

한국 서해남부 조간대 표층 퇴적물의 지화학적 특성

황동운*·류상옥¹·김성길²·최옥인³·김성수⁴·고병설

국립수산과학원 갯벌연구소, ¹목포대학교 갯벌연구소,

²국립수산과학원 어장환경과, ³서해수산연구소, ⁴남동해수산연구소

Geochemical Characteristics of Intertidal Surface Sediments along the Southwestern Coast of Korea

Dong-Woon Hwang*, Sang-Ok Ryu¹, Seong-Gil Kim²,
Ok In Choi³, Seong-Soo Kim⁴ and Byoung-Seol Koh

Tidal Flat Research Institute, NFRDI, Gunsan 573-882, Korea

¹Institute of Tidal-Flat Research, Mokpo National University, Muan 534-729, Korea

²Marine Environmental Research Division, NFRDI, Busan 619-902, Korea

³West Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Incheon 400-420, Korea

⁴Southeast Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Tongyeong 650-743, Korea

In order to evaluate the characteristics of sediments and pollution by organic matter and metallic elements in intertidal sediments along the southwestern coast of Korea, we measured various geochemical parameters, including the mean grain size (Mz), water content (WC), ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), acid volatile sulfide (AVS), and metallic elements (Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, Hg, As), in intertidal surface sediments. The Mz of the surface sediments ranged from 2.1 to 8.3 ϕ , indicating that the surface sediments consist of various sedimentary facies, such as sand, slightly gravelly mud, sandy mud, and silt. The IL and COD in surface sediment ranged from 0.8 to 5.5% (mean 2.9 \pm 1.2%) and from 3.9 to 13.8 mgO₂/g-dry (mean 8.5 \pm 2.6 mgO₂/g-dry), respectively, which were lower than the values for surface sediment in areas near fish and shellfish farms or industrial complexes. No AVS was detected at any sampling station, despite various sedimentary facies. Most of metallic elements in surface sediments showed relatively good positive correlations with Mz and IL, which imply that the concentrations of metallic elements are mainly controlled by grain size and the organic matter content. The concentrations of metallic elements, except As, at some stations were considerably lower than those in the Sediment Quality Guideline (Effect Range Low, ERL) proposed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in the United States. Similarly, the geoaccumulation index (Igeo) class indicated that pollution by metallic elements in intertidal surface sediment, except As, was moderate or non-existent. Our results imply that the intertidal surface sediments along the southwestern coast of Korea are not polluted by organic matter and metallic elements and are healthy for benthic organisms.

Key words: Intertidal zone, Sediment, Organic matter, Metallic element, Geoaccumulation index (Igeo)

서 론

우리나라에서 흔히 ‘갯벌’로 불리는 조간대 (intertidal zone)는 조석에 따른 주기적인 해수면의 상승과 하강에 의해 노출과 침수를 반복하는 육지와 바다사이에 위치하는 전이지대로서 강우, 바람 등의 기상요소들과 조석, 파도 등과 같은 해양요소들의 영향을 직간접적으로 받아 퇴적물의 생지화학적 특성들이 시공간적으로 급격하게 변하는 곳이다. 우리나라의 서해안과 남해안은 마지막 최대빙하기 (Last Glacial Maximum) 이후 홀로세 해침 (Holocene transgression)에 의해 하구, 만, 해변, 사구 등 다양한 연안환경이 형성된 리아스식 해안으로, 하구와 만과 같은 반폐쇄적인 환경을 중심으로 조

간대가 발달하였다 (Ryu et al., 1997, 1998; Ryu, 2003; MLTM, 2008). 특히 서해안은 해수면이 상승함에 따라 평균조차가 4 m 이상인 조석이 우세한 대조차 환경으로 바뀌면서 남해안과 달리 해안선을 따라 완만한 경사를 가진 평균 5 m 이상의 두터운 조간대 퇴적층이 만들어졌다 (Lee et al., 1997; Lee and Yoon, 1997; Park et al., 1997; Oh and Kum, 2001). 이들 조간대는 계절적으로 발생하는 태풍, 폭풍 등과 같은 강한 외부압력요인으로부터 육지를 보호해 주는 자연재해 조절기능을 가지고 있으며, 지표수나 연안 지하수를 통해 육상으로부터 연안으로 유입되는 영양염류를 비롯한 각종 오염물질의 정화기능, 다양한 수산생물 및 바다새의 서식 및 생산기능 등 연안생태계에서 아주 중요한 역할을 담당하고 있다 (Kim and You, 2001; Woo and Je, 2002; Bark and Lee, 2004; Shin

*Corresponding author: dwhwang@nfrdi.go.kr

and Kim, 2007; Kim et al., 2008).

과거 해양수산부 (현 국토해양부) 출범과 더불어 갯벌보전에 대한 관리정책을 마련하기 위해 2003년 조사된 우리나라의 조간대 면적은 전 국토면적의 2%에 해당하는 약 2550 km²이며, 이중 서해안이 약 80%를 차지하고, 특히 전라남도에도 40% 이상이 집중되어 있는 것으로 보고되었다 (MOMAF, 2003). 그러나, 최근 시화호 및 새만금 방조제의 건설과 같이 경제성장에 따른 무분별한 연안개발정책에 의한 간척과 매립 등으로 우리나라의 조간대는 점차 사라져 1987년 이후 전체 면적의 20% 이상이 감소하였다 (Kim et al., 2008; Ryu et al., 2009). 이러한 간척과 매립 외에 2007년에 일어난 Hebei-spirit 원유유출 사고와 같이 연안에서의 갑자기 발생하는 사고에 의한 기름유출이나 임해공업단지의 조성으로 인한 산업화와 도시화와 함께 육상으로부터 산업폐수와 생활하수 등을 통한 유기화합물과 중금속들을 비롯한 오염물질의 지속적인 유입으로 저서환경이 악화되거나 갯벌생태계가 파괴되면서 조간대는 점차 그 고유의 기능들을 상실해가고 있다.

조간대를 구성하는 가장 기본적인 요소는 퇴적물이며, 퇴적물의 입도 및 퇴적물에 포함되어 있는 유기물 함량, 황화수소와 금속원소의 농도 등은 퇴적물내에 서식하는 생물의 분포 및 성장에 영향을 미치기 때문에 그 지역의 저서환경 특성을 반영한다 (Hyun et al., 2003b; MLTM, 2008). 지금까지 우리나라 연안해역에서 저서환경을 평가하기 위하여 퇴적물의 퇴적학적 특성 및 퇴적물중 유기물과 금속원소의 분포특성에 대해서는 많은 연구가 이루어져 왔으나 조간대 지역에 대한 연구는 현장접근과 시료채취의 어려움, 많은 노동력, 조사시간의 제한, 높은 분석비용 등 여러 가지 요인들에 의해 조사가 제대로 이루어지지 않았다. 특히, 기존에 시화호 (Choi et al., 1999; Hyun et al., 2004a; Hong et al., 2005), 광양만 (Kwak et al., 2001), 새만금 (Kim and You, 2001; Kim et al., 2003) 등 우리나라 서해안과 남해안의 일부 조간대 지역에 대한 조사가 이루어져 있으나, 이들 연구지역은 연안개발을 목적으로 방조제가 건설되어 현재 매립이 진행중이다. 또한, 주변에 양식어장 및 산업단지가 위치하여 인위적인 오염원의 영향으로 퇴적물이 오염된 것으로 평가받고 있어 우리나라 연안 조간대 퇴적물중 유기물 및 금속원소의 농도분포 특성을 파악하는데 어려움이 있다.

따라서, 이 연구의 목적은 우리나라의 조간대 표층 퇴적물의 퇴적학적 특성과 유기물 및 금속원소의 농도분포 및 오염도를 파악하는데 있으며, 이를 위해 비교적 육상으로부터 인위적인 오염의 영향이 적고 넓은 조간대가 발달되어 있는 서해남부지역의 영광에서부터 탄도만 사이를 연구지역으로 선정하여 퇴적물의 퇴적학적 특성 (평균입도, 분급도, 왜도, 첨도) 및 유기물과 금속원소의 오염을 지시하는 여러 지화학적 인자들 (강열감량, 화학적산소요구량, 산화발성황화물, 금속원소)를 조사하였다.

