

진해만 양식어장 주변 표층 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성 및 오염 평가

최태준* · 권정노**† · 이가람** · 황현진** · 김영숙** · 임재현**

*,** 국립수산과학원 어장환경과

Distribution and Pollution Assessment of Trace Metals
in the Surface Sediments around Farming Area of Jinhae Bay

Tae-Jun Choi* · Jung-No Kwon**† · Garam Lee** · Hyunjin Hwang** · Youngsug Kim** · Jae-Hyun Lim**

*, ** Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 46083, Korea

요 약 : 2013년 8월 진해만을 대상으로 표층 퇴적물을 채취하여 미량금속(As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn)의 분포를 살펴보고, 오염도를 분석하였다. 미량금속의 평균농도는 As 11.1 mg/kg, Cd 0.52 mg/kg, Co 14.1 mg/kg, Cr 69.8 mg/kg, Cu 57.2 mg/kg, Fe 3.7%, Hg 0.064 mg/kg, Mn 600 mg/kg, Pb 40.1 mg/kg, Zn 167.2 mg/kg 의 범위로 조사되었다. 미량금속 중 As, Co, Cr, Fe의 농도는 만 전반적으로 균일한 분포를 보였다. 반면, Cd, Hg, Pb, Zn는 마산만을 포함한 진해만의 북쪽 해역, Cu는 진해만 남동쪽의 고현만, Mn은 거제도 북쪽과 마산만 남쪽을 잇는 만 동쪽방면의 외해로 열린 해역에서 국지적으로 높은 농도를 나타냈다. 각 미량금속의 공간적 분포, 퇴적물 입도 및 미량금속 간의 상관관계와 요인분석 결과 등을 종합적으로 검토해봤을 때, Co, Cr, Fe는 퇴적물의 입도, Mn은 퇴적물의 산화환원 상태, 그리고 As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn는 만 주변의 오염활동으로 인한 미량금속 공급에 따라 분포가 지배되는 것으로 파악되었다. 미량금속 중 As, Cd, Cr, Hg, Pb의 농도를 국내 해양 퇴적물 환경기준인 주의기준(TEL), 관리기준(PEL)과 비교 시, Cd, Hg, Pb의 농도가 만의 북쪽인 마산만 주변에서 주의기준을 초과하였다. 각 미량금속의 농축계수 및 농집지수를 계산한 결과, As, Cd, Cu, Hg, Mn, Pb, Zn가 일부 해역에서 인위적 오염을 보였다. 이 중 As, Mn, Zn은 우려할만한 수준의 오염을 보이진 않았으나, 마산만을 포함한 만 북쪽에서는 Cd, Hg, Pb, 만 남동쪽 가장 안쪽의 고현만에서는 Cu로 인한 오염 수준이 비교적 높게 나타나 해당 원소의 농축에 대해 주의가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 진해만, 표층 퇴적물, 미량금속, 퇴적물 환경기준, 농축계수, 농집지수, 오염

Abstract : Trace metals(As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn) concentrations in surface sediments of Jinhae bay in August of 2013 were measured to investigate the characteristics of trace metals distribution and to evaluate the metal pollution. Assessment for metal pollution was carried out using the sediment quality guidelines(SQGs) such as threshold effects level(TEL) and probable effects level(PEL) proposed by the ministry of oceans and fisheries(MOF) in Korea and geochemical assessment techniques(enrichment factor(EF) and geoaccumulation index (I_{geo})). The mean concentration of trace metals in the sediments are as follows: 11.1 mg/kg for As, 0.52 mg/kg for Cd, 14.1 mg/kg for Co, 69.8 mg/kg for Cr, 57.2 mg/kg for Cu, 3.7% for Fe, 0.064 mg/kg for Hg, 600 mg/kg for Mn, 40.1 mg/kg for Pb, 167.2 mg/kg for Zn. The spatial distributions of As, Co, Cr and Fe were not distinguished clearly in whole area. However, Cd, Hg, Pb and Zn were high in northern area of bay, and Cu and Mn were high in southeastern and eastern area of bay, respectively. The distribution pattern of trace metals, correlation matrix and R-mode factor analyses results revealed that the distribution of trace metals were mainly effected by the sediment grain size(Co, Cr and Fe), redox condition of sediments(Mn) and anthropogenic factors(As, Cd, Cu, Hg, Pb and Zn). Comparing the concentrations of several trace metals(As, Cd, Cr, Hg and Pb) with SQGs from Korea(TEL and PEL), the concentrations of Hg, Cd and Pb in sediment of northern area of bay were higher than TEL. EF and I_{geo} values of As, Cd, Cu, Hg, Mn, Pb and Zn showed that these metals in sediments are enriched by anthropogenic activities in some areas, and pollution status for Cd, Hg and Pb in northern area and Cu in southeastern area of bay were concerned about current level, although those for As, Mn and Zn were not.

Key Words : Jinhae bay, Surface sediment, Metal, Sediment quality guidelines, Enrichment factor, Geoaccumulation index, Pollution

* First Author : choiter@naver.com, 051-720-2541

† Corresponding Author : jungnok@korea.kr, 051-720-2540

1. 서론

자연적 혹은 인위적인 활동으로 인해 환경으로 유출된 미량금속은 강이나 하천을 통하여 해양으로 유입되며(Ra et al., 2013), 유입된 미량금속 중 소량만이 용존 상태로 존재하고 대부분은 물리·화학적인 과정을 통해 수층으로부터 침강하여 해저 퇴적물에 저장된다(Cho et al., 2000; Fang and Hong, 1999; Ra et al., 2013). 해양환경에서 퇴적물 중 미량금속은 수층에 비해 축적된 농도가 매우 높을 뿐만 아니라 쉽게 분해되지 않기 때문에 그 해역의 미량금속 거동 및 오염도를 대표할 수 있으며, 저서생물에게 영향을 미칠 수 있기 때문에 저서생태계 오염의 지시자로서 활용된다(Lim et al., 2013).

우리나라 남해 동부에 위치한 진해만은 마산만, 진동만, 창포만, 원문만, 고현만 등의 소규모 만으로 구성되어 있고, 동쪽의 좁은 가덕수도를 통해 제한적인 해수교환이 일어나는 반폐쇄적인 해역이다(Cho and Lee, 2012). 진해만의 북쪽으로 대도시와 임해공업단지가 조성되어 있고, 서쪽에 수하식 굴양식장, 남쪽에는 주거도시와 조선산업 시설이 밀집되어 있어 각종 오염물질의 부하량이 크다(Son et al., 2011). 만 주변으로부터 배출된 오염물질은 대부분이 외부로 빠져나가지 못하고 만 내부에 축적되어 오염이 가중되어 왔다(Hong and Lee, 1983; Cho et al., 1998). 특히, 마산만을 포함한 진해만 북쪽 해역에서는 오염이 심각한 상황으로 해역의 자체적인 자정능력이 상실되었으며, 부영양화 현상이 빈번히 발생하고 있다(Jin et al., 2000). 또한 만 주변으로부터 미량금속의 인위적 유입이 매우 활발하여 여건이 비슷한 타 해역에 비해 퇴적물 중 미량금속 농도가 현저히 높은 농도를 보인다(Cho and Lee, 2012). 이에 따라 이 해역의 퇴적물은 미량금속으로 인한 오염이 심하여 퇴적물 내에 서식하는 각종 저서 동물을 포함한 저서생태계에 영향을 미치고 있다(Hong and Lee, 1983; Kim et al., 1986; Cho et al., 1998; Woo et al., 1999, 2003).

이러한 진해만 연안 환경오염이 심각하다는 사실을 인식하고 마산만을 비롯한 소규모 만들을 중심으로 수질 및 저질환경 특성과 오염에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다(Hwang et al., 2006; Lim et al., 2012; Hyun et al., 2007; Sun et al., 2014). 마산만을 포함한 진해만 전 해역 범위의 미량금속의 분포에 관한 연구도 진행된 바 있으나(Lee and Lee, 1983; Cho and Lee, 2012), 마산만에 초점을 둔 연구에 비해 미미하고 시간적으로 꾸준히 진행되지 않는 편이다. 진해만은 해양자원이 풍부한 천해어장환경일 뿐만 아니라 연중 수산생물의 성육장 및 산란장으로서 중요한 역할을 하고 있고(Kang et al., 1996), 굴, 진주담치, 미더덕 등의 양식산업도 활발히 이루어지고 있으므로(Kim et al., 2012b) 수산 생물에게

악영향을 미칠 수 있는 미량금속의 분포 및 오염에 대한 모니터링이 반드시 필요하다. 따라서 본 연구는 진해만 내 양식장 주변 및 어장환경을 대표할 수 있는 정점에서 채취한 퇴적물을 분석하여 미량금속의 분포 및 오염 현황을 살펴보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료채취 및 분석

2013년 8월에 진해만 29개 정점에서 van Veen grab sampler로 표층 퇴적물(0~2 cm)을 채취하였다(Fig. 1). 채취한 시료는 미리 산세척한 고밀도 폴리에틸렌병(high density polyethylene bottle)에 담아 분석 시까지 냉동 보관하였고, 이후 퇴적물의 입도, 미량금속 분석을 위한 시료를 개별로 취하여 Hwang et al.(2011)이 제시한 방법에 따라 분석을 시행하였다.

