

방조제 건설 후 이원 대조차 조간대의 계절별 퇴적학적 특성 및 퇴적환경

신동혁^{1,*} · 금병철¹ · 박은영¹ · 이희일¹ · 오재경²

¹한국해양연구원 해저환경자원연구본부, 425-600 안산시 안산우체국 사서함 29

²인하대학교 해양과학과, 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

Seasonal Sedimentary Characteristics and Depositional Environments after the Construction of seawall on the Iwon Macrotidal Flat

Dong-Hyeok Shin^{1,*}, Byung-Cheol Kum¹, Eun Young Park¹,
HI-IL Lee¹, and Jae-Kyung Oh²

¹Marine Geoenvironment & Resources Research Division, KORDI, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea

²Department of Marine Science, Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu,
Incheon 402-701, Korea

Abstract: In order to elucidate seasonal sedimentary characteristics and depositional environment after construction of seawall on macrotidal flat, a seasonal observations of surface sediments (total 450) and sedimentation rates on 4 transects have been investigated for 2 years. The eastern area of Iwon tidal flat, has been changed from semi-closed coast to open coast by construction of seawall, shows general seasonal changes similar to characteristics of open coast type, which represented both fining and bad sorted distribution due to deposition of fine sediments under low energy condition in the summer, and relatively coarser and better sorted distribution because of erosion of fine sediments in the winter. In considering angles of transects, distribution patterns of surface sediments, the northern and southern parts of eastern tidal flat are dominantly influenced by wave and tidal effects, respectively. As time goes by, the eastern tidal flat shows coarsening-trend of surface sediments caused by direct effect of tidal current, wave and typhoon. Meanwhile the western area of seawall, which has been re-formed by construction of seawall, is sheltered from northwesterly seasonal wind. The seasonal change pattern of western area of seawall is slightly different from that of eastern tidal flat. Mean grain size and sorting of surface sediments during spring is finer and worse than those during summer. This seasonal change pattern may be influenced by topographic effects caused from the construction of seawall. In consideration of all results, the transport of fine sediments in the study area, which is supplied to limited sediments, shows clockwise circulation pattern that fine sediments are transported from the eastern tidal flat to the western area of seawall because of blocking of seawall in the winter and are transported reversed direction in the summer. As a result, many changes have been observed in the study area after construction of seawall; however, this change is still in progress and is expected to need continuous monitoring.

Keywords: depositional environment, tidal flat, seasonal sedimentary characteristics, seawall

요약: 대조차 조간대에서 방조제 건설 후 발생하는 퇴적물의 분포특성과 퇴적환경의 계절적 변화를 파악하기 위해서 4계절을 대표하는 표층퇴적물을 채취, 분석하였으며, 4개의 축선에서 2년 동안 퇴적물과 퇴적률에 대한 조사가 병행되었다. 그 결과, 방조제를 축조함으로써 반폐쇄성 연안에서 개방형 연안으로 바뀐 이원 조간대의 동측 조간대 지역은 개방형 연안에서 나타나는 일반적인 계절 변화, 즉 몬순 계절풍의 영향으로 여름에는 세립질 퇴적물이 퇴적되고 겨울에는 강한 북서계절풍에 의해서 세립질 퇴적물이 제거되는 계절 변화를 보인다. 또한 축선 경사도와 퇴적물 분포양상 등을 고려할 때, 북부 지역은 조석보다는 파랑작용에 크게 영향을 받고, 남부 지역은 파랑보다는 조석작용이 크게 영향을 미

*Corresponding author: dhshin@kordi.re.kr

Tel: 82-31-400-6260

Fax: 82-31-408-5822

치고 있지만 강한 조류, 파랑 그리고 태풍 등에 의해 시간이 지남에 따라서 조립화 현상을 보이고 있다. 반면 방조제 건설에 의해 새로운 형태로 변화된 서측 끝 지역은 조간대의 발달방향이 남동방향으로 향하고 있어 북서계절풍의 영향에서 보호되는 지역으로 동측 조간대에서 보여지는 계절변화 양상과는 약간 다르게 봄에 세립질과 불량한 분급을 그리고 여름에는 상대적으로 조립하고 양호한 분급을 나타낸다. 이는 방조제 건설에 따른 지형적 원인에 의한 것으로 판단되어진다. 따라서 연구 지역의 세립질 퇴적물 이동은 방조제에 의해서 겨울철에 동측 조간대에서 방조제 서측 끝 지역으로 이동하고 다시 여름철에는 동측 조간대로 이동되어지는 시계방향의 순환현상이 진행되는 것으로 보인다. 방조제 건설 이후 이원 조간대 지역은 2년 동안 많은 변화를 보이고 있지만 이것은 변화과정 중인 것으로 보이고 계속적인 모니터링이 필요할 것으로 보인다.

주요어: 퇴적환경, 조간대, 계절별 퇴적학적 특징, 방조제

서론

한반도 서해안은大潮차(Tidal range > 4 m) 연안으로 하구와 조간대 환경이 발달되어 있는 복잡한 리아형의 해안으로 이루어져 있으며(Well et al., 1990; Alexander et al., 1991) 퇴적물의 기원, 유용도, 수리학적 조건(조석, 파랑) 그리고 지형적 형태에 따라서 퇴적물 특성과 퇴적환경이 지역적, 시간적으로 많은 변화를 보이고 있다. 특히 지형적 특징에 따라서 문순 계절풍의 영향에 의해서 이원적 계절변화를 보이는 개방성 해안(추용식 외, 1996; 오재경과 금병철, 1998; Chun et al., 1998; Lee et al., 1999)과 일차적으로 계절풍의 영향을 받지만 만 내의 지형적 요인에 의해서 복잡한 계절변화를 보이는 반폐쇄성 해안(장진호와 최진용, 1998; 류상욱 외, 1999, 장진호 외, 1999; 류상욱 외, 2001; Ryu, 2003)으로 구분되어진다. 그러나 최근 연안 지역은 간척사업, 방조제 건설 등의 인위적인 영향에 의한 해안선 변화에 따른 해류 및 조류의 변화를 야기시켜 침식과 퇴적 현상이 발생되고 이에 따른 여러 가지 문제가 발생하고 있다(한국해양연구원, 1993, 1994, 2000, 2001; Lee et al., 1999; 류상욱 외, 2001; 우한준과 제종길, 2001; Ryu, 2003).

본 연구 지역인 이원 조간대는 2000년 이원방조제가 축조되기 이전에 반폐쇄성 해안으로 만형(embayment type)의 조간대였으나 현재 만 입구를 막은 방조제 축조로 인해 조간대 주변 지형이 개방형으로 변형되어 조류의 변화가 야기됨으로써 이원 조간대의 퇴적물 특성 및 퇴적환경의 변화가 일어날 것으로 보인다. 따라서 이 논문은 방조제 건설 후, 새로 형성되어가는 조간대 지역에서 계절별 표층퇴적물, 축선의 입도 및 퇴적을 측정용 통해서 연구 지역의 계절별 퇴적물 특성 및 변화 그리고 퇴적환경을 파악하는데 그 목적이 있다.

지역 개관 및 수리적 특성

지역개관

연구 지역은 동경 126° 14.5'~126° 17.5', 북위 36° 54'~36° 56'에 위치하고, 1990년 11월부터 2000년 12월까지 간척사업이 진행되어 연구 지역 남서 지역에 총길이 2.981 km의 이원방조제(Iwon seawall)가 형성되었다(Fig. 1). 이에 따라서 이원 조간대의 해안선은 전체적으로 북서방향의 V자 형태를 이루고 있으며, 남북방향의 동측 해안선은 자연 상태의 소규모 포켓

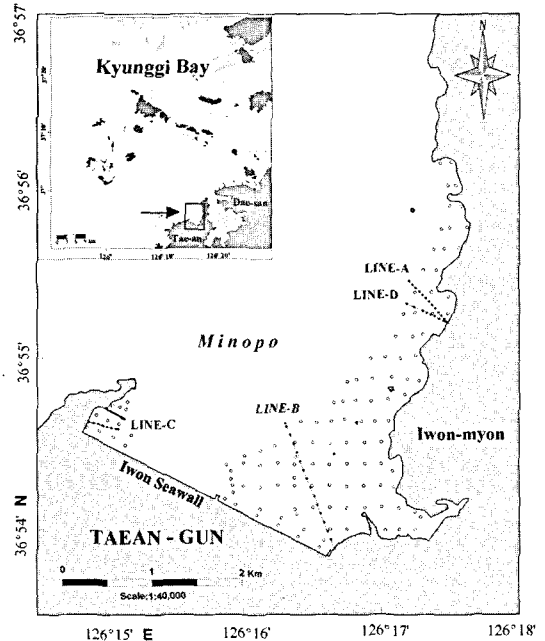


Fig. 1. Location map showing seasonal sampling stations and four transects (Line-A, -B, -C and -D) in the study area. Surface sediments and sedimentation rates on 4 transects had been investigated for 2 years (October 2000–October 2002). Open circles and closed circles indicate sampling stations of tidal flat and transects, respectively.

