

퇴적물 내 입도와 유기물 함량이 영양염류 및 중금속 농도에 미치는 영향

김석구 · 이미경[†] · 안재환 · 강성원 · 전상호*

한국건설기술연구원 건설환경연구부 · *강원대학교 환경과학과

(2005년 8월 29일 접수, 2005년 9월 22일 채택)

The Effects of Mean Grain Size and Organic Matter Contents in Sediments on the Nutrients and Heavy Metals Concentrations

Seogku Kim · Mikyung Lee[†] · Jaehwan Ahn · Sungwon Kang · Sangho Jeon*

Construction Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology

*Department of Environmental Science, Kangwon National University

ABSTRACT : A study was carried out to identify the major causes of sediments pollution in the Paldang Lake in the vicinity of Gyeongan river. Samples from 40 sites were collected and analyzed to characterize the regional distributions of grain size, organic matter contents, and concentrations of T-N, T-P and heavy metals. contaminations. The mean grain size (M_z) ranged from sand type ($M_z, 1\sim 3 \phi$) where Bukhan River and Namhan River converges at a high flow rate to silt type ($M_z, 5\sim 10 \phi$) at the downstream of Gyeongancheon and Paldang lake, reflecting the water circulation in the area. Except sampling point St. 36 near the wetland, the determination coefficient (r^2) of M_z and organic matter (LOI) was 0.88, showing that more organic matters are concentrated inside finer sediments. The concentrations of T-N and T-P in sediments were higher in the area at which M_z and organic matters are also higher. High concentrations of T-P analyzed in the sediments, ranging from 216~1,623 $\mu\text{g/g}$ (Avg. 769 $\mu\text{g/g}$) could be considered as a critical level. Adsorbed-P and NAI-P, which are easily released to the surrounding environments when physico-chemical characteristics of sediments are changed, was found to be around 20%, which was showed by the result of fractionated-P. Moreover, Principle Component Analysis (PCA), showed that high concentrations of T-N, T-P, organophilic metals (Cd, Cu, Pb, Zn) are distributed in the areas where high organic matter contents and fine grain-sized sediments are found. However, results of I'_{geo} (Geoaccumulation Index) that considers the grain size of sediments showed that heavy metal concentrations in the lake was low enough to be considered as Class 1 indicating the relative degree of pollution was less than zero.

Key Words : Sediments, Mean Grain Size, Organic Matter, Metals, Geoaccumulation Index

요약 : 팔당호 표층퇴적물의 오염 특성을 파악하기 위해 경안천을 중심으로 팔당호 전반에 걸쳐 40개 지점에 대해 입도, 유기물 함량, 총질소, 총인, 중금속의 분포 특성을 분석하였다. 입도(M_z , mean grain size)의 분포 특성은 유입량 및 유속이 강한 북한강과 남한강 합류지점부터 팔당댐 지역에 걸쳐 사질($M_z, 1\sim 3 \phi$)로 분포하며, 경안천 하부 및 팔당호 하부 지역에서는 세립한 silt($M_z, 5\sim 10 \phi$)로 구성되어 이 지역의 수리 특성을 반영한다. 입도(M_z)와 유기물 함량(LOI)의 상관관계는 습지 근처인 St. 36을 제외하고, $r^2 = 0.88$ 로 세립토일수록 유기물 함량이 높아지는 경향을 보였다. 퇴적물 내 T-N과 T-P의 농도 역시 입도와 유기물 함량이 높은 지역에서 높은 값을 나타내었다. 특히, T-P의 농도 분포는 216~1,623 $\mu\text{g/g}$ (Avg. 769 $\mu\text{g/g}$)의 범위로 팔당호 퇴적물내 인(phosphorus)의 오염이 심각한 것으로 나타났다. Fractionated-P를 통해 환경 변화에 의해 수체로 용출될 가능성이 큰 Adsorbed-P와 NAI-P(Non-apatite inorganic P)가 약 20%로 나타났다. 또한, 20개 항목의 결과를 토대로 통계학적 기법인 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)을 실시한 결과, 입도가 세립하고, 유기물 함량이 높은 지역에서 T-N, T-P, 친유기성 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn)이 높게 분포하는 것으로 나타났다. 그러나 중금속 오염 정도는 입도를 고려한 I'_{geo} (Geoaccumulation Index)로 분석한 결과 상대적 오염도가 0 이하 및 Class 1에 속하는 것으로 나타나 중금속 오염은 없는 것으로 평가되었다.

주제어 : 표층퇴적물, 입도, 유기탄소, 중금속, Geoaccumulation Index

1. 서 론

일반적으로 퇴적물 입자가 작을수록 표면적이 넓어져, 더 많은 물질이 흡착할 수 있는 물리적 면적이 증가할 뿐만 아니라, 이온교환능이 커져 용존금속들이 더욱 쉽게 퇴적물

에 흡착될 수 있다. 특정 중금속이 농축된 광물의 영향을 제외하고, 대부분 오염물질의 분포 및 축적은 퇴적물 입자 크기에 의해 크게 좌우된다.¹⁾ 유기탄소 또한 각 금속 원소들의 분포를 조절하는데 매우 중요한 역할을 하는 것으로 보고되고 있으며, Pb, Zn, Cu의 경우 유기탄소와 관련이 높은 것으로 나타났다.²⁾ 이처럼 퇴적물은 수괴와 달리 오염의 기록을 비교적 장기간 보전하는 특성을 가지고 있으므로 퇴적물의 오염을 판단하기 위해서는 초기속성작용(early diagenesis) 등의 제반 과정을 이해하는 것이 필수적이다.³⁾