퇴적물 입도 분석을 위해 시료에 과산화수소와 염산을 첨가하여 유기물과 탄산염을 제거한 후 40(63 μm)를 기준으로 습식 체질하여 조립질과 세립질로 구분하였다. 40보다 큰 조립질은 건조 후 건식 체질하였고 40 이하의 세립질은 자동입도분석기(Micromeritics, Sedigraph-5100)로 분석하였다. 분석결과 값은 10 간격으로 입자 크기별 무게 백분율을 구하여 자갈(gravel), 모래(sand), 실트(silt), 점토(clay)의 함량을 나타냈고, 퇴적물의 평균입도(mean grain size, Mz)와 퇴적상(sedimentary type)은 각각 Folk and Ward(1957)와 Folk(1968)의 방법에 따라 구하였다.

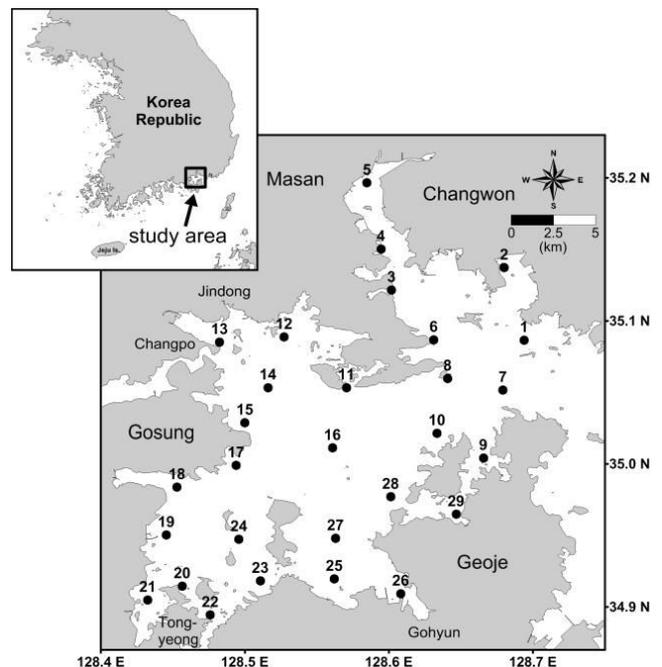


Fig. 1. The sampling locations of surface sediment in Jinhae bay.

진해만 양식어장 주변 표층 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성 및 오염 평가

미량금속 분석에는 -80℃에서 동결건조한 후 플라스틱 재질의 40 체로 체질하여 세립한 퇴적물만을 시료로 사용하였다. 미량금속 중 Hg은 다른 전처리 없이 자동수은분석기 (Automatic Mercury Analyzer, Milestone, DMA-80)로 분석하였으며, 이 외의 미량금속(As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn)은 혼합산(HNO₃:HF:HClO₄=2:2:1)을 이용한 완전분해법으로 퇴적물을 녹인 다음 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, ELAN DRC-e)로 측정하였다. 미량금속 분석 결과의 정확도를 검증하기 위해 인증표준물질(certified reference material)로서 Hg는 MESS-3(marine sediment, National Research Council Canada)를, 이 외 미량금속은 PACS-2(marine sediment, National Research Council Canada)를 3개씩 분석시료와 함께 처리하여 측정하였고, 각 원소별 회수율은 83%(Fe)~ 119%(As)의 범위로 나타났다(Table 1).

Table 1. Certified and analytical values and recovery of metallic elements for the reference material (PACS-2 and MESS-3*, marine sediment)

Trace metal	Certified value(mg/kg)	Analytical value(mg/kg)	Recovery (%)
As	26.2 ± 1.5	31.1 ± 1.7	119±6
Cd	2.11 ± 0.15	1.90 ± 0.06	90±3
Co	11.5 ± 0.3	12.1 ± 0.4	105±4
Cr	90.7 ± 4.6	91.7 ± 3.8	101±4
Cu	310 ± 12	311 ± 13	100±4
Fe	40900 ±600	34081 ±1060	83±3
Hg*	0.091± 0.009	0.087± 0.001	95±2
Mn	440 ± 19	367 ± 15	84±3
Pb	183 ± 8	157 ± 4	86±2
Zn	364 ± 23	404 ± 8	111±2

2.2 미량금속 오염도 평가

퇴적물 중 미량금속은 저서생태계에 영향을 미칠 수 있을 뿐만 아니라 물리·화학적 환경변화에 의해 수층으로 이동하여 수층생태계에 잠재적 오염원으로 작용할 수 있다(Ra et al., 2013). 이 때문에 미국, 캐나다, 중국 등의 나라들은 각국의 환경특성과 미량금속 농도에 따른 생물의 영향을 고려한 해양 퇴적물 환경기준(sediment quality guidelines, SQGs)을 설정해 놓고 있다. 우리나라의 경우, 해양수산부(고시 제 2013-186호)에서 제시한 주의기준(threshold effects level, TEL)과 관리기준(probable effects level, PEL)이 있으며, TEL 미만의 미량금속 농도는 부정적인 생태영향이 거의 없는 것으로 예측되는 농도이며, TEL과 PEL 사이의 농도는 부정적인 생태영향이 발현될 가능성이 있는 범위이고, PEL을 초과하는 농

도는 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 범위를 나타낸다(MOF, 2013). 기준에 명시된 원소 중 As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb은 퇴적물에서 측정된 농도를 직접 비교하여 평가 가능하지만, Cu와 Zn은 Li 또는 Cs을 이용해 입도의 영향을 보정하여 평가할 것으로 권고하고 있다. 하지만 본 연구에서는 Li과 Cs이 분석되지 않아 Cu와 Zn의 농도 보정이 불가능하기 때문에 Cu, Zn을 제외한 As, Cd, Cr, Hg, Pb의 농도를 국내 주의기준과 환경기준(Table 2)과 비교하였다.

또한 미량금속의 인위적인 오염도를 평가하기 위해 농축계수(enrichment factor, EF)와 농집지수(geoaccumulation index, I_{geo})을 이용하였다. 농축계수는 시료의 미량금속 중 보존적인 성질의 Al, Fe, Li와 같은 표준화 원소 농도에 대한 각 미량금속 농도비를 자연적인 배경물질에서의 농도비와 비교하는 방법으로, 본 연구에서는 Fe를 이용하였으며 다음의 방정식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Enrichment Factor (EF)} = \frac{(\text{Me/Fe})_{\text{measured}}}{(\text{Me/Fe})_{\text{crust}}} \quad (1)$$

여기서 (Me/Fe)_{Measured}는 연구해역 내 Fe에 대한 각 미량금속의 농도비이고, (Me/Fe)_{Crust}는 지각 중의 Fe에 대한 각 미량금속의 농도비를 나타낸다.

농집지수는 시료의 미량금속의 농도를 오염되지 않은 미량금속의 농도로 정량화하는 방법으로 방정식(2)에 따라 계산하였다.

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5} \quad (2)$$

여기서 C_n는 시료의 미량금속 농도, B_n는 각 원소의 배경 농도를 나타내며, 1.5는 서로 다른 지각에 존재하는 미량금속의 배경농도를 보정하기 위한 지수이다(Ghani et al., 2013). 본 연구에서는 동일 연구 지역에서 수행된 이전 연구결과(Cho and Lee, 2012)와의 미량금속 오염도 비교를 위하여 As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn의 배경농도는 Cho and Lee(2012)의 연구와 동일하게 지각의 평균 농도 (Martin and Whitfield, 1983)를 이용하였고, Hg은 전세계 연안 대륙붕해역 퇴적물 중 평균농도(Taylor, 1964)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 퇴적물의 입도조성

진해만 표층 퇴적물은 점토(clay)의 함량이 22.6~86.8%(평균 72.7%)로 가장 높았으며 실트(silt)는 5.9~36.2%(평균 22.5%)의

함량을 보였고 모래(sand)와 자갈(gravel)은 각각 0~70.1%(평균 4.5%), 0~4.9%(평균 0.2%)로 비교적 낮은 함량을 보였다. 진해만 하부 통영 방면 수로에 위치한 정점(st. 22)에서는 모래가 70% 이상을 차지하였지만, 대부분의 정점에서 점토의 함량이 가장 큰 비율을 차지하였다(Fig. 2). 진해만 표층 퇴적물의 퇴적상을 Folk(1968)의 분류법으로 구분하여 살펴보면, 점토질(clay, C), 사니질(sandy mud, sM), 약역사니질(slightly gavelly sandy mud, (g)sM), 약역니사질(slightly gravelly muddy sand, (g)mS) 퇴적상으로 구분되었다. 전체의 83%에 해당하는 정점에서 C 퇴적상이 나타났고 진해만 북쪽의 마산만 가장 안쪽 정점 st. 5에서 sM, 진해만 북서쪽의 창포만 정점 st. 13과 가조도 서측하단 정점 st. 23 그리고 거제도 옥계 하단 정점 st. 29에서는 (g)sM, 진해만 남쪽 통영방면 수로 부근의 정점 st. 22에서는 (g)mS 퇴적상이 나타났다(Fig. 3).

