

시화호 표층 퇴적물의 유기탄소와 금속의 분포

김경태* · 김은수** · 조성록** · 박준건** · 김종근** · 이정무**

*, **한국해양연구원 해양환경연구본부

Distribution of TOC and metals in the surface sediments of the Lake Shihwa

Kyung Tae Kim* · Eun Soo Kim** · Sung Rok Cho** · Jun Kun Park** ·

Jong Kun Kim** · Jeong Moo Lee**

*, **Marine Environment Research Department, KORDI, Ansan, 426-744, Korea

요약 : 경기만에 건설된 인공호수 시화호 표층 퇴적물의 지화학 성분의 시·공간적 분포를 파악하기 위하여 2007년 7월에 14개 정점에서 시료를 채취하였으며, 각 성분은 CHN 분석기와 ICP/MS를 이용하여 분석하였다. 금속 농도는 만월 및 시화공단, 주변 도시 등 다양한 인위적인 유입원에 의한 오염물질 유입 때문에 시화호의 내측에서 배수갑문 방향으로 갈수록 감소하는 경향이 있었다. 또한 세립 퇴적물의 퇴적에 의하여 호수의 중앙에서도 높은 금속 농도를 나타내었다. 방조제 건설 이후 시화호의 환경을 개선하기 위하여 여러 가지 방안이 시도되었지만 환경을 만족스럽게 개선하기에는 충분하지 못하였다. 따라서 환경 개선을 위한 지속적인 방안들이 추진되어야 할 것이다.

핵심용어 : 유기탄소, 금속, 표층 퇴적물, 시화호, 오염

Abstract : In order to understand the spatio-temporal distribution of geochemical parameters in surface sediments of the artificial Lake Shihwa in the vicinity of Kyunggi Bay in Korea, surface sediments were sampled at 14 sites in July 2007 and analyzed by CHN analyzer and ICP/MS. Metal concentrations in the sediments tended to be decreasing from the head to the mouth of the Lake Shihwa because of extreme pollutant discharge from various kinds of anthropogenic sources such as the Banweol and Shihwa Industrial Complex and cities. With the deposition of fine-grained sediments, high metal concentrations were also observed in the central part of lake. Although various programs(improvement of wastewater collection and treatment system, sea-lake water exchange etc.) to improve the environmental conditions around the Lake Shihwa after dike construction were carried out, it was not clear to reach a good environmental quality. Therefore, further environmental programs should be conducted continuously for environmental improvement.

Key Words : TOC, Metal, Surface Sediment, Lake Shihwa, Pollution

1. 서론

조간대가 발달되어 있는 경기만에서 대규모 간척사업인 시화지구 개발사업의 일부로 1994년 1월 12.7km의 시화방조제의 물막이 공사가 완료됨으로서 농업용수 공급을 목적으로 하는 인공호수인 시화호가 만들어졌다(한국수자원공사 1998). 외해와의 해수교환이 중단되고, 시화호 유역 주변의 공단과 도시, 목축 및 농경지에서 유입되는 오폐수, 비점오염물질로 인하여 시화호의 부영양화가 급속히 진행되었으며, 호수 내에는 식물 플랑크톤의 대증식으로 연중 적조가 발생하였다. 담수화 과정에서 형성된 밀도 성층으로 인하여 상·하층간의 교환이 원활하지 않게 되어 저층에서는 유기물의 분해에 많은 산소가 소모되어 용존산소가 고갈되는 등 수질이 급격하게 악화되었다(박 등, 1997; 한국해양연구소, 1997, 1998). 1996년 이후 시화호의

수질오염이 사회적으로 문제가 되면서 환경부는 2005년까지 4,500억원을 투자하는 시화호 수질개선대책을 수립하였다. 그러나 1996년 8월 어류가 집단 폐사한 이후 시화호 수질을 개선하기 위한 여러 가지 방안이 시도되었으나, 효과를 거두지 못했다. 악화된 호수의 수질을 개선하고 홍수 조절을 위하여 1996년 부정기적인 방류를 시작하여, 1997년 7월부터 배수갑문 관리규정에 의하여 각각 250만³의 방류와 외해수 유입이 시도되었으며, 1997년 12월부터 1일 2회씩 500만³/회 이내, 1998년 2월부터는 750~1,000만³/회, 그리고 1998년 3월부터는 조석주기를 이용한 상시 조작으로 1일 2회씩 2,000만³/회까지 방류 및 유입을 실시하였다(한국수자원공사·농어촌진흥공사 1996; 한국해양연구소 1999). 그러나 다각적인 수질 개선 노력에도 불구하고 시화호를 담수화하여 기본 목적을 달성하는 것이 불가능하다는 판단에 따라 2000년 12월 정부는 시화호를 해수호로 관리

하기로 결정하였으며, 시화호 환경관리주체는 환경부에서 해양수산부로 이관되었다. 해양수산부는 2000년 2월 해양오염방지법을 개정하여 '환경관리해역'제도를 신설하고 시화호 유역을 포함하는 시화호-인천연안을 특별관리해역으로 지정하였다.