† Corresponding author
E-mail: mkleee@kict.re.kr

Tel: 031-910-0395

Fax: 031-910-0291

팔당호(Paldang Lake)는 1973년 북한강, 남한강, 경안천의 세 지류가 모이는 지점에 댐을 축조하여 생성된 인공호로 수도권 상수원 공급($7.75 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$)의 중추적 역할을 하고 있다.⁴⁾ 그러나 만수면적에 비하여 유역면적이 국내·외 다른 호소보다 매우 크므로 상대적으로 오염에 취약한 형태를 갖고 있다. 유역면적은 $23,800 \text{ km}^2$, 저수량은 $244 \times 10^6 \text{ m}^3$, 평균수심은 약 6.5 m 이며, 호내 평균 체류시간이 6.7~7.3일로 매우 짧은 하천형 호수이다.⁴⁾ 팔당호로 유입되는 유량은 남한강 55%(BOD 1.5 mg/L), 북한강 43.4%(BOD 1.1 mg/L), 경안천은 1.6%(BOD 6.4 mg/L)를 차지하고 있다. 팔당호 유역의 BOD 발생부하량은 총 $464.8 \times 10^3 \text{ kg/d}$ 이며, 생활계(33%), 산업계(28%), 축산계(24%), 비점오염원(15%)를 차지 한다. BOD 배출부하량은 총 $158.1 \times 10^3 \text{ kg/d}$ 중 생활계(40%), 비점오염원(33%), 축산계(19%), 산업계(8%)로 생활계와 비점오염원이 높은 비율을 보인다.⁴⁾ 팔당호 내 유속 양상은 북한강과 남한강으로부터 유입된 유량이 팔당댐을 통해 한강으로 유입되며, 일부는 경안천 상류를 향해 진행된다. 이때 유속은 팔당호 내 총 유입량에 비례하며, 팔당댐 수문 개·폐여부에 의해 경안천으로의 유입량이 달라진다.⁴⁾

본 연구에서는 이러한 지역적 특성 및 계절적 변화가 큰 팔당호 내 표층퇴적물의 지화학적 특성 중 입도 및 유기물 함량이 총질소, 총인, 중금속 함량에 미치는 영향을 파악하고, 통계학적 기법인 주성분 분석을 통해 퇴적물 내 오염을 가중시키는 주요 조절 요인을 파악하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구를 위해 팔당호 표층퇴적물의 시료를 여름(1999년 8~11월)철 40개 site에서 채취하였다(Fig. 1). 퇴적물 시료는 교란되지 않도록 소형 Gravity Corer(내경 60 mm 아크릴파이프 장착)을 이용하여 채취하였다. 퇴적물의 입도 분석은 Boring 퇴적물 Corer를 상·중·하로 분리하여 각 시료를 혼합한 후 4분법으로 시료를 채취 후 입도분석기를 이용하여 측정하였다. 퇴적물내 pH는 pH meter(HANNA-H18424)로 측정하였으며, COD는 해양오염 공정시험법(제4장 2항)에 의해 분석하였다. 강열감량(Loss on Ignition)은 분말시료 10 g을 정확히 평량하여 550°C 회화로에서 완전 회화하여 원분말시료와의 무게 차이로 구하였다. 퇴적물중 총 탄소의 함량은 분말화된 시료를 주석 캡슐에 넣어 CHN·분석기(CE Instrument; Flash-1120)를 이용하여 측정하였으며, 무기탄소 함량은 시료를 아황산(sulfuric acid)을 첨가하여 유기탄소를 제거한 후, 같은 방법으로 측정하였다. 유기탄소의 함량은 총 탄소의 함량에서 무기탄소의 함량을 뺀 값으로 하였다. 퇴적물의 T-N은 Kjeldhal법으로 분석하였으며, T-P의 경우 Hiltje and Lijklema(1980)에 시험법을 이용하였다.⁵⁾ 토양입자의 표면에 흡착된(adsorbed P), 철과 알루미늄과 결합하여 토양 표면에 공침된 인(NAI-P), 인회석에 함유된 인(apatite P)으로 분리 추출하였고, 생물체나 그 분해산물에 함유된 인(organic P)으로 분리 추출하였다. 퇴적물중 금속의 총 농도는 Tessier



Fig. 1. Study area and sampling sites with numbers.

et al.,(1979)의 방법에 의해 분석하였다.⁶⁾ 저압용 테프론용기(Teflon bomb)에 분말화된 퇴적물 시료께 질산(65% HNO₃)과 과염소산(70% HClO₄)을 3:1로 혼합한 산 5 mL 넣어 120°C의 가열판에서 가열한 후 유기물을 완전히 산화시켜 건조시킨 후, 불산(48% HF)과 과염소산(70% HClO₄)을 4:1로 혼합한 산을 5 mL 넣고 가열하여 완전히 녹였다. 이 시료에 과염소산(70% HClO₄) 1 mL 그리고 봉산(HBO₃) 4 mL와 과염소산 1 mL를 순차적으로 넣고 건조시킨 후, 1 N 질산 20 mL를 넣어 가열판에서 10분 동안 반응 시켜 액상상태가 되도록 하였다. 전처리된 시료들에 대한 금속 원소의 정량은 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS; VG PlasmaQuad ICP-MS)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과

3.1. 퇴적물 내 입도의 공간분포 특성

팔당호 내 표층퇴적물의 평균입도 분포 특성은 0.8~9.8 φ($\phi = -\log_2(D_i)$, D_i : 입자의 지름)의 범위이며, 평균 5 φ로 사질과 실트질로 크게 구분된다(Table 1, Fig. 2). 소내섬 부근(St. 19)에서만 점토(Clay)가 70% 이상으로 높은 분포를 보였다(Fig. 1, 2). 북한강과 남한강 하류 지역부터 팔당호 본류까지는 5 φ 이하의 조립한 분포를 보이며, 광동교부터 경안천 하류지역 즉, 소내섬 아래지역은 5~10 φ의 세립한 분포를 보인다(Fig. 2). 이와 같은 입도의 분포 특성은 팔당호 내 유속의 흐름과 일치하는 바, 북한강(청평댐)과 남한강(충주댐)으로부터 유입된 유량의 일부는 경안천 상류를 향해 진행되며, 특히 팔당댐 수문조작에 의해 경안천 합류부 흐름구조에 영향을 미치는 것으로 나타났다.⁴⁾

3.2. 퇴적물 내 pH, COD, LOI, C_{org} 및 영양염류의 분포 특성

조사지역의 퇴적물 내 pH 분포는 평균 6.8이며, TCOD의

Table 1. Mean grain size(Mz), pH, COD, LOI(%), C_{org}(%), T-N, T-P, fractionized P, and metal elements concentrations for each site.

