

한국 서해 강화 갯벌의 퇴적물 특성

Characteristics of Sediments in the Kanghwa Tidal Flat on the west coast of Korea

우 한 준* / 박 장 준** / 이 연 규*** / 제 종 길**** / 최 재 응*****

Han Jun Woo / Jang Jun Bahk / Yeon Gyu Lee / Jong Geel Je / Jae Ung Choi

:: Abstract ::

The southern tidal flat of Kanghwa Island is one of the biggest flats on the west coast of Korea. Tide is typically a semidiurnal with maximum range of about 10m. The tidal flat receives large amount of sediments from Han River system. Surface sediments for sedimentary analyses were sampled at 83 stations in the study area in August 2003. The surface sediments consisted of five sedimentary facies. Generally, sandy mud sediments dominated in the southern tidal flat of Kanghwa Island, whereas sand sediments dominated in channel and subtidal zones of the western part of Kanghwa Island. The area of sandy mud sediment extended to eastward tidal flat compared to sedimentary facies in August 1997. Sedimentary facies analysis of three core sediments from the tidal flat to the south of the Kangwha Island revealed three sedimentary facies: trough-cross-bedded sand, laminated silt, and bioturbated silt. Distribution of the facies in the cores suggested that sedimentation rates has been generally high in the margin of main tidal channel, especially in the east of the Donggeum Island. Twelve-and-half-hour anchoring survey was carried out for measurements of hydrodynamic parameters at Yeomha channel near Choji Bridge(K1) and channel near Donggeum Island(K2) in June 2003. Residual flows indicated strong ebb-dominated tidal currents. Depth-integrated net suspended sediment loads for one tidal cycle were seaward movement with 309,217.9kg/m and 128,123.1kg/m at station K1 and K2, respectively. The higher value of net suspended sediment loads at station K1 suggested that lots of suspended sediments from Han River deposited in the eastern part of tidal flat.

Keywords : Kanghwa tidal flat, Surface sediments, Sedimentary facies, Suspended sediments

:: 요 지 ::

강화 남단 갯벌은 우리나라 서해안의 가장 규모가 큰 갯벌 중의 하나이다. 조석은 전형적인 반일주조로 최대조차가 약 10m 이다. 강화 남단 갯벌은 한강 수계로부터 많은 양의 퇴적물이 유입된다. 연구지역에서 2003년 8월에 83개 정점에서 표층퇴적물을 채취하여 분석하였다. 표층퇴적물은 5개의 퇴적상으로 구성 되어 있었다. 일반적으로 모

* 정회원, 한국해양연구원 해저환경자원연구본부 책임연구원, E-mail : hjwoo@kordi.re.kr - 발표자

** 한국해양연구원 극지연구소 연수연구원, E-mail : jjbahk@kordi.re.kr

*** 정회원, 여수대학교 해양시스템학부, E-mail : lyg6342@yosu.ac.kr

**** 정회원, 한국해양연구원 해양생물자원연구본부책임연구원, E-mail : jgje@kordi.re.kr

***** 한국해양연구원 해저환경자원연구본부 연수생, E-mail : jaeung@kordi.re.kr

래 펄 퇴적물은 강화 남단 갯벌에서 우세하였고, 반면에 모래 퇴적물은 강화도 서부의 수로와 조하대에서 우세하였다. 이 지역의 1997년 8월 퇴적상과 비교하여 모래 펄 퇴적물은 갯벌의 동쪽으로 확장 되었다. 강화도 남단 갯벌에서 채취한 3점의 주상 시료에 대한 퇴적학적 분석 결과, 사층리 모래층, 실트-점토 호층 얽리 실트, 생물교란 실트 등 세 개의 퇴적상이 인지되었다. 이들 퇴적상의 분포는 조수로 인근 지역이 전반적으로 퇴적물이 높으며, 특히 동검도 동쪽 갯벌에서 최근 급격한 퇴적 작용이 진행되고 있음을 지시하고 있다. 수리학적 관측을 위하여 2003년 6월에 염하수로의 초지대교 부근(K1)과 동검도 남부 수로(K2)에서 12시간 30분 동안 정선 관측을 실시하였다. 잔여유속 계산 결과 이 지역은 썰물이 강하게 나타났다. 각 수층의 부유물질 양에 의하여 계산된 순 부유퇴적물 이동양은 한 조석 주기 동안 염하수로에서는 외해로 309,217.9kg/m가 유출 되며, 동검도 남부 수로에서는 외해로 128,123.1kg/m가 유출 되는 것으로 나타났다. 동검도 남부 수로에 비하여 염하수로의 순 부유퇴적물 이동양이 높은 것은 갯벌의 동부에 한강에서 유입된 많은 부유물질이 퇴적된다는 것을 나타낸다.