한편 중금속은 자연수 중에 극미량으로 존재하며(Bruland *et al.*, 1991), 생물에게 필수 원소로 작용하는 경우도 있으나 환경 중에 유입되면 분해되지 않는 특성을 가지고 있는 지속성 오염물질로 분류되며, 생물에 농축(Bioaccumulation)될 뿐 아니라 생태계의 먹이사슬을 통하여 고차 생물로 갈수록 축적 정도가 커지는 생물 확대(Biomagnification) 과정을 거치게 된다. 다양한 환경시료 중에서 퇴적물은 주변 유역으로부터의 오염물질 유입 형태 변화에 따른 정보 또는 수계 내에서 진행된 다양한 생지화학적 과정에 관한 정보를 기록하고 있기 때문에 환경의 변화와 오염도를 연구하는데 있어서 매우 유용하게 이용되고 있으며, 오염물질 중에서 특히 중금속은 환경내에서 지속성을 가지고 축적되므로 환경 변화를 이해하는데 매우 유용한 것으로 알려져 있다(Förstner 1981; Salomons and Förstner 1984).

시화호 주변에는 과거부터 가동 중인 반월공단과 시화지구 개발 사업의 일부로 조성된 시화공단이 있으며, 그 주변 해역에서 퇴적물 중의 중금속 연구를 보면 Ahn *et al.*(1995)과 Jung *et al.*(1996)은 시화 방조제를 건설하기 전에 반월 조건대에서 서식하는 생물 또는 그 지역 퇴적물의 중금속 오염현상을 보고한 바 있다. 방조제 건설 후에는 더욱 관심이 높아져서 활발한 연구가 진행되었는데 심 등(1998)은 주상 퇴적물내의 지화학적 변화와 오염물질 축적, 최 등(1999)은 방조제 건설 전과 후에 표층 퇴적물의 중금속 변화 특성, 김 등(2003)은 시화호와 그 주변 하천의 표층 퇴적물에서 주변 환경의 변화에 따른 중금속 오염과 지화학성분의 변화를 보고한 바 있다.

본 연구에서는 해양수산부의 시화호 종합관리계획의 원활한 시행에 필요한 제도, 정책, 핵심 기술 등을 확보하고 각 프로그램의 시행 지원 등 시화호 종합관리계획에서 정해진 사업을 종합적으로 시행·이행하기 위한 '시화호 해양환경개선사업'의 일부로 시화호 표층 퇴적물 내 유기물과 금속의 공간적 분포와 오염도, 시간적 변화를 파악하였다.

2. 재료 및 방법

표층 퇴적물 채취는 시화호 내에서 2007년 7월에 14개 정점에서 1회 실시하였다(Fig. 1). van Veen Grab을 이용하여 채취한 퇴적물은 그랩의 뚜껑과 접촉하지 않은 상층 1cm 부분을 취하여 zipper bag에 담아 냉동시킨 후 실험실로 운반하였다. 퇴적물 시료는 동결건조(Labconco, FREEZONE 6) 후 200mesh 체를 통과하도록 agate mortar로 분쇄하여 분석 때까지 보관하였다.

총 유기탄소(TOC)는 시료를 10% 염산으로 처리하여 무기탄소를 제거한 후에 건조한 시료를 CHN Analyzer(Carlo-Erba EA 1112)로 측정하였다. 금속 분쇄 시료 약 0.05g을 60mL PFA 테프론 비커에 넣고 고순도(Merck, ultrapur) HF와 HNO₃

를 각각 6mL, 3mL씩 넣고 2시간 이상 실온에 둔 다음 고순도(Merck, suprapur) HClO₄ 2mL를 가한 후 테프론 뚜껑을 덮고 가열판에서 가열하여 완전히 증발건조시켰다. 이때 시료는 흰색 또는 옅은 노란색을 나타내게 되며, 그렇지 않은 시료에 대해서는 위 과정을 반복하여 시료를 완전히 분해시켰다(Windom *et al.* 1989). 여기에 1% HNO₃을 가하여 비이커내의 잔류물을 녹여 10mL로 맞춘 후 적절하게 희석하여 ICP-MS(Thermo Elemental, X-7)로 측정하였다. 수은은 분쇄 시료 20mg을 60mL 테플론 용기에 넣고 정제된 염산과 질산을 각각 2mL씩 가하여 뚜껑을 꼭 닫고 가열판 위에서 150°C로 2시간 가열하여(Smith, 1993). 냉각 후 용액을 취하여 자동 수은 증기 발생장치와 금포집 장치에 농축하여(김 등, 1998) 원자형 광분광기(Tekran 2500)로 검출하는 CVAFS법으로 측정하였다.

