

시화호의 퇴적환경과 중금속오염

현상민 · 천중화 · 이희일
한국해양연구소 해양지질연구단

Sedimentary Environments and Heavy Metallic Pollution at Shihwa Lake

SANGMIN HYUN, JONG-HWA CHUN AND HI-IL YI
*Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and
Development Institute, Ansan P.O Box 29, Seoul 425-600, Korea*

시화호 내 5개 정점에서 채취한 주상시료들을 지화학적으로 분석하여 시화방조제 건설이후 퇴적환경 및 중금속오염에 대해 연구하였다. 시화호내 퇴적환경은 유기물의 C/N비와 C/S비에 의해 무산소환경, 산화환경, 그리고 두 환경이 공존하는 지역으로 세분되었다. 산화-환원환경을 지배하는 요인은 수심과 퇴적물의 공급차이인으로 사료된다. 주상시료에서 분석된 지화학적 원소중 Mn-U-Mo간의 상관관계는 각 정점간의 산화 환원환경의 지시자로 사용이 가능하다. 주상시료들의 Al과 Ti 함량은 퇴적물특성에 의해 구분되며, 5개 중금속(Cr, Ni, Cu, Zn 및 Pb)함량은 중금속에 의한 오염정도를 지시한다. 중금속의 상대적 함량은 방조제에 가까운 시화호 중심부분에서 보다 안산-반월공단에 가까운 지역에서 높게 축적되어 있다. 특히 주상시료의 표층퇴적물은 시화호 중앙부보다 시화-반월공단쪽이 약 2-8배 정도로 중금속축적이 높다.

Five core sediments acquired from the Lake Shihwa are analyzed for variations of sedimentary environment and heavy metal pollution after the Shihwa seawall construction. The depositional environment of the study area is divided into anoxic, oxic and mixed suboxic conditions based on the C/N ratio and C/S ratios of organic matters. Controlling factors for redox condition are the water depth and the difference in industrial effluents supply. Correlations among geochemical elements (Mn, U, Mo) show a distinctive difference and thus can be used as an indicator of redox condition. The content of Al, Ti are dependent on the sediment characteristics, and the contents of heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, and Pb) indicate heavy metal pollution. The concentrations of heavy metals are higher near Shihwa-Banwol industrial complexes than the central part of Lake Shihwa. Especially, the accumulation of the heavy metal at the surface sediments near Shihwa-Banwol industrial complex are two to eight times higher than in the center of Lake Shihwa.

서 론

한국 서해연안에 위치하고 있는 시화호는 1994년 인공방조제 축조에 의해 형성된 호수이다. 인공방조제가 건설되기 이전에는 전형적인 조간대(tidal flat)환경이었으나 방조제 건설에 의해 해수유입이 중단되면서 생태계의 급격한 변화를 비롯한 많은 환경변화가 야기된 지역이다. 또한 시화호 주변 시화-반월공단과 안산시 등으로부터 지속적으로 유입되는 각종 오폐수는 시화호의 환경변화를 가속화하고 있다고 생각된다. 시화호는 인공방조제 축조 이후 시화호 환경 보전대책 수립에 관한 수질, 생태, 지질 및 수질모니터링 시스템 등에 대한 연구대상이 되어왔다(박 등, 1997; 한 등, 1997; 최 등, 1997; 한국해양연구소, 1998). 그러나 시화호의 환경개선을 위한 결정적인 방법 개발에는 미치지 못하였으며 이로 인해 현재 시화호는 담수호로서의 역할을 포기한 채 해수유입에 의존한 환경개선에 역점을 두고 있다.

1996년 여름철의 조사결과를 보면, 시화호는 수심 6-8 m 부근에서 뚜렷한 밀도성층이 형성되어 저층은 환원성환경을 유지하고 있다고 보고되었으며 이러한 현상은 시화호 전역이 담수의 영향을 심하게 받은 결과로 해석되었다. 그러나 97년 7월 이후 외해수가 유입되기 시작하면서 담수의 유입에 의한 성층화 현상이 96년보다 얕은 수심 3-3.5 m에 존재한다고 보고되었다(한국해양연구소, 1998). 기존 연구결과들은 시화호가 자연상태에 있을 때, 해수 유입을 차단했을 때, 그리고 빈번한 해수 유입이 있었을 때 등 여러 환경요건에 따라 유동적이었음을 시사한다. 시화호내의 수괴가 무산소화되고 성층화되면서 무생대(azoic area)인 중오염역이 나타나게 되었다(홍 등, 1997).

해양 생물활동은 해수 중 용존무기물과 깊은 관계에 있으며, 퇴적물 중 중금속의 거동 및 축적은 해수 중 미량원소와 해저퇴적환경과 밀접히 관계된다고 보고되었다(현과 최, 1997). 위에서 서술한 바와 같이 시화호가 짧은 기간동안에 공간적으로 산화

환원상태를 반복하였다고 한다면 이러한 현상은 해저 퇴적물 내에 기록되어 있을 것이다. 시화호 내에서 일부원소의 고농도 축적 혹은 감소는 이미 보고된바 있다(Jung *et al.*, 1996). 따라서 퇴적물의 지화학적 분석을 통해 퇴적환경을 이해하거나 전반적 환경변화를 역추적 하는 것은 가능하다.

현재까지 시화호에 관한 연구들은 대부분 해수 특성이나 생태학적인 종변화 등에 집중되어 왔다(Ahn *et al.*, 1995; 허와 오, 1997; 한국해양연구소, 1998). 이에 반해 시화호의 퇴적환경과 퇴적물에 대한 중금속 오염에 대한 연구는 상대적으로 빈약한 편이라 할 수 있다. 그러나 기술한 바와 같이 수괴특성의 변화나 환경오염은 결과적으로 퇴적물 속에 기록되기 때문에 퇴적물에 대한 지화학적 연구를 통해 시화호의 환경변화를 연구하는 것은 필연적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시화호에서 얻어진 주상시료에 대한 지화학적 연구를 수행하여 시화호 퇴적물의 지화학적 특성을 밝힘과 동시에 퇴적환경의 시공간적 변화 및 중금속 오염에 관한 평가를 목적으로 한다.

시화호의 수리학적 배경 및 퇴적상

총길이 12.7 km인 시화방조제 내의 시화호는 서해연안에 위치하고 있으며 약 25 km의 길이와 4 km의 폭을 가진다(Fig. 1). 시화호 내 수심은 약 4-18 m 범위로 배수갑문의 개폐에 의해 상대적으로 변화며, 시화호로 유입되는 담수는 인근 4개 하천으로부터 기원한다(한국해양연구소, 1998). 시화호는 반월 조간대로 불리는 조간대 환경으로 1994년 1월 시화방조제 축조 이후 해수유입이 차단되었다가 1996년부터 해수유입이 시작되어 1997년에는 해수화 되었다. 인공방조제 축조 후에는 지속적인 담수 유입에 의해 상부층에는 밀도가 낮은 담수가, 그리고 하부층은 고염의 높은 밀도를 가지는 수괴를 형성하였다. 이러한 성층은 외해수의 유입량에 따라 유동적이며 생물활동과 중금속 축적과 깊이 관계되리라고 추측된다.

