

진해만 표층수와 표층 퇴적물 중의 중금속 분포

김경태* · 김은수** · 조성록** · 김종근** · 박준건**

*, ** 한국해양연구원 해양환경연구본부

Heavy metals in the surface waters and sediments of Jinhae Bay, Korea

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

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

요 약 : 진해만 표층수 중의 중금속은 육지에 가까운 정점에서 높은 분포를 나타내었으며, 이들의 분포에는 조사 해역의 염분에 근거한 물리적 혼합은 크게 작용하지 않았다. 그리고 Pb는 제외한 다른 중금속은 과거와 큰 차이를 나타내지 않았다. 표층 퇴적물의 중금속 함량은 거제도 혹은 가덕도에 인접한 정점에서 높게 나타났으며, 이들 해역의 Zn, Cu와 Pb 함량은 과거에 비해 약간 상승하여 인위적인 영향이 있는 것으로 판단된다. Hg과 Pb를 제외한 중금속은 상호간에 양호한 상관성을 보였으며, Co, Ni, Zn, Cu, As와 Cd는 IL 및 COD와도 좋은 상관성을 보였다. 농축계수는 As>Cd>Pb>Zn>Co>Cu>Hg>Ni의 순이었으며, As, Cd, Pb, Zn은 1 이상이었다.

핵심용어 : 진해만, 중금속, 표층수, 표층 퇴적물, 농축계수

ABSTRACT : Heavy metals in the surface seawaters and sediments were measured in Jinhae Bay. The high concentrations of heavy metals in the seawaters were found at the stations near the islands. In the seawaters, the mean concentrations of dissolved heavy metals except for Pb were not higher than previous data in this bay. Higher heavy metal contents in the surface sediments were observed at the stations adjacent to the Kojedo or Kadukdo of the Kadoksudo. The contents of Co, Ni, Zn, Cu, As and Cd in the surface sediments showed relatively high correlation coefficients with IL and COD. The order of enrichment factors(EFs) of heavy metals in the sediments was As>Cd>Pb>Zn>Co>Cu>Hg>Ni, and the EFs of As, Cd, Pb and Zn were higher than 1.

KEY WORDS : Jinhae Bay, Heavy Metal, Surface Seawater, Surface Sediment, Enrichment Factor

1. 서론

진해만은 남해안의 동쪽에 위치하고 있으며, 가덕수도와 견내량 해협으로 외해와 연결되는 폐쇄성이 강한 내만으로 일찍부터 각종 수산 생물의 서식 및 산란장으로 이용되었으며, 양식 기술의 보급으로 어패류 양식이 활발하게 이루어지고 있는 곳이다. 그러나 1960년 이후 진해만 주변 유역의 급격한 도시화와 공단 조성 및 대규모 조선소 건설 등의 산업화, 양식장의 자가오염 등으로 빈산수 수괴가 형성되고 부영양화가 심하며 (Hong *et al.*, 1991), 유해성 적조가 발생할 뿐 아니라(박과 김, 1967), 최근엔 적조 출현 빈도가 증가하였다. 또한 중금속, 유기오염물질과 같은 지속성 오염물질의 오염이 보고되고 있다(김 등, 1994; Hong *et al.*, 2003; Oh *et al.*, 2003; Kim, 1996).

한편 중금속은 일반적으로 자연수중에 극미량으로 존재하며 (Bruland *et al.*, 1991), 생물에게 필수 원소로 작용하는 경우도 있으나 환경 중에 유입되면 분해되지 않는 특성을 가지고 있으므로 지속성 오염물질로 분류되고 있다. 이들은 생물에 농축(Bioaccumulation)될 뿐 아니라 생태계의 먹이사슬을 통하여 고차 생물로 갈수록 축적 정도가 커지는 생물 확대(Biomagnification) 과정을 거치게 된다. 연안 지역의 도시 및 산업화에 의하여 발생된 중금속은 하천, 대기, 직접 유입 등 여러 경로를 거쳐 연안 해역으로 유입되고 있다. 연안 해역, 특히 만과 같은 곳은 이류와 확산이 외양에 비해 제한되므로 중금속과 같은 오염물질이 더욱 축적될 가능성이 높다. 해양으로 유입된 중금속은 수중의 생지화학적 과정에 의하여 입자화되며, 결국 저층의 퇴적물에 축적되며, 저층에 서식하는 생물에 영향을 미칠 수 있다(Salomons and Förstner, 1984).

진해만에 있어서 중금속에 대한 연구보고는 대표적으로 해수(Lee *et al.*, 1984; 김 등, 1994), 퇴적물(Lee and Lee,

* 대표저자 : 정희원, ktkim@kordi.re.kr, 031)400-6163

1983), 생물(한국해양연구소, 1988) 등에 대하여 이루어졌다. 그러나 해수의 경우는 청결기술에 의한 자료만이 신뢰성을 가지며, 그렇지 못할 경우 환경 변화 추세 파악과 보존 및 관리에 활용할 수 없다(Bruland, 1983; Burton and Statham, 1990. 진해만에서는 1987~1988년에 조사된 김 등(1994), 1995년 조사된 Kim(1996)의 자료가 활용할 수 있는 정도이다. 한편 퇴적물은 해수보다 높은 농도로 존재하지만 IAEA의 상호검증 연구에서 믿을 수 있는 자료를 확보하기 위해서는 엄격하게 관리되어야 하는 것으로 나타났다(Coquery *et al.*, 2000).