한편 퇴적물의 금속 분석자료 정확도를 검증하기 위하여 NRCC(National Research Council Canada)의 해양 퇴적물 SRM인 MESS-2를 시료와 같이 처리하여 측정하였다. 2회의 개별 분석자료에 의하면 각 금속의 MESS-2의 보증값에 대한 평균 회수율은 Zn의 94.2%에서 Pb의 105%의 범위였으며, 2회 분석의 원소별 표준 편차는 보증 농도에 대하여 As의 1.6%에서 Ni의 4.5%의 오차를 나타내어 만족스런 결과를 보였다.

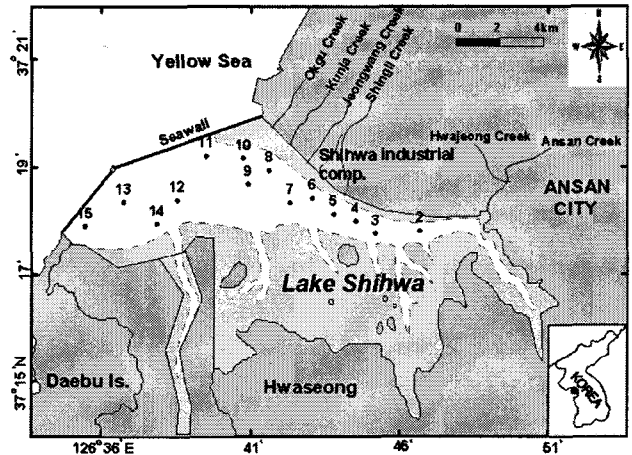


Fig. 1. Map showing the study area with location of sampling stations.

3. 결과 및 고찰

3.1 지화학 성분의 분포 특성

본 연구 지역 표층 퇴적물의 지화학 성분인 유기탄소와 금속의 공간 분포는 Fig. 2에 나타내었다.

유기탄소는 0.27~1.82%(평균 1.00%)의 범위로 정점에 따른 변화가 불규칙이었다. 시화공단 주변에서 낮고, 그 전면의 호수 중앙부에 해당하는 정점 9에서 가장 높으며, 인접한 정점 12에서도 1.58%로 높았고, 가장 내측으로 반월공단과 가까운 정점 2에서도 높은 값을 보였다. 2006년에는 0.41~1.67%(평균 1.02%)로 본 조사와 비슷하였으며, 호수 중앙부의 정점 12는 매

년 높은 값을 보였다. 또한 총탄소에서 유기탄소의 점유율이 높으며, 이는 육상기인보다 호수 내부에서 생산된 플랑크톤이 대부분을 차지한 것으로 나타났다(해양수산부, 2005, 2006).

