 구리(Cu), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As), 니켈(Ni), 아연(Zn), 크롬(Cr^{6+})의 7개의 항목을 조사한 결과(Table 4), 구리(Cu)는 0.190~3.860 mg/kg, 납(Pb) 1.44~5.00 mg/kg, 카드뮴(Cd) 0.075~0.230 mg/kg, 비소(As) 0.79~4.37 mg/kg, 니켈(Ni) 4.23~14.37 mg/kg, 아연(Zn) 18.00~54.30 mg/kg이 검출되었으며, 크롬(Cr^{6+})의 경우 GHS 4지점의 0.028 mg/kg을 제외하고는 불검출 되었다.

계화조류지의 중금속 분석 결과를 미국의 퇴적물 관리기준인 EPA의 SQGs (Sediment Quality Guidelines, NOAA, 1999)와 비교 검토한 결과 ERL (Effect Range-Low / 최소영향농도)기준을 초과하는 중금속은 없는 것으로 조사되어 계화조류지의 퇴적물내 중금속 오염은 우려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

퇴적물내 중금속이 인의 화학적 존재형태에 미치는 영향에 대한 상관관계 조사결과 Table 5와 같다. Saloid-P 형태의 농도 증감에 비소(As)가 가장 크게 영향을 주는 것으로

Table 4. Concentration of heavy metals in sediment of Gyeonwa reservoir

Parameters		Cu	Pb	Cd	As	Ni	Zn	Cr ⁶⁺
GHS 1		0.690	1.53	0.075	0.79	14.37	18.00	N.D.
GHS 2		2.280	3.47	0.185	1.71	9.73	34.77	N.D.
GHS 3		2.825	5.00	0.190	3.66	13.10	50.47	N.D.
GHS 4		0.760	1.95	0.075	0.89	6.70	25.60	0.028
GHS 5		1.390	3.39	0.085	1.39	9.30	28.33	N.D.
GHS 6		0.675	2.22	0.120	1.36	7.30	26.27	N.D.
GHS 7		2.960	3.28	0.225	3.79	9.40	44.37	N.D.
GHS 8		3.860	3.26	0.230	4.37	10.50	54.30	N.D.
GHS 9		0.190	1.44	0.075	1.22	4.23	23.03	N.D.
SQGs*	ERL**	34	46.70	1.20	8.2	20.90	150	81
	ERM***	270	218	9.60	70	51.60	410	370

* SQGs = Sediment Quality Guidelines

** ERL = Effect Range Low

*** ERM = Effect Range Median

Table 5. Correlation coefficients (r) between heavy metals and phosphorus fraction in sediment of Gyehwa reservoir

Parameters	Saloid-P	Al-P	Fe-P	Ca-P	Red-P	Occd-P
Cu	0.339	0.421	0.793*	0.249	0.249	0.861**
Pb	0.003	0.564*	0.241	0.093	0.021	0.439
Cd	0.474	0.384	0.786*	0.416	0.332	0.853**
As	0.518*	0.606*	0.817**	0.380	0.190	0.864**
Ni	-0.258	0.402	0.118	-0.406	-0.561*	0.359
Zn	0.388	0.562*	0.738*	0.319	0.282	0.781*

* Correlation is significant at the 0.05 level
** Correlation is significant at the 0.01 level

나타났으며, Al-P 형태의 인에는 비소(As)>납(Pb)≒아연(Zn)의 중금속이 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 계화조류지 퇴적물의 상당부분을 차지하는 Fe-P 형태의 농도는 비소(As), 구리(Cu), 카드뮴(Cd), 아연(Zn)과 높은 상관관계를 보여, 인 형태에 영향을 미치는 여러 인자 중 중금속이 Fe-P 형태의 농도 결정에 크게 영향을 미치는 것으로 조사되었다. Ca-P 형태의 인은 특정 중금속과 상관관계를 나타내지 않아 중금속 농도의 증감에 영향을 적게 받는 것으로 사료되며, Red-P 형태의 인은 니켈(Ni)에 대해 $r=-0.561$ 로 상관관계를 나타내 퇴적물의 니켈(Ni) 농도가 증가할수록 Red-P 형태의 인 농도가 감소하는 것으로 조사되었으나 유의성이 낮아 추가 조사가 필요할 것으로 판단된다. Occd-P 형태의 인은 비소(As), 구리(Cu), 카드뮴(Cd), 아연(Zn)과 높은 상관관계를 나타냈다. 하지만 퇴적물내 Occd-P 형태의 인이 극히 미량 존재하므로 분명한 상관관계 검증을 위해서는 더 많은 시료의 분석이 필요할 것으로 판단된다.

