변산반도 조간대 표층 퇴적물의 퇴적률 및 저서환경 변화

정래홍·황동운^{1*}·김영길²·고병설·송재희·최희구¹

국립수산과학원 갯벌연구소, ¹국립수산과학원 어장환경과, ²(주)지오시스템리서치

Temporal Variations in the Sedimentation Rate and Benthic Environment of Intertidal Surface Sediments around Byeonsan Peninsula, Korea

Rae-Hong Jung, Dong-Woon Hwang^{1*}, Young-Gil Kim²,

Byoung-Seol Koh, Jae-Hee Song and Hee-Gu Choi¹

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

¹Marine Environment Research Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea

²Geosystem Research Co., Ltd., Gunpo 435-824, Korea

To understand temporal variations in geochemical characteristics of intertidal surface sediments around Byeonsan Peninsula (in the middle of the western coast, Korea) after the construction of Saemanguem dyke, the sedimentation rate and various geochemical parameters, including mean grain size (Mz), water content (WC), ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), and acid volatile sulfide (AVS), were measured along four transects (A-D lines) at monthly intervals from February 2008 to March 2009. The average monthly sedimentation rate ranged from -5.3 to 3.8 mm/month (mean -0.8 ± 2.7 mm/month), which showed an erosion-dominated environment in the lower part of the intertidal zone. In addition, surface sediments were eroded in summer and autumn, but were deposited in spring and winter. The Mz of surface sediments ranged from -0.8 to 3.4 ϕ (mean $2.8 \pm 0.5\phi$), indicating that the surface sediments consist of coarser sediments (sand and slightly gravelly sand). The Mz of surface sediments did not show large monthly and/or seasonal variations, although the sedimentation rates of surface sediment showed large seasonal variation. This may be due to lateral shifting and effective dispersion of surface sediments by wind, tide, and longshore current. The concentrations of IL and COD in the surface sediments ranged from 0.2 to 2.9% (mean $1.4 \pm 0.4\%$) and from 0.2 to 18.5 mgO₂/g-dry (mean 3.9 ± 3.4 mgO₂/g-dry), respectively, which were slightly higher in spring than in the other seasons. This may be related to spring blooms of phytoplankton in seawater and/or benthic microalgae in surface sediments. On the other hand, no AVS concentrations were detected in surface sediments at any of the sampling stations during the study period.

Key words: Intertidal Zone, Sediment, Sedimentation Rate, Byeonsan Peninsula

서 론

우리나라 서해안은 홀로세 해침 (Holocene transgression)에 의한 해수면의 상승과 평균 4 m 이상의 높은 대조차 환경으로 바뀌면서 리아스식 해안을 따라 하구, 만, 해빈, 조간대 등 다양한 연안환경이 형성되었다 (Well et al., 1990; Alexander et al., 1991; Lee and Yoon, 1997; Ryu et al., 2000; Oh and Kum, 2001; Shin et al., 2004; Lee and Ryu, 2007). 이들 연안환경은 바다와 육지로부터 동시에 영향을 받는 지역에 위치하고 있어 파랑 및 조류 등과 같은 외부의 수리적 에너지 조건과 퇴적물 공급량, 지형적인 특성에 따라 지속적인 침식과 퇴적 작용을 반복하면서 끊임없이 변화하고 있다 (Shin et al., 2004; Ryu et al., 2006). 또한, 동계에 강한 북서계절풍에 의해 발생하는 폭풍이나 하계에 서태평양 상에서 발생한 태풍이 간헐적으로 영향을 줌으로서 해저지형의 변화 및 해안침식에 따른

해안선의 변화 등 급격한 연안환경 변화가 일어나기도 한다 (Chang et al., 1999; Ryu et al., 2001; Ryu, 2003; Ryu and Jang, 2005).

자연적인 연안환경 변화와 함께 1980년대 초부터 농지 및 공업단지 조성, 농업용수 확보를 위한 방조제와 하구둑의 건설, 건설자재 확보를 위한 골재채취, 연안정비사업에 의한 방파제 및 직립호안의 설치 등 경제성장에 따른 무분별한 연안개발은 서해안의 연안환경을 급속도로 변화시키고 있다. 이러한 인위적인 개발이 이루어진 연안지역은 자연상태의 연안지역과 달리 지형적인 변화에 따른 조류의 방향과 유속의 변화, 국지적인 해수면의 상승 등에 의해 본래의 침식 및 퇴적 작용과 다른 방향으로 변화가 진행될 수 있다 (Cho and Park, 1998; Ryu et al., 2001; Ryu and Jang, 2005; Ryu and Sin, 2006; Chang et al., 2007).

본 연구지역인 변산반도 조간대는 총 면적 400 km²의 토지

*Corresponding author: dhwang@nfrdi.go.kr

와 담수호를 조성하기 위해 1991년부터 전북 군산과 부안을 잇는 총 33 km의 세계 최대의 방조제 공사가 이루어진 새만금 방조제 바깥쪽에 위치하고 있다. 새만금방조제는 고군산군도 내 신지도와 부안군의 변산반도사이의 2개의 갑문 (신시갑문과 가력갑문)을 통하여 비정기적으로 만경강과 동진강으로부터 유입되는 육상의 담수를 외측으로 방류하고, 내측의 수질정화 목적으로 해수를 내측으로 유입시켜 내·외측의 물을 유통시킴으로서 방조제 주변해역의 연안환경 및 생태계 변화를 야기하고 있다 (Lee et al., 2007; Koo et al., 2008; Lie et al., 2008; Lee et al., 2009). 따라서, 방조제 공사가 시작된 이후부터 방조제 건설에 따른 연안환경 변화를 알아보기 위해 새만금 내·외측에서 해수유통 (Choi and Kang, 1990; Lee et al., 2003a; Kim et al., 2006; Suh et al., 2006; Kim et al., 2008), 수질 (Kim and Kim, 2002; Yang et al., 2008; Kim et al., 2009), 퇴적물 (Hong et al., 2006; Lee et al., 2006; Lee and Lee, 2008; Lee and Ryu, 2007, 2008; Yang and Hwang, 2008), 및 해양생물 (Yoo et al., 2002; Hwang and Kim, 2003; Lee et al., 2003b; Cha et al., 2004; Park et al., 2004a; Rho et al., 2004; An et al., 2006; Kil et al., 2006; Lee et al., 2007; Lee et al., 2009) 등에 대한 다양한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 이들 연구의 대부분은 방조제 내·외측의 조하대 지역에 집중되어져 있고, 일부 조간대 지역의 연구는 대부분 만경강과 동진강 하구의 새만금 갯벌 (Cho et al., 2001; Kim and You 2001; Kim et al., 2003; You et al., 2003; Oh et al., 2004; Park et al., 2004b; Woo et al., 2006; Koo et al., 2008)에 대해 이루어져 있다. 그러나, 방조제 건설로 인한 퇴적물 공급의 차단, 방조제 자체와 가력갑문을 통한 방조제 내·외측 물의 유통 등으로 복잡한 해수유통 및 조류패턴 변화의 영향을 직접적으로 받는 변산반도 조간대는 큰 퇴적환경 및 생태계 변화가 예상됨에도 불구하고 상대적으로 다른 지역에 비해 연구가 전무한 실정이다. 일반적으로 조간대 퇴적환경은 물리, 화학, 생물 등의 모든 분야와 직·간접적으로 연관되기 때문에 퇴적환경의 시·공간적 변화를 연구하는 것은 조간대 생태계 변화를 이해하는데 많은 도움을 준다.