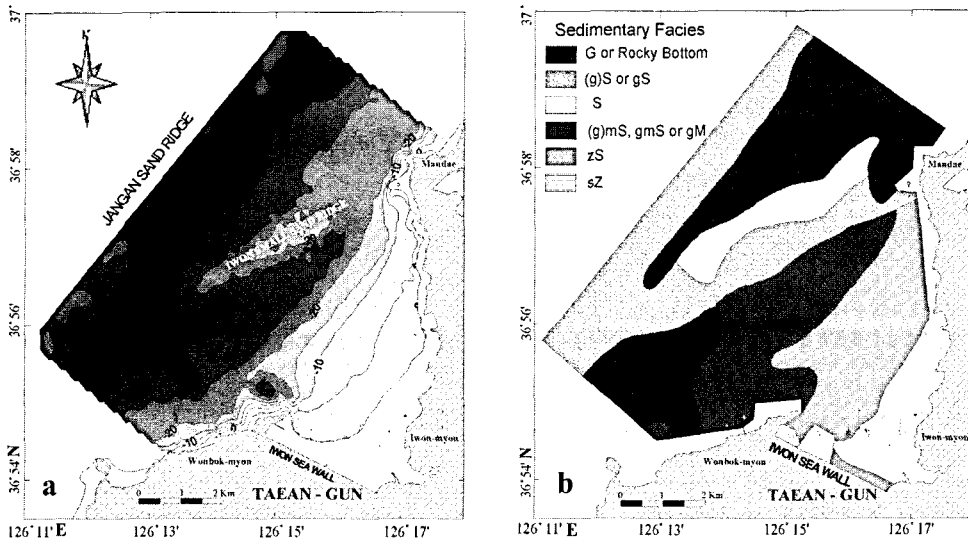


Fig. 2. Bathymetric chart (a) and distribution of sedimentary facies (b) in offshore of study area. The Jangan sand ridge and Iwon small sand ridge are located in the northwestern part of study area. Unit is in meter.

형(pocket) 해빈과 선 캄브리안 후기의 경기편마암복합체의 화강암질 편마암, 반상변정질 편마암 및 호상편마암 등의 변성암류로 구성된 암반해안이다. 자연상태의 반폐쇄성 만 입구를 북서-남동방향으로 막은 이원방조제의 조간대는 원래 저조선 근처의 하부 조간대였으며, 방조제 후면에 위치한 대부분의 상부 및 중부 조간대는 현재 육지화 되었다(Fig. 1). 또한 방조제 서측 끝 지역은 방조제 축조에 의해 남동방향으로 향하고 있어 북서계절풍에 의한 파랑과 바람에 보호된다. 현재 방조제 앞쪽으로 형성된 중부 및 하부 조간대에서는 굴 양식장이 넓게 분포하고 있다.

외해 지역은 북동-남서 방향에 길이 30 km, 폭 1.8~5.4 km, 최대높이 50 m 규모의 장안사퇴가 발달되어 있고, 연안쪽으로 길이 4 km, 높이 15 m, 폭 1 km 규모의 이원소사퇴(Iwon small sand ridge) 중심으로 두개의 해저굴이 북동-남서 방향으로 발달되어 있다(Fig. 2a). 외해 지역의 표층퇴적물은 암반(rocky bottom)과 자갈(G), 역질사(gS, (g)S), 모래(S), 역니질사(gmS, (g)mS) 그리고 실트질사(zS) 등의 다양한 퇴적상을 보인다(Fig. 2b).

수리적 조건

한반도 서해안은 몬순기후로 겨울철에는 대륙성 고기압에 의한 강한 북서계절풍이 우세하며, 여름철에는 적도 부근에서 발생하는 해양성 저기압의 영향을

주로 받아 남남서풍이 분다. 연구 지역 평균풍속의 계절별 월평균값(서산)은 봄, 여름, 가을, 겨울이 각각 2.7, 2.3, 1.9, 2.2 m/s로 봄에 강한 바람이 불며 가을이 여름보다 약한 평균풍속을 보인다. 풍향은 여름과 겨울에 각각 남남서풍(SSW)과 북서풍(NW)을 나타낸다(기상청, 2000, 2001, 2002). 태풍은 연구기간(2000. 10~2002. 10)동안 총 52개가 기록되었으며 이 중 3개의 태풍(CHEBI: 2001. 6.20~24, RAMASON: 2002. 6.29~7.6, RUSA: 2002. 8. 23~9.01)이 직접적으로 서해안을 통과하여 연구기간 중에 큰 영향을 미쳤다.

본 연구 지역은 반일주조 성분의 조석이 우세하고 평균조차가 460 cm(대조차: 638 cm, 소조차: 282 cm)에 이르는 대조차 연안이다. 연구 지역 남부의 조하대에서 조류의 방향은 시계방향으로 회전하며 낙조류는 서향, 창조류는 동향을 나타내며, 북부 지역에서는 북북동-남남서 방향으로 해안선에 직각방향을 나타낸다. 또한 조류의 유속은 표층에서 약 0.5~2.2 m/s, 저층에서 약 0.2~0.9 m/s의 범위를 보이고, 낙조시 남단에서 먼저 조류의 세기가 강해지고 시간이 지나면서 북단에서 강한 조류가 형성되는 특징을 보인다(한국해양연구원, 2001). 낙조시 최대유속은 1.4 m/s이다. 창조시에는 남단에서 먼저 유속이 증가하며, 이후 북단에서 최대 유속의 조류가 형성된다. 최대창조류는 2.2 m/s이다.

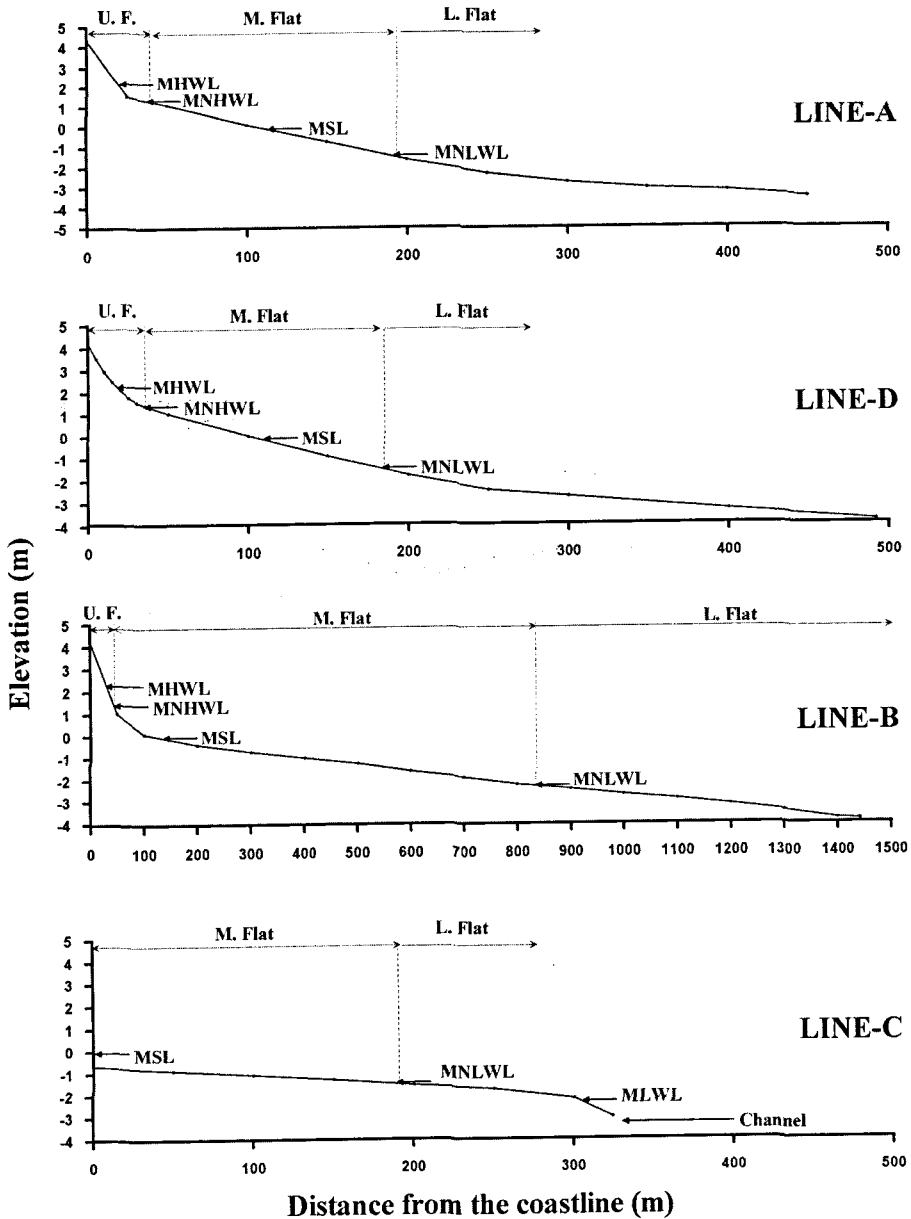


Fig. 3. Elevation feature of four transects (Line-A, -B, -C and -D). The symbols on profile (Line-A, -B and -C) represent sampling stations, but symbols between 0 and 35m on Line-D only imply leveling stations. MHWL: mean high water level; MNHWL: mean neap high water level; MSL: mean sea level; MNLWL: mean neap low water level. MLWL: mean low water level. U.F.: upper flat; M.F.: middle flat; L.F.: lower flat.