평균 입도는 5.0~9.7 ϕ 범위에 속하였으며, 진해만 남쪽 통영 방면 수로 정점 st. 22에서 5.0 ϕ 로 가장 조립하였고, 대부분의 정점에서 8 ϕ 보다 세립한 입도를 나타냈다. 이러한 입도 분포는 최근 Cho and Lee(2012)가 본 연구와 같은 해역에서 측정한 결과와 유사하였다. 진해만은 반폐쇄적인 해역이기 때문에 외해로부터 조류나 파랑과 같은 물리적인 에너지의 영향을 적게 받아(Hong et al., 2007) 매우 세립한 퇴적물이 우세한 것으로 판단된다. 일반적으로 퇴적물은 세립한 입자로 구성될수록 표면적이 커지므로(Horowitz, 1991), 진해만 퇴적물은 유기물 및 미량금속이 쉽게 축적될 수 있는 환경으로 파악되었다.

3.2 미량금속의 농도 및 분포

진해만 표층 퇴적물 중 미량금속 농도는 As가 8.8~13.6 mg/kg(평균 11.1 \pm 1.2 mg/kg), Cd은 0.11~1.61 mg/kg(평균 0.52 \pm 0.39 mg/kg), Co는 7.0~17.1 mg/kg(평균 14.1 \pm 2.1 mg/kg), Cr은 37.6~83.2 mg/kg(평균 69.8 \pm 11.9 mg/kg), Cu는 28.4~231.1 mg/kg(평균 57.2 \pm 33.3 mg/kg), Fe은 2.4~4.3%(평균 3.7 \pm 0.5%), Hg은 0.021~0.283 mg/kg(평균 0.064 \pm 0.051 mg/kg), Mn은 361~1441 mg/kg(평균 600 \pm 294 mg/kg), Pb은 20.8~76.8 mg/kg(평균 40.1 \pm 11.6 mg/kg), Zn은 95.5~292.1 mg/kg(평균 167.2 \pm 44.8 mg/kg)의 범위로 나타났다. 분석된 원소들의 공간적 분포를 살펴보면 Cd, Cu, Hg, Mn, Pb, Zn의 농도가 비교적 확연한 공간적 차이를 보였다. Cd, Hg, Pb, Zn의 농도는 마산만을 포함한 진해만의 북쪽 해역에서 확연히 높은 분포를 나타냈고, Cu는 진해만 남동쪽의 고현만에서 200 mg/kg 이상으로 가장 높은 농도를 보였다(Fig. 4). Mn은 거제도 북쪽과 마산만 남쪽을 잇는 만 동쪽방면의 외해로 열린 해역에서 높은 농도 분포를 나타냈다. 이들 원소에 비해 As, Co, Cr, Fe의 농도는 공간적으로 큰 차이를 보이지 않았으나, As는 마산만 남쪽

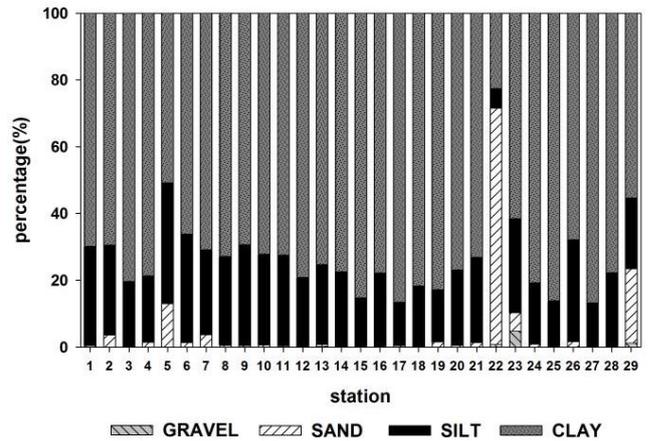


Fig. 2. The percentage compositions of gravel, sand, silt and clay in surface sediment of Jinhae bay.

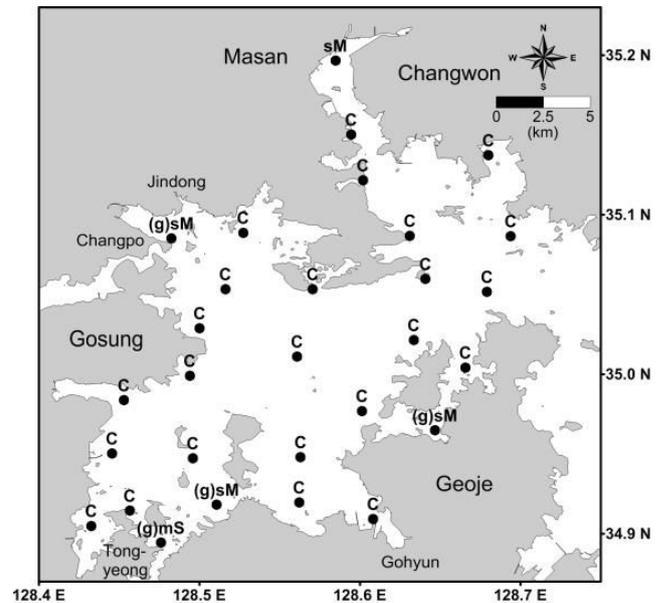


Fig. 3. The spatial distribution of sedimentary facies in the surface sediment of Jinhae bay.

와 진해만 북서쪽의 창포만, 남동쪽의 고현만 등지에서 다소 높은 농도를 보였고, Co, Cr, Fe의 농도는 만 가장자리에서 낮고 만 중심부 및 만 동쪽의 외해로 열린 해역에서 높은 농도 분포를 나타냈다.

본 연구에서 나타난 퇴적물 중 미량금속의 평균농도를 이전에 Cho and Lee(2012)가 제시한 1990년대 후반의 동일한 연구해역 내 미량금속 평균농도와 비교 시(Table 2), 미량금속 중 Cd의 평균농도가 확연한 차이를 보였다. 본 연구에서 나타난 Cd의 평균 농도는 Cho and Lee(2012)가 조사한 값에 비해 약 2배 낮게 나타났는데, 이는 시간적인 변화가 반영된

진해만 양식어장 주변 표층 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성 및 오염 평가

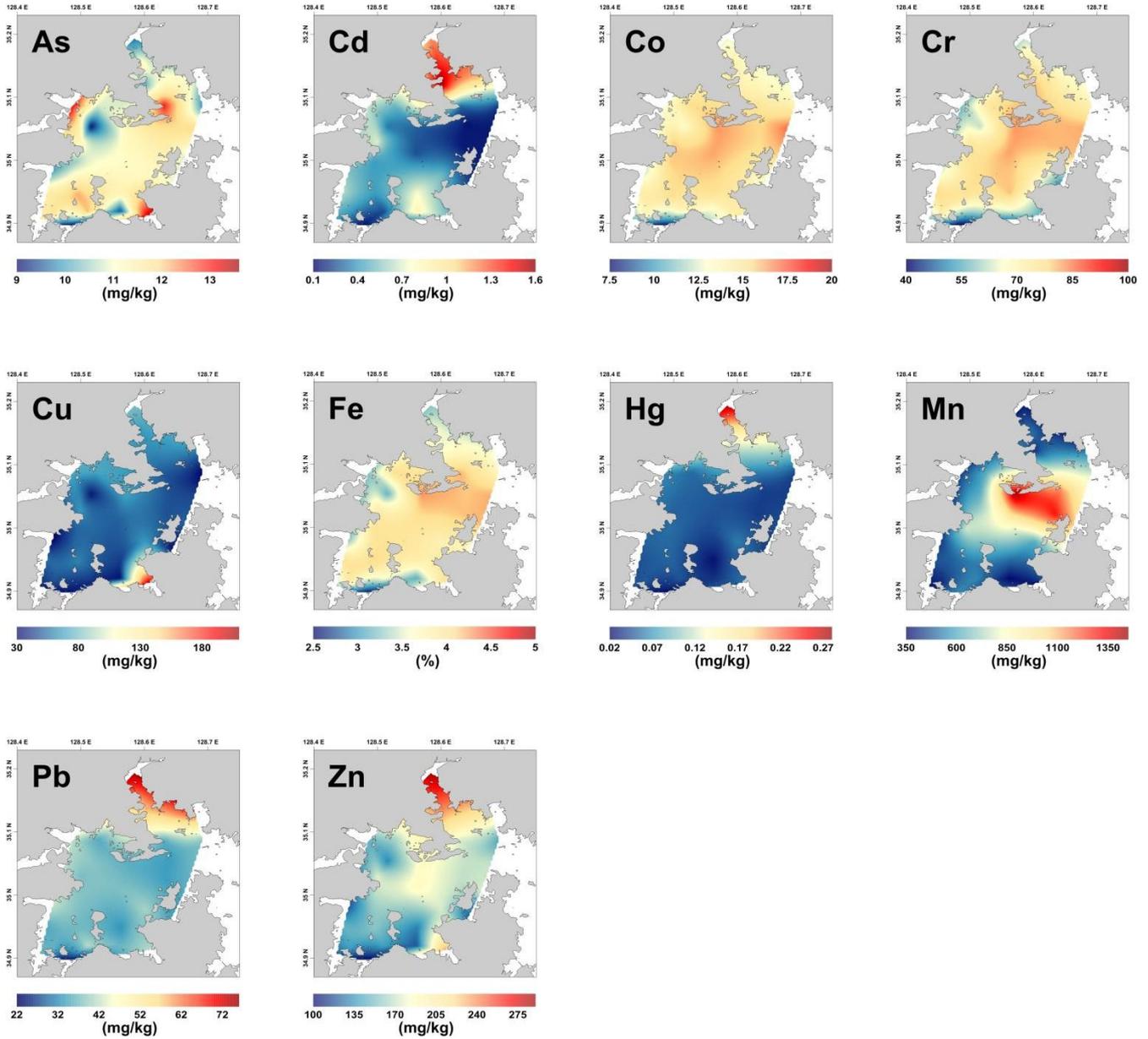


Fig. 4. Spatial distributions of As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn contents in surface sediments of Jinhae bay.