따라서, 이 연구의 목적은 금강 하구둑과 새만금 방조제 건설이후 금강, 만경강과 동진강으로부터 직접적인 퇴적물 공급이 차단된 상태에서 변산반도 연안 조간대의 퇴적환경 변화를 이해하는데 있으며, 이를 위해 변산반도 조간대내 4개 측선 (A~D Lines)을 선정하여 조간대 지형, 상부에서부터 하부까지 퇴적물의 퇴적률, 퇴적물의 퇴적학적 특성 (Mz, sorting, skewness) 및 유기물 오염을 지시하는 여러 지화학적 인자들 (IL, COD, AVS)을 조사하였다.

재료 및 방법

연구지역

연구지역인 변산반도 조간대는 우리나라 서해 중부연안의 변산반도 북서쪽에 부안 격포항과 새만금 제1호 방조제사이 (북위 35° 35'~35° 45', 동경 126° 20'~126° 40')에 위치하고

있으며, 북쪽으로는 금강하구둑과 남쪽으로는 곰소만과 인접하고 있다 (Fig. 1). 해안은 전체적으로 서해안의 다른 지역에 비해 단조롭고 조간대 앞쪽으로 하심을 포함한 작은 섬들이 산재해 있다. 수심은 새만금 방조제 외측으로 대부분의 지역이 10 m 미만의 비교적 얕은 수심으로 이루어져 있으나, 새만금 방조제의 신시갑문과 가력갑문을 통해 유출입되는 담수와 해수의 영향으로 조간대 하부 끝부분부터 일부 지역에 해안선과 평행한 20 m 이상의 깊은 골이 발달되어 있다 (Lee and Ryu, 2008). 연구지역 주변의 퇴적물은 금강하구둑과 새만금 방조제가 건설되기 이전에 금강, 만경강 및 동진강으로부터 지속적인 퇴적물을 공급받아 모래에서부터 사니질까지 다양한 퇴적상이 존재한다 (Oh and Choi, 1999; Lee and Ryu, 2008).

변산반도 연안의 조석 (위도 기준)과 조류 (연도~고군산도 해역)의 특징을 보면, 조석은 반일주조석 (semidiurnal tide)으로서 일조부등 (diurnal inequality)을 나타내며, 소조차는 254.2 cm, 대조차는 544.6 cm, 평균조차가 399.4 cm로서 Davies (1964)의 분류기준에 의하면 중조차 (mesotidal environment) 환경에 속한다. 평균 대조기 동안 조류의 유속은 창조류가 1.0~1.7 knots (= 0.5~0.9 m/sec)를 보이고 전반적으로 북동방향을 나타내며, 낙조류는 남서방향으로 0.8~1.7 knots (= 0.4~0.9 m/sec)로 흐른다.

조사항목 및 분석방법

이 연구는 변산반도 주변 조간대 표층퇴적물의 퇴적환경 변화를 살펴보기 위하여 2008년 2월부터 2009년 3월까지 1년 동안 격포항에서부터 새만금 방조제 방향으로 조간대 특성을 잘 대변할 수 있는 해안선과 수직인 4개의 측선 (A~D Lines)을 선정하여 간조시에 조사를 수행하였다 (Fig. 1). 조간대 퇴적물의 지형적 특성을 파악하기 위한 지형조사는 2009년 2월에 해안선 부근에 기준점을 설정한 후 4개의 측선을 따라 광파거리측정기 (Topcon, Model No. GTS-751)를 사용하여 지형적으로 변화를 보이는 지점의 고도를 측정하는 방법으로 행하였다. 이 연구에서 지형조사를 위해 사용한 광파거리측정기는 3 km의 수평거리에 ± 2 mm의 고도오차를 가지는 것으로 알려져 있다.

조간대에서 퇴적물의 침식 및 퇴적양상을 살펴보기 위한 퇴적률 측정은 Ryu and Jang (2005)이 제시한 방법으로 행하였다. 즉, 조간대 지형조사를 위해 선정한 4개 측선상에 지형적 특성과 조간대의 거리를 고려하여 16개의 정점 (정점간 간격: 100~150 m) 정하여 기준면으로부터 각 정점별로 약 30 cm 깊이에 30×30 cm 크기의 아크릴 판과 PVC 파이프를 연결된 퇴적률 집적장치 (Sedimentation Rate Plate, SRP)를 설치한 후, 2008년 2월부터 2009년 3월까지 매일 퇴적물 표면에서부터 기준면까지의 깊이를 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. 이때, 퇴적률 측정은 SRP를 심은 후 주위환경과 동화될 수 있도록 하기 위하여 설치시점으로부터 약 1개월 동안 기다린 다음 실시하였다.

퇴적물의 퇴적학적 특성 및 유기물 함량 변화는 측선상의

Fig. 1. A map showing the study area and the sampling stations for the measurement of sedimentation rate and the analysis of intertidal surface sediment around Byeonsan Peninsula in the western coast of Korea.

총 16개 정점에서 퇴적물 시료를 채취한 후, 냉장 및 냉동 보관 상태로 실험실로 운반하여 입도 (Grain Size)와 함수율 (WC), 강열감량 (IL), 화학적산소요구량 (COD), 산화발성황화물 (AVS)을 Hwang et al. (2010)이 실시한 분석방법에 따라 실시하였으며, 분석방법에 대해 간략히 요약하면 다음과 같다.

먼저, 퇴적물의 입도는 채취한 퇴적물 습시료 약 30 g을 1 L 비이커에 취한 후 염분이 제거될 때까지 이온교환수로 세척한 다음, 10% 과산화수소 (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 물체질 (wet sieving)을 한 후, 4 ϕ 보다 큰 조립질 입자는 110°C에서 24시간 동안 건조한 다음 진탕기 (Ro-tap sieve shaker, Fritsch Model-Anaiysette 3)를 이용하여 15분 동안 건식체질 (dry sieving)을 하여 1 ϕ 간격으로 무게를 구하였다. 4 ϕ 보다 작은 세립질 입자는 침전 속도를 고려한 피펫팅법으로 시료무게를 구하였으며, 이때 입자의 응집현상을 방지하기 위해 확산제로서 2% 칼콘용액 (sodium hexametaphosphate, $(NaPO_3)_6$)을 사용하였다. 여기서 퇴적상은 Folk (1968)의 방법에 따라 분류하였으며, 퇴적물의 특성을 나타내는 평균입도 (Mz), 분급도 (sorting), 왜도 (skewness) 등과 같은 통계적 입도상수는 Folk and Ward (1957)의 계산식에 의하여 구하였다.