3.4. 국내 간척지 유역 담수호의 퇴적물 특성에 따른 인의 존재형태 비교

간척농지 지구인 계화조류지의 퇴적물과 간척 개발 사업 지이고 농업용수 활용을 위해 담수화 과정중인 화성호 및 남양호의 퇴적물 특성을 비교 분석한 결과(Table 6), 계화조류지 퇴적물의 토성은 S, SL, LS, L/LS로 조사지점에 따라 모래(Sand)와 실트(Silt) 비율의 차이를 보이거나 대부분 50% 이상이 모래(Sand)로 구성되어 있다.

화성호의 퇴적물은 모든 지점에서 수소이온농도(pH)가 중성이며 대부분이 실트(Silt)가 50% 이상인 미사질 양토(Silty Loam)로 이루어져 있으나 남양천 부근에서만 모래(Sand)가 85% 이상인 토성분포를 나타냈으며, 남양호의 퇴적물은 전체적으로 80% 이상이 실트(Silt)를 함유하고 있어, 계화조류지와 화성호, 남양호 퇴적물의 토성이 모두 다를 수 있다. 50% 이상의 모래(Sand)를 함유하고 있는 계화조류지 퇴적물의 특성상 유입 오염물질 및 유기물 등에 대한 흡착능력이 다른 두 호수수에 비해 상대적으로 낮아 쉽게 오염물질의 용출 및 부유가 일어날 확률이 높다고 판단되나 본 연구에서 토성과 인의 존재형태가 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않아 토성의 변화에 따른 인의 존재형태에 대하여는 추후 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 총질소(T-N)의 경우 계화조류지의 GHS 7, 8지점을 제외하면 모두 비슷한 농도를 보였으나, 남양호는 총인(T-P), 구리(Cu), 납(Pb)의 농도가 계화조류지나 화성호에 비해 높음을 알 수 있다.

퇴적물내 인의 존재형태를 비교하면(Table 7), 계화조류지는 Ca-P (56.6%)>Fe-P (39.8%)의 형태가 97% 이상이며, 화성호는 Fe-P (59.0%)>Al-P (27.7%)의 형태로 87% 정도 존

Table 6. Comparison of phosphorus properties in Gyehwa reservoir, Hwasung reservoir and Namyang reservoir

Parameters	Gyehwa reservoir (2009.9)	Hwasung reservoir (2009.8)*	Namyang reservoir (2006.7)**
pH	6.2~7.4	7.1~7.7	6.7~7.0
Soil Texture	S, SL, LS, L/LS (Sand over 50%)	S, SiL (Silt over 50%)	Si (Silt over 80%)
T-N	674.0~2,381.9 mg/kg	616.9~1,242.1 mg/kg	374.7~855.7 mg/kg
T-P	335.0~1,805.6 mg/kg	307.2~374.4 mg/kg	1,310~2,600 mg/kg
Cd	0.075~0.230 mg/kg	0.019~0.200 mg/kg	0.130~0.570 mg/kg
Cu	0.190~3.860 mg/kg	0.067~3.450 mg/kg	9.100~35.250 mg/kg
Pb	1.44~5.00 mg/kg	2.61~8.80 mg/kg	3.45~35.25 mg/kg
Cr ⁶⁺	N.D., 0.028 mg/kg	N.D.	N.D., 0.140 mg/kg
Zn	18.0~54.3 mg/kg	48.9~96.9 mg/kg	32.9~106.0 mg/kg
Ignition Loss	1.3~5.8 %	3.94~8.76 %	5.2~11.4 %

* 한국농어촌공사, 2009년 화성호 담수화에 관한 연구 보고서 결과 적용
** 화성시, 한국농어촌공사, 2007년 남양호 수질개선대책 조사보고서(II) 결과 적용

Table 7. Comparison of phosphorus fraction in sediment of Gyehwa reservoir, Hwasung reservoir and Namyang reservoir (Unit = mg/kg)

reservoirs	Saloid-P	Al-P	Fe-P	Ca-P	Red-P
Gyehwa reservoir	2.3~7.8 (1.4%)	0.2~5.4 (0.5%)	31.0~837.3 (39.8%)	149.9~257.1 (56.6%)	0.29~2.07 (0.4%)
Hwasung reservoir	9.0~20.0 (5.5%)	52.6~59.4 (27.7%)	87.8~126.2 (59.0%)	1.8~8.0 (2.7%)	1.4~41.8 (5.1%)
Namyang reservoir	0.8~3.4 (0.2%)	96.0~146.0 (12.1%)	362.0~590.0 (46.9%)	210.0~356.0 (11.6%)	113.0~122.0 (29.2%)

재한다. 그러나 남양호는 Fe-P (46.9%)>환원성-P (Red-P, 29.2%)>Al-P (12.1%)=Ca-P (11.6%)의 형태로 퇴적물 내에 인이 다양한 형태로 존재함을 알 수 있다.