Site	Mz	pH	COD	LOI	C _{org}	T-N	T-P	Adsorbed-P	NAI-P	Apatite-P	Residual-P	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr
	(ϕ)	(mg/g)	(%)	(μg/g)												
1	0.8	6.7	7.6	0.7	0.41	510	229	12	17	66	134	0.02	2.9	5.3	4.0	0.5
2	4.6	6.8	8.8	2.4	1.43	40	475	23	32	188	232	0.07	8.8	5.4	15.1	1.1
3	2.9	6.8	12.1	1.2	0.72	470	308	16	24	76	190	0.03	3.2	3.9	3.1	0.5
4	4.2	6.9	15.2	1.5	0.88	40	420	9	28	173	210	0.03	2.4	2.5	8.3	1.2
5	9.8	6.8	21.9	7.9	4.72	1360	1094	32	252	286	524	0.22	17.6	13.9	41.4	1.2
6	6.7	6.7	19.8	6.9	4.13	1330	1100	21	224	283	572	0.35	15.9	14.2	38.7	2.9
7	7.0	6.8	21.4	7.1	4.27	1350	1373	53	362	401	558	0.23	16.4	13.5	40.0	2.5
8	6.9	6.7	21.9	8.5	5.09	1380	1340	37	294	301	708	0.40	17.6	15.6	42.3	3.4
9	8.0	6.7	24.6	7.9	4.72	1520	1158	48	241	149	721	0.27	19.3	13.8	46.2	3.3
10	4.7	6.9	19.0	2.6	1.54	960	557	17	41	159	340	0.24	11.4	7.6	32.1	1.4
11	7.0	6.7	23.7	5.7	3.44	410	1349	58	397	343	587	0.26	14.1	11.2	37.2	2.5
12	7.1	6.7	21.7	8.8	5.28	1430	1385	47	249	293	760	0.39	18.6	10.4	44.4	3.5
13	5.6	6.8	18.7	2.9	1.72	650	640	21	61	258	300	0.17	7.5	7.9	32.2	1.4
14	6.4	6.7	20.2	4.7	2.83	1310	974	33	197	163	581	0.24	14.7	10.5	33.4	1.9
15	7.2	6.9	23.1	9.3	5.55	1410	1623	55	365	420	792	0.28	18.0	14.0	45.9	2.8
16	6.7	6.8	20.6	5.9	3.54	1360	1273	45	251	217	760	0.32	21.1	13.8	39.7	3.6
17	7.1	6.8	21.9	8.0	4.82	1380	1225	44	281	190	708	0.37	19.4	16.2	41.5	3.4
18	7.2	6.7	19.9	4.8	2.86	1270	1038	23	232	151	632	0.11	6.9	7.1	4.2	1.4
19	8.3	6.8	19.2	3.9	2.32	1320	572	17	49	124	382	0.19	9.0	10.4	16.2	2.2
20	6.7	6.8	21.3	8.0	4.79	1330	1124	35	265	274	550	0.32	16.8	15.7	38.8	3.0
21	5.8	6.6	19.4	3.3	1.99	1210	918	35	171	222	490	0.11	6.9	9.4	6.7	1.9
22	6.9	6.7	21.8	8.2	4.91	1410	1118	45	223	270	580	0.44	18.4	15.0	35.4	3.5
23	4.5	6.8	21.0	8.0	4.79	1270	1265	36	278	270	681	0.42	12.2	8.0	7.4	3.2
24	1.8	6.8	6.8	0.9	0.56	30	240	11	15	62	152	0.03	1.7	2.6	3.1	0.6
25	3.3	6.8	8.4	2.4	1.45	50	414	19	41	71	283	0.03	3.2	6.1	5.8	0.7
26	2.9	6.8	7.9	0.6	0.35	20	229	12	18	124	75	0.01	2.2	3.2	3.6	0.3
27	3.3	6.8	8.5	0.8	0.47	420	280	12	21	96	151	0.01	3.1	2.1	2.5	0.4
28	1.4	6.8	7.1	0.6	0.36	30	216	12	16	75	113	0.01	2.6	2.4	3.7	0.4
29	2.9	6.7	8.2	1.4	0.85	170	331	14	22	103	192	0.03	2.9	3.2	3.7	0.4
30	6.8	3.1	0.1	0.05	30	249	7	26	73	143	0.01	1.9	2.1	3.4	0.4	
31	1.6	6.8	9.8	0.9	0.53	110	252	11	24	85	132	0.01	2.7	2.4	4.2	0.4
32	3.6	6.9	8.3	0.6	0.34	60	278	12	19	98	149	0.01	3.4	2.6	6.5	0.5
33	4.6	6.7	13.1	6.3	3.79	1270	1008	24	232	231	521	0.13	12.2	7.4	18.1	1.3
34	2.8	6.8	3.1	1.4	0.83	510	326	12	28	92	194	0.02	2.7	3.2	4.5	0.3
35	3.2	6.9	8.4	3.4	2.02	420	613	19	49	230	315	0.07	3.1	3.6	8.6	0.9
36	6.9	6.8	19.2	20.2	12.1	2200	1454	33	392	198	831	0.44	7.8	12.8	55.8	4.0
37	4.2	6.7	2.5	0.9	0.53	50	252	12	17	98	125	0.01	1.9	2.1	2.5	0.3
38	5.8	6.8	13.2	6.5	3.89	1290	1110	28	266	145	671	0.19	10.8	7.2	22.3	1.2
39	3.6	6.9	9.3	4.3	2.6	70	672	14	54	172	432	0.03	7.3	6.7	7.1	1.1
40	3.0	6.7	7.1	1.2	0.69	50	274	18	28	65	163	0.07	3.2	2.9	3.6	0.6
Min	0.8	6.6	2.5	0.1	0.1	20	216	7.0	15.0	62.0	75.0	0.01	1.7	2.1	2.5	0.3
Max	10	7	25	20	12	2200	1623	58	397	420	831	0.44	21	16	56	4
Avg.	5.1	6.8	14.7	4.5	2.7	790	769	26	145	182	416	0.16	9.3	7.9	203	1.7