WC와 IL은 퇴적물 습시료 약 20 g을 미리 무게를 측정한 비이커에 담아 110°C에서 24시간 건조한 후 비이커의 무게를

측정하였으며, 이후 건조된 시료를 막자사발에 넣어 곱게 분쇄한 다음 미리 무게를 측정한 도가니에 담아 550°C에서 2시간 동안 회화시킨 후 도가니의 무게를 측정하였다. 여기서, 건조전후와 회화전후 시료의 무게차이로부터 WC와 IL을 각각 계산하였다.

COD는 퇴적물 습시료 약 2~3 g을 250 mL 삼각플라스크에 담아 0.1 N 과망간산칼륨 ($KMnO_4$) 100 mL와 10% 수산화나트륨 (NaOH) 5 mL를 넣은 후 잘 혼합한 다음, 끓는 물에서 1시간 동안 중탕시켰다. 이후 시료를 실온으로 냉각시켜 10% 요오드화칼륨 (KI) 10 mL와 4% 아지드화나트륨 (NaN_3) 1 mL를 넣은 다음, 여기에 이온교환수를 가해 500 mL로 만들어 잘 흔들어 준 후 유리섬유여과지 (GF/C, 직경 47 mm)로 여과하였다. 이후 여과한 용액 100 mL를 취하여 30% 황산 (H_2SO_4) 2 mL를 넣고 잘 혼합한 다음 이를 0.1 N 티오황산나트륨 ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 용액으로 적정·분석하였다.

AVS는 퇴적물 습시료 약 2~3 g과 약간의 이온교환수를 황화수소 (H_2S) 발생관에 넣고 기체가 새지 않도록 뚜껑을 닫은 다음, 발생관에 황산 2 mL를 첨가하여 퇴적물과 반응하여 발생한 황화수소를 핸드펌프를 이용하여 검지관에 흡수되도록 하여 측정하였다.

결과 및 고찰

조간대 지형

조간대의 지형은 퇴적작용 및 방향을 결정하는 중요한 요인으로서 그 지역의 수리환경 및 퇴적물의 이동양상등에 따른 퇴적작용의 역사를 반영한다 (Ryu et al., 1999; Ryu, 2003). 변산반도 조간대의 지형적 특성을 알아보기 위하여 2009년 2월에 측량한 지형단면을 Fig. 2에 도시하였다. 먼저, 각 측선 별로 조위를 고려하여 해안선으로부터 간조선 방향으로 평균 해수면 (Mean Sea Level, MSL) 아래 1 m 까지를 조간대 상부, 1~2 m 사이를 조간대 중부, 2 m 이하부터를 조간대 하부로 나누었다. 변산반도의 가장 남서쪽에 위치한 측선 A는 해안선으로부터 약 130 m 거리에 평균해수면이 위치하였으며, 육지 쪽으로 경사가 급한 해변면은 없었으나 바다쪽으로 경사가 완만한 저조단구 (low tide terrace)가 존재하였다. 저조단구의 경사도는 조간대 상부에서는 0.8°, 조간대 중부에서는 0.2°로서 바다쪽으로 갈수록 경사도는 낮아졌으며, 해안선에서 간조선 방향으로 약 800 m의 폭을 나타내었다. 고사포 해수욕장 부근의 측선 B는 해안선으로부터 약 30 m 거리에 평균해수면이 위치하였으며 육지쪽으로 경사가 급한 해변면 (beach face)와 바다쪽으로 경사가 완만한 저조단구가 존재하였다. 평균해수면 부근의 해변면의 경사도는 약 5.0° 이상의 급경사를 이루고 있었으며, 저조단구의 경사도는 조간대 상부에서 0.7°, 조간대 하부에서 0.4°로서 바다쪽으로 갈수록 경사도가 낮아졌다. 특히, 측선 B의 경우 해안선에서 간조선 방향으로 약 350 m의 폭을 나타내어 조사지역중 가장 짧았다. 변산 해수욕장 부근의 측선 C는 해안선으로부터 약 100 m 거리에 평균해수면이 위치하였으며 측선 B와 마찬가지로 육지쪽으로 경사가

Fig. 2. Schematic diagrams represent the cross-sections of topography and the sampling locations in the intertidal zone around Byeonsan Peninsula. The MSL and DL imply the mean sea level and datum level, respectively.

급한 해변면과 바다쪽으로 경사가 완만한 저조단구가 존재하였다. 평균해수면 부근의 해변면의 경사도는 약 2.5° 로 다소 급한 경사를 이루고 있었으며, 저조단구의 경사도는 조간대상부에서부터 하부까지 0.4° 로서 바다쪽으로 갈수록 경사가 완만하였다. 조간대 폭은 해안선에서 간조선 방향으로 약 600 m를 나타내었다. 새만금 방조제 앞쪽 대항리 부근의 측선 D는 해안선으로부터 약 50 m 거리에 평균해수면이 위치하였으며 측선 A와 마찬가지로 육지쪽으로 경사가 급한 해변면은 없었으나 바다쪽으로 경사가 완만한 저조단구가 존재하였다. 저조단구의 경사도는 조간대 상부에서는 0.7° , 조간대 중부에서는 0.2° 로서 바다쪽으로 갈수록 경사도는 낮아졌으며, 해안선으로부터 450 m 이후부터는 거의 평탄한 지형을 나타내었다. 조간대의 폭은 측선 C와 비슷하게 해안선에서 간조선 방향으로 약 650 m를 나타내었다. 한편, 연구지역내 모든 지역에서 조석작용에 의해 형성되는 사행성 조류로 (meandering tidal channel)은 발견되지 않았으나 해안선과 평행한 연흔 (ripple mark)이 형성되어져 있었는데, 이는 연구지역이 개방형 해안으로서 조간대 모든 지역이 비슷한 수리적 에너지와 조석의 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다.

표층퇴적물의 퇴적률

일반적으로 우리나라 연안해역에서 해저퇴적물의 퇴적률 (퇴적속도)를 구하기 위해서 방사성 동위원소 중 ^{210}Pb (반감기 22.3년)을 이용하여 퇴적층내 ^{210}Pb 농도의 수직분포로부터 간접적으로 측정하는 방법이 널리 사용되어 왔다 (Yang and

Kim, 1994; Hong et al., 1997; Woo et al., 2003; Hwang and Yang, 2003; Han and Choi, 2007). 이러한 방사성 동위원소를 이용한 방법은 퇴적작용이 약한 반폐쇄적인 내만해역이나 외해의 대륙붕지역에서는 유용하나 연구지역과 같이 퇴적 및 침식작용이 활발하고 저서생물의 교란 (bioturbation)이 일어나는 개방형의 조간대 지역에서는 퇴적물을 알아내기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 조간대 지역의 퇴적물을 측정하기 위하여 현재 많이 이용되고 있는 SRP를 사용하여 조간대 표층 퇴적물의 퇴적 및 침식 경향을 살펴보았다.

2008년 3월부터 2009년 3월까지 13개월 동안 조간대 4개 측선에서 SRP를 이용하여 측정한 퇴적률 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 여기서, 변산 해수욕장 부근의 측선 C의 경우 조간대 상부쪽의 정점 C1, C2의 경우 2008년 9월과 10월에, 조간대 중부쪽에 위치한 정점 C3의 경우 2009년 1월에 퇴적률 판이 유실되어 그 이후의 퇴적률 측정은 이루어지지 않아 관측된 결과만을 나타내었다.

