

강화도 장화리 조간대의 퇴적 특성

오재경¹ · 도종대^{2,*} · 조용구¹

¹인하대학교 해양학과, 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

²한국해양연구원 연안개발연구본부, 425-600 경기도 안산시 우체국 사서함 29

Sedimentary Characteristics in the Tidal Flat of Janghwa-ri, Kangwha Island, Eastern Yellow Sea

Jae-Kyung Oh¹, Jong-Dae Do^{2,*}, and Yong-Gu Jo¹

¹Department of Oceanography, Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea

²Coastal Engineering Research Department, KORDI, Ansan P. O. Box 29, 425-600, Korea

Abstract: In Janghwa-ri of Kanghwa Island morphological changes in four transects, 112 surface, and 2 core sediments were analyzed to understand the seasonal variation of the muddy tidal-flat environment. Sedimentary of facies can be classified into four facies; sand, muddy sand, sandy mud, and silt. During winter, the coarse-grained sediment facies expanded seaward. In the subsurface part of the core sediments, poorly sorted silty sediments dominate the area. According to the Pb-210 isotope analysis, accumulation rates of the tidal flat in Jangwha-ri appear to be 5~19 mm/yr. In the study area, the result is suggestive of a rapid change in depositional environments in recent years.

Keywords: seasonal variation, tidal flat, sedimentary facies, Pb-210 isotope

요 약: 강화도 장화리 니질 조간대의 계절 변화에 따른 지형 변화와 퇴적 환경을 알기 위해서 4개 측선의 지형 변화, 112점의 표층 퇴적물 그리고 2점의 주상 퇴적물을 얻어 퇴적학적 분석과 방사선 동위원소 분석을 수행하였다. 표층 퇴적물은 크게 4가지의 퇴적상 즉, 사질, 니질 사, 사질 니, 실트로 나누어졌다. 장화리 조간대는 겨울철로 갈수록 표층 퇴적상이 조립해지고, 조간대 경사가 급해지는 등 전형적인 계절적 변화가 나타났다. 주상퇴적물에서 전체적인 퇴적상은 실트가 우세하고 분급은 불량하였다. Pb-210 동위원소를 분석한 결과 강화도 조간대의 평균 퇴적속도는 약 5 mm/yr로 나타났다. 또한 주상시료 최상부 퇴적상의 차이는 최근 이 연구 지역의 급격한 퇴적환경 변화를 지시하며, 이는 최근 주변 해역의 대규모 연안 개발 사업과 연관되어있는 것으로 사료된다.

주요어: 계절변화, 조간대, 퇴적상, Pb-210 동위 원소

서 론

한반도 서해안은 넓은 조간대가 분포하고 있어 생태계는 물론 공간 자원으로 매우 중요한 위치를 차지한다. 조간대의 형태는 하구 환경, 만 내부, 그리고 연안 특성에 따라 좌우되며, 이러한 지형적 특성은 수리적인 요인(파랑, 조석, 해류 등)에 의해 영향을 받는다. 또한 조간대는 해안선 변화 등 인위적인 해

양환경 변화에 따른 퇴적환경 변화가 크게 나타나는 지역이다. 이런 현상을 규명하기 위하여 서해안의 인천, 아산만, 몽산포, 대부도, 대호, 군산, 영광, 남양만, 곰소만, 백수 그리고 함평만 조간대에서 과거 많은 퇴적학적 연구가 실시되었다(한국해양연구소, 1982; Frey et al., 1989; Wells et al., 1990; Alexander et al., 1991; Lee et al., 1994; 장진호 외, 1996; Park, 1996; Koh, 1997; 오재경과 금병철, 1998; Lee et al., 1999; 장진호 외, 1999; Kim et al., 1999; Yang and Chun, 2001; 오재경과 금병철, 2002). 서해안 조간대는 일반적으로 니질퇴적물이 우세하게 나타나며 경기만 남부와 태안반도를 중심으로 사질퇴적물이 나

*Corresponding author: eagles78@naver.com

Tel: 82-31-400-7808

Fax: 82-31-408-5823

타나고, 또한 계절풍의 영향으로 침식과 퇴적이 반복된다. 그 중 강화조간대는 니질퇴적물에 의한 대표적인 하구조간대로 독특한 지형, 동식물의 서식지 그리고 철새 도래지로 다양한 사회/경제적 가치가 있는 곳으로 주목받고 있다. 그렇지만, 인천연안에 1992년부터 시작된 인천국제공항 및 고속도로 건설, 인공구조물 설치로 인해 연안지형이 바뀌어 인위적인 환경변화에 따른 생태계 변화는 물론 연안 환경변화에도 큰 관심이 집중되고 있다. 이에 따라서 강화조간대의 퇴적학적 환경 조사가 실시되었지만(우한준과 제종길, 2002), 지역에 따른 세밀한 조사는 아직까지 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 지역적으로 보다 정밀한 조사를 통해 강화도의 대표적인 조간대인 장화리 주변해역의 지역적이고 계절적인 퇴적학적 특성을 파악하는데 있다.

연구 지역

지형 및 지질

연구지역은 경기만 북부의 북위 37° 35'~37° 40', 동경 126° 20'~126° 25' 내에 위치하고 있는 강화도 남서부 장화리 일대의 니질조간대 중 상부조간대이다 (Fig. 1). 본 연구지역의 지질은 한반도 지체구조 중 경기육괴에 해당하는 지역으로 경기변성암복합체를 비롯하여 변성퇴적암과 주라기의 심성암류가 주로 분포하고, 이 중 화강암류와 편암류가 가장 우세하게 나타난다(한국자원연구소, 1999). 연구지역 주변으로 한강, 임진강, 예성강 등 많은 양의 퇴적물을 공급할 수 있는 하천이 존재하며 동쪽의 섬 경계로 폭이 약 300~1,500 m로 비교적 좁은 염화수호가 있고, 서쪽 경계에는 약 1,200~3,800 m 폭의 석모수호가 존

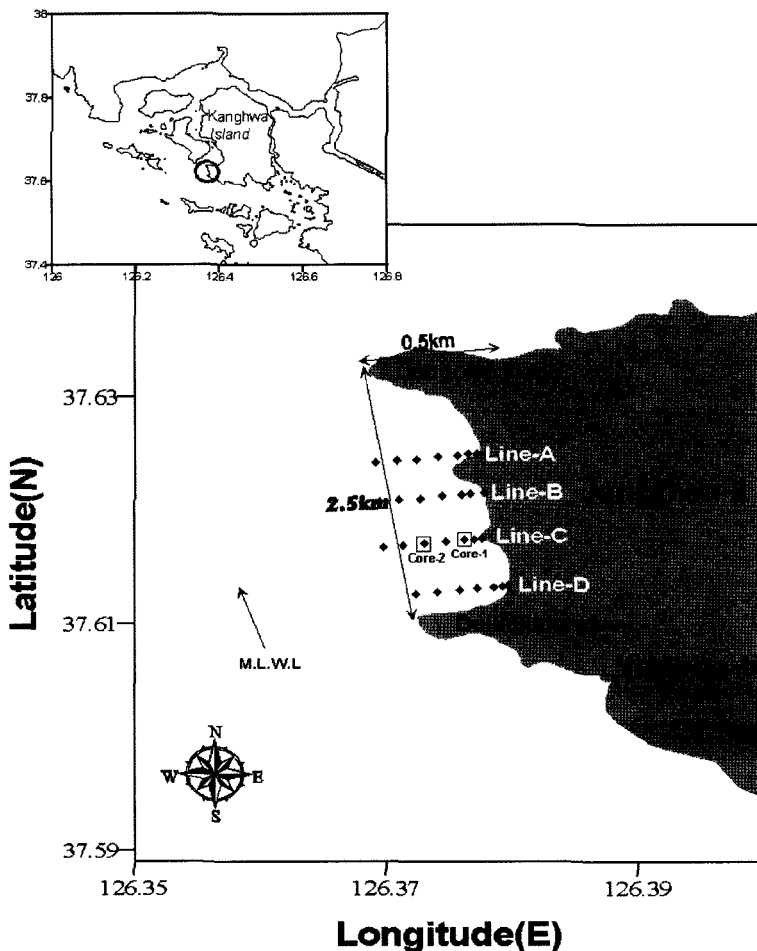


Fig. 1. Map showing the sampling stations (◆: surface sediments, □: Core sediments).