분포 특성은 입도 분포와 유사한 경향을 보인다(Fig. 3(a)). 퇴적물 내 COD의 분포는 2.5~24.6 mg/g(Avg. 14.7 mg/g)의 범위로 St. 9에서 24.6 mg/g으로 가장 높게 나타났다. 경안천 하류와 팔당호 하부지역(St. 6~23)은 20~25 mg/g의 값으로 다른 지역 보다 2배 이상 높은 분포를 보였다(Fig. 3(a)). 유기물 함량(LOI)의 분포 특성은 0.1~20.2%(Avg. 4.5%)의 범위로 St. 36에서 20%의 높은 값을 보였다(Fig. 3(b)). 입도와 유기물 함량과의 상관관계는 St. 36을 제외한 나머지 정점들에 대해 $r^2 = 0.88$ 로 입도가 세립 할수록 유기물 함량이 높아지는 일반적인 경향을 보였다(Fig. 4). 즉 입자가 작을수록

표면적이 넓어져, 더 많은 물질이 흡착할 수 있는 물리적 면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 St. 36 지점은 평균 입도가 7 (ϕ silt) 임에도 불구하고, 퇴적물 내 유기물 함량이 20%로 일반적인 환경과 비교할 때 약 3배 이상 높은 값을 보인다(Fig. 4). 이러한 원인은 이 지역 주변에 비점오염원 저감을 위해 인공습지를 약 2 km 이상으로 조성하여 퇴적물 내 유기물 함량이 높아진 것으로 사료된다. T-N의 퇴적물 내 분포 특성은 20~2,200 μg/g(Avg. 790 μg/g)으로 넓은 농도의 범위를 보이며, St. 36에서 2,200 μg/g으로 가장 높은 값을 나타내었다(Fig. 5(a)). T-N의 전반적인 분포 특성

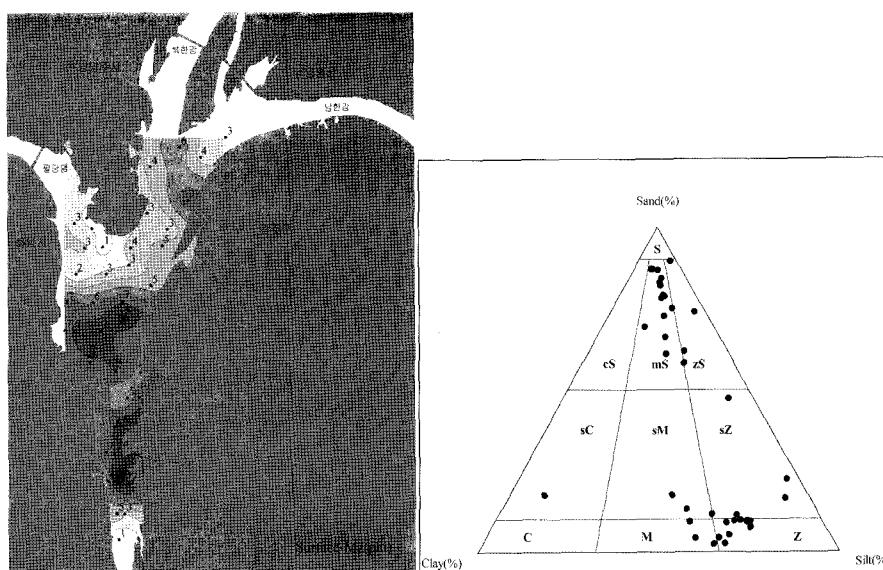


Fig. 2. The soil composition of sediment in Lake Paldang.



Fig. 3. Distributional characteristics of COD(mg/g) and LOI(%) of sediment in Lake Paldang.

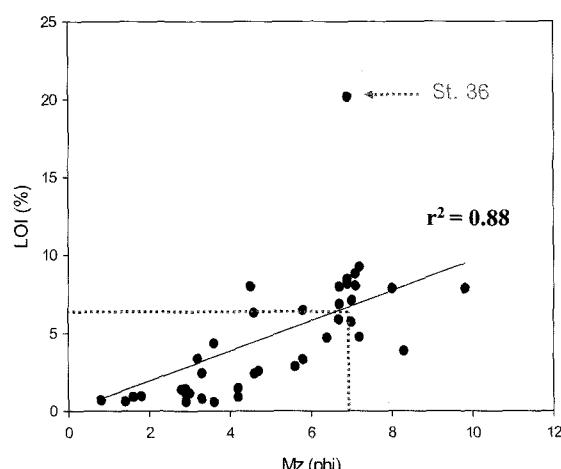


Fig. 4. Correlation relationship between the mean grain size and the LOI(%) content.

은 입도 및 유기물 함량 분포와 유사하나, St 10, 11, 13에서는 1,000 $\mu\text{g/g}$ 이하의 농도를 나타내었다. T-P의 분포 특성 역시 T-N과 유사한 경향을 보였으며, 216~1,623 $\mu\text{g/g}$ (Avg. 769 $\mu\text{g/g}$)의 범위로 경안천 하류 지점 St. 15에서 가장 높은 값을 나타내었다(Fig. 5(b)). T-P의 존재형태별 농도는 residual P(Avg. 416 $\mu\text{g/g}$)>apatite P(Avg. 182 $\mu\text{g/g}$)>NAI-P(Avg. 145 $\mu\text{g/g}$)>Adsorbed P(Avg. 26 $\mu\text{g/g}$)의 순으로 나타났다 (Table 1, Fig. 6). 수체로 용출 가능성성이 큰 미립자 표면에 주로 흡착된 인(Adsorbed-P)과 주로 점토 표면에 철이나 알루미늄과 결합되어 침전되거나 Fe_2O_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, MnO_2 등이 생성될 때 공침되어 있는 NAI-P(Non apatite inorganic P)가 약 20% 이상을 차지하며, 특히 팔당호 습지 앞에 위치한 St. 36과 경안천 하부, 우산천 하부인 St. 7, 11에서 높은 값을 나타내었다(Fig. 6).