시화호는 해저지형에 의해서 깊은 수심의 해저수로와 상대적으로 얇고 평탄한 지역으로 구분된다. 지리적으로 배수갑문층이 반월공단측의 시화호보다 급한 경사와 큰 규모의 해저수로가 발달한다(한국해양연구소, 1998). 배수갑문근처에서 채취한 주상시료들은 조개편을 포함하는 사질퇴적물과 사질/실트질 교호퇴적물들로 구성된다(Fig. 2). 이에 반하여 반월공단 주변에서 채취한 주상시료들은 주로 점토/실트질 교호퇴적물로 구성되어 있으며 조

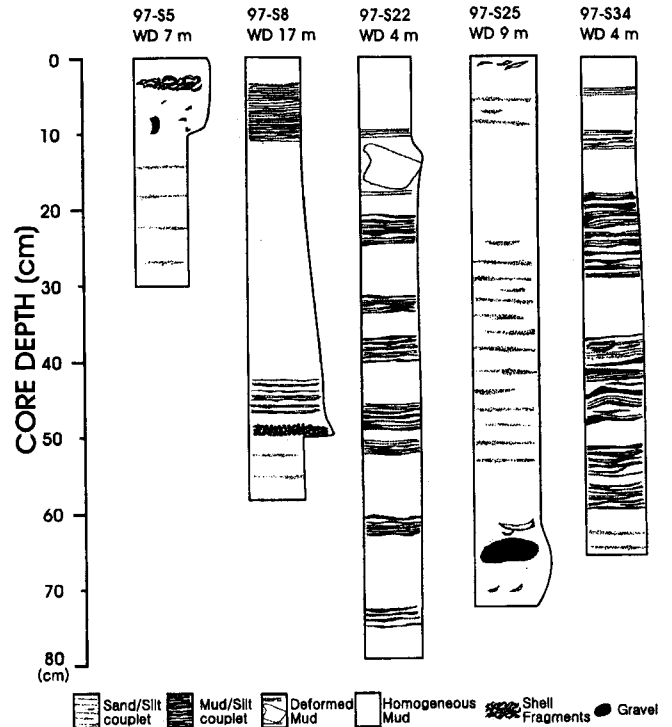


Fig. 2. Vertical descriptions of five sediment cores. WD is water depth in meter.

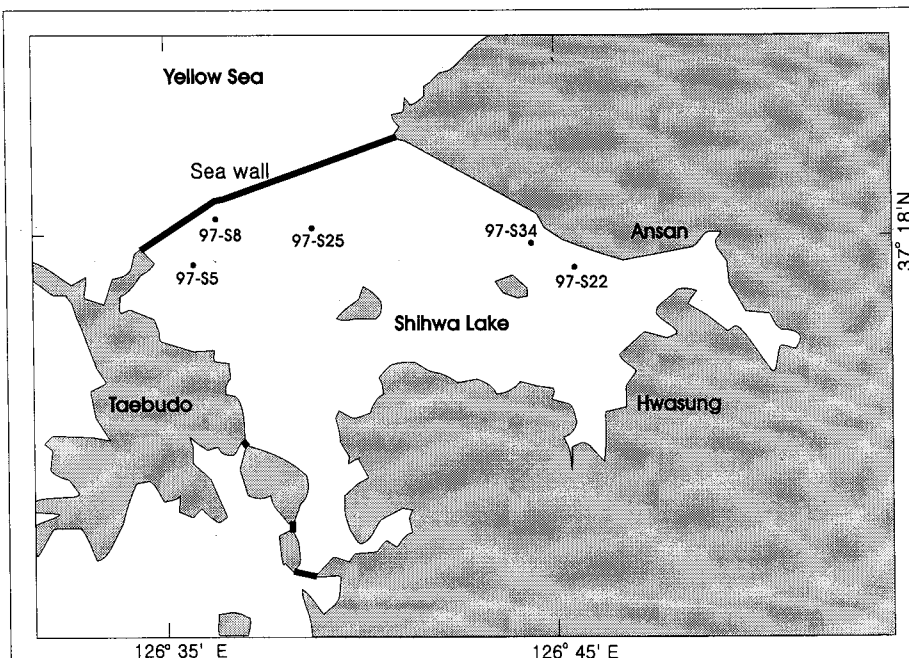


Fig. 1. Sampling stations in the Shihwa Lake. Five core locations are used for this study.

개편들을 포함하지 않는다.

재료 및 방법

시화호의 퇴적환경과 지화학적 특성을 밝히기 위해서 1997년 3월과 6월에 정밀수심측량과 함께 주상시료를 채취하였다(한국해양연구소, 1998). 주상시료는 선행된 정밀 해저지형자료를 근거로 해저수로와 평탄한 지역에서 중력시추기(gravity core)를 사용하여 5개의 정점에서 채취되었다(Table 1). 채취된 주상시료는 양면으로 절개하여 반쪽은 입도와 지화학 분석을 실시하였고, 나머지 반쪽은 X선 사진 촬영하여 퇴적구조를 해석하였다. 시화호의 주상시료 퇴적물에 대한 지화학적 분석은 유기물분석과 탄산

Table 1. Core location, water depth and core length

Station	Latitude	Longitude	Water depth (m)	Core length (cm)
97-S5	37°17.572'N	126°36.142'E	7	30
97-S8	37°18.349'N	126°36.723'E	17	57
97-S22	37°17.390'N	126°45.888'E	4	78
97-S25	37°18.166'N	126°39.335'E	9	73
97-S34	37°17.792'N	126°44.382'E	4	65

염분석, 중금속원소를 포함하는 주요원소(major elements), 미량원소(minor elements) 및 희토류원소(rare earth elements; REE)를 측정하였다. 또한 퇴적물의 특성을 밝히기 위하여 함수율과

Table 2. Analytical results of the organic matter for the cores

Depth (cm)	Total Carbon (%)	TOC (%)	Sulfur (%)	CaCO ₃ (%)	C/N	C/S ratio
97-S5						
0	0.62	0.20	0.10	3.47	5.22	2.03
10	0.45	0.15	0.07	2.51	5.26	2.09
20	0.23	0.19	0.05	0.39	6.03	3.63
29	0.27	0.21	0.05	0.55	6.41	4.25
97-S8						
1	0.71	0.53	0.20	1.52	6.76	2.70
6	0.42	0.38	0.11	0.33	12.41	3.64
11	0.15	0.08	0.06	0.55	5.47	1.35
29	0.15	0.11	0.05	0.29	7.45	2.29
41	0.21	0.10	0.07	0.87	4.94	1.59
51	0.29	0.25	0.07	0.32	6.67	3.70
55	0.28	0.25	0.06	0.25	6.44	4.31
97-S22						
0	1.25	1.15	0.22	0.85	8.14	5.10
5	1.08	0.92	0.16	1.36	7.11	5.61
12	0.41	0.30	0.09	0.96	5.84	3.18
20	0.45	0.30	0.21	1.20	5.65	1.46
29	0.72	0.63	0.32	0.73	7.31	2.00
50	0.47	0.35	0.26	0.98	6.02	1.36
70	1.03	0.81	0.38	1.83	6.39	2.16
97-S25						
0	0.43	0.23	0.15	1.60	6.77	1.53
10	0.26	0.19	0.21	0.61	6.83	0.88
29	0.24	0.21	0.22	0.29	7.68	0.98
50	0.27	0.23	0.24	0.40	7.33	0.92
70	0.28	0.17	0.20	0.92	6.63	0.89
97-S34						
1	0.57	0.50	0.15	0.58	6.45	3.42
11	0.97	0.87	0.42	0.86	7.45	2.09
21	0.57	0.50	0.22	0.65	7.76	2.27
30	0.57	0.45	0.20	0.99	6.81	2.23
34	0.26	0.19	0.08	0.58	5.90	2.20
41	0.82	0.71	0.26	0.92	7.34	2.73
51	0.56	0.44	0.30	1.00	6.83	1.47
61	0.46	0.36	0.25	0.83	7.34	1.44

퇴적물의 밀도도 직접 측정되었다(한국해양연구소, 1998). 주상시료들의 수직적인 지화학적 특성을 밝히기 위해 총 60개 (유기물 31개 시료, 주요원소 및 미량원소 29개 시료)의 퇴적물을 분석하였다.