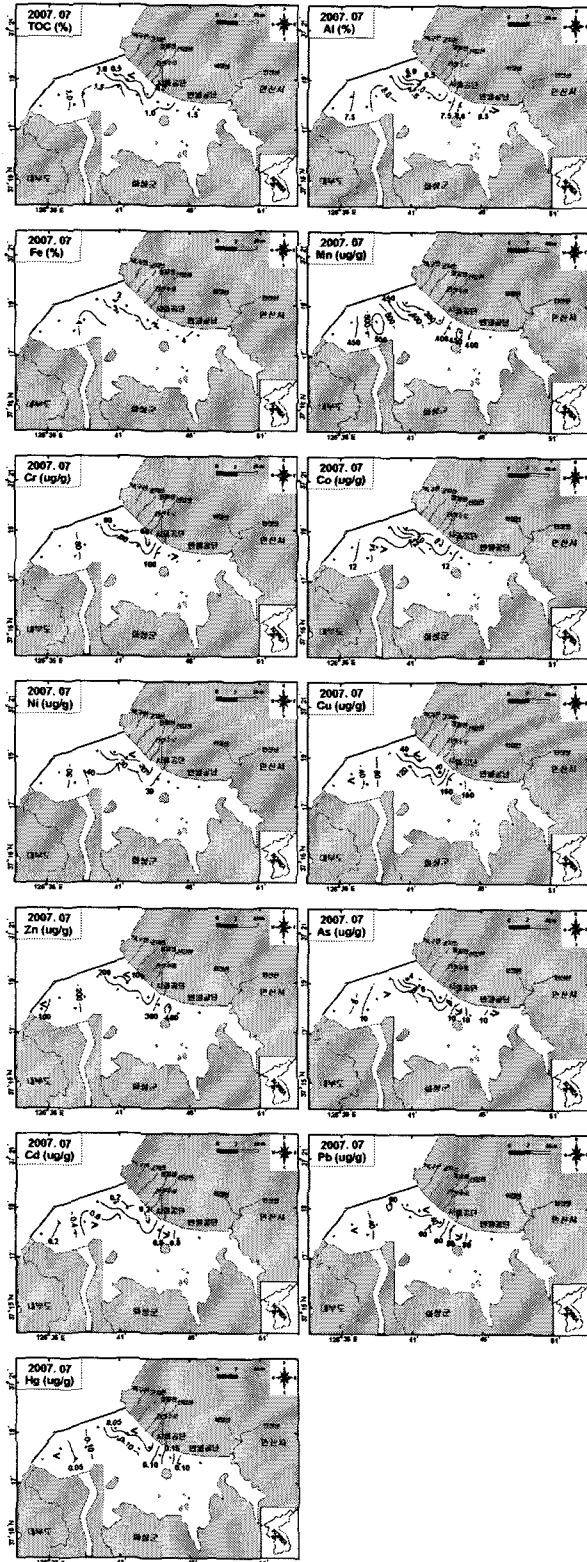


Fig. 2. Spatial distribution of TOC and metals in the surface sediments.

각 금속들의 분포 범위는 Al 5.93~5.66%(평균 7.48%), Fe 1.77~4.24%(평균 3.35%), Mn 311~597µg/g(평균 418µg/g), Cr 40.6~113µg/g(평균 81.3µg/g), Co 6.45~15.1µg/g(평균 11.5µg/g), Ni 13.9~41.0µg/g(평균 29.7µg/g), Cu 20.2~187µg/g(평균 89.6µg/g), Zn 85.3~426µg/g(평균 226µg/g), As 3.82~11.1µg/g(평균 8.51µg/g), Cd 0.16~0.76µg/g(평균 0.42µg/g), Pb 26.8~96.2µg/g(평균 51.3µg/g), 그리고 Hg은 0.011~0.194µg/g(평균 0.082µg/g)이었다.

Al은 대부분이 퇴적물 내에서 안정성이 높은 광물격자에 많이 포함되어 있으며, 퇴적물에 % 단위로 존재하는 주요 원소이기 때문에 일반적인 중금속 오염과 크게 상관이 없는 것으로 여겨진다. Al의 공간적 분포는 다른 금속들보다 크지 않지만 정점 2에서 가장 높으며, 인접한 정점 3, 4와 호수 중앙부의 정점 12에서도 8.2% 내외로 높았으며, 방조제 북단의 정점 10에서 가장 낮았다. 정점이 완전히 일치하지는 않지만 이와 유사한 분포 이전의 조사(해양수산부, 2004, 2005, 2006)에서도 나타났다. Al은 입도 보정이 가능한 원소(Al, Fe, Li, Sc, Cs, Co 등) 중의 하나로 활용되며, 높은 농도를 갖는다는 것은 퇴적물이 세립정도가 높다는 것을 의미한다(Schropp *et al.*, 1990; Hanson *et al.*, 1993). 본 연구지역에서 정점간 Al 농도 차이는 크지 않기 때문에 입도 역시 차이가 적을 것으로 보이지만 시화공단에 인접한 정점들에서는 다소 낮은 농도를 보여 상대적으로 조립한 퇴적물이 분포할 것으로 판단된다. Fe의 최고 농도는 정점 12에서 나타났고 정점 2에서도 높았으며, 최저 농도는 Al과 같이 정점 10에서 나타났다. 수평 분포는 Al과 비슷하게 시화호 북단과 시화공단 주변에서는 3%이하의 낮은 농도였으며, 호수의 중앙부와 그 주변, 그리고 반월 공단 주변에서 높았다. 산화·환원 환경 변화와 밀접한 원소의 하나인 Mn과 Co도 최고 및 최저 농도가 Fe와 같이 나타나고 분포는 앞의 원소들과 비슷하다. 하지만 Mn은 전년의 343~933µg/g보다 매우 낮았는데 호수 중앙부의 정점 13에서 농도 저하에 따른 것이며, 퇴적물내 속성 작용에 변화, 즉 산화환원의 약화에 따른 가능성이 있다(Jung *et al.*, 1996). Cr, Zn, As, Cd, Pb, Hg은 모두 정점 4에서 가장 높았는데, 이 정점과 가까운 반월공단 주변의 정점들에서 높고 호수의 중앙부에서도 다소 높은 농도를 나타내었으며, Cd은 정점 6, 그 외에는 정점 10과 그 주변에서 낮게 나타났다. Cu의 신길천과 가까운 정점 5에서 가장 높지만 정점 4에서도 최고 농도에 근접하였고, 시화공단에 가까운 정점에서는 낮지만 그 아래의 정점 7, 9, 11에서는 100µg/g 이상의 높은 농도를 나타내었다. 이상과 같이 반월공단과 신길천 주변의 높은 농도와 함께 호수의 중앙부로 연결되는 정점들에서 높게 나타나서 오염물질의 이동과 축적 경로와 관련이 있을 것으로 보인다.