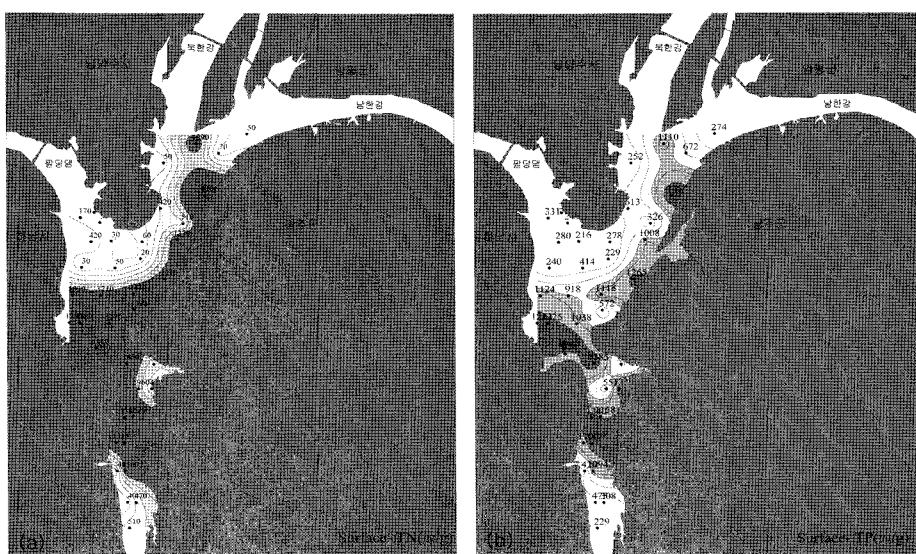


Fig. 5. Distributional characteristics of T-N and T-P concentration of sediment in Lake Paldang.

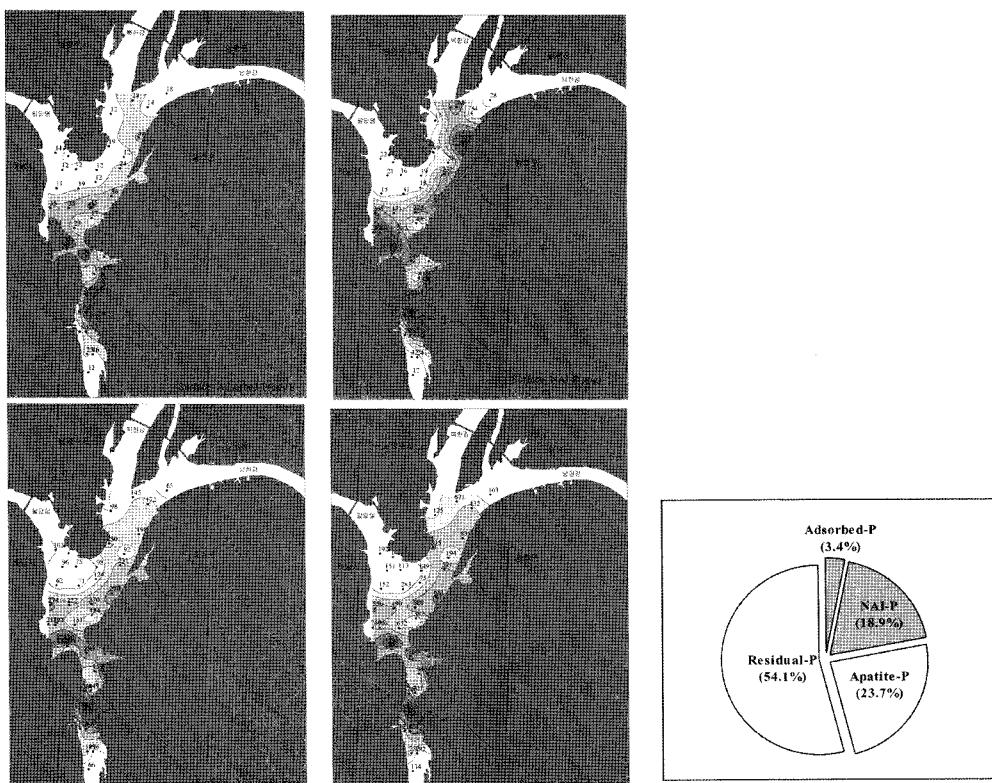


Fig. 6. Distributional characteristics of fractionated-P concentration of sediment in Lake Paldang.

3.3. 퇴적물 내 금속 원소의 분포 특성

금속의 분포 특성을 보면 Cd은 $0.01\sim0.44 \mu\text{g/g}$ (Avg. $0.16 \mu\text{g/g}$)의 범위를 보이며, 경안천의 좌측(St. 6, 8, 12) 지역과 St. 22, 23, 36에서 약 $0.4 \mu\text{g/g}$ 이상의 값을 보인다(Fig. 7(a)). Cu의 분포 특성은 $1.7\sim21.1 \mu\text{g/g}$ (Avg. $9.3 \mu\text{g/g}$)의 범위이며, 남한강을 따라 좌측 지역과 경안천 하류, 팔당호 하부 지역에서 약 $10 \mu\text{g/g}$ 이상으로 분포하며, 특히 St. 15, 16, 17에서 약 $20 \mu\text{g/g}$ 으로 높은 값을 나타내었다(Fig. 7(b)). Pb은 $2.1\sim6.2 \mu\text{g/g}$ (Avg. $7.95 \mu\text{g/g}$)로 낮은 농도를 보였다

(Fig. 7(c)). Zn의 경우 $2.5\sim55.8 \mu\text{g/g}$ (Avg. $20.3 \mu\text{g/g}$)으로 St. 36에서 $55.8 \mu\text{g/g}$ 으로 가장 높게 나타났다(Fig. 7(d)). 우산천 아래 지역(St. 5, 6, 7, 8, 9)과 팔당호 좌측(St. 12, 15, 16, 17)에서 $40 \mu\text{g/g}$ 이상의 높은 분포 특성을 보인다. 특히 Cu와 Zn는 오염에 민감한 원소로서 오염 퇴적물 내에서 이들 원소의 농축 현상은 여러 연구를 통해 보고되었으며, sulfide가 형성되는 무산소 환경에서 더욱 두드러지게 나타난다.^{7,8)} St. 36을 제외한 각 금속과 유기성 탄소와의 상관관계를 보면, Cd($r^2 = 0.81$), Cu($r^2 = 0.86$), Pb($r^2 = 0.81$), Zn(r^2