계화조류지의 퇴적물 특성과 인의 존재형태에 대한 상관관계 분석결과, 총인(T-P)과 구리(Cu)는 Fe-P의 존재형태와 상관관계가 높았으며 납(Pb)은 Al-P와 높은 상관관계를 나타내는 것으로 조사되었다. 이는 남양호의 퇴적물내 인의 존재형태 중 Fe-P와 Red-P의 형태가 큰 비중을 차지하나 Al-P (12.1%)와 Ca-P (11.6%)의 형태로 다른 비교 호소수에 비해 높은 것을 볼 때, 남양호 퇴적물내 납(Pb)의 농도가 높으므로 계화조류지에서 나타난 납(Pb)과 Al-P 형태가 높은 상관관계를 보였던 조사결과와의 적용이 가능하리라 판단된다. 그러나 퇴적물내의 인의 존재형태 및 용출 반응은 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 나타나기 때문에 어떤 조건이 크게 작용했는가를 정량적으로 밝히기 쉽지 않으므로, 각 호소수에 대한 수질 및 퇴적물 특성의 상세한 조사와 인의 존재형태 파악을 통한 상관관계 조사 등 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

계화조류지는 퇴적물내 Ca-P와 Fe-P의 형태로 인이 대부분 존재하므로, 외부 오염원 유입에 따라 높은 농도를 보이는 Ca-P의 제어를 위해 계화조류지의 유역 대책이 필요할 것으로 사료되며, 수계 퇴적층내 환원상태 방지를 위해 오염물질이 일시적으로 다량 유입되는 것을 억제하고 수계 관리와 호소의 건천화를 막기 위한 방안이 강구되어야 할 것으로 생각된다. 또한 수소이온농도(pH)가 급격히 상승되지 않도록 수온이나 수계내 환경 변화에 대한 제어 및 모니터링이 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

화성호의 경우,¹¹⁾ Al 및 Fe과 착물을 형성하여 침전되어 존재하거나 Al(OH)₃, Fe₂O₃ 등의 형성 시 공침되어 존재하다가 산화환원전위가 낮아지거나 수소이온농도(pH) 상승하게 되면 수층으로 용출되어 오염원으로 작용하는 Al-P와 Fe-P의 형태가 대부분이므로 계화조류지와 마찬가지로 환원상태 방지를 위한 노력과 수계내 환경 변화에 대한 제어 및 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 사료된다. 반면 남양호는 계화조류지와 화성호에 비해 퇴적물내 다양한 인의 형태가 상당량 존재하므로 수계 및 유역에 대한 종합적 대책이 마련되어야 할 것으로 생각된다. 이 세 호소수를 비교한 결과, 상대적으로 다른 여러 인자들에 비해 실트(Silt)와 모래(Sand)의 구성 비율 차이가 분명하게 나타나므로 토성이 인의 존재형태를 결정하는데 크게 영향을 미칠 것으로 사료되나, 본 연구에서는 토성과 인의 존재형태와의 상관관계가 명확하게 나타나지 않았으므로 이에 대한 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

새만금호와 인접한 배후지역에 위치하며 새만금 수질에 직·간접적으로 영향을 미치는 간척농지 지구 계화조류지

를 대상으로 환경변화에 의해 수계로 용출되어 부영양화의 주원인이 되는 인의 존재형태와 수계내 영향인자 사이의 상관관계를 분석하였다.

1) 계화조류지 퇴적물 내 인의 존재형태 조사 결과, 전체적으로 Saloid-P의 형태가 2.28~7.75 mg/kg (1.4%), Al-P 0.34~5.36 mg/kg (0.5%), Fe-P 31.04~837.25 mg/kg (39.8%), Ca-P 149.91~257.09 mg/kg (56.6%), Red-P 0.29~2.07 mg/kg (0.4%), Occd-P 2.23~8.89 mg/kg (1.3%)를 나타냈다. 대부분이 외부에서 유입된 인으로 도시하수 및 산업폐수, 축산폐수 등 오염물질의 유입이 직접적으로 일어나는 곳에서 주로 높은 함량을 보이는 Ca-P(약 57%)의 형태(Paek et al., 1998)와 Fe과 착물 형성하여 침전되어 있거나 Fe₂O₃ 등의 형성시 공침되어 있다가 산화환원전위가 낮아지거나 수소이온농도(pH) 상승 시 수층으로 용출되는 특성을 갖고 있는 Fe-P(약 40%)의 형태로 존재한다.