Al은 앞에서 언급되었듯이 입도 보정에 활용되는데 자연적 변화와 상관성을 가지고, 인위적 유입이 배제되며, 지화학적으로 안정할 뿐 아니라 기반암의 기원이 같아서 풍화에 의한 공급이 일정하게 지속되는 특성을 가지고 있기 때문이다.

시화호 표층 퇴적물의 금속 농도를 입도에 따른 영향을 배제하여 비교하기 위하여 금속 농도를 Al으로 표준화한 Metal(Al

과 Fe은 %, 기타 중금속은 $\mu\text{g/g}/\text{Al}(\%)$ 의 값은 Fe, Mn, Co의 경우 정점 13에서 가장 높은 비를 나타내었으며, Fe과 Co는 반월공단과 호수 중앙부에서도 다소 높고 시화공단 북부에서 낮았다. 하지만 Mn의 경우는 호수의 내측과 공단 주변에서 환원 환경의 영향으로 낮으며, 호수 중앙과 배수갑문 주변에서의 높은 비는 산화 환경에 의한 축적인 것으로 보인다. Cr과 Cu는 정점 5, Zn Cd, Pb은 정점 4에서 가장 높게 나타났으며, Ni은 정점 9에서 가장 높지만 반월공단 주변과 호수 중앙 및 북부, 그리고 이들 지역을 연결하는 정점들에서 높은 비를 나타내었다. 이는 반월 공단과 신길천의 오염물질 공급과 중앙부로의 이동과 지하학적 과정에 의한 축적에 따른 것으로 보인다.

일반적으로 퇴적물은 입도, 광물 조성, 탄산염 및 유기물 농도의 영향을 많이 받으며(Calvert, 1976), 중금속과 유기물의 농도는 입도가 세립할수록 증가하는 경향이 있다(Horowitz, 1991). Fig. 3과 4에는 퇴적물의 Al과 TOC에 대한 각 금속과의 상관관계를 나타내었다. 이미 Al은 입도에 의한 금속 농도의 차이 보정에 많이 활용된다고 한 바 있는데 Al에 대한 각 금속의 상관성을 보면 입도 보정에 활용되는 금속으로 언급한 바 있는 Fe, Co에 대해서 다른 금속보다 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다. Mn, Cr, Ni, Zn, As, Cd 등도 비교적 양호한 양의 상관성을 나타내었지만 Cu, Pb, Hg은 낮은 상관성을 나타내었다.

0.9% 정도의 TOC임에도 주변 오염원에 의하여 높은 금속 함량을 나타낸 특이성을 제외하면 조사된 모든 금속은 비교적 양호한 상관성을 나타내었다.

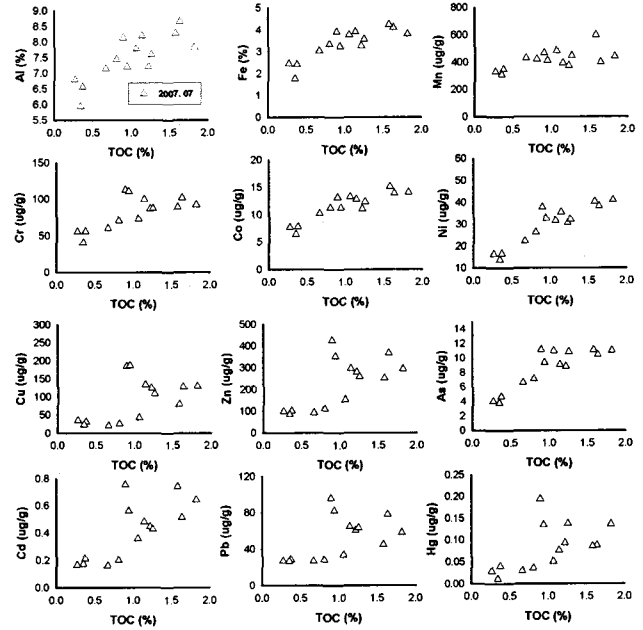


Fig. 4. Metal vs. TOC in the surface sediments.