퇴적물 내에 포함된 유기물의 측정은 105°C에서 24시간 건조한 후 곱게 분말화한 시료에서 CHNS 분석기를 사용하여 직접 총탄소 함량을 측정하였다. 총탄소를 측정한 다음 같은 시료를 이용하여 1N 염산으로 무기탄소를 제거한 후 총유기탄소 함량을 측정하였다. 탄산염 함량은 총탄소와 총유기탄소와의 함량차에 의해 다음과 같은 계산식에 의해 계산하였다.

$$\text{탄산염 함량(\%)} = (\text{총탄소\%} - \text{총유기탄소\%}) \times 8.33.$$

총황량(total sulfur)은 CHNS에서 측정한 값을 그대로 적용하였으며 C/N ratio는 총 유기탄소에 대한 총질소의 비로 결정하였다.

주상시료 퇴적물 중 주요원소, 미량원소 및 희토류원소는 유기물 분석시와 같이 건조한 시료를 분말화 하여 한국 기초과학연구소에서 유도결합 플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma, ICP)로 분석되었다. 이들 주요원소와 미량원소에 대한 분석오차는 약 10% 정도로 추정된다.

결과 및 토의

퇴적물에 대한 유기물분석(C/N 및 C/S 비)

시화호에서 채취한 5개 지점에서 얻어진 31개의 퇴적물 주상시료에 대한 지화학적 분석결과(유기물 및 탄산염 함량, C/N ratio, C/S ratio)는 Table 2에 표시하였다. 총유기탄소의 함량 중에서 최대치(1.15%)를 갖는 점은 97-S22점의 표층이며, 97-

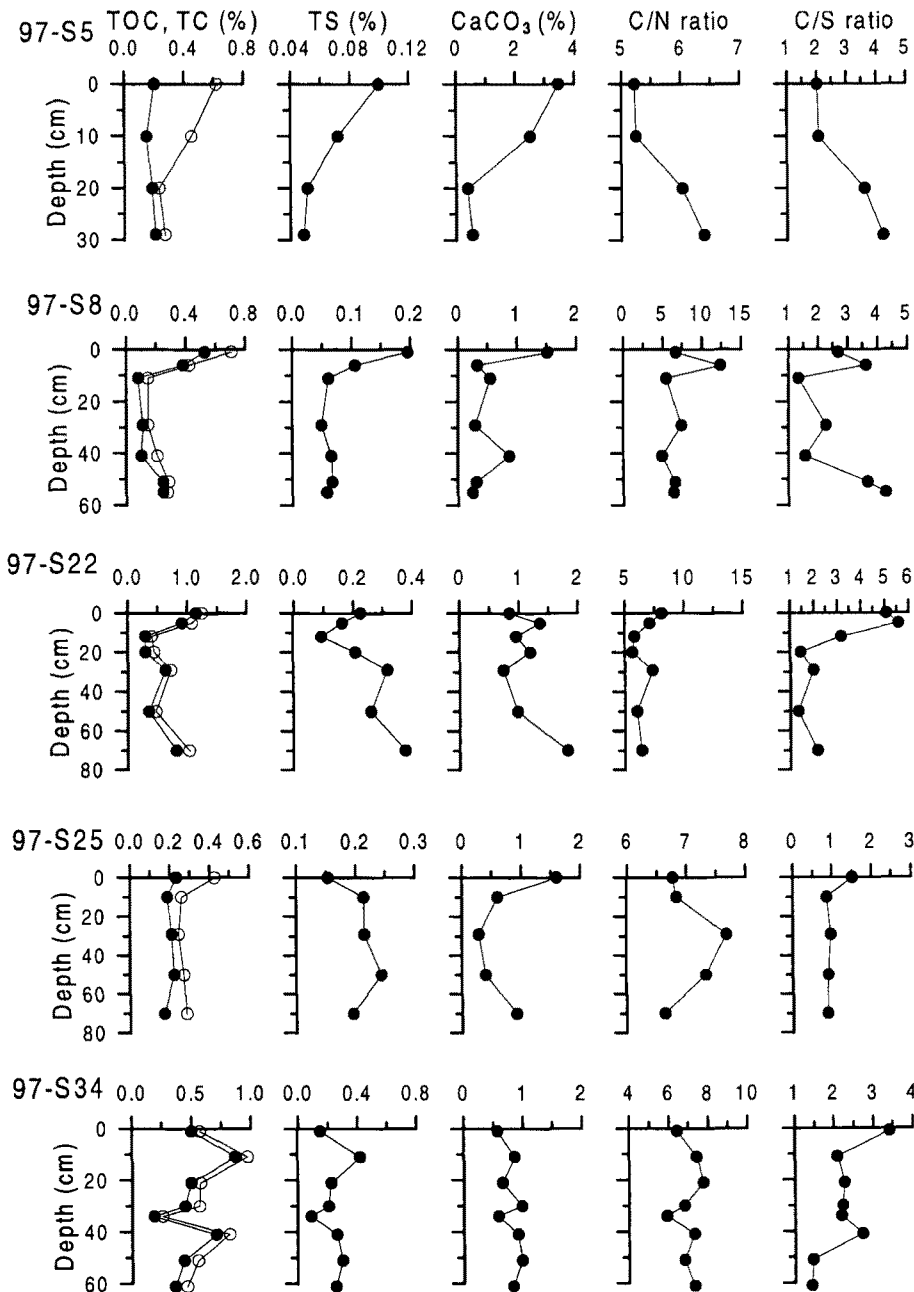


Fig. 3. Vertical profiles of total organic carbon, total sulfur, carbonate, C/N ratio and C/S ratio from the five core sediments.

S8지점의 심도 11 cm에서는 최소치(0.11%)를 갖는다. 탄산염 함량은 97-S5의 표층퇴적물에서 최대치 3.47%를 보이며 최소치는 97-S8과 97-S25의 주상시료에서 약 0.29%로 나타났다.

해저퇴적물에 유기탄소를 축적시키는 기작은 주로 표층에서의 생물생산, 유기탄소의 보존증가 또는 대륙으로부터의 유기물공급에 의해 조절된다. 유기물의 특성을 지시하는 총유기탄소에 대한 총질소의 비(C/N ratio)는 여러 형태의 유기물의 기원을 밝히는 데 이용되어 왔다. 해양생물의 기초생산에 의해 형성된 유기물은 C/N 비가 약 10 이하를 보이며, 주변대륙에서 공급된 유기물의 경우 C/N 비는 10 이상을 보이고 있다(Muller, 1977; Muller and Suess, 1979; Stein, 1990, 1991). 본 연구 결과 주상시료들에 대한 유기탄소, 탄산염함량 및 C/N 비는 Fig. 3에 표시하였다. 5개 정점에 대한 주상시료 중에서 C/N 비는 97-S8의 심도 6 cm에서 12.41로 최고치를 보이고 있으며 그 외의 전 지점에 있어서는 10 이하의 값을 갖는다. 이러한 사실로 미루어 보아 C/N 비에 의하면 육성기원 유기물은 본 조사지역 총유기탄소의 함량에 큰 영향을 미치지 않았으며, 대부분의 유기물은 시화호내의 생물생산에 의한 결과로 해석된다. 그러나 97-S8 주상시료의 일부구간에서는 C/N 비가 10 이상을 보이고 있어 육성기원으로 해석할 수 있으며 이 퇴적물은 퇴적상분석 결과 적조방제를 위해 살포된 황토로 밝혀졌다.