Table 1. Monthly average of air-temperature, wind speed, and precipitation at Kangwha Island (The Meteorological Administration, January 1971~May 2003)

Month	Temperature(°C)			Wind Speed(m/s)		Precipitation(mm)	
	Ave.	Max.	Min.	Ave.	2002.6~2003.5	Ave.	2002.6~2003.5
June	20.1	25.2	15.7	1.8	2.1	119.1	78.0
July	23.6	27.7	20.5	1.9	2.3	368.2	211.0
August	23.8	28.4	20.1	1.7	2.4	300.7	408.0
September	19.9	25.6	14.9	1.6	1.7	63.8	39.0
October	12.9	18.8	7.5	1.5	2.8	69.4	56.5
November	4.5	9.8	-0.6	1.5	3.3	25.8	13.5
December	-1.1	3.8	-5.9	1.4	2.7	19.7	11.7
Jan.	-4.0	0.8	-8.7	1.3	2.9	39.3	9.9
February	-0.7	4.5	-5.5	1.4	2.3	23.0	33.1
March	4.3	9.4	-0.7	1.7	2.4	27.6	26.5
April	11.2	16.6	5.6	1.8	2.3	98.9	142.5
May	16.2	22.0	11.0	2.0	1.8	62.8	19.9
Monthly Ave.	10.91	6.1	6.2	1.6	2.4	101.5	87.5

재한다. 그리고 강화도 남쪽으로는 최대거리 약 6 km, 면적은 약 90 km² 넓은 조간대가 분포한다. 또한 강화 남부지역은 사질, 니질 그리고 사질과 니질이 혼합된 다양한 조간대가 존재하며 그 중 장화리 조간대는 대표적인 니질조간대이다.

수리 기상학적 특성

본 연구지역은 한반도 중부 서해안에 위치하여 중국대륙 또는 시베리아에서 발생하는 양쯔강 기단과 시베리아 기단의 영향을 한반도에서 가장 먼저 직접적으로 받는 지역이므로 겨울철에는 지형적인 영향으로 고기압 확장시에도 흐리거나 강우가 있는 날이 많다. 또한 봄철에는 이동성 고기압과 저기압의 빈번한 통과로 일기가 급변하는 날이 많이 있다. 풍향은 북태평양 기단과 오호츠크해 기단의 영향을 많이 받는 여름과 가을철에도 지역적인 특성 때문에 해풍(북서-남서)이 우세한 경우가 많다. 이로 인해 해양성 기후의 특징을 띄어 같은 위도의 내륙지방보다 따뜻하다. 강화도의 1971년 1월부터 2003년 5월까지 33년간 주요 기상자료를 분석한 결과 연평균 기온은 10.9°C로 인천에 비해 0.8°C, 서울에 비해 1.3°C 낮고 최고기온은 8월로 평균 23.8°C, 최저기온은 1월로 평균 -4°C를 보이며 27.8°C의 연교차를 나타낸다(Table 1). 평균풍속은 1.3~2.0 m/s(평균 1.6 m/s)이고 특히 다른 계절에 비해 봄·여름 해당하는 3~8월 까지 1.7~2.0 m/s로 강한 풍속을 나타낸다. 연강수량은 약 1,300 mm 내외로 여름인 7,8월에 50% 이상 집중된

다. 또한 연구기간동안(2002년 6월~2003년 5월)의 평균풍속은 1.7~3.3 m/s(평균 2.4 m/s)로 예년보다 강한 풍속을 나타내었고, 2002년 11월에 3.3 m/s로 가장 강하게 나타났다. 총 강수량은 1049.6 mm, 월평균 87.5 mm로 7,8월에 집중되는 양상을 보이고 있다(기상청, 2002; 기상청, 2003).

주변 해역의 조석(2002. 7~2003. 6, 인천항)은 조석형태수가 0.17로 전형적인 반일주조 일조부등이 우세하며 약최고고조가 940.8 cm, 대조와 소조의 평균 고조는 각각 872.1 cm, 642.7 cm를 나타낸다. 대조의 평균저조는 68.5 cm, 소조의 평균저조는 298.1 cm 이고 대조차, 평균조차 그리고 소조차는 각각 803.4 cm, 574.0 cm, 328.3 cm로 나타났다(Fig. 2).

강화도 부근의 조류는 장봉수로 남부에서 창조시 2.7~4.7 knt/h로 창조류가 우세하나, 석모수로에서는 2.7~6.7 knt/h로 낙조류가 우세하다(수로국 1981). 장현도와 오재경(1991)에 의하면 주변해역의 부유퇴적물 농도는 석모수로와 염화수로 평수기인 5월중 표층 150.8 mg/l~1074.0 mg/l, 저층에서 208.0~1397.6 mg/l이며, 풍수기인 8월에는 표층 88.8~1170.8 mg/l, 저층 257.6~2921.2 mg/l로 대체적으로 풍수기 동안의 농도가 높고 변화폭도 크게 나타난다. 또한 강화도 남단에 위치한 세어도 부근에서는 5월 표층에서 63.2~266.8 mg/l, 저층에서 139.2~344.8 mg/l로 나타났으며, 8월에는 표층 9.2~465.2 mg/l, 저층에서 20.4~631.6 mg/l로 나타났다. 이러한 현상은 유속비(낙조류/창조류)가 크고 유량증가에 따른 부유물질의 대부분

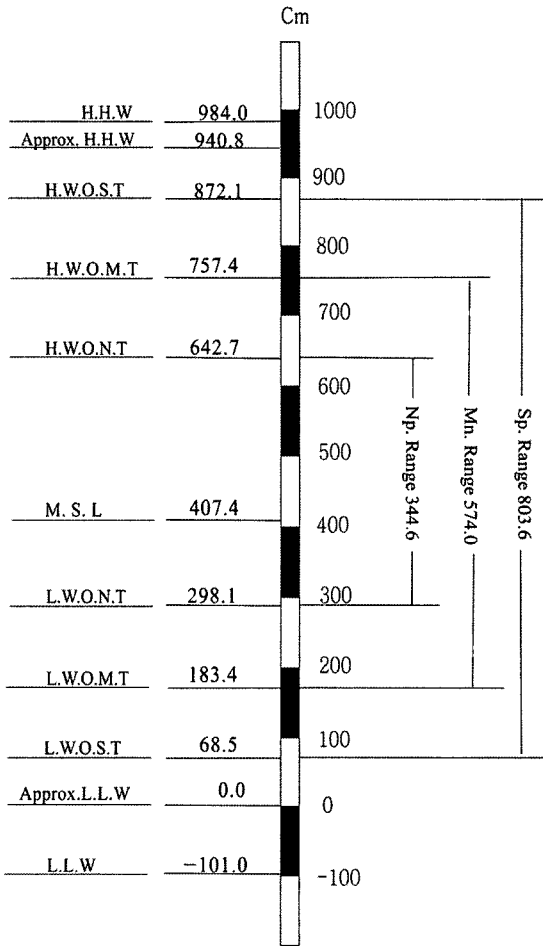


Fig. 2. Tidal range measured at Incheon harbor (Nori, July 2002~June 2003).

이 외해로부터의 공급이 아닌 상류로부터 공급되기 때문인 것으로 사료된다(장현도와 오재경, 1991).