재료 및 방법

연구지역

연구지역은 우리나라 남서쪽에 위치한 영광~탄도만 (북위

35° 25' ~35° 25', 동경 126° 10' ~126° 25') 사이의 수심이 비교적 얇고 굴곡이 매우 심한 리아스식 해안으로 주변에 넓은 조간대가 발달되어 있으며, 임자도, 증도, 매화도 등 수많은 섬들이 다도해 (archipelago)를 이루고 있는 곳이다 (Fig. 1). 이로 인해 해수의 유동은 해저지형에 따라 지역적으로 큰 차이를 보이며 주로 조류의 흐름에 영향을 받는다. 특히, 조류의 유속은 섬사이의 좁은 통로에서는 강한 반면 넓은 조간대 지역이나 만내에서는 매우 약한 불균형을 이루는 특징을 가지고 있는데, 보통 1.0~3.3 knots (= 0.5~1.7 m/sec)에서 최고 6.0 knots (= 3.1 m/sec) 까지 변화를 보인다 (Jeon and Cho, 2002). 조석은 반일주조석 (semidiurnal tide)으로서 일조부등 (diurnal inequality)을 나타내며 소조차는 약 200 cm, 대조차는 약 430 cm, 평균조차는 약 320 cm로서 Davies (1964)의 분류기준에 의하면 중조차 (mesotide)에 해당된다 (Ryu et al., 1997; Youn et al., 1999).

지난 30년간 (1970~2000년) 연구지역 주변에서 관측된 기상자료 (KMA, 2001)를 살펴보면, 연구지역의 연평균 기온은 약 14.0°C이며, 강수량은 약 1130 mm로서 주로 여름 (6~8월)에 집중되고 있다. 연구지역내에는 큰 강물을 통한 담수의 유입은 없으며, 범성포 주변의 구암천 (길이: 17.2 km)과 와탄천 (길이: 25.4 km), 그 남쪽으로 불갑천 (길이: 29.5 km)과 같은 평균 유량이 1,000 m³/sec 이하의 소규모 하천들이 있다. 그러나, 대부분의 하천들은 1990년대 농업용수 확보를 목적으로 방조제가 건설된 이후 상류로부터 담수 유입량에 따라 배수갑문을 통해 방류량이 조절되기 때문에 하천을 통한 해양으로의 담수유입은 매우 제한적이다 (Lim and Hong, 2002; Kahng, 2004; Lee and Jo, 2005).

연구지역 주변의 육상지질은 시대미상의 편마암 및 편암 등의 변성암류와 이들 암체들을 관입하는 중생대 쥐라기의 편마상 화강암으로 이루어져, 함평만을 중심으로 북서부 일대는 편마상 화강암 (gneissose granites)이 분포하고, 남동부일대에는 화강암질 편마암 (granitic gneiss)이 그리고 이들 사이에는 소규모의 반상변정편마암 (porphyroblastic gneiss)이 있으며, 이들 암체들 위를 신생대 제4기의 미고화된 충적층이 부정합적으로 피복되어 있다 (Youn et al., 1999).

조사항목 및 분석방법

이 연구는 2008년 7월에 영광~탄도만 사이의 조간대 지역에서 만조시 소형선박을 이용하여 총 30개의 정점에서 채니기 (Labond-type grab sampler)로 표층 퇴적물 (0~3 cm)을 채취하였으며, 선박의 접근이 어려운 일부 조간대 상부 정점들은 걸어 들어가 시료를 채취하였다 (Fig. 1). 채취한 시료는 냉장 및 냉동 보관 후 실험실로 운반하여 입도 (Grain Size)와 함수율 (Water Content, WC), 강열감량 (Ignition Loss, IL), 화학적산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD), 산화발성황화물 (Acid Volatile Sulfide, AVS), 그리고 금속원소 (Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, Hg, As)를 분석하였다.

먼저, 퇴적물의 입도는 Ingram (1971)의 표준입도분석 방법에 따라 분석하였다. 채취한 퇴적물 습시료 약 30 g을 취한 후 이온교환수를 이용하여 염분을 제거한 다음 10% 과산화수

소 (H_2O_2)와 0.1 N 염산 (HCl)을 차례로 넣고 유기물과 탄산염 ($CaCO_3$)을 제거하였다. 이 퇴적물은 다시 이온교환수를 이용하여 깨끗이 세척하고 4 ϕ (0.0625 mm) 표준체를 이용하여 불체질 (wet sieving)을 한 후 4 ϕ 보다 큰 조립질 입자는 110 $^{\circ}C$ 에서 24시간 동안 건조한 후 진탕기 (Ro-tap sieve shaker, Fritsch Model-Anaiysette 3)를 이용하여 15분 동안 건식체질 (dry sieving)을 한 다음 1 ϕ 간격으로 무게를 구하였고, 4 ϕ 보다 작은 세립질 입자에 대해서는 침전속도를 고려한 피펫팅법으로 시료무게를 구하였으며, 이때 입자의 응집현상을 방지하기 위해 확산제로서 2% 칼콘용액 (sodium hexametaphosphate, $NaPO_3)_6$)을 사용하였다. 여기서 퇴적물의 특성을 나타내는 평균입도 (mean grain size, Mz), 분급도 (sorting), 왜도 (skewness) 및 첨도 (kurtosis)등 통계적 입도상수는 Folk and Ward (1957)의 계산식에 의하여 구하였으며, 퇴적상의 분류는 Folk (1968)의 방법에 따랐다.

입도를 제외한 그 외의 분석 항목들은 Hwang et al. (2006)이 제시한 방법에 따라 분석하였다. WC와 IL은 퇴적물 습시료

약 20 g을 미리 무게를 측정한 비이커에 담아 건조기에 넣고 110 $^{\circ}C$ 에서 24시간 가열한 후 데시케이터 안에서 실온으로 식혀 비이커의 무게를 측정하였고, 이후 건조된 시료를 곱게 분쇄한 다음 미리 무게를 측정한 도가니에 담아 전기로에 넣어 550 $^{\circ}C$ 에서 2시간 동안 가열한 후 데시케이터 안에서 실온으로 식혀 도가니의 무게를 측정하여 건조 및 회화 후 무게차이로 계산하였다.

COD는 퇴적물 습시료 약 1-2 g을 250 mL 삼각플라스크에 옮긴 후 0.1 N 과망간산칼륨 ($KMnO_4$) 100 mL와 10% 수산화나트륨 (NaOH) 5 mL를 넣고 잘 흔든 다음, 시료와 시약이 담긴 삼각플라스크를 끓는 물에서 1시간 동안 증탕하였다. 그 후 실온으로 냉각시켜 10% 요오드화칼륨 (KI) 10 mL와 4% 아지드화나트륨 (NaN_3) 한 방울을 넣은 다음, 여기에 증류수를 가해 500 mL로 만든 후 잘 흔들어 유리섬유여과지로 여과하였다. 여과한 용액 100 mL를 취하여 30% 황산 (H_2SO_4) 2 mL를 넣고 잘 흔들어 이를 0.1 N 티오황산나트륨 ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 용액으로 적정·분석하였다.

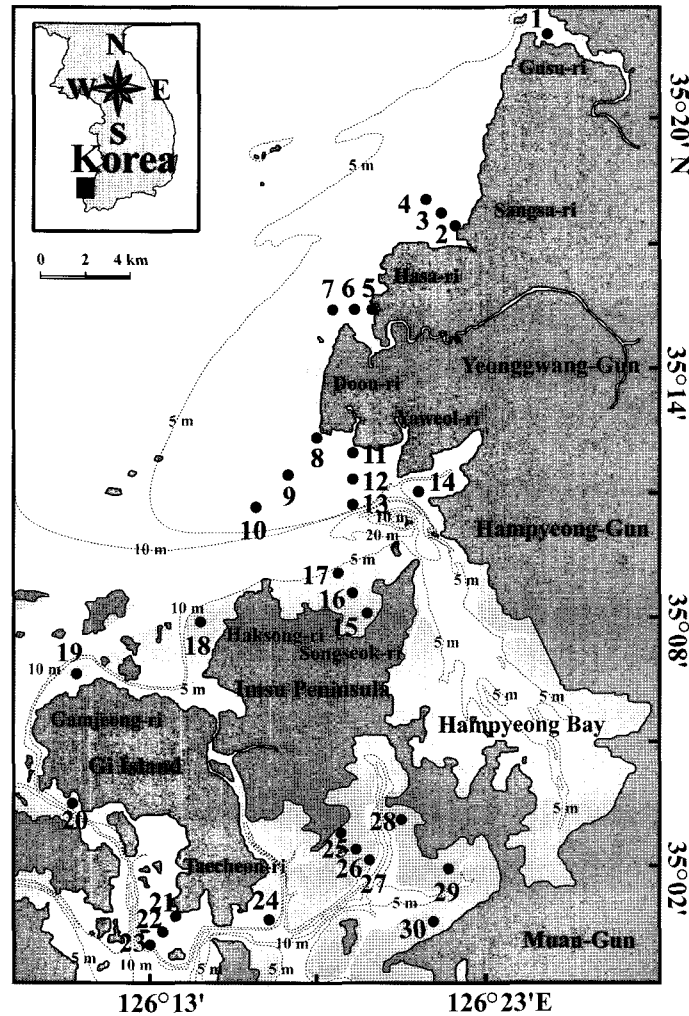


Fig. 1. A map showing the study area and the sampling stations for analyzing the intertidal surface sediment in the southwestern coast of Korea.