재료 및 방법

방조제가 축조된 후, 조간대 지역의 퇴적학적 특징과 계절별 변화를 파악하기 위해서 2000년 10월(가을), 2001년 3월(봄), 12월(겨울) 및 2002년 7월(여름)에 각각 플라스틱 스펀을 이용해서 표층 1cm 이내

로, 총 450 시료의 표층퇴적물을 채취하여 계절적인 분포 및 변화를 분석하였다(Fig. 1).

조간대의 측면지형을 파악하기 위해 이원 조간대를 대표할 수 있는 3개의 측선(Line-A, Line-B, Line-C; Fig. 1)에서 각 측선의 기준고도를 평균해수면(MSL)으로 환산한 후, 각 측선의 기준점으로부터 해안의

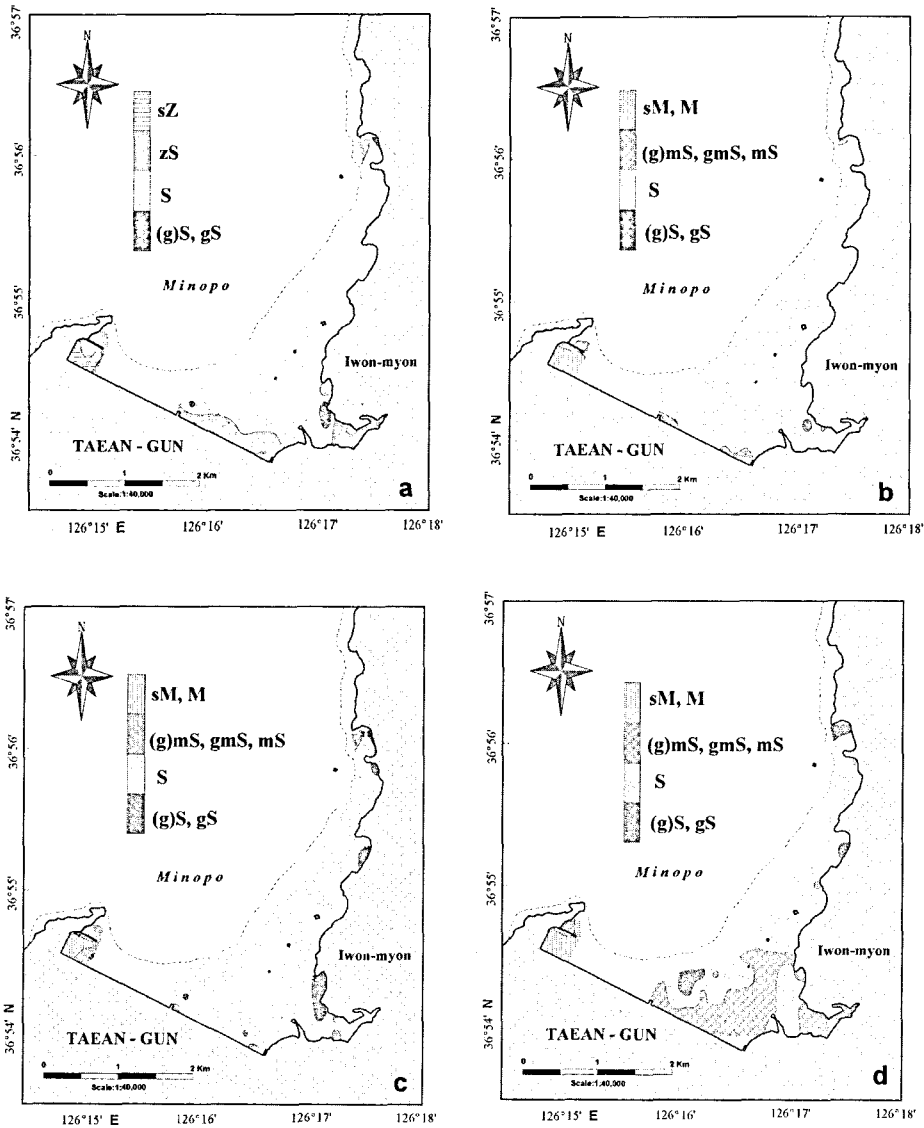


Fig. 4. Distributions of surface sedimentary facies on Iwon tidal flat in October 2000(a), March 2001 (b), December 2001 (c) and July 2002 (d).

수직방향으로 50 m 또는 100 m 간격으로 수직고도 1 mm 오차를 갖는 Pantax Level 측정기로 수준측정하였다. 또한 각 측선에서 2000년 10월부터 2002년 10월까지 2, 3개월 간격으로 표층퇴적물을 채취하였다. 그러나 Line-A에서는 퇴적률판의 손실로 2001년 8월까지만 표층퇴적물의 채취와 수준측정이 이루어졌고 그 이후부터는 Line-D에서 이루어졌다. 각 측선의 퇴적률은 정점마다 해저면하 약 30 cm의 깊이에 30 × 30 cm의 기준면인 쇠판을 설치하고 주위 환경과 동화 될 수 있도록 1개월 뒤에 해저면에서 기준면과

지의 깊이를 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. 각 측선들은 각 측정점의 고도와 조위값(tidal level)에 기초하여 조간대 환경을 상부 조간대 (평균고조선~소조평균고조선), 중부 조간대 (소조평균고조선~소조평균저조선) 그리고 하부 조간대 (소조평균저조선~평균저조선)으로 세분하여(Wang and Eisma, 1988; Fig. 3) 각 퇴적환경을 비교, 분석하였다.

채취된 표층퇴적물의 입도분석은 퇴적물에 과산화수소(H₂O₂)와 염산(HCl)을 넣어 유기물과 탄산염을 제거한 후, 습식체질에 의해 4 Φ 이하의 조립질과 그

