

지화학적 평가기법을 이용한 전남 서해 도서갯벌 퇴적물내 중금속 오염도 평가

황동운* · 김성길¹

국립수산과학원 어장환경과, ¹해양환경관리공단

Evaluation of Heavy Metal Contamination in Intertidal Surface Sediments of Coastal Islands in the Western Part of Jeollanam Province Using Geochemical Assessment Techniques

Dong-Woon Hwang* and Seong-Gil Kim¹

Marine Environmental Management Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea

¹ Climate and Marine Environment Team, KOEM, Busan 606-080, Korea

We measured grain size, organic matter, and metallic elements (Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, Hg, and As) in intertidal sediments collected from six islands in the western part of Jeollanam Province in order to evaluate heavy metal contamination in the tidal flat sediments of coastal islands. The evaluation of metal contamination was carried out using geochemical assessment techniques such as sediment quality guidelines (SQGs), enrichment factor (EF), and geoaccumulation index (I_{geo}). Surface sediments were classified into four sedimentary facies: sand, gravelly muddy sand, slightly gravelly mud, and silt. The concentrations of heavy metals in intertidal sediments from Jaeun, Amtae, Biguem, and Docho islands showed good positive correlations with mean grain size and ignition loss, indicating that the concentrations of metallic elements in these sediments were dependent on grain size and the organic matter content. The concentrations of heavy metals in sediments from almost all of the stations were lower than two criterion values proposed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in the United States. Based on the EF and I_{geo} results, surface sediments were a little polluted for Cr and were moderately polluted for As. Our results suggest that more intensive studies are necessary in the future in order to determine the major source of As in intertidal sediment and to evaluate the As pollution level in macrobenthos.

Key words: Tidal flat, Heavy metal, Sediment quality guideline (SQGs), Enrichment factor (EF), Geoaccumulation index (I_{geo})

서 론

갯벌(tidal flat)은 조석에 따라 육지-해양-대기 환경의 영향을 직접적으로 받아 퇴적환경 및 저서생태계의 변화가 급격하게 일어나는 매우 독특한 해양환경이다. 전세계적으로 갯벌은 지구 생태계 면적의 0.3%를 차지하지만, 다양한 퇴적환경을 바탕으로 지구상에 존재하는 생물의 약 20%가 서식할 만큼 생물 다양성이 높다(Lee, 2002; Chang, 2008). 또한, 바지락, 백합, 낙지, 칠게, 농게, 쪽 등을 비롯한 수많은 수산생물의 서식지이자 연안 어류들의 산란장과 성육장 역할을 하는 중요한 수산자원의 보고이며(Woo and Je, 2002; Park and Lee, 2004; Kim et al., 2008), 최근에는 패류 및 해조류 등의 양식을 통해 어업인들의 소득을 증가시키는 삶의 터전이자 기능성 식품 및 의약품 개발이 가능

한 천연자원의 보고이다.

갯벌은 일반적으로 조차가 매우 크고, 해저면의 경사가 완만하며, 강한 파도로부터 보호되고 조류의 흐름이 약한 반폐쇄적인 내만 지역이나 육상으로부터 부유물이 풍부하게 공급되는 연안지역에 크게 발달한다(Yang, 2006; Chang, 2008). 우리나라의 남서해안 또한 평균 4 m 이상의 큰 조차와 연안으로 유입되는 영산강, 탐진강 같은 큰 강과 주변의 소규모 하천, 많은 섬으로 이루어진 다도해와 굴곡이 심한 리아스식 해안으로 인해 육상으로부터 공급된 부유물들이 외해로 빠져나가지 못하고 주변 연안지역에 퇴적되어 넓은 갯벌이 분포하고 있다(Jeon and Cho, 2002; Shin et al., 2002; Choi et al., 2010). 2008년에 국토해양부에서 조사한 우리나라의 갯벌 면적을 보면, 전체 면적(약 2,490 km²)의 42% (1,037 km²)가 전라남도에도 집중되어 있고, 이중 약 34% (343 km²)가 신안군 내에 존재하고 있다(http://www.index.go.kr).

*Corresponding author: dwhwang@nfrdi.go.kr

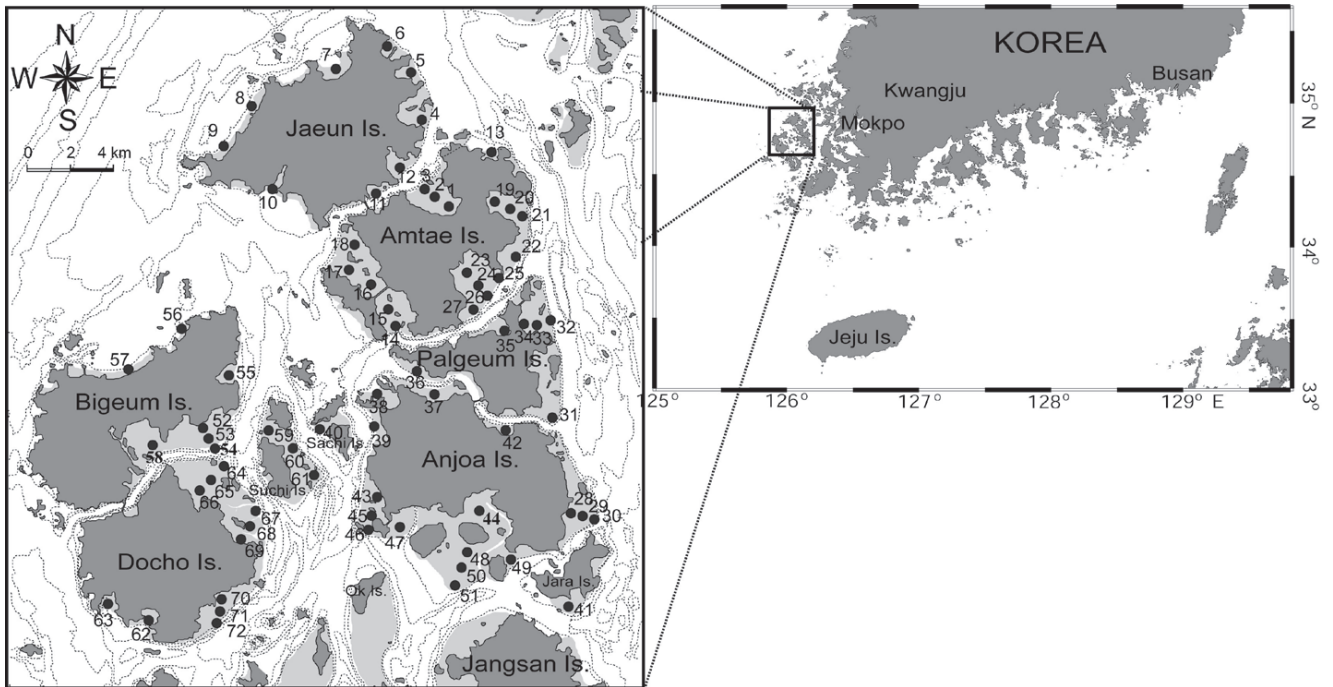


Fig. 1. A map showing the location of study area and the sampling sites for analyzing the heavy metals in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam Province in July 2008.

신안군은 전라남도 서부에 위치한 1,004개의 섬(유인도 72개, 무인도 932개)으로 이루어진 도서군이다. 따라서, 우리나라의 남해안과 서해안의 다른 지역과 달리 이 지역의 갯벌은 대부분이 도서갯벌로서 육지와 인접한 연안갯벌처럼 하나의 갯벌로 서로 연결되어 있는 것이 아니라 섬 주변의 해안을 따라 지형적으로 분리되어 곳곳에 산재해 있다. 특히 신안군내 중심에 다이아몬드 형태를 이루고 있는 섬들은 복잡한 조류 및 해류의 흐름, 굴곡이 심한 해안선 등의 영향으로 각기 다른 형태의 크고 작은 독특한 갯벌들이 발달해 있다.

우리나라의 갯벌은 1970년대만 해도 쓸모없는 땅으로 여겨져 개발위주의 정책에 따라 임해공업단지 및 도시의 조성, 농지 및 농업용수의 확보 등을 위하여 간척과 매립, 하구둑 및 방조제의 건설 등 무분별한 연안개발로 인해 지난 30년간 전체 갯벌면적의 20% 정도가 사라졌다(Chang, 2008; Ryu et al., 2009; Hwang et al., 2010; Jung et al., 2010). 남서해안의 경우에도 영산강 하구둑, 금호 및 영암방조제 건설, 대불 국가산업단지 및 영암 영공단지 조성, 목포시 신도시 및 항만 개발 등 각종 연안개발로 인해 많은 갯벌들이 파괴되었다(Cho and Park, 1998). 이러한 연안개발은 연안지역의 산업화와 도시화를 가속시켜 이차적으로 인근 육상으로부터 해양으로 유기물 및 중금속 등의 각종 오염물질들의 유입을 증가시켰으며, 이들 오염물질들은 영산강 하구역을 비롯한 남서해안 연안으로 확산되어 인접한 갯벌 퇴적물을 오염시키고 갯벌 생태계에 큰 위협을 주고 있다.