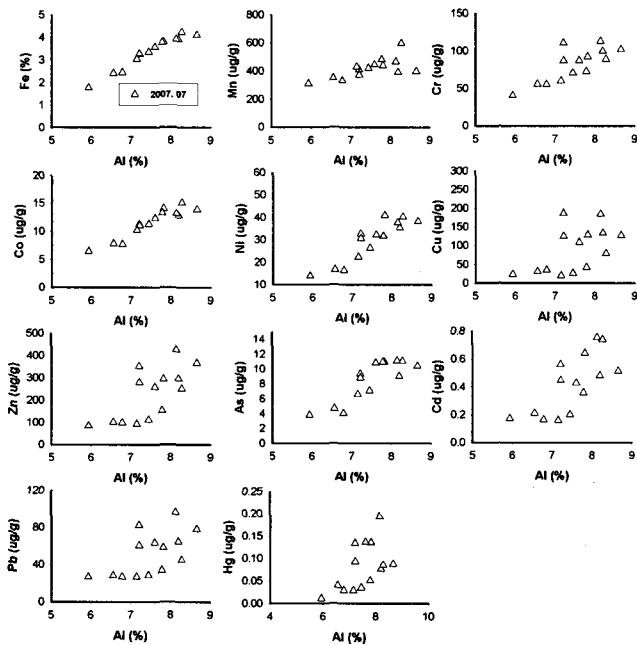


Fig. 3. Metal vs. Al in the surface sediments.

시화호의 퇴적물은 산화·환원 환경의 영향이 크게 작용하는 곳으로 그 영향을 많이 받는 금속의 하나인 Mn의 경우 다른 금속보다 크게 분산되어 상관성이 매우 낮았으나(김 등, 2003; 해양수산부, 2004, 2005, 2006) 본 조사에서는 분산이 크지 않았다. 그렇지 않았다. TOC와 중금속의 관계는 Al과는 다소 차이가 있는데 Cr, Cu, Zn, Cd, Hg의 경우 정점 4와 5에서

3.2 중금속의 연도별 변화 추세와 오염도

시화호 방조제 완공 차기 연도인 1997년부터 현재까지 표층 퇴적물 중의 중금속 농도의 연변화를 Fig. 5에 나타내었다. Mn은 1998년과 2001년에 큰 변동을 보였으며, 평균농도로는 2001년의 피크를 제외하면 최근에는 비교적 낮고, 2007년의 농도는 2005, 2006년보다 약간 낮다. Cr, Co, Ni, Cu, Cd, Pb 등의 변동은 시화호 완공 초기 또는 2003~2006년 사이에 변동 폭이 컸으며, 평균 농도는 초기는 물론 2000년대 초·중반에 증가하였지만 2007년에는 변동 폭이 좁아지고, 평균 농도도 전년보다 감소하였다. 과거의 변화추세에서 Ni, As 등은 환경 개선이 있는 것으로 보였는데 Ni, Cu, Zn, Cd, Pb 등은 큰 변동폭, 공단 주변 정점의 높은 농도 등은 여전히 오염원이 해결되지 못하고 있음을 나타낸다. 올해는 일시적인 감소가 있지만 지속적인 모니터링에 의하여 환경 변화를 파악할 수 있을 것이다.

우리나라에는 해양 퇴적물 관리를 위한 기준이 마련되어 있지 않기 때문에 여기에서는 미국의 NOAA의 ERL, ERM과 비교하였다(Long *et al.*, 1995). ERL과 ERM은 각 매체간의 평형 관계, 생물의 독성 평가, 퇴적물의 오염물질과 생물에 대한 영향 등 다각적인 오염 평가 방법을 포괄적으로 함축하여 제시한 것으로 생물학적인 반응이 측정된 방법과 오염물질의 농도에 따른 반응 정도가 포함되어 있다. 여기서 ERL(Effects Range-Low)과 ERM(Effects Range-Median)은 오염물질의 농도 증가에 따른 생물 영향의 정도를 순서대로 나열하였을 때 각각 하위의 10%와 50%에 해당하는 값을 나타내는 것으로 각 금속별 값은 표 3-1-17에 제시하였다. 본 조사의 퇴적물 중금

속 농도를 위 기준과 비교하면 ERM을 초과하는 중금속은 Zn으로 정점 4가 해당되며, ERL을 초과하는 경우는 Cd를 제외한 대부분의 중금속으로 Cr은 8개, Ni은 11개, Cu 10개, Zn 9개(ERM초과 1개 정점 포함), As 9개, 그리고 Pb은 7개 정점이었 다(Fig. 6).