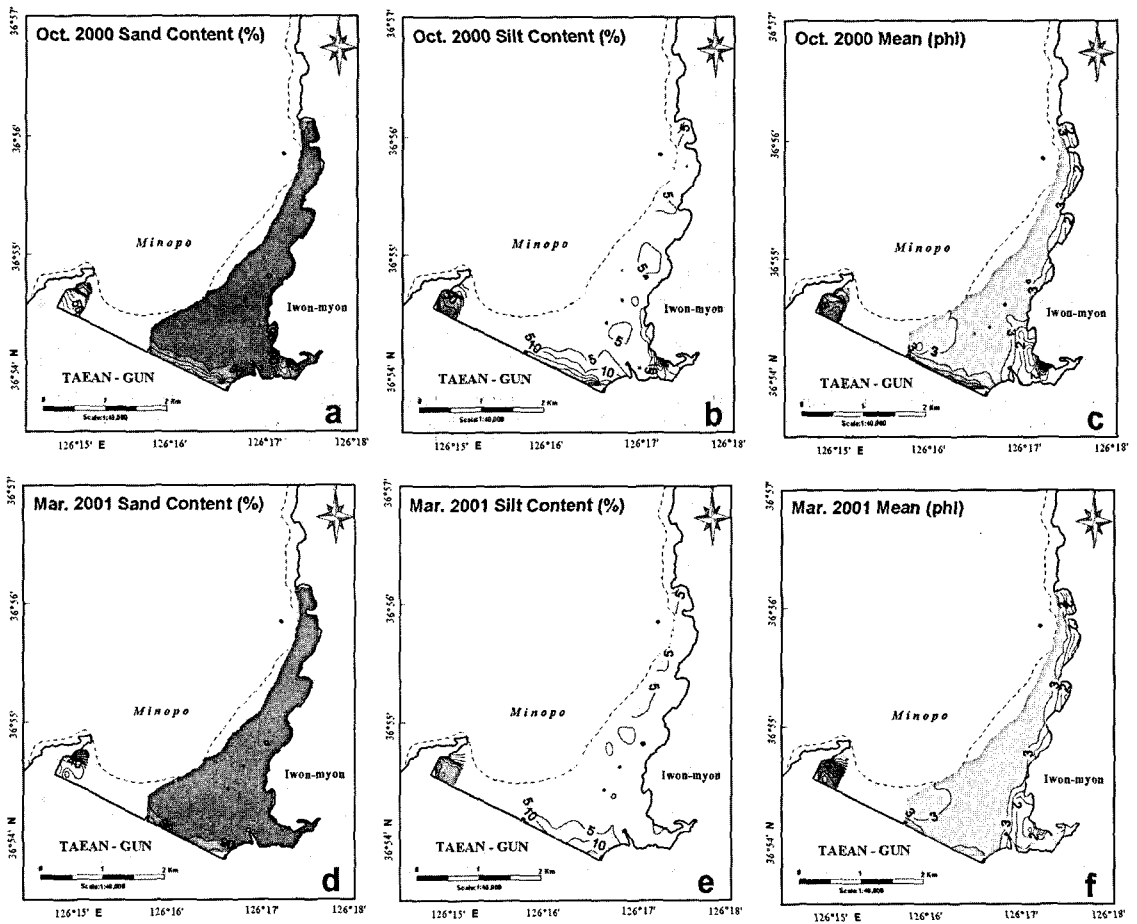


Fig. 5. Distributions of mean (ϕ), sand and silt contents(%) of surface sediments in Oct. 2000 (a, b, c), Mar. 2001 (d, e, f), Dec. 2001 (g, h, i) and Jul. 2002 (j, k, l).

이상의 세립질로 각각 구분하였다. 4ϕ 이하의 조립질 시료는 0.5ϕ 간격으로 건식체질하여 무게 백분율을 구하고, 4ϕ 이상의 세립질 시료는 전체를 대표하는 2g을 취해 300 ml의 0.1% 확산제용액에 넣고 초음파 자기진동기로 균일하게 분산시킨 후 자동입도분석기(Sedigrah 5100D)로 분석하였다. 퇴적상 분류는 Folk(1968) 방법을 따랐으며, 그 외 조직변수는 통계 처리로 구하였다.

결 과

이원 조간대의 계절별 퇴적물 특성

계절별로 채취된 조간대 표층퇴적물의 퇴적상, 조성 및 평균입도 결과는 다음과 같다.

2000년 10월: 표층퇴적물의 퇴적상은 대부분 모래(S)로 구성되어 있고, 방조제 근처와 방조제 서쪽 끝 부분에서 실트질사(zS)와 사질실트(sZ)를 나타내며, 남동쪽 소만 안쪽과 북부 지역에 자갈을 포함한 퇴적상((g)S, (g)mS)을 보인다(Fig. 4a). 조성은 자갈 0.0~4.9%, 모래 12.3~99.1%, 실트 0.4~76.7%, 점토 0.0~11.1%의 분포를 보이고 있다. 모래함량은 대부분 지역에서 90%이상을 나타내고 연구 지역의 남쪽인 방조제 근처, 남동쪽에 위치한 소만 그리고 방조제 서측 끝 지역에서 상대적으로 낮은 모래함량(<80%)을 보이고 있다(Fig. 5a). 반면 실트함량은 모래함량과 반대의 분포 경향성을 보이고 있다(Fig. 5b). 평균입도는 대부분 $3.0\sim 3.5\phi$ 로 구성되어 있고 북부 지역의 상부 조간대 지역에서는 $2\sim 3\phi$ 의 세립사(fine

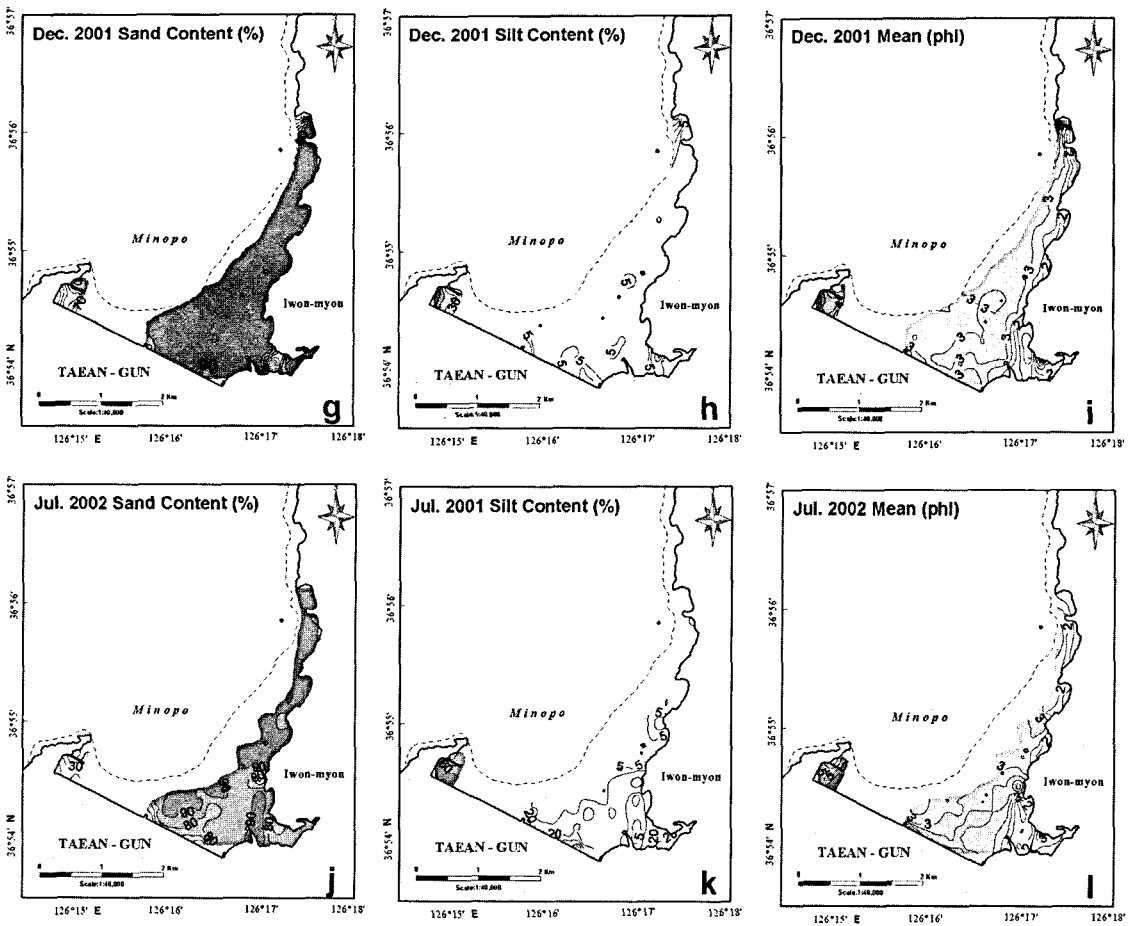


Fig. 5. Continued.

sand)가 분포하지만 방조제 근처 지역과 이원방조제 서측 끝에서 3.5~6.5 Φ로 가장 세립한 퇴적물이 분포한다(Fig. 5c).

2001년 3월: 퇴적상은 대부분 모래(S)를 나타내며 방조제 근처와 소만에서 니질사(mS), 방조제 서측 끝 지역에서 사질니(sM)와 니질사(mS)가 나타나고 있으며(Fig. 4b), 2000년 10월 퇴적상과 비교해 보면 방조제와 소만 안쪽에 넓게 존재하던 실트질사가 모래로 바뀌었다. 조성은 모래가 11.6~99.8%, 실트 0.2~74.9%, 점토 0.6~22.3%로 구성된다. 모래함량은 대부분 지역이 90% 이상을 나타내고 방조제 근처와 방조제 서측 끝에서 상대적으로 낮은 함량을 보이고 있으며 실트함량은 모래함량 분포의 반대 양상을 보이고 있다(Fig. 5d and 5e). 평균입도는 0.8~6.4 Φ의 범위로 2000년 10월의 결과보다 상대적으로 조립하

지만 유사한 분포를 보이고 있다(Fig. 5f).

2001년 12월: 퇴적상은 대부분 모래(S)를 나타내며 동쪽 해안선의 포켓형 해변 내에 역질사(gS, gS), 방조제 서측 끝 지역에서 모래(S), 니질사(mS), 사질니(sM)가 분포하고 있다(Fig. 4c). 조성은 자갈 0.0~11.2%, 모래 9.1~100.0%, 실트 0.0~69.7%, 점토 0.0~25.2%의 범위로 모래가 전체적으로 90%이상 분포하고 연구 지역 북부, 소만, 방조제 근처와 방조제 서측 끝 지역에서 상대적으로 낮은 함량을 보이고 있다(Fig. 5g). 평균입도는 0.4~6.6 Φ의 분포를 보이고 있으며, 연구 지역 북부와 중부 지역에서 1.0~3.5 Φ의 분포로 해안으로 갈수록 조립해지는 경향성을 보이고 남부 지역에서 2.5~3.5 Φ의 범위의 복잡한 분포를 보인다(Fig. 5i).

