

압해도 조간대 표층퇴적물의 유기물 및 금속원소 오염도 평가

황동운* · 박성은 · 김평중¹ · 고병설² · 최희구

국립수산과학원 어장환경과, ¹남서해수산연구소, ²해양환경관리공단

Assessment of the Pollution Levels of Organic Matter and Metallic Elements in the Intertidal Surface Sediments of Aphae Island

Dong-Woon Hwang*, Sung-Eun Park, Pyoung-Jung Kim¹,
Byoung-Seol Koh² and Hee-Gu Choi

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

¹Southwest Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yeosu 556-823, Korea

²Marine Ecosystem Management Team, KOEM, Seoul 135-870, Korea

We evaluated the pollution levels of organic matter and metallic element (Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Cr, Mn, As, and Hg) in the intertidal surface sediments of Aphae Island using several sediment quality guidelines (SQGs) and assessment techniques for sediment pollution. Based on the textural composition of sediment, the surface sediments were classified into two main sedimentary facies: slightly gravelly mud and silt. The concentrations of chemical oxygen demand (COD) and acid volatile sulfide (AVS) in the sediments ranged from 4.6-9.9 (mean 7.4 ± 1.1) mgO₂/g-dry and from ND-0.53 (mean 0.04 ± 0.10) mgS/g-dry, respectively. These values were considerably lower than those reported from a farming area in a semi-enclosed bay of Korea and for SQGs in Japan. The metallic element concentrations in the sediments varied widely with the mean grain size and organic matter content, implying that the concentrations of metallic elements are influenced mainly by secondary factors, such as bioturbation, the resuspension of sediment, and anthropogenic input. The overall results for the comparison with SQGs, enrichment factor (EF), and geoaccumulation index (I_{geo}) indicate that the surface sediments are slightly polluted by Cr and Ni, and moderately polluted by As. Our results suggest that the intertidal surface sediments of Aphae Island are not polluted by organic matter or metallic elements and the benthic conditions are suitable for healthy organisms.

Key words: Organic matter, Metallic element, Sediment quality guideline (SQGs), Enrichment factor (EF), Geoaccumulation index (I_{geo}), Aphae Island

서 론

조간대(intertidal zone)는 조석에 따른 반복적인 해수면의 상승과 하강에 의해 만조시 잠기고 간조시 드러나는 연안의 비교적 평탄한 지역으로 우리나라에서는 흔히 '갯벌'로 불리우는 곳이다(Hwang et al., 2010). 이들 조간대는 강우, 바람 등의 기상 요소들과 조석, 파랑 등과 같은 해양요소들의 영향을 직·간접적으로 받아 퇴적환경 및 저서생태계의 변화가 급격하게 일어난다(Hwang et al., 2010; Jung et al., 2010). 하지만, 다채로운 형태의 퇴적 및 저서환경을 바탕으로 수많은 동식물이 서식하고 있는 생물 다양성 및 생산성이 높은 곳으로 예로부터 인위적으로 가꾸지 않고도 패류와 연체류 등의 수산생물을 채취할 수 있는 천혜의 자연환경으로 인식되어져 왔다. 또한, 패류 및 해조류 등

의 양식을 통해 어업인들의 소득을 증가시키는 삶의 터전이자 최근에는 기능성 식품 및 의약품 개발이 가능한 천연자원의 보고로서 그 보전 가치가 매우 높은 곳이다.

우리나라의 서해안은 약 18,000년 전 마지막 빙하기인 위스콘신 빙하기(Wisconsin glacial epoch) 이후 해빙에 의한 해수면 상승으로 하구, 만, 해빈, 사구 등 다양한 연안환경이 형성되었으며, 특히 평균조차가 4 m 이상인 조석이 우세한 대조차 환경으로 바뀌면서 육지로부터 공급되는 퇴적물이 쌓여 완만한 경사를 가진 조간대가 크게 발달하였다(Ryu et al., 1997, 1998; Ryu, 2003; Chang et al., 2007; MLTM, 2008). 현재, 갯벌의 보전 및 관리정책을 담당하고 있는 국토해양부에서 2008년 조사한 우리나라의 조간대 면적은 약 2,490 km²이며, 이중 서해안이 2,080 km² (약 84%)를 차지하고, 지역적으로는 전라남도에 1,037 km² (약 41%)로서 가장 많은 조간대를 가지고 있는 것으로 나타났다(<http://www.index.go.kr>). 그러나, 이는 1980년대 후반에 조

*Corresponding author: dwhwang@nfrdi.go.kr

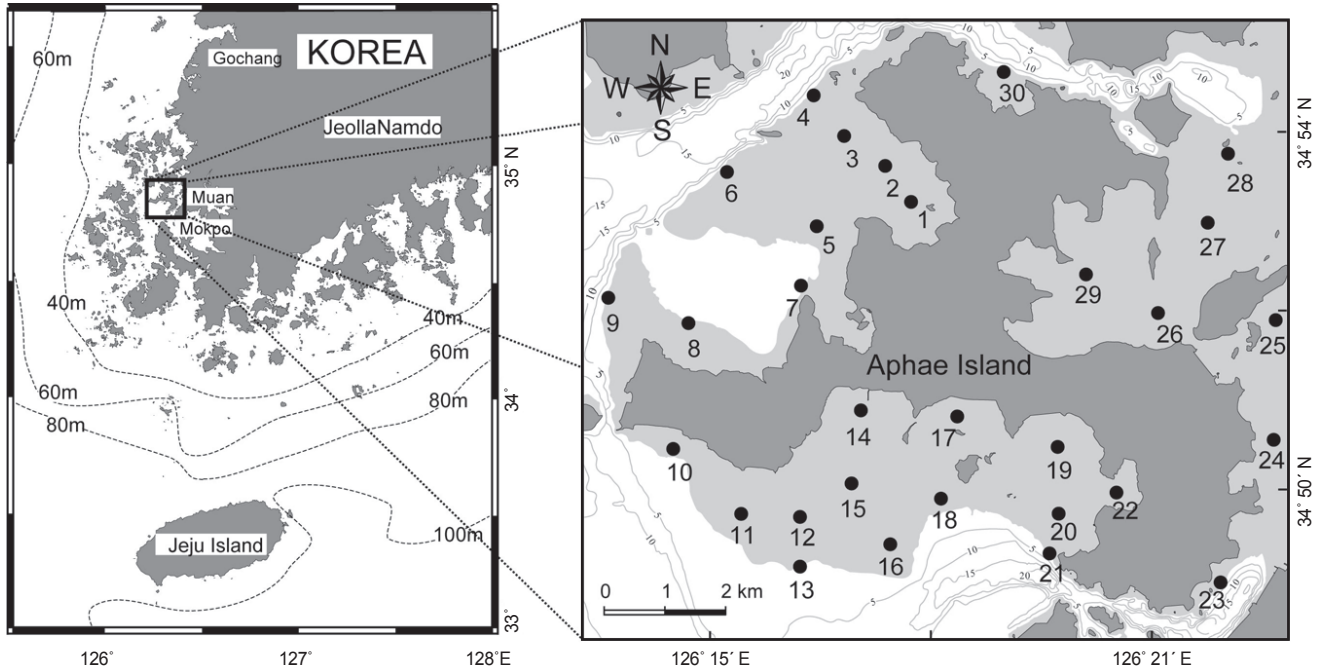


Fig. 1. A map showing the location of study area and the sampling sites for analyzing the organic matter and the metallic elements in intertidal surface sediments of Aphae Island in June 2010.

사된 우리나라의 조간대 면적(약 3,200 km²)에 비해 20% 이상 감소한 것으로 최근 완공된 새만금방조제나 시화방조제 건설, 인천 송도국제도시 및 영종도 인천국제공항 개발, 여수 울촌산업단지 건설 등에 따른 간척이나 매립과 같은 무분별한 연안개발의 결과이다.

한반도 남서해안에 위치한 영산강 하구역은 지난 1973년부터 시작된 영산강 유역 개발사업에 따라 1981년에 무안반도와 영암반도를 연결하는 영산강 하구둑이 건설되었고, 1992년부터는 공유수면 매립을 위해 하구남쪽의 영암반도와 화원반도를 잇는 영암 및 금호방조제가 완공되면서 해안선의 형태가 크게 바뀌었다(Cho and Park, 1998). 이로 인해 영산강으로부터 유입되던 퇴적물 유입량이 감소하고, 조위의 상승과 조류 흐름의 변화 등으로 퇴적물의 운반양상에 큰 변화가 생기고 하구 부근에 발달한 기존의 조간대가 많이 상실되는 등 연안 퇴적환경에 중요한 변화가 일어나고 있다(Kang et al., 1998; Park et al., 2001). 또한, 대규모 간척사업으로 1997년 전남 영암군에 완공된 대불국가산업단지 및 2000년대 중반부터 활발하게 조성되고 있는 영암농공단지, 그리고 인접한 목포시의 신도시 조성 및 신항 개발 등과 같은 연안지역의 산업화와 도시화로 육상으로부터 산업 폐수와 생활하수 등을 통해 유기화합물과 중금속을 비롯한 오염물질들이 지속적으로 유입되고 있다.