따라서 본 연구에서는 연안 환경 및 어장 관리 측면에서 관심을 끌고 있는 진해만의 입구인 가덕도와 거제도 사이 해역에서 표층수와 표층 퇴적물의 중금속의 공간 분포와 오염현황에 대하여 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사방법

진해만 입구의 표층수 및 표층 퇴적물의 조사 정점은 Fig. 1과 같으며, 표층수는 2000년 10월과 2001년 5월에 각각 1회씩, 표층 퇴적물은 2000년 10월에 1회 채취하였다.

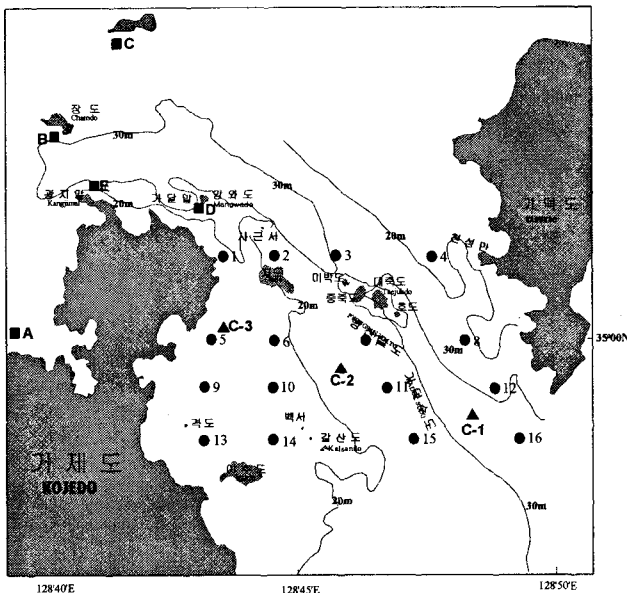


Fig. 1. A map showing sampling stations in Jinhae Bay.

표층수는 PVC파이프에 아크릴 판을 Tygon tubing으로 고정된 채수 보조기구에 산 세척된 채수병을 매달아 배가 조사 정점에 서기 위하여 속도를 줄였을 때 채취하였다(Boyle *et al.*, 1981). 채취된 시료는 Clean-bench내에서 산 세척한 PC막여과지(pore size 0.4 μ m, 직경 47mm)로 여과한 후 고순도 HCl를 사용하여 pH 2이하로 보존하였다. 용존 중금속(Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn)은 시료를 Clean bench(class 100)내에서 Danielsson *et al.*(1978)의 APDC-DDDC-Freon(CFC-113) 용매추출법에

서 용매를 HCFC 141b로 대체하여 추출한 후, ICP/MS(Thermo Elemental X-7)로 측정하였다.

표층퇴적물은 van Veen Grab으로 채취하여 뚜껑과 닿지 않은 상층 1cm 부분을 플라스틱 스푼으로 취하여 비닐 백에 담아 냉동하여 실험실로 옮겼다. 그리고 동결건조 후 200mesh 체를 Agate mortar로 분쇄하였다. 금속 분석은 시료 약 0.05g을 60mL Teflon bomb(Saville #561B)에 넣고 Teflon distilled HF, Teflon distilled HNO₃, suprapur(Merck) HClO₄로 분해 후 증발건조하여 1% HNO₃을 가한 다음 ICP-MS로 측정하였다(Windom *et al.*, 1989). 퇴적물의 수은은 시료 약 0.2g을 60mL Teflon bomb에 넣고 고순도 HNO₃과 HCl 각각 2.5mL씩 넣고 170~180°C에서 2시간 가열하여(Smith, 1993), 냉각 후 CVAFS(Tekran 2500)으로 측정하였다.

퇴적물의 강열감량(IL)은 회화 전과 후의 무게 차이로 측정하였으며, COD는 細川와 三好(1981)에 따라 측정하였다.

중금속 분석법 검정을 위하여 캐나다 NRC(National Research Council Canada) 해수용 CASS-3, 퇴적물용 MESS-2 중금속 표준물질을 함께 분석하였다.

3. 결론

3.1 표준물질 분석 신뢰성

본 연구의 중금속 분석의 정확도를 점검하기 위하여 실시한 표준물질(CASS-3, MESS-2)에 대한 분석 결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Analytical results of metal in the SRMs
A) CASS-3

Element	Certified value	Measured value (Mean \pm 1SD)	Recovery (%)	N
Co(μ g/L)	0.041 \pm 0.009	0.037 \pm 0.002	90	3
Ni(μ g/L)	0.386 \pm 0.062	0.393 \pm 0.027	102	3
Cu(μ g/L)	0.517 \pm 0.062	0.532 \pm 0.039	103	3
Zn(μ g/L)	1.24 \pm 0.25	1.31 \pm 0.12	106	3
Cd(μ g/L)	0.030 \pm 0.005	0.030 \pm 0.002	100	3
Pb(μ g/L)	0.012 \pm 0.004	0.009 \pm 0.001	83	3

B) MESS-2

Element	Certified value	Measured value (Mean \pm 1SD)	Recovery (%)	N
Al(%)	8.57 \pm 0.26	8.41 \pm 0.11	98	3
Co(μ g/g)	13.8 \pm 1.4	12.7 \pm 0.1	92	3
Ni(μ g/g)	49.3 \pm 1.8	45.0 \pm 0.09	91	3
Cu(μ g/g)	39.3 \pm 2.0	39.5 \pm 0.7	101	3
Zn(μ g/g)	172 \pm 16	166 \pm 3	97	3
As(μ g/g)	20.7 \pm 0.8	23.2 \pm 0.8	112	3
Cd(μ g/g)	0.24 \pm 0.01	0.26 \pm 0.02	108	3
Hg(ng/g)	92 \pm 9	92 \pm 5	100	3
Pb(μ g/g)	21.9 \pm 1.2	21.9 \pm 1.2	100	3