AVS는 퇴적물 습시료 약 2~3 g의 무게를 취하여 황화수소 (H₂S) 발생관에 넣은 후 약간의 증류수를 넣고 기체가 새지 않도록 뚜껑을 닫은 다음 발생관에 황산 2 mL를 넣고 2~3초간 기다린 후 핸드펌프를 서서히 당겨 이때 발생하는 황화수소가 검지관에 흡수되도록 하여 측정하였다.

퇴적물내 금속원소는 -80℃에서 퇴적물을 동결건조한 후 플라스틱 재질의 채 (Ø <63 μm)로 채질하여 통과된 퇴적물을 시료로 사용하였다. 금속원소를 추출하기 위하여 약 1 g의 동결건조된 퇴적물 시료를 50 mL 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 정용한 다음 측정하였다. 금속원소의 측정은 유도결합플라즈마 질량분석기 (ICP-MS, Perkin Elmer Model-Elan 6000)로 분석하였으며, 수은 (Hg)의 경우에는 수은자동분석기 (Milestone, AMA-254)로 분석하였다. 분석자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 표준물질 (standard reference material)은 PACS-2 (marine sediment)를 이용하였으며, 모든 전처리 과정은 class 100의 clean booth 내에서 행하였다.

결과 및 고찰

표층 퇴적물의 퇴적학적 특성

퇴적학적 관점에서 퇴적물의 입도는 현재의 수리-역학적 퇴적환경 특성을 가장 잘 반영하는 인자이며, 퇴적물의 공급 원 혹은 파도, 조석, 조류 등과 같은 해수의 물리적 에너지의 변동에 의해 그 분포가 달라진다 (Lee et al., 2004; Hwang et al., 2006). 연구지역내 표층 퇴적물중 자갈은 0~3.9% (평균 0.3±0.9%), 모래는 0.4~100% (평균 27.3±35.2%), 실트와 점토는 각각 0~84.4% (평균 54.1±28.2%), 0~46.4% (평균 18.4±11.9%) 범위로써 대부분의 정점에서 실트의 함량이 높았다. 입도분석결과를 기초로 Folk (1968)의 삼각좌표에 도시한 결과, 연구지역내 표층 퇴적물은 사 (S, sand), 실트질사 (zS, silty sand), 사질실트 (sZ, sandy silt), 실트 (Z, silt), 사질니 (sM, sandy mud), 약역질니 ((g)M, slightly gravelly mud)의 7개의 퇴적물 유형 (sedimentary type)으로 구분되었으며, 퇴적물의 조직특성에 따라 크게 사 (S), 약역질니 ((g)M), 사질니 (sM), 실트 (Z)의 4개의 퇴적상 (sedimentary facies)으로 나누어졌다 (Fig. 2). 사 (S) 퇴적상은 주로 연구지역의 북쪽에 위치한 영광군 상사리와 야월리 남서쪽 조간대에 넓게 분포하고, 약역질니 ((g)M) 퇴적상은 무안군 임수반도 부근의 송석리와 탄도만 안쪽 조간대 상부지역에 주로 분포하였다. 또한, 사질니 (sM) 퇴적상은 무안군 지도 남서쪽 조간대 하부와 탄도만 안쪽 조간대 중하부지역에, 실트 (Z) 퇴적상은 함평만 입구쪽과 지도 주변 조간대 상부와 중부지역에 주로 넓게 분포하였다.

퇴적물의 통계적 변수 특성을 살펴보면 (Fig. 3 and Fig. 4), Mz는 2.1~8.3ϕ (평균 5.5ϕ)범위로 중립사 (medium sand)에서부터 극세립실트 (very fine silt) 크기에 이르기까지 비교적 넓은 입도분포를 보였으며, 전체적으로는 조립실트 (coarse silt)가 매우 우세한 분포를 나타내었다. 이와 같이 입도의 분포 범위가 넓다는 것은 연구지역내 퇴적물의 기원이 다양하다는 것을 의미하며, 연구지역 주변에 위치한 함평만에서도 유사한 연구결과가 보고된 바 있다 (Ryu et al., 1997, 1998). 퇴적물의 입도조성이 얼마나 균일한가를 나타내는 지표인 분급도 (sorting)는 0.3~4.0ϕ (평균 2.2ϕ) 범위로 양호한 분급 (well sorted)과 매우 불량한 분급 (very poorly sorted) 사이였으며, 전반적으로는 매우 불량한 분급을 나타내었다. 대체로 연구지역 북쪽의 영광지역 퇴적물의 분급도는 1.0ϕ 내외의 양호한 분급을 보인 반면, 연구지역 남쪽의 지도 입수반도 주변 퇴적물의 분급도는 2.0ϕ 이상의 불량한 분급을 보였다. 왜도 (skewness)는 -0.3~0.7 (평균 0.4)의 범위로 음의 왜도와 양의 왜도값을 동시에 가지지만, 영광군 야월리 조간대 상부지역 (St. 8)과 탄도만 북동쪽 끝부분의 조간대 상부지역 (Sts. 28~29)을 제외하면 대부분의 지역에서 양의 왜도 (positively skewed)를 보이며 매우 균질한 분포양상을 보였다. 퇴적물의 분산이 얼마나 좁은 확률범위에 존재하고 있는가를 나타내는 첨도는 0.8~2.1 (평균 1.3) 범위로 대부분의 퇴적물은 입도분포 곡선이 중앙에 집중된 형태 (leptokurtic)를 나타내었다. 한편, 연구지역내 표층 퇴적물중 WC는 20~48% 범위로 조립질 퇴적

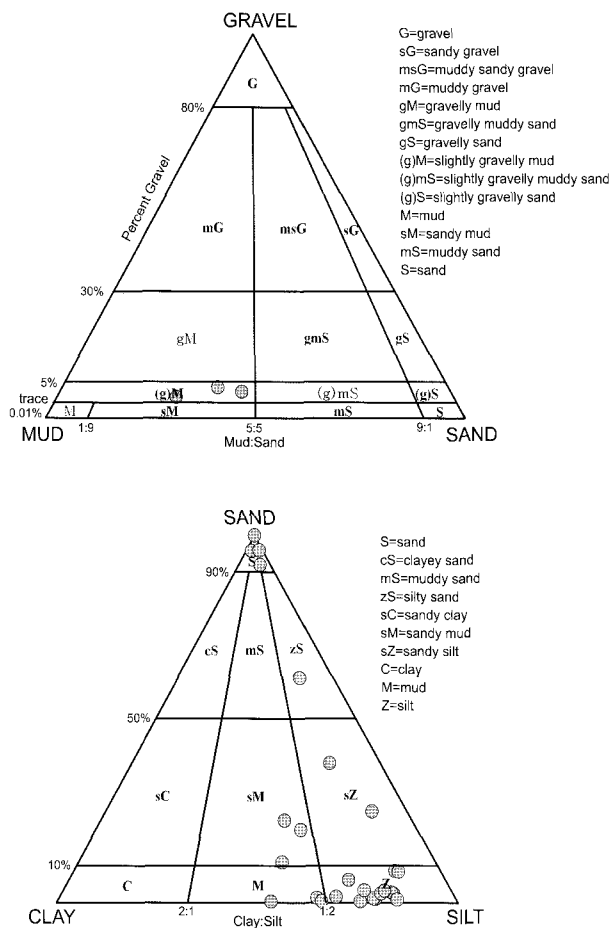


Fig. 2. The ternary diagrams showing the major sediment types of intertidal surface sediment in the southwestern coast of Korea.