재료 및 방법

강화도 남부 장화리 니질조간대 퇴적물의 계절적 변화를 확인하기 위해 각 계절을 대표하는 2002년 8월(여름), 11월(가을), 2003년 1월(겨울), 5월(봄)에 4회 현장조사를 실시하였다(Fig. 1). 현장 조사는 모두 대조기에 실시되었으며, 28개의 정점에서 총 112개의 표층퇴적물을 채취하였다. 또한 계절별 조간대 지형변화를 확인하기 위해 4개의 축선(축선 A~D)에서 광과거리계(Electronic Total Station GTS-225)를 이용하여 계절별 4회 수준측량을 실시하였다. 각 축선 사이의 정점 3개를 정하여 각 축선 간 고도보정을 실시하였다.

2003년 6월 대조기 시기에 축선 C의 100 m (Core-1; 100 cm)와 300 m (Core-2; 310 cm) 지점에서 Hand Auger를 이용하여 주상퇴적물을 채취하였다. 채취된 표층퇴적물에 대해 입도분석을 실시하였고, 주상퇴적물은 3~20 cm 간격으로 입도분석을 실시하였다. 또한 조간대의 퇴적속도를 파악하기 위해 주상퇴적물(Core-1, -2) 중 표층으로부터 각각 33 cm와 58 cm까지(3 cm 간격) 한국 기초 과학 지원 연구원에 의뢰하여 방사능 동위 원소(Pb-210, Ra-226)의 깊이별 분포를 확인하였고, 이를 통해 각각 주상퇴적물의 퇴적속도를 산정하였다.

퇴적물의 입도분석은 HCl과 H₂O₂로 탄산염과 유기물을 제거한 후 증류수를 이용한 회석을 통해 용해성 염분을 제거하였다. 처리된 시료는 습식체질을 통해 4φ 이하의 조립질 시료와 5φ 이상의 세립질 시료로 분리한 후 조립질 시료는 진탕기(Rotap sieve shaker)를 이용하여 1φ 간격으로 분석하였으며, 세립질 시료는 자동입도분석기(Sedigraph 5100)를 이용하여 분석하였다. 분석된 입도자료는 입도 누적확률분포 곡선상에 나타내고 Folk and Ward(1957)의 그래픽 방법(graphic method)을 통해 퇴적물의 조직변수를 구하였다.

결 과

기상 자료 및 조간대 지형 변화

연구기간 동안 기상자료를 분석한 결과 월평균 풍속은 1.7~3.3 m/s 범위로 나타났으며, 2002년 11월에 3.3 m/s로 가장 강한 풍속을 나타냈다. 또한 겨울철로 갈수록 상대적으로 강한 평균 풍속을 보이고 있다. 월 최대 풍향은 겨울철로 갈수록 북서계열의 계절풍의 영향이 크게 나타나고, 일별 강수량은 여름철에 집중되는 것으로 나타난다(Fig. 3). 본 연구지역의 조간대 경사도는 모든 축선에서 0.2~0.4° 정도의 비교적 완만한 조간대 경사를 보이고 있다. 계절적 지형 변화는 전반적으로 축선 A에서 축선 D로 갈수록 조간대 경사도가 비교적 급해지고, 연안에서 100 m 이내에서 급격한 경사도 변화를 나타냈다. 수준높이의 변화 역시 축선 D 방향으로 크게 나타났다(Fig. 4).

표층 퇴적물의 퇴적상 및 입도 특성

표층퇴적물의 조성은 사계질 모두 자갈과 모래, 실트 그리고 점토가 모두 포함된 다양한 분포를 보이

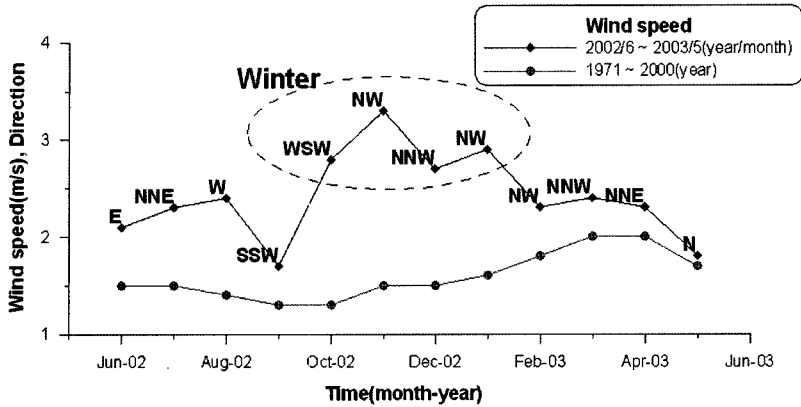


Fig. 3. Monthly average of wind speed and direction at study area (The Meteorological Administration, June 2002~ May 2003).

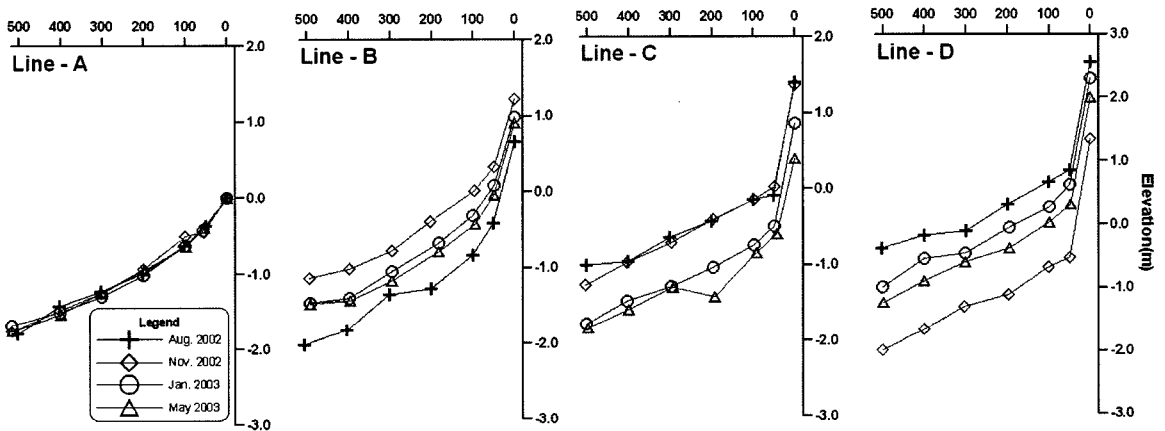


Fig. 4. Seasonal variation of topographic profile (Line -A, -B, -C, -D). The symbols on profile represent sampling stations.

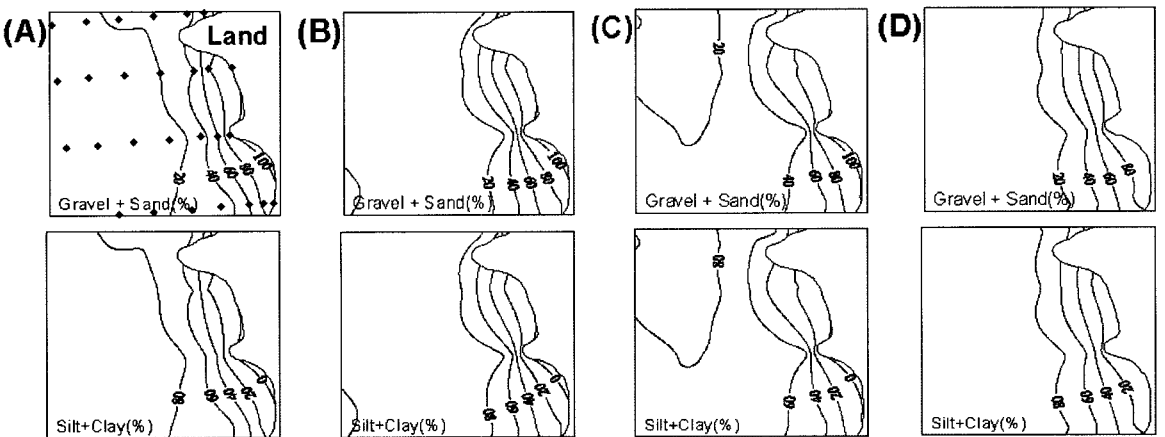


Fig. 5. Seasonal variation of gravel+sand and mud (silt+clay) contents(%) of surface sediments (◆: sampling station) in (A) August 2002, (B) November 2002, (C) January 2003, (D) May 2003.