2) 수질 특성 분석 결과, 영농을 위한 시비기간인 5~6월 조사 시기에 화학적산소요구량(COD)은 32.8 mg/L, 총질소(T-N)는 6.427 mg/L로 최고 농도를 보였으며, 염록소 a 농도는 전기전도도(EC) (r=0.787, p<0.05)와 염분도(r=0.791, p<0.05)에 대해 높은 상관성을 보이는 것으로 조사되었다. 계화조류지 퇴적물내 인의 형태중 대부분을 차지하는 Ca-P와 Fe-P의 형태에 영향을 미치는 수계내 인자를 분석한 결과, Fe-P는 총질소(T-N) (r=0.761, p<0.05)와 질산성질소(NO₃-P) (r=0.754, p<0.05), 암모니아성질소(NH₄-N) (r=0.728, p<0.05), 총인(T-P) (r=0.774, p<0.05), 용존성 무기인(PO₄-P) (r=0.767, p<0.05)과 유의성 있는 상관관계를 나타냈으나 Ca-P의 형태는 조사항목 중 수계내 인자와의 유의성을 발견하지 못하였다.

3) 계화조류지 인의 형태별 함량과 퇴적물 특성간의 상관관계를 조사한 결과, Ca-P의 형태는 유효인산(P₂O₅) (r=0.783, p<0.05)과 유의성 있는 정의 상관관계를 나타냈으며, Fe-P의 형태는 강열감량(r=0.569, p<0.05)과 유기물(r=0.417, p<0.05), 총질소(T-N) (r=0.715, p<0.05), 총인(T-P) (r=0.983, p<0.01) 농도의 증감에 따라 영향을 받는 것으로 조사되었다. 그 외에도 Occd-P 형태는 총인(T-P)과 강열감량, 유기물, 총질소(T-N) 농도의 영향을 받는 것으로 나타나 상관관계 정도의 차이는 있으나 Fe-P와 Occd-P 형태에 영향을 미치는 퇴적물 특성이 유사한 것으로 조사되었다. 퇴적물의 토성은 GHS 2 지점(38%)을 제외하고 전 지점에서 모래(Sand) 성분 비율이 50% 이상으로 나타나 오염물질에 대한 흡착력이 상대적으로 떨어지며 이는 오염물질의 수계내 용출 및 부유를 용이하게 할 가능성이 있다고 판단된다. 본 연구에서 이에 대한 명확한 상관관계가 조사되지는 않았으나, 존재형태에 따라 퇴적물의 토성이 인의 용출에도 상당한 영향을 미칠 것으로 사료된다. 퇴적물내 중금속이 인의 존재형태에 미치는 영향 조사 결과, Ca-P 형태의 인은 특정 중금속과 상관관계를 나타내지 않았으나, Fe-P 형태의 인은 비소(As) (r=0.817, p<0.01), 구리(Cu) (r=0.793,

$p < 0.05$), 카드뮴(Cd) ($r=0.786$, $p < 0.05$), 아연(Zn) ($r=0.738$, $p < 0.05$)과 높은 상관관계를 보였다.

4) 농업용수 활용을 위해 담수호로 진행 중인 화성호와 남양호를 본 연구의 조사 지역인 계화조류지와 퇴적물 특성을 비교 분석한 결과, 계화조류지 퇴적물의 토성은 대부분 50% 이상이 모래(Sand)로 구성되어 있고, 화성호의 퇴적물은 실트(Silt) 입자가 50% 이상인 미사질 양토(Silty Loam)로 이루어져 있으며, 남양호의 퇴적물은 전체적으로 80% 이상이 실트(Silt)를 함유하고 있다. 또한 총질소(T-N)의 경우 계화조류지의 GHS 7, 8지점을 제외하면 모두 비슷한 농도를 보이나, 남양호의 총인(T-P), 구리(Cu), 납(Pb) 농도가 계화조류지나 화성호에 비해 높음을 알 수 있다. 퇴적물 내 인의 존재형태를 비교하면, 계화조류지는 Ca-P (56.6%) > Fe-P (39.8%)의 형태가 97% 이상이며, 화성호는 Fe-P (59.0%) > Al-P (27.7%)의 형태로 87% 정도 존재한다. 그러나 남양호는 Fe-P (46.9%) > 환원성-P(Red-P) (29.2%) > Al-P (12.1%) ≒ Ca-P (11.6%)의 형태로 존재하여, 간척유역에 위치하나 퇴적물의 토성이 다른 세 호소수에서 인이 각각 다른 형태로 존재함에 따라 퇴적물 및 유역 관리시에도 인의 존재형태 특성에 따라 그 특성에 맞는 차별적 수계관리 및 수질 개선대책의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 지원과 서울장학재단 하이서울장학금의 지원, 환경부의 폐기물에너지화·자원화 전문인력양성사업의 지원을 받아 연구가 이루어졌으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