물로 이루어진 조간대 상부쪽에 위치한 정점들 (Sts. 2, 5, 8, 20)에서 다른 정점에 비해 다소 낮았다 (Fig. 3).

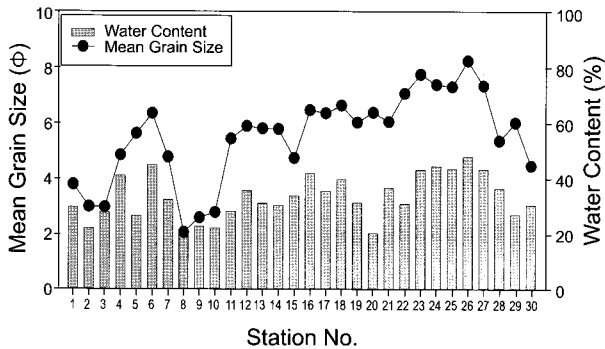


Fig. 3. The mean grain size (Mz) and water content of intertidal surface sediment with each station in the southwestern coast of Korea.

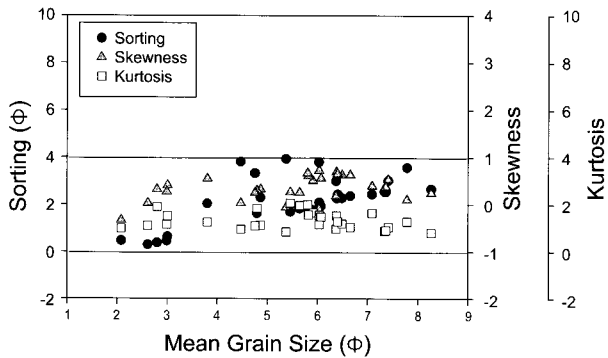


Fig. 4. Plots of mean grain size (Mz) versus sorting, skewness, and kurtosis of intertidal surface sediment in the southwestern coast of Korea.

표층 퇴적물의 유기물 함량

연구지역내 퇴적물중 유기물 함량과 분포특성을 알아보기 위해 IL과 COD 함량을 Fig. 5에 나타내었다. 퇴적물중 IL은 0.8~5.5% (평균 2.9±1.2%) 범위로 영광군 아월리 남서쪽 조간대 상부 (St. 8)에서 가장 낮고 지도 북서쪽의 조간대 상부 (St. 19)에서 가장 높았다. 대체로 높은 Mz를 보였던 함평만 입구쪽과 지도~입수반도 주변 그리고 탄도만 안쪽 조간대 중-하부 부근 정점들에서 높은 IL을 나타내었는데, 이는 연구지역의 유기물 함량이 Mz에 의해 크게 달라지며 세립질 퇴적물일수록 유기물 함량이 높다는 것을 의미한다. 그러나, 연구지역의 IL은 우리나라 주변의 연안해역 (Kang et al., 1993)에서 측정된 결과와는 유사한 농도 범위를 보이나, 남해안의 득량만 (Yoon, 2003), 여자만 (Hue et al., 2000), 가막만 (Noh et al, 2006) 등 양식활동이 활발하게 이루어지고 있는 반폐쇄적인 내만의 어장주변해역이나 부산항 (Park et al., 1995)이나 마산항 (Hwang et al., 2006)과 같이 주변에 큰 공단이 존재하고 육상으로부터 오염된 하천수의 유입이 있는 항내보다는 상당히 낮은 농도였다 (Table 1).

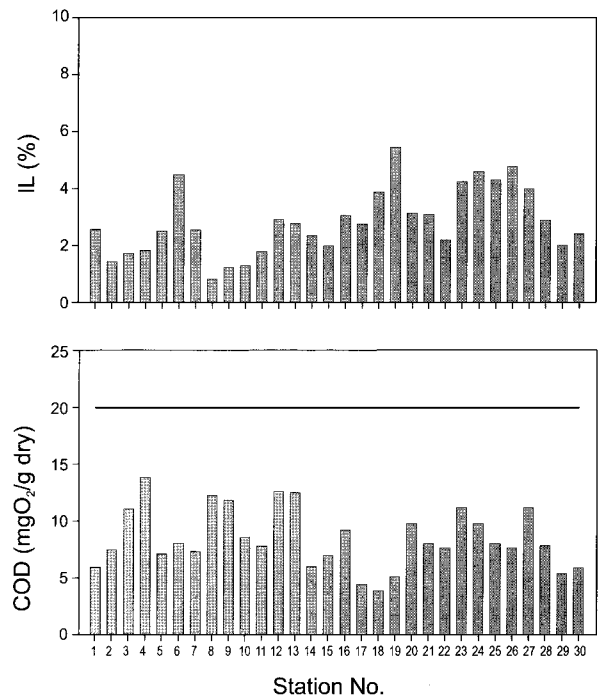


Fig. 5. The contents of ignition loss (upper) and chemical oxygen demands (lower) in intertidal surface sediment with each station in the southwestern coast of Korea.

Table 1. The concentration of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), and acid volatile sulfide (AVS) in coastal surface sediment around Korea. The parenthesis represents the average concentration of each parameter in surface sediment

Region	IL (%)	COD (mgO ₂ /g-dry)	AVS (mgS/g-dry)	Reference
Pusan Harbor	6.3~18.5 (12.1)	5.1~43.7 (17.5)	0.06~4.37 (1.18)	Park et al. (1995)
Masan Harbor	7.2~14.3 (11.2)	11.3~29.9 (19.6)	0.20~4.47 (1.83)	Hwang et al. (2006)
Deukryang Bay	3.1~21.5 (5.6)	0.4~18.2 (5.7)	ND~3.30 (0.36)	Yoon (2003)
Yeoja Bay	6.2~12.2 (8.9)	5.5~29.7 (13.2)	0.02~0.10 (0.05)	Hue et al. (2000)
Gamak Bay	4.6~11.6 (7.1)	2.3~99.3 (31.0)	ND~10.3 (1.02)	Noh et al. (2006)
Coastal Sea of Korea	1.4~10.8 (6.7)	3.2~21.7 (12.4)	ND~1.12 (0.24)	Kang et al. (1993)
Southwestern Coast of Korea (Yeonggwang-Muan)	0.8~5.5 (2.9)	3.9~13.8 (8.5)	ND	This Study

* ND = Not Detected.