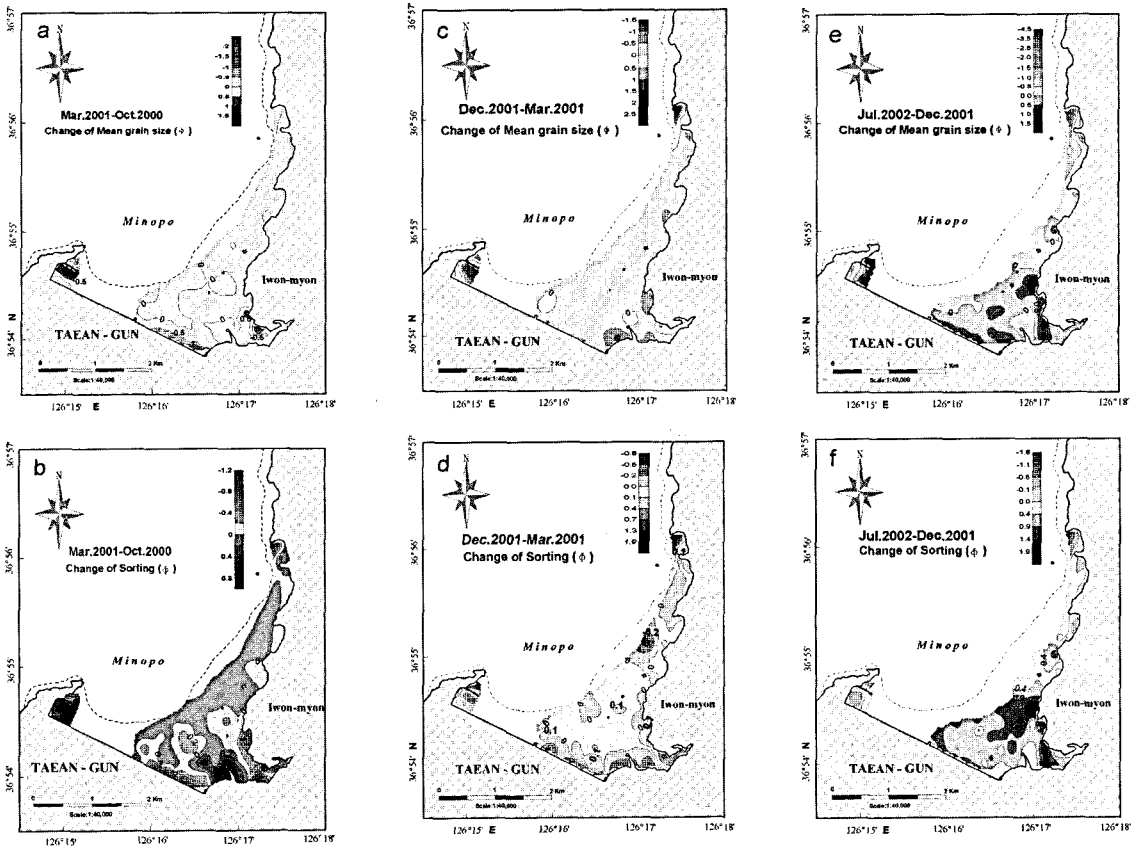


Fig. 6. Spatial distributions of seasonal difference of mean and sorting. a, b: March 2001-October 2000, c, d: December 2001-March 2000, e, f: July 2002-December 2001. Note that minus values of mean and sorting mean relatively coarser and better-sorted distribution.

2002년 7월: 퇴적상은 다른 계절보다 다양한 퇴적상이 나타나고 있다. 북부 지역에서는 역질사((g)S, gS)와 모래(S)가 나타나는 반면 남부 지역에서는 대부분 니질사(mS)가 나타나고 있다. 소만 안쪽과 남부 지역 중부 조간대에서 자갈을 포함한 니질사(gmS, (g)mS)가 존재하고 방조제 서측 끝에서 사질니(sM)가 나타나고 있다(Fig. 4d). 조성은 자갈이 0.0~15.5%, 모래 16.2~100.0%, 실트 0.0~71.2%, 점토 0.0~16.4%의 분포를 보이고 있다. 모래함량은 북부 지역에서 90%이상의 높은 함량을 보이는 반면 연구 지역 남부와 서측 끝 지역에서는 상대적으로 낮은 모래함량을 보이고 있다(Fig. 5j). 실트함량은 모래함량과 반대양상을 보이고 상대적으로 넓은 범위를 타나내고 있다(Fig. 5k). 평균입도는 1.2~5.9 Φ 의 분포를 보이고 있다. 북부 지역에서는 연안쪽으로 갈수록 조립해지는 반면, 남부 지역은 방조제와 해안으

로 갈수록 세립해지는 다른 분포 양상을 보이고 있다(Fig. 5i).

조간대 퇴적물 조성 및 조직변수의 계절적 변화

각 계절별로 얻어진 조간대 퇴적물의 변화를 파악하기 위해서 동일한 정점에 대해서 퇴적물 조성 및 조직변수를 비교하였다. 평균입도의 경우, 양의 값은 상대적으로 세립해진 것을 의미하고 음의 값은 상대적으로 조립해진 것을 의미한다. 분급도의 경우, 양의 값은 분급도가 상대적으로 불량해짐을 나타내고 음의 값은 상대적으로 양호해짐을 나타낸다.

2000년 10월과 2001년 3월: 이 기간 동안 퇴적물의 평균입도 변화는 대부분 조간대에서 -0.5~0.0 Φ 범위로 봄철(3월)이 가을철(10월)보다 상대적으로 조립해졌음을 보이며, 특히 방조제 근처 지역은 -0.5 Φ

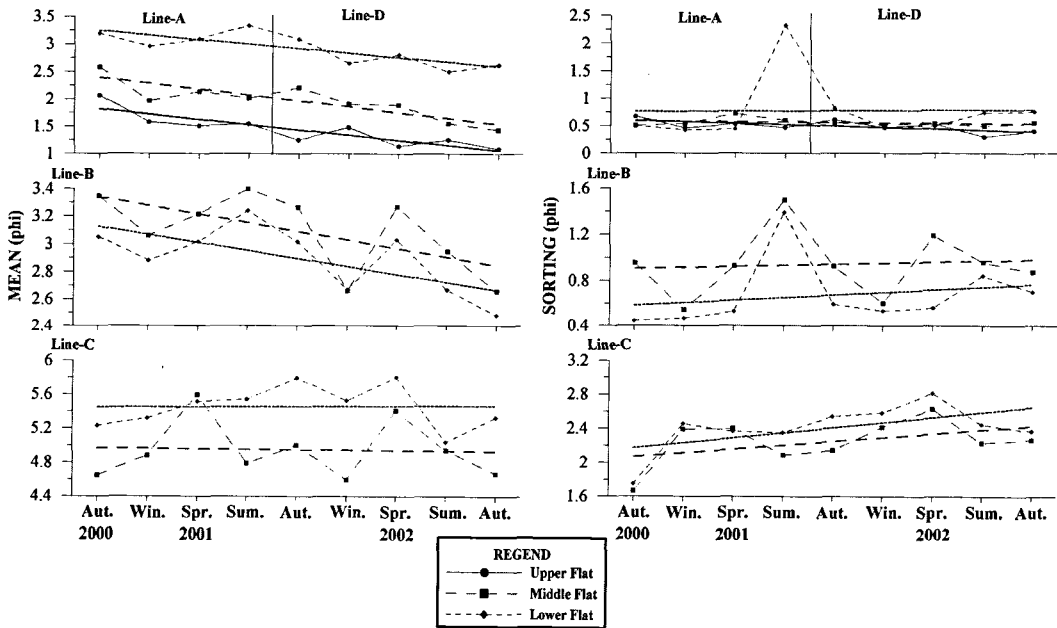


Fig. 7. Seasonal variations in average values of mean and sorting on four transects(Line-A, -B, -C and -D) from 2000 to 2002. Each transects are divided in upper flat, middle flat and lower flat according to tidal level. The bold lines of each zonation imply trend lines. Mean values of surface sediments of Line-A, -D and -B are shown coarsening-trend, whereas those of Line-C are shown slightly fining-trend.