지금까지 남서해안의 갯벌 퇴적물의 지화학적 특성 및 오

염에 대한 연구가 함평만(Youn et al., 1999), 청계만(Choi et al., 2010), 영광-완도에 이르는 서남해 연안(Shin et al., 2002; Hwang et al., 2010) 등 여러 지역에서 꾸준히 이루어져 왔다. 하지만, 대부분의 연구는 육지와 인접한 연안갯벌에 집중되어 있고, 도서갯벌 퇴적물에 대한 지화학적 특성 및 금속원소의 오염에 대해서는 알려져 있는 것이 없다. 이는 도서갯벌이 육지와 멀리 떨어져 있어 육상의 어떤 지역보다도 현장 접근성이 떨어지고, 넓은 갯벌면적과 하루 반일주조석에 따른 조사일정의 어려움, 그리고 많은 노동력 등 퇴적물 조사시 발생하는 여러 가지 제약들 때문이다.

따라서, 이 연구에서는 육지로부터 멀리 떨어져 있는 연안 도서갯벌 내 퇴적물의 지화학적 특성 및 중금속의 오염도를 평가하고자 하였으며, 이를 위해 전남 서부 신안군 내 갯벌 중 다이아몬드 형태를 이루고 있는 6개의 도서(자은도, 암태도, 안좌도, 팔금도, 비금도, 도초도)와 그 주변의 작은 섬들을 연구지역으로 선정하여 퇴적물의 입도, 유기물 및 중금속 농도를 조사하였다.

재료 및 방법

연구지역

연구지역은 한반도 남서쪽의 북위 34° 35′-35° 00′, 동경 125° 50′-126° 15′ 사이에 있는 우리나라 서남단 다도해 섬 지역으로, 목포에서 서쪽으로 약 20 km 떨어져 있는 곳이다(Fig. 1). 북쪽으로는 입자도와 증도, 동쪽으로는 목포와 화원반도, 남쪽으로

는 하의도와 신의도, 서쪽으로는 흑산도 및 황해와 연결되어 있다. 연구지역 내 9개 섬의 총 면적은 252 km² 이고 해안은 모두 굴곡이 매우 심한 리아스식 해안으로 이루어져 해안선의 길이는 391 km에 달한다(http://www.shinan.go.kr). 섬 주변으로 약 100 km²의 넓은 조간대가 발달되어 있으며 갯벌지역의 수심은 3-5 m 정도이다.

섬 사이의 좁은 수로 및 해저지형의 차이에 의해 연구지역 내 해수의 유동은 공간적으로 큰 차이를 보이고 매우 복잡하다. 전반적으로 조류의 흐름에 영향을 받으며, 섬 사이의 좁은 수로 부근에서 매우 빠르고 섬 사이를 통과하면서 약화되는 불균일한 형태를 가진다. 조류의 방향은 대체로 창조시 북동방향, 낙조시 남서 혹은 남쪽방향의 흐름을 보이고, 조류의 유속은 보통 1.0-3.3 knots (=0.5-1.7 m/s)에서 최대 6.0 knots (=3.1 m/s)까지 큰 차이를 보인다(Jeon and Cho, 2002). 조석은 일조부등(diurnal inequality)이 심한 반일조조석(semidiurnal tide)이며, 평균조차는 약 300 cm (소조차: 약 210 cm, 대조차: 약 400 cm)로서 Davies (1964)의 분류기준에 의하면 중조차(mesotide)환경에 해당된다(Ryu et al., 2001; Shin et al., 2002).

연구해역 및 인근 육상 지질은 선캄브리아기의 화강편마암과 반상변정질 화강편마암으로 구성된 변성암 복합체(metamorphic complex)를 기반암으로 고생대 변성퇴적암류, 중생대 쥬라기 화강암류, 중생대 백악기 화산암류와 퇴적암류, 그리고 화강암류 등이 혼재해 있다(Ryu et al., 1999; Shin et al., 2002; Youn and Na, 2008).

조사항목 및 분석방법

전남 서부 도서갯벌 퇴적물의 지질특성 및 중금속 원소의 오염도를 평가하기 위하여 2008년 7월 만조시 소형어선(선외기)을 타고 신안군 내 9개의 섬 주변 갯벌의 총 72개 정점에서 채취기(Van Veen grab sampler)를 이용하여 퇴적물을 채취하였으며, 선박 접근이 어려운 일부 조간대 상부 정점들은 직접 걸어 들어가 시료를 채취하였다(Fig. 1). 채취한 퇴적물 시료는 표면 0-2 cm 내의 퇴적물만을 미리 산세척한 고밀도 폴리에틸렌병(high density polyethylene bottle)에 담아 냉장 및 냉동상태로 보관하여 실험실로 운반한 후 입도(grain size)와 강열감량(ignition loss, IL), 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS) 그리고 금속원소(Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, Hg, and As)를 Hwang et al. (2010)이 실시한 방법에 따라 분석하였으며, 간략하게 요약하면 다음과 같다.

먼저, 입도는 퇴적물 습시료 약 30 g을 500 mL 비이커에 담아 이온교환수로 염분을 제거한 다음 10% 과산화수소(H₂O₂)와 0.1 N 염산(HCl)을 넣고 유기물과 탄산염(CaCO₃)을 제거하였다. 이 퇴적물을 다시 이온교환수로 2-3회 세척하고 4 Ø (0.0625 mm) 표준체에 물체질(wet sieving)을 하여 조립질과 세립질 입자로 나누었다. 이후 조립질 입자는 110 °C에서 24시간 동안 건조하여 진탕기(Ro-tap sieve shaker, Fritsch Model-Anaiysette

3)로 약 20분간 건식체질(dry sieving)을 한 다음 1 Ø 간격으로 무게를 구하였으며, 세립질 입자는 1 L 메스실린더에 담아 균질하게 혼합하고 침전속도를 고려한 피펫팅법으로 시료무게를 구하였다. 이때, 입자의 응집현상을 방지하기 위해 확산제로서 2% 칼곤용액((NaPO₃)₆)을 사용하였다. 여기서 측정된 모든 자료는 그래픽 방법에 따라 처리하였고, 퇴적물의 특성을 나타내는 평균입도(mean grain size, Mz)는 Folk and Ward (1957)의 계산식에 의하여 구하였으며, 퇴적상의 분류는 Folk (1968)의 방법에 따랐다.

IL은 퇴적물 습시료 약 20 g을 비이커에 담아 건조기에 넣고 110°C에서 24시간 건조한 후 곱게 분쇄한 다음 도가니에 담아 전기로에 넣어 550°C에서 2시간 동안 회화시킨 후 도가니의 무게를 측정하여 회화 전후의 무게차이로 값을 구하였다. COD는 퇴적물 습시료 약 1-2 g을 삼각플라스크에 담고, 0.1 N 과망간산칼륨(KMnO₄)과 10% 수산화나트륨(NaOH)을 넣어 잘 혼합한 다음 1시간 동안 중탕하였다. 그 후 시료를 실온으로 방냉한 다음 10% 요오드화칼륨(KI)과 4% 아지드화나트륨(NaN₃)을 넣은 후 증류수를 가해 500 mL로 만들어 유리섬유여과지로 여과하였다. 이 후 여과한 용액 100 mL에 30% 황산(H₂SO₄)을 넣고 이를 0.1 N 티오황산나트륨(Na₂S₂O₃·5H₂O) 용액으로 적정하여 그 값을 구하였다. AVS는 퇴적물 습시료 약 2-3 g을 황화수소(H₂S) 발생관에 담은 후 뚜껑을 닫은 다음, 황산 2 mL를 넣어 이때 발생하는 황화수소를 검지관에 흡수시켜 그 값으로부터 구하였다.

중금속 원소는 퇴적물 습시료를 -80°C에서 동결건조한 후 플라스틱 재질의 채(Ø < 63 µm)로 채질하여 통과된 퇴적물을 사용하였다. 퇴적물로부터 금속원소를 추출하기 위해 약 1 g의 퇴적물 시료를 테프론 재질의 비이커에 넣고 혼합산(HNO₃:HF:HClO₄ = 2:2:1)을 이용하여 digestion하였으며, 이후 산을 완전히 휘발시킨 후 2% 질산(HNO₃)을 사용하여 100 mL로 정용하였다. 수은을 제외한 대부분의 원소들은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer Model-ELAN 6000)로 측정하였으며, 수은의 경우에는 자동수은분석기(Automatic Mercury analyzer, Milestone Model-AMA 254)로 측정하였다. 분석자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 표준물질(standard reference material)로는 PACS-2 (marine sediment)를 이용하였으며, 이때 금속원소의 회수율은 87-110% 범위였다. 이 모든 전처리 실험 및 분석은 천정면에 초고성능 필터(Hepa filter)가 설치된 청정실(clean room, Class 100)에서 행하였다.