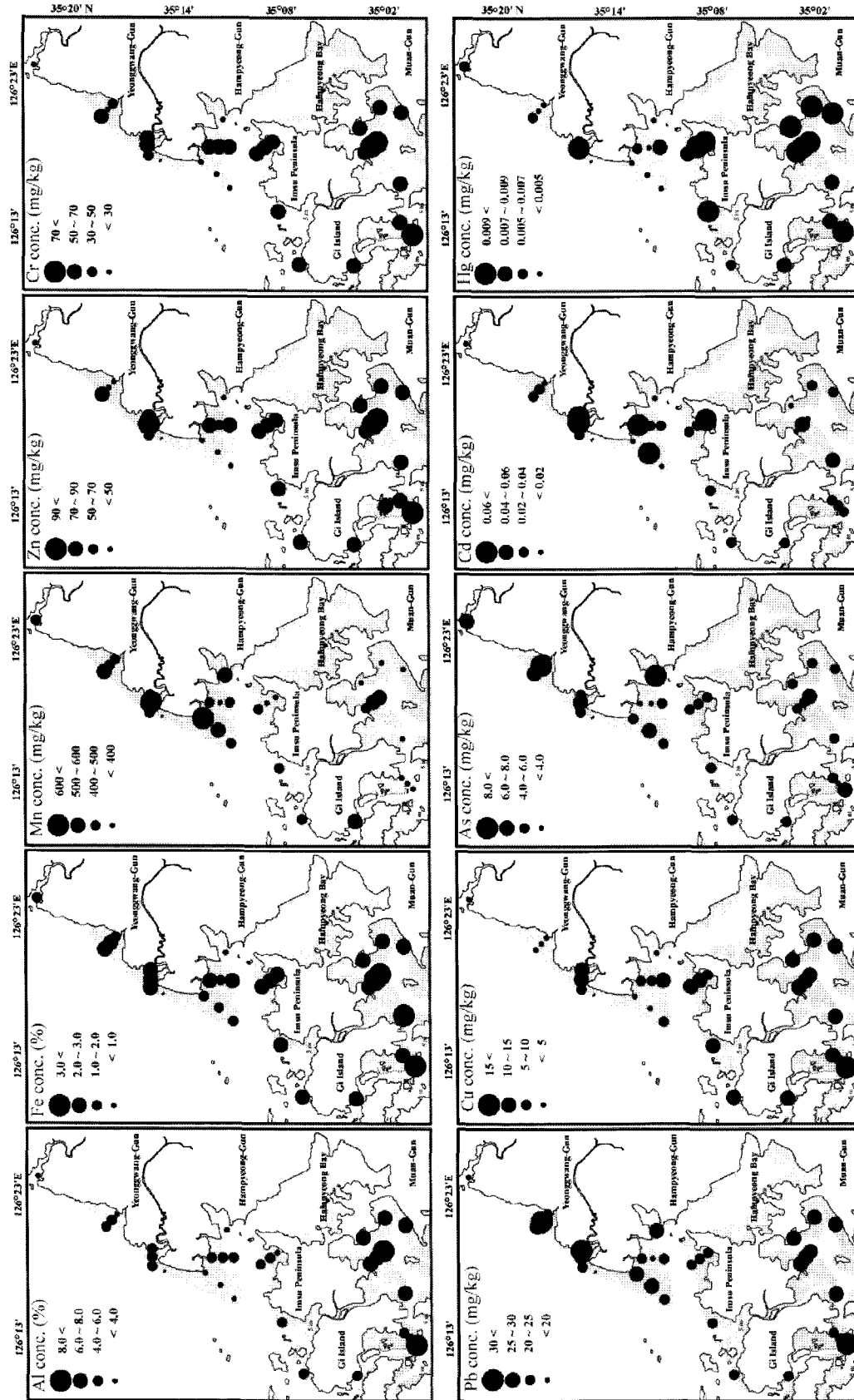


Fig. 6. The concentrations of metallic elements (Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, As, Hg) in intertidal surface sediment with each station in the southwestern coast of Korea.

퇴적물중 COD 농도는 3.9~13.8 mgO₂/g-dry (평균 8.5±2.6 mgO₂/g-dry) 범위로 입수반도 북서쪽의 학송리 조간대 (St. 18)에서 가장 낮고, 영광군 상사리 조간대 하부 (St. 4)에서 가장 높았다. IL과 마찬가지로 우리나라 주변의 연안해역 (Kang et al., 1993)과 득량만 (Yoon, 2003)에서 측정된 COD와 유사한 농도 범위를 보이나, 그 외 양식활동이 활발하게 이루어지고 있는 반폐쇄적인 내만의 어장주변해역이나 주변에 큰 공단이 존재하고 육상으로부터 오염된 하천수의 유입이 있는 항내에서 측정된 값보다는 상당히 낮았다 (Table 1). 퇴적물중 AVS 농도는 각 정점별로 서로 다른 입도조성을 가짐에도 불구하고 연구지역내 모든 정점에서 검출되지 않았다. 이는 연구지역내 큰 조석차에 의한 썰물시 노출과 밀물시 재순환하는 해수의 영향으로 표층 퇴적물이 산화환경을 유지하고 있거나 표층 퇴적물중 생분해성 유기물 함량이 매우 낮아 황산염 환원세균이 의한 황화물의 생성이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 황화물을 생성하는 황산염 환원세균은 퇴적물내에서 에너지원으로 COD로 대변되는 생분해성 유기물을 이용하고 COD의 농도가 낮을 때에는 황화물의 생성이 매우 느린 것으로 알려져 있다 (Yoon, 2003)

한편, COD와 AVS는 연안해역에서 퇴적물내 유기물 오염을 평가하는 기준으로 널리 이용되어 왔으며 (Yoon, 2000; Hyun et al., 2003a, 2004b), 저서생물의 정상적인 활동에 제한을 가져오는 부영양화 기준값으로 일본에서는 퇴적물중 COD

와 AVS 농도를 각각 20 mgO₂/g-dry와 0.2 mgS/g-dry로 제시하고 있다 (Yoon, 2000, 2003; Hwang et al., 2006). 이를 기준으로 연구지역내 조간대 표층 퇴적물의 유기물 오염정도를 살펴보면, COD와 AVS 농도는 거의 모든 정점에서 일본의 퇴적물 기준농도보다 약 1/2 이하로 매우 낮아, 현재로서는 유기물 오염이 진행되지 않았으며 저서생물이 서식하기에 적합한 퇴적환경을 유지하고 있는 것으로 생각된다.

표층 퇴적물의 금속원소 함량

연구지역내 조간대 표층 퇴적물중 금속원소의 농도와 분포 특성을 알아보기 위하여 각 정점별로 원소의 농도를 Fig. 6에 나타내었다. 표층 퇴적물중 알루미늄 (Al)의 농도는 2.6~9.0% (평균 5.2±1.6%) 범위로 지역별로 큰 차이를 보였다. 사 (S) 퇴적상을 가진 가장 낮은 IL을 보였던 영광군 야월리 북서쪽 조간대 상부 (St. 8)에서 가장 낮고, 사니질 (sM) 퇴적상을 보인 무안군 지도 남서쪽 조간대 하부 (St. 23)에서 가장 높았다. 대체로 영광지역 주변의 정점들에서 대부분 4.5% 이하의 낮은 농도를 보인 반면 무안군 지도 남서쪽 조간대 하부와 탄도만 안쪽 정점들에서는 6.5% 이상의 높은 농도를 보였다. 이러한 Al은 지각에 널리 분포하는 성분들 중에 하나로 암석의 풍화나 풍화된 퇴적물들이 운반되는 도중에 함량변화가 매우 낮고, 액체상태보다는 고체상태로 운반되는 것이 일반적이다 (Martin and Meybeck, 1979).

Table 2. The average concentration of mean grain size (Mz) and metallic elements (Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, Hg) in coastal surface sediment of Korea

Region	Mz (ϕ)	Metals (%)		Metals (mg/kg)								Reference
		Al	Fe	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn	As	Hg	
Eastern Coast												
Youngil Bay	3.8	6.0	2.4	49	36	202	1.5	29	-	-	-	Lee et al. (2004)
Ulsan Bay	-	-	-	60	63	46	2.2	237	570	-	-	Kang and Lee (1996)
Southern Coast												
Nakdong River Estuary	4.2	6.4	1.9	9.4	27	31	-	17	320	-	-	Kim et al. (2000)
Gwangyang Bay	7.1	6.2	3.3	18	28	86	0.2	51	812	-	-	Hyun et al. (2003)
Jinhae Bay	-	-	3.6	30	37	128	-	59	386	-	-	Lee and Lee (1983)
Masan Harbor	7.2	6.4	4.5	73	74	321	1.4	79	-	11	0.14	Hwang et al. (2006)
Continental Shelf	5.2	5.1	2.5	11	27	62	-	53	-	-	-	Cho et al. (1994)
Western Coast												
Youngsan River Estuary	9.1	8.3	4.1	23	28	96	-	77	673	-	-	Cho and Park (1998)
Hampyeong Bay	-	6.1	2.2	12	20	45	-	34	321	-	-	Youn et al. (1999)
Southwest coast (Mokpo-Wando)	3.2	6.3	2.6	22	33	66	-	51	600	-	-	Shin et al. (2002)
Saemanguem	-	7.1	2.7	21	26	85	-	47	610	-	-	Kim et al. (2003)
Shihwa (outer part)	7.2	6.9	3.2	55	29	122	0.5	81	494	-	-	Choi et al (1999)
Kyounggi Bay	4.4	6.2	2.4	25	-	92	-	70	532	-	-	Lee et al. (1998)
Southwest coast (Yeonggwang-Muan)	5.5	5.2	2.3	9.8	25	70	0.05	51	448	5.6	0.01	This Study

Table 3. Classification of geoaccumulation index (Müller, 1979) and the number of I_{geo} -Class for the concentrations of metallic elements in intertidal surface sediment in the southwestern coast of Korea

I_{geo}	I_{geo} Class	Designation of sediment quality	I_{geo}									
			Fe	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn	As	Hg	
> 5	6	Very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4-5	5	Strongly/very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0		
3-4	4	Strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0		
2-3	3	Moderately/strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0		
1-2	2	Moderately polluted	0	0	0	0	0	0	27	0		
0-1	1	Practically unpolluted/moderately polluted	0	0	3	0	0	19	0	3		
0	0	Practically unpolluted	30	30	27	30	30	11	30	0		