용존 중금속 분석법 점검을 위한 NRC(National Research Council Canada)의 CASS-3 분석결과, 회수율은 Pb의 83%에서 Zn의 106%로 모두 보증값의 범위내에 들었으며, 퇴적물에 분석법에 대한 MESS-2의 분석결과, 각 금속의 회수율은 Ni의 91%에서 As의 112%의 범위로 보증 범위를 벗어나는 경우도 있으나 전반적으로 만족스런 결과였으며, 이상의 두 결과로 보면 본 연구의 금속 분석 방법 및 시료의 분석 결과는 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

3.2 표층수 중의 중금속

진해만의 가덕수도 주변해역에서 2000년 10월과 2001년 5월에 각각 1회씩 실시한 표층 해수 중의 용존 중금속의 일부 원소 분포는 Fig. 2에 나타내었으며, 각 원소별 분포를 살펴보면 다음과 같다.

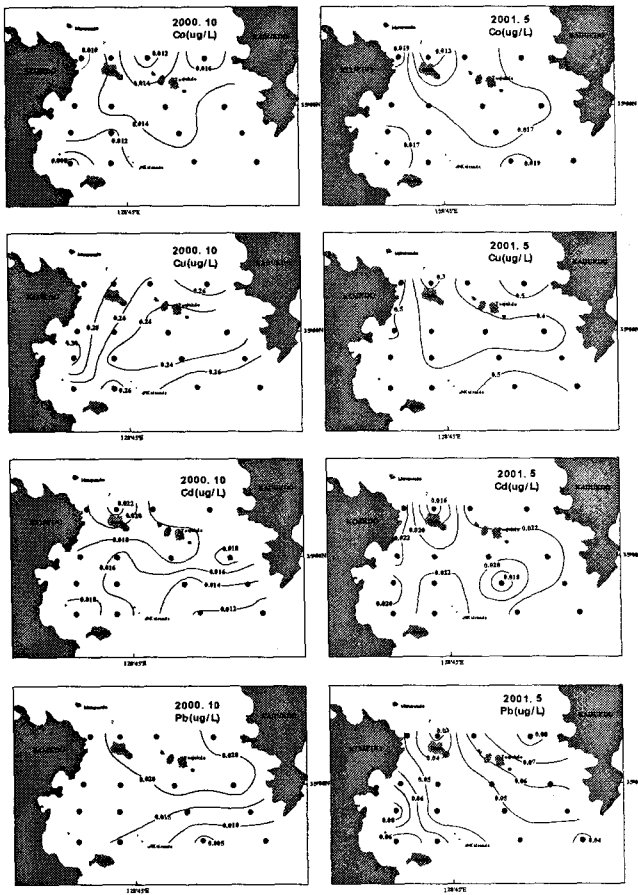


Fig. 2. Distribution of dissolved metals in the surface seawaters.

Co는 2000년 10월의 경우 0.008~0.017 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.013 $\mu\text{g/L}$)의 범위로 가덕도 주변의 St. 4를 비롯한 조사해역의 중앙 및 북쪽 해역에서 높고, 거제도 주변에서 다소 낮은 농도 분포였다. 2001년 5월에는 2000년 10월의 조사 정점과 개조개 서식 지역인 A~E를 포함한 경우 농도 범위는 0.011~