결과라기보다는 본 연구와 비교 연구 간 조사정점 수 및 위치가 차이를 보이기 때문인 것으로 생각된다. 진해만 전반적인 미량금속의 공간적 분포를 살펴보면, 만 북쪽의 마산만 일대와 이를 제외한 해역 간 Cd의 농도 차이는 다른 원소들의 농도차이에 비해 크게 나타나는 특징을 보인다(Fig. 4). 본 연구에서는 비교 연구(Cho and Lee, 2012)에 비해 마산만에 해당하는 조사정점 수가 작고, Cd가 매우 높은 농도를 나타내는 마산만 내 북동쪽의 창원공단 적현부두에 가까운 해역이 포함되지 않아 평균농도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. Cd를 제외한 나머지 미량금속의 평균농도의 차이는

대체로 약 10% 이내로 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 Cho and Lee(2012)가 밝힌 미량금속의 공간적 분포와 비교 시, Cu가 고현만에서 매우 증가된 변화를 나타냈다. 이 연구에서 나타난 진해만 퇴적물 중 미량금속의 평균농도가 다른 해역에 비해 어느 정도의 수준인가를 알아보기 위해 비교적 최근에 이 연구의 해역과 유사한 지형적 특성을 갖추고 주변에 대규모 공업단지 및 산업시설이 위치해있는 국내 타해역에서 측정된 퇴적물 중 미량금속의 평균농도와 비교하였다(Table 2). 본 연구에서 나타난 진해만 퇴적물 중 미량금속의 평균농도는 가막만에서 측정된 미량금속의 평균농도

Table 2. Comparison of trace metal contents between this study area and other polluted bay and lake sediments

Area	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (%)	Hg (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Reference
Gamak bay	9.8	0.1	15	78	28	3.8	0.02	717	28	114	Kim et al. (2012a)
Gwangyang bay	-	0.2	11	51	18	3.3	-	812	28	86	Hyun et al. (2003)
Jinhae bay	11.1	1.0	-	62	58	4.1	-	720	38	189	Cho and Lee (2012)
Jinhae bay	11.1	0.5	14	70	57	3.7	0.06	600	40	167	This study
Shihwa lake	12.3	0.5	13	101	207	3.4	0.12	399	66	309	Kim et al. (2005)
Ulsan harbor	16.2	0.3	-	62	81	3.3	0.11	499	35	189	Hwang et al. (2014)
Youngil bay	-	1.5	-	29	49	2.4	-	-	36	202	Lee et al. (2008)
Threshold effects level (TEL)	14.5	0.75	-	116	20.6	-	0.11	-	44	68.4	MOF (2013)
Probable effects level (PEL)	75.5	2.72	-	181	64.4	-	0.62	-	119	157	

Table 3. Pearson correlation coefficients between mean grain size(Mz) and trace metals(As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn)

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Zn
Mz	0.308	0.220	0.678**	0.676**	0.091	0.503**	-0.071	0.020	0.109	0.151
As		-0.150	0.439**	0.203	0.493**	0.560**	-0.169	0.103	-0.111	0.168
Cd			-0.117	0.028	0.219	-0.277	0.685**	-0.563**	0.771**	0.594**
Co				0.867**	0.205	0.903**	-0.113	0.530**	-0.072	0.320
Cr					-0.092	0.795**	-0.076	0.508**	-0.041	0.257
Cu						0.243	0.024	-0.158	0.261	0.611**
Fe							-0.216	0.594**	-0.201	0.246
Hg								-0.302	0.916**	0.790**
Mn									-0.369**	-0.009
Pb										0.772**

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$ (two tails)

(Kim et al., 2012a)에 비해 대체로 높게 나타났고, Cd, Cu, Hg의 평균농도가 2배 이상의 차이를 나타내며 비교적 확연히 높은 농도를 보였다. 광양만에서 조사된 미량금속의 평균농도(Hyun et al., 2003)에 비해서도 대부분의 원소가 높은 평균농도를 보였고, Cd, Cu, Zn의 평균농도차가 뚜렷하였다. 반면, 시화호에서 측정된 미량금속의 평균농도(Kim et al., 2005)에 비해서는 Cu, Hg, Zn이 낮은 수준을 보이는 것으로 나타났다. 울산만에서 측정된 미량금속 평균농도(Hwang et al., 2014)와의 차이는 다른 만과의 차이에 비해 큰 편은 아니었으나 다소 Cd는 높은 반면 As, Cu, Hg는 낮게 나타났다. 영일만에서 조사된 미량금속 평균농도(Lee et al., 2008)에 비해서는 Cr은 높은 반면, Cd는 약 3배 정도 낮은 수준이었다.

3.3 미량금속 분포의 조절 요인

일반적으로 지화학적 특성이나 환경 내에서 거동 방식 등이 밀접한 관련을 가지는 미량금속은 서로 간에 상관성을 나타낸다(Harman, 1967; Summerhayes, 1972). 따라서 미량금속 간 상관관계를 분석하는 것은 이들의 분포를 조절하는 요인을 파악하는데 유용하다. 퇴적환경에서 퇴적물 입도조성은 미량금속 농도를 조절하는 매우 중요한 요인이기 때문에(Salomons and Förstner, 1984; Horowitz, 1991), 평균입도 및 미량금속 간의 상관관계를 분석하였다(Table 3). 본 연구해역에서는 분석된 미량금속 중 Co, Cr, Fe 만이 평균입도에 대해 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. 나머지 원소(As, Cd, Cu, Hg, Mn, Pb, Zn)는 평균입도와 유의한 상관성을 보이지 않았

진해만 양식어장 주변 표층 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성 및 오염 평가

다. 일반적으로 연안 환경에서 퇴적물 중 미량금속의 농도와 분포는 입도조성에 의해 조절되는 것으로 알려져 있지만, 미량금속이 입자의 크기에 대해 상관성을 보이지 않을 경우 생물교란(bioturbation), 퇴적물 내 산화환원 환경에 따른 속성작용(diagenesis), 석영희석효과(quartz dilution effect), 탄산칼슘이나 굵은 모래, 그리고 정장석 함량, 인위적인 요인 등과 같은 여러 가지 요인의 작용으로 인해 그 농도가 결정될 수 있다(Kim et al., 1998; Hwang et al., 2010; Song et al., 2011; Kim et al., 2012a).

진해만 퇴적물 중 미량금속의 분포를 결정하는 요인을 보다 객관적으로 추정하기 위해 R-mode 요인분석을 실시하였다. 요인분석에 대한 자료의 적합성을 검증하기 위해 표본적합도에 대한 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin) 측도 검증과 Bartlett의 구형성 검정을 실시하였고, 검정 결과 KMO 측도 값과 Bartlett의 구형성 검정 유의확률이 각각 0.586, $p=0.000$ 으로 요인분석에 적합함을 확인하였다. 요인분석 결과 고유값(eigenvalue)이 1 이상인 성분은 4가지로 추출되었고, 미량금속 변동의 약 91%를 설명한다(Table 4). Factor 1은 Cd, Hg, Pb, Zn에 높은 적재값을 보였다. 이 미량금속들은 모두 공간적으로 마산만을 포함한 진해만 북쪽에서 가장 높은 농도를 보이는 특징을 가지며(Fig. 4), 미량금속들 상호 간에 높은 상관관계를 가지고 평균입도에 대해서는 무관하다(Table 3). 또한 모두 Fe과 상관성을 보이지 않으므로 석영희석효과나 탄산칼슘이나 굵은 모래, 정장석 함량 등의 영향보다는 주로 공단과 산업시설로부터 강이나 하천을 통한 유입과 같은 인위적인 요인에 의해 퇴적물 내 미량금속의 농도분포가 영향을 받았을 가능성이 크다. 산업활동의 부산물로 배출된 미량금속은 강한 흡착 및 공침을 통해 퇴적물에 축적되어 국지적으로 매우 높은 농도를 보일 수 있다(Cho and Lee, 2012). 이러한 사항을 고려하면 Factor 1은 마산만 주변의 공단 및 산업시설로부터 유입되는 오염물질과 밀접한 관련을 가지는 요인인 것으로 판단된다. Factor 2는 평균입도, Co, Cr, Fe에 대해 높은 적재값을 나타냈다. Fe은 퇴적물 내에서 입도와 관련성이 높은 보존성 원소로 알려져 있으며(Summers et al., 1996), Co, Cr은 친철원소로 Fe와 유사한 거동을 보인다(Hwang et al., 2006). 이 금속들은 상호간에는 물론 평균입도에 대해 높은 상관관계를 갖는 공통된 특징(Table 3)을 보이므로 Factor 2는 입도요인으로 해석된다. Factor 3은 As, Cu에 대해 높은 적재값을 나타낸다. Cu는 고현만에서 매우 높은 농도를 보이는 미량금속이다. 최근 고현만 주변 해역의 표층해수 중 미량금속을 측정된 Kim et al.(2015)의 연구는 해수 중 Cu가 고현만 안쪽에서 주변해역에 비해 매우 높은 농도를 보이는 경향을 밝혔고, 이에 대해 고현만 주변의 조선소로부터 선박의 방오도료로 주로 사용되는 Cu가 유입된 결과로 해석하였