철 (Fe)을 비롯한 구리 (Cu), 아연 (Zn), 크롬 (Cr), 수은 (Hg)의 농도는 각각 0.8~3.5% (평균 2.3±0.6%), 2.8~15.2 mg/kg (평균 9.8±3.9 mg/kg), 18.9~97.0 mg/kg (평균 70.1±20.4 mg/kg), 13.8~72.4 mg/kg (평균 51.4±17.4 mg/kg), 0.001~0.106 mg/kg (평균 0.012±0.023 mg/kg) 범위로 AI과 마찬가지로 영광지역 주변의 정점들에서 무안군 지도 남서쪽 조간대 하부와 탄도만 안쪽 조간대 표층 퇴적물에 비해 다소 낮은 농도를 보였다. 일반적으로 Cu와 Zn은 퇴적물내에서 Fe-Mn oxyhydroxide의 함량에 의해 그 농도가 조절되고, Cr은 친철원소 (siderophile element)로 Fe와 유사한 거동을 보이는 것으로 알려져 있다 (Youn et al., 1999; Balkis and Cagatay, 2001). 그러나, 납 (Pb)과 카드뮴 (Cd), 비소 (As)는 각각 14.1~41.5 mg/kg (평균 25.5±4.8 mg/kg), 0.004~0.116 mg/kg (평균 0.033±0.027 mg/kg), 3.43~8.90 mg/kg (평균 5.64±1.33 mg/kg) 범위로 영광군 상사리와 에일리 사이 조간대 상부와 중부의 일부정점을 제외하면 각 정점별로 큰 차이를 보이지 않았다.

망간 (Mn)의 경우에는 256~721 mg/kg (평균 448±101 mg/kg) 범위로 다른 금속원소들과 달리 오히려 영광지역 주변의 정점들에서 지도-임수반도 주변과 탄도만 안쪽 조간대 표층 퇴적물에 비해 다소 높은 농도를 보였다. 일반적으로 Mn은 점토광물과 각섬석을 비롯한 유색광물 계열에서 그 함량이 높고, 해양퇴적물 내에서 탄산칼슘에 의해 그 함량이 조절되는 것으로 알려져 있다 (Jung et al., 1996; Fang and Hong, 1999). 한편, 연구지역내 금속원소의 농도는 연구지역과 인접한 함평만을 제외한 기준에 우리나라 주변의 반폐쇄적인 내만 해역이나 하구역에서 측정된 금속원소들의 평균농도보다 대부분 상당히 낮았으며, Cho et al. (1994)이 남해 대륙붕 지역에서 측정한 금속원소의 평균농도와 비슷하였다 (Table 2).

연안해역에서 퇴적물중 대부분의 금속원소 농도는 주로 퇴적물의 입도와 쇄설성 광물질의 영향을 크게 받으며, 환경

에 따라서는 자생광물 혹은 생물기원물질, 그리고 인위적인 요인에 의해서 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Cho and Park, 1998; Choi et al., 1999; Cho et al., 2001). 특히, 생물기원 물질인 유기물은 세립질 퇴적물과 친화력이 매우 크고, 표면적이 넓어 금속원소와의 흡착능력이 매우 뛰어난 것으로 알려져 있다 (Horowitz, 1991). 이 연구에서도 연구지역내 금속원소의 농도가 퇴적물의 입도와 어떤 관계를 가지는지 알아보기 위하여 Mz에 따른 각 금속원소의 농도를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 Pb, Cd, Mn, As를 제외한 대부분의 금속원소들은 Mz와 좋은 상관성 ($r=0.64-0.82$)을 보였으며, 이러한 Mz는 연구지역내 유기물 함량과도 좋은 상관성 ($r=0.79$)을 보인다. 따라서, 연구지역내 표층 퇴적물중 AI을 비롯한 금속원소들은 주로 퇴적물의 입도와 유기물 함량에 의해 그 농도가 조절되며, 나머지 Pb, Cd, Mn, As는 입도와 유기물 함량과 관련성이 없는 것으로 나타나 다른 인위적인 요인이나 혹은 퇴적물내 산화환경하에서의 속성작용 (diagenesis)과 같은 이차적인 요인에 의해 그 농도가 큰 영향을 받는 것으로 생각된다.

금속원소를 이용한 저서환경 오염평가

퇴적물내 금속원소는 연안해역에서 급격한 환경변화를 반영하고 해수와 달리 주변의 금속에 대한 오염의 기록을 장기간 보존하는 특성을 가지고 있어서 오염의 역사를 추적하는 중요한 단서이다 (Choi et al., 1999; Lee et al., 2004). 이러한 퇴적물내 금속원소의 오염에 대한 평가는 주로 각 나라별로 설정해놓은 금속원소의 오염기준 (Sediment Quality Guidelines; SQGs)이나 혹은 분석된 금속원소의 농도를 지각물질중의 자연적인 농도와 비교하는 농축계수 (Enrichment Factor, EF), 농집지수 (Geoaccumulation Index; I_{geo}) 등 다양한 방법이 이용된다. 이 연구에서는 먼저 연구지역내 퇴적물중 금속원소의 오염여부를 파악하기 위하여 연구지역내 금속원소의 농도와 미국 해양대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 권고하고 있는 퇴적물 오염기준 (SQGs)을 비교하였으며, 아울러 연구지역의 지질특성을 반영하여 오염을 정량적으로 평가할 수 있는 기법으로 알려진 농집지수 (I_{geo})를 계산하여 오염정도를 파악하였다.

최근에 미국 NOAA에서는 연안퇴적물의 오염을 평가하기 위하여 ERL (Effect range low)-ERM (Effect range median)기법을 이용한 금속원소의 농도기준을 제시하였다 (Buchman, 2008). 이 기법은 Long and Morgan (1990)에 의해 처음 제안된 이후 Long et al. (1995)에 의해 제시된 방법으로 지각물질중에 높은 농도로 존재하는 AI과 Fe을 제외한 총 9개의 원소 (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, Ni, Hg, Ag)에 대하여 퇴적물내 농도와 현장 퇴적물의 생물학적 영향을 조사한 방대한 연구결과를 바탕으로 퇴적물 내 금속원소의 농도를 낮은 농도에서 높은 농도순으로 재배열한 다음, 가장 낮은 농도에서 10% (ERL)와 50% (ERM)에 해당하는 농도를 계산하여 퇴적물내 금속원소들이 생물에 미치는 영향에 대한 수치적인 권고기준이다. 이 기준에 따르면, 각 원소별 하한농도기준과 상한농도기준은