일반적으로 우리나라 연안에서 육상으로부터 유입된 퇴적물들의 대부분은 조간대를 비롯한 연안해역에 집적된다(Shin et al. 2002; Choi et al., 2010). 영산강 하구 또한, 하구둑과 방조제 건설이후 조류의 유속이 감소하여 외해수와의 교환이 원활하지

않아 육지로부터 유입된 퇴적물과 영양염류 및 금속원소를 포함한 오염물질들이 하구 주변에 위치한 조간대로 이동하여 쌓이면서 퇴적물 오염을 가중시키고 조간대 환경 변화를 야기하고 있다. 더욱이, 퇴적물의 입도 및 퇴적물에 포함되어 있는 유기물 함량, 황화수소와 금속원소의 변화는 조간대 환경에 서식하는 저서생물의 분포 및 성장과 함께 저서생태계 전반에 걸쳐 큰 영향을 준다(Hyun et al., 2003; Hwang et al., 2010). 따라서, 하구둑 및 방조제 건설이후 영산강 하구 인근 지역의 조간대 환경 특성을 파악하기 위하여 하구 인근에 위치한 조간대 퇴적물내 유기물과 금속원소의 분포특성 및 오염도를 평가할 필요가 있다.

이 연구의 목적은 영산강 유역개발 이후 육상으로부터 인위적인 오염의 영향이 받고 있는 전남 서해안 조간대 지역의 퇴적물중 유기물 및 금속원소의 농도를 조사하여 그 오염도를 평가하는데 있으며, 이를 위해 영산강 하구역 부근에 위치하고 넓은 연안 조간대를 가진 압해도를 연구지역으로 선정하여 퇴적물의 입도 및 유기물과 금속원소의 오염을 지시하는 다양한 지화학적 인자들(강열감량, 화학적산소요구량, 산취발성황화물, 금속원소)을 조사하였다.

재료 및 방법

연구지역

연구지역인 압해도는 한반도 남서쪽의 영산강 하구역에 위치한 북위 34° 45'–35° 00', 동경 126° 10'–126° 25' 사이에 있는

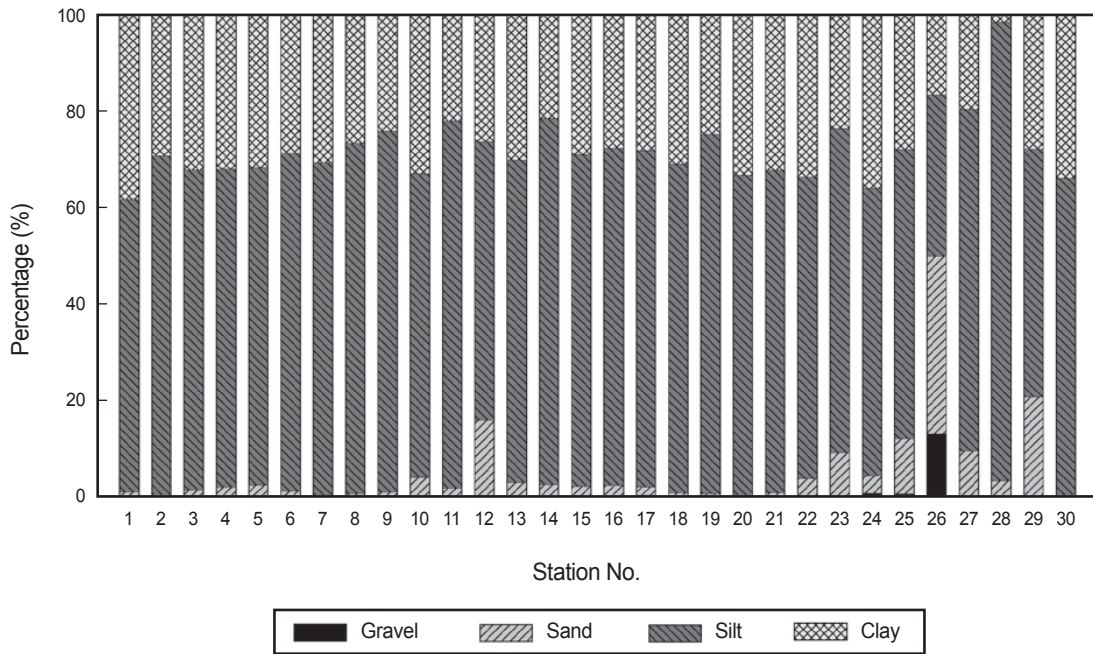


Fig. 2. The percentage composition of gravel, sand, silt, and clay in intertidal surface sediments of Aphae Island.

우리나라 서남단 다도해 섬중에서 목포와 가장 가까운 섬이다 (Fig. 1). 행정구역상 전라남도 신안군 압해면에 속해있으며, 총면적은 약 49 km²이고, 해안선 길이는 약 82 km로서 굴곡이 매우 심한 리아스식 해안으로 이루어져 있다. 섬 주변으로 약 60 km²의 넓은 조간대가 발달되어 있으며 만조시 수심은 3-5 m 정도이다(Lim et al., 2002).

동쪽과 북쪽으로는 무안반도, 서쪽으로는 자은-압태도, 남쪽으로는 화원반도 그리고 그 외 매화도, 고이도, 당사도, 가란도 등 크고 작은 섬으로 둘러싸여 있으며, 이로 인해 해수의 유동은 압해도를 중심으로 해저지형에 따라 공간적으로 큰 차이를 보이고 매우 복잡하다. 특히, 조류는 창조시 북동방향, 낙조시 남서 혹은 남쪽방향의 흐름을 보이고, 무안반도와 압해도 사이의 무안만내 폭 1 km내외의 주조류로(main tidal channel)에서는 강한 반면 압해도 남서쪽과 주변의 넓은 조간대 지역에서는 약한 매우 불균형을 이룬다. 조류의 최강유속은 압해도 남동쪽의 압해도와 목포사이에서 창조시 1.0 m/s, 낙조시 1.7 m/s로서 낙조류가 우세한 환경이다(Ryu et al., 2001). 조석은 반일주조석(semidiurnal tide)으로서 일주부등(diurnal inequality)을 보이며, 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).

지형적인 영향에 따른 해수유동, 조석, 그리고 조류 특성의 차이로 인해 연구지역 주변의 표층 퇴적물의 경우, 강한 조류 흐름과 파도의 영향을 받는 압해도 북동쪽의 무안만 남쪽과 서쪽 입구, 만내 주조류로와 일부 조간대 상부지역, 그리고 압해도 북서쪽의 탄도만 입구쪽의 주조류로를 중심으로 니사질역(muddy

sandy gravel) 혹은 역니질사(gravelly muddy sand)와 같은 다소 조립한 퇴적물이 분포하고 있고 그 외 무안만내 대부분의 조간대 지역과 압해도 북서쪽의 매화도, 고이도 주변 조간대, 그리고 영산강 하구를 포함한 압해도 남쪽 주변지역 등 연구지역을 중심으로 대부분의 지역은 니질(mud), 실트(silt), 점토(clay)와 같은 세립질 퇴적물로 이루어져 있다(Cho and Park, 1998; Jeon and Cho, 2002; Shin et al., 2002; Roh et al., 2007; MLTM, 2008; Hwang et al., 2010). 또한, 연구해역 부근의 지질은 선캄프리아기의 변성암복합체(metamorphic complex)를 기반암으로 고생대 후기의 변성퇴적암류, 이들을 관입하는 중생대 쥐라기 화강암류 및 그 위를 부정합적으로 덮고 있는 중생대 백악기 화산암류와 퇴적암류, 그리고 다시 이들을 관입하는 백악기 화강암류 등으로 이루어져 있으며, 특히 백악기 화산암류와 연구지역 주변에 광범위하게 분포하고 있다(Shin et al., 2002)

연구지역 주변의 연강수량은 약 1,600 mm로 계절적으로 큰 차이를 보이고, 담수의 유입은 약 3,400 km²의 유역면적과 하천 길이가 총 1,470 km 인 영산강을 통해 평균 5.5 × 10⁶ m³/day 가 유입되고 있다(Cho and Kim, 1998; Lee and Kim, 2003; Oh, 2007). 그러나, 계절적인 강수량의 차이와 영산강 하류에 건설된 하구둑의 배수갑문을 통해 방류량이 조절되기 때문에 해양으로 유입되는 담수와 이를 통한 부유물질의 양은 시기적으로 큰 차이를 보인다. 해수수온은 2.5-29.1℃ 범위로 겨울철의 경우 내만보다 외양쪽의 수온이 더 높고 여름철은 그 반대의 경향을 보이며, 염분은 13.3-33.9 psu 범위로 여름철 강우로 인한 담수의 유입으로 변화의 폭이 큰 반면 겨울철에는 변화의 폭은 적다 (Lim and Park, 1998).