0.024 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.018 $\mu\text{g/L}$)였다. St. 1~16의 해역에 비해 개조개 서식 해역에서 다소 높은 농도를 보였는데, 특히 칠천도 부근의 St. A, 잠도 부근의 St. B, 광지말 부근의 St. E 등에서 0.020 $\mu\text{g/L}$ 이상의 높았다(Fig. 2). 이러한 분포는 이들 정점이 육상과 비교적 가까운 곳에 위치하기 때문이라 판단된다. 한편 2001년 5월의 가덕수도 주변 조사에서는 2000년 10월과 달리 가덕도 주변 및 외해와 거제도 동북부 해역에서 높은 분포를 나타내었다. Ni은 2000년 10월에 0.24~0.56 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.30 $\mu\text{g/L}$)의 범위로 St. 4와 6에서 높은 농도를 나타낸 것을 제외하면 비교적 균일한 분포를 나타내었다. 2001년 5월에 0.20~0.42 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.33 $\mu\text{g/L}$)의 범위였으며, St. B, C에서 0.4 $\mu\text{g/L}$ 이상으로 높은 농도였다. 가덕수도 해역에서는 St. 2에서 0.20 $\mu\text{g/L}$ 나타내며 낮은 농도를 보였으나 이것을 제외하면 농도 차이는 크지 않았으며, 수평분포는 2001년 5월의 Co와 유사하였다. 2000년 10월 Cu의 농도 범위는 0.2~0.31 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.26 $\mu\text{g/L}$)로 조사해역의 중앙부에서 낮고, 주변부에서 높은 분포였으며, 거제도 주변의 St. 9에서 가장 높았다(Fig. 2). 2001년 5월에는 0.27~0.59 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.47 $\mu\text{g/L}$)의 범위로 2000년 10월에 비해 약 2배 정도 높은 농도를 보였으며, 잠도 주변의 St. B에서 가장 높은 농도를 보였다. 해역의 수평 분포는 위 두 원소와 같이 가덕도와 거제도 주변에서 높고, 조사 해역의 중앙부에서 낮았다(Fig. 2). Zn은 2000년 10월에 0.16~0.91 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.27 $\mu\text{g/L}$)의 범위였으나 가덕도 주변의 St. 4에서 0.91 $\mu\text{g/L}$ 을 나타낸 것을 제외하면 정점간의 차이는 크지 않으며, 외해쪽의 정점에서 낮은 농도를 나타내었다. 2001년 5월에는 0.20~1.29 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.51 $\mu\text{g/L}$)로 Cu 마찬가지로 전년도 조사에 비해 높은 농도를 나타내었으며, St. B와 E에서 1 $\mu\text{g/L}$ 이상으로 다른 정점에 비해 매우 높은 농도를 보였다. 가덕수도 해역에서는 거제도쪽에서 가덕도 방면으로 가면서 증가하는 경향이 있었다. Cd은 2000년 10월에 0.011~0.023 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.016 $\mu\text{g/L}$)의 범위에 St. 1, 2에서 0.020 $\mu\text{g/L}$ 이상으로 높았으며, 가덕도의 남단의 St. 16에서 가장 낮은 농도였다. 수평 분포는 거제도 북동쪽에서 가덕도 남단으로 가면서 낮아지는 경향을 나타내었다. 2002년 5월에는 0.014~0.029 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.022 $\mu\text{g/L}$)로 칠천도 주변의 St. A, 잠도 부근의 St. B에서 0.029 $\mu\text{g/L}$ 로 조사 정점 중에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 가덕수도 해역에서는 다른 중금속과 같이 St. 2에서 가장 낮았으며, 이것을 제외하면 농도 차이는 크지 않았다. 수평 분포는 가덕수도의 중앙의 축방향에서 낮고 거제도와 가덕도의 주변에서 다소 높았다(Fig. 2). 2000년 10월에 Hg은 6.0~18.3ng/L(평균 11.7ng/L)의 범위였으며, St. 2와 6에서 17ng/L 이상의 높은 농도였으며, 수평 분포는 Cd과 같이 거제도 북단에서 가덕도 남단 방향으로 가면서 낮은 경향이 있었다. 2001년 5월에는 1.7~11.1ng/L(평균 3.2ng/L)였으며, St. D에서 가장 높았고, 칠천도 주변의 St. A에서 1.7ng/L로 가장 낮았다. St. A~E를 제외한 가덕수도 해역 정점에서는 2.0~4.5ng/L(평균 2.8ng/L)이었다.

Pb의 경우 2000년 10월에는 0.004~0.025 $\mu\text{g/L}$ (평균

0.017 $\mu\text{g/L}$)로 조사해역의 중앙 및 북부에서 높고, 외해쪽으로 갈수록 낮아지는 분포였으며, 특히 가덕도의 남단에 위치한 St. 15와 16에서 0.005 $\mu\text{g/L}$ 내외로 조사기간 중 가장 낮은 농도를 보였다. 2001년 5월은 2000년 10월에 비해 높은 0.027~0.332 $\mu\text{g/L}$ (평균 0.084 $\mu\text{g/L}$)의 범위였으며, 개조개 서식지 주변 정점에서 높은 농도를 보였으며, 가덕수도에서는 St. 2와 15 주변에서 낮고, 가덕도와 거제도 주변에서 높게 나타났다(Fig. 2).

일반적으로 해수중의 중금속 농도는 주변 육상 환경에 의한 영향, 생지화학적 과정의 정도, 외해수와의 교환 등에 의해서 영향을 받는다. 본 연구의 시기별 각 중금속과 물리적 화학적 요인인 염분과의 상관성(R)은 -0.463~0.198로 낮은 값을 나타내었다. 이것은 각 시기별 정점간 염분의 변화폭이 0.5% 이하로 작아서 염분 변화에 따른 흡탈착이나 회석 작용이 미미하기 때문이라 생각된다. 각 원소들 간 상관성을 보면 Cd의 경우 2000년 10월에 다른 중금속과 대부분 낮은 부(-)의 상관성을 보였으나 2001년 5월에는 양호한 정(+)의 상관성을 나타내었다. 한반도 남해에서 표층 해수중의 Cd는 Cu와 정의 상관성을 나타내는 등 그 분포 형태가 유사한 것으로 알려져 있으나(한국해양연구소 1989; 1990), 2000년 10월에는 그렇지 않았다. 또한 Pb와 Hg의 경우 다른 중금속과의 상관성은 비교적 낮아서 해양 환경에서 그 분포에 영향을 미치는 요인에 차이가 있는 것으로 보인다(Table 2). 특히 이들은 대기 중을 통한 유입에 의한 영향이 크게 작용하는 중금속에 속한다(Harper, 1991; 홍 등, 1997).

Table 2. Correlation coefficients(R) among salinity and heavy metals in the surface seawaters.

A) Oct. 2000

	Salinity	Co	Ni	Zn	Cu	Cd
Salinity	1.000					
Co	0.279	1.000				
Ni	-0.245	0.335	1.000			
Zn	-0.347	0.515	0.380	1.000		
Cu	-0.224	0.124	0.038	0.135	1.000	
Cd	-0.199	0.087	-0.026	0.085	0.011	1.000

B) May. 2001

	Salinity	Co	Ni	Zn	Cu	Cd
Salinity	1.000					
Co	-0.323	1.000				
Ni	0.104	0.753	1.000			
Zn	-0.463	0.735	0.438	1.000		
Cu	-0.101	0.783	0.665	0.782	1.000	
Cd	-0.205	0.928	0.814	0.587	0.742	1.000

진해만 해수에 대하여 1987년과 1988년에 총 5회 실시된 김 등(1994)과 1995년에 1회 실시된 Kim(1996)의 중금속 연구 자료 중에서 본 연구지역과 인접한 자료의 평균과 본 연

구의 평균을 Table 3에 나타내었다. 본 연구의 Co, Ni, Cu, Cd 농도는 과거와 비슷한 수준으로 나타났으며, Zn은 과거에 비해 낮았지만 Pb의 경우 2000년의 자료는 낮지만 2001년에는 과거보다 높았다. 그러나 해수중의 농도는 동일 정점에서도 시간 및 공간적으로 변화가 크게 나타날 수 있기 때문에 장기적으로 높은 빈도의 조사 결과가 획득되어야 해역환경 변화를 더욱 자세하게 파악할 수 있을 것이다.