고 있다(Fig. 5). 계절별 퇴적물의 조성은, 하계인 8월에 자갈과 모래 5.57~99.87%, 실트 0.12~91.34%,

점토 0.00~13.54%로 분포하며, 추계인 11월에 자갈과 모래 1.28~99.96%, 실트 0.04~98.72%, 점토 0.00

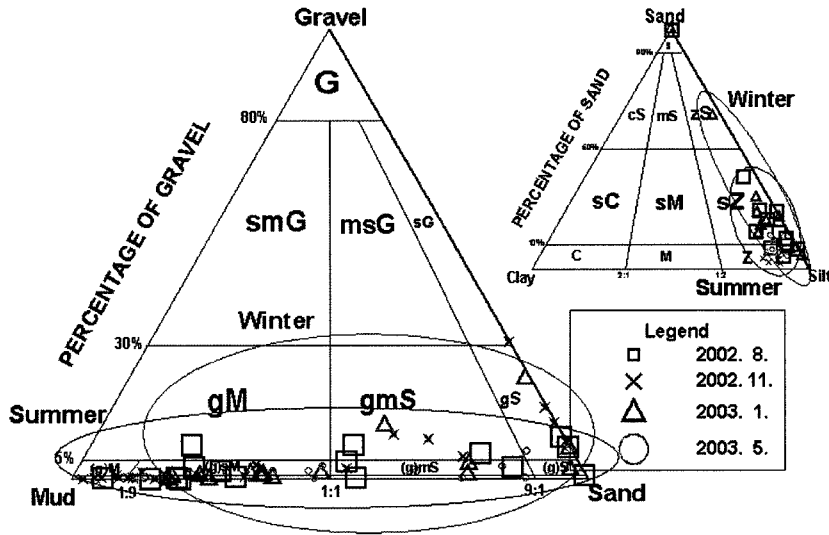


Fig. 6. Ternary diagrams of total surface sediments (Folk, 1968). (□: summer, ×: autumn, △: winter, ○: spring)

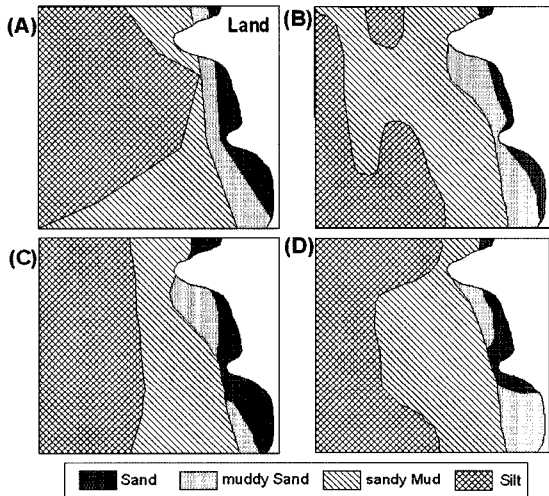


Fig. 7. Seasonal variation of surface sediment facies on Janghwa tidal flat in (A) August 2002, (B) November 2002, (C) January 2003, (D) May 2003.

~14.44%로 분포한다. 또한 동계인 1월에 자갈과 모래 5.34~99.96%, 실트 0.04~94.66%, 점토 0.00~18.83%로 분포하며, 춘계인 5월에는 자갈과 모래 5.56~93.17%, 실트 0.05~89.28%, 점토 0.00~11.83%로 분포한다. 사계절 모두 일반적으로 자갈과 모래는 해안선 인접 지역에 전반적으로 분포하고 이외의 지역에서는 실트가 우세하게 나타난다. 퇴적상(Folk, 1968)은 역질사(gS), 역니질사((g)mS), 사질(S), 실트

질사(zS), 역사질니((g)sM), 사질실트(sZ), 실트(Z)까지 다양하게 분포하며(Fig. 6, 7), 연안 지역에는 사질 퇴적상이 우세하고 다양한 퇴적상을 나타내며, 이외의 지역에는 실트질 퇴적상이 우세하게 분포한다. 또한 계절별로는 가을, 겨울철에 역사질니((g)sM) 퇴적상이 가장 우세하게 나타난다.

조석변수는 하계인 8월에는 평균입도(mean)가 0.99~6.48φ를 나타내며, 분급도(sorting) 0.44~3.09φ, 왜도(skewness) -0.44~0.41의 범위로 나타난다. 추계인 10월에는 평균입도 0.07~6.12φ, 분급도 0.82~3.38φ, 왜도 -0.45~0.45의 범위로 나타난다. 동계인 1월에는 평균입도 0.37~5.56φ, 분급도 0.66~3.02φ, 왜도 -0.26~0.43의 범위로 나타나고, 춘계인 5월은 평균입도 0.49~5.93φ, 분급도 1.01~2.67φ, 왜도 -0.25~0.54의 범위로 나타난다(Fig. 8).

표층 퇴적물의 퇴적 기작

표층퇴적물의 이동과 퇴적기작을 알아보기 위하여 Passega(1957)의 C-M 도를 사용하였다. 모든 계절별로 해안에 근접한 지점(0~50 m)은 밀집이동(bedload)으로 운반되며, 외해 방향(400~500 m)은 지속부유(uniform suspension), 연구지역의 중간지역(100~300 m)은 밀집이동, 점이부유(graded suspension), 지속부유의 복합적인 운반작용으로 이동되어 퇴적된다(Fig. 10). 평균빈도곡선은 해안에 근접한 100 m까지 비교적 다양한 에너지의 형태인 2φ와 6φ의 이중모드

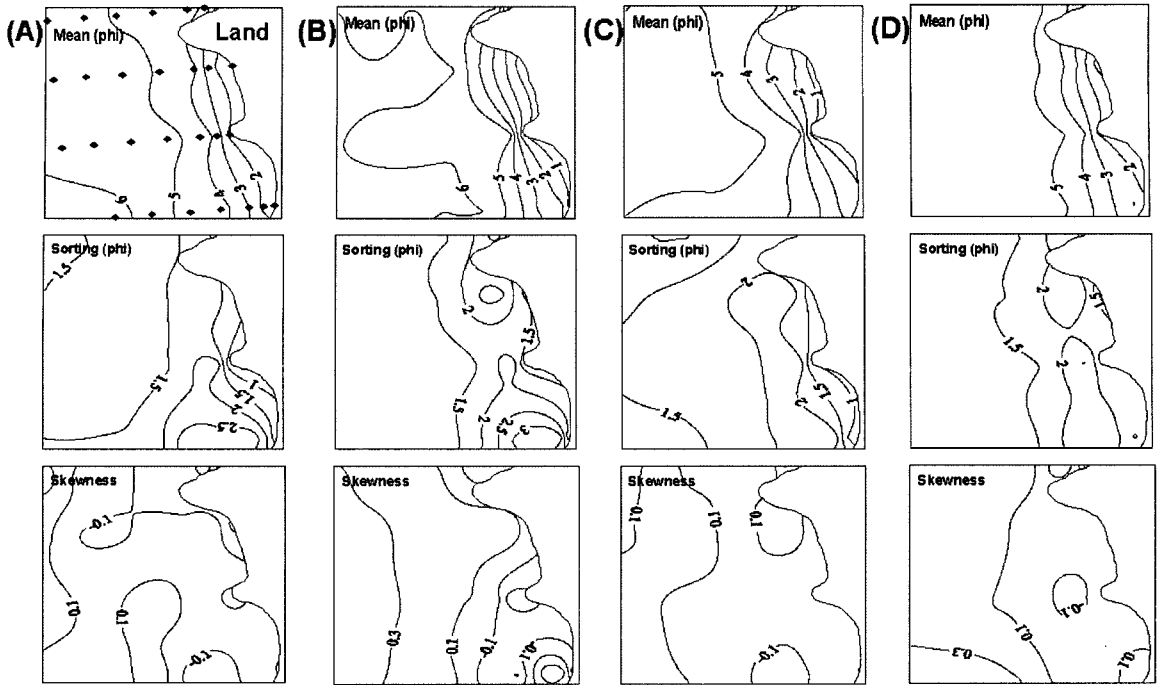


Fig. 8. Seasonal variation of textural parameter of surface sediments (◆: sampling station) in (A) August 2002, (B) November 2002, (C) January 2003, (D) May 2003.