이상의 값을 나타내고 있어 다른 지역보다 상대적으로 더 많이 조립해졌음을 의미한다(Fig. 6a). 평균입도의 양의 값, 즉 퇴적물이 세립해진 지역은 이원 조간대의 남부 하부 조간대 일부와 방조제 서측 끝 지역으로 대부분 0.5 Φ 정도 퇴적물이 세립해졌다. 분급도의 경우, 양의 값을 나타내는 지역은 대부분 저조선과 만나는 하부 조간대에 위치하고 있으며, 분급이 양호해지는 지역 즉, 음의 값이 나타나는 지역은 이원방조제와 인접한 동측 지역과 상부 및 중부 조간대 지역에서 주로 나타난다(Fig. 6b).

2001년 3월과 2001년 12월: 표층퇴적물의 평균입도 변화는 대부분 조간대에서 -0.5~0.0 Φ 범위로 퇴적물이 조립해졌음을 의미한다(Fig. 6c). 분급도는 지역적으로 복잡하게 나타나지만 특징적으로 이원방조제와 해안에 인접한 지역에서 대부분 음의 값으로 이는 분급이 양호해졌음을 의미한다(Fig. 6d).

2001년 12월과 2002년 7월: 이 기간동안 평균입도 변화는 북부와 남부 저조선에 인접한 하부 조간대에서 -0.5~0.0 Φ 범위로 퇴적물이 조립해졌으며 남

부 중부 조간대와 이원방조제 인접 지역에서는 0.0~1.5 Φ 범위로 퇴적물이 세립해졌다. 방조제 서측 끝 지역은 해안선 근처 지역에서는 조립해졌지만 수로쪽으로 갈수록 세립해졌다(Fig. 6c). 분급도의 변화는 대부분 지역에서 양의 값으로 여름철의 퇴적물이 분급이 불량함을 나타낸다(Fig. 6f).

이원 조간대 표층퇴적물의 전체적인 계절적 변화는 가을(2000. 10)에서 봄(2001. 03)으로 가면서 연구 지역의 동측에 위치한 조간대 지역과 남부 조간대 상부 및 중부 조간대에서는 조립해지면서 분급이 양호하게 변하지만 남부 조간대의 하부 조간대에서는 세립해지고 불량한 분급을 나타낸다. 반면 방조제 서측 끝 지역은 봄에 더 세립해지고 있으며 분급이 불량해지고 있다. 봄(2001. 03)에서 겨울(2001. 12)을 거쳐 여름(2002. 07)으로 가면서는 연구 지역 동측 조간대의 북부 지역은 계속적으로 조립해지지만 분급은 겨울에 양호해졌다가 여름에 다시 불량해지고 있다. 남부 지역에서는 겨울에 조립하고 양호한 분급을 나타내지만 여름에는 반대로 세립해지고 불량한 분급을 보이고 있다.

Table 1. Seasonal variations of average values of mean and sorting of surface sediments and sedimentation rates of 4 transects in the Iwon tidal flat according to zonations (upper, middle and lower flat)

Line	Zone		2000		2001		2002				Total change (2002 10-2000 10.)		
			Aut.	Win.	Spr.	Sum.	Aut.	Win.	Spr.	Sum.			
Line-A Line-D	U.F.	Mz (phi)	2.1	1.6	1.5	1.5	1.3	1.5	1.1	1.3	1.1	-1.0	
		Sorting (phi)	0.7	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.3	0.4	-0.3
	M.F.	Mz (phi)	2.6	2.0	2.1	2.0	2.2	1.9	1.9	1.6	1.4	-1.1	
		Sorting (phi)	0.5	0.5	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0	
	L.F.	S.R. (mm/yr)	-43.2		21.6								-5.4
		Mz (phi)	3.2	3.0	3.1	3.3	3.1	2.6	2.8	2.5	2.6	-0.6	
Line-B	M.F.	Sorting (phi)	0.5	0.4	0.4	2.3	0.8	0.5	0.5	0.7	0.8	0.3	
		S.R. (mm/yr)	38.4		10.8								42.3
	L.F.	Mz (phi)	3.3	3.1	3.2	3.4	3.3	2.7	3.3	2.9	2.7	-0.7	
		Sorting (phi)	1.0	0.5	0.9	1.5	0.9	0.6	1.2	1.0	0.9	-0.1	
	M.F.	S.R. (mm/yr)	10.1		-6.6								3.5
		Mz (phi)	3.1	2.9	3.0	3.2	3.0	2.7	3.0	2.7	2.5	-0.6	
Line-C	L.F.	Sorting (phi)	0.4	0.5	0.5	1.4	0.6	0.5	0.6	0.8	0.7	0.3	
		S.R. (mm/yr)	-15.3		-17.4								-32.6
	M.F.	Mz (phi)	4.6	4.9	5.6	4.8	5.0	4.6	5.4	4.9	4.7	0.0	
		Sorting (phi)	1.7	2.4	2.4	2.1	2.1	2.4	2.6	2.2	2.3	0.6	
	L.F.	S.R. (mm/yr)	-1		0.5								-0.5
		Mz (phi)	5.2	5.3	5.5	5.5	5.8	5.5	5.8	5.0	5.3	0.1	
M.F.	Sorting (phi)	1.8	2.5	2.4	2.4	2.5	2.6	2.8	2.4	2.4	0.6		
	S.R. (mm/yr)	5.1		-2.2								2.9	

U.F.: Upper Flat, M.F.: Middle Flat, L.F.: Lower Flat, Mz: Mean, S.R.: Sedimentation Rate.

측선 퇴적물의 계절변화

2000년 10월부터 2002년 10월까지 2년 동안 2~3 개월간격으로 얻어진 각 측선에 대해서 상부 조간대, 중부 조간대 그리고 하부 조간대로 구분하여 계절적으로 평균한 결과는 다음과 같다(Fig. 7 and Table 1).

연구 지역의 북부를 대표하는 측선 Line-A와 Line-D는 기준점은 같고 측선위치가 다르다(Fig. 1). 평균입도는 상부, 중부, 하부 조간대에서 각각 1.1~2.1 Φ, 1.4~2.6 Φ, 2.5~3.3 Φ의 범위를 가지고 있고 분급도는 각각 0.3~0.7 Φ, 0.5~0.7 Φ, 0.4~2.3 Φ의 범위를 나타내고, 상부 조간대에서 하부 조간대로 갈수록 세립해지고 불량한 분급을 보이고 있다(Table 1). 연구 지역 북부 지역 Line-A와 Line-D에서의 계절적 변화를 보면 평균입도에서는 여름에 세립해지고 겨울에 조립해진다. 이런 경향성은 상부, 중부, 하부 조간대에서 모두 나타나고 있으며 시간이 지남에 따라서 계속적으로 조립해지고 있다(Fig. 7). 분급도는 계절별, 구획별로 뚜렷한 경향성을 보이지 않지만 여름 동안은 상부에서 하부 조간대로 갈수록 분급도가 나빠지고 있음을 알 수가 있다(Fig 7). Line-A(2000.

10~2001. 06)는 중부 조간대에서 총 43.2 mm가 침식되었으며, 하부 조간대에서 38.4 mm의 퇴적을 보이고 있고, Line-D(2001. 09~2002. 10)은 중부와 하부 조간대에서 각각 총 21.6 mm, 10.8 mm가 퇴적되었다. 총 변화량은 중부 조간대에서 -5.4 mm의 침식을 보였으며 하부 조간대에서는 42.3 mm의 퇴적을 보인다(Table 1).

이원 조간대 중앙에 위치하는 Line-B에서 상부 조간대는 암반 및 방조제로 되어 있어서 중부 조간대와 하부 조간대만 존재한다(Fig. 3). 중부와 하부 조간대의 평균입도는 각각 2.7~3.4 Φ, 2.5~3.2 Φ, 분급도는 0.5~1.2 Φ, 0.4~1.4 Φ의 분포범위를 가지고 있어 하부 조간대가 중부 조간대보다 상대적으로 조립하고 양호한 분급을 나타낸다(Table 1). 평균입도의 계절적 변화를 보면, 가을에서 겨울로 갈수록 조립해지고 봄에서 여름으로 갈수록 세립해지는 경향성을 가지고 있다. 분급도 또한 평균입도와 같이 여름에는 상대적으로 불량한 분급을 그리고 겨울에는 양호한 분급을 가지며, 하부 조간대보다는 중부 조간대에서 계절별 변화가 크게 나타나고 있다. 또한 Line-A와 -D에서