Table 3. Comparison of dissolved metals in the surface seawaters collected from Jinhae Bay

Year	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Source
1987-1988	-	-	0.30	0.67	0.21	0.059	Kim <i>et al.</i> (1994)
1995	0.019	0.47	0.48	3.0	0.018	0.031	Kim(1996)
2000	0.013	0.30	0.26	0.27	0.016	0.017	This study
2001	0.018	0.33	0.47	0.51	0.022	0.084	"

3.3 표층퇴적물 중의 유기물 지표 및 중금속

표층 퇴적물 중의 유기물 지표인 IL과 COD, 그리고 금속들의 대표적인 수평 분포는 Fig. 3에 나타내었으며, 각 항목 별로 살펴보면 다음과 같다.

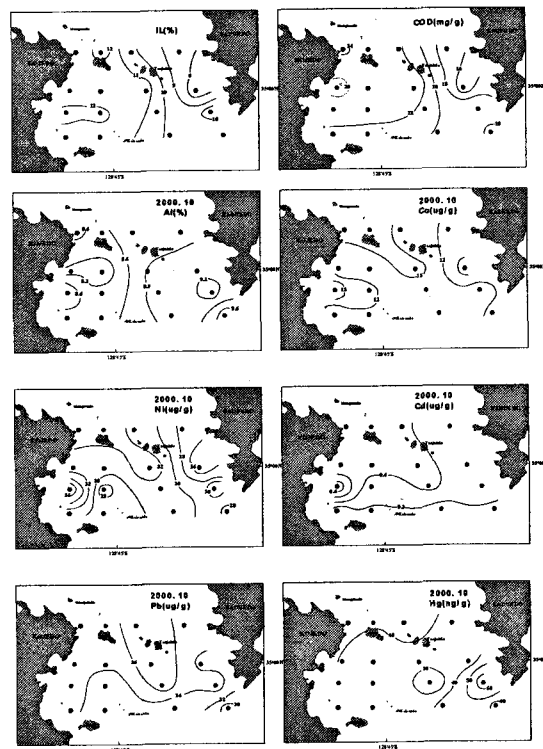


Fig. 3. Distribution of IL, COD and metals in the surface sediments.

퇴적물의 COD는 15.2~28.8mg/g(평균 22.2mg/g)의 범위로 St. A~E에서 다른 정점들보다 다소 높게 나타났다. 일반적으로 퇴적물의 COD는 어장 노화를 일으키는 분해성 유기

물 지표로 활용되는데 30mg/g 이상이면 저서생물에 영향을 미치는 것으로 알려져 있지만(度邊 競, 1990) 본 연구 자료는 이보다 낮았다. 강열감량은 7.5~13.5%(평균 11.1%)의 범위로 St. A~E를 비롯하여 거제도에 가까운 정점들에서 높았다. 한편 강열감량은 난분해성 유기물의 함량이 높은 경우에 높게 나타나는데 분해성 유기물인 COD에 대하여 양호한 상관관계를 나타내어 본 연구해역 퇴적물의 유기물은 분해성 유기물에 많은 영향을 받고 있는 것으로 보인다.

Al 8.14~9.31%(평균 8.68%)의 범위로 개조개 서식지인 칠천도 주변의 St. A에서 가장 낮고, 광지말 주변의 St. E에서 가장 높은 함량을 나타내었다. 가덕수도 해역에서는 저도 아래의 St. 6에서 8.15%로 가장 낮고 가덕도 남단 인근의 St. 12에서 9.31%로 가장 높았으며, 수평 분포는 거제도쪽에서 가덕도 방면으로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다. Co는 10.7~17.0 μ g/g(평균 12.9 μ g/g)의 범위였으며, 칠천도의 St. A에서 가장 높은 함량을 보였으며, 그 외의 개조개 서식지에서는 평균 함량과 비슷하였다. 가덕수도해역에서는 거제도 동쪽 St. 9의 14.9 μ g/g과 저도 인근에서 13 μ g/g 이상의 높은 함량 분포를 나타내었으며, 가덕도쪽과 이수도 위의 정점10에서 낮은 분포를 보였다. Ni과 Cu는 각각 24.5~43.4 μ g/g(평균 31.6 μ g/g), 22.0~39.5 μ g/g(평균 27.3 μ g/g)의 범위였으며, St. A에서 모두 최대 함량을 나타내었으며, 가덕수도에서는 Co와 유사한 분포를 보였다. Zn은 122~159 μ g/g(평균 140 μ g/g)의 범위였으며, 다른 중금속도 높게 나타난 St. 9에서 159 μ g/g으로 가장 높았으며, 가덕수도해역의 수평 분포는 앞서 언급한 중금속과 비슷하였다. As는 12.1~23.8 μ g/g(평균 15.0 μ g/g)로 Ni, Cu와 같이 St. A에서 최대 함량이었으며, 그 외의 개조개 서식지에서는 16 μ g/g 내외였다. 가덕수도에서는 St. 9의 18.7 μ g/g를 비롯한 거제도 주변에서 높고, 가덕도 주변에서 낮은 함량이었다. Cd의 범위는 0.22~3.65 μ g/g(평균 0.82 μ g/g)였는데, 개조개 서식지인 St. A와 D에서 3.5 μ g/g 이상이었으며, 그 외의 개조개 서식지에서도 1 μ g/g 이상으로 가덕수도에 비해 매우 높은 함량을 나타내었는데 이에 대한 명확한 이유는 알 수 없지만 어장 환경의 관리를 위해서는 서식 환경과 생물 및 퇴적물 등에 대한 자세한 연구가 있어야 할 것이다. 가덕수도에서는 St. 9에서 가장 높았고, 전반적으로 거제도에서 가덕도 및 조사해역의 남쪽으로 가면서 낮은 수평분포를 보였다. Hg과 Pb의 함량 범위는 각각 21.7~69.8ng/g(평균 38.8ng/g)과 29.7~37.5 μ g/g(평균 34.4 μ g/g)였다. Hg의 경우 가덕도 남단 부근인 St. 12의 69.8ng/g과 St. 15, 거제도의 북동쪽의 St. 1, 2, 3에서 40ng/g 이상의 높은 함량은 보였다. Pb는 정점간의 함량 차이가 크지 않지만 가덕수도의 중앙부에서 약간 높고 가덕도 주변에서 낮은 함량을 나타내었다.