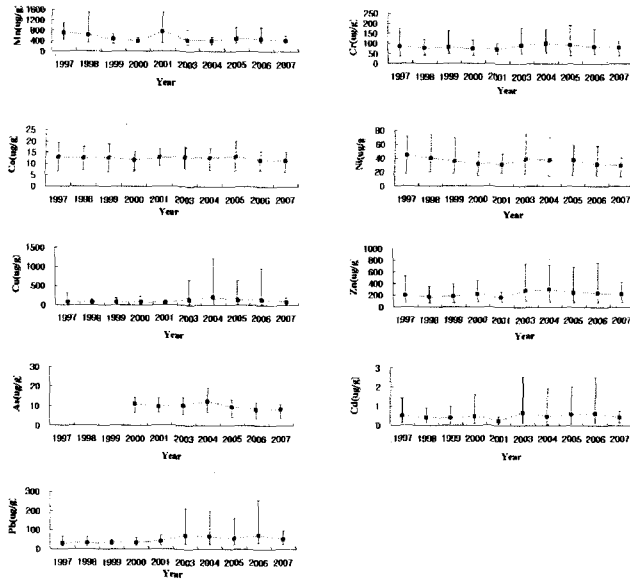


Fig. 5. Temporal variations of metals in surface sediments of the Lake Shihwa.

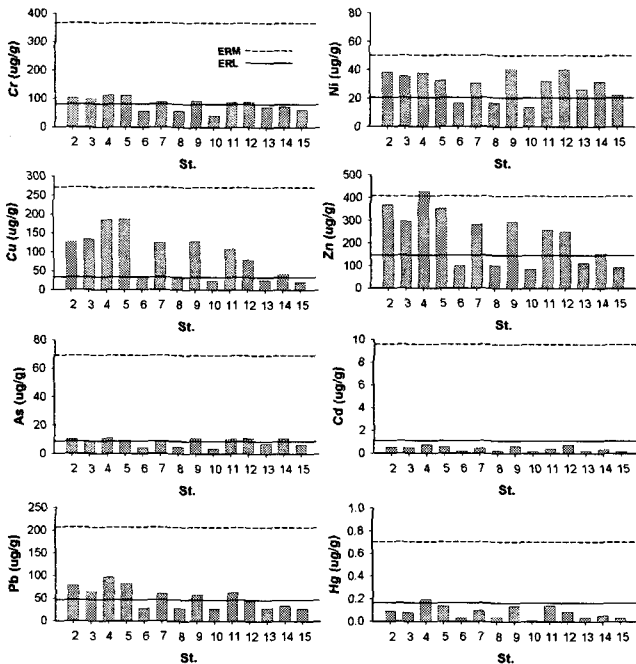


Fig. 6. Comparison of sediment quality guidelines for metals and metal concentrations in the surface sediments.

한편 Ni와 As의 경우 ERL을 초과하는 경우가 많지만 우리나라 주변의 대륙붕 해역에서도 오염원과 크게 상관없이 높게 나타나는 경우가 많은 것으로 볼 때(조, 1994; 임 등, 2007), 기반암이 자체에 높게 포함된 것이 크게 영향을 미치기 때문으로 보인다.

5. 요약

본 연구에서는 경기만의 시화호 표층 퇴적물에 대한 지화학 적 성분 시공간적 변화와 오염도를 파악하였다.

표층 퇴적물의 중금속은 반월공단과 신길천 주변, 그리고 호수 중앙지역에서 높게 축적되어 있었다. 각 금속들은 Al과 TOC에 대하여 높은 상관성을 나타내어 입도가 금속 농도에 영향을 미치고 있는 것으로 보이지만 반월공단 주변의 정점은 Cr, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg의 경우 상관성에서 벗어났다. Cr, Co, Ni, Cu, Cd, Pb 등의 변동은 시화호 완공 초기 또는 2003~2006년 사이에 변동 폭이 컸으며, 평균 농도는 시화호 조성 초기와 2000년대 초·중반에 증가하였지만 2007년에는 변동 폭이 줄어지고, 평균 농도도 전년보다 감소하였다. 시기별 변화추세로 보면 최근들어 Ni, As 등은 환경 개선이 있는 것으로 보였는데 Ni, Cu, Zn, Cd, Pb 등은 큰 변동폭, 공단 주변 정점의 높은 농도를 보인 것은 여전히 시화호 주변의 오염이 해결되지 못하고 있음을 지시한다. Cd를 제외하고는 정점에 따라서 미국의 ERL을 초과하였으며, 정점 4에서는 Zn이 ERM을 초과하는 높은 오염도를 보였다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 “시화호 해양환경 개선사업(PM 44101)”과 한국해양연구원의 “하구역의 관리 및 기능회복 기술 개발(PE 9811B)” 사업 결과의 일부이며, 연구비의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김정태, 조성록, 이수형, 강성현, 이진영(1998), 금 포집 장치와 냉증기 원자흡수분광법을 이용한 수은 측정 전처리 시스템의 자동화, 해양연구, 제20권, pp. 251-260.
- [2] 김정태, 김은수, 조성록, 박준건, 박창길(2003), 시화호 주변 표층 퇴적물의 중금속 분포 변화. Ocean and Polar Res., 제20권, pp. 251-26.
- [3] 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희(1997), 시화호 산화-환원 환경하의 용존성 유, 무기 화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지 「바다」, 제2권 제 2호, pp. 53-68.