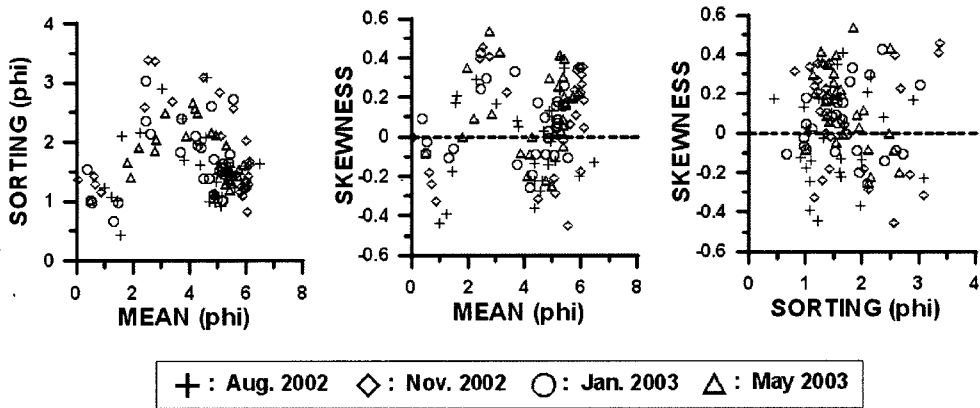


Fig. 9. Bivariate scatterplots of textural parameters of total surface sediments.

(bimodal)를 나타내고, 외해 방향으로 갈수록 6ϕ 내외에 집중된 형태를 나타낸다(Fig. 11). 이는 해안에 근접한 지역의 퇴적물이 주로 밀집과 도약의 이중모드에 의해서 이동되고, 외해 방향으로 갈수록 부유(도약)의 단일모드에 의해서 이동됨을 나타낸다. 따라서 해안에 가까운 지역은 만조와 폭풍 시 조류와 파랑의 영향으로 해안선 부근에서 침식되거나 재부유된 퇴적물이 주로 밀집 이동에 의해 이동되어 조립한 입자가 선별적으로 퇴적되는 것으로 사료된다. 외해

방향은 강한 조석의 영향으로 세립한 퇴적물이 주로 지속부유에 의해 이동하여 퇴적되는 것으로 사료된다. 또한 겨울철로 갈수록 점부유의 범위가 증가하고 이는 계절에 따른 퇴적기작의 변화가 있는 것으로 판단된다.

주상 퇴적물의 입도 특성 및 방사능 동위 원소 분석
 2003년 6월 측선 C의 100 m (Core-1; 100 cm)와 300 m (Core-2; 310 cm) 지점에서 Hand Auger를 이

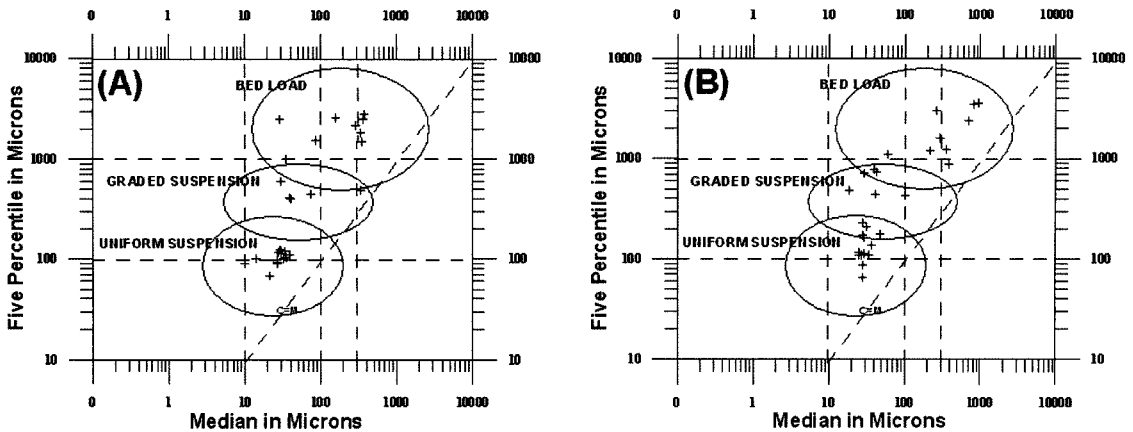


Fig. 10. C-M (coarse five percentile vs. median) diagram showing three patterns of sediment transport mode (Passega, 1957); (A) August 2002-Summer, (B) January 2003- Winter.

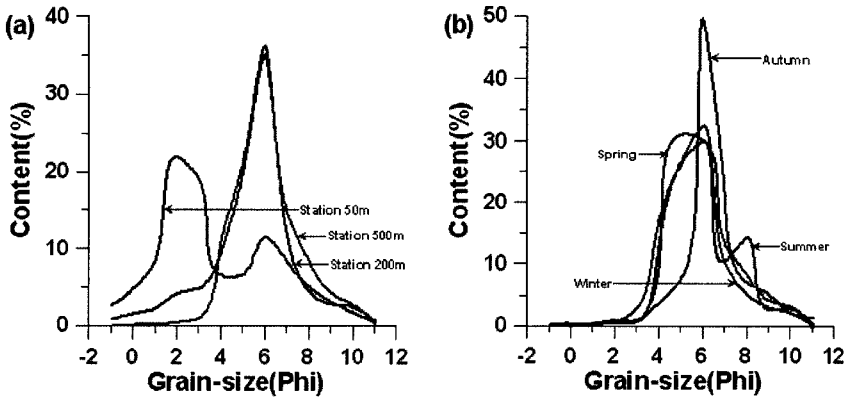


Fig. 11. (a) Frequency curves of average values showing bimodal distribution in supratidal zone (station 50 m) and unimodal in intertidal zone (station 200 m, 500 m). (b) Seasonal variation of average values at station 500 m.

용해 주상퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 두 주상퇴적물은 생물교란이 적고 전체적으로 니질이 우세하며 뚜렷한 퇴적구조는 발견되지 않았다. 주상퇴적물 Core-1의 조성은 모래 3.67~15.67%, 실트 79.43~90.04%, 점토 3.8~10.06%의 분포를 보이고 있다. 조직변수는 평균입도가 5.29~5.95 ϕ 로 전체적으로 실트가 우세하고 하부로 갈수록 세립해지는 경향을 나타내고 있다. 분급도는 1.18~1.59 ϕ 로 전체적으로 poorly sorted의 분포를 보이며, 왜도는 0.08~0.26 범위로 전체적으로 fine-skewed를 나타낸다(Fig. 12). 310 cm 길이의 외해 방향에 근접한 Core-2의 퇴적물 조성은 모래 2.72~28.99%, 실트 60.35~88.7%, 점토 4.83~14.05%의 분포를 보이고 있다. 조직변수는 평균입도 4.34~6.49 ϕ 로 전체적으로 실트가 우세하고 100 cm 지점까지는 세립해지는 경향을 나타내고, 이후 조립

해지는 경향을 나타낸다. 분급도는 1.31~2.63 ϕ 범위로 poorly sorted와 very poorly sorted의 분포를 보이며 하부로 갈수록 양의 왜도를 나타낸다. 두 주상퇴적물의 상부에서는 급격한 조성 및 조직변수의 변화가 나타나고 있으며, 표층에서 100 cm까지의 평균입도를 비교해보면, 하부로 점차 세립화되는 유사한 양상을 나타낸다(Fig. 12).