참고문헌

1. 농림부, 농업기반공사, 간척지 조성 후 토양 특성 변화 및 활용방안 연구, pp. 27~41(2003).
2. Bold, H. C. and Wynne, M. J., Introduction to algae, 2nd Ed. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New jersey, pp. 1~720(1985).
3. Hellawell, J. M., Biological indicators of freshwater pollution and environmental management. Elsevier Applied Science Publishers, p. 546(1986).
4. 임흥탁, 호수의 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문(1991).
5. Bostrom, M. L. and Gerry, L., "Relations between chemistry, microbial biomass and activity in sediments of a polluted vs a nonpolluted eutrophic lake," *Ver. int. Ver. Limnol.*, **23**, 451~459(1988).
6. 전상호, "소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출 가능성에 대하여," 한국육수학회지, **22**(3), 261~271(1989).
7. Boers, P. M., "The influence of pH on phosphate release from lake sediment," *Water Res.*, **25**, 309~311(1991).
8. 김규광, 인공호수에 대한 영양염류와 염류농도 농도의 상관성 및 부영양화 검토, 서울대학교 보건학 석사학위논문(1988).
9. 김영규, "해저 퇴적물에 함유된 인의 존재 형태에 대한 연구," 한국광물학회지, **16**(5), 151~159(2003).
10. 나유미, "호수 퇴적물 인 용출제어를 위한 현장처리제 개발 및 모델 연구," 이화여자대학교 과학기술대학원 박사학위 논문, p. 29(2004).
11. 한국농어촌공사, 화성호 담수화에 관한 연구 보고서(2009).
12. 화성시, 한국농촌공사, 남양호 수질개선대책 조사보고서(II), (2007).
13. 심무준, 조성록, 나공태, 신진선, 김은수, "시화호 퇴적물에서 인의 지화학적 특성," 한국해양환경공학회지, **14**(3), 16~27(2001).
14. 심재형, 신윤근, 이원호, "만경동진강 하구 표영 생태계의 무생물 환경과 일차 생산자," 한국해양학회지, **26**(2), 155~168(1991).
15. 양성렬, 송환식, 문창호, 권기영, 양한섭, "낙동강 하구역의 담수 유입에 따른 해양환경 및 일차 생산력 변화," 한국조류학회지, **16**(2), 165~177(2001).
16. 오왕근, 신상혁, 농촌진흥청농사시험연구보고, 7-1, 25~30(1964).
17. 이찬원, 권영택, 박동규, 김봉진, "남해연안 퇴적물내 인과 중금속의 존재형태," 대한환경공학회지, **17**(7), 661~674(1995).
18. 정우혁, 김건하, "pH와 산화환원전위에 따른 상등수-퇴적물에서의 인 형태 변화," 대한환경공학회지, **28**(5), 472~479(2006).
19. Abrams, M. M. and Jarrell W. M., "Soil phosphorus as a potential nonpoint source for elevated stream phosphorus levels," *J. Environ. Qual.*, **24**, 132~138(1995).
20. Abril, G., Riou, S. A., Etcheber, H., Frankignoulle, M., de Wit R. and Middelburg, J. J., "Transients, Tidal Time-scale, Nitrogen Transformations in an Estuarine Turbidity Maximum-Fluid Mud System," *Estuarine, Coastal Shelf Science*, **50**, 703~715(2000).
21. Allen, H. E., Fu, G. and Deng B., "Analysis of acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metal for the estimation of potential toxicity in aquatic sediments," *Environ. Toxicol.*, **12**, 1~13(1993).
22. Bold, H. C. and Wynne, M. J., Introduction to algae. 2nd Ed. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New jersey, pp. 1~720(1985).