중금속 원소의 오염평가

중금속 오염은 일반적으로 환경 내 매질 중 중금속의 농도가 자연상태에서 존재하는 농도에 비해 높아져 있는 상태를 말한다. 이러한 중금속 오염을 평가하는 방법은 환경 내 매질의 농도와 연구지역 혹은 지구상의 오염되지 않은 곳의 농도를 비교하는 지화학적 방법, 생물검정법(bioassay)을 이용하여 오염물질의 생물학적 이용도와 영향을 평가하는 독성학적 기법, 환경 내

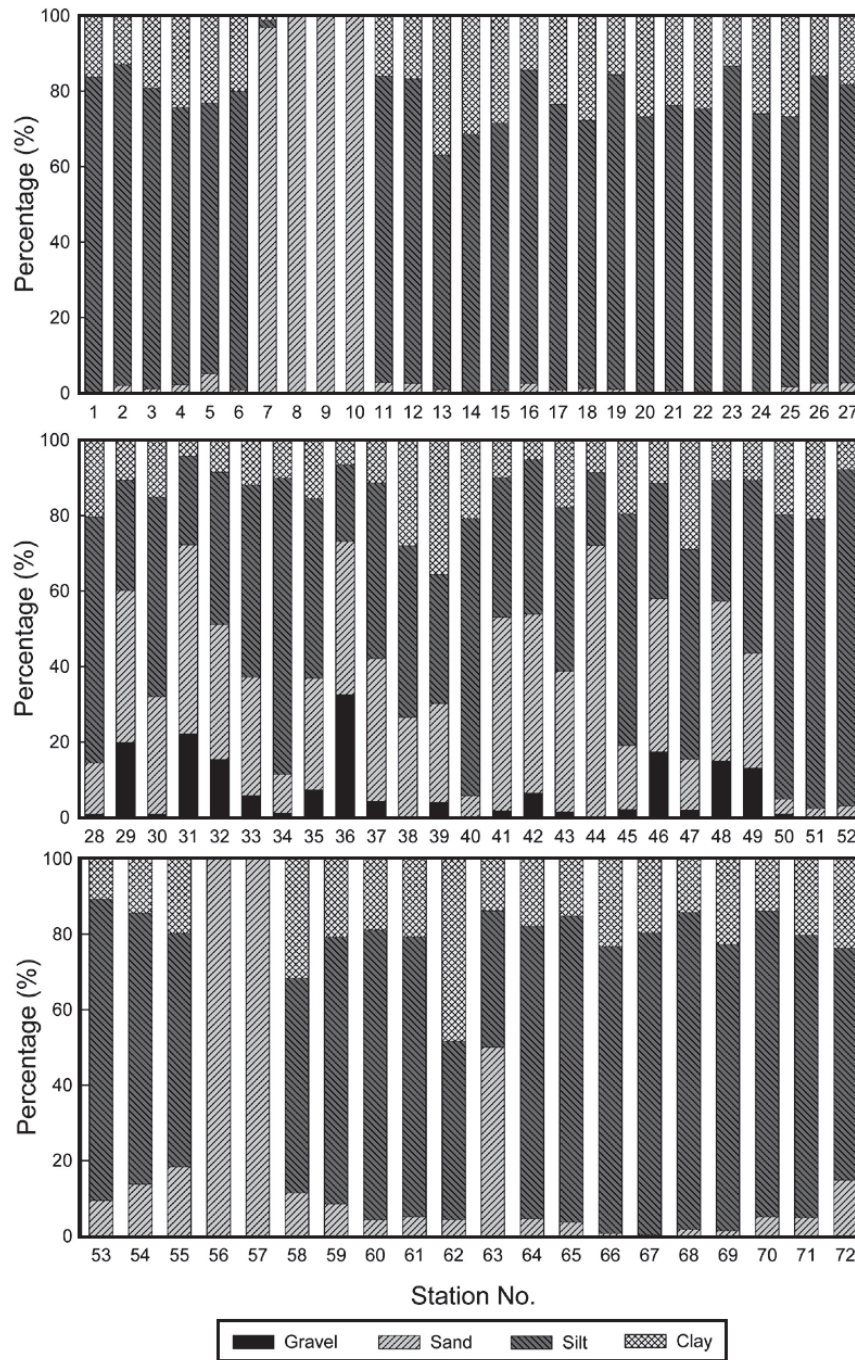


Fig. 2. The percentage compositions of gravel, sand, silt, and clay in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam Province.

다양한 생물군의 생활사에 대해 오염의 영향 및 물리적 환경변화를 지속적으로 감시하여 오염의 영향을 구명하는 생태학적 기법 등 다양하다(Lee and Lee, 2002). 이 연구에서는 최근에 국내외 여러 연구자들(Loska et al., 1997; Hwang et al., 2006, 2010; Chen et al., 2007; Hyun et al., 2007; Lee et al., 2008; Feng et al., 2011)에 의해 퇴적물 내 중금속의 오염평가에 널리 사용

되어 온 농축계수(enrichment factor, EF) 및 농집지수(geoaccumulation index, I_{geo}), 그리고 중금속의 오염기준(sediment quality guidelines; SQGs)과 같은 지화학적 방법을 이용하여 연구지역 내 갯벌 퇴적물의 오염도를 평가하였다

먼저, SQGs를 이용한 평가는 연구지역 내 퇴적물 중 중금속의 농도와 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmo-

spheric Administration, NOAA)에서 권고하고 있는 ERL (Effect Range Low) - ERM (Effect Range Median) 값(Buchman, 2008)을 비교함으로써 이루어졌다. EF와 I_{geo} 는 연구지역 내 퇴적물 중 금속원소의 농도와 Taylor (1964)와 Taylor and McLennan (1995)이 보고한 전세계 연안 대륙붕지역의 퇴적물 내 금속원소의 평균농도(Fe 3.5%, Mn 600 mg/kg, Zn 71 mg/kg, Cr 35 mg/kg, Pb 20 mg/kg, Cu 25 mg/kg, As 1.5 mg/kg, Cd 0.098 mg/kg, Hg 0.08 mg/kg)를 이용하여 다음의 방정식 1과 2로부터 각각 계산한 후, 그 값으로부터 중금속 오염도를 파악하였다.

$$\text{Enrichment Factor} = \frac{(Me/Fe)_{\text{Observed}}}{(Me/Fe)_{\text{Crust}}} \quad (1)$$

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

여기서, $(Me/Fe)_{\text{observed}}$ 는 연구지역 내 퇴적물 중 Fe에 대한 각 금속원소의 농도비를 말하고, $(Me/Fe)_{\text{crust}}$ 는 전세계 연안 대륙붕 지역의 퇴적물 중 Fe에 대한 각 금속원소의 농도비, C_n 은 연구지역 내 퇴적물 중 중금속 원소의 농도, B_n 은 금속원소의 바탕농도 (background or reference concentration)로서 전세계 연안 대륙붕 지역의 퇴적물 중 각 원소의 평균농도를 의미한다.

결과 및 고찰

표층 퇴적물의 입도 및 유기물 함량

연구지역을 포함한 우리나라 남서해안은 큰 조차와 강한 조류의 흐름, 다도해를 이루는 많은 섬, 굴곡이 심한 리아스식 해안, 영산강으로부터 유입되는 부유물질 등에 의해 퇴적환경의 변화가 심한 곳으로, 퇴적물의 입도는 이러한 수리역학적 퇴적 환경 특성을 반영하고 있다(Chester and Voutsinou, 1981; Ryu et al., 2001; Shin et al., 2002; Lee et al., 2004).