퇴적속도를 파악하기 위해 실시한 방사능 동위원소의 수직분포 결과는 Pb-210 방사능이 1.6~5.8 dpm/g 이며 전반적으로 상부에 많이 존재한다. Ra-226 방사능은 1.5~3.0 dpm/g 이며 뚜렷한 경향이 나타나지 않는다(Fig. 13). 이는 Core-1과 Core-2 모두 유사하게 나타낸다. 또한 각 주상퇴적물의 0~38 cm까지의 자료를 이용해 얻은 퇴적속도는 Core-1의 경우 약 5.2 mm/yr이고, Core-2는 약 5.3 mm/yr로 나타났다.

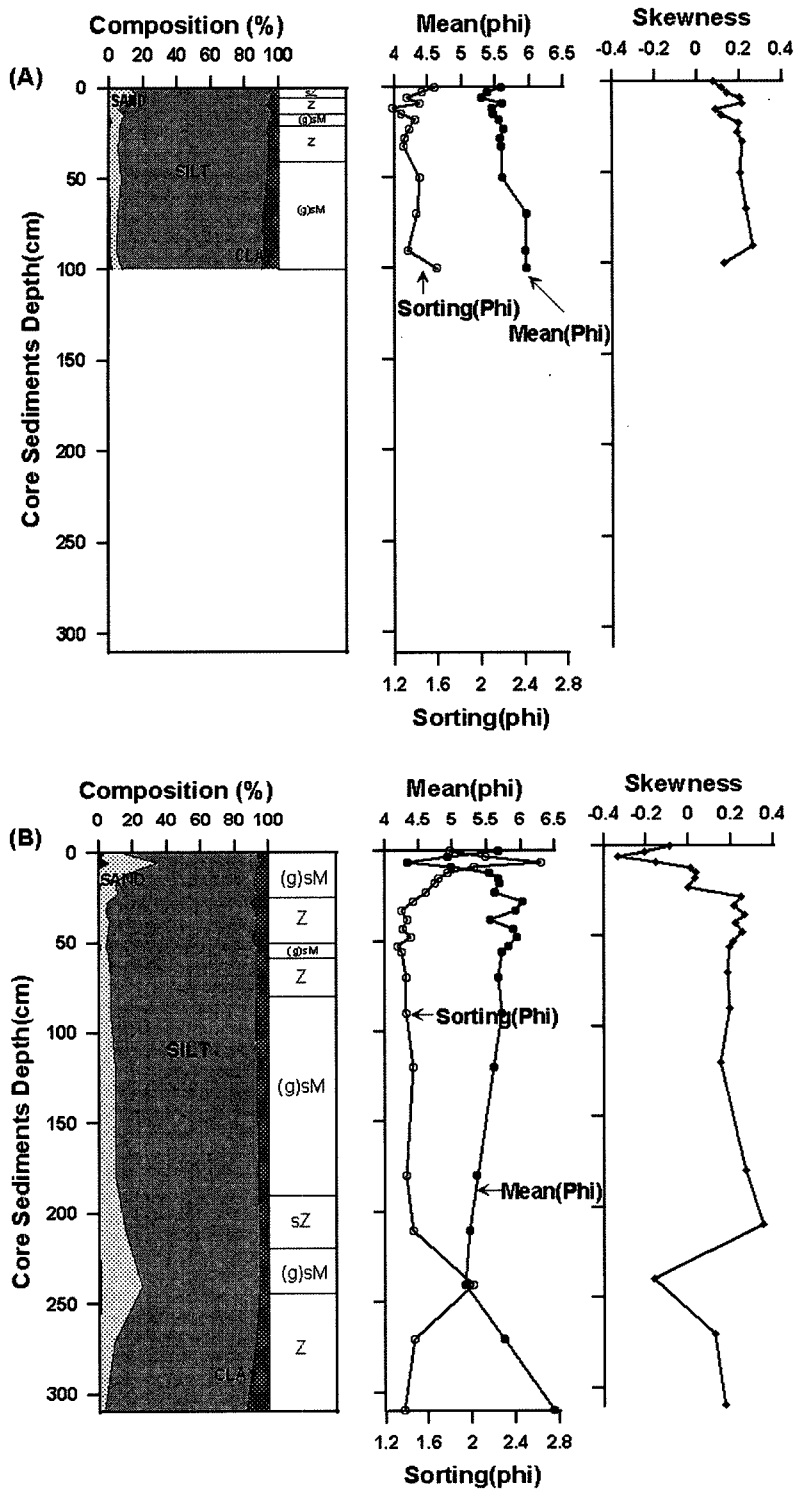


Fig. 12. Vertical distributions (composition (%), facies, and textural parameter) of core sediments using hand auger; Core-1 (A), Core-2 (B). Core-1 and -2 were sampled at station 100m and 300m of Line-C, respectively.

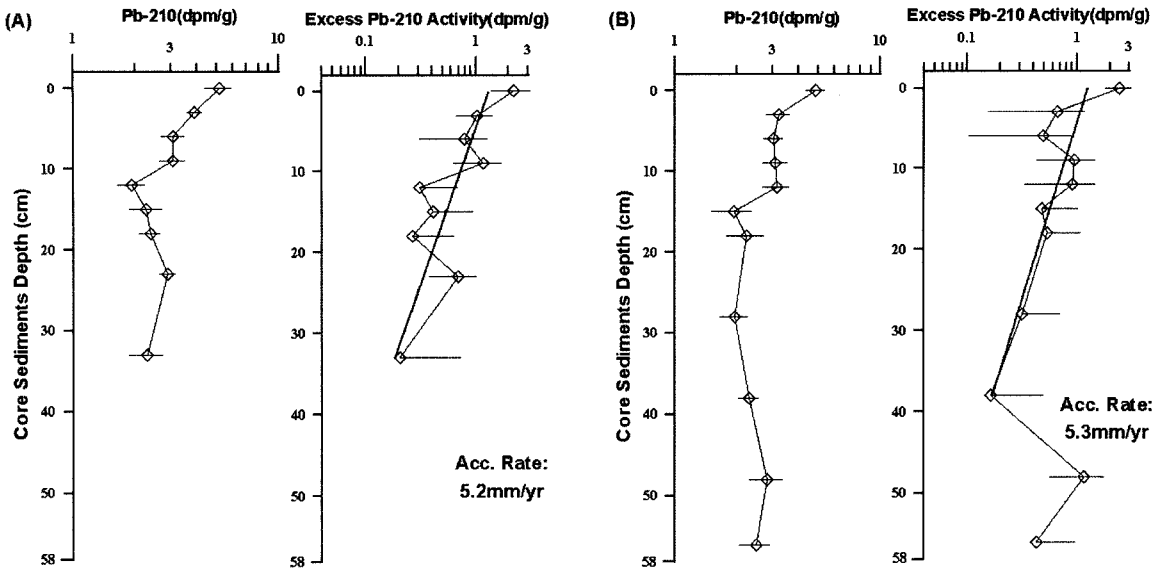


Fig. 13. Vertical profiles of Pb-210 and excess Pb-210 activity; (A) Core-1, (B) Core-2.

토 의

경기만 북부에 위치한 장화리 조간대는 대조차 환경의 조간대로 조석에 의한 영향을 많이 받는다. 이러한 조간대는 일반적으로 조석에 의한 퇴적작용이 우세하게 작용한다. 하지만 조간대는 침수시 기상학적인 요인에 의해 나타나는 파랑 및 유속의 영향 역시 간과 할 수 없다.