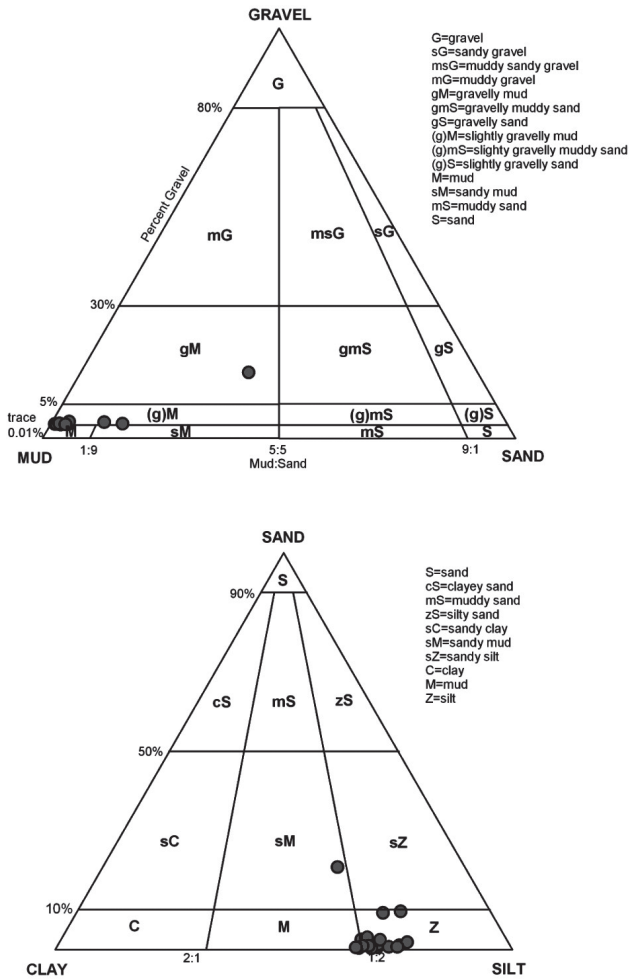


Fig. 3. The ternary diagrams showing the major sediment types of intertidal surface sediments in Aphae Island.

조사항목 및 분석방법

전남 서해안 조간대 퇴적물의 유기물 및 금속원소의 오염도를 평가하기 위하여 2010년 6월 만조시 소형어선(선외기)을 타고 압해도 주변 조간대내 총 30개 정점에서 채취기(Van Veen grab sampler)를 이용하여 퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 채취한 퇴적물 시료로부터 유기물 및 금속원소를 분석하기 위해 표면 0-2 cm 내의 퇴적물만을 미리 산세척한 고밀도폴리에틸렌병(high density polyethylene bottle)에 담아 냉장 및 냉동상태로 보관하여 실험실로 운반한 후 입도(grain size)와 함수율(water content, WC), 강열감량(ignition loss, IL), 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS), 그리고 금속원소(Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Cr, Mn, As, and Hg)를 Hwang et al.(2010)이 실시한 방법에 따라 분석하였으며, 이를 간단히 요약하면 다음과 같다.

먼저, 입도는 퇴적물 습시료 약 50 g을 비이커에 담아 이온교환수로 염분을 제거한 다음 10% 과산화수소(H₂O₂)와 0.1 N 염

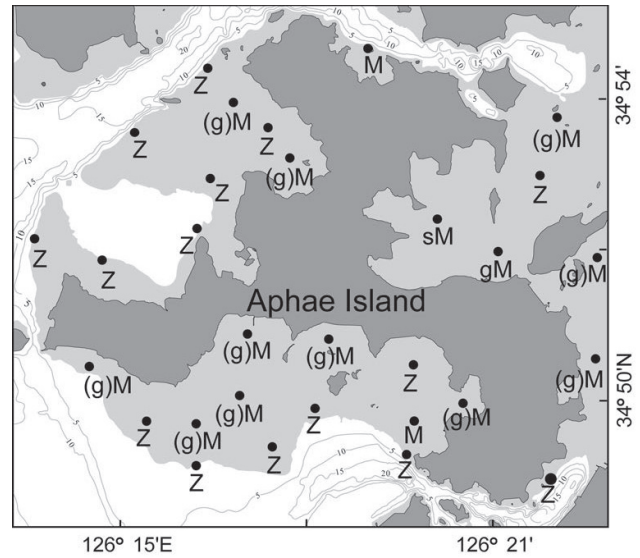


Fig. 4. The horizontal distribution of surface sediment in intertidal zone of Aphae Island (Abbreviations: Z, silt; M, mud; (g) M, slightly gravelly mud; gM, gravelly mud; sM, sandy mud).

산(HCl)을 차례로 넣고 유기물과 탄산염(CaCO₃)을 제거하였다. 이 퇴적물을 다시 이온교환수로 세척한 후 4 ϕ (0.0625 mm) 표준체에 물체질(wet sieving)을 하여 4 ϕ보다 큰 조립질 입자는 110℃에서 24시간 동안 건조하여 진탕기(Ro-tap sieve shaker, Fritsch, Anaiysette 3)로 약 20분간 건식체질(dry sieving)을 한 다음 1 ϕ 간격으로 무게를 구하였다. 4 ϕ보다 작은 세립질 입자는 일정시간에 피펫하여 미리 무게를 달아놓은 비이커에 옮겨 담은 후 완전히 건조하여 시료무게를 구하였다. 여기서 측정된 모든 자료는 그래픽 방법에 의해 처리하였고, 퇴적물의 특성을 나타내는 평균입도(mean grain size, Mz), 분급도(sorting), 왜도(skewness) 및 첨도(kurtosis)등 통계적 변수는 Folk and Ward(1957)의 계산식에 의하여 구하였으며, 퇴적상의 분류는 Folk (1968)의 방법에 따랐다.

WC와 IL은 습시료 약 20 g을 비이커에 담아 건조기에 넣고 110℃에서 24시간 건조한 후 비이커의 무게를 측정하였고, 이후 건조된 시료를 곱게 분쇄한 다음 도가니에 담아 전기로에 넣어 550℃에서 2시간 동안 회화시킨 후 도가니의 무게를 측정하여 건조 및 회화 후 무게차이로 계산하였다. COD는 습시료 약 1-2 g을 삼각플라스크에 담아 0.1N 과망간산칼륨(KMnO₄)과 10% 수산화나트륨(NaOH)을 넣고 잘 혼합한 다음 1시간 동안 증탕하였다. 그 후 실온으로 냉각시켜 10% 요오드화칼륨(KI)과 4% 아지드화나트륨(NaN₃)을 넣은 다음, 여기에 증류수를 가해 500 mL로 만든 후 유리섬유여과지로 여과하였다. 이때, 여과한 용액 100 mL를 취하여 30% 황산(H₂SO₄)을 넣고 이를 0.1 N 티오황산나트륨(Na₂S₂O₃·5H₂O) 용액으로 적정할 후 계산하였다. AVS는 습시료 약 2-3 g을 황화수소(H₂S) 발생관에 담은 후 약간의 증류수를 넣고 뚜껑을 닫은 다음, 황산 2 mL를 넣어 이때

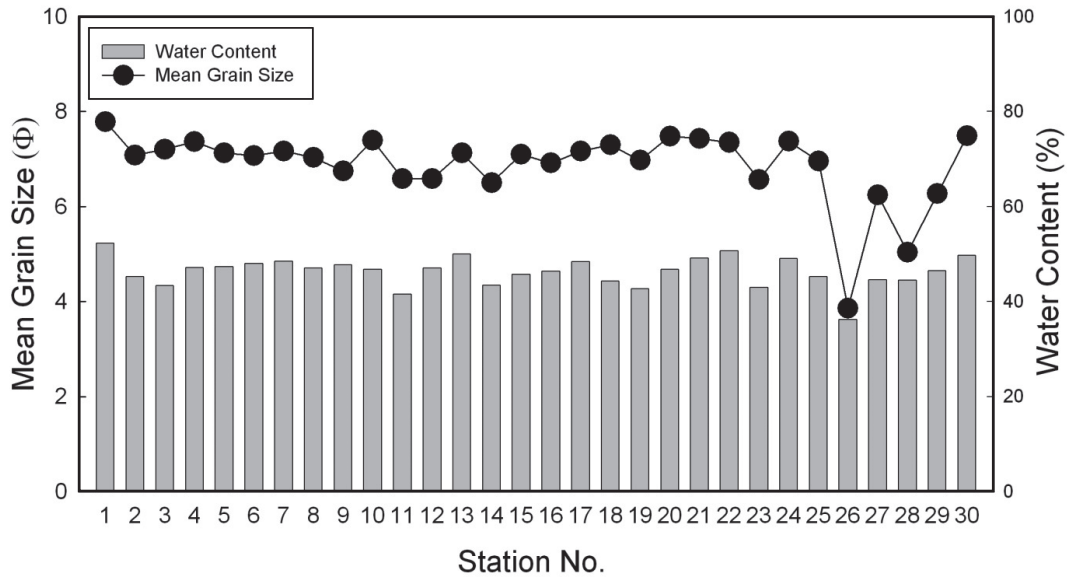


Fig. 5. The mean grain size and the water content of intertidal surface sediments with each station in Aphae Island.