입도분석 결과, 퇴적물 중 자갈은 0-32.7% (평균 2.4 ± 6.1%), 모래는 0.2-100% (평균 21.3 ± 29.0%), 실트와 점토는 각각 0.0-89.1% (평균 59.0 ± 25.3%), 0.0-48.3% (평균 17.2 ± 9.3%) 범위였다. 특이하게 자갈은 팔금도와 안좌도 주변 정점에서만 나타났으며, 이들 지역을 제외한 대부분의 정점에서 실트 함량이 매우 높았다(Fig. 2). 각 정점별 자갈, 모래, 실트, 점토 함량을 기초로 Folk (1968)의 삼각좌표에 도시한 결과, 퇴적물은 실트(silt, Z), 사질실트(sandy silt, sZ), 사(sand, S), 약역질사(slightly gravelly sand), 실트질사(silty sand), 역니질사(gravelly muddy sand), 약역니질사(slightly gravelly muddy sand), 니(mud, M), 사질니(sandy mud, sM), 약역질니(slightly gravelly mud, (g)M), 역질니(gravelly mud, gM)의 총 11개 퇴적물 유형(sedimentary type)으로 구분되었다(Fig. 3). 퇴적물의 조직특성에 따라 크게 약역질니((g)M), 역니질사(gmS), 사(S), 실트(Z)인 4개의 퇴적상(sedimentary facies)으로 분류되었으며, 약역질니와 역니질사 퇴적상은 주로 팔금도와 안좌도 주변

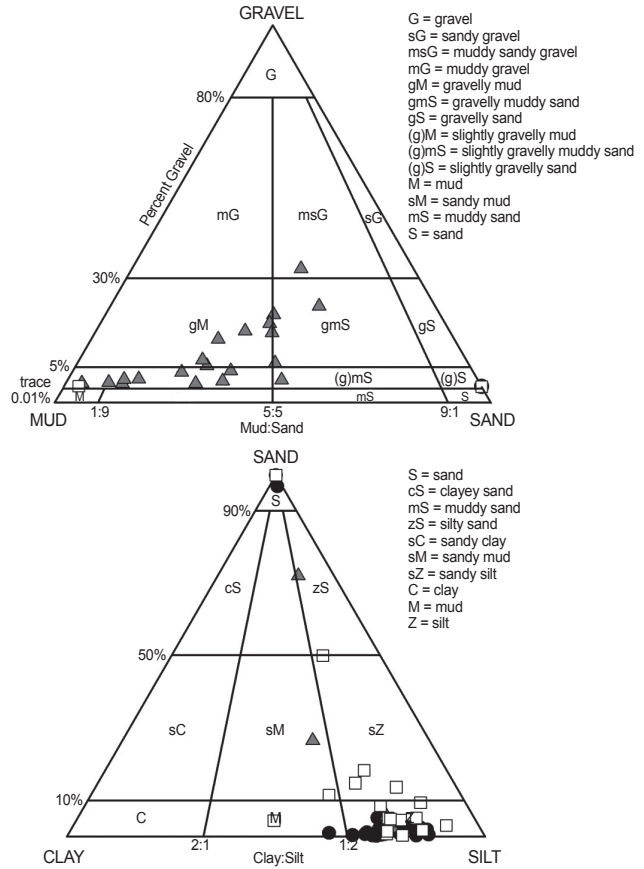


Fig. 3. The ternary diagrams showing the major sediment types of intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam Province. The filled circles and triangles represent the sediment samples collected from Jaemun and Amtae islands and Palgeum and Anjoa islands, respectively. The blank squares also represent the sediment samples collected from Bigeum and Docho islands.

에, 사 퇴적상은 자은도와 비금도 북서쪽에, 실트 퇴적상은 암태도와 도초도 주변, 그리고 자은도와 비금도의 남동쪽 혹은 동쪽에 분포하고 있었다(Fig. 4). 퇴적물의 통계학적 특성을 살펴보면, M_z 는 1.3-8.2 Ø (평균 5.3 ± 1.7 Ø) 범위로 사 퇴적상을 보인 자은도와 비금도 북서쪽과 팔금도와 안좌도 일부 정점을 제외하면, 대부분의 정점에서 극조립실트(very coarse silt, 5.0 Ø)와 중립실트(medium silt, 7.0 Ø) 사이였으며 전반적으로는 조립실트(coarse silt, 6.0 Ø)가 우세하였다(Fig. 5).

한편, 연구지역의 경우, 섬 주변의 갯벌과 얇은 조하대 지역을 중심으로 김, 미역을 비롯한 해조류와 굴, 고막과 같은 패류 양식이 활발하다. 이러한 양식생물의 부산물이 조하대나 다른 해역으로 빠져나가지 못하고 그대로 갯벌에 퇴적될 경우 퇴적물 내 유기물 함량은 증가하고 그 양이 지속적으로 유지된다면 퇴

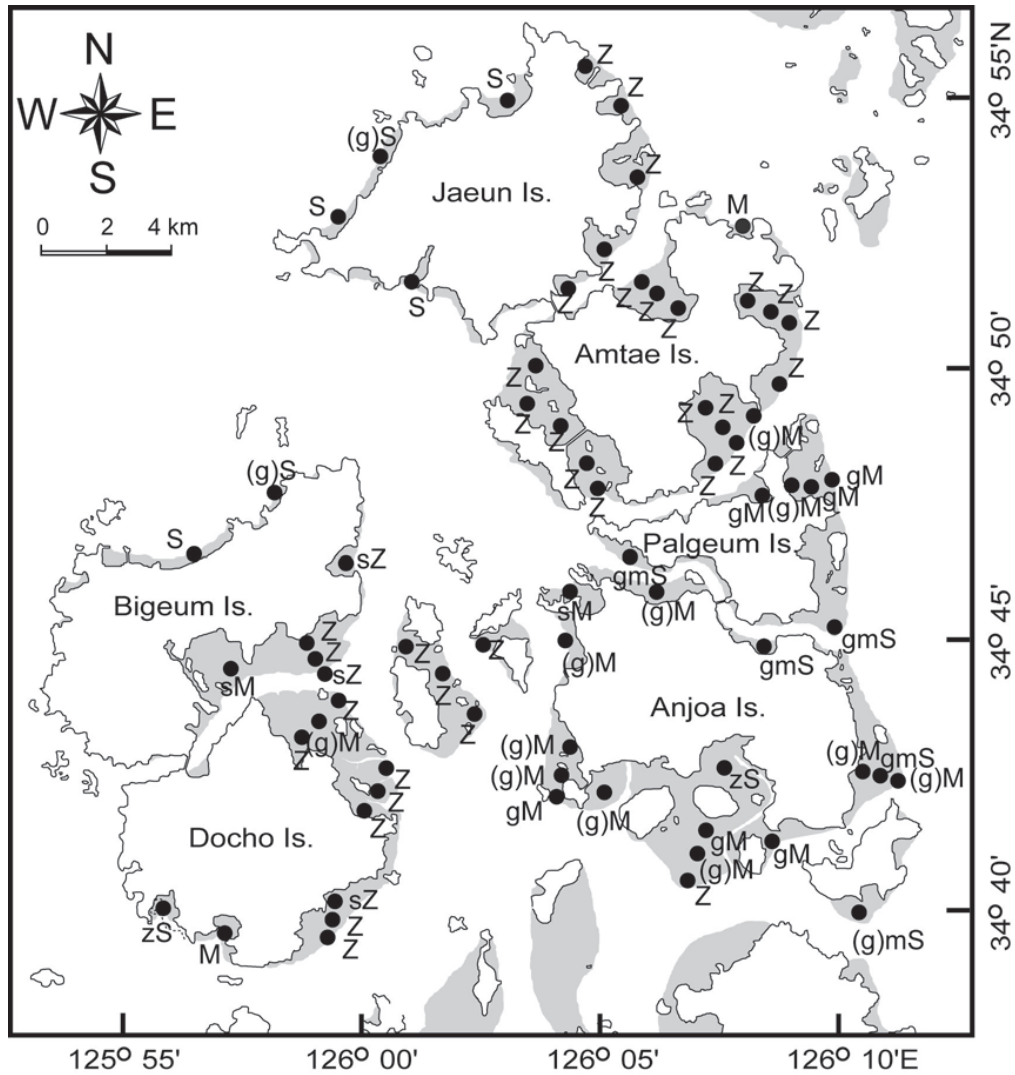


Fig. 4. The horizontal distribution of surface sediment in intertidal zone of coastal islands in the western part of Jeollanam Province (Abbreviations: Z, silt; sZ, sandy silt; M, mud; (g)M, slightly gravelly mud; gM, gravelly mud; sM, sandy mud; S, sand; zS, silty sand; gmS, gravelly muddy sand; (g)mS, slightly gravelly muddy sand; (g)S, slightly gravelly sand).

적물의 유기물 오염을 예상할 수 있다. 퇴적물 내 유기물 함량 및 특성을 나타내는 지표로는 IL, COD, AVS, 총유기탄소(Total organic carbon, TOC), 총유기질소(Total organic nitrogen, TON) 등이 있으며, 이 연구에서는 이들 중 IL, COD, 및 AVS 농도를 살펴보았다. 퇴적물 중 IL은 0.6-5.3% (평균 $3.2 \pm 1.0\%$) 범위로 전반적으로 사 퇴적상을 보인 자은도와 비금도 북서쪽과 팔금도와 안좌도 주변의 조립질 퇴적물이 분포하는 정점에서 낮고 세립질의 실트 퇴적상을 보인 암태도와 도초도 부근 정점에서 높았다(Fig. 5). 이는 연구지역 내 퇴적물의 유기물 함량이 입도와 밀접한 관련이 있음을 의미한다. 퇴적물 중 COD 농도는 각각 0.4-12.6 $\text{mgO}_2/\text{g-dry}$ (평균 $5.8 \pm 2.6 \text{ mgO}_2/\text{g-dry}$) 범위로 각 정점간에 다소 공간적 차이는 있으나 대체적으로 일본에

서 유기물 오염의 기준으로서 제시하는 퇴적물 중 COD 농도기준(20 $\text{mgO}_2/\text{g-dry}$) 보다 1/2 이하로 매우 낮았으며, AVS 농도는 ND-0.41 $\text{mgS}/\text{g-dry}$ (평균 $0.05 \pm 0.09 \text{ mgS}/\text{g-dry}$) 범위로 자은도 남동쪽, 안좌도 남쪽과 남동쪽, 도초도 남쪽의 일부 정점에서만 검출될 뿐 대부분의 지역에서 검출되지 않았다.