Fig. 3. The monthly variations of accumulated sedimentation rate with each station in the intertidal zone around Byeonsan Peninsula from March 2008 to March 2009.

Fig. 4. The frequency percent of the wind direction (A) and the daily variations of the wind speed and precipitation (B) around Byeonsan Peninsula from January 2008 to March 2009.

각 측선별 특징을 보면 조사지역의 가장 남서쪽에 위치한 하섬 부근의 측선 A의 경우 월평균 퇴적률이 1.4 mm/month로서 4개 측선 중 가장 퇴적이 활발한 곳이다. 조간대 상부 정점 A1~A3에서는 월평균 퇴적률 0.6~3.8 mm/month로 퇴적이 우세하고 조간대 중부 간조선 부근의 정점 A4에서는 월평균 퇴적률이 -1.5 mm/month로 침식이 우세하였다. 고사포 해수욕장 부근에 위치한 측선 B의 경우, 월평균 퇴적률이 -0.2 mm/month였으며, 측선 A와 마찬가지로 조간대 중부 정점 B1~B2에서는 월평균 퇴적률이 0.8~1.5 mm/month로 퇴적이 우세하고 조간대 하부 간조선 부근의 정점 B3에서는 월평균 퇴적률이 -2.9 mm/month로 침식이 우세하였다. 변산 해수욕장 부근에 위치한 측선 C의 경우, 조간대 상부쪽의 일부정점에서 퇴적률 측정장치가 유실되어 측선 전체의 월평균 퇴적률은 알수가 없으나, 조간대 중부와 하부인 간조선 부근의 정점 C4와 C5에서는 월평균 퇴적률이 -1.2 mm/month로 앞선 두 측선과 마찬가지로 침식 우세를 보였다. 조사지역의 가장 북동쪽에 위치한 방조제 앞쪽 대항리 부근의 측선 D의 경우 월평균 퇴적률이 -4.0 mm/month로서 4개 측선 중 가장 침식이 활발하였으며, 조간대 전 지역에서 퇴적률 -5.3~2.6 mm/month로 침식이 일어나고 있었다. 전체적으로 연구지역 남서쪽의 하섬부근에 위치한 측선 A는 퇴적되는 경향을 보인 반면, 그 외 측선들은 침식되는 경향을 보였으며, 측선 B에서 방조제 앞쪽의 측선 D쪽으로 갈수록 침식경향은 더욱 컸다 (Fig. 3). 이는 과거 만경강 및 동진강 하류까지 이동하던 조류가 새만금 방조제로 인해 육지쪽으로 더 이상 이동하지 못하고 연구지역 주변 조류의 흐름방향 및 세기가 바뀌면서 대항리 주변의 조간대 퇴적물이 하섬부근으로 이동하고 있는 것으로 생각된다. 최근에, Lee and Ryu (2007)는 연구지역 주변해역에서 Delft3D-FLOW 수치모델과 TISDOS (Tidal Sediment Dynamics Observational System)를 이용하여 잔차류 (residual current) 및 부유물질의 이동량을 조사한 결과, 잔차류의 이동

방향은 변산반도의 해안선과 평행한 남서방향이며, 부유물질은 새만금 방조제 앞쪽에서부터 변산반도 연안을 따라 이동한다고 보고한 바 있다.

퇴적물의 계절적 변화를 살펴보면, 하섬 부근의 측선 A의 경우, 봄 (4~6월)과 겨울 (1~3월)철에 각각 평균 12.2 mm/month와 8.2 mm/month로서 퇴적이 우세하였고, 여름 (7~9월)과 가을 (10~12월)철에는 각각 평균 -7.1 mm/month와 -7.5 mm/month로서 침식이 우세하였다. 방조제 부근의 측선 D 또한, 측선 A와 마찬가지로 봄과 겨울에 각각 평균 3.9 mm/month와 6.0 mm/month로서 퇴적이 우세하였고, 여름과 가을에는 각각 평균 -1.5 mm/month와 -19.4 mm/month로서 침식이 우세하였다. 변산 해수욕장 부근의 측선 C의 경우, 비록 조사기간 중 퇴적률 측정장치가 유실되어 전 계절에 따른 퇴적률 변화를 알지 못하지만, 앞서 설명한 두 측선과 유사하게 봄철에는 평균 5.2 mm/month로 퇴적이 우세하였고, 여름철에는 -21.2 mm/month로 침식이 우세하였다. 반면, 고사포 해수욕장 주변의 측선 B의 경우, 가을에는 5.8 mm/month로 퇴적이 우세하였고, 봄과 여름, 그리고 겨울에는 각각 평균 -3.7 mm/month, -1.0 mm/month, 그리고 -1.8 mm/month로서 침식이 우세하였다. 일반적으로 우리나라의 개방형 해안의 경우, 몬순 계절풍의 영향으로 여름에는 남풍계열의 바람이 우세하고 바람이 약화됨에 따라 세립질 퇴적물이 퇴적되는 양상을 보인 반면, 겨울에는 북풍계열로 바람의 방향이 바뀌고 바람의 세기가 현저히 증가함에 따라 여름에 쌓인 세립질 퇴적물이 침식되는 계절적 변화를 보인다 (Ryu et al., 2001, Yang and Chun, 2001; Ryu, 2003; Ryu et al., 2006). 연구지역 또한 조사기간 중 월별 풍향을 살펴보면 여름철인 7월을 제외한 거의 모든 기간에 북풍계열 (북풍, 북북서풍, 북동풍)의 바람이 우세하였다 (Fig. 4A). 바람의 세기에 있어서도 가을에 평균 1.5 m/sec로서 다른 계절 (1.7~2.0 m/sec)에 비해 다소 낮았지만 계절적으로 큰 차이를 보이지 않았다 (Fig. 4B). 특

히, 조사기간 중 북서태평양상에서 발생한 총 22개의 태풍 중 우리나라 주변에 영향을 준 태풍은 여름철인 7월 중순에 1차례 (KALMAEGI, 7/15-7/20)였으며, 이 태풍은 중국대륙을 통과하여 우리나라로 접근함으로써 바람과 강우에 있어서 연구지역에 큰 영향을 미치지 않았었다 (KMA, 2008). 따라서, 이상의 결과를 종합해 보았을 때 변산반도 조간대 퇴적물의 퇴적물의 변화는 기존의 몬순계절풍이나 태풍 및 폭풍과 같은 자연적인 영향보다는 방조제 건설에 따른 지형변화 및 조류 방향의 변화 등과 같은 인위적인 영향이 더 크게 작용하고 있는 것으로 생각된다.