미국 NOAA의 퇴적물 기준과 비교하면 모든 정점이 Ni과 As는 ERL(Effect Range Low)인 21 μ g/g, 8.2 μ g/g을 초과하였으며, Cu(ERL 34 μ g/g)는 St. A, Zn(ERL 150 μ g/g)은 St. 9와 A, Cd(ERL 1.2 μ g/g)은 St. A, B, D에서 ERL을 초과하였다. 그러나 조사된 중금속들은 ERM(Effect Range Median)을

초과하지는 않았다. 한편 Ni과 As이 다른 중금속보다 ERL 초과빈도가 높은 것은 자연 환경에 의한 배경 농도 자체가 높음에 따른 것이 크게 작용한 것으로 보인다(조 등, 1994; 한국해양연구소, 2002).

1988년 한국해양연구소(1988)의 진해만 조사 자료 중에서 망와도 인근 정점 표층 퇴적물의 Zn, Cu, Pb의 함량은 각각 105, 23, 21 μ g/g으로 본 연구의 중금속 함량은 이보다 다소 높은 수준으로 주변 환경의 인위적인 영향의 가능성이 있다. Pb과 Hg을 제외한 각 중금속은 IL 및 COD에 대하여 0.512~0.831의 양호한 상관계수를 나타내고 있어 중금속 함량은 퇴적물내의 유기물에 의한 영향이 많이 작용하고 있는 것으로 보이며(Fig. 4), 이들 중금속은 상호간에 양호한 정의 상관성을 보였다. 그러나 Pb과 Hg 및 Al은 다른 중금속 및 유기물 지표와 상관성은 매우 낮았다.

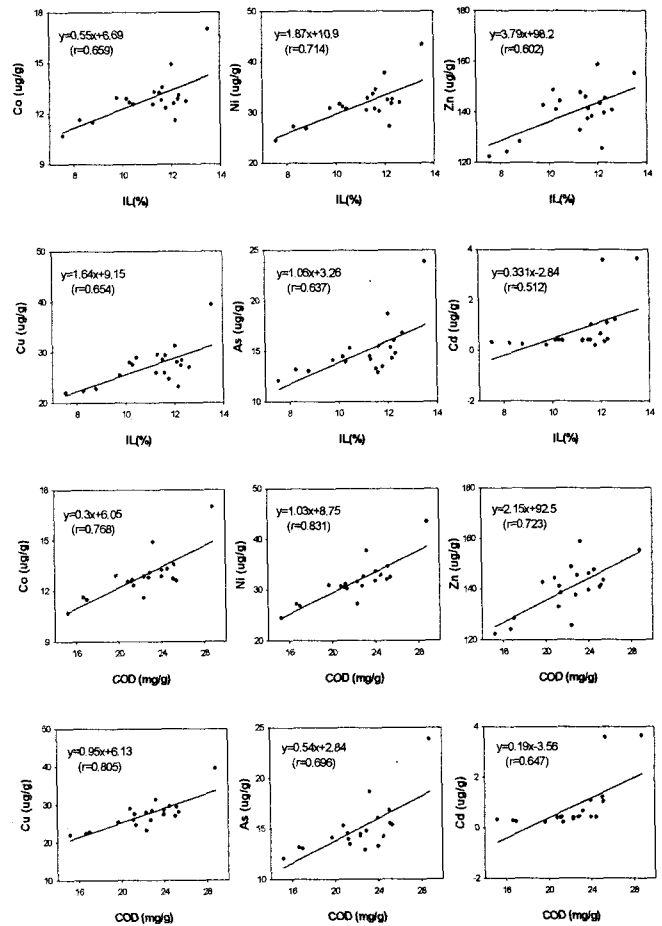


Fig. 4. Relationship between heavy metals vs. IL and COD in the surface sediments.