Table 1. Certified and analytical values and recovery of metallic elements for the reference material (MESS-3)

Metallic element	Certified value (mg kg ⁻¹)		Analytical value (mg kg ⁻¹)		Recovery (%)	
Fe	43400	± 110	39800	± 300	92	± 1
Mn	324	± 12	318	± 6	98	± 2
Zn	159	± 8	166	± 3	104	± 2
Cr	105	± 4	106	± 2	101	± 2
Pb	21.1	± 0.7	20.3	± 0.2	96	± 1
Ni	46.9	± 2.2	47.7	± 1.3	102	± 3
Cu	33.9	± 1.6	33.9	± 0.9	100	± 3
As	21.2	± 1.1	21.5	± 2.5	101	± 12
Cd	0.24	± 0.01	0.25	± 0.01	105	± 4
Hg	0.091	± 0.009	0.089	± 0.005	98	± 6

발생하는 황화수소를 검지관에 흡수시켜 그 값으로부터 계산하였다.

금속원소는 습시료를 -80℃에서 동결건조한 후 플라스틱 재질의 채(φ < 63 μm)로 채질하여 통과된 퇴적물을 사용하였다. 채를 통과한 퇴적물 약 1 g을 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 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, ELAN 9000)로 측정하였으며, 수은의 경우에는 자동수은분석기(Milestone, DMA 80)로 측정하였다. 금속원소에 대한 분석자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 인증표준물질(certified reference material)로서 캐나다 국가연구위원회(National Research Council Canada) 산하 연구소에서 제공하는 MESS-3 (marine sediment)를 이용하였으며, 이때 각 금속원

소의 회수율은 92-105% 범위로 Fe을 제외한 모든 금속원소들이 인증농도의 신뢰수준 범위였다(Table 1).

금속원소의 오염평가

연안 퇴적물 내 금속원소는 연안해역에서의 급격한 생지화학적 환경변화를 반영하고, 해수와 달리 주변의 금속에 대한 오염의 기록을 장기간 보존하는 특성을 가지고 있어서 그 지역의 금속에 대한 오염의 지표로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 오염물질의 유입과정과 오염역사를 추적하는 단서로 사용된다(Choi et al., 1999; Jeon and Cho, 2002; Hwang et al., 2006). 이러한 퇴적물내 금속원소의 오염에 대한 평가는 주로 분석된 금속원소의 농도를 오염되지 않은 지역에서의 자연적인 농도와 비교하는 방법이 이용되며, 그 방법으로는 농축계수(enrichment factor, EF), 농집지수(geoaccumulation index, I_{geo}), 농축비(concentration

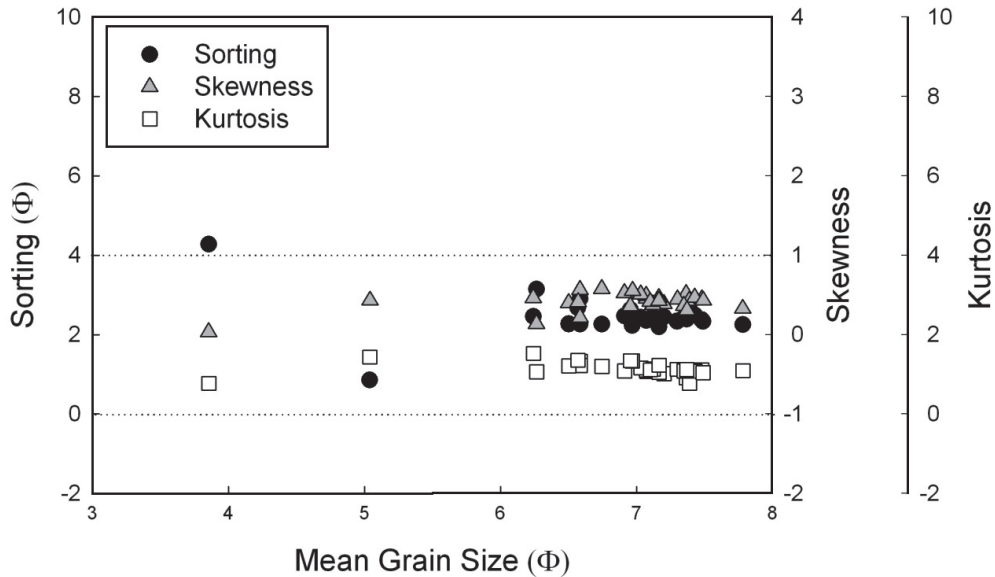


Fig. 6. Plots of mean grain size versus sorting, skewness, and kurtosis of intertidal surface sediments in Aphae Island.

enrichment ratio), 오염지수(metal pollution index) 등 다양한 방법이 있다. 또한, 최근에는 퇴적물내 미량금속의 농도에 따른 생물의 영향을 고려한 각 나라별로 설정해 놓은 금속원소의 오염기준(sediment quality guidelines; SQGs)을 적용하여 평가하기도 한다(Hwang et al., 2010).

이 연구에서는 압해도 주변 조간대 표층 퇴적물내 금속원소의 오염 정도를 파악하기 위해 먼저, 연구지역내 퇴적물중 금속원소의 농도와 현재 우리나라에 퇴적물중 금속원소의 오염기준이 없어 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 권고하고 있는 ERL(effect range low) - ERM (effect range median) 값(Buchman, 2008)을 비교하였으며, 표층 퇴적물에 있어서는 오염기준 외에 EF와 I_{geo} 를 계산하여 오염정도를 파악하였다. 여기서, EF는 퇴적물내 광물의 구성비율을 고려한 금속원소의 함량을 보정하는 방법으로 이를 위해 각 금속원소와 지각물질 중에 높은 농도로 존재하고 오염의 영향이 적은 Al이나 혹은 Fe의 농도비를 이용하는데, 이 연구에서는 퇴적물중 Al에 대한 분석이 이루어지지 않았기 때문에 연구지역내 Fe에 대한 각 금속원소의 농도비를 기초로 다음의 식(Eq. 1)을 이용하여 EF 값을 계산하였다.

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

여기서 $(\text{Me/Fe})_{\text{Observed}}$ 는 연구지역 내 퇴적물 중 Fe에 대한 각 금속원소의 농도비를 말하고, $(\text{Me/Fe})_{\text{Crust}}$ 는 전세계 연안 대륙붕지역의 퇴적물 중 Fe에 대한 각 금속원소의 농도비를 의미하며, 전 세계 연안 대륙붕지역의 퇴적물 중 각원소의 평균농도는 Taylor (1964)와 Taylor and McLennan (1995)이 보고한 농도를 이용하였다. EF와 함께 연구지역의 표층 퇴적물중 금속원소

의 오염을 정량적으로 평가하기 위한 I_{geo} 는 다음의 식(Eq. 2)을 이용하여 계산하였다.

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

여기서, C_n 은 연구지역내 퇴적물 중 금속원소의 농도를, B_n 은 금속원소의 바탕농도(background or reference concentration)를 나타낸다. 일반적으로 금속원소의 바탕농도는 세일이나 지각물질의 평균농도를 사용하며, 때로는 해당 연구지역에서 오염원의 영향을 가장 적게 받는 지역의 농도값 혹은 가장 낮은 농도의 값을 사용하는 경우도 있다(Martin and Whitefield, 1983; Sahu and Bhosale, 1991; Jeon and Cho, 2002; Hyun et al., 2003; Hwang et al., 2006). 따라서, 이 연구에서는 EF계산에서와 마찬가지로 전세계 연안 대륙붕지역의 퇴적물 중 각 원소의 평균농도(Taylor, 1964; Taylor and McLennan, 1995)를 바탕농도로 사용하였다.