총유기탄소에 대한 총황량(C/S ratio)은 퇴적환경을 지시하는 것으로 보고되어 있다(Leventhal, 1983; Berner, 1984). 그러므로 서로 다른 퇴적환경 하에서는 평균 C/S비가 다르게 나타난다(Berner and Raiswell, 1983). 일반적인 해양환경 하에서 유기탄소 함량과 총황의 함량은 정의 상관관계(positive relationship)를 가지며 일정한 C/S 비(약 2.8)를 보여준다. 본 연구의 결과 Figs. 3과 4 및 Table 2에 보여지듯이 C/S 비는 최대 5.61에서 최소 1.36의 범위로 변하고 있다. 97-S25 주상시료를 제외한다면 C/S 비는 표준적인 해양환경에서의 2.8을 경계로 크

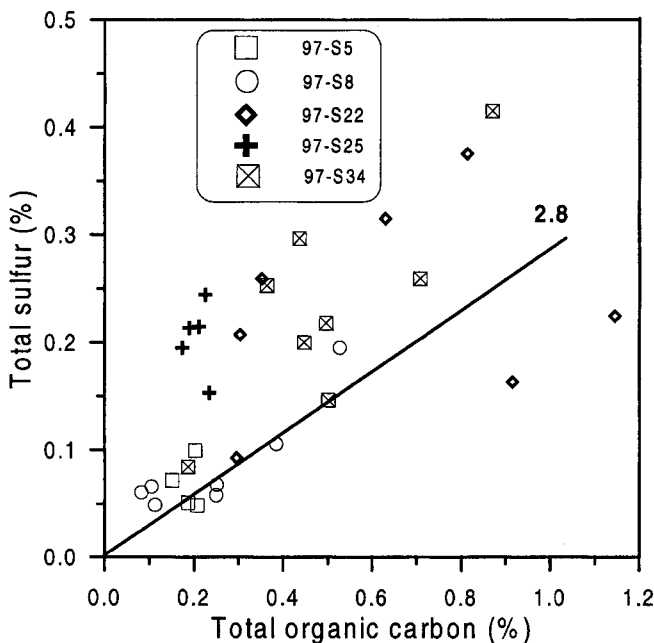


Fig. 4. Total sulfur vs. total organic carbon at five core sediments.

게 변화하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 비해양성 퇴적물이나 초기속정과정에서 다 일어나기 전에 급속한 퇴적물의 공급에 의한 것으로 해석된다. 또한 여러 기원을 가지는 퇴적물의 혼합에 의한 결과일 가능성도 배제할 수 없다. 결론적으로 97-S25정점을 제외한 각 정점에 있어서는 퇴적환경이 극적으로 변화했음을 시사한다.

주요원소 및 미량원소의 거동

주요원소 및 미량원소에 대한 각 정점별 분석결과는 Table 3에 표시하였다. 주상퇴적상 분석에 의하면, 배수갑분 주변은 조개편들이 포함된 사질퇴적물이 분포하고 시화공단 주변은 점토/실트 교호퇴적물이 주로 발달되어 있는 것으로 나타났다. 해저수로에서 채취된 주상시료들은(97-S8, 97-S22, 97-S34) 방조제 건설 이후에 주변퇴적물들이 재동(reworking)에 의해 수십 cm 층후의 퇴적물이 집적된 것으로 나타났다. 이에 반해 평탄한 지형에서 채취한 주상시료(97-S5)는 퇴적물의 침식작용이 우세한 것으로 해석된다(한국해양연구소, 1997). 지화학적 분석결과 Table 3에 나타난 것과 같이 일부 원소는 넓은 농도범위를 보이고 있다. 육지기원이며 전형적 보존성 원소로 간주되는 Al 및 Ti의 함량(Goldberg and Arrhenius, 1958; Moorby, 1983)은 주상시료의 심도에 따라 큰 변화폭을 보여준다. 이러한 변화는 공급지 변화에 의한 퇴적물의 조성변화로 추정된다. 5개 정점의 주상시료들에 대한 지화학분석 결과 나타난 원소 중 Al에 대한 Ti를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5의 정점 97-S34에 보여진 것과 같이 두 보존성 원소가 거의 일정한 형태로 분산되어 있는 경우 단일한 공급지를 가지거나 퇴적물이 조성이 일정하다고 간주될 수 있다. 반면, 정점 97-S8의 경우처럼 두 보존성 원소가 일정한 비율로 변화하지 않고 크게 분산되어 있는 경우 공급지의 차이에 의하거나 퇴적물 조성이 변화했음을 시사한다. 정점 97-S8의 a점은 심도 5 cm에 위치하고 있으며 Ti/Al의 비가 약 0.14로 다른 분석치가 약 0.05-0.07정도를 보이고 있어 크게 차이가 난다(Fig. 5). a 점을 포함한 두 원소간의 상관계수는 0.84로 높게 나타나고 있으나 이는 분석 데이터가 적은 결과로 기존의 퇴적물조성(b line)과는 달리 a점은 3배 이상의 Ti(%)와 약 2배 가량의 많은 Al(%) 함량을 보이고 있어 외래기원(allochthonous) 퇴적물임이 거의 확실하다. 97-S8 주상시료의 퇴적물 색상분석에 의하면 이 지점이 적조발생을 억제하기 위해 살포된 황토로 해석되었으며 이미 언급한 바와 같이 유기물 분석 결과 대륙기원 유기물임을 지시하고 있어 인위적으로 투기된 외래기원 퇴적물임을 시사한다. 정점 97-S5의 경우 a에 해당되는 시료의 심도는 표층과 20 cm, 그리고 b에 해당되는 심도는 10 cm와 29 cm이다. 따라서 심도를 달리하는 값이 반복되어 나타나는 것은 반복되는 공급지 교대나 생물기원 물질의 증감에 의해 나타난 결과라 할 수 있다. Fig. 6은 Li에 대한 Ti/Al의 변화를 나타내고 있다. 각 정점별 비가 다르게 나타나고 있음은 물론 동일한 정점에서도 이들의 비는 넓은 분산을 보이고 있어 급격한 공급지의 변화나 퇴적환경 변화로 해석된다. 특히 97-S8의 한 정점은 기술한 바와 같이 퇴적상 및 유기물 분석결과에서처럼 Ti/Al비가 확실히 높게(0.14) 나타나고 있어 Ti를 다량 함유하고 있는 외래기원 퇴적물이 공급되었음을 시사한다. 일반