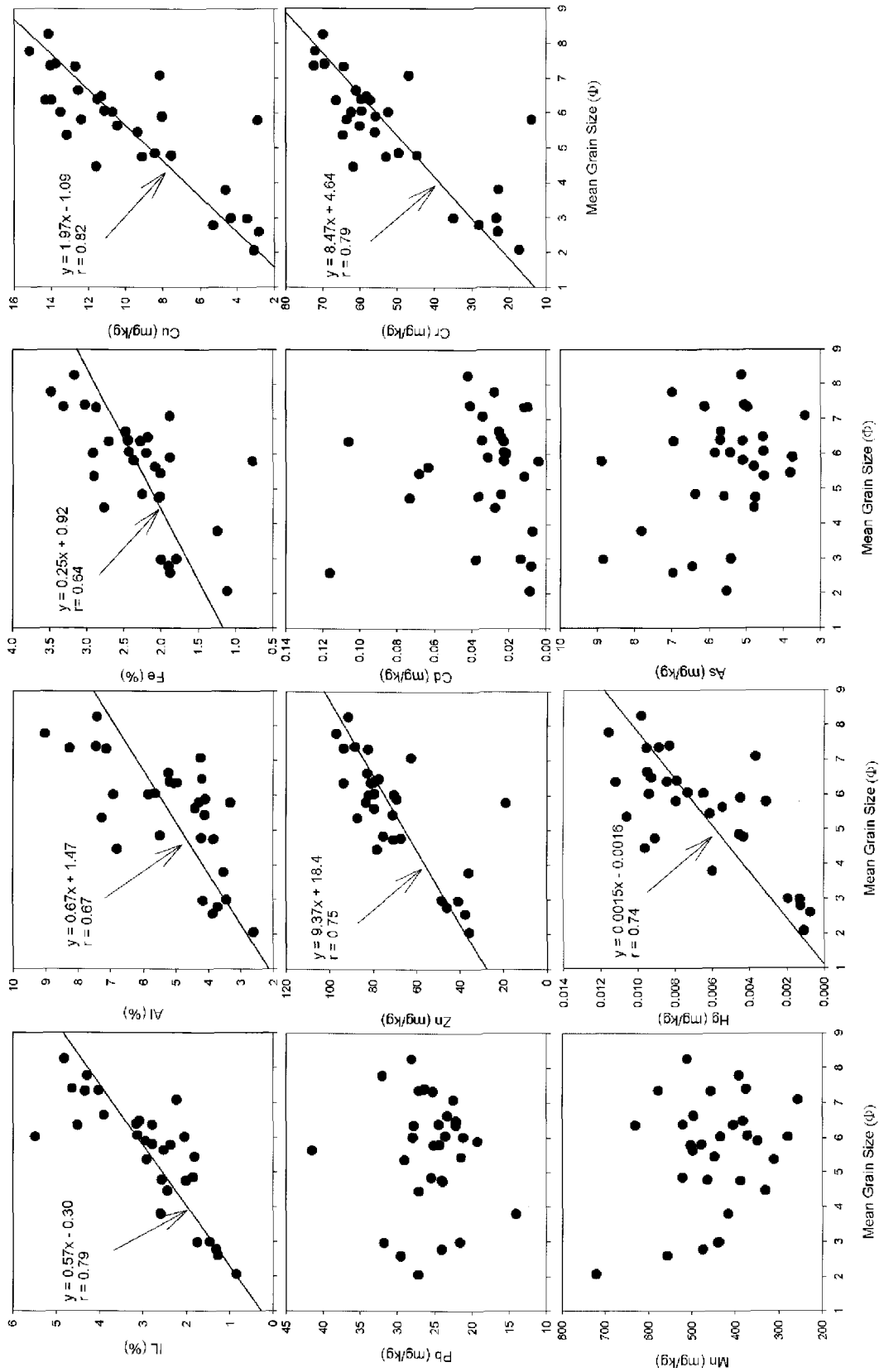


Fig. 7. Plots of mean grain size (Mz) versus ignition loss and metallic elements (Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, As, Hg) in intertidal surface sediment in the southwestern coast of Korea.

각각 Cu 34 mg/kg과 270 mg/kg, Cr 81 mg/kg과 370 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, 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 였다. 연구지역내 표층 퇴적물중 금속원소의 농도를 이들 기준농도와 비교해 보면, As의 경우 하한농도 기준과 비슷하거나 일부정점에서 이들 농도를 초과하는 것으로 나타났으나 다른 모든 금속원소들은 모든 정점에서 하한농도기준보다 낮은 농도를 보였다. 특히, Cu, Cd, Hg은 하한농도 기준의 1/5 이하의 매우 낮은 농도였다. 이는 연구지역내 표층 퇴적물중 금속원소들의 농도가 저서생물에게 큰 영향을 주지 않음을 의미한다.

연구지역의 표층 퇴적물중 금속원소의 오염을 보다 정량적으로 평가하기 위해 농집지수를 계산하였다. 농집지수 (I_{geo})란 Müller (1979)에 의해 처음 제시되었으며, 퇴적물에 함유된 금속원소의 농도를 오염되지 않은 금속원소의 농도와 비교하여 정량하는 방법으로 그 값에 따라 총 7등급으로 구분된다 (Table 3). 특히, 농집지수는 연구지역에서 측정된 퇴적물중 AI에 대한 각 금속원소의 농도비를 지각물질 중 AI에 대한 각 금속원소의 평균농도비로 나누는 농축계수 (EF)와 달리 연구지역내 주어진 시스템내에서 금속원소의 상대적인 농축정도를 반영할 뿐만 아니라 농축정도를 등급화하여 오염정도를 더욱 세분화하여 평가할 수 있기 때문에 연안 퇴적물의 오염정도를 평가하기 위해 최근에 널리 이용되고 있는 방법이며 (Shin et al., 2002; Hyun et al., 2003b; Lee et al., 2004; Hwang et al., 2006), 다음의 식 (1)을 이용하여 계산된다.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5} \quad (1)$$

여기서, C_n 은 연구지역내 분석된 금속원소의 농도를, B_n 은 금속원소의 바탕농도 (background or reference)를 나타낸다. 일반적으로 금속원소의 바탕농도는 세일이나 지각물질중 금속원소의 평균농도를 사용하며, 때로는 해당 연구지역에서 오염원의 영향을 가장 적게 받는 지역의 농도 혹은 가장 낮은 농도를 사용하기도 한다 (Martin and Whitefield, 1983; Sahu and Bhosale, 1991; Hyun et al., 2003b; Lee et al., 2004). 이 연구에서는 Taylor and McLennan (1995)에 의해 보고된 전 세계 연안 대륙붕지역의 퇴적물 중 각원소의 평균농도를 바탕농도로 사용하였으며, I_{geo} 값이 0 보다 작은 값을 가질 경우에는 오염되지 않은 지역으로 구분하였다.

지각물질중에 높은 농도로 존재하는 AI을 제외한 9개의 원소에 대하여 계산된 농집지수값을 구분하여 Table 3에 나타내었다. 연구지역내 표층 퇴적물중 Fe, Cu, Zn, Cd, Mn, Hg은 모든 정점에서 I_{geo} class가 0으로 아직 오염되지 않은 수준 (practically unpolluted)인 것으로 나타났으며, Cr은 대부분 I_{geo} -class가 0과 1에 집중되어 있어 약간 오염되었거나 오염되지 않은 수준 (practically unpolluted/ moderately polluted)인 것으로 나타났다. 그러나, As의 경우에는 I_{geo} class가 2에 집중되어

약간 오염된 수준 (moderately polluted)이었으며 다른 금속원소에 비해 상대적으로 오염된 것으로 나타났다. 일반적으로 As는 농업분야에서 살초제와 살충제, 혹은 공업분야에서 비철금속의 합금재료나 백색안료 등에 사용되고 공업단지 주변의 오염된 하수나 하천을 통해 해양으로 유입되어 해양퇴적물내에서 높은 농도를 보인다 (Hwang et al., 2003). 본 연구지역의 경우 주변에 공단이나 오염된 하천수의 유입이 없고, 연구지역 내 모든 곳에 영향을 줄 수 있는 다른 인위적인 공급원이 없다. 그러나, 최근에 Kim et al. (2005)은 우리나라 연안지역에서 해저를 통해 상당한 양의 지하수가 영양염류를 비롯한 육상의 오염된 물질들을 해양으로 운반한다고 보고한 바 있다. 따라서, 연구지역내 표층 퇴적물에서 높은 As 농도를 보이는 것은 주변의 농사를 짓는 과정에서 사용된 살충제 및 살초제에 의해 오염된 지하수가 연안으로 유입되었기 때문인 것으로 생각되며, 앞으로 연구지역내 As의 오염경로 및 퇴적물내에서의 화학적 거동 특성을 보다 정확하게 파악하기 위한 심도있는 연구가 진행되어져야 할 것으로 판단된다. 아울러 저서생물들이 서식하기에 적합한 조간대 퇴적물 상태를 유지하기 위한 유기물 및 금속원소에 대한 지속적인 모니터링과 체계적인 관리정책이 요구된다.