Table 4. The Varimax-rotated R-mode factor pattern

	Factor			
	1	2	3	4
Hg	0.95	-0.13	-0.03	-0.06
Pb	0.93	-0.01	-0.01	-0.22
Zn	0.90	0.18	0.35	0.16
Cd	0.75	0.10	-0.07	-0.54
Cr	0.07	0.92	-0.08	0.29
Mz	0.02	0.89	0.09	-0.33
Co	0.03	0.87	0.26	0.35
Fe	-0.09	0.74	0.39	0.47
Cu	0.33	-0.04	0.87	-0.03
As	-0.17	0.30	0.83	0.01
Mn	-0.20	0.30	-0.07	0.88
Eigenvalue	3.97	3.58	1.4	1.07
Variance %	36.11	32.54	12.78	9.76
Cumulative %	36.11	68.65	81.43	91.19

다. 이러한 연구결과와 연계하면 고현만 퇴적물 중 Cu의 확연히 높은 농도는 고현만의 해수 중으로 유입된 Cu 대부분이 널리 확산되지 못하고 퇴적물로 가라앉아 국지적으로 활발히 축적된 것으로 추정할 수 있다. 한편 As는 Cu의 분포처럼 확연한 농도차를 보이진 않으나 마산만 남쪽, 만의 북서쪽의 창포만, 그리고 남동쪽의 고현만에서 다소 높은 농도를 보인다. As가 다소 높은 농도를 보이는 해역의 주변부에는 조선소, 공장 및 산업단지가 위치해 있으며, 이러한 시설로부터의 공급에 영향을 받았을 것으로 생각된다. 따라서 Factor 3은 마산만을 제외한 진해만 주변의 인위적인 오염활동과 관련된 요인으로 판단된다. factor 4는 Mn에 대해 높은 적재값을 보이는 요인이다. 입도와 상관성을 나타내지 않는 미량금속들 대부분이 오염활동이 활발할 것으로 의심되는 해역에서 높은 농도를 보이는 경향과 달리 Mn은 거제도 북쪽과 마산만 남쪽을 잇는 만 내부와 외부 간 해수 교환이 일어나는 해역에서 높은 농도를 보였다. 이러한 Mn의 분포는 인위적인 활동과 관련된 오염물질 유입에 영향을 받은 것이 아니라 퇴적물 내에서의 산화환원 환경에 따른 속성작용에 의한 결과로 생각된다. 퇴적물 중 망간산화물은 산소가 부족한 환경에서 유기물 분해의 산화제 역할을 하며, 망간산화물과 결합되어 있는 산소가 이용되면서 Mn은 퇴적물로부터 수층으로 용존 상태로 배출 된다(Libes, 1992). 진해만은 하계 빈산소 수괴가 빈번히 발생하는 지역으로(Yang and Hong, 1988; Kim et al., 2012b) 만 내부에서 혐기적 환경이 형성됨에 따라 퇴적층으로부터 수층으로 유출된 용존 상태의 망간이 만 동쪽 방향의 외해로 열린 해역에서 산소가 비교적 풍부한 해수와 만나 산화되어 산화망간 형태로 퇴적된 것으로 추정된다. 따라서 Mn에 높은 적재값을 보이는 factor 4는 퇴적물의 산화환원 상태에 지배되는 요인으로 파악되었다.

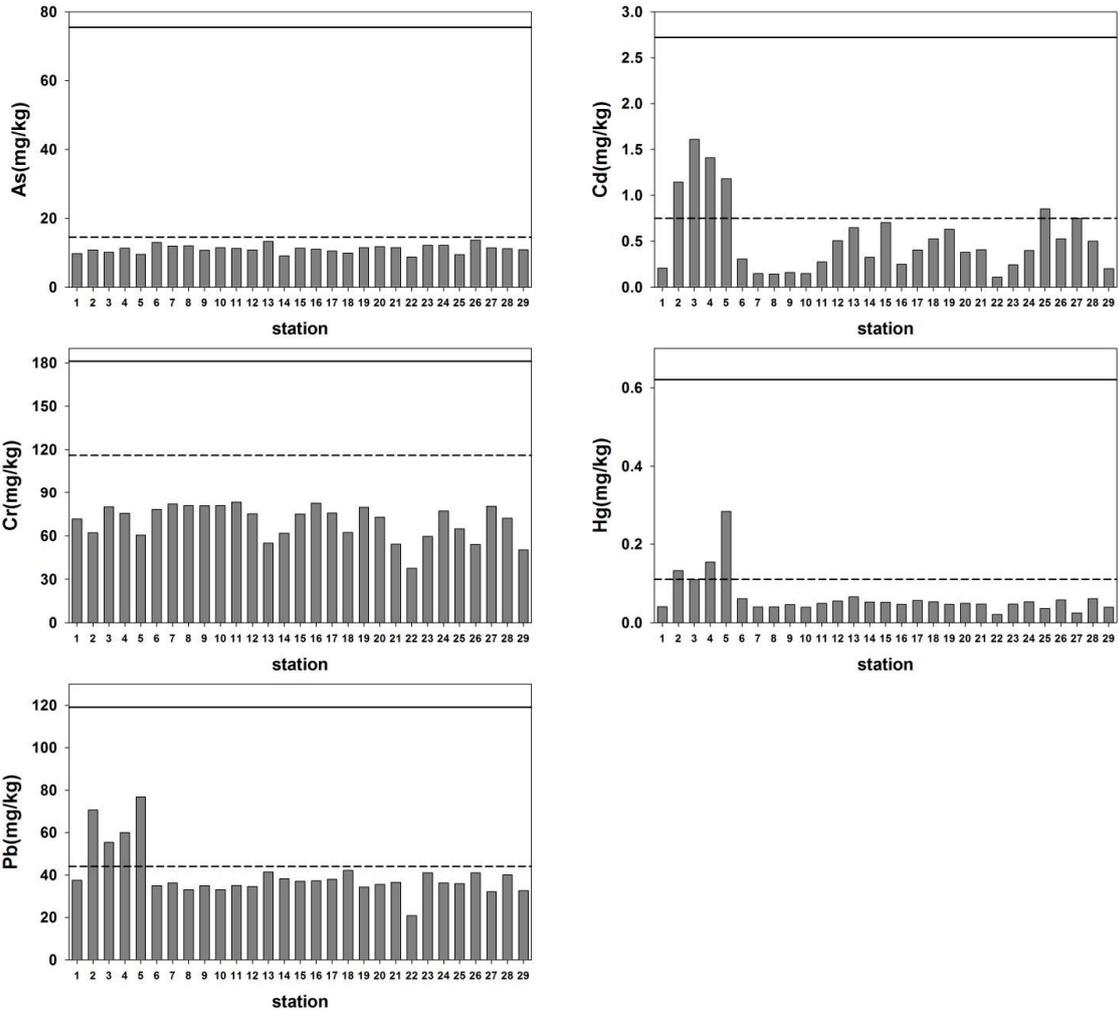


Fig. 5. The concentrations of trace metals(As, Cd, Cr, Pb and Hg) with each station in the surface sediments of Jinhae bay. The dash and solid lines indicate the threshold effects level(TEL) and probable effects level(PEL) proposed by ministry of oceans and fisheries(MOF) as the sediment quality guidelines, respectively.

3.4 미량금속 농축 및 오염도 평가

앞서 언급하였듯이, 진해만 퇴적물에서 일부 미량금속 농도와 공간적 분포는 인위적인 오염 요인에 지배되는 것으로 파악되었으므로 미량금속의 농축 및 오염 현황에 대해 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서는 퇴적물 미량금속 오염 평가에 널리 사용되는 방법인 국내 퇴적물 환경기준과의 비교 및 농축계수(EF)와 농집지수(I_{geo})를 이용해 미량금속의 오염도를 평가하였다. 먼저, 우리나라 해양수산부(고시 제 2013-186호)에서 제시한 해양 퇴적물 환경기준인 주의기준(threshold effects level, TEL)과 관리기준(probable effects level, PEL)을 이용하여, 입도의 영향을 보정하여 평가할 것으로 권고하고 있는 Cu와 Zn을 제외하고 직접적인 농도비교가 가능

한 As, Cd, Cr, Hg, Pb의 농도를 비교하였다(Fig. 5). 그 결과, As와 Cr의 농도는 전 해역에서 주의기준을 초과하지 않았다. 반면 Cd, Hg, Pb의 농도는 모두 만의 북쪽인 마산만 주변 정점 st. 2~5에서 주의기준을 초과하였다. 이들 원소는 나머지 해역에서는 대부분 주의기준 미만의 농도를 나타내었으나, Cd가 만 남동쪽의 st. 25에서 주의기준을 약간 초과하는 값을 보였다.