Table 3. Analytical results of the major and minor element for the core

Station	Depth ¹⁾	Na*	Mg	Al	Fe	K	Ca	Ti	Li	P	S	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Zr	Mn	Sr	Ba	Rb	Y	Nb	Mo	Cd	Cs	Pb
97-S5	0	1.89	1.05	7.48	3.25	2.58	0.54	0.51	55.8	367	1069	11	73	61	15	32	19	66	137	312	151	442	120	21	13.7	0.9	0.12	6.08	16.2
	10	1.66	0.84	6.58	2.70	2.56	0.93	0.43	40.9	365	1015	9	56	50	11	22	11	50	140	314	182	513	109	19	11.4	0.4	0.16	4.26	14.6
	20	1.73	1.06	7.53	3.23	2.53	0.55	0.53	56.6	346	673	11	73	64	15	32	17	64	154	296	150	468	123	22	14.4	0.5	0.24	6.05	15.5
	29	1.67	0.74	6.26	2.47	2.55	0.96	0.45	31.9	440	1283	8	50	48	10	21	14	50	165	337	193	542	106	20	13.0	0.6	0.21	3.51	18.2
97-S8	0	1.85	1.05	8.39	4.14	2.60	0.52	0.46	54.6	520	4068	12	86	73	16	40	39	108	115	434	139	510	114	24	11.7	1.5	0.19	4.40	23.9
	5	1.41	0.84	10.95	5.50	2.48	0.33	1.52	42.6	557	1514	16	113	81	15	47	153	100	86	1076	105	558	111	19	12.1	1.0	0.34	6.07	54.1
	11	1.75	0.68	6.36	2.36	2.62	0.71	0.37	30.3	373	665	7	47	41	14	36	95	44	121	325	191	596	107	19	12.1	1.0	0.23	6.07	44.0
	29	1.81	0.70	5.99	2.33	2.71	0.74	0.34	31.3	362	987	7	43	38	13	34	54	43	81	311	197	578	119	21	12.3	1.5	0.28	5.60	39.4
	41	1.83	0.70	6.38	2.38	2.79	0.72	0.37	32.4	362	693	7	46	41	16	35	39	45	127	315	197	565	129	21	14.7	0.7	0.31	5.06	52.5
45	1.50	0.55	5.18	1.91	2.28	0.58	0.29	22.8	271	605	5	36	33	16	48	85	34	91	261	157	453	123	20	12.4	1.7	0.21	6.80	38.8	
97-S22	0	1.77	1.08	7.57	3.41	2.67	0.56	0.48	56.4	569	3864	11	74	108	14	40	102	150	151	297	150	466	126	23	13.3	2.3	0.26	5.94	33.9
	5	1.50	1.42	9.34	4.88	2.78	0.43	0.57	79.4	922	2943	14	99	145	11	23	12	228	122	389	122	520	116	17	10.9	1.2	0.14	3.60	19.4
	12	1.78	0.85	6.75	2.72	2.61	0.67	0.44	43.0	456	1001	9	58	58	10	19	10	78	118	328	171	509	104	15	9.4	0.2	0.14	3.15	15.6
	20	1.83	1.04	7.15	3.34	2.93	0.76	0.45	51.6	827	3427	10	69	89	11	22	12	124	128	448	169	481	115	16	10.0	0.3	0.15	3.36	19.4
	29	1.97	1.21	7.58	3.82	2.72	0.58	0.49	63.3	732	4559	11	79	107	12	22	13	175	114	508	150	479	121	20	11.6	0.5	0.16	3.82	17.1
	50	1.91	1.17	7.58	3.71	2.43	0.58	0.47	61.4	674	4186	11	76	119	34	74	45	215	108	423	151	457	99	28	12.1	1.3	0.13	6.42	28.5
70	1.66	1.19	8.19	4.55	2.67	0.47	0.51	74.1	989	3928	12	92	176	22	66	179	268	128	499	128	474	82	22	14.2	1.4	0.53	1.18	76.6	
97-S25	0	1.79	0.86	6.51	2.77	2.54	1.30	0.45	39.3	423	2688	8	56	46	12	26	15	52	138	350	191	511	113	20	12.2	0.7	0.16	4.42	23.6
	10	1.84	0.94	6.75	2.97	2.58	0.73	0.48	41.7	420	2937	9	61	57	14	28	16	55	180	368	177	510	117	21	13.4	0.7	0.31	4.71	19.0
	29	1.85	0.88	6.59	2.76	2.74	0.70	0.45	39.1	405	2792	8	56	50	13	26	14	51	137	332	177	498	116	20	12.7	0.6	0.20	4.52	19.0
	50	1.87	0.89	6.56	2.84	2.73	0.80	0.47	38.9	396	2743	8	57	53	13	26	15	51	211	354	188	519	118	22	13.4	0.7	0.32	4.56	15.9
	70	1.64	0.75	6.34	2.60	2.76	0.69	0.41	34.0	364	1751	8	51	46	13	25	14	47	158	335	182	552	118	20	12.5	0.6	0.24	4.24	16.1
97-S34	0	1.74	1.12	7.52	3.65	2.56	0.60	0.50	56.5	855	5348	11	75	138	21	91	398	415	176	446	154	453	131	25	14.2	3.4	1.06	5.96	34.1
	10	1.78	1.09	7.37	3.45	2.67	0.65	0.49	53.4	761	4987	10	68	163	17	75	242	279	140	486	168	476	129	21	13.9	2.3	0.50	5.68	38.7
	20	1.70	1.22	8.07	3.91	2.75	0.61	0.51	63.0	520	2915	12	84	84	20	45	46	98	149	557	153	453	144	25	14.2	0.7	0.30	7.06	49.9
	29	1.97	1.14	7.51	3.43	3.07	0.63	0.49	56.0	593	3078	11	74	94	18	45	81	129	159	457	159	468	137	23	14.1	0.9	0.19	5.92	51.2
	40	1.83	1.09	7.91	3.61	2.62	0.59	0.49	56.9	672	2670	11	75	99	18	48	105	157	142	417	154	511	133	23	14.1	1.2	0.43	5.20	41.4
	50	1.91	1.02	7.14	3.23	2.70	0.70	0.48	49.2	572	3478	10	66	106	16	40	154	110	149	396	170	492	137	22	14.1	1.0	0.20	5.30	31.1
60	1.87	0.99	6.98	3.03	2.70	0.68	0.46	46.3	498	3082	9	63	78	15	35	66	99	159	453	177	498	127	22	13.2	0.6	0.13	4.85	23.3	

¹⁾Depth

*Elemental concentrations are expressed as % from Na to Ti, and other are ppm.

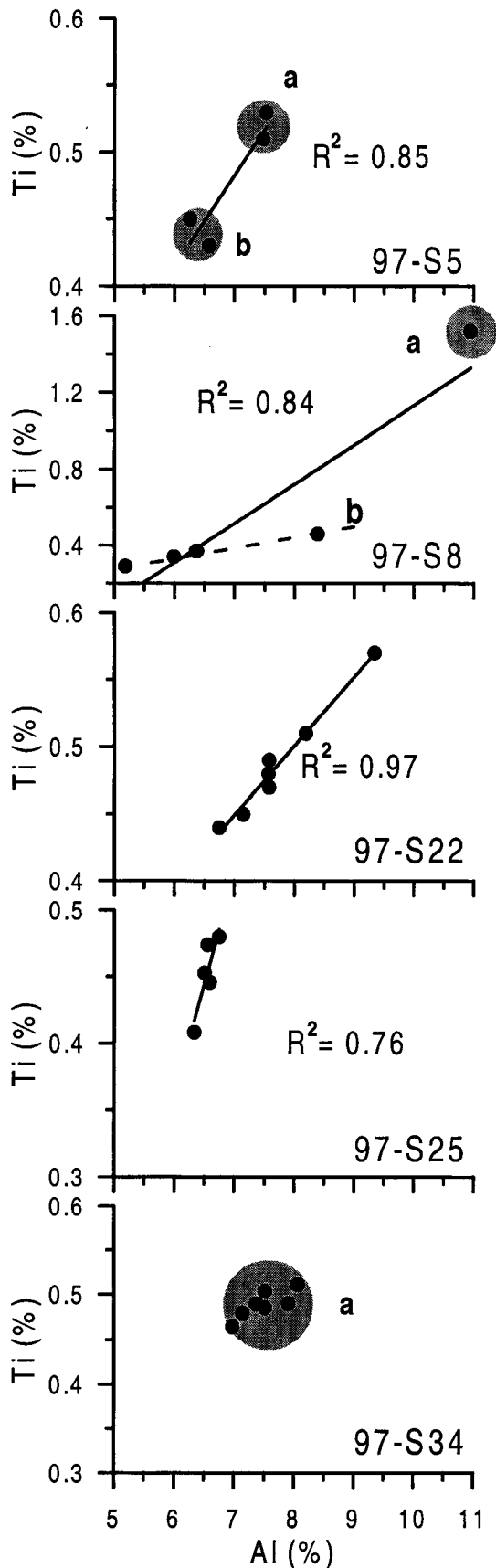


Fig. 5. Ti vs. Al variation at five core sediments. A point a in 97-S8 indicate allochthonous sediment.