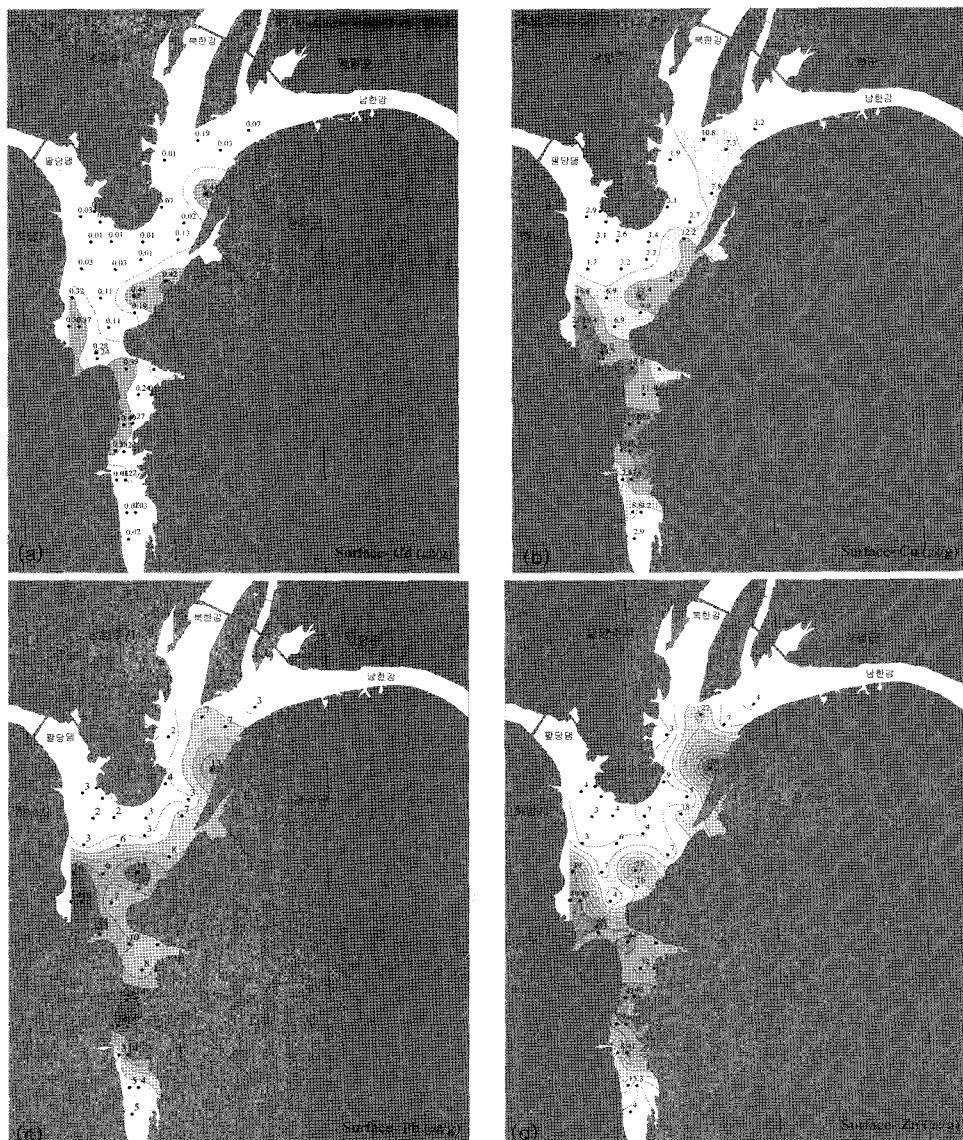


Fig. 7. Distributional characteristics of metal content of sediment in Lake Paldang.

= 0.70)는 유기성 탄소와 밀접한 상관관계를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 8). Cu는 대부분이 organic ligands와 다양한 결합 형태를 이루어 안정화 되려는 속성이 있으며, 공극수에서 organic ligands와 결합하여 높은 안정화를 이루는 금 속에는 $Cu > Pb > Cd$ 순으로 제시된 바 있다.^{9~11)}

4. 고찰

4.1. 요인분석 (Factor Analysis)

요인분석(Factor analysis)은 많은 변수들을 유사한 항목(공통차원)들끼리 묶어 적은수의 요인으로 축소시키는 통계학적 분석 방법이다.^{12,13)} 요인분석의 절차는 변수들간의 상관관계를 계산한 후 요인을 추출하고, 이로부터 어떤 변수들이 어떤 요인에 의해 높게 관계되는지 명확하게 알기 위해 요인을 직교회전(orthogonal rotation)중 행렬의 열을 단순화(varimax)하여 그에 따른 요인 구조를 명확히 알아낼 수 있다.

즉, 상관분석에서 상관계수가 큰 원소들은 대체로 그 지화학적 특성이나 환경 내에서의 거동 등과 밀접한 관련성을 갖는다. 따라서 이러한 상관계수 분석은 중금속 원소들의 함량 및 분포를 조절하는 일차적 요인을 이해하는데 유용하다. 고유치(eigenvalue)는 각 요인이 기존 변수의 정보를 어느 정도 설명하는지를 나타내는 지표이다. 아이겐이 크다는 것은 그 요인의 변수들이 분산을 잘 설명한다는 것을 의미한다. 특정 요인에 적재된 모든 변수의 적재량을 제곱하여 합한 값으로 특정 요인에 대한 표준화된 분산을 말한다.