퇴적물의 중금속 함량 및 분포특성

연구지역 내 표층 퇴적물 중 중금속 원소를 측정된 결과, 철(Fe) 0.5-2.9% (평균 $2.2 \pm 0.5\%$), 망간(Mn) 117-778 mg/kg (평균 $416 \pm 100 \text{ mg}/\text{kg}$), 아연(Zn) 9-119 mg/kg (평균 $74 \pm 18 \text{ mg}/\text{kg}$), 크롬(Cr) 6-97 mg/kg (평균 $58 \pm 16 \text{ mg}/\text{kg}$), 납(Pb) 15.3-55.8 mg/kg (평균 $23.8 \pm 6.3 \text{ mg}/\text{kg}$), 구리(Cu) 0.8-19.5 mg/kg

Table 1. The mean grain size (Mz) and the average concentrations of metallic elements (Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, As, and Hg) in intertidal and sublittoral sediments in the western coast of Korea

Region	Sampling zone	Mz (φ)	Metals (%)		Metals (mg/kg)							Reference	
			Al	Fe	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn	As		Hg
Kyounggi Bay	Intertidal and Sublittoral	4.4	6.2	2.4	25	-	92	-	70	532	-	-	Lee et al. (1998)
Shihwa Lake (outer)	Sublittoral	7.2	6.9	3.2	55	29	122	0.5	81	494	-	-	Choi et al (1999)
Saemanguem (inner part)	Intertidal	-	7.1	2.7	21	26	85	-	47	610	-	-	Kim et al. (2003)
Julpo Bay	Intertidal	7.1	7.6	2.8	15	19	84	0.1	52	494	11.3	-	Kim et al. (2008)
Hampyeong Bay	Intertidal and Sublittoral	-	6.1	2.2	12	20	45	-	34	321	-	-	Youn et al. (1999)
Yeonggwang-Muan coast	Intertidal	5.5	5.2	2.3	10	25	70	0.05	51	448	5.6	0.01	Hwang et al. (2010)
Mokpo-Wando coast	Intertidal	3.2	6.3	2.6	22	33	66	-	51	600	-	-	Shin et al. (2002)
Youngsan River Estuary	Sublittoral	9.1	8.3	4.1	23	28	96	-	77	673	-	-	Cho and Park (1998)
Coastal Islands of Shinan	Intertidal	5.3	-	2.8	11	24	74	0.06	58	416	5.1	0.01	This study

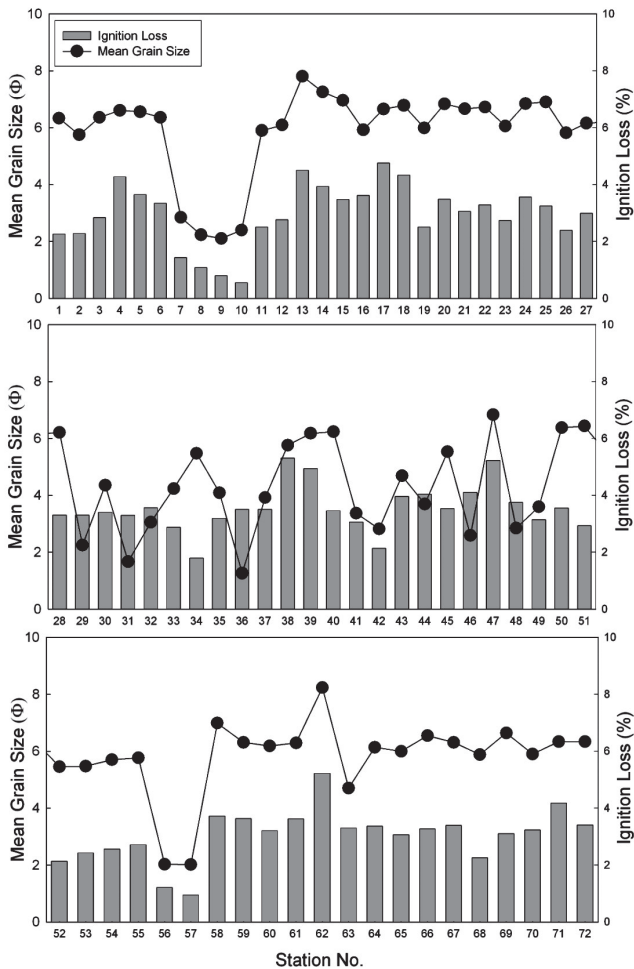


Fig. 5. The mean grain size and the content of ignition loss (IL) of intertidal surface sediments with each station from coastal islands in the western part of Jeollanam Province.

(평균 11.0 ± 3.1 mg/kg), 비소(As) 1.7-9.3 mg/kg (평균 5.1 ± 1.2 mg/kg), 카드뮴(Cd) 0.005-0.49 mg/kg (평균 0.055 ± 0.089 mg/kg), 수은(Hg) ND-0.028 mg/kg (평균 0.007 ± 0.004 mg/

kg) 범위로 공간적으로 큰 차이를 보였다. 대체적으로 조립질의 모래 퇴적물이 분포하고 있는 자은도와 비금도 북서쪽 정점들에서 낮고, 세립질의 실트 퇴적물로 이루어진 압태도와 도초도 부근에서 높았다(Fig. 6).

일반적으로 연안해역에서 퇴적물 중 금속원소의 농도는 입도, 유기물 함량, 초기속성작용(diagenesis), 생물교란(bioturbation), 인위적인 오염(anthropogenic pollution) 등 다양한 요인에 의해 크게 달라진다(Cho and Park, 1998; Cho et al., 2001, Hwang et al., 2006). 연구지역 또한 자은도, 압태도, 비금도, 도초도의 경우 퇴적물의 Mz와 IL, 그리고 Mz와 Pb, Cd, As를 제외한 대부분의 중금속 원소의 농도 사이에 좋은 정의 상관성이 나타났으며, 세립질 퇴적물에서 IL과 중금속 원소의 농도가 높았다(Fig. 7). 이는 이들 지역에서 표층 퇴적물 중 중금속 원소의 농도가 입도와 유기물의 영향을 받고 있음을 의미한다. 반면, 팔금도와 안좌도의 경우에는 퇴적물의 Mz와 IL 및 중금속 원소들의 농도 사이에 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다. 이는 퇴적물의 입도와 유기물 함량 외에 금속원소의 농도를 조절하는 다른 이차적인 요인들이 있으며, 연구지역 내 유기물 함량과 AVS 농도가 낮은 것으로 보아 퇴적물 내 초기 속성작용 보다는 연구지역 인근의 인위적인 오염원으로부터의 영향 때문인 것으로 생각된다. 한편, 연구지역 내 중금속 원소의 농도는 인접한 영광-무안 연안 갯벌에서 조사된 중금속 원소의 평균농도와는 비슷한 반면, 서해안 북부쪽의 경기만, 시화호 외측, 그리고 연구지역 동쪽의 영산강 하구역 갯벌 및 조하대 퇴적물에서 측정된 금속원소의 평균농도보다는 낮았다(Table 1).

퇴적물의 중금속 오염도 평가

앞서 본문 2.3에서 설명하였듯이, EF, I_{geo} , 그리고 SQGs을 이용하여 연구지역 내 갯벌 퇴적물의 중금속 오염도를 평가하였다. 여기서 SQGs의 경우 현재 우리나라의 연안환경 내 퇴적물 오염에 대한 기준이 없어 미국 NOAA에서 권고하는 퇴적물 오염을 평가하는 두가지 기준값(ERL과 ERM)을 적용하였다. 이 기법은 Long et al. (1995)에 의해 제시된 방법으로 미국NOAA에서는 지각물질 내 주요 원소인 Al과 Fe를 제외한 총 9개의 원