사 사

이 연구의 현장조사 및 시료채취에 도움을 준 김영길 연구원과 국립수산과학원 갯벌연구소 연구원들에게 감사를 드립니다. 이 논문은 국립수산과학원 경상과제 (갯벌어장생물서식환경연구, RP-2010-ME-001)의 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

- Balkis N and Cagatay MN. 2001. Factors controlling metal distributions in the surface sediments of the Erdek Bay, Sea of Marmara., Turkey. Environ Int 27, 1-13.
- Bark CH and Lee SH. 2004. Environmental considerations on the function and value of tidal wetland. J Environ impact assess 13, 87-101.
- 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, pp. 34.
- Cho YG, Lee CB and MS Choi. 1994. Characteristics of heavy metal distribution in surface sediments from the South Sea of Korea. J Kor Soc Oceanogr 29, 338-356.
- Cho YG and Park KY. 1998. Heavy metals in surface sediments of the Youngsan Estuary, west coast of Korea. J Kor Environ Sci Soc 7, 549-557.
- 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 MS, Chun JH, Woo HJ and Yi HI. 1999. Change of heavy metals and sediment facies in surface sediments of the Shihwa Lake. J Kor Environ Sci Soc 8, 593-600.
- Davies JS. 1964. A morphogenic approach toward sholines. Z Geomorph 8, 127-142.
- Fang TH and Hong E. 1999. Mechanisms influencing the spatial distribution of trace metals in surface sediments off the south-western Taiwan. Mar Pollut Bull 38, 1026-1037.
- Folk RL. 1968. Petrology of sedimentary rock, Hemphill Publishing Co., Austin TX, U.S.A., pp. 170.
- Folk RL and Ward WC. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters, J Sed Petol 27, 3-26.
- Hong HG, Park J, Kim D and Lim HB. 2005. Determination of heavy metals in surface sediments of Lake Shihwa. J Kor Soc Environ Anal 8, 1-6.
- Horowitz AJ. 1991. A primer on sediment-trace element chemistry. 2nd Ed Lewis Publishers Inc., Chelsea MI, U.S.A., pp. 136.
- Hue HK, Kim DH, Ahn SH and Park KW. 2000. Characteristics of the sedimentary environment in Yoja Bay in the summer of 1998. Kor J Environ Biol 18, 227-235.
- 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.
- Hyun S, Choi JW, Choi JS and Lee T. 2003a. Surface sediment characteristics and benthic environments in the mouth of Jinhae Bay, Korea. J Kor Fish Soc 36, 700-707.
- Hyun S, Lee T, Choi JS, Choi DL and Woo HJ. 2003b. 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, Kim ES and Paeng WH. 2004a. Heavy metal contamination and spatial difference in redox condition of the artificial Shihwa Lake, Korea. J Environ Sci 13, 479-488.
- Hyun S, Paeng WH and Lee T. 2004b. Characteristics of surficial sediment and benthic environments based on geochemical data in Gwangyang Bay, Korea. Kor J Environ Biol 22, 93-102.
- Ingram RL. 1971. Sieve analysis. In : Procedures in Sedimentary Petrology. Carver RE, ed. Willey-Inter Science, New York, U.S.A., pp. 49-67.
- 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 HS, Lee CB, Cho YG and Kang JK. 1996. A mechanism for the enrichment of Cu and depletion of Mn in anoxic marine sediments, Banweol intertidal flat, Korea. Mar Pollut Bull 32, 782-787.
- Kahng T. 2004. The alluvial landforms on the Bulgap River chatchment in the Jeollanam-Do. J Kor Geomorphol Associat 11, 41-51.
- Kang CK, Lee PY, Park JS and Kim PJ. 1993. On the distribution of organic matter in the nearshore surface sediment of Korea. Bull Kor Fish Soc 26, 557-566.
- Kang HS and Lee KW. 1996. Trace metal concentrations and sedimentation rates of Kwangyang, Masan and Ulsan Bay sediments. J Kor Soc Water Qual 12, 455-461.
- 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 and You SJ. 2001. Estimation of decomposition capacity for organic matter in tidal flat sediment at Saemankeum area. J Kor Environ Sci Soc 10, 315-321.
- Kim JG, You SJ and Ahn WS. 2008. Evaluation of characteristics of particle composition and pollution of heavy metals for tidal flat sediments in Julpo Bay, Korea. J Kor Soc Mar Environ Safety 14, 247-256.
- Kim JG, You SJ, Cho EI and Ahn WS. 2003. Distribution characteristics of heavy metals for tidal flat sediments in the Saemankeum area. J Kor Fish Soc 36, 55-61.
- Kim KH, Cho JH and Park NJ. 2000. Distributions and pollution history of heavy metals in Nakdong Estuary sediments. J Kor Soc Oceanogr 5, 285-294.
- KMA. 2001. Climatological normals of Korea. pp. 632.
- Kwak YS, Hwangbo JK and Lee CI. 2001. Heavy metal concentrations of sediment and *Ruditapes philippinarum* inhabited in the intertidal zone of Kwangyang Bay. Kor J Ecol 24, 297-301.
- Lee HJ and Yoon SK. 1997. Development of stratigraphy and sediment distribution in the northeastern Yellow Sea during Holocene Sea-Level Rise. J Sed Res 67, 341-349.

- Lee JH, Yi JS, Kim BS, Lee CB and Koh CH. 1998. Characteristics of metal distribution in the sediment in Kyeonggi Bay, Korea. *J Kor Soc Oceanogr* 3, 103-111.
- 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.
- Lee SH and Lee KW. 1983. Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. *J Oceanol Soc Korea* 18, 49-54.
- Lee YG, Park YA and Choi JY. 1997. Stratigraphy, sedimentary facies and diatoms of the tidal sediments in Hampyeong Bay, west coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 18, 90-98.
- Lee YW and Jo WR. 2005. The geomorphological development of Watan-Cheon (River) drainage basin. *J Geomorphol Associat Korea* 12, 77-90.
- Lim HS and Hong JS. 2002. Spatial distribution of macrozoobenthos along the salinity gradient and sedimentary environment in the Watancheon Estuary, Beobseongpo, southwest coast of Korea. *J Kor Soc Oceanogr* 7, 8-19.
- Long ER, MacDonald DD, Smith SL and Calder FD. 1995. Incidence of adverse effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environ Manage* 19, 81-97.
- Long ER and Morgan LG. 1990. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. NOAA Technical memorandum NOS ORCA 52. NOAA Seattle, WA, U.S.A.
- Martin JM and Meybeck M. 1979. Elemental mass balance of material carried by minor world rivers. *Mar Chem* 7, 173-206.
- Martin JM and Whitfield M. 1983. The significance of river input of chemical elements to the ocean. In: *Trace Metals in Sea Water*. Wang CS, Boyle E, Burton JD and Goldberg ED, ed. Plenum, New York, U.S.A., 265-298.
- MLTM. 2008. The investigation of coastal wetland ecosystem. MLTM Report, TR-2008-ME-009, pp. 382.
- MOMAF. 2003. Studies on inventories and a sustainable use of tidal flats in Korea. MOMAF Report, BSPM 221-00-1610-3, pp. 1130.
- Müller G. 1979. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins - Verderyngen Seit. *Umschau* 24, 778-783.
- Noh IH, Yoon YH, Kim DI and Park JS. 2006. The spatio-temporal distribution of organic matter on the surface sediment and its origin in Gamak Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Engin* 9, 1-13.
- Oh JK and Kum BC. 2001. Depositional environments and characteristics of surface sediments in the near-shore and offshore off the mid-western coast of the Korean Peninsula. *J Kor Earth Sci Soc* 22, 377-387.
- Park YA, Lim DI, Choi JY and Lee YG. 1997. Late Quaternary stratigraphy of the tidal deposits in the Hampyeong Bay, southwest coast of Korea. *J Kor Soc Oceanogr* 2, 138-150.
- Park YC, Yang HS, Lee PY and Kim PJ. 1995. Environmental characteristics of the seawater and surface sediment in the vicinity of Pusan Harbor area in winter. *J Kor Fish Soc* 28, 577-588.
- Ryu SO. 2003. Seasonal variation of sedimentary processes in a semi-closed bay: Hampyeong Bay, South Korea. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 56, 481-492.
- 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, You HS and Chun SS. 1997. Distribution pattern and Characteristics of the surface sediments in Hampyeong Bay, the southwestern coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 18, 367-378.
- Ryu SO, You HS, Kim MJ and Moon BC. 1998. Sedimentary environments of Hampyeong Bay, the southwestern coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 19, 343-353.
- Sahu KC and Bhosale U. 1991. Heavy metal pollution around the island city of Bombay, India. Part I: quantification of heavy metal pollution of aquatic sediments and recognition of environmental discriminants. *Chem Geol* 91, 263-283.
- Shin BS and Kim KH. 2007. Estimation of ability for water quality purification using ecological modeling on tidal flat. *J Ocean Engin Technol* 21, 42-49.
- 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 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 environments in the southern tidal flat of Kanghwa Island. *Ocean Polar Res* 24, 331-343.

- 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.
- Yoon YH. 2003. Spatio-temporal distribution of organic matters in surface sediments and its origin in

Deukryang Bay, Korea. *J Environ Sci* 12, 735-744.

2010년 1월 12일 접수
2010년 4월 5일 수정
2010년 4월 13일 수리