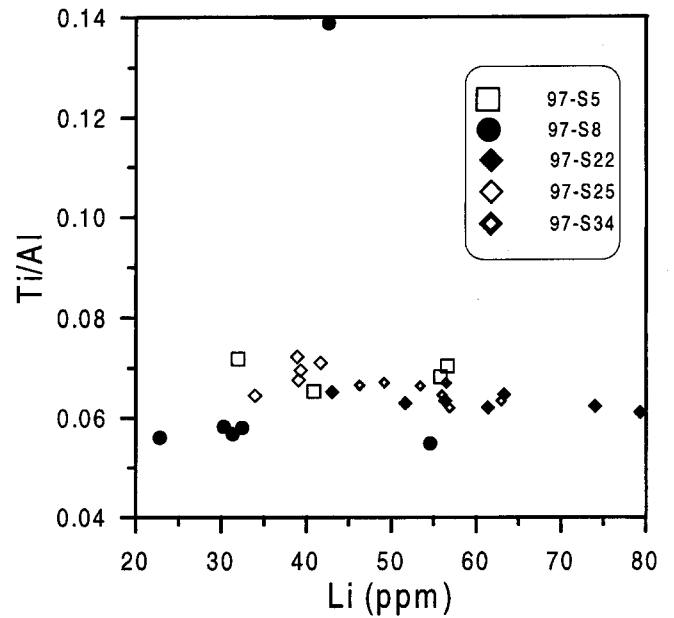


Fig. 6. Scattered diagrams of Ti/Al to Li content from the five core sediments.

해양 또는 해양성 분지와 비교해 본다면 좁은 면적의 시화호에서는 퇴적물의 급격한 조성변화가 인위적으로 투기된 퇴적물의 영향에 의해 야기된 것으로 해석된다.

산화 및 환원환경의 공간적 변화: 지화학적 접근

시화호는 저염이며 밀도가 낮은 담수인 표층수와 고염이며 밀도가 높은 해수에 의해 강한 밀도성층을 보이고 있다(한국해양연구소, 1998). 이러한 시화호의 수계환경은 인근주변으로부터의 유입물이나 수괴특성과 같은 물리적 요인과 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다. 이미 C/S비에 의해 시화호내 퇴적환경의 복잡성을 언급하였듯이 시화호 퇴적물은 산화환경과 환원환경이 공간적으로 구별된다.

지화학적 원소 중에서 Mo, U 및 Mn은 산화 환원환경에 의해 퇴적물 내에서 그 농도분포가 달라질 수 있는 원소로 알려져 있다. 특히 Mo는 저층수 순환이 일어나지 않아 무산소 환경을 형성하는 해역에서 축적되기 쉬운 원소로 알려져 있다(Bertine, 1972; 한국해양연구소, 1995). 따라서 이들 세 원소간의 상관관계 및 Mo의 농도변화는 무산소환경의 존재에 대한 정보를 제공해 줄 수 있다. 이들 세 원소간의 상관관계는 C/S비에 의한 퇴적환경의 변화와 잘 일치한다. 또한 이들의 상관관계는 각 정점별로 크게 차이가 남을 알 수 있다(Fig. 7). 정점 97-S25의 경우 Mo 대 Mn, U 대 Mn, U 대 Mo의 상관계수가 각각 0.89, 0.76, 0.65로 나타나고 있어 전형적인 무산소 저층환경임을 지시하고 있다. 이들 세 원소간의 상관관계에 의한 무산소 환경의 결정은 Jung *et al.*(1996)이 제시한 시화호내 무산소 환경에서의 Cu의 농축과 Mn의 감소특성을 가진다는 연구 결과와도 일치하고 있다. 이와 같은 저층의 무산소 현상은 방조제 축조 이후 해수유입이 차단되면서 기존에 존재하는 해수와 새롭게 유입되는 담수와의 사이에 강한 밀도성층이 형성되어 해수 교환이 활발히 일어나지 못한 이유로 생각된다. 한편 시화-

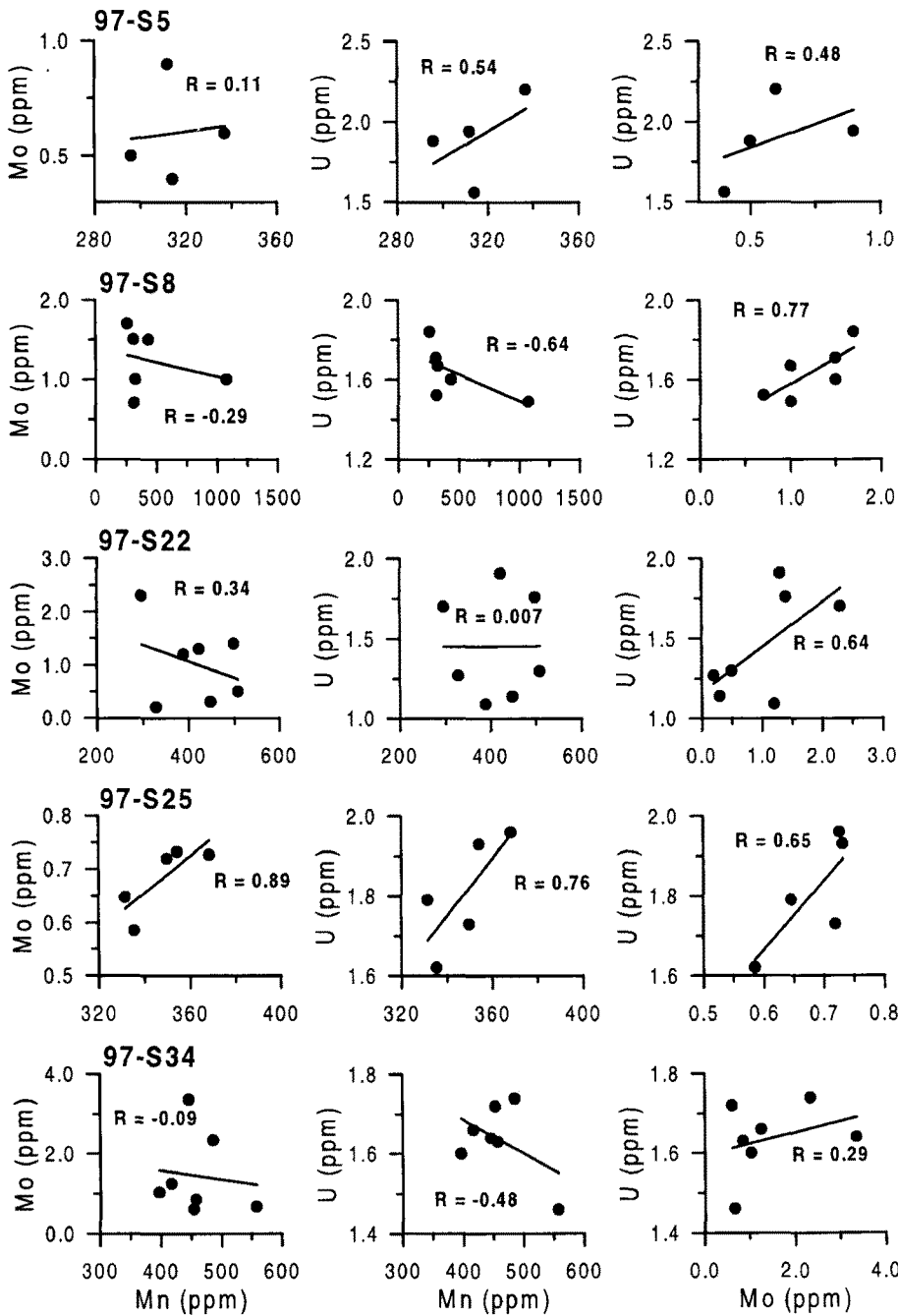


Fig. 7. Mo-U-Mn relationship and their correlation coefficient from the five core sediments. Distinctive anoxic environment is recognized based on elemental relationships at 97-S25.