미량금속의 인위적 농축 경향을 파악하기 위해 조사 정점에 따른 각 미량금속의 농축계수를 Fig. 6에 나타냈다. 퇴적물 중 미량금속이 농축되었다는 것은 자연적인 농도 이상의 높은 값을 나타내는 것으로, 농축계수가 1.5보다 낮으면 오염되지 않은 자연적인 농도 상태를 의미하며 1.5보다 큰 값

진해만 양식어장 주변 표층 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성 및 오염 평가

Table 5. Classification of geoaccumulation index and the number of Igeo for the trace metal concentrations in surface sediments of Jinhae bay

Igeo range	Igeo class	Designation of sediment quality	Number of Igeo										
			As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Zn	
> 5	6	Very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	5	Strongly/very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-4	4	Strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	3	Moderately/strongly polluted	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
1-2	2	Moderately polluted	0	7	0	0	0	0	1	0	4	0	0
0-1	1	Practically unpolluted/moderately polluted	7	10	0	0	17	0	2	3	24	5	0
< 0	0	Practically unpolluted	22	10	29	29	11	29	26	26	1	24	0

을 보이는 경우에는 외부의 인위적인 요인에 의한 오염이 있는 것으로 볼 수 있다(Zhang and Liu, 2002; Hyun et al., 2007). Co와 Cr의 농축계수 값은 각각 0.8~1.2 (평균 1.0), 0.7~1.1 (평균 0.9)범위로 모든 정점에서 1.5 이하의 값을 나타냈다. As의 농축계수는 1.2~1.9 (평균 1.4)범위로 일부해역(만 북서쪽의 창포만 정점 st. 13, 만 남서쪽의 통영인근 해역 정점 st. 21, 22, 만 남동쪽의 고현만 정점 st. 26)에서 1.5를 약간 초과하는 값을 보였으나, 대부분의 정점에서 1.5 이하의 값을 나타냈다. Mn의 농축계수도 0.5~1.7 (평균 0.9)로 만 동쪽의 거제도 북쪽과 마산만 남쪽을 잇는 외해로 열린 해역에 속한 정점 st. 10, 11에서 1.5를 초과한 값을 보였지만, 이를 제외한 정점에서 1.5 이하의 값을 보였다. 반면 Pb의 농축계수는 1.8~5.4 (평균 2.5)범위로 모든 정점에서 1.5를 초과하였다. 공간적으로 만의 북쪽인 마산만 주변 정점 st.2~5에서 3.5~4.7 범위로 가장 높은 농축계수를 보였고, 이를 제외한 해역 중만 북서쪽의 창포만 및 그 주변 정점 st. 13, 14와 만 서쪽의 당동만에 위치한 정점 st. 18에서도 3에 근접한 비교적 높은 값을 보였다. Cd의 농축계수는 0.6~8.2 (평균 2.6) 범위로, 외해로 열린 해역에 인접한 정점을 제외하면 대체로 1.5 이상의 값을 보였다. Pb와 마찬가지로 만 북쪽의 마산만에서 가장 높은 값을 보였는데, 마산만에서 속한 정점인 st. 2~5에서 나타난 Cd의 농축계수는 6.0~8.2로 조사된 모든 미량금속의 농축계수 중 가장 높은 값이었다. 만 북서쪽의 창포만 정점 st.13, 만 서쪽의 당동만 인근 정점 st. 18, 남동쪽 방향의 일부인 st. 25, 27에서 3 이상의 값을 보였으며, 남동쪽의 st. 25에서는 5에 근접한 값을 보였다. Hg과 Zn의 농축계수는 각각 0.3~3.9 (평균 0.8), 0.9~2.6 (평균 1.3) 범위로, 공통적으로 마산만에 속한 정점 st. 2~5에서 1.5 이상의 농축계수를 보였

다. 마산만을 제외한 해역에서 Hg의 농축계수는 모두 1 이하의 값을 보였고, Zn의 농축계수는 고현만 정점 st. 25에서 1.5를 약간 초과한 값을 보였으나 나머지는 모두 1.5 이하의 값을 보였다. 한편 Cu의 농축계수는 0.9~5.9 (평균 1.7) 범위로, 대체로 외해로 열린 해역에 인접한 정점을 제외하면 1.5 이상의 값을 나타냈다. 특징적으로 만의 남동쪽 방면 가장 안쪽의 고현만 정점 st. 25에서 가장 높았고 약 6에 근접한 농축계수를 보였다.

미량금속의 오염 정도를 세부적으로 평가하기 위해 농집지수를 계산하여 Müller(1979)의 분류 기준에 따라 총 7단계로 구분하였고, 각 오염 등급에 해당되는 정점의 개수를 Table 5에 나타냈다. Co, Cr, Fe의 Igeo class는 모든 정점에서 0으로 오염되지 않은 상태에 해당하였다. As, Mn, Zn의 Igeo class도 대부분의 정점에서 0이었고 일부 지역에서 1로 나타나 우려할 만한 수준의 오염을 보이지 않았다. Hg과 Pb의 Igeo class는 각각 만 북쪽의 마산만에 속한 정점 st. 5, st. 2~5에서 2로 나타나 약간 오염된 수준이었고, 나머지 해역에서는 0~1로 나타났다. Cd의 Igeo class는 만 북쪽의 마산만에 속한 정점 st. 2~5에서 2~3 범위로 나타나 약간의 오염 또는 강한 오염 단계에 직면한 수준이었으며, 만의 서쪽과 남동쪽의 일부 정점 st. 13, 19, 25, 27에서는 2로 약간의 오염 수준이었다. 이외의 해역에서는 0~1 범위를 나타냈다. Cu의 Igeo class는 고현만 정점 st. 25에서 3으로 강한 오염 단계에 직면한 것으로 나타났고, 대부분의 해역에서 0~1로 나타났다.

농축계수와 농집지수를 통한 오염도 평가는 이용한 배경농도(background value)에 따라 농축 및 오염 정도에 대한 해석이 달라질 수 있음을 감안하여야 한다. 지각 및 전 세계 연안 대륙붕 해역 퇴적물 중 평균농도를 배경농도로 계산된