팔당호 표층 퇴적물내 금속들의 분포와 함량에 영향을 미치는 주요 원인을 파악하기 위해 20개 항목에 대해 계절별로 요인분석을 실시하였다. 각 변량들의 상관관계를 통해 3개의 요인이 추출되었으며, 이를 좀더 명확히 설명하기 위해 varimax rotation으로 회전하였다. 고유치(eigenvalue loading)의 누적값은 각각 64.2%, 13.8%, 6.6%를 나타내었다(Table 2). 요인별 변수의 적재값 분포를 토대로 팔당 호수 퇴적물

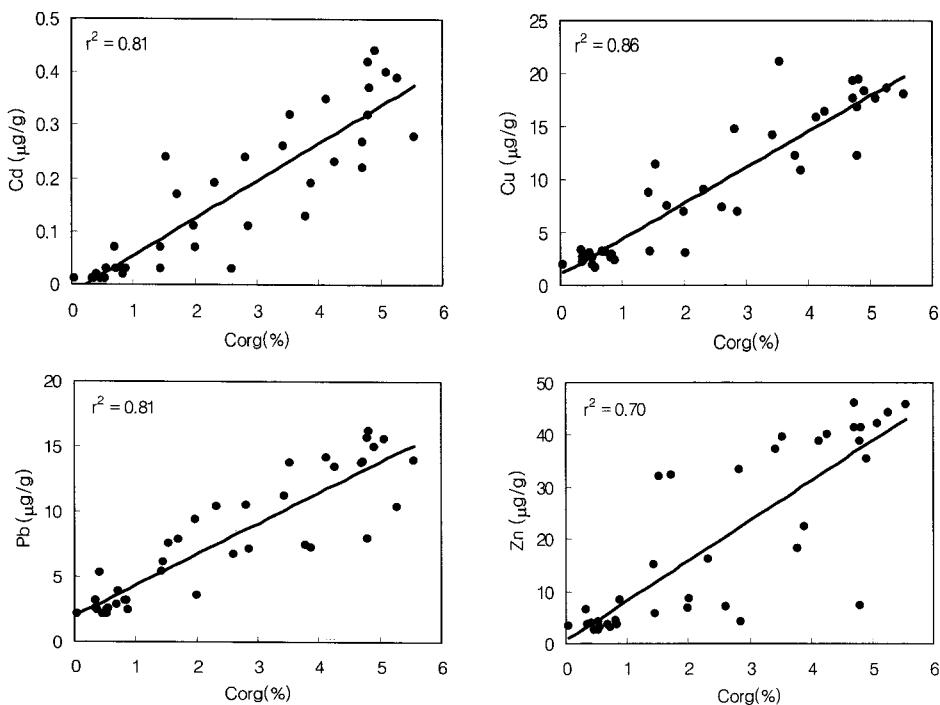


Fig. 8. Correlation between $C_{org}(\%)$ and metals in Lake Paldang.

내 금속의 분포를 좌우하는 환경적 영향을 해석하고자 하였다. Factor 1의 고유치(eigenvalue)는 64.2%로 입도, Silt, COD,

Table 2. Rotated component matrix for the sediment

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Communality
Mz	0.73	0.54	0.21	0.867
Sand	-0.80	-0.40	0.18	0.841
Silt	0.89	0.12	-0.08	0.807
Clay	0.41	0.83	0.13	0.870
pH	-0.05	-0.09	0.92	0.856
Water Content	0.10	0.83	-0.30	0.784
COD	0.82	0.40	0.18	0.857
LOI	0.92	0.26	0.05	0.911
T-N	0.79	0.16	-0.26	0.710
T-P	0.95	0.25	0.00	0.959
Adsorbed-P	0.88	0.19	-0.17	0.841
NAI-P	0.92	0.23	-0.12	0.912
Apatite-P	0.81	0.06	0.26	0.729
Residual-P	0.92	0.29	-0.06	0.934
Cd	0.93	0.20	0.08	0.909
Cu	0.90	0.23	0.02	0.859
Pb	0.88	0.25	-0.10	0.838
Zn	0.73	0.36	0.30	0.745
Cr	0.86	0.30	0.07	0.833
Hg	0.87	0.34	0.05	0.870
Eigenvalue loading(%)	64.2	13.8	6.6	

Extraction method: Principal component analysis

Rotation method: Varimax rotation method

LOI, T-N, T-P, Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, Hg의 상관성이 매우 큰 것으로 나타났다. 즉, 입도가 세립하고, 유기물 함량이 높은 지역에서 T-N, T-P 및 친유기성 금속(organophilic metals)들이 높게 분포하는 것을 알 수 있다. 즉 이들은 입자 크기의 영향을 크게 받는 특성을 갖는 것으로 확인되었다. Factor 2에 의해 주로 조절되는 금속들은 입도, Clay, 수분 함량으로 기여도는 약 14%에 해당한다.

4.2. Geoaccumulation Index를 이용한 중금속 오염 평가

퇴적물 내 중금속 오염 평가는 주로 분석된 중금속의 함량을 자연적인 농도와 비교하는 방법을 이용한다. 그 방법에는 enrichment factor, geoaccumulation index, concentration enrichment ratio, metal pollution index 등 다양한 방법이 있다. 이 중 연구지역에서는 지역의 지질 특성이 반영되어 오염 정도를 판별할 수 있는 I_{geo} (geoaccumulation index)를 이용하여 계산하였으며, 이를 근거로 연구지역의 오염정도를 정량화하였다. I_{geo} 는 Müller(1979)에 의해 제시된 것으로 퇴적물의 오염정도를 평가하기 위해 이용되며, 식 (1)을 통하여 계산된다.¹⁴⁾ 일반적으로 총 금속의 농도는 입자의 크기가 세립할수록 높아지므로, 퇴적물내 금속의 함량이 동일하더라도, 그 지역의 입도를 고려하여 오염 지수를 산정하는 것이 타당하다 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Müller의 식 (1)에 지역별 입도를 고려하여 수정한 식 (2)를 이용하여 오염지수를 산정하였다.¹⁴⁾ I_{geo} 값은 주어진 시스템에서 어떤 미량금속의 상대적인 농축정도를 반영한다. 퇴적물에서 미량금속의 I_{geo} 값은 class 1(0~1, unpolluted to moderately polluted), class 2(1~2, moderately polluted), class 3(2~3, moderately to strongly), class 4(3~4, strongly polluted), class 5

Table 3. Comparison geoaccumulation index(I_{geo}) and I'_{geo} for total metals in study area

Area ^a	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr
A	-2.0	-2.2	-1.1	-2.1	-1.2
B	1.4	0.1	0.5	0.5	0.6
C	-2.1	-2.1	-1.3	-2.3	-1.7
Area ^a	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr
A	-1.2	-0.8	0.6	-1.7	0.4
B	0.9	-1.9	-0.2	-0.6	-0.5
C	-1.4	-0.7	0.2	-1.6	0.1