결과 및 고찰

표층 퇴적물의 입도 및 통계학적 특성

연구지역을 포함한 우리나라 남서해안은 영산강과 같은 큰 강을 끼고 있고 큰 조차와 비교적 얇은 수심, 굴곡이 심한 리아스식 해안과 주변의 많은 섬들로 이루어져 부유입자의 퇴적물이 비교적 높고 해저지형 및 퇴적환경의 변화가 심한 곳으로 알려져 있다(Ryu et al., 2001; Jeon and Cho, 2002; Shin et al., 2002). 일반적으로 큰 강을 끼고 있는 지역에서 연안 퇴적물의 형성에는 퇴적입자를 공급하는 주변 육지의 영향이 큰 것으로 알려져 있으나 연구지역의 경우에는 최근 만들어진 하구둑과 방

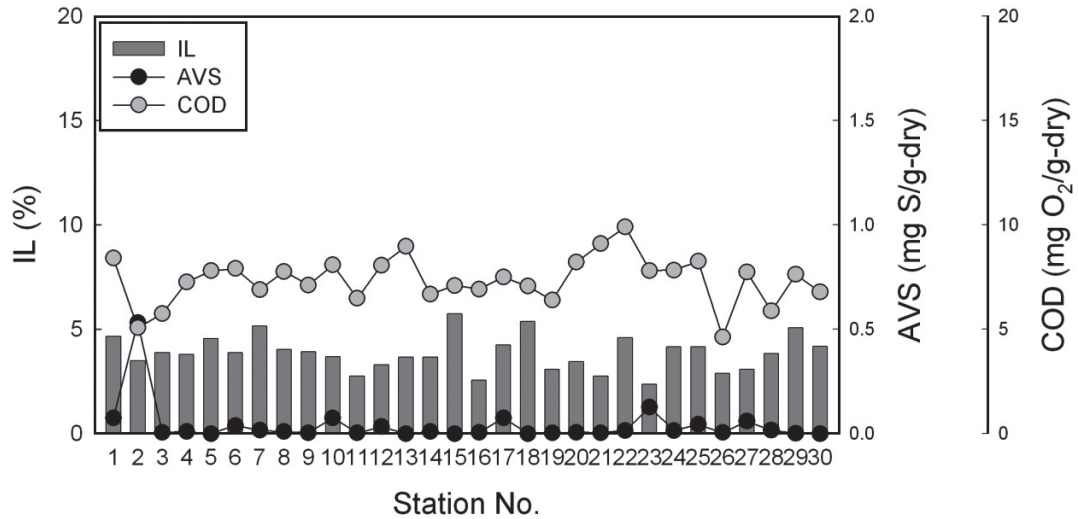


Fig. 7. The content of ignition loss (IL) and the concentrations of chemical oxygen demand (COD) and acid volatile sulfide (AVS) with each station in intertidal surface sediments of Aphae Island.

조제 등의 영향으로 주변 육지의 영향보다는 오히려 조류, 파랑 등과 같은 해양학적 요인들이 더 많은 영향을 줄 수 있다.

입도분석결과, 연구지역내 표층 퇴적물중 자갈은 0-13.2%(평균 $0.5 \pm 2.4\%$), 모래는 0.3-36.8% (평균 $4.9 \pm 7.7\%$), 실트와 점토는 각각 33.4-95.0% (평균 $66.8 \pm 9.8\%$), 1.6-38.3% (평균 $27.8 \pm 7.0\%$) 범위로서 압해도 북동쪽의 신장리 앞 조간대 정점 St. 26과 북용리 앞 조간대 정점 St. 29을 제외하면 거의 모든 정점에서 약 60% 이상의 높은 실트 함량을 보였다(Fig. 2). 각 정점별 자갈, 모래, 실트, 점토 함량을 기초로 Folk (1968)의 삼각좌표에 도시한 결과, 표층 퇴적물은 실트(Z, silt), 니(M, mud), 사질니(sM, sandy mud), 약역질니((g)M, slightly gravelly mud), 역질니(gM, slightly gravelly mud)의 5개 퇴적물 유형(sedimentary type)으로 분류되었으며, 퇴적물의 조직특성에 따라 크게 약역질니((g)M)와 실트(Z) 2개의 퇴적상(sedimentary facies)으로 구분되었다(Fig. 3). 약역질니 퇴적상은 주로 연구지역의 남서쪽과 동쪽에 위치한 신안군 대천리와 신장리 조간대 육지쪽에 넓게 분포하고, 실트 퇴적상은 연구지역의 북서쪽 송광리와 신용리 조간대와 남쪽의 대천리 조간대-조하대 경계부근에 주로 분포하였다(Fig. 4). 이러한 퇴적물의 분포는 창조시 북동방향, 낙조시 남서 혹은 남쪽방향의 흐름을 보이는 압해도 주변 조류 흐름과 파랑과 관련이 있는 것으로 생각된다.

연구지역내 표층 퇴적물중 WC는 36-52% 범위로 다른 정점에 비해 상대적으로 자갈과 모래의 함량이 높았던 북동쪽 신장리 앞 조간대에 위치한 정점 St. 26에서 다소 낮았다(Fig. 5). 연구지역내 퇴적물의 통계학적 특성을 살펴보면, Mz는 $3.9-7.8 \phi$ (평균 $6.9 \pm 0.8 \phi$) 범위로 압해도 북동쪽의 신장리 앞 조간대 정점 St. 26과 북용리 앞 조간대 정점 St. 28을 제외하면 거의 모든 정점에서 조립실트(coarse silt, 6.0ϕ)와 세립실트(fine silt, 8.0ϕ) 사이로 입도의 분포범위가 매우 좁았으며, 전체적으로

는 중립실트(medium silt)가 매우 우세하였다(Fig. 5). 이와 같이 입도의 분포범위가 좁다는 것은 연구지역내 퇴적물의 기원이 비슷하다는 것을 의미한다. 퇴적물의 입도가 얼마나 균일한가를 나타내는 분급도(sorting)는 $0.9-4.3 \phi$ (평균 $2.5 \pm 0.5 \phi$) 범위로 보통인 분급(moderately sorted)과 지극히 불량한 분급(extremely poorly sorted) 사이였으며, Mz와 마찬가지로 압해도 북동쪽의 신장리와 북용리 앞 조간대 정점 St. 26과 St. 28을 제외하면 거의 모든 정점이 $2.0-3.0 \phi$ 사이의 매우 불량한 분급(very poorly sorted)을 나타내었다(Fig. 6). 왜도(skewness)는 $0.0-0.6$ (평균 0.4 ± 0.1)의 범위로 모든 지역에서 양의 왜도(positively skewed)를 보이며 매우 균질한 분포양상을 보였으며, 퇴적물의 분산정도를 나타내는 첨도는 $0.8-1.5$ (평균 1.1 ± 0.2) 범위로 대부분의 퇴적물이 입도분포 곡선이 중앙에 집중된 형태(leptokurtic)를 나타내었다(Fig. 6).

퇴적물의 유기물 함량 및 오염도 평가

최근, 우리나라 연안해역은 양식산업의 발달로 어류를 비롯한 해조류, 패류 양식어장이 급격히 증가하였으며, 이러한 주변 해역은 양식생물의 사체나 배설물, 그리고 과잉공급된 먹이의 침강으로 해서 퇴적물내 유기물 오염이 광범위하게 발생하고 있다(Yoon, 2000; Noh et al., 2006). 연구지역 또한, 주변에 해조류 및 패류양식장이 밀집되어 있고, 인근 영산강을 통해 육상으로부터 유기오염물질의 유입으로 퇴적물내 유기물 오염이 예상된다. 따라서, 연구지역내 퇴적물내 유기물의 오염정도를 알아보기 위하여 현재 오염평가에 널리 이용되고 있는 IL, COD, 및 AVS 함량을 Fig. 7에 나타내었다.