반월공단에 가까운 쪽에 위치하는 정점 97-S34와 97-S22의 경우 그리 명료한 상관관계를 보여주지는 않는다. 97-S22의 경우 상관계수는 -0.34에서 0.64정도까지 변화하고 있어, 국부적인 무산소 상태(semi-anoxic or suboxic)에 있음은 인정되나 완전한 무산소 상태에는 있지 않다고 할 수 있다. 또한 97-S34의 경우도 상관계수가 낮거나 무상관을 보이고 있어, 산화환경이거나 아니면 국부적인 환원환경으로 해석된다. 방조제에 가까운 97-S8 및 97-S5의 경우도 이들 매개변수간에는 상관계수가 높지 않아 산화환경을 형성하고 있다고 추정된다. 그러나 97-S8에서는 이미 언급한 환원환경을 지시하는 Mo이 축적이 다른 지점에 비해 약 2배정도 높게 나타나고 Mn의 경우도 Jung et al.(1996)이 제시한 것과 같이 다른 지점에 비해 낮게 나타나고 있어 환원환경임을 지시하는 요

소도 가지고 있다. 따라서 이러한 면을 종합적으로 고려해 본다면 지화학적 원소에 근거한 해저환경은 이미 언급하였듯이 산화 환원 환경을 공유하는 것으로 생각된다. 시화-반월공단에 인접한 이 두 정점인 97-S22와 97-S34은 공단으로부터 다량의 산업폐기물 및 중금속이 유입되었다고 사료된다. 또한 이러한 현상은 이 정점들이 위치한 곳의 수심과도 밀접한 관계가 있는데 이들 두 정점에 있어 수심은 약 4 m 정도로 시화호 중앙부의 무산소환경인 97-S25의 9 m에 비해 얇다. 따라서 이들 두 정점이 위치한 지역의 수계는 바람에 의한 혼합이 용이하다고 판단되며 이러한 이유로 지속적인 산소의 유입이 가능하였을 것으로 사료된다. 따라서 이와 같은 물리적 요인에 의해 이들 두 정점은 산화환경에 가까운 퇴적환경을 보이고 있다고 생각된다.

중금속 오염

본 연구에서는 총 19개의 시료에 대해 각각 46개의 중금속과 희토류원소가 분석되었다. 이들 중에서 5개의 중금속원소(Cr, Ni, Cu, Zn 및 Pb)에 대해서 자세한 해석이 이루어졌다. 또한 Ni을 제외한 4개의 원소에 대해서는 셰일(shale)의 평균값을 표시하였으며 기존 연구결과 나타난 최고농도를 참고로 정리하였다(Forstner and Wittmann, 1981). 전체적으로 이들 5개 중금속은 평균 셰일에 나타난 값을 경계로 큰 분산을 보이면서 변화하고 있음을 알 수 있다(Fig. 8). 가장 큰 폭의 농도변화를 보이는 원소는 Cu와 Zn으로서 정점 97-S34의 경우 표층에서 두 원소는 최고 약 400 ppm정도인 반면, 심도 20 cm 정도에서 최소값 약 50 ppm 및 100 ppm을 보이고 있다. 평균적으로 일부 중금속에 있어서는 셰일의 평균값과 비교해 보았을 때 평균 1.5-10배정도 높게 농축되어 있으며 정점별, 수직별로 큰 분산을 보이고 있다.

각 정점간 중금속원소의 공간분포를 기준으로 살펴본다면 시화-반월공단에 인접한 정점 97-S22 및 97-S34에서 비교적 높은 농도를 보이고 있으며, 특히 표층퇴적물인 경우 더욱 두드러지게 높은 농도를 보인다(Fig. 8). 시화호 중앙부의 정점(97-S5, 97-S8)에서는 일부 중금속의 농도가 기준에 알려진 셰일의 평균값과 비교해 볼 때 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 시화-반월공단에 가까운 정점에서는 예외 없이 평균 셰일값보다 높은 값을 보이고 있다. 따라서 전체적으로 중금속 농도는 시화호 중앙부에서 시화-반월공단 쪽으로 증가하는 경향을 보인다고 할 수 있다. 따라서 이것은 시화-반월공단에서 인위적으로 유출된 오염물질의 영향으로 사료된다.

일반적으로 중금속오염은 저서생물군집에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구와 동일한 지점에서 유공충을 조사한

결과 시화-반월공단에 가까운 두 정점에서 유공충의 개체수가 급격히 감소하거나 존재하지 않은 것은 이와 같은 중금속오염의 가능성을 지시한다(Shin and Yi, 1998). 또한 저서생물의 군집변화를 연별로 조사한 결과에서도 시화-반월공단에 인접한 이 두 정점에서 상대적으로 낮은 생물종이 보고되었다(Ahn *et al.*, 1995).

결론

시화호의 퇴적물에 대한 유기탄소 함량은 대체적으로 낮은 편으로 0.1%에서 1.15%의 범위에서 작은 폭으로 변하고 있다. 유기물의 특성을 지시하는 C/N비에 의하면 거의 대부분이 시화호에서 생물생산에 의해 형성된 해양성 유기물로 해석되었다. 퇴적환경을 지시하는 C/S비는 해양환경에서 평균값을 경계로 큰 변화 폭을 보인다. 이러한 사실은 시화호의 퇴적환경이 급격히 변화하였음을 지시한다. 특히 Mo-Mn-U간의 상관관계 및 농축 정도는 이러한 사실을 뒷받침한다. Mo-Mn-U의 관계에 기초한다면 전체적으로 저층환경이 무산소에 가까운 환경임을 지시하나, 중앙부의 97-S25의 정점에서는 이들 원소간 상관계수가 높아 전형적인 환원적(anoxic) 퇴적환경, 그리고 방조제 부근의 97-S5와 97-S8 및 97-S22, 97-S34는 산화적 퇴적환경 이거나 산화 및 환원환경이 공존하는 복잡한 퇴적환경으로 해석되었다. 이러한 산화 환원 환경이 공간적 분포가 지화학적 연구결과 구분되며, 중앙부의 환원환경은 강한 밀도성층에 의한 해수의 혼합이 거의 일어나지 못하였기 때문인 것으로 사료된다. 그러나, 수심이 얕은 시화-반월공단에서 가까운 지역은 산화적 퇴적환경으로 나타나는데 이는 바람에 의한 해수의 혼합이 활발하기 때문인 것으로 해석된다.