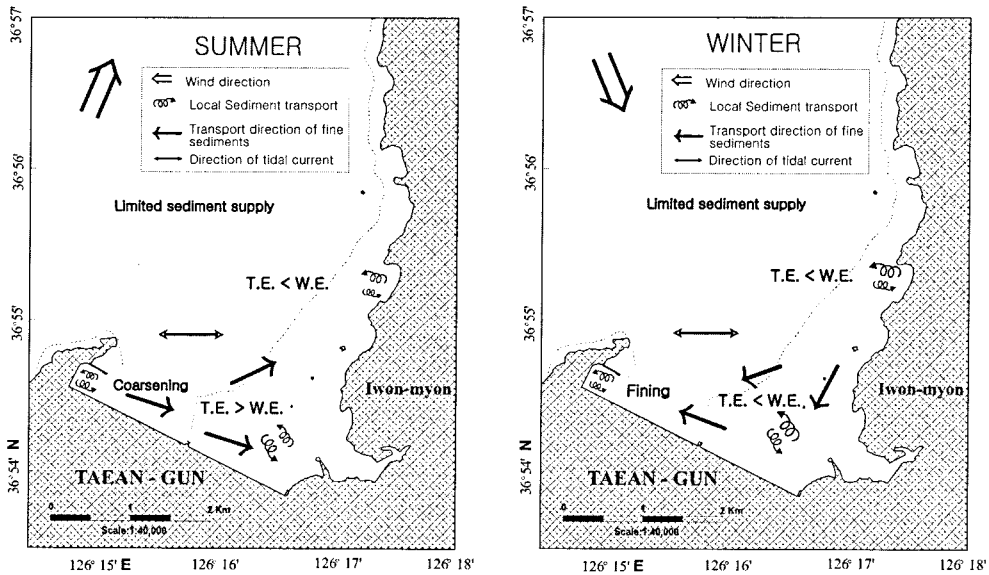


Fig. 8. Schematic diagram illustrating the seasonal variations of sedimentary processes, transport and major factors influencing on them. T.E.: Tide Effect, W.E.: Wave Effect.

보여진 것과 같이 시간이 지남에 따라서 평균입도가 조립해지고 있다(Fig. 7). 퇴적물은 중부, 하부 조간대에서 각각 10.1 mm, -15.3 mm(2000. 10~2001. 10), -6.6 mm, -17.4 mm(2001. 10~2002. 10)로 계속 침식되고 있음을 보이고 있고 2년 동안의 총 변화는 중부와 하부 조간대에서 각각 3.5 mm와 -32.6 mm를 나타내고 있다(Table 1).

Line-C는 방조제 서측 끝에 위치한 측선으로서 풍파의 직접적인 영향에서 보호된다. 이 측선은 평균해수면(MSL)보다 아래쪽에 위치하고 있으며, Line-B와 마찬가지로 상부 조간대는 방조제 위에 위치하고 중부와 하부 조간대만 존재한다(Fig. 3). 하부 조간대 바깥쪽에는 수로가 존재하고 있다. 중부와 하부 조간대의 평균입도는 4.6~5.6 Φ, 5.2~5.8 Φ, 분급도는 1.7~2.6 Φ, 1.8~2.8 Φ의 범위로 중부 조간대가 하부 조간대보다 상대적으로 조립하고 분급이 양호하다(Fig. 7). Line-C 측선의 퇴적물은 다른 측선(Line-A, -D and -B)에 비해서 세립하고 불량한 분급이 나타나는 것이 특징이다. Line-C의 계절적 변화를 보면 직접적으로 파랑에 영향 받는 Line-A, -D 및 -B와 다른 경향성을 보이고 있다. 중부 조간대에서는 봄에 세립한 퇴적물이 그리고 여름과 가을에 상대적으로 조립한 퇴적물이 분포하며, 분급도는 겨울에 상대적으로 불량해지고 여름에는 양호해지는 경향성을 보이고 있다. 하부 조간대에서는 2001년 겨울을 제외하고 2002년

봄까지 계속적으로 세립해지다가 2002년 여름과 가을에 조립한 퇴적물로 변화되었다(Fig. 7). Line-C 지역은 시간이 지남에 따라서 Line-A, -D 및 -B와 다르게 세립해지는 경향성을 보이고 있다. 퇴적물은 중부, 하부 조간대에서 각각 -1.0 mm, 5.1 mm(2000. 10~2001. 10), 0.5 mm, -2.2 mm (2001. 10~2002. 10)로 2001년과 2002년 사이에 중부와 하부 조간대가 반대의 경향을 보이고 있다(Table 1).

Line-D의 상부와 중부 조간대, Line-B의 모든 조간대 그리고 Line-C의 하부 조간대에서 2002년 여름에 상대적으로 조립해지고 부분적으로 분급이 양호해지는 특징을 보이고 있는데 이는 현장조사 3일전에 충남 서해안을 통과한 태풍 라마손(RAMASOON)의 영향으로 세립질 퇴적물이 제거된 현상으로 사료된다.

토 의

본 연구 지역은 방조제 건설 전에 반폐쇄성 해안으로 저조선 근처의 하부 조간대에 포함되었으나 현재 만 입구를 막은 방조제 축조로 인하여 조간대 주변 지형이 개방형으로 바뀌므로 해서 새로운 조간대 환경으로 변화되었다. 조류 방향은 방조제가 건설됨에 따라서 만 입구 방향의 직각 방향인 북동-남서방향에서 현재 동서 방향으로 바뀌었다. 또한 연구 지역은 퇴적물의 기원이 될 수 있는 강이 존재 하지

않으며 변성암류의 암반해안으로 구성되어 있어서 육상기원 퇴적물의 공급이 제한적이다. 그러므로 연구 지역의 퇴적물 기원은 외해기원으로 볼 수 있다. 또한 연구 지역 동측 조간대의 표층퇴적물의 최빈값이 2~3 Φ 로 외해 지역의 모래와 같음을 고려할 때, 연구 지역 외해 지역에 발달되어 있고 세립사 퇴적물로 구성된 모래파(Sand Wave)가 동쪽 내지 북동쪽 육지를 향해 이동(최 등, 1992)되면서 연구 지역에 유입되는 것으로 보이지만 동측 조간대의 침식에 의해서 공급량은 제한적일 것으로 보인다. 또한, 세립질 퇴적물은 태안반도 근해에 형성된 조석전선에 의해서 제한되고(최진용과 박용안, 1996, 1998), 연구 지역의 부유퇴적물 농도 역시 0.55~4.32 mg/l(한국해양연구원, 2001)로 인근 방조제의 10~80 mg/l(Lee et al., 1999)에 비해서 극히 낮은 값을 보인다. 따라서 이 연구 지역은 세립질 퇴적물 유입량이 극히 제한된 지역임을 알 수가 있다. 이런 퇴적물 공급이 제한적인 이원 조간대 표층퇴적물의 전체적인 계절적 변화 양상을 보면 크게 2 지역으로 나눌 수가 있다(Fig. 8). 첫번째 양상은 연구 지역의 동측 조간대로서 이 지역은 개방형 해안(open coast)으로 몬순계절풍의 영향에 따라 여름에는 남풍계열의 바람이 우세하고 바람의 세기가 약화되어 저에너지환경으로 세립질 퇴적물이 퇴적되는 양상을 보이는 반면, 겨울에는 북풍계열로 바람의 방향이 바뀌고 세기가 현저히 증가한 고에너지환경으로 여름에 쌓인 세립질 퇴적물이 제거되는 계절적 변화를 보인다(Chun et al., 1998; Lee et al., 1999). 그리고 제한된 퇴적물 공급 및 강한 조류와 파랑 그리고 격변작용(태풍)에 직접적인 영향을 받음으로써 표층퇴적물은 점차 조립해지고 있는데, 이는 Line-A, -D 및 -B에서의 2년 동안의 표층퇴적물의 입도변화(Fig. 7)에서 뚜렷이 알 수 있다. 남부 지역은 북부 지역보다 단면 경사도(Line-A, -D: 6.2°~6.7°, 1.0°, 0.32°; Line-B: 1.5°~0.17°; Fig. 3)에서 상대적으로 완만한 경사를 가지며 퇴적물은 세립하고 불량한 분급을 나타낸다. 또한 북부는 상부에서 하부 조간대로 갈수록 세립해지고 불량해지는 패턴을 가지지만, 남부는 반대 양상을 보이고 있다. 이는 파랑과 조석의 상대적인 영향의 차이라고 볼 수 있는데, 파랑은 쇄파대에서 깨지면서 많은 양의 퇴적물을 이동, 분산시키는(Sallenger et al., 1983; Davies and Hayes, 1984) 반면, 조석은 해수면을 규칙적으로 변동함으로써 에너지를 분산시켜 퇴적물의 이동과 지형

변화를 감소, 즉 경사를 감소시키며, 해저면 회귀류(seabed return flow)는 저조때 증가하고 고조일 때 감소한다(Masselink and Short, 1993). 따라서 북부 지역에서는 조석작용보다는 파랑의 영향이 크게 작용하여 유입되는 퇴적물보다는 제거되는 퇴적물이 클 것으로 보이며 반면 남부 지역에서는 반대로 조석의 영향을 받아 쇄파대를 이동시키면서 에너지를 분산시켜 상대적으로 세립질 퇴적물이 더 많이 퇴적되는 것으로 판단된다. 겨울에는 동측 조간대 지역 모두 강한 북서풍의 영향으로 파랑작용에 의해 제거되는 퇴적물이 많을 것으로 보인다. 전체적으로 이 결과는 대호방조제가 건설됨으로써 퇴적환경에 영향을 미친 결과(Lee et al., 1999)와 일치한다.