퇴적물중 IL은 $2.4-5.7\%$ (평균 $3.9 \pm 0.8\%$) 범위로 압해도 남쪽 대천리 앞 조간대 정점 St. 15에서 가장 높고 압해도 남동쪽 조간대 정점 St. 23에서 가장 낮았다. 특히, 압해도 남쪽 조간대-

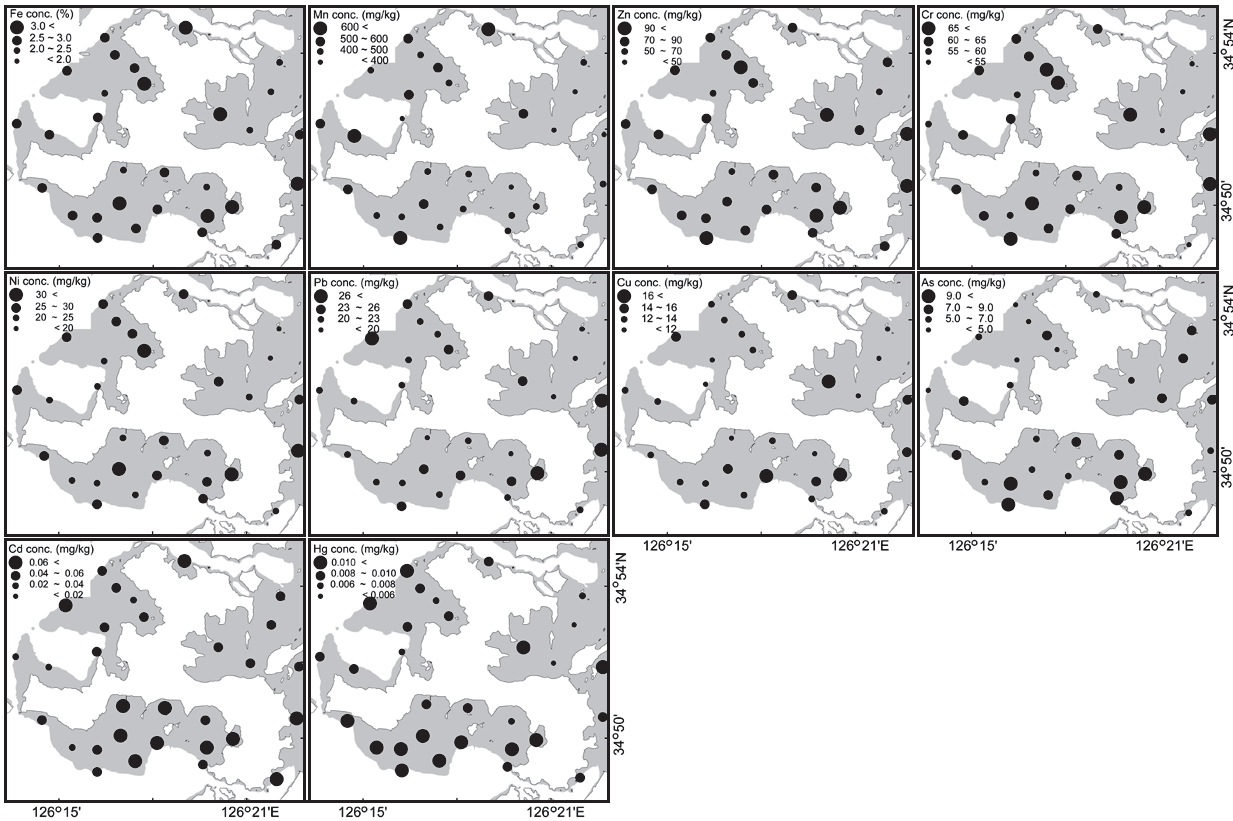


Fig. 8. The horizontal distributions of each metallic element (Fe, Mn, Zn, Cr, Pb, Ni, Cu, As, Cd, and Hg) in intertidal surface sediments of Aphae Island.

조하대 경계부근에 위치한 정점들에서 다소 낮은 강열감량을 보였다. 지금까지 조사된 우리나라의 다른 지역과 비교했을 때, 연구지역의 퇴적물내 IL평균값은 서해중부의 변산반도 조간대 (Jung et al., 2010)에서 조사된 결과보다는 높았으나, 연구지역과 인접한 영광과 무안 부근 조간대(Hwang et al., 2010)와 서해 중부의 새만금 조간대(Kim et al., 2003)에서 조사된 결과와는 유사하였다. 또한, 남해안의 득량만(Yoon, 2003), 여자만(Hue et al., 2000), 가막만(Noh et al, 2006) 등 양식활동이 활발하게 이루어지고 있는 반폐쇄적인 내만의 조하대 지역의 어장주변해역보다는 낮은 농도였다(Table 2).

퇴적물중 COD 농도는 4.6-9.9 mgO₂/g-dry (평균 7.4±1.1 mgO₂/g-dry) 범위로 다른 정점에 비해 조립질 퇴적물로 이루어진 압해도 북동쪽 신장리 앞 조간대 정점 St. 26 가장 낮고, 압해도 남서쪽 분매리 조간대 정점 St. 22에서 가장 높았다. IL과 마찬가지로 연구지역의 퇴적물내 COD평균값은 영광과 무안 부근 조간대(Hwang et al., 2010)에서 조사된 결과와는 유사하였고, 서해 중부의 새만금(Kim et al., 2003)과 변산반도(Jung et al., 2010) 조간대 보다는 다소 높았다. 그러나, 남해안의 여자만(Hue et al., 2000)과 가막만(Noh et al., 2006) 등 양식활동이 활발하게 이루어지고 있는 반폐쇄적인 내만의 조하대 지역의 어장주변해역보다는 매우 낮았다(Table 2). 특히, 연구지역내 모든

정점에서 COD 농도는 일본에서 퇴적물내 유기물 오염의 기준으로 제시하는 농도기준인 20 mgO₂/g-dry (Yoon, 2003) 보다 1/2 이하로 매우 낮았다.

퇴적물중 AVS 농도는 ND-0.53 mgS/g-dry (평균 0.04±0.10 mgS/g-dry) 범위로 다른 정점들에 비해 상대적으로 높은 AVS 농도를 보이는 연구지역의 북서쪽 신용리 조간대 앞 정점 St. 2을 제외하면, 대부분의 정점에서 AVS가 검출되지 않거나 검출되어도 0.05 mgS/g-dry 이하의 낮은 농도를 보였다. 특히, 연구지역내 퇴적물중 AVS 농도는 일본에서 퇴적물중 유기물 오염의 기준으로서 제시하는 AVS 농도기준인 0.2 mgS/g-dry (Yoon, 2003) 보다 1/4 이하로 매우 낮은 농도였다.

이상의 압해도 연안 표층 퇴적물의 유기물에 대한 평가 결과를 종합해 보면, 압해도 연안 조간대 퇴적물은 아직 유기물에 대해 오염이 되지 않은 것으로 생각된다. 한편, 일반적으로 퇴적물내 유기물 함량은 입도와 관련이 있고 세립질 퇴적물일수록 유기물 함량이 높은 것으로 알려져 있다(Cho and Park, 1998; Hwang et al., 2006, 2010). 그러나, 본 연구에서 퇴적물의 입도와 유기물 특성을 나타내는 IL, COD 및 AVS는 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다. 이는 연구지역내 유기물 함량을 조절하는 다른 요인이 있으며, 그 요인으로서 연구지역의 퇴적물에 서식하는 저서생물의 분포특성과 관련이 있는 것으로 생각된다. 이전

Table 2. The content of ignition loss (IL) and the concentrations of chemical oxygen demand (COD) and acid volatile sulfide (AVS) in coastal sediment of Korea. The parenthesis represents the average of each parameter in surface sediment

Study Region	Sampling Zone	IL (%)	COD (mgO ₂ /g-dry)	AVS (mgS/g-dry)	Reference
Deukryang Bay	Sublittoral Zone	3.1~21.5 (5.6)	0.4~18.2 (5.7)	ND~3.30 (0.36)	Yoon (2003)
Yeoja Bay	Sublittoral Zone	6.2~12.2 (8.9)	5.5~29.7 (13.2)	0.02~0.10 (0.05)	Hue et al. (2000)
Gamak Bay	Sublittoral Zone	4.6~11.6 (7.1)	2.3~99.3 (31.0)	ND~10.3 (1.02)	Noh et al. (2006)
Saemanguem (inner)	Intertidal Zone	0.5~5.8 (2.2)	1.0~10.8 (3.5)	0.10~1.56 (0.75)	Kim et al. (2003)
Southwestern Coast of Korea (Yeonggwang-Muan)	Intertidal Zone	0.8~5.5 (2.9)	3.9~13.8 (8.5)	ND	Hwang et al. (2010)
Byeonsan Peninsula	Intertidal Zone	0.2~2.8 (1.4)	0.2~18.5 (3.9)	ND	Jung et al. (2010)
Aphae Island	Intertidal Zone	2.4~5.7 (3.9 ± 0.8)	4.6~9.9 (7.4 ± 1.1)	ND~0.53 (0.04 ± 0.10)	This study

* ND = Not Detected.