중금속 농도변화는 수직적 또는 공간적으로 큰 폭의 변화를

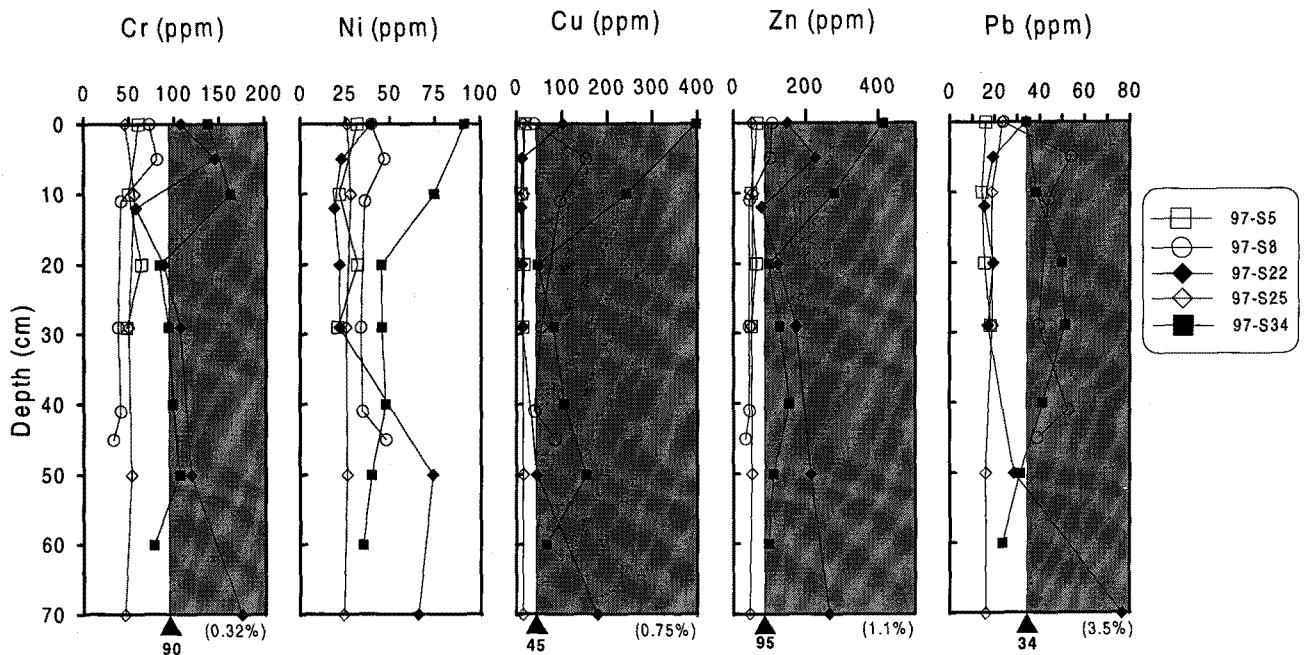


Fig. 8. Vertical profiles of five heavy metal concentrations (Cr, Ni, Cu, Zn and Pb) from the five core sediments. Arrows indicate average shale concentration and shaded areas are possible pollutant area.

보이고 있다. 특히 시화호 중앙부 표층퇴적물에서 보다 안산-반월공단에 가까운 정점 97-S34 및 97-S22에서는 평균 세일값과 비교해 볼 때 최고 1.5배에서 약 10배까지 높은 농도를 보이고 있다. 따라서 시화-반월공단으로부터 인위적인 중금속 유입이 있었음을 시사한다.

사 사

본 연구는 한국해양연구소에서 실시한 기관고유사업의 일환인 “시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(BSPE-98705-041-34)”의 연구결과이다. 본 연구에 많은 도움을 주신 한국해양연구소 해저환경실 여러분에게 감사드리며 익명의 심사위원님에게도 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997. 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유, 무기 화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지-바다, 2: 53-68.

정희수, 최강원, 김동선, 김채수, 1997. 한국 서해안 시화호의 오염현황과 환경개선방안. 해양정책연구, 12: 123-163.

최중기, 이은희, 노재훈, 허성희, 1997. 시화호와 시화호 주변 해양 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구. 한국해양학회지-바다, 2: 78-86.

한국해양연구소, 1998. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(2차년도) BSPE 97610-00-1035-4, 230 pp.

한명우, 박용철, 허성희, 1997. 시화호에서 암모니아와 납의 저층 용출. 한국해양학회지-바다, 2: 69-77.

현상민, 최영찬, 1997. 해수중 화학원소의 거동과 생물활동. 제주대학교 연구논문집, 21: 187-198.

홍재상, 정래홍, 서인수, 윤건탁, 최병미, 유재원, 1997. 시화방조제의 건설은 저서성 동물군집의 시공 분포에 어떠한 영향을 미쳤는가? 한국수산학회지, 30: 882-895.

Ahn, I.Y., Y.C. Kang and J.W. Choi, 1995. The influence of industrial effluents on intertidal benthic communities in Panweol, Kyeonggi Bay (Yellow Sea) on the west coast of Korea. Mar. Pollution Bull., 30: 200-206.

Berner, R.A., 1984. Sedimentary pyrite formation: An update. Geochim. Cosmochim. Acta, 48: 605-615.

Berner, R.A. and R. Raiswell., 1983. Burial of organic carbon and

pyrite sulfur in sediments over Phanerozoic time: a new theory. Geochim. Cosmochim. Acta, 47: 855-862.

Bertine, K.K., 1972. The deposition of molybdenum in anoxic waters. Mar. Chim., 1: 43-53.

Bottrell, S.H., J.A. Hannam, J.E. Andrews and B.A. Maher. 1998. Diagenesis and remobilization of carbon and sulfur in mid-Pleistocene organic-rich freshwater sediment. J. Sed. Res., 68: 37-42.

Forstner, U. and G.T.W. Wittmann, 1981. Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer-Verlag, New York, 486 pp.

Goldberg, E.D. and G.O.S. Arrhenius. 1958. Chemistry of Pelagic sediments. Geochim. Cosmochim. Acta, 13: 153-212.

Jung, H-S., C-B. Lee, Y-G. Cho and J-K. Kang, 1996. A mechanism for the enrichment of Cu and depletion of Mn in anoxic marine sediments, Banweol intertidalflat, Korea. Mar. Pollution Bull., 32: 782-787.

Leventhal, J.S., 1983. An interpretation of carbon and sulfur relationship in Black Sea sediments as indicator of environments of deposition. Geochim. Cosmochim. Acta, 47: 133-137.

Moorby, S.A., 1983. The geochemistry of transtional sediments recovered from the Galapagos hydrothermal mounds field during DSDP Leg 70- implication for mound formation. Earth. Plan. Sci. Let., 62: 367-376.

Muller, P.J., 1977. C/N ratio in Pacific deep-sea sediments: effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. Geochim. Cosmochim. Acta, 41: 765-776.

Muller, P.J. and E. Suess, 1979. Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic carbon in the ocean 1.Organic carbon preservation. Deep-Sea Res., 26: 1347-1362.

Shin, I-C. and H-I. Yi., 1998. Spatial and temporal variations of foraminifera as an indicator of marine pollution. Kor. J. Geophys. Res., 26: 59-73.

Stein, R., 1990. Organic carbon content/sedimentation rate relationship and its paleoenvironmental significance for marine sediments. Geo-Mar. Let., 10: 37-44.

Stein, R., 1991. Accumulation of organic carbon in marine sediments. In: Lecture Notes in Earth Science, edited by Somdev, B., G.M. Friedman, H. J. Neugebauer and A. Seilacher, Springer-Verlag, Berlin, 217 pp.

1999년 3월 8일 원고 접수
1999년 6월 7일 수정본 채택