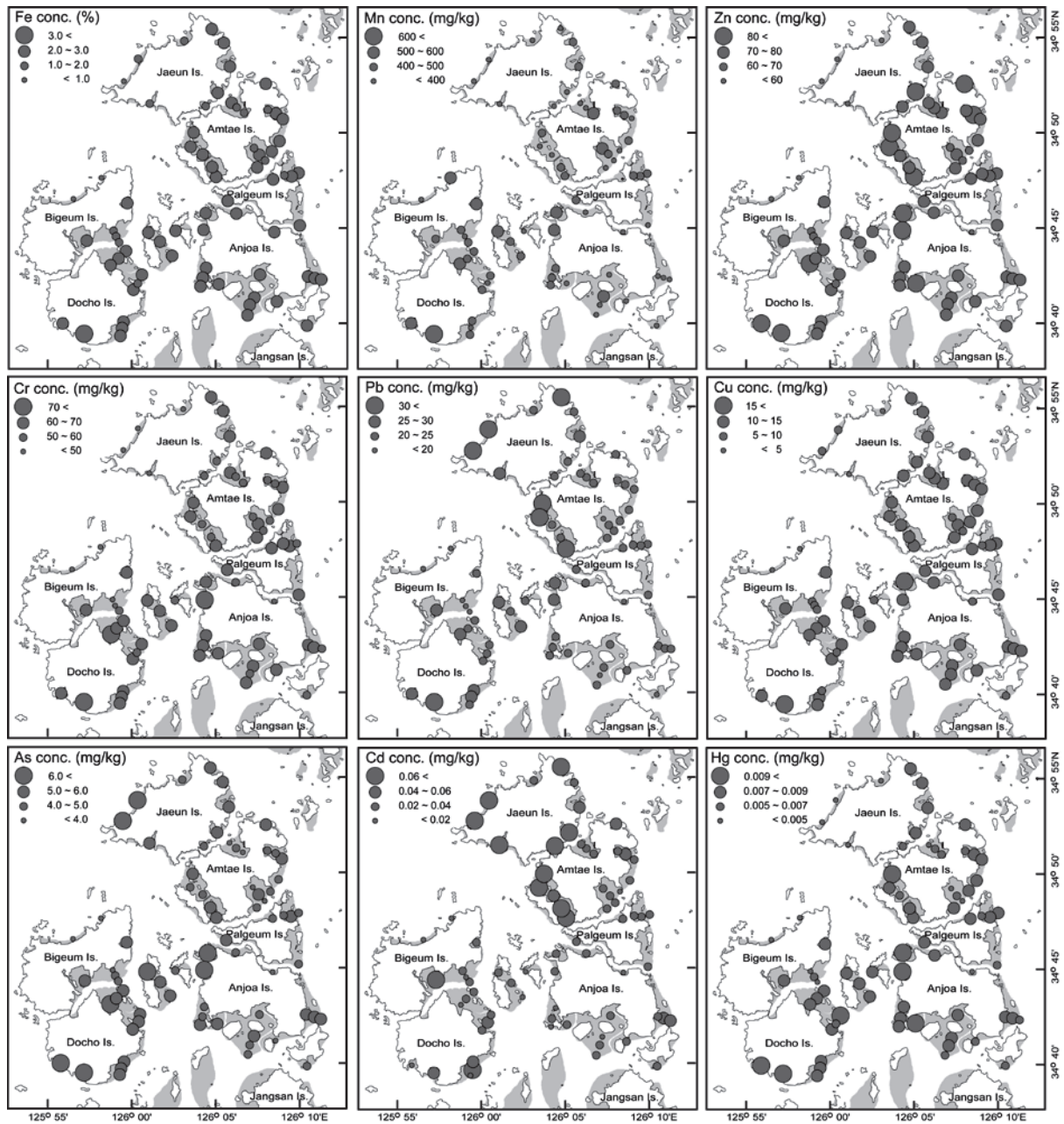


Fig. 6. The horizontal distributions of each metallic element (Fe, Mn, Zn, Cr, Pb, Cu, As, Cd, and Hg) in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam Province.

소(Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, Ni, Hg, and Ag)에 대하여 그 기준값을 설정해 놓고 있으며, 각 원소별 ERL과 ERM 값은 Cu 34 mg/kg과 270 mg/kg, Pb 46.7 mg/kg과 218 mg/kg, Zn 150 mg/kg과 410 mg/kg, Cd 1.2 mg/kg과 9.6 mg/kg, Cr 81 mg/kg과 370 mg/kg, As 8.2 mg/kg과 70 mg/kg, Ni 20.9 mg/kg과 51.6 mg/kg, Hg 0.15 mg/kg과 0.71 mg/kg, Ag 1.0 mg/kg과 3.7 mg/kg 이다(Buchman, 2008). 이를 연구지역 내 표층 퇴적물 중 중금속 원소의 농도와 비교해 보면, 모든 중금속 원소들은 거의 모든

정점의 퇴적물에서 ERL 기준보다 낮았다(Fig. 8). 그러나, Cr과 As의 경우 다른 중금속 원소들과 달리 대부분의 정점에서 ERL 값과 비슷한 농도를 보였다.

연구지역 내 퇴적물의 중금속 오염을 평가하기 위하여 계산한 EF값을 Table 2에 정리하여 나타내었다. EF는 Bruland et al. (1974)에 의해 처음 제시되었던 방법으로 점토광물의 구성비율과 미량금속의 상대적인 함량변화를 이용하여 금속원소의 농축 정도를 평가하는 방법이다(Choi et al., 2010). 일반적으로 EF

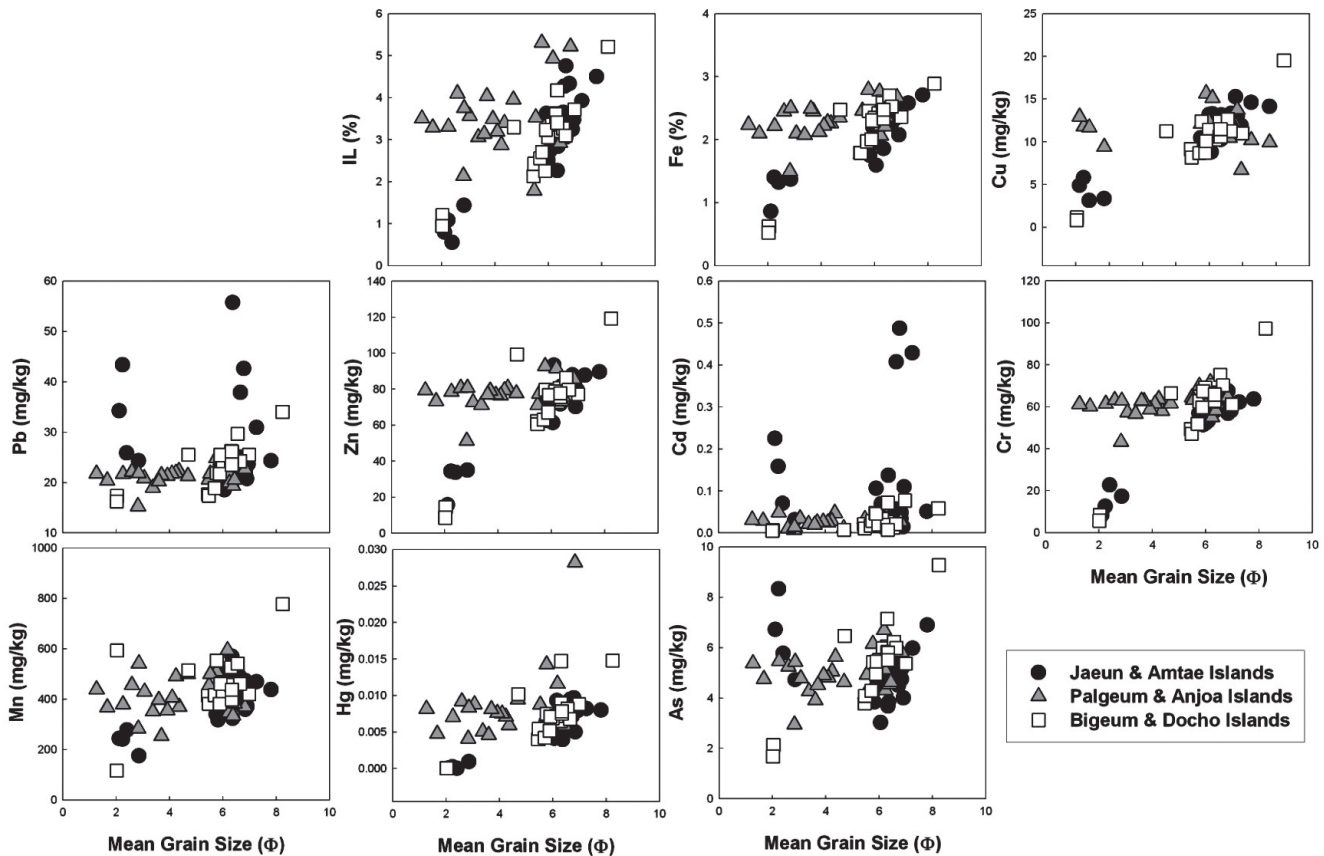


Fig. 7. Plots of mean grain size (M_z) versus ignition loss (IL) and heavy metals (Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, Hg, and As) in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam Province.