- [4] 심무준, 김은수, 김경태, 이기복, 강화성, 이광우(1998), 시화호 퇴적물의 유기탄소, 황 및 중금속 분포. 한국물환경학회지, 제14권 제4호, pp. 469-482.
- [5] 임동일, 최진용, 정희수, 최현우, 김영옥(2007), 한국 연안 퇴적물 내 중금속 원소의 자연적 배경농도 연구, *Ocean and Polar Res.*, 제29권, pp. 379-389.
- [6] 조영길(1994), 한반도 주변 퇴적물 중 중금속의 분포와 기원에 관한 연구, 서울대학교 이학박사 학위논문.
- [7] 최만식, 천종화, 우한준, 이희일(1999), 시화호 표층퇴적물의 중금속 및 퇴적상 변화, 한국환경과학회지, 제8권 제5호, pp. 593-600.
- [8] 한국수자원공사(1998), 시화호 수질관리 대책 수립 연구.
- [9] 한국수자원공사 · 농어촌진흥공사(1996), 시화방조제 방재차원 배수갑문 운영에 따른 수질조사 결과보고서.
- [10] 한국해양연구소(1997), 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 보고서(1차년도).
- [11] 한국해양연구소(1998), 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 보고서(2차년도).
- [12] 한국해양연구소(1999), 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 보고서(3차년도).
- [13] 해양수산부(2004), 시화호 해양환경 개선사업, 한국해양연구원 BSPN 28300-1674-4.
- [14] 해양수산부(2005), 시화호 해양환경 개선사업, 한국해양연구원 BSPM 32900-1749-4.
- [15] 해양수산부(2006), 시화호 해양환경 개선사업, 한국해양연구원 BSPM 38800-1825-4.
- [16] 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. Pollut. Bull.*, Vol. 30, pp. 200-206.
- [17] Bruland, K.W., J.R. Donat and D.A. Hutchins(1991), Interactive influences of bioactive trace metals on biological production in oceanic waters, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 36, pp. 1555-1577.
- [18] Calvert, S.E.(1976), Mineralogy and geochemistry of nearshore sediments, pp. 187-280, *In* J.P. Riley and R. Chester eds., *Chemical Oceanography*, Vol 6. 2nd ed., Academic Press, London.
- [19] Förstner, U.(1981), Metal concentrations in river, lake, and ocean water, pp.71-109, *In* U. Förstner, and G.T.W. Wittmann eds., *Metal pollution in the aquatic environment*, 2nd ed., Spring-Verlag, Heidelberg.
- [20] Hanson, P., D. Evans, D. Colby and V. Zdanowics(1993), Assessment of elemental contamination in estuarine and coastal environments based on geochemical and statistical modeling of sediments, *Mar. Environ. Res.*, Vol. 36, pp. 237-266.
- [21] Horowitz, A.J.(1991), *A primer on Sediment-Trace Element Chemistry*. Lewis pub., USA, 136pp.
- [22] 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 intertidal flat, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 32, pp. 782-787.
- [23] Long, E.R., D.D. MacDonald, S.L. Smith and F.D. Calder(1995), Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments, *Environ. Management*, Vol. 19, pp. 81-97.
- [24] Salomons, W. and U. Förstner(1984), *Metals in the Hydrocycle*, Springer-Verlag, Berlin. 349pp.
- [25] Schropp, S.J., F.G. Lewis, H.L. Windom, J.D. Ryan, F.D. Calder and L.C. Burney(1990), Interpretation of metal concentrations in estuarine sediments of Florida using aluminum as a reference element, *Estuaries*, Vol. 13, pp. 227-235.
- [26] Smith, R.G.(1993), Determination of mercury in environmental samples by isotope dilution/ICPMS, *Anal. Chem.*, Vol. 65, pp. 2485-2488.
- [27] Windom, H.L., S.J. Schropp, F.D. Calder, J.D. Ryan, R.G. Smith, Jr., L.C. Burney, F.G. Lewis and C.H. Rawlinson(1989), Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediment of the southeastern United States, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 23, pp. 314-320.