표층 퇴적환경의 특성

계절에 따른 지형변화를 확인하기 위해 각 측선별 수준높이 변화와 조간대 경사도 변화를 확인하면 연구지역의 북쪽에 위치한 측선 A의 경우 비교적 계절적으로 수준높이의 변화와 조간대 경사도 변화가 작게 나타난다. 이와 대조적으로 연구지역에서 남쪽에 위치한 측선 C, D의 경우 계절에 따라 0m 지점인 수준높이와 조간대 경사도의 변화가 나타나는데, 봄과 여름 보다 가을, 겨울철에 경사도가 크게 나타났다. 이러한 대조적인 결과는 각 측선별 지형적 요인으로 판단된다. 측선 A 지역의 경우 연구지역의 북쪽에 위치하고 있지만, 북쪽에 위치하는 둔대라는 돌출부가 겨울철 우세하게 나타나는 북서계절풍을 막는 역할을 하고, 이에 따라 조간대의 지형변화가 작은 것으로 판단된다. 따라서 측선 A의 경우 계절풍의 영향이 비교적 작은 것으로 보이며, 이와 반대로 연구지역의 남쪽의 지역은 비교적 개방된 지형으로 거

울철 북서계절풍의 영향에 따라 겨울철에 침식이 우세하게 나타나며 이에 따라 경사도가 급해지는 것으로 판단된다. 또한 측선 C의 경우 조사지역 중 유일하게 기준점(0m)이 돌출된 지형으로 기준점의 높이 변화가 가장 크게 나타나고, 측선 D의 경우 계절에 따라 조수로 및 조간대 지형변화가 큰 것으로 현장 조사 시 확인되었다. 이에 따라 연구지역의 북쪽지역은 비교적 안정화된 환경으로 판단되며, 남쪽으로 갈수록 계절적 변화가 있는 것으로 판단된다.

표층퇴적물의 계절별 퇴적물 조성 변화를 확인하면 사질보다는 니질 퇴적물의 변화가 우세하게 나타난다. 북서계절풍이 강한 겨울철로 갈수록 연구지역에서 상대적으로 니질 퇴적물의 조성이 줄어든다. 또한 각 측선 조성 역시 모든 지역에서 겨울철로 갈수록 조립한 사질의 조성이 증가하고 니질 퇴적물이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이에 따른 퇴적상의 변화도 여름철 연안지역의 사질(Sand), 니질사(muddy Sand) 퇴적상이 존재하고, 이외의 지역은 실트(Silt), 사질니(sandy Mud) 퇴적상이 존재하지만 겨울철로 갈수록 연안방향의 사질, 니질사 퇴적상이 확장되고 외해 쪽에서 여름철에 대부분을 차지하던 실트 퇴적상이 줄고 사질니 퇴적상이 확장되는 것을 알 수 있다(Fig. 6).

표층 퇴적물의 평균입도(Mz)는 사계절 모두 다양한 분포(0.07~6.48φ)를 나타내며, 해안선 인접지역에서 4φ 이하로 분포하고, 외해방향으로 갈수록 세립해

지는 경향을 나타낸다. 또한 겨울철로 갈수록 조립해 지는 경향을 보인다. 분급도(So)는 well sorted에서 very poorly sorted의 분포(0.44~3.38 ϕ)를 나타내며, 겨울철로 갈수록 외해 방향으로 불량해진다. 또한 왜도(Sk)는 strongly coarse-skewed에서 strongly fine-skewed의 분포(-0.45~0.54)를 나타내며, 겨울철 외해 방향으로 양의 왜도를 나타내고 있다. 조직변수의 상관관계는 전반적으로 넓게 분산된 분포를 보이며, 계절적 변화 특성이 나타나지 않는다(Fig. 9). 그러나 평균입도는 4~6 ϕ 사이에, 분급도는 1~2 ϕ 사이에 다소 집중된 경향을 보이며, 왜도는 음과 양의 왜도가 모두 나타난다. 또한 2 ϕ 근처의 사질에서 양호한 분급을 보이는데, 이는 2 ϕ 내외에서의 사질은 수층 유동에 의한 유동성이 높아 같은 입도의 입자들끼리 집적되는 성향이 있어 양호한 분급도가 나타나기 때문이다(McLaren and Bowles, 1985). 표층퇴적물의 퇴적기작과 이동기작을 확인하면 겨울철로 갈수록 도약군과 점이부유의 위가 증가하고 이는 계절에 따른 퇴적기작의 변화가 있는 것으로 사료된다. 위의 결과를 종합하면 본 연구지역은 겨울철에 여름철과 비교해 비교적 고에너지 환경으로 판단된다. 이러한 계절별 에너지 변화는 표층퇴적물의 빈도곡선으로도 확인할 수 있다. 빈도곡선은 가을, 겨울철에 단일모드가 가장 강해지고, 이는 해당 시기동안 강한 에너지의 영향에 의한 것으로 판단된다. 본 연구지역은 니질퇴적물이 우세하게 나타나고 대부분이 평균해수면보다 높은 곳에 위치하고 있어 대기 중에 노출되는 시간이 많아 비교적 고에너지 상태가 유지된다(류상옥 외, 1999). 이런 환경에서 계절별 에너지의 변화는 기상 조건에 따라 크게 달라지는데, 연구기간 동안 가을과 겨울철에 북서계절을 바람이 빈번하게 작용하였고, 또한 11월과 2월 사이에 가장 강한 풍속을 나타내었다. 강한 북서계절풍은 겨울철에 창조시 여름철보다 강한 파랑을 형성하고 이에 따라 표면마찰력이 해저에 전달되어 여름철에 쌓인 세립질 퇴적물이 재부유되고, 낙조시 외해 방향으로 이동하는 것으로 판단된다(Kang and Choi, 1984; 최진용, 1993).

주상 퇴적물의 수직 퇴적 환경

측선 C의 100 m(Core-1; 100 cm)와 300 m(Core-2; 310 cm) 지점에서 Hand Auger를 이용해 얻은 주상 퇴적물 자료는 본 연구지역에서 현재까지 퇴적환경의 변화를 나타내는 중요한 사실들을 지시해 준다. 실제

로 두 주상퇴적물의 조성 및 동위원소 분포가 유사하게 나타나는데, 이는 두 지역 모두 평균해수면 보다 높은 상부조건대에 위치하고 있기 때문으로 판단된다. 각 주상퇴적물의 수직적 퇴적물 조성과 방사능 동위 원소의 분포 역시 유사한 형태를 나타내고 있는데, 이는 방사능 동위 원소의 분포가 해당지역의 퇴적물 조성과 밀접한 상관관계를 나타내는 것으로 판단된다. 또한 두 지역 모두 주상퇴적물의 최상부에서 급격한 조성 및 조직변수의 변화를 나타내고 있고, 이는 최근에 과거와 다른 급격한 퇴적환경의 변화를 나타내는 것으로 사료된다.