한편, 변산반도 조간대의 경우 월평균 퇴적물을 이용하여 계산된 연평균 퇴적률은 -33.9~17.1 mm/yr 범위였다. 이 결과를 이전의 서해연안 조간대에서 조사된 퇴적률에 대한 연구결과와 비교했을 때, 서해북부의 남양만 조간대 (2.0~8.6 mm/yr, Alexander et al., 1990)와 연구지역과 비슷한 해양환경을 가진 서해중부의 태안 이원조간대 (-32.6~42.3 mm/yr, Shin et al., 2004)와는 서로 비슷하였다. 그러나, 서해남부의 반폐쇄적인 내만인 무안만 (-48.9~8.9 mm/yr, Ryu et al., 2001)과 함평만 (-49.6~3.7 mm/yr, Ryu et al., 1999) 조간대 보다는 다소 높았다.

표층퇴적물의 입도 분포

퇴적물과 더불어 조간대 퇴적물의 입도분포는 그 지역의 퇴적물의 공급원과 종류, 조류로의 특성, 조간대의 경사, 조류와 파랑 등에 의한 수리역학적 조건, 해안지형, 생물의 종류와 밀도 등에 의해서 좌우되며, 이와 같은 요인들은 지역에 따라 다르므로 퇴적물의 입도는 그 지역의 퇴적학적 특성을 반영한다.

월별로 채취한 변산반도 조간대 표층퇴적물의 입도분석결과, 조간대 표층퇴적물중 자갈은 0~46.4% (평균 0.4±3.2%), 모래는 53.5~99.9% (평균 99.1±3.2%), 실트+점토 (mud)는 0.1~2.3% (평균 0.5±0.3%) 범위로서 대부분의 정점에서 모래

의 함량이 높았다. 이를 기초로 Folk (1968)의 삼각좌표에 의한 연구지역내 표층 퇴적물 유형 (sedimentary type)은 사 (S, sand), 약역질사 ((g)S, slightly gravelly sand), 역질사 (gS, gravelly sand), 사질역 (sG, sandy gravel)의 4개의 퇴적물로 구분되었으며, 퇴적물의 조직특성에 따라 크게 사 (S), 약역질사 ((g)S)의 2개의 퇴적상 (sedimentary facies)으로 나뉘어졌다 (Fig. 5).

각 측선별 특성을 보면, 하섬 부근의 측선 A의 경우 조간대 상부인 A1은 전 계절에 약역질사 ((g)S)를, 조간대 상부인 A2와 중부인 A4는 여름에는 사 (S), 그 외 계절에는 약역질사 ((g)S)를, 조간대 상부인 A3는 여름과 가을에는 사 (S), 봄과 겨울에는 약역질사 ((g)S)를 보였다. 전체적으로 약역질사 ((g)S) 퇴적상이 우세하고 여름철에 특징적으로 사 (S) 퇴적상이 분포하는 것으로 나타내었다. 고사포 해수욕장 부근의 측선 B의 경우, 조간대 중부인 B1은 가을에는 사 (S), 그 외 계절에는 약역질사 ((g)S)를 보였으나 그 외 정점에서는 전 계절에 사 (S) 퇴적물을 보여 전체적으로는 사 (S) 퇴적상이 우세하였다. 변산 해수욕장 부근의 측선 C의 경우에는 조간대 상부인 C1은 여름철에 역질사 (gS), 그 외 계절에는 약역질사 ((g)S)를, 조간대 중부인 C4는 봄철에 사 (S), 그 외 계절에는 약역질사 ((g)S)를, 그 외 정점에서는 전 계절에 걸쳐 약역질사 ((g)S)를 보여 전체적으로 약역질사 ((g)S) 퇴적상이 우세하였다. 방조제 부근의 측선 D의 경우에는 조간대 상부인 D1은 여름철에 사 (S), 그 외 계절에는 약역질사 ((g)S)를, 그리고 그 외 정점에서는 전 계절에 걸쳐 사 (S) 퇴적물을 보여 전체적으로 사 (S) 퇴적상이 우세하였다. 이상의 결과를 종합해보면, 변산반도 조간대 표층퇴적물은 모래 함량이 95% 이상으로 측선 A와 측선 C는 약역질사 ((g)S), 측선B와 측선 D는 사 (S) 2개 퇴적상이 분포하고, 각 측선별로 퇴적상의 변화는 연중 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 5. The ternary diagrams showing the major sediment types of intertidal surface sediment with each station in Byeonsan Peninsula during the study periods.

Fig. 6. The monthly variations of mean grain size, sorting, and skewness of intertidal surface sediment in Byeonsan Peninsula from February 2008 to March 2009.

Fig. 7. The monthly variations of water content, ignition loss, and chemical oxygen demand (COD) in intertidal surface sediment around Byeonsan Peninsula from February 2008 and March 2009.

퇴적물의 통계적 변수 특성을 살펴보면 (Fig. 6), Mz는 $-0.9 \sim -3.4\phi$ (평균 2.8ϕ) 범위로 극조립사 (very coarse sand)에서 극세립사 (very fine sand)까지 존재하였으며, 전체적으로는 세립사 (fine sand)가 매우 우세하게 분포하였다. 하섬부근의 측선 A의 경우에는 조간대 상부와 중부의 Mz가 서로 비슷하였으나 그 외 측선에서는 간조선 부근의 조간대 하부에서부터 상부로 갈수록 Mz가 낮아 조립한 모래가 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 평균해수면보다 상부에 위치하거나 근처에 있는 일부 정점들 (B1, C1, C2, D1)들은 다른 조간대 중부와 하부 정점들에 비해 Mz의 월별 혹은 계절별 변화폭이 매우 컸다. 특히, 조사기간 동안 거의 모든 정점에서 약 $0.1 \sim 0.3\phi$ 범위로 Mz가 증가한 것으로 나타나, 변산반도 조간대 퇴적물들이 미미하지만 지속적으로 세립해지고 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 연구지역과 같이 중립사 혹은 세립사와 같은 사질퇴적물로 이루어진 지역에서는 작은 수리역학적 에너지 (조석, 파랑 등)에도 쉽게 퇴적물이 재부유되고 이동하기 때문에 (Ryu et al., 2006), 이러한 연구결과를 보다 명확하기 밝히기 위해서는 앞서 살펴본 퇴적물과 더불어 입도에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다.

퇴적물의 입도조성이 얼마나 균일한가를 나타내는 지표인 분급도 (sorting)는 $0.1 \sim 1.7\phi$ (평균 0.3ϕ) 범위로 매우 양호한 분급 (very well sorted)과 불량한 분급 (poorly sorted)사이였다. 대체로 고사포 해수욕장과 변산 해수욕장 부근의 측선 B와 C의 조간대 상부정점 (B1, C1, C2)에서 다른 정점들에 비해 급한 경사와 계절적인 지형변화로 인해 매우 불량한 분급을 보였다. 그러나 그 외 정점에서는 0.3ϕ 이하로 매우 양호한 분급을 나타내었으며, 이는 연구지역이 개방형의 조간대로서 효과적인 파랑에너지에 의한 선택적 분급작용 (selective sorting)의 결과인 것으로 보여진다.