Table 2. Ratios of metallic elements relative to Fe in intertidal surface sediments from the coastal Islands in the western part of Jeollanam Province and in earth crust reported by Taylor (1964) and Taylor and McLennan (1995)

	Metals/Fe × 1000						Metals/Fe × 10000	
	Mn/Fe	Zn/Fe	Pb/Fe	Cu/Fe	Cr/Fe	As/Fe	Cd/Fe	Hg/Fe
Coastal Islands	20.0	3.34	1.18	0.49	2.60	0.24	0.027	0.003
Earth's crust	17.1	2.03	0.57	0.71	1.00	0.04	0.028	0.023
Enrichment factor	1.17	1.64	2.06	0.69	2.60	5.69	0.96	0.14

값이 0.5와 1.5 사이일 경우 오염되지 않은 자연적인 농도임을 의미하고 1.5보다 클 경우에는 대기나 하천 등을 통한 금속원소들의 순유입에 의해 오염되었음을 의미한다(Zhang and Liu, 2002; Hwang et al., 2006; Hyun et al., 2007). 최근에 Chen et al. (2007)은 EF 값을 좀더 세분화하여 오염을 평가하였으며, EF 값을 기준으로 EF < 1 는 오염이 되지 않은 상태(no enrichment), EF=1-3 는 약간 오염상태(minor enrichment), EF=3-5 는 적당한 오염상태(moderate enrichment), EF=5-10 는 적당히 심한 오염상태(moderately severe enrichment), EF=10-25 는 심한 오염상태(severe enrichment), EF=25-50 는 매우 심한 오염상태(very severe enrichment), EF > 50 는 극히 심한 오염 상태(extremely severe enrichment)로 구분하였다. 이 기준을 적용하

여 연구지역 내 중금속 원소의 오염도를 살펴보면, Cu, Cd, Hg 은 EF값이 1 보다 낮아 오염되어 있지 않은 자연적인 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났고, Mn, Zn, Pb, Cr 은 EF값이 1-3 사이로 약간 오염된 상태(minor enrichment)를, As는 EF값이 5-10 사이로 적당히 심한 오염상태(moderately severe enrichment)인 것으로 나타났다.

연구지역 내 중금속 원소의 오염을 평가하기 위한 또 다른 방법인 I_{geo} 계산결과를 Table 3에 정리하여 제시하였다. 이 방법은 Müller (1979)에 의해 처음 제시되었던 방법으로 그 값에 따라 총 7개 등급으로 구분된다(Jeon and Cho, 2002; Hyun et al., 2003; Hwang et al., 2006, 2010). 각 원소별 I_{geo} 값을 이용한 연구지역 내 퇴적물의 중금속 오염도를 살펴보면, 퇴적물 중 Fe,

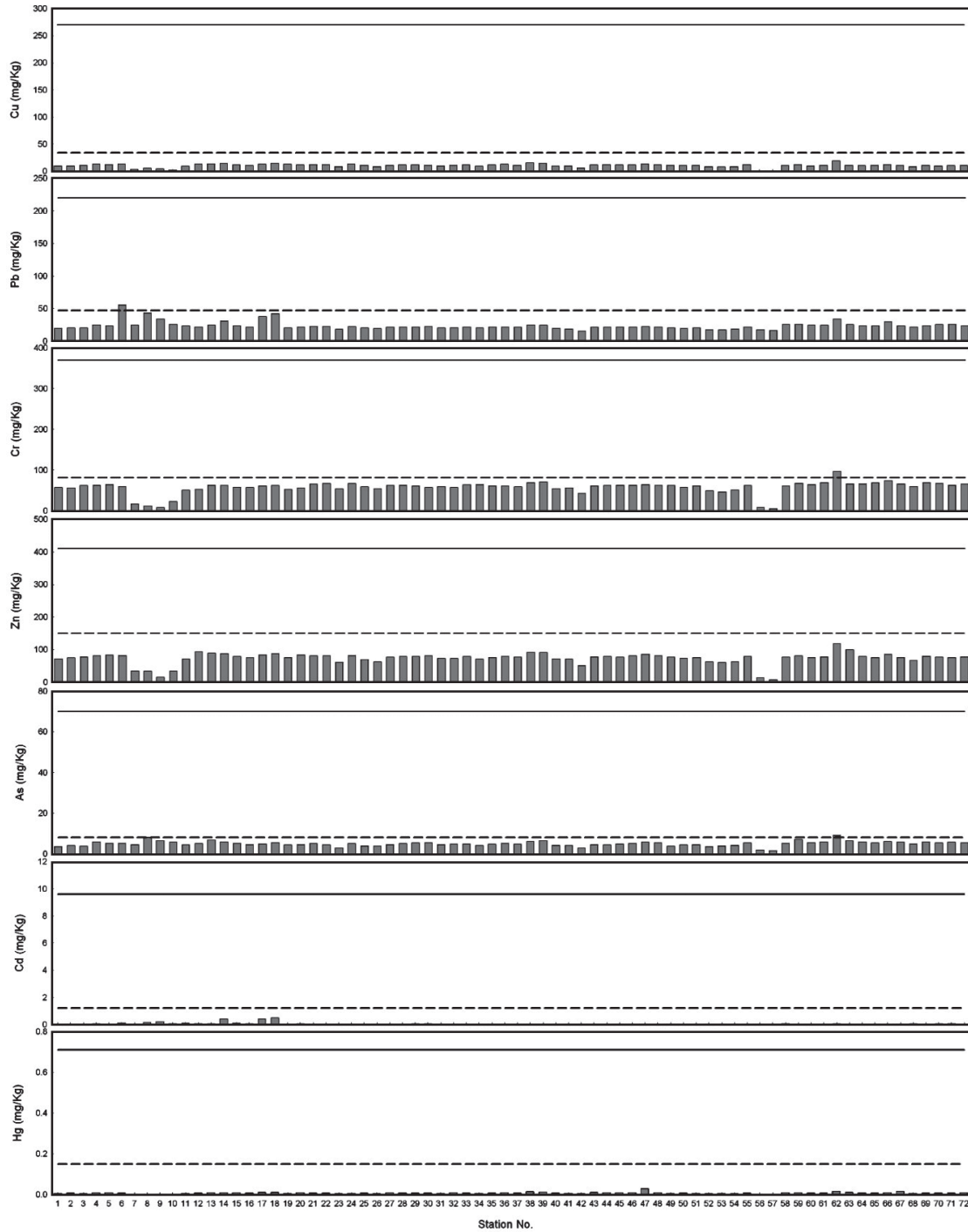


Fig. 8. The concentrations of heavy metals (Cu, Pb, Cr, Zn, As, Cd, and Hg) with each station in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam Province. The dotted and solid lines represent the values of effect range low and median proposed by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) as the sediment quality guidelines in the United States, respectively.

Mn, Cu, Hg은 모든 정점에서, 그리고 Pb, Zn, Cd은 거의 대부분의 정점에서 I_{geo} class가 0를 보여 오염되지 않은 수준(practically unpolluted)인 것으로 나타났고, Cr 경우에는 대부분의 정

점에서 I_{geo} class가 1로써 오염되지 않은 수준과 약간 오염된 수준의 중간단계인 것으로 나타났다. 그러나, As의 경우에는 대부분의 정점에서 I_{geo} class가 2를 보여 약간 오염된 수준(moder-

Table 3. Classification of geoaccumulation index and the number of Igeo-class for the concentrations of metallic elements in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam Province

Igeo	Igeo Class	Designation of sediment quality	Igeo									
			Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg	
> 5	6	Very strongly polluted	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
3-4	4	Strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	3	Moderately/strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1-2	2	Moderately polluted	0	0	0	0	0	3	0	52	0	0
0-1	1	Practically unpolluted/moderately polluted	0	0	0	7	1	2	60	18	0	0
0	0	Practically unpolluted	72	72	72	65	71	67	12	1	72	0

ately polluted)인 것으로 나타났다.

이상의 세가지 지화학적 방법을 이용한 연구지역 내 퇴적물의 중금속 원소에 대한 오염도 평가 결과를 종합해 보면, 퇴적물 내 Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cd, Hg은 오염되지 않은 것으로 나타났으나, Cr은 약간 오염된 수준 그리고 As는 다른 금속에 비해 상대적으로 적당히 오염된 것으로 나타났다. 일반적으로 As는 지각물질에 풍부한 원소 중 하나로 암석의 풍화, 화산활동 등에 의해 자연적으로 공급되는 것으로 알려져 있으나, 최근에는 산업화 및 인간활동에 의한 화석연료의 연소, 살충제 및 제초제의 사용 등을 통해 인위적으로 공급되기도 한다(Hwang et al., 2003). 연구지역을 포함한 우리나라 서남부 지역의 경우, 과거 화산활동이 활발하였음을 보여주듯 광범위하게 백악기 화산암이 분포하고 있고(Shin et al., 2002), 이러한 지역은 광물 중 비소함량이 높아 지표수가 지하로 유입에 될 경우 산화과정에서 광물로부터 비소가 용출되어 지하수 중에 As 농도가 높다(An et al., 2007; Youn and Na, 2008). 또한, 연구지역은 해양성 기후로서 월평균 80 mm 이상의 많은 강우를 보이고, 섬 내 대부분의 농민들이 농사를 짓는 과정에서 아직 살충제 및 제초제 등과 같은 농약을 사용하고 있기 때문에 강우에 의해 지표수가 섬 내 지하로 스며들 경우 지하수 중 As오염을 일으킬 가능성이 높다. 특히, 최근의 연구결과에 의하면 우리나라 주변의 해안가에서 상당한 양의 지하수가 투수성의 퇴적물을 통해 해양으로 유입되고 있으며, 이들 해저 지하수는 육상의 오염된 영양염류나 용존 화학성분들을 해양으로 공급하는 중요한 공급원인 것을 밝혀졌다(Kim et al., 2005). 따라서, 연구지역 내 갯벌 퇴적물 중 높은 As 농도는 자연적인 혹은 인위적인 요인에 의해 As 오염이 된 지하수가 해안가를 통해 해저지하수의 형태로 연안으로 유입되었기 때문인 것으로 생각된다.