두 번째 양상은 방조제 축조에 의해서 형성된 서측 끝 지역으로, 남동쪽으로 향하고 있어 겨울철 북서계절풍의 영향에서 보호되는 지역이다. 이 지역의 계절적 변화는 뚜렷한 패턴을 보이지 않지만 동측 조간대에서 보여지는 양상과는 다르게 봄에 가장 세립하고 불량한 분급을 가지며 여름에는 상대적으로 조립하고 양호한 분급을 가지고 격변작용인 태풍의 영향이 없다면 시간이 지남에 따라 세립화 현상을 보일 것으로 보인다. 이는 방조제 건설에 따른 지형적인 요인에 의한 것으로 겨울철에는 동측 조간대에서 파랑의 체질작용에 의해 효과적으로 재부유된 세립질 퇴적물이 조류와 폭풍에 의해 외해 또는 연안과 평행하게 이동되다가 저에너지 환경인 서측 끝 지역에 퇴적되는 반면, 여름에는 퇴적물 공급이 제한적이고 전체적으로 저에너지 환경으로 동서 방향의 조류에 의해서 세립질 퇴적물이 재부유되어 이동, 분산되어지는 것으로 보인다. 따라서 연구 지역은 겨울철에 동측 조간대에서 재부유된 세립질 퇴적물이 남서쪽으로 이동하다가 방조제에 의해서 북서쪽 방향으로 이동하여 방조제 서측 끝 지역에 퇴적되고 여름철에는 방조제 끝 지역 부분에서 동서 방향의 조류에 의해 재부유되어 동측 조간대 북, 남부쪽으로 이동되어지는 순환형태를 보이는 것으로 판단된다(Fig. 8).

결 론

계절별로 채취된 표층퇴적물과 4개의 축선에서 2년 동안 표층퇴적물의 변화를 통해서 보면, 퇴적물 공급이 제한적인 이원 조간대는 방조제가 건설된 후, 동측 조간대 지역이 개방형 연안에서 나타나는 계절

적 변화, 즉 몬순계절풍의 영향으로 여름에는 저에너지 환경으로 세립질 퇴적물이 퇴적되어 세립해지고 분급이 불량해지는 양상을 보이는 반면, 겨울에는 강한 북서 계절풍에 의한 파랑에 의한 고에너지 환경으로 여름에 쌓인 세립질 퇴적물이 제거되어 조립하고 양호한 분급을 나타내는 계절적 변화를 보인다. 또한 동측 조간대의 북부 지역은 조석보다는 파랑작용에 크게 영향을 받고 있으며 남부 지역은 반대의 영향을 받고 있지만 태풍과 같은 격변작용과 겨울철 파랑의 주된 작용에 의해서 세립질 퇴적물이 제거되면서 조립화 현상을 보이고 있다. 반면 방조제가 건설됨으로 해서 새롭게 형성된 서측 끝 지역은 남동 방향으로 향하고 있어 북서계절풍에 의한 영향에서 보호되는 지역으로 동측 조간대에서 보여지는 계절변화 양상과는 약간 다르게 봄에 가장 세립하고 불량한 분급을 가지며 여름에는 상대적으로 조립하고 양호한 분급을 가진다. 이는 방조제 건설에 따른 지형적 원인으로 판단되어진다. 또한 연구 지역의 세립퇴적물 이동은 방조제에 막혀 겨울철에는 동측 조간대에서 방조제 서측 끝 지역으로 이동하고 다시 여름철에는 동측 조간대로 이동되는 계절적인 순환현상이 나타나는 것으로 보인다. 이런 결과들은 아직 변화과정 중인 것으로 보이고 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구를 위한 현장조사와 자료분석을 해주신 한국해양연구원의 권수재, 장석 연구원께 감사드립니다. 또한 본 연구는 “황해연안역의 해양환경복원을 위한 연구”와 “황해퇴적물 이동현상 및 퇴적환경연구”의 사업 일환으로 지원수행 되었습니다.

참고문헌

- 기상청, 2000, 2001, 2002, 기상연보.
 류상욱, 유환수, 이종덕, 1999, 함평만 조간대의 표층퇴적물과 집적물의 계절변화. 한국해양학회 '바다'. 4 (2), 127-135.
 류상욱, 김주용, 장진호, 2001, 서해남부 무안만의 표층퇴적물의 분포와 조간대 퇴적물. 한국지구과학회, 22 (1), 30-39.
 오재경, 금병철, 1998, 서해안 몽산포 대조차 해변의 퇴적학적 특성, 한국지구과학회지, 19 (3), 310-317.
 우한준, 제종길, 2002, 강화 남부 갯벌의 퇴적환경 변화.

- Ocean and Polar Research, 24 (4), 331-343.
 장진호, 최진용, 1998, 조간대 퇴적물의 계절적 집적양상과 보존:한국 서해안의 곰소만. 한국해양학회지, 3 (3), 149-157.
 장진호, 김여상, 조영길, 1999, 해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 퇴적작용: 한국 서해안의 함평만. 한국해양학회지, 4 (2), 117-126.
 최동립, 김성렬, 석봉출, 한상준, 1992, 한반도 황해 중부 태안반도 근해 사질퇴적물의 이동. The Journal of the Oceanological Society of Korea. 27 (1), 66-77.
 최진용, 박용안, 1996, 한반도 서해 태안반도 연근해 부유 퇴적물의 기초 해양학적 특성. 'The sea' The Journal of the Korea Society of Oceanography, 1 (1), 46-54.
 최진용, 박용안, 1998, 하계동안 한국 서해 태안반도 연근해에서 부유퇴적물의 운반양상. 'The sea' The Journal of the Korea Society of Oceanography, 3 (1), 45-52.
 추용식, 권수재, 박장준, 박용안, 1996, 한국 서해중부 해변에서의 퇴적작용의 계절변화. Journal of Ocean Research, 18 (1), 37-45.
 한국해양연구원, 1993, 방조제 축조에 따른 퇴적환경변화 연구 (I). BSPN 00208-626-5, 175 p.
 한국해양연구원, 1994, 방조제 축조에 따른 퇴적환경변화 연구 (II). BSPN 00235-716-5, 174 p.
 한국해양연구원, 2000, 황해 연안역의 해양환경 복원을 위한 연구: 인공갯벌. BSPE 00785-00-1312-2, 269 p.
 한국해양연구원, 2001, 황해 연안역의 해양환경 복원을 위한 연구: 인공갯벌 (I-II). BSPE 00821-00-1399-2, 505 p.
 Alexander, C.R., Nittrouer, C.A., Demaster, D.J., Park, Y.A. and Park, S.C., 1991, Macrotidal Mudflats of the Southwestern Koera Coast: A Model for Interpretation of Intertidal Deposits, J. Sed. Pet., 61, 805-824.
 Chun, S.S., Lee, H.J., Ryu, S.O. and Yang, B.C., 1998, Seasonal and local variation of sedimentation on the wave-dominated tidal flats, Southwestern coast of Korea: Comparison between inner-bay and open tidal flats. 15th International Sedimentological Congress, Alicante, Spain. (Abstract), 257 p.
 Davis, Jr. R.A. and Hayes, M.O., 1984, What is a wave dominated coast?. Marine Geology, 60: 313-330.
 Folk, R.L., 1968, Petrology of Sedimentary Rock, Hemphill's. 134 p.
 Lee, H.J., Chu, Y.S., and Y.A. Park., 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.
 Masslink, G. and Short, A.D., 1993, The effect of tide range on beach morphodynamics and Morphology: A conceptual beach model. Journal of Coastal Research, 9, 785-800.
 Ryu, S.O., 2003, Seasonal variation of sedimentary processes in a semi-enclosed bay: Hampyong bay, Korea.

- Estuarine, Coastal and Shelf Science, 56, 481-492.
- Shallenger Jr., A.H., Howard, P.C., Fletcher III, C.H., and Howd, P.A., 1983, A system for measuring bottom profiles, wave and currents in the high energy nearshore environments. *Marine Geology*, 51: 63-76
- Wang, B.C. and Eisma, D., 1988, Mud flat deposition along the Wenzhou coastal plain in the southern Zhejiang, China, In: *Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies*, de Boer, P.L., van Gelder, A., and Nio, S.D. (eds.), Boston Reidel Publications, Amsterdam, 233-263.
- Well, 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.

2004년 6월 29일 원고 접수
2004년 9월 18일 수정원고 접수
2004년 9월 18일 원고 채택