방사능 동위 원소를 통해 퇴적속도를 산정한 결과 장화리 조건대는 약 5 mm/yr의 속도로 퇴적되어 형성된 것으로 추정되며, 이를 토대로 볼 때 주상퇴적물 상부의 급격한 변화는 최근 15년 이내에 급격한 퇴적특성 변화로 나타난 것으로 판단된다. 실제로 연구지역 남쪽은 최근 20년 동안 인천국제공항 등 인위적인 해양환경 변화가 일어나고 있다. 2001년 한국 해양연구원에서 실시한 강화도 주변 지역의 인공구조물 건설에 따른 주변해역의 해수유동 변화를 연구한 수치모형의 결과는 경기만 주변의 인공구조물 건설로 인해 강화도 남부 조건대의 서부 지역의 유속이 증가하는 것으로 나타났다(한국해양연구원, 2001). 따라서 주상퇴적물의 최상부에서 평균입도가 조립해지고 불량한 분급을 보이는 변화는 최근 실시된 주변해역의 인공구조물의 건설의 영향으로 유속이 증가하고 이에 따라 급격한 퇴적환경의 변화를 나타내는 것으로 판단된다. 실제 1997년부터 2000년까지의 실시된 강화 남부 갯벌의 퇴적환경 변화(우한준과 세종길, 2002)에 관한 연구 결과에서 장화리 퇴적상은 점차적으로 사질니 퇴적상이 확장되고, 1998년에서 2000년까지 집적률의 변화는 -4.23~1.57 cm/yr로 침식되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구지역은 최근 급격한 주변해역의 개발로 인해 해수순환의 변화가 예상되고 이에 따라서 계절별 변화 이외의 지속적인 퇴적환경의 변화가 있을 것으로 예상된다.

결 론

계절별로 채취된 표층퇴적물과 4개의 측선에서의 지형변화를 통해서 보면, 퇴적상은 크게 사질, 니질사, 사질니, 실트로 분류할 수 있고, 겨울철로 갈수록 사질, 니질사 퇴적상이 확장되었다. 평균입도는

전체적으로 4 ϕ 이상의 실트가 우세하며, 겨울철로 갈수록 조립하고 분급도는 불량해지며, 외해 방향으로 양의 왜도를 나타내고 있다. 또한 표층퇴적물의 퇴적 기작은 겨울철로 갈수록 도약군과 점이부유가 증가한다. 이러한 결과를 토대로 볼 때 장화리 조간대는 겨울철에 여름보다 고에너지 환경으로, 이는 강한 북서 계절풍의 영향으로 겨울에 창조시 강한 파랑을 형성하고 이에 따른 표면마찰력이 해저에 전달되어 세립질 퇴적물은 재부유되고 낙조시 외해방향으로 이동하는 것으로 판단된다. 또한 연구지역에서 비교적 개발된 남쪽의 계절별 지형변화는 서해안 조간대에서 일반적으로 알려진 계절풍 영향으로 나타나는 계절별 침식/형상을 잘 반영하고 있다. 또한 2개의 주상퇴적물의 분석결과 장화리 조간대는 약 5 mm/yr 의 속도로 퇴적되어 형성된 것으로 추정된다. 이러한 결과를 볼 때 주상퇴적물 상부에 나타나는 급격한 변화는 과거 20년 이내의 이루어진 주변 환경 개발로 인해 퇴적환경이 변화하여 나타난 현상으로 판단된다.

따라서 장화리 조간대의 퇴적특성은 계절적인 변화와 주변 환경 개발에 따른 영향이 있을 것으로 판단되지만, 보다 정확한 퇴적특성을 파악하기 위해서는 장기간 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다.

사 사

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(R05-2002-000-01228-0) 이에 사의를 표한다. 그리고 현장 조사 및 자료처리 작업을 도와준 손영하 대학원생께 감사드리며 본 논문의 자상한 심사를 해주신 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- 기상청, 2002, 자동기상관측연보 - 월별자동기상관측자료. 865 p.
- 기상청, 2003, 자동기상관측연보 - 월별자동기상관측자료. 891 p.
- 류상옥, 유환수, 이종덕, 1999, 함평만 조간대의 표층퇴적물과 집적물의 계절변화. 한국해양학회지, 4(2), 127-135.
- 수로국, 1981, 영종도에서 용매도 해도. No. 311.
- 오재경, 금병철, 1998, 서해안 몽산포 대조차 해변의 퇴적학적 특성. 한국지구과학회지, 19(3), 310-317.
- 오재경, 금병철, 2002, 대조차환경 침식연안의 퇴적학적 특성. 한국지구과학회지, 23(7), 565-574.
- 우한준, 재종길, 2002, 강화 남부 갯벌의 퇴적환경 변화. Ocean and Polar Research, 24(4), 331-343.
- 장진호, 김여상, 조영길, 1999, 해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 퇴적작용: 한국서해안의 함평만. 바다, 4(2), 117-126.
- 장진호, 박용안, 한상준, 1996, 한국 서해안 곶소만 조간대의 제4기 층서와 해수면 변화. 바다, 1(2), 59-72.
- 장현도, 오재경, 1991, 한강중하개발 이후 한강하구 및 경기만의 퇴적환경. 한국해양학회지, 26(1), 13-23.
- 최진용, 1993, 금강하구 및 인근해역에서 부유퇴적물의 계절적 변동에 관한 연구. 한국해양학회지, 28, 272-280.
- 한국자원연구소, 1999, 서울-남천점 지질도폭 설명서. 64 p.
- 한국해양연구소, 1982, 만리포 해변변화 및 침식방지대책에 관한 연구. 200 p.
- 한국해양연구원, 2001, 강화도 어업피해 및 경인지역 공동보상관계 보상금 분담 조사용역(1차 중간보고서). 554 p.
- Alexander, C.R., Nittrouer, C.A., Demester, D.J., Park, Y.A., and Park, S.C., 1991, Macrotidal mudflats of the south-western Korean coast: a model for interpretation of intertidal deposits. Journal of Sedimentary Petrology, 61, 805-824.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos river bar: A study in the significance of grain-size parameter. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-27.
- Folk, R.L., 1968, Petrology of sedimentary rock. Hemphill's, Texas, 140 p.
- Frey, R.W., Howard, J.D., Han, S.J., and Park, B.K., 1989, Sediments and sedimentary sequences on a modern macrotidal flat, Incheon, Korea. Journal of Sedimentary Petrology, 59, 28-44.
- Kang, S.W. and Choi, J.K., 1984, Surface waves and bottom shear stresses in the Yellow Sea. Journal of the Oceanological Society, 19, 118-124.
- Kim, Y.H., Lee, H.J., Choung, S.K., Chun, S.S., and Han, S.J., 1999, Holocene transgressive stratigraphy of macrotidal flat in the southeastern Yellow Sea: Gomsu Bay, Korea. Journal of Sedimentary Research, 69, 328-337.
- Koh, C.H., 1997, Korean megatidal environments and tidal power project: Korean tidal flats - biology, ecology and land uses by reclamations and other feasibilities. La Houille blanche/N^o, 3, 66-78.
- Lee, H.J., Chun, S.S., Chang, J.H., and Han, S.J., 1994, Landward migration of isolated shelly sand ridge (chenier) on the macrotidal flat of Gomsu Bay, west coast of Korea: controls of storms and typhoon. Journal of Sedimentary Research, A64, 886-893.
- Lee, H.J., Chu, Y.S., and Park, Y.A., 1999, Sedimentary processes of fine-grained material and the effect of seawall construction in the Daeho macrotidal flat-near-shore area, northern west coast of Korea. Marine Geology, 157, 171-184.
- McLaren, P. and Bowles, D., 1985, The effects of sediment transport on grain size distribution. Journal of

- Sedimentary Petrology, 4, 457-470.
- Park, Y.A., 1996, Coastal typhoon Deposit in Hampyung Bay, Southwest coast of Korea. Journal of the Oceanological Society, 31, 32-36.
- Passega, R., 1957, Texture as characteristics of clastic deposition. Geological Society of American Bulletin, 41, 1952-1984.
- Wells, J.T., Adams, C.E.J., Park, Y.A., and Frankenberg, E.W., 1990, Morphology, sedimentology and tidal channel processes on a high-tide-range mudflat, west coast of South Korea. Marine Geology, 95, 111-130.
- Yang, B.C. and Chun, S.S., 2001, A seasonal model of surface sedimentation on the Baeksu open-coast intertidal flat, Southwestern coast of Korea. Geosciences Journal, 5, 251-262.

2006년 2월 21일 접수
2006년 5월 26일 수정원고 접수
2006년 5월 26일 원고 채택