한편, As와 그 화합물들은 독성을 지니고 있고, 인체에 유입될 경우 암을 유발하는 발암물질로 분류되고 있다. 연구지역 내 갯벌 퇴적물의 높은 As 농도는 갯벌 퇴적물에서 서식하는 낙지, 농게, 고막, 바지락 등 수산생물의 체내에 축적되고 최종적으로는 이러한 수산생물을 섭취하는 인간에게도 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서, 앞으로 전남 서부 도서갯벌 퇴적물 중 높은 As농도에 대한 보다 명확한 원인 구명과 이러한 높은 As농도가 패류, 연체

류, 갑각류 등의 저서생물에게 어떠한 영향을 주는지 그리고 인간 건강에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 종합적인 연구가 필요하다.

사 사

이 연구의 현장조사 및 시료채취에 도움을 준(주)지오시스템 리서치 김영길 연구원 및 국립수산과학원 갯벌연구소 연구원들에게 감사사를 드립니다. 이 논문은 국립수산과학원 수산시험연구사업(RP-2011-ME-24)의 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

- An JS, Ko KS and Chon CM. 2007. Arsenic occurrence in groundwater of Korea. *J Kor Soc Soil Ground Environ* 12, 64-72.
- Burland KW, Bertine K, Koide M and Goldberg ED. 1974. History of metal pollution in southern California coastal zone. *Environ Sci Technol* 8, 425-432.
- Buchman MF. 2008. NOAA screening quick reference tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA, Office of response and restoration division, National Oceanic and Atmospheric Administration, 34.
- Chang JH. 2008. Criteria and evaluation of local tidal flats for designation conservation sites in the southwestern coast of Korea. *J Environ Sci* 17, 1391-1402.
- Chen CW, Kao CM, Chen CF and Dong CD. 2007. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere* 66, 1431-1440.
- Chester R and Voutsinou FG. 1981. The initial assessment of trace metal pollution in coastal sediment. *Mar Pollut Bull* 12, 84-91.
- Cho YG, Ryu SO, Khu YK and Kim JY. 2001. Geochemical composition of surface sediments from the Saemangeum tidal flat, west coast of Korea. *J Kor Soc Oceanogr* 6, 27-34.

- Choi SW, Oh KH, Youn ST, Kim HG and Koh YK. 2010. Sedimentary environments and geochemistry characteristics of tidal flat sediments in semi-enclosed Cheonggye Bay, Korea. *J Kor Island* 22, 175-187.
- Davies JS. 1964. A morphogenic approach toward sholines. *Z Geomorph* 8, 127-142.
- Feng H, Jiang H, Gao W, Weinstein MP, Zhang Q, Zhang W, Yu L, Yuan D and Tao J. 2011. Metal contamination in sediments of the western Bohai Bay and adjacent estuaries, China. *J Environ Manage* 92, 1185-1197.
- Folk RL. 1968. Petrology of sedimentary rock, Hemphill Publishing Co., Austin TX, U.S.A., 170.
- Folk RL and Ward WC. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *J Sed Petrol* 27, 3-26.
- Hwang DW, Jin HG, Kim SS, Kim JD, Park JS and Kim SG. 2006. Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan Harbor, Korea. *J Kor Fish Soc* 39, 106-117.
- Hwang DW, Han J and Yang HS. 2003. The distribution characteristics of Sb and As in the surface sediment from the Yellow Sea and the coastal areas of Korea. *J Environ Sci* 12, 1121-1129.
- Hwang DW, Ryu SO, Kim SG, Choi OI, Kim SS and Koh BS. 2010. Geochemical characteristics of intertidal surface sediments along the southwestern coast of Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 146-158.
- Hyun S, Lee T, Choi JS, Choi DL and Woo HJ. 2003. Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea. *J Kor Soc Oceanogr* 8, 380-391.
- Hyun S, Lee CH, Lee T, Choi JW. 2007. Anthropogenic contributions to heavy metal distributions in the surface sediments of Masan Bay, Korea. *Mar Pollut Bull* 54, 1031-1071.
- Jeon SG and Cho YG. 2002. Some heavy metal concentration of surface sediments from the southwestern coast of Korea. *J Environ Sci* 11, 1299-1305.
- Jung RH, Hwang DW, Kim YG, Koh BS, Song JH and Choi HG. 2010. Temporal variations in the sedimentation rate and benthic environment of intertidal surface sediments around Byeonsan Peninsula, Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 723-734.
- Kim G, Hwang DW, Ryu JW and Lee YW. 2005. Environmental and ecological consequences of submarine groundwater discharge in the coastal areas of Korea peninsula. *J Kor Soc Oceanogr* 10, 204-212.
- Kim JG, You SJ and Ahn WS. 2008. Evaluation of characteristics of particle composition and pollution of heavy metals for tidal flat sediments in the Julpo Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Safety* 14, 247-256.
- Lee HY. 2002. Comparison of the effects of physic-chemical factors on the zonation and vertical distribution of benthic microalgal communities in the tidal flats of south-west Korea. *J Environ Sci* 11, 529-535.
- Lee BG and Lee JS. 2002. The foreign and domestic trends on the evaluation and regulation of heavy metals in the coastal oceans. In: Proceedings of the Autumn meeting, 2002 of the Korean Society of Oceanography. Oh IS and Park GR, eds. Han Yang University, Seoul, Korea, 141-176.
- Lee MK, Bae W, Chung J, Jung HS and Shim H. 2008. Seasonal and spatial characteristics of seawater and sediment at Youngil Bay, southeast coast of Korea. *Mar Pollut Bull* 57, 325-334.
- Lee MK, Bae W, Um IK and Jung HS. 2004. Characteristics of heavy metal distribution in sediments of Youngil Bay, Korea. *J Kor Soc Environ Eng* 26, 543-551.
- Loska K, Cebula J, Pelczar J, Wiechula D and Kwapulinski J. 1997. Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Bybnik water reservoir in Poland. *Water Air Soil Pollut* 93, 347-365.
- Müller G. 1979. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins – Verderyngen Seit. *Umschau* 24, 778-783.
- Park CH and Lee SH. 2004. Environmental considerations on the function and value of tidal wetland. *J Kor Soc Environ Impact Assess* 13, 87-101.
- Ryu SO, Chang JH, Lee HJ, Jo YJ and Choi OI. 2009. Spatial and temporal variation of surface sediments by tidal environment changes: Muan Bay, west coast of Korea. *J Kor Soc Oceanogr* 14, 10-21.
- Ryu SO, Kim JY and Chang JH. 2001. Distribution of surface sediments and sedimentation rates on the tidal flat of Muan Bay, southwestern coast, Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 22, 30-39.
- Ryu SO, You HS, Kim JY, Lee IG and Kim MJ. 1999. Distribution of the surface sediments and transport pattern of suspended matters during winter season in Tando Bay, the southwestern coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 20, 486-496.
- Shin SE, Kang SB, Koh YK, Park BY, Youn ST, Kim JY and Oh KH. 2002. Sedimentary facies and geochemical characteristics of upper intertidal zone, southwestern coast, Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 23, 722-735.
- Taylor SR. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. *Geochem Cosmochim Acta* 28, 1273-1285.
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophys* 33, 241-265.
- Woo HJ and Je JG. 2002. Changes of sedimentary environ-

- ments in the southern tidal flat of Kanghwa Island. *Ocean Polar Res* 24, 331-343.
- Yang WH. 2006. Understanding of the Korean adjacent seas: 4. Tidal flat and sedimentation of the Yellow Sea. *J Sci Edu* 31, 1-8.
- Youn ST, Koh YK and Ryu SO. 1999. Distribution characteristics of surface sediments and metal elements in Hampyong Bay, the southwestern coast of Korea. *J Kor Environ Sci Soc* 8, 677-684.
- Youn ST and Na BS. 2008. Soil environmental assessment by the risk and artificial enrichment of Hampyeong district soils. *J Kor Soc Environ Impact Assess* 6, 321-333.
- Zhang J and Liu CL. 2002. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuar Coast Shelf Sci* 54, 1051-1070.
-

2011년 8월 16일 접수

2011년 10월 11일 수정

2011년 12월 9일 수리