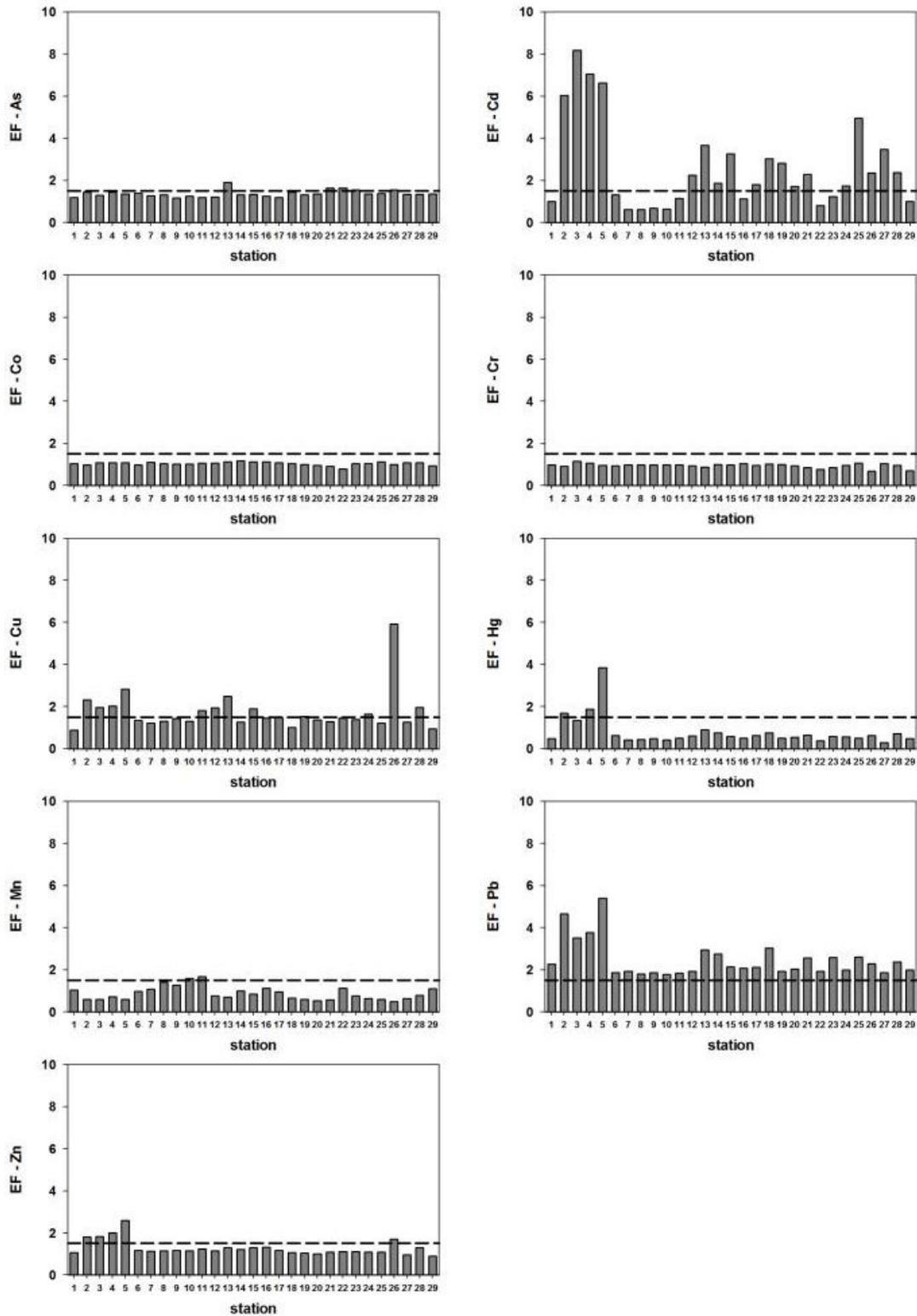


Fig. 6. Enrichment factors of trace metal(As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Pb and Zn) with each station in the surface sediments of Jinhae bay. The dash line indicate the equilibrium mean sediment value of unity.

진해만 양식어장 주변 표층 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성 및 오염 평가

농축계수 및 농집지수에 근거하여 미량금속의 오염도를 평가한 결과, Co, Cr, Fe는 자연적인 농도 상태로 오염을 보이지 않았다. 반면 As, Hg, Mn, Zn은 전체 조사정점 중 7~17%에 해당하는 비교적 국지적인 규모로, 이들 원소에 비해 Cd, Cu, Pb는 41~100%에 해당하는 보다 넓은 범위의 해역에서 인위적 오염의 영향을 받은 것으로 나타났다. 각 원소가 인위적 오염을 보이는 해역에 국한하여 오염 정도를 살펴보면, As, Mn, Zn은 비교적 농축정도가 크지 않아 우려할만한 수준의 오염을 보이지 않았다. 하지만 Cd, Hg, Pb는 공통적으로 마산만을 포함한 만의 북쪽에서, Cu는 만 남동쪽의 고현만에서 가장 심각한 농축을 보였으며, 해당 원소의 농축에 대해 염려할 필요가 있을 것으로 파악되었다. 각 원소가 상대적으로 활발히 농축된 해역을 제외한 나머지 해역에서는 대체로 우려할 만한 수준의 오염을 보이진 않았으나, 만 서쪽과 남동쪽의 일부 해역에서 Cd이 약간의 오염 수준을 보이므로 주의가 필요할 것으로 판단된다.

이 전에 진해만 퇴적물 중 미량금속의 분포와 오염도를 분석한 Cho and Lee(2012)의 연구 결과 중 미량금속 오염도 평가 결과는 주로 마산만 해역에서의 오염에 집중되어 있어, 본 연구에서 나타난 진해만 전반적인 미량금속 오염 양상 및 수준과 비교하기에는 무리가 있었다. 다만 Cho and Lee(2012)의 연구와 본 연구의 결과 중 마산만을 제외한 나머지해역에서 나타난 각 미량금속의 농축계수 범위를 비교해보았을 때, Cu의 농축계수가 뚜렷한 차이를 보였다. 비교연구(Cho and Lee, 2012)에서 나타난 Cu의 농축계수의 최대값은 약 2로, 본 연구의 고현만에서 나타난 Cu의 농축계수인 약 6과 큰 차이를 보였다. Cho and Lee(2012)의 연구와 본 연구는 농축계수를 계산함에 있어 입도에 의한 영향을 보정하기 위한 원소로서 각각 Al, Fe을 사용하여 차이를 보이지만, 본 연구해역에서 Al, Fe은 모두 만 주변의 오염원으로부터의 유입에 관계없이 입도와 상관성을 가지며 만 전반적으로 상호간에 일정한 비율을 보이기 때문에(Cho and Lee, 2012) Al 또는 Fe 중 어느 원소를 사용하던지 간에 농축계수 값은 큰 차이를 보이지 않을 것으로 생각된다. 따라서 이전의 연구보다 매우 높은 고현만에서의 Cu의 농축계수는 과거에 비해 진해만 내 고현만에서 Cu의 농축이 활발해졌고, 이로 인한 퇴적물 오염이 가중되고 있는 실정을 시사하는 것으로 판단된다. 진해만 해역 내 마산만은 해양오염방지법에 근거하여 특별관리해역으로 지정된 후, 해역의 환경 개선을 위해 연안오염총량제와 같은 노력이 꾸준히 시행되고 있다. 그러나 고현만의 경우 특별관리해역의 범위에 포함되지 않으므로 상대적으로 마산만에 비해 수질 및 퇴적 환경의 오염이 더 악화될 가능성이 있다. 그러므로 진해만 내 마산만 뿐만 고

현만 해역에 대해서도 오염원에 대한 적절한 관리 및 규제가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

2013년 8월 진해만 표층 퇴적물을 채취하여 미량금속(As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn)의 분포 및 오염도에 대해 분석하였다. 진해만 퇴적물 중 미량금속은 공간적 분포 특성에 따라 크게 두가지 유형으로 분류되었다. 하나는 만 전반에 걸쳐 균질한 분포를 나타내는 원소이고, 다른 하나는 국지적으로 높은 농도를 나타내는 원소이다. 전자에 속한 원소는 Co, Cr, Fe로 이들의 분포는 입도에 따라 조절되는 것으로 파악되었다. 진해만 퇴적물은 대체로 세립하고 입도조성이 공간적으로 큰 차이를 나타내지 않기 때문에, 이러한 특성이 반영된 분포로 판단된다. 반면, 후자에 속한 원소는 As, Cd, Cu, Hg, Mn, Pb, Zn으로 모두 입도와 상관성을 보이지 않아 다른 요인의 영향을 받는 것으로 예측되었다. 이중 Mn은 만 내부와 외부 간 해수 교환이 일어나는 해역에서 높은 농도 분포를 보여 퇴적물의 산화환원환경에 따른 속성작용의 영향 때문인 것으로 파악되었다. 반면, As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn은 대체로 마산만을 포함한 만 북쪽, 북쪽의 창포만, 그리고 남동쪽의 고현만 주변과 같은 오염활동이 활발한 해역에서 높은 농도를 보여, 인위적인 공급에 의해 국지적으로 축적된 것으로 파악되었다. 미량금속 중 As, Cd, Cr, Hg, Pb의 농도를 국내 해양 퇴적물 환경기준과 비교한 결과, As와 Cr의 농도는 전 해역에서 주의기준을 초과하지 않은 반면, Cd, Hg, Pb의 농도는 모두 만의 북쪽인 마산만 주변에서 주의기준을 초과하였다. 농축계수와 농집지수를 이용한 미량금속 오염평가 결과, As, Mn, Zn은 비교적 농축정도가 크지 않아 우려할만한 수준의 오염을 보이지 않았다. 하지만 Cd, Hg, Pb은 마산만을 포함한 만의 북쪽, Cu는 만 남동쪽의 고현만에서 가장 활발한 농축을 보였으며, 약간 또는 강한 단계에 직면한 수준의 오염을 나타냈다. 각 원소가 상대적으로 활발히 농축된 해역을 제외한 나머지 해역에서는 대체로 우려할 만한 수준의 오염을 보이진 않았으나, 만 서쪽과 남동쪽의 일부 해역에서 Cd이 약간의 오염 수준을 보이므로 주의가 필요할 것으로 판단된다. 진해만 퇴적물 중 미량금속의 분포 및 오염 수준을 과거(15년 전)와 비교 시, 가장 급격하고 뚜렷한 변화는 만 남동쪽의 고현만에서 Cu의 농도가 매우 증가하였고 오염 수준이 비교적 강하게 나타난 것이다. 따라서 진해만 내 마산만과 더불어 고현만에 대해서도 오염원에 대한 적절한 관리 및 규제가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업 (R2015055)의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Cho, K. J., M. Y. Choi, S. K. Kwak, S. H. Im, D. Y. Kim, J. G. Park and Y. E. Kim(1998), Eutrophication and seasonal variation of water quality in Masan-Jinhae bay, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 3, No. 4, pp. 193-202.
- [2] Cho, Y. G., C. B. Lee and C. H. Koh(2000), Heavy metals in surface sediments from Kwangyang bay, south coast of Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 5, No. 2, pp. 131-140.
- [3] Cho, Y. G. and C. B. Lee(2012), Heavy metal contamination in surface sediments from Masan and Jinhae bay, southeast coast of Korea, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 302-313.
- [4] Fang, T. H. and E. Hong(1999), Mechanisms influencing the spatial distribution of trace metals in surficial sediments off the south-western Taiwan, Marine Pollution Bulletin, Vol. 38, No. 11, pp. 1026-1037.
- [5] Folk, R. L.(1968), Petrology of sedimentary rock, Hemphill's, Drawer M. University Station, p. 170.
- [6] Folk, R. L. and W. C. Ward(1957), Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters, Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 27, No. 1, pp. 3-26.
- [7] Ghani, S. A., G. E. Zokm, A. Shobier, T. Othman and M. Shreadah(2013), Metal pollution in surface sediments of Abu-Qir Bay and Eastern Horbour of Alexandria, Egypt, The Egyptian Journal of Aquatic Research, Vol. 39, No. 1, pp. 1-12.
- [8] Harman, H. N.(1967), Modern factor analysis. Univ. Chicago Press, 2nd ed., p. 469.
- [9] Hong, J. S. and J. H. Lee(1983), Effects of the pollution on the benthic macrofauna in Masan bay, Korea. J.Oceanol. Soc. Korea. Vol. 18. pp.169-179
- [10] Hong, S. J., W. C. Lee, R. H. Jung, H. T. Oh, J. H. Jang, J. H. Goo and D. M. Kim(2007), Ecosystem modelling for improvement summer water quality of Jinhae bay in 2003, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 13, No. 2, pp. 103-110.
- [11] Horowitz, A.(1991), A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry, Lewis Publishers, INC., Michigan, p. 136.
- [12] Hwang, D. W., H. G. Jin, S. S. Kim, J. D. Kim, J. S. Park and S. G. Kim(2006), Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan harbor, Korea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 39, No. 2, pp. 106-117.
- [13] Hwang, D. W., I. S. Lee, M. Choi and H. G. Choi(2014), Distribution and pollution assessment of organic matter and trace metals in surface sediment around Ulsan harbor, Journal of the Korean Society for Environmental Analysis, Vol. 17, No. 3, pp. 146-160.
- [14] Hwang, D. W., S. E. Park, P. J. Kim, B. S. Koh and H. G. Choi(2011), Assessment of the pollution levels of organic matter and metallic elements in the intertidal surface sediments of Aphae Island, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 44, No. 6, pp. 759-771.
- [15] Hwang, D. W., S. O. Ryu, S. G. Kim, O. I. Choi, S. S. Kim and B. S. Koh(2010), Geochemical characteristics of intertidal surface sediments along the southwestern coast of Korea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 43, No. 2, pp. 146-158.
- [16] Hyun, S., C. H. Lee, T. Lee and J. W. Choi(2007), Anthropogenic contributions to heavy metal distributions in the surface sediments of Masan bay, Korea, Marine Pollution Bulletin, Vol. 54, No. 7, pp. 1059-1071.
- [17] Hyun, S., T. Lee, J. S. Choi, D. L. Choi and H. J. Woo(2003), Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of Gwangyang and Y대내 bay, south coast of Korea, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 8, No. 4, pp. 380-391.
- [18] Jin, Y. H., K. T. Kim, C. S. Chung, S. H. Kim, D. B. Yang, G. H. Hong and K. W. Lee(2000), Behavior of trace metals in Masan bay, Korea during oxygen deficient period, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 56-64.
- [19] Kang, Y. S., J. S. Park, S. S. Lee, H. G. Kim and P. Y. Lee(1996), Zooplankton community and distributions of Copepods in relation to eutrophic evaluation in Chinhae bay, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 29, No. 4, pp. 415-430.
- [20] Kim, K. T., E. S. Kim, S. R. Cho, K. H. Chung and J. K. Park(2005), Distribution and pollution of heavy metals in the environmental samples of the lake Shihwa, Journal of the

- Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 148-157.
- [21] Kim, K. T., K. Ra, J. K. Kim, E. S. Kim, C. K. Kim and W. J. Shim(2015), Distribution of dissolved heavy metals in surface seawaters around a shipyard in Gohyun bay, Korea, Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 18, No. 1, pp. 36-44.
- [22] Kim, G., H. S. Yang and Y. Kodama(1998), Distributions of transition elements in the surface sediments of the Yellow Sea, Continental Shelf Research, Vol. 18, No. 12, pp. 1531-1542.
- [23] Kim, J. H., S. D. Chang and S. K. Kim(1986), Variability of current velocities in Masan Inlet, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 19, No. 3, pp. 274-280.
- [24] Kim, P. J., S. G. Shon, S. Y. Park, S. S. Kim, S. J. Jang, S. B. Jeon and J. S. Ju(2012a), Biogeochemistry of metal and nonmetal elements in the surface sediment of the Gamak bay, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 18, No. 2, pp. 67-83.
- [25] Kim, S. Y., Y. H. Lee, Y. S. Kim, J. H. Shim, M. J. Ye, J. W. Jeon, J. R. Hwang and S. H. Jun(2012b), Characteristics of Marine Environmental in the Hypoxic Season at Jinhae bay in 2010, Korean Journal of Nature Conservation, Vol. 6, No. 2, pp. 115-129.
- [26] Lee, M., W. Bae, J. Chung, H. S. Jung and H. Shim(2008), Seasonal and spatial characteristics of seawater and sediment at Youngil bay, southeast coast of Korea, Marine Pollution Bulletin, Vol. 57, No. 6, pp. 325-334.
- [27] Lee, S. H. and K. W. Lee(1983), Heavy metals in sediments from Jinhae bay, Korea, Journal of the Oceanological Society of Korea, Vol. 18, No. 1, pp. 49-54.
- [28] Libes, S. M.(1992), An introduction to marine biogeochemistry, New York · Chichester Brisbane Toronto · Singapore, John Wiley Sons, INC., pp. 193-197.
- [29] Lim, D. I., H. S. Jung, K. T. Kim, H. H. Shin and S. W. Jung(2012), Sedimentary records of metal contamination and eutrophication in Jinhae-Masan bay, Korea, Marine Pollution Bulletin, Vol. 64, No. 11, pp. 2542-2548.
- [30] Lim, D. I., J. W. Choi, H. H. Shin, D. H. Jeong and H. S. Jung(2013), Toxicological impact assessment of heavy metal contamination on macrobenthic communities in southern coastal sediments of Korea, Marine Pollution Bulletin, Vol. 73, No. 1, pp. 362-368.
- [31] Martin, J. M. and M. Whitfield(1983), The significance of the river input of chemical elements to the ocean. In: C.S. Wong, E.A. Boyle, K.W. Bruland, J.D. Burton and E.D. Goldberg(editors), Trace Metals in Sea Water, New York: Plenum, pp. 265-296.
- [32] MOF(2013), Ministry of Oceans and Fisheries, Sediment quality guidelines, <http://www.mof.go.kr/law2.do>.
- [33] Müller, G.(1979), Schwermetalle in den sedimenten des rheins-Veränderungen Seit, Umschau 24, pp. 778-783.
- [34] Ra, K. T., J. K. Kim, E. S. Kim, K. T. Kim, J. M. Lee and E. Y. Kim(2013), Vertical profiles and assessment of trace metals in sediment cores from outer sea of lake Shihwa, Korea, Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 16, No. 2, pp. 71-81.
- [35] Salomons, W. and U. Förstner(1984), Metals in the Hydrocycle, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 349.
- [36] Son, M., S. H. Baek, H. M. Joo, P. G. Jang and Y. O. Kim(2011), Distributional characteristics of *Escherichia coli* and water pollution in Gwangyang Bay and Jinhae Bay, Korea, The Korean Journal of Environment Biology, Vol. 29, No. 3, pp. 162-170.
- [37] Song, Y. H., M. S. Choi and Y. W. Ahn(2011), Trace metals in Chun-su bay sediments, The Sea - Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 16, No. 4, pp. 169-179.
- [38] Summerhayes, C. P.(1972), Geochemistry of continental margin sediments from northwest Africa, Chemical Geology, Vol. 10, No. 2, pp. 137-156.
- [39] Summers, J. K., T. L. Wade, V. D. Engle and Z. A. Malaeb(1996), Normalization of metal concentration in estuarine sediments from the Gulf of Mexico, Estuaries, Vol. 19, No. 3, pp. 581-594.
- [40] Sun, C. I., Y. J. Lee, J. H. An and Y. W. Lee(2014), Speciation and ecological risk assessment of trace metals in surface sediments of the Masan bay, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 19, No. 2, pp. 155-163.
- [41] Taylor, S. R.(1964), Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 28, No. 8, pp. 1273-1285.
- [42] Woo, H. J., H. Y. Kim and K. S. Jeong(1999), Response of benthic foraminifera to sedimentary pollution in Masan bay, Korea, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 4, No. 2, pp. 144-154.
- [43] Woo, H. J., J. H. Cho, K. S. Jeong, C. S. Chung, S. J. Kwon and S. M. Park(2003), Pollution history of the Masan bay, southeast Korea, from heavy metals and foraminifera in the

subsurface sediments, Journal of Korea Earth Science Society,
Vol. 24, No. 7, pp. 635-649.

- [44] Yang, D. B. and J. S. Hong(1988), On the biogeochemical characteristic of surface sediments in Chinhae bay in September 1983, Bulletin of the Korean Fisheries Society, Vol. 21, No. 4, pp. 195-205.
- [45] Zhang, J. and C. L. Liu(2002), Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 54, No. 6, pp. 1051-1070.

Received : 2015. 08. 03.

Revised : 2015. 08. 21.

Accepted : 2015. 08. 27.