한편 퇴적물중의 중금속이 자연적인 상태에 비해 인위적인 영향을 어느 정도 받았는지 농축계수(Enrichment factor)를 구하였다. 기준 원소는 가능한 원소기원에 대하여 보존성이 강한 것을 택하게 되는데, 지각에서는 Al, Fe, Sc 등을 선택하는 경우가 많다(Qu et al., 1993). Al을 기준 원소로 하는

농축계수를 구하는 식은 아래와 같이 표현되며,

$$EF = \frac{M_s / AI_s}{M_c / AI_c}$$

이 식에서 EF 는 원소 M의 농축계수, M_s 는 시료중의 대상 원소 함량, AI_s 는 시료중의 AI 함량, M_c 는 지각중의 대상 원소 함량, AI_c 는 지각중의 AI 함량이다. AI_c 와 M_c 는 그 지역에서 역사적으로 오염되지 않은 자연적인 농도 적용하여야 하지만 본 연구에서는 그 자료를 확보하지 못하였다. 따라서 여기에서는 일반적으로 활용하는 지각 중의 원소 함량을 적용하였 본 연구에서는 Taylor(1964)가 제시한 것을 이용하였다. 이와 같이 구한 각 정점의 농축계수는 Table 4에 나타내었으며, 원소별 변동 범위는 Fig. 5에 나타내었다.

Zn, As, Cd과 Pb의 농축계수는 모든 정점에서 1이상의 값을 나타내어 인위적인 영향이 다소 받고 있는 것으로 판단되었는데, Cd과 As의 경우 개조개 서식지인 St. A~E, 특히 St. A와 D에서 높은 값을 나타내었다. 그 외에 Cu, Co, Ni 등은 모든 정점에서 1 이하였지만 St. A에서 가장 높은 농축계수를 나타내었다. 전체 정점에 대한 각 중금속의 평균 농축계수는 $As > Cd > Pb > Zn > Co > Cu > Hg > Ni$ 의 순이었으며, Zn과 Pb은 비교적 변화폭이 좁았으나 Cd은 St. A와 D의 영향으로 큰 변화를 보였다.

Table 4. Enrichment factors of heavy metals in the surface sediment

St.	Co	Ni	Zn	Cu	As	Cd	Hg	Pb
1	0.52	0.43	2.05	0.52	7.69	2.11	0.55	2.67
2	0.52	0.43	2.07	0.52	8.20	2.22	0.51	2.74
3	0.49	0.40	2.03	0.49	7.69	1.96	0.57	2.66
4	0.45	0.35	1.72	0.39	7.11	1.46	0.44	2.66
5	0.51	0.41	1.94	0.48	8.26	2.00	0.51	2.77
6	0.53	0.43	2.04	0.49	7.46	2.21	0.37	2.75
7	0.50	0.43	1.98	0.49	7.03	2.04	0.44	2.74
8	0.40	0.30	1.62	0.37	6.24	1.55	0.35	2.39
9	0.57	0.48	2.16	0.54	9.92	3.14	0.46	2.63
10	0.47	0.37	1.82	0.43	8.08	1.71	0.47	2.47
11	0.47	0.39	1.88	0.47	7.26	1.94	0.25	2.64
12	0.46	0.37	1.87	0.48	7.74	1.83	0.79	2.45
13	0.49	0.40	1.98	0.45	7.48	1.10	0.49	2.66
15	0.48	0.39	1.91	0.43	7.37	1.10	0.51	2.32
16	0.46	0.36	1.82	0.41	7.22	1.25	0.46	2.27
A	0.71	0.60	2.30	0.75	13.8	18.6	0.56	2.70
B	0.52	0.43	2.04	0.50	9.49	6.11	0.48	2.59
C	0.51	0.42	1.97	0.49	8.86	5.35	0.56	2.49
D	0.50	0.43	2.02	0.50	8.43	17.3	0.27	2.45
E	0.50	0.42	1.86	0.49	7.95	4.73	0.39	2.51

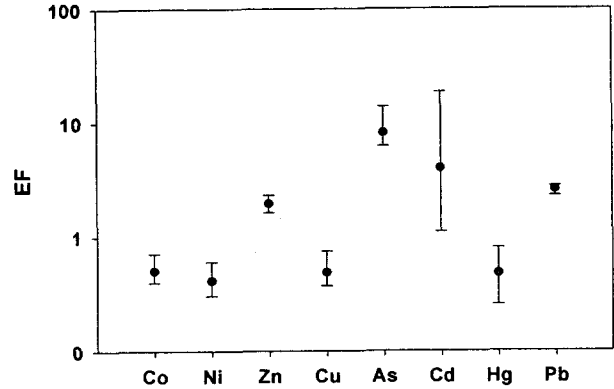


Fig. 5. Range and mean of enrichment factors of heavy metals in the surface sediments.

5. 결론

진해만 입구인 가덕수도에서 2000-2001년에 표층수와 표층 퇴적물의 중금속 분포에 대한 연구를 하였다.

표층 해수중의 중금속의 수평분포는 대부분의 경우 육지가 가까운 곳에서 높은 분포를 나타내었으며, 이들의 분포에는 조사 해역의 물리적인 회석에 의한 영향은 미약한 것으로 나타났다. 각 중금속간의 상관성은 2001년 5월에 비교적 높게 나타났다. Pb을 제외한 다른 중금속은 과거와 큰 차이를 나타내지 않았다.