퇴적환경 에너지와 밀접한 관련이 있는 왜도 (skewness)는 $-0.8 \sim 0.5$ (평균 -0.1)의 범위로 음의 왜도와 양의 왜도값을 동시에 가지지만 거의 대칭 (0)에 가까운 왜도가 나타났다. 일반적으로 이러한 음의 왜도와 양의 왜도 값이 동시에 나타나는

지역은 유체의 흐름이 있음을 의미한다 (Sung and Bang, 2005). 연구지역내 대부분의 정점에서 왜도값은 월별 또는 계절별 변화가 매우 미미하였지만, 불량한 분급을 보였던 고사포 해수욕장과 변산 해수욕장 부근의 측선 B와 C의 조간대 상부정점 (B1, C1, C2)에서는 큰 변화를 보이고 있었으며, 특히 이들 지역에서는 다른 정점에 비해 강한 음의 왜도 값 (평균 -0.3)을 보였는데, 이는 이 지역이 고에너지 환경으로 침식이 활발하게 진행되고 있거나 혹은 조립질 퇴적물의 비율이 다른 지역에 비해 높기 때문인 것으로 생각된다.

전반적으로 변산반도 조간대는 금강 하구둑과 새만금 방조제 건설이후 금강, 만경강과 동진강으로부터 직접적인 퇴적물 공급이 차단되고, 방조제로 인해 조류의 흐름과 세기가 바뀌어 퇴적물의 침식 및 퇴적작용이 활발함에도 불구하고 고사포 해수욕장과 변산 해수욕장 주변의 평균해수면보다 상부에 위치하거나 근처에 있는 일부 정점들을 제외하면, 아직 뚜렷한 퇴적물의 입도 및 통계적 변수특성 변화를 보이지는 않는다. 이는 앞서 퇴적물 변화에서도 설명하였듯이, 연구지역 주변의 조간대 및 조하대 퇴적물이 유사한 퇴적상 (사(S), 약역질사 ((g)S), 니질사 (mS))을 보이고 있고 (Lee and Ryu, 2007, 2008), 조석이나 파도에 의해 부유된 퇴적물들이 조류의 흐름에 의해 방조제 앞쪽에서부터 변산반도 연안을 따라 남서쪽으로 이동하면서 연구지역내 넓은 조간대 지역에 효과적으로 분산되었기 때문인 것으로 생각된다.

표층 퇴적물의 유기물 함량

변산반도 조간대 퇴적물중 유기물 함량 및 계절적 변화특성을 알아보기 위해 WC, IL과 COD 농도를 Fig. 7에 나타내었다. 연구지역내 표층 퇴적물중 WC는 $8 \sim 37\%$ (평균 $26.1 \pm 4.2\%$) 범위로 비교적 다소 조립하고 지형적 경사가 컸던 변산 해수욕장 부근의 측선 C 조간대 상부 정점들 (C1, C2)에서 다른 정점들에 비해 다소 낮고 큰 월별 혹은 계절별 변화를 보였다. 그러나, 그 외 정점들에서는 $20 \sim 30\%$ 범위에서 서로 비슷한 함량을 보이고 큰 계절적 차이를 보이지 않았다.

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	Sampling zone	IL (%)	COD (mgO ₂ /g-dry)	AVS (mgS/g-dry)	Reference
Masan Harbor	sublittoral zone	7.2~14.3 (11.2)	11.3~29.9 (19.6)	0.20~4.47 (1.83)	Hwang et al. (2006)
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)
Coastal Sea of Korea	sublittoral zone	1.4~10.8 (6.7)	3.2~21.7 (12.4)	ND~1.12 (0.24)	Kang et al. (1993)
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 ± 0.4)	0.2~18.5 (3.9 ± 3.4)	ND	This study

* ND = Not Detected.

퇴적물중 IL은 0.2~2.9% (평균 $1.4 \pm 0.4\%$) 범위로 연구지역 내 거의 모든 정점들이 비슷한 농도를 보였으며, 봄철 (5월)에 다른 조사시기에 비해 다소 높은 값을 보였다. 퇴적물중 COD는 0.2~18.5 $\text{mgO}_2/\text{g-dry}$ (평균 $3.9 \pm 3.4 \text{ mgO}_2/\text{g-dry}$) 범위로 IL과 달리 각 정점별로 큰 농도차이를 보였으나 조간대 위치에 따른 뚜렷한 농도 분포경향을 보이지 않았다. 그러나, IL과 마찬가지로 특이하게 봄철 (5~6월)에 다른 시기에 비해 2배 이상 높은 값을 보였으며, 봄철이후에는 거의 모든 정점에서 5.0 $\text{mgO}_2/\text{g-dry}$ 이하의 낮은 값을 보였다. 최근, Shin et al. (2010)은 일본의 나나키타강 하구에서 계절별로 퇴적물중의 유기물량과 그 기원은 다르지만 사질갯벌에서는 주로 부착조류와 해양성 유기물이 퇴적물내 유기물의 기원이라고 보고한 바 있다. 비록 이 연구결과가 비슷한 환경에서 수행된 연구는 아니지만, 변산반도 조간대 표층퇴적물 또한 봄철에 높은 IL과 COD 값을 보이는 것은 해수 중 플랑크톤과 조간대 퇴적물 표층에 서식하는 저서미세조류의 대번식과 관련이 있는 것으로 생각되며, 보다 명확한 원인 구명을 위해서는 앞으로 연구지역 주변의 해수와 퇴적물 중의 Chl. a, TOC, TN, 안정동위원소 (^{13}C , ^{15}N) 측정 등 유기물 기원을 밝힐 수 있는 여러 가지 인자들에 대한 종합적인 연구가 필요하다. 한편, 변산반도 조간대 표층 퇴적물중 IL과 COD 함량은 양식활동이 활발하게 이루어지고 있는 반폐쇄적인 내만 (Noh et al., 2006)이나 육상으로부터 오염된 하천수의 유입이 있는 항내 (Hwang et al., 2006), 그리고 연구지역과 다른 퇴적상으로 이루어진 니질 조간대 (Kim et al., 2003; Hwang et al., 2010)를 포함한 우리나라 연안해역에서 측정된 값보다 상당히 낮은 농도였다 (Table 1).

퇴적물중 AVS 농도는 조사기간 동안 연구지역내 모든 정점에서 검출되지 않았다. 일반적으로 황화물을 생성하는 황산염 환원세균은 퇴적물내에서 에너지원으로 COD로 대변되는 생분해성 유기물을 이용하고 본 연구지역과 같이 퇴적물내 COD의 농도가 낮은 경우에는 황화물의 생성속도가 매우 느린 것으로 알려져 있다 (Yoon, 2003). 또한, 최근에 Hwang et al. (2008)은 우리나라 연안 사질 조간대 퇴적물에서 조석과 파도 등과 같은 해양의 물리적 에너지의 영향으로 퇴적물내 상부 20 cm까지 공극수와 해수사이에 활발한 물질교환이 이루어진다고 보고한 바 있다. 따라서, 연구지역내 퇴적물중 AVS의 농도가 검출되지 않은 것은 연구지역이 투수성이 높은 사질로 이루어져 생분해성 유기물 함량이 매우 낮고, 큰 조석차에 의한 썰물시 노출과 밀물시 재순환하는 해수의 영향으로 표층 퇴적물이 산화환경을 유지하고 있어 표층 퇴적물중 황산염 환원세균에 의한 황화물의 생성이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 연구결과는 이전에 본 연구지역과 다른 해양환경을 가진 전남 서부연안의 니질조간대 표층 퇴적물에서도 보고된 바 있다 (Hwang et al., 2010).