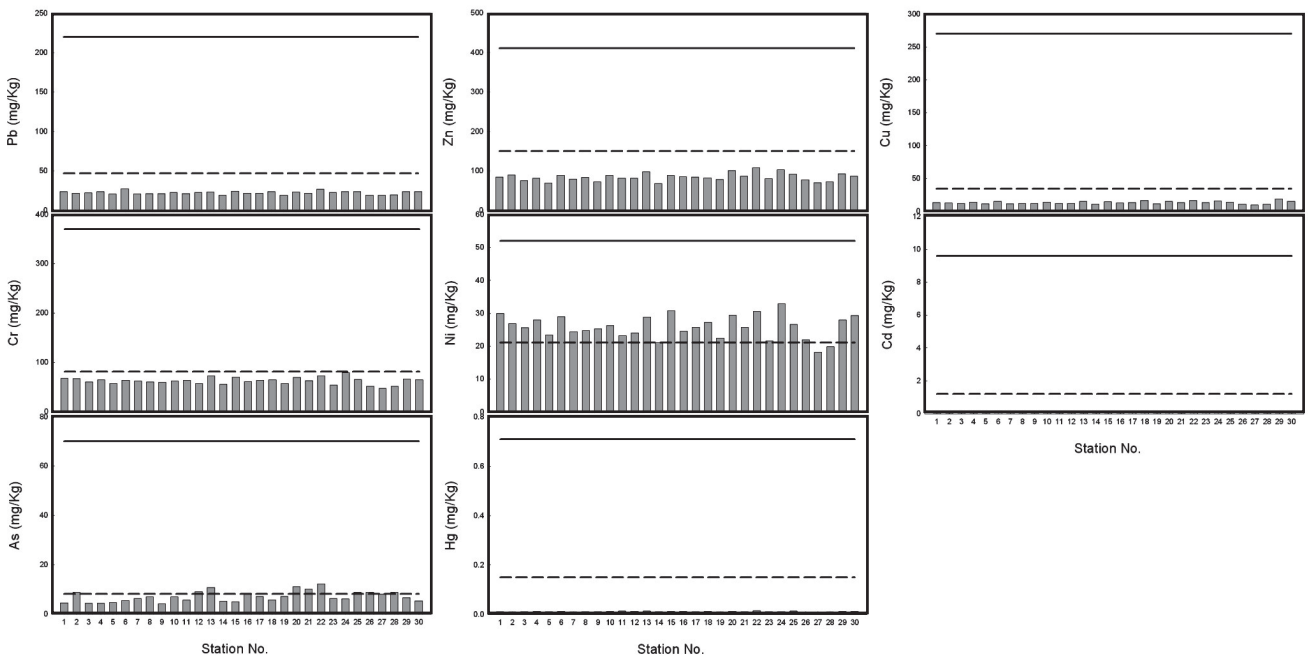


Fig. 9. The concentrations of metallic elements (Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Cd, As, and Hg) with each station in intertidal surface sediments of Aphae Island. The dotted and solid lines represent the values of ERL (effect range low) and ERM (effect range median) proposed by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) as the sediment quality guidelines, respectively.

에 Lim et al. (2002)은 같은 연구지역에서 갑각류와 연체동물의 생체량과 밀도가 퇴적물내 유기물 함량과 양의 상관관계를 보인다고 보고한 바 있다.

퇴적물의 금속원소 함량 및 오염도 평가

연구지역내 표층 퇴적물중 금속원소를 측정된 결과, 철(Fe) 2.2-3.5% (평균 2.8 ± 0.3%), 망간(Mn) 300-660 mg/kg (평균

476 ± 83 mg/kg), 아연(Zn) 68-109 mg/kg (평균 84 ± 10 mg/kg), 크롬(Cr) 47.4-78.9 mg/kg (평균 62.5 ± 6.9 mg/kg), 니켈(Ni) 18.2-32.9 mg/kg (평균 25.8 ± 3.5 mg/kg), 납(Pb) 19.1-27.4 mg/kg (평균 22.4 ± 2.1 mg/kg), 구리(Cu) 9.5-18.5 g/kg (평균 13.2 ± 2.0 mg/kg), 비소(As) 4.2-12.2 mg/kg (평균 7.1 ± 2.2 mg/kg), 카드뮴(Cd) 0.03-0.15 mg/kg (평균 0.06 ± 0.03 mg/kg), 수은(Hg) 0.006-0.013 mg/kg (평균 0.009 ± 0.002 mg/

Table 3. The mean grain size (Mz) and the average concentrations of metallic elements in coastal sediment of Korea

Region	Mz (ϕ)	Metals (%)		Metals (mg/kg)								Reference
		Al	Fe	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn	As	Hg	
Youngil Bay	3.8	6.0	2.4	49	36	202	1.5	29	-	-	-	Lee et al. (2008)
Ulsan Bay	-	-	-	60	63	46	2.2	237	570	-	-	Kang and Lee (1996)
Nakdong River Estuary	4.2	6.4	1.9	9	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	716	11	0.14	Hwang et al. (2006)
Masan Bay	8.3	-	-	43	44	206	1.2	67	-	-	-	Hyun et al. (2007)
Continental Shelf	5.2	5.1	2.5	11	27	62	-	53	-	-	-	Cho et al. (1994)
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 (inner part)	-	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	10	25	70	0.05	51	448	5.6	0.01	Hwang et al. (2010)
Aphae Island	6.9	-	2.8	13	22	84	0.06	63	476	7.1	0.01	This study

Table 4. Ratios of metallic elements relative to Fe in intertidal surface sediment of Aphae Island 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	Ni/Fe	As/Fe	Cd/Fe	Hg/Fe	
Aphae Island	17.1	3.02	0.80	0.47	2.24	0.92	0.26	0.023	0.003	
Earth's crust	17.1	2.03	0.57	0.71	1.00	0.57	0.04	0.028	0.023	
Enrichment Factor	1.00	1.49	1.41	0.66	2.24	1.61	5.98	0.82	0.15	

kg) 범위였다. 대체로 압해도 북서쪽의 신용리 앞 조간대 육지쪽 지역과 동쪽의 신장리 앞 조간대 지역의 일부 정점에서 다른 정점에 비해 다소 농도가 높았으며, 같은 조간대 내 공간분포에 있어서도 비슷한 입도임에도 불구하고 각 정점별로 약간의 차이를 나타내었다(Fig. 8). 특히, 본 연구에서는 금속원소의 농도와 퇴적물의 입도 및 유기물 함량사이에 좋은 상관성을 보이지 않았다. 일반적으로 연안해역에서 퇴적물중 금속원소의 농도는 퇴적물의 입도와 유기물 함량과 같이 특정 요인에 의해 조절되기는 하나, 대부분 다양한 요인들이 복합적으로 작용함으로써 그 농도를 달리한다(Choi et al., 2010). 따라서, 연구지역내 퇴적물중 금속원소의 농도는 앞서 살펴본 유기물 함량과 같이 다른 농도 조절 요인이 있으며, 그 요인으로서 저서생물의 수직활동에 의한 생물교란(bioturbation) 혹은 조석작용에 의한 퇴적물의 재부유(resuspension), 그리고 연구지역 인근의 인위적인 오염원으로부터의 영향 등과 같은 이차적인 요인에 의해 그 차이를 보이는 것으로 생각된다. 한편, 연구지역내 금속원소의 농도는 연구지역과 인접한 함평만과 영광-무안 부근 조간대 지역에서 조사된 금속원소의 농도와 비슷한 반면 진해만, 마산만 등과 같이 우리나라 주변의 반폐쇄적인 내만해역이나 영산강 하구역에서 측정된 금속원소들의 평균농도보다 대부분 낮았다(Table 3).

압해도 연안 조간대 표층 퇴적물내 금속원소의 오염도를 알아보기 위하여 앞서 본문 2.2에서 제시한 다양한 지화학적 평가 방법(SQGs, EF, I_{geo})을 이용하였다. 먼저 최근에 미국 NOAA에서 권고하는 퇴적물 오염기준에 따르면, 각 원소별 하위농도 기준(ERL)과 상위농도기준(ERM)은 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 였다(Buchman, 2008). 이를 연구지역내 표층 퇴적물중 금속원소의 농도와 비교해 보면, Cu, Cr, Pb, Zn, Cd, Hg은 모든 정점에서 하위농도기준인 ERL 보다 낮았으나, As는 일부정점에서, Ni의 경우에는 거의 모든 정점에서 ERL 기준을 초과하였다(Fig. 9).