^a Area (A: Upper of Gyeongan river, B: Middle of Paldang lake, C: Junction of Namhan river and Bughan river)

(4~5, strong to very strong)로 분류된다. 그리고 I_{geo} 값이 0보다 작은값을 가질 경우에는 오염되지 않은 지역으로 구분하였다.¹¹⁾ 여기서, C_n 은 분석된 시료의 농도를, B_n 은 reference 값으로, 본 연구지역에서는 평균입도가 5으로 유사하고 오염이 적은 것으로 판단되는 지점(St. 2)을 사용하였으며, M_z 은 조사 지점의 입도와 reference 지역의 입도비로 즉, $M_z = M_{zc}/M_zB$ 를 나타낸다.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5} \quad (1)$$

$$I'_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5 \times M_z} \quad (2)$$

지역적 특성을 고려하여 경안천 상부(A area), 경안천 하부 및 팔당하부 지역(B area), 북한강과 남한강 합류부 지역(C area)으로 3지역을 구획하여 비교평가 하였다(Table 3). 팔당호 퇴적물의 경우, 입도를 고려하지 않은 I_{geo} 값과 입도를 보정한 I'_{geo} 모두 크게 오염되지 않은 것으로 나타나 중금속 오염이 심각하지 않은 것으로 나타났다(Table 3). 경안천 하부와 팔당호 하부 지역(B area)은 Cd이 1.4의 값으로 Class 1에 속하며, 약간 오염된 것으로 나타났다. 각 지역의 입도를 고려한 I'_{geo} 는 A, C 지역은 상대적 Index 값이 I_{geo} 보다 다소 높아지긴 하였으나, 오염되지 않은 것으로 나타났으며, B 지역은 I_{geo} 보다 낮은 Index를 보였다. 즉, 입도를 보정하였음에도 모든 지역에서 0 이하 및 Class 1에 속하는 것으로 나타나 팔당호 퇴적물 내 중금속 오염은 심각하지 않은 것으로 평가된다.

5. 결 론

1) 팔당호 퇴적물 내 입도의 분포 특성은 이 지역의 수리 특성과 일치하였다. 북한강과 남한강 하류 지역부터 팔당호 본류는 조립한 사질로 나타났으며, 광동교부터 경안천 하류 지역은 세립한 실트로 나타났다.

2) 입도와 유기물 함량의 상관관계는 $r^2 = 0.88$ 로 높은 상관

성을 보였으며, 유기물 함량이 높은 지역에서 영양염류와 중금속 역시 높은 분포를 보였다. 이는 통계학적 기법인 Factor analysis를 통해 입도, COD, LOI, T-N, T-P, Cd, Cu, Zn, Pb 등의 고유치(eigenvalue)가 64.2%로 높은 상관성을 나타냈다.

3) 팔당호 퇴적물 내 T-P의 Fractionated-P 분석 결과, 환경 변화에 의해 물속으로 용출될 확률이 큰 Adsorbed-P과 NAI-P 부분은 20%로 나타났다.

4) 퇴적물 내 중금속의 상대적 오염 평가를 위해 각 지역의 입도를 보정한 I'_{geo} 값을 계산하였다. 입도를 보정하였음에도 I'_{geo} 는 모든 지역에서 0 이하 및 Class 1에 속하는 것으로 나타나 퇴적물 내 중금속 오염은 심각하지 않은 것으로 나타났다.

사사

본 연구는 “환경부 차세대 핵심환경기술개발사업(2005-01361-1)” 지원에 의해 수행되었으며, 자료협조에 도움을 주신 환경관리공단과 강원대학교 전상호 교수님께 감사를 드립니다.

참고문헌

- Cho, Y. G., Lee, C. B., and Choi, M. S., “Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea,” *Marine Geology*, **159**, pp. 111~129(1999).
- Balkis, N., Cagatay, M. N., “Factors controlling metal distributions in the surface sediments of the Erdek Bay, Sea of Marmara, Turkey,” *Environment International*, **27**, pp. 1~13(2001).
- Horowitz, A. J., “A primer on sediment-trace element chemistry,” Lewis Publishers, Michigan. U.S.A., **136**(1991).
- 팔당호 퇴적물 현황 및 수리특성 조사보고서, 환경관리공단(1999).
- Hieltjes, A. H. M., Liklema, L., “Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments,” *Hour., Environ. Qual.*, **9**(3), pp. 405~407(1980).
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., and Bisson, M., “Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals,” *Anal. Chem.*, **51**(7), pp. 844~851(1979).
- Jung, H. S., Lee, C. B., Cho, Y. G., Kang, J. K., “A mechanism for the enrichment of Cu and depletion of Mn in anoxic marine sediments, Banweol intertidal flat, Korea,” *Mar. Pollut. Bull.*, **32**, pp. 782~787(1996).
- Zaggia, L. and Zonta, R., “Metal-sulphide formation in the contaminated anoxic sludge of the Venice canals,” *Applied Geochemistry*, **12**, pp. 527~536(1997).
- Bloom, P. R., “Metal organic matter interactions in soil,” In: *Chemistry of the Soil Environment*, ASA Spec. Publ. Soil Sci. Soc. Am, Madison, Wisc. **40**, pp. 129~150(1981).
- Förstner, U., Ahlf, W., Calmano, W., Kersten, M., and

- Salomons, W., "Mobility of heavy metals in Dredged Harbor sediments," *Sediments and Water Interactions.*, Springer-Verlag, London, pp. 371~380(1984).
11. Stumm, W. and Morgan, J. J., "Aquatic chemistry," Wiley Interscience, New York, 3rd ed., pp. 583(1996).
12. Krzysztof, L. and Danuta, W., "Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir," *Chemosphere*, 51, pp. 723~733(2003).
13. Grant, A., "Multivariate statistical analyses of sediment analyses of sediment geochemistry," *Mar. Pollut. Bull.*, 21, pp. 297~299(1990).
14. Müllr, G., "Schwernetalle in den Sedimenten des Rheins-Veranderungen seit," *Umschau*, 79, pp. 778~783(1979).