지금까지의 연구결과를 종합해 보면, 변산반도 조간대는 개방형의 해안으로서 비교적 평탄한 경사를 보이고 사 (S) 혹은 약역질사 ((g)S) 퇴적물이 분포하고 있다. 계절에 따른 입도분포 변화는 적으며, 조석과 파랑에 의한 재순환하는 해수의 영향으로 해수와 퇴적물 경계면을 통해 교환작용이 활발

하여 퇴적물내 유기물 오염은 심각하지 않은 것으로 보인다. 그러나, 퇴적물은 방조제 앞쪽에서 다른 지역에 비해 큰 침식우세 현상을 보이고, 계절적으로 봄과 겨울철에는 퇴적되고 여름과 가을철에는 침식되는 경향을 보여, 일반적인 개방형 해안에서의 퇴적 및 침식현상과 다른 양상을 나타낸다. 이러한 결과는 방조제의 건설로 인해 조류의 방향 및 유속의 세기, 부유물질의 양 등이 변함으로서 이전과 다른 퇴적환경이 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 이 같은 단기간의 조사결과만을 가지고 변산반도 조간대의 퇴적환경 변화를 단정짓기에는 부족함이 있으며, 퇴적환경 변화와 방조제사이의 관계에 대한 명확한 사실구명을 위해서는 모든 조간대 지역에 대한 퇴적률, 퇴적물 이동량 조사 등을 포함한 퇴적환경 변화에 대한 장기적인 모니터링 연구가 필요하다. 또한, 퇴적환경 변화가 퇴적물내 서식하는 갯지렁이류 및 패류를 포함한 많은 저서생물들에게 어떠한 영향을 미치는지에 대한 종합적인 연구도 요구된다.

사 사

이 연구의 현장조사 및 시료채취에 도움을 준 국립수산물과학원 갯벌연구소 연구원들 및 연안관리기술연구소 박정훈 연구원에게 감사를 드립니다. 이 논문은 국립수산물과학원 수산시험연구과제(저서동물군집을 이용한 생태계 평가기법 연구, RP-2010-ME-002)의 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

- Alexander CR, Nittrouer CA, Demaster DJ, Park YA and Park SC. 1991. Macrotidal mudflats of the southwestern Korea coast: a model for interpretation of intertidal deposits. *J Sed Pet* 61, 805-824.
- An SM, Lee JH, Woo HJ, Koo BJ, Lee HG, Yoo JW and Je JG. 2006. Benthic environment and macrofaunal community changes during the dike construction in Saemangeum subtidal area, Korea. *Ocean Polar Res* 28, 369-383.
- Cha SS, Chun SJ, Yang JS and Choi KW. 2004. Species composition and abundance of Ichthyoplankton in the water of Saemangeum, Korea 2003. *Kor J Ichthyol* 16, 321-330.
- Chang JH, Kim YS and Cho YG. 1999. Tidal-flat sedimentation in a semiclosed bay with erosional shorelines: Hampyong Bay, west coast of Korea. *The Sea - J Kor Soc Oceanogr* 4, 117-126.
- Chang JH, Ryu SO and Jo YJ. 2007. Long-term variation of tidal flat sediments in Gomso Bay, west coast of Kora. *J Kor Ear Sci Soc* 28, 357-366.
- 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. *The Sea - J Kor Soc Oceanogr* 6, 27-34.
- Choi BH and Kang YD. 1990. Preliminary estimation of barrier effects on tides in Saemangeum area. *J Kor Soc Coast Ocean Engin* 2, 34-42.
- Davies JS. 1964. A morphogenic approach to world 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 Petrol* 27, 3-26.
- Han JH and Choi MS. 2007. Estimation of ^{210}Pb -derived sedimentation rates in the southwestern East Sea. *The Sea - J Kor Soc Oceanogr* 12, 273-279.
- Hong GH, Kim SH, Chung CS, Kang DJ, Shin DS, Lee HJ and Han SJ. 1997. ^{210}Pb -derived sediment accumulation rates in the southwestern East Sea (Sea of Japan). *Geo-Mar Lett* 17, 126-132.
- Hong SH, Shim WJ, Li DH, Yim UH, Oh JR and Kim ES. 2006. Contamination status and characteristics of persistent organochlorine pesticides in the Saemangeum Environment. *Ocean Polar Res* 28, 317-329.
- 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.
- Hwang DW, Kim G and Yang HS. 2008. Active exchange of water and nutrients between seawater and shallow pore water in intertidal sandflats. *Ocean Sci J* 43, 223-232.
- Hwang DW and Yang HS. 2003. Distributions of metallic elements in the sediment cores from several shellfish-farming bays in Korea. *J Kor Soc Oceanogr* 38, 17-23.
- Hwang SD and Kim JS. 2003. Change in community structure of shellfish in the reclaimed Saemangeum area. *J Kor Fish Soc* 36, 708-715.
- 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.
- Kil HJ, Choi MA and Choe BL. 2006. Marine molluscs of Saemangeum. *Kor J Environ Biol* 24, 19-28.
- Kim JG and Kim YS. 2002. Application of ecosystem model for eutrophication control in coastal sea of Saemankeum area I. Characteristics of water quality and nutrients released from sediments. *J Kor Fish Soc* 35, 348-355.
- Kim CS, Lee SH, Son YT, Kwon HK, Lee KH, Kim YB and Jeong WJ. 2006. Changes of surface M_2 currents as observed by HF radar before and after Saemangeum fourth tidal dyke closing. *The Sea - J Kor Soc Oceanogr* 11, 37-48.
- Kim CS, Lee SH, Son YT, Kwon HK, Lee KH and Choi BJ. 2008. Variations in subtidal surface currents observed with HF radar in the coastal waters off the Saemangeum area. *The Sea - J Kor Soc Oceanogr* 13, 56-66.
- Kim JG and You SJ. 2001. Estimation of decomposition capacity for organic matter in tidal flat sediments at Saemankeum area. *J Environ Sci* 10, 315-321.
- Kim JG, You SJ, Cho EI and Ahn WS. 2003. Distribution characteristics of heavy metals for tidal flat sediments in the Saemangeum area. *J Kor Fish Soc* 36, 55-61.
- Kim KT, Kim ES, Kim SS, Park JS, Park JK and Cho SR. 2009. Water quality and heavy metals in the surface seawaters of the Saemangeum area during the Samangeum-dike construction. *J Kor Soc Mar Environ Engin* 12, 35-46.
- KMA. 2009. 2008 annual climatological report. Korea Meteorological Admiastration, Seoul, Korea, 306.
- Koo BJ, Shin SH, Woo HJ, Kim ES and Jae JG. 2008. Changes in macrobenthic community structure on Gunsan tidal flat after the closing of the Saemangeum 4th dyke. *Ocean Polar Res* 30, 497-507.
- Lee CR, Kang HK and Noh JH. 2009. Temporal and Spatial variation of zooplankton community structure post construction of Saemangeum dyke. *Ocean Polar Res* 31, 327-338.
- Lee GH and Lee HJ. 2008. Examination of vertical 1D sediment resuspension and diffusion model using field data collected in the Saemangeum area. *Ocean Polar Res* 30, 537-543.
- Lee HJ, Jo HR and Kim MJ. 2006. Topographical changes and textural characteristics in the areas around the Saemangeum dyke. *Ocean Polar Res* 28, 293-303.
- Lee HJ and Ryu SO. 2007. Role of the giant Saemangeum dyke in sedimentation at the mouth of an estuarine complex. *Mar Geol* 239, 173-188.
- Lee HJ and Ryu SO. 2008. Change in topography and surface sediments by the Saemangeum dyke in an