압해도 주변 조간대 표층 퇴적물의 오염도를 평가하기 위하여 계산한 EF 값을 Table 4에 나타내었다. 이 연구에서 EF 값의 계산은 앞서 2.3 금속원소의 오염평가 부분에서 설명하였듯이, 연구지역내 퇴적물중 Fe 에 대한 각 금속원소의 농도비는 연구지역내 퇴적물중 각 금속원소의 평균농도(Fe 2.8%, Mn 476 mg/kg, Zn 84 mg/kg, Cr 62.5 mg/kg, Ni 25.8 mg/kg, Pb 22.4 mg/kg, Cu 13.2 mg/kg, As 7.1 mg/kg, Cd 0.06 mg/kg, Hg

0.009 mg/kg)로부터 계산하였으며, 지각 물질 중 Fe에 대한 각 금속원소의 평균 농도비는 Taylor (1964)와 Taylor and McLennan (1995)이 제시한 전 세계 연안 대륙붕지역의 퇴적물 중 각 금속원소의 평균농도(Fe 3.5%, Mn 600 mg/kg, Zn 71 mg/kg, Cr 35 mg/kg, Ni 20 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 계산하였다. 최근에 Chen et al. (2007)은 금속원소의 EF 값을 기준으로, EF < 1 일때 오염이 되지 않은 상태(no enrichment), EF = 1-3 일때 약간 오염상태(minor enrichment), EF = 3-5 일때 적당한 오염상태(moderate enrichment), EF = 5-10 일때 적당히 심한 오염상태(moderately severe enrichment), EF = 10-25 일때 심한 오염상태(severe enrichment), EF = 25-50 일때 매우 심한 오염상태(very severe enrichment), 그리고 EF > 50 일때 극히 심한 오염상태(extremely severe enrichment) 라고 분류하였다. 이를 바탕으로 연구지역내 금속원소의 오염도를 살펴보면, 앞서 SQGs를 이용한 결과와 유사하게, 연구지역내 퇴적물의 경우 Cu, Cd, Hg, Mn은 EF값이 1 보다 낮아 오염되어 있지 않은 상태(no enrichment)인 것으로 나타났으나, Cr, Pb, Zn, Ni 은 EF값이 1-3 사이로 약간 오염된 상태(minor enrichment)를, As 는 EF값이 5-10 사이로 적당히 심한 오염상태(moderate severe enrichment)를 나타내었다.

금속원소의 오염을 보다 정량적으로 평가하기 위하여 최근에 널리 이용되는 방법인 I_{geo} 는 그 값에 따라 총 7개 등급으로 구분되며(Jeon and Cho, 2002; Hyun et al., 2003; Hwang et al., 2010), 연구지역내 표층 퇴적물에 대한 계산결과를 Table 5에 표시하였다. 앞선 두 개의 퇴적물 오염평가 결과와 유사하게, 압해도 연안 조간대 표층 퇴적물의 경우 Fe, Mn, Cu, Pb, Hg은 모든 정점에서 그리고 Zn, Cd, Ni은 거의 대부분의 정점에서 I_{geo} class가 0으로 오염되지 않은 수준(practically unpolluted)인 것으로 나타났고, Cr 경우에는 대부분의 정점에서 I_{geo} class가 1로 오염되지 않은 수준과 약간 오염된 수준의 중간단계인 것으로 나타났다. 그러나, As 의 경우에는 거의 대부분의 정점에서 I_{geo} class가 2 이상으로 약간 오염된 수준(moderately polluted)이었다.

이상의 압해도 연안 표층 퇴적물의 금속원소에 대한 오염도 평가 결과를 종합해 보면, 연구지역내 퇴적물내 금속원소중 Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cd, Hg은 모든 지역에서 오염되지 않은 반면, Cr과 Ni은 약간 오염된 수준이며, 특히 As는 다른 금속에 비해 상대적으로 오염된 것으로 나타났다. 이 같은 결과는 이전에 Hwang et al. (2010)이 연구지역과 인접한 영광-무안 연안 지역의 조간대 퇴적물에서도 보고한 바 있으며, 조간대 표층 퇴적물내 As의 농도가 높은 원인으로서 연구지역 주변의 농사를 짓는 과정에서 사용된 살충제 및 살초제에 의해 오염된 지하수가 해저지하수의 형태로 연안으로 유입되었기 때문이라고 제시되었다. 그러나, 우리나라의 경우 옥천대 변성퇴적암과 경상분지를 중심으로 한 백악기 화산암 분포지역에서 광물중 As함량이 높는데, 연구지역을 비롯하여 해남, 진도, 완도 등 전남 남서부 지

역은 우리나라의 대표적인 백악기 화산암 분포지역 중에 하나이다(Shin et al., 2002). 이러한 As함량이 높은 지역에서는 지표수 유입에 의한 산화과정에서 광물로부터 As가 용출되어 지하수중에 As 농도가 높다(An et al., 2007). 또한, 최근에 연구지역과 인접한 영산강 하구역 주변에서는 ^{222}Rn 물질수지 모델로부터 비록 영산강의 일평균 유출량보다는 작지만 많은 양의 지하수(약 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$)가 해양으로 유입되고 있음이 확인되었다(Kim et al., 2010). 따라서, 연구지역내 조간대 퇴적물중 높은 As 농도는 자연적인 혹은 인위적인 요인에 의해 As 오염이 된 지하수가 해저지하수의 형태로 연안으로 유입되었기 때문인 것으로 생각되며, 보다 명확한 원인 구명을 위하여 연구지역 주변의 강물, 지하수, 해수중 As의 농도와 해저지하수 유입량 조사 등 연안해역으로의 As의 유입경로 및 물질수지에 대한 체계적이고 집중적인 연구가 필요하다.

사 사

이 연구의 현장조사 및 시료채취에 도움을 준 연안관리기술연구소 박정훈 연구원 및 국립수산과학원 갯벌연구소 연구원들에게 감사함을 드립니다. 이 논문은 국립수산과학원 수산시험연구사업(RP-2011-ME-20)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.
- 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, Ryu SO and Jo YJ. 2007. Long-term variation of tidal flat sediments in Gomso Bay, west coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 28, 357-366.
- 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.
- Cho YG and Kim JY. 1998. Heavy metals in surface sediments of the Youngsan River channel. *J Kor Environ Sci Soc* 7, 281-290.
- Cho YG, Lee CB and Choi MS. 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.
- 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.
- 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 shorelines. *Z Geomorph* 8, 127-142.
- 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 Petol* 27, 3-26.
- 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, 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.
- 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.
- Kang JW, Song JJ and Oh NS. 1998. Analysis of ebb-dominant tidal currents characteristics at Mokpo coastal zone. *J Kor Soc Civil Engin* 18, 185-193.
- Kim J, Kim JS and Kim G. 2010. Nutrient input from submarine groundwater discharge versus intermittent river-water discharge through an artificial dam in the Yeongsan River estuary, Korea. *Ocean Sci J* 45, 179-186.
- 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.
- 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, 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 NI and Kim GS. 2003. Estimation of pollution loads flowing into Mokpo Harbour-Centering on pollution loads from land in dry case. *J Kor Soc Mar Environ Eng* 6, 11-20.
- Lee SH and Lee KW. 1983. Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. *J Oceanol Soc Korea* 18, 49-54.
- Lim HS and Park KY. 1998. Community structure of the macrobenthos in the soft bottom of Youngsan River estuary, Korea. *J Kor Fish Soc* 31, 330-342.
- Lim HS, Je JG and Lim JG. 2002. Spatial distribution of the macrobenthos in the tidal flat of Aphae Island around Mokpo. In: *Proceedings of the Autumn Joint Conference on Fisheries Science*. Jang DS, eds. *Kor Soc Fish Aquat Sci*, Busan, 238-240.
- 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, 382.
- 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 KH. 2007. Sedimentary environment and geomorphic system of Yeongsan River system. *J Kor Geomorph Assoc* 14, 91-102.
- Park LH, Cho YK, Cho C, Sun YJ and Park KY. 2001. Hydrography and circulation in the Youngsan River estuary in summer, 2000. *The Sea - J Kor Soc Oceanogr* 6, 218-224.
- Roh Y, Park B, Lee J, Oh J, Lee S, Han J, Kim Y and Seo H. 2007. Mineralogy and biogeochemistry of intertidal flat sediment, Muan, Chonnam, Korea. *J Miner Soc Kor* 20, 47-60.
- Ryu SO. 2003. Seasonal variation of sedimentary processes in a semi-closed bay: Hampyong Bay, South Korea. *Est Coast Shelf Sci.*, 56, 481-492.

- 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 and Chun SS. 1997. Distribution pattern and characteristics of the surface sediments in Hampyong 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 Hampyong 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 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.
- 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. 2000. A study on the distributional characteristic of organic matters on the surface sediments and its origin in Keogeum-sudo, southern part of Korea Peninsula. *J Kor Environ Sci Soc* 9, 137-144.
- 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.

2011년 7월 28일 접수
 2011년 9월 24일 수정
 2011년 12월 12일 수리