표층 퇴적물에서 COD는 저서생물에 영향 한계 농도인 30mg/g보다 낮았으며, 강열감량과 높은 상관성을 보여 분해성 유기물에 많은 영향을 받고 있는 것으로 보인다. 중금속 함량은 다른 지역보다 개조개 서식지에서 비교적 높았으며, 특히 Cd의 경우 가덕수도에 비해 최소 5배 이상의 높은 함량을 나타내었다. 가덕수도에서 표층 퇴적물의 중금속 분포는 거제도 혹은 가덕도 주변에서 높게 나타났으며, 이들 해역의 Zn, Cu와 Pb 함량은 과거에 비해 약간 상승하여 인위적인 영향이 있는 것으로 판단된다. Hg과 Pb를 제외한 중금속은 상호간에 양호한 상관성을 보였으며, IL 및 COD와도 좋은 상관성을 보였다. 농축계수는 $As > Cd > Pb > Zn > Co > Cu > Hg > Ni$ 의 순이었으며, As, Cd, Pb, Zn은 1 이상이었으며, Cd의 경우 개조개 서식지(St. A~E)에서 다른 정점보다 높은 농축계수를 나타내었다. 환경과 어장 관리 및 개발을 위하여 높은 중금속 환경 형성 과정과 생물학적인 축적 등에 관한 더욱 자세한 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 한국해양연구원의 “남해어패류 우량화를 위한 생태환경조성 기반기술연구(PN 40600)” 및 “하구역 관리 및 기능회복 기술개발(PE97701)” 사업 결과의 일부이며, 연구비의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김경태, 홍기훈, 이수형, 이동수, 김석현, 김은수(1994), 진해만 표층수 중의 중금속 농도 분포(1987-88), 해양연구, 제16권, 제1호, pp. 19-27.
- [2] 박주석, 김중두(1967), 진해만의 적조현상에 관한 연구, 수산진흥원 연구보고, Vol. 43, pp. 63-79.
- [3] 한국해양연구소(1988), 연안환경기술개발연구, BSPG000 57-184-4.
- [4] 한국해양연구소(1989), 한국해역 종합해양자원도 작성연구 - 남해(2차년도), BSPG00091-251-7.
- [5] 한국해양연구소(1990), 한국해역 종합해양자원도 작성연구 - 남해(최종년도), BSPG00116-313-3.
- [6] 한국해양연구원(2002), 녹산하수처리장 방류관거 공사에 따른 어업피해조사 용역, BSPI323-00-1501-3.
- [7] 홍기훈, 김석현, 정창수(1997), 황해본역의 환경오염, 해양연구, Vol. 19, pp. 55-62.
- [8] 度邊 競(1990), 海面養殖と養魚場環境. 日本水産學シリーズ 82, 恒星社厚生閣, 130pp.
- [9] 細川恭史, 三好英一(1981), 底質 COD 測定法の檢討, 港灣技術資料, No. 368.
- [10] Boyle, E.A., S.S. Husted and S.P. Jones(1981), On the distribution of copper, nickel, and cadmium in the surface waters of the North Atlantic and North Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, pp. 8048-8066.
- [11] Bruland, K.W.(1983), Trace Elements in Seawater, pp. 157-220, In Riley, J.P. and Chester, R. eds., *Chemical Oceanography*(8), Academic Press, New York.
- [12] 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.
- [13] Burton, J.D. and P.J. Statham(1990), Trace metals in seawater, pp. 5-25. In Furness, R.W. and Rainbow P.S. eds., *Heavy metals in the marine environment*, CRC Press, Boca Raton, U.S.A.
- [14] Coquery, M., S. Azemard and S. J. de Mora(2000) Report on the world-wide intercomparison exercise for the determination of trace elements and methylmercury in estuarine sediment sample IAEA-405, IAEA/AL127, IAEA/MEL/70, IAEA, pp. 114.
- [15] Danielsson, L., B. Magnusson and S. Westerlund(1978), An improved metal extraction procedure for the determination of trace metals in seawater by atomic absorption spectrometry with electrothermal atomization, *Anal. Chim. Acta.*, Vol. 98, pp. 47-57.
- [16] Harper, D.J.(1991), The distribution of dissolved cadmium, lead and copper in the Bristol Channel and the outer Severn Estuary, *Mar. Chem.*, Vol. 33, pp. 131-143.
- [17] Hong, G.H., K.T. Kim, S.J. Pae, S.H. Kim and S.H. Lee(1991), Annual cycles of nutrients and dissolved oxygen in a nutrient rich temperate coastal bay, Jinhae Bay, *J. Oceanol. Soc. Korea*, Vol. 15, No. 3, pp. 204-222.
- [18] Hong, S.H., U.H. Yim, W.J. Shim, J.R. Oh and I.S. Lee(2003), Horizontal and vertical distribution of PCBs and chlorinated pesticides in sediments from Masan Bay, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol.46, pp. 244-253.
- [19] Kim, E. J.(1996), Contamination assessment and bioavailability of heavy metals in the Chinhae Bay system, Korea, M.S. thesis, Ewha Womans' University, 93pp.
- [20] Oh, J.R. M.G. Ikonomou, M.P. Fernandez and S.H. Hong(2003), PCB and PCDD/F totals, TEQs, and congener patterns in Korean coastal marine environments, 1987, 1988, 1990 and 1996-1999, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 44, pp. 224-236.
- [21] Qu, C.H., C.Z. Chen, J.R. Yang, L.Z. Wang and Y.L. Lu(1993), Geochemistry of dissolved and particulate elements in the major rivers of China (The Huanghe, Changjiang, and Zhunjiang Rivers), *Estuaries*, Vol. 16(3A), pp. 475-487.
- [22] Salomons, W. and U. Förstner(1984), *Metals in the Hydrocycle*, Springer-Verlag, Berlin, 349pp.
- [23] Smith, R.G.(1993), Determination of mercury in environmental samples by isotope dilution/ICPMS, *Anal. Chem.*, Vol. 65, No. 18, pp. 2485-2488.
- [24] Taylor, S.R.(1964), Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table, *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 28, pp. 1273-1285.
- [25] 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.