- estuarine complex, west coast of Korea. *Cont Shelf Res* 28, 1177-1189.
- 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 SH, Choi HY, Son YT, Kwon HK, Kim YK, Yang JS, Jeong HJ and Kim JG. 2003a. Low-salinity water and circulation in summer around Saemangeum area in the west coast of Korea. *The Sea - J Kor Soc Oceanogr* 8, 138-150.
- Lee TW, Hwang HB and Hwang SW. 2007. Change in fish species composition in the Saemangeum reservoir after the construction of dike in 2006-2007. *The Sea - J Kor Soc Oceanogr* 12, 191-199.
- Lee TW, Moon HT and Kim GC. 2003b. Seasonal variation in species composition of fish in the estuary of Saemangeum waters during the construction of a dike in 2001-2002. *J Kor Fish Soc* 36, 298-305.
- Lie HJ, Cho CH, Lee S, Kim ES, Koo BJ and Noh JH. 2008. Changes in marine environment by a large coastal development of the Saemangeum reclamation project in Korea. *Ocean Polar Res* 30, 475-484.
- 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 Choi K. 1999. Environment of deosition and characters of surface sediments in the nearshore off Byun-San peninsula, Korea. *The Sea - J Kor Oceanogr* 4, 107-116.
- Oh JK and Kum BC. 2001. Depositional environments and characteristics of surface sediments in the nearshore and offshore off the mid-western coast of the Korean Peninsula. *J Kor Earth Sci Soc* 22, 377-387.
- Oh SJ, Moon CH and Park MO. 2004. HPLC analysis of biomass and community composition of microphytobenthos in the Saemankeum tidal flat, west coast of Korea. *J Kor Fish Soc* 37, 215-225.
- Park GH, Kim KY, Kim CH and Kim HG. 2004a. Spatio-temporal distribution of dinoflagellate resting cysts at the Saemangeum area. *J Kor Fish Soc* 37, 202-208.
- Park GS, Park SY, Lee SG and Lee Y. 2004b. Geochemistry and water quality in the tidal flat of Saemangeum area, west sea of Korea in summer. *J Kor Wetl Soc* 6, 133-147.
- Rho HS, Jung JW and Kim W. 2004. Marine decapods of Saemangeum. *Kor J Environ Biol* 22, 464-471.
- Ryu SO. 2003. Seasonal variation patterns of tidal flat sediments in semi-enclosed Hampyong and Kwangyang Bays, west and south coasts of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 24, 578-591.
- 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 and Chang JH. 2005. Characteristics of tidal beach and shoreline changes in Chonsu Bay, west coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 26, 584-596.
- Ryu SO and Sin YS. 2006. Sedimentologic characteristics of tidal flat sediments after the construction of sea dyke in Kwangyang Bay, south coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 27, 659-669.
- Ryu SO, Kim JY and You HS. 2000. Seasonal variation and transport pattern of suspended matters in semiclosed Muan Bay, southwestern coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 21, 128-136.
- Ryu SO, Kim JY, Chang JH, Cho YG, Shin SE and Eun GYN. 2006. A study on the transport mechanism of tidal beach sediments I. Deukryang Bay, south coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 27, 221-235.
- Shin DH, Kum BC, Park EY, Lee HI and Oh JK. 2004. Seasonal sedimentary characteristics and depositional environments after the construction of seawall on the Iwon macrotidal flat. *J Kor Earth Sci Soc* 25, 615-628.
- Shin WS, Lee YD, Fujibayashi M, Nagahama Y, Nomura M and Nishimura O. 2010. The origin of sediment organic matters at tidal flat in estuary. *Kor Soc Enviorn Engin* 32, 1177-1184.
- Suh SW, Cho WH and Yoo GS. 2006. Simulation of mixing transport on inner reservoir and influence impacts on outer region for the Saemankeum effluents caused by gate operation. *J Kor Soc Coast Ocean Engin* 18, 43-52.
- Sung HH and Bang KW. 2005. The depositional sedimentary environments of Mallipo beach in the winter. *J Kor Geomorph Assoc* 12, 87-98.
- Yang BC and Chun SS. 2001. A seasonal model of surface sedimentation on the Baeksu open-coast intertidal flat, southwestern coast of Korea. *Geosci J* 5, 251-262.
- Yang HS and Kim SS. 1994. Pollution of heavy metals and sedimentation rate in the sediments of Suyeong bay, Pusan. *Bull Kor Fish Soc* 27, 643-658.
- Yang JS, Jeong YH, Ji KH, Kim HS, Choi JH and Kim

- WJ. 2008. The early-stage changes of water qualities after the Saemangeum sea-dike construction. *J Kor Soc Mar Environ Engin* 11, 199-213.
- Yang SH and Hwang KN. 2008. An analysis of the variation in the settling properties of cohesive sediments before and after closure of the Saemankeum seadike. *J Ocean Engin Technol* 22, 20-26.
- Yoo YD, Jeong HJ, Shim JH, Park JY, Lee KJ, Yih W, Kweon HK, Pae SJ and Park JK. 2002. Outbreak of red tides in the coastal waters off the southern Saemankeum areas, Jeonbuk Korea 1. Temporal and spatial variations in the phytoplankton community in the summer-fall of 1999. *The Sea-J Kor Soc Oceanogr* 7, 129-139.
- 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.
- You SJ, Kim JG and Cho EI. 2003. Characteristics of particle composition and organic matter distribution for tidal flat sediments in the Saemangeum area. *J Kor Fish Soc* 36, 49-54.
- Well JT, Adams CEJ, Park YA and Frankenberg EW. 1990. Morphology, sedimentology and tidal channel processes on a high-tidal range mudflat, west coast of south Korea. *Mar Gel* 95, 111-130.
- Woo HJ, Cho JH, Jeong KS, Chung CS, Kwon SJ and Park SM. 2003. Pollution history of the Masan bay, southeast Korea, from heavy metals and foraminifera in the subsurface sediments. *J Kor Earth Sci Soc* 24, 635-649.
- Woo HJ, Choi JU, An SM, Kwon SJ and Koo BJ. 2006. Changes of sedimentary environments in the Saemangeum tidal flat on the west coast of Korea. *Ocean Polar Res* 28, 361-368.

2010년 10월 27일 접수
 2010년 11월 17일 수정
 2010년 12월 3일 수리