핵심용어 : 강화 갯벌, 표층퇴적물, 퇴적상, 부유 퇴적물

1. 서론

한반도 서해안은 조차가 크고 넓은 대륙붕이 발달하여 연안에 갯벌(tidal flat)이 잘 발달되어 있다. 서해안의 갯벌은 주변 지형에 따라 개방형(open-coast type), 하구형(estuarine type) 그리고 만형(embayment type), 퇴적물에 따라 펄 갯벌, 모래 갯벌 그리고 혼합갯벌로 구분할 수 있다. 갯벌은 주변 지형에 따라 퇴적학적, 수리학적 작용이 서로 다르게 작용하면서 갯벌의 자연적인 생태계를 유지하며 생물의 서식지, 오염정화 등 고유의 기능을 유지하고 있다. 그러나 최근 인간의 사회·경제적 활동에 따라 간척사업에 의하여 앞으로 연안 갯벌의 약 40% 이상이 사라졌거나 사라질 전망이다(농어촌진흥공사, 1995). 이러한 갯벌 주변의 인위적인 환경변화는 갯벌에 작용하는 수리적인 변화를 가져와 퇴적물의 퇴적/침식을 비롯하여 생태계에 상당한 부작용을 가져올 것이다.

서해안의 갯벌 퇴적물은 계절적인 퇴적/침식작용이 반복되어 나타나며, 북해나 북미의 갯벌 층서와는 달리 상향 조립화 층서(coarsening-upward sequence)를 보이는 것으로 알려져 있다(장진호, 1995; Kim 등, 1999; Lee 등, 1999). 이러한 주요 원인은 상대적으로 강에서 갯벌에 공급되는 퇴적물이 작아 연간 순퇴적이 낮기 때문으로 보인다(Kim, 1997). 최근 서해안의 영종

도 신공항, 금강 및 영산강 하구언, 새만금 방조제 등의 건설에 의해 육지에서부터 공급되는 세립질 퇴적물의 양이 인위적으로 낮아지고, 수리적인 조건이 변하여 갯벌의 유지 기능을 더욱 어렵게 만드리라 예상되고 있다.

강화 갯벌은 우리나라 대표적인 하구 갯벌로서 동식물의 서식지, 산란지, 철새 도래지 등 많은 기능을 가지고 있다. 강화도는 고려시대 이후 간척사업에 의하여 해안선이 상당히 많이 변화 되었으며(최강원 등, 1998), 최근 영종도 신공항과 주변 해안 구조물 건설에 의하여 해안의 조류 흐름과 퇴적물 특성이 많이 변하고 있는 실정이다(한국해양연구원, 2001; 우한준과 제종길, 2002). 따라서 강화 갯벌은 주변 변화에 따른 장기적인 생태계 관찰이 필요하며 이에 따라 향후 환경 보전과 관리가 이루어져야 할 것이다. 본 연구의 목적은 강화 남단 갯벌 생태계에 영향을 미치는 퇴적환경의 특성을 파악하는 것이다. 이러한 연구 목적을 위하여 강화 남부 갯벌의 표층퇴적물, 주상시료 그리고 부유 퇴적물에 관한 조사가 수행되었다. 이러한 자료들은 강화 갯벌의 퇴적물 특성을 파악하고 향후 이 지역의 변화와 보전 관리 계획 수립에 중요한 자료가 될 것이다.

2. 조사 지역

강화도는 경기만 북부의 동경 126° 21' ~ 126° 32', 북

위 37° 35' ~ 37° 50' 에 위치하며, 강화 갯벌은 한강, 임진강, 예성강들로부터 유입된 퇴적물에 의하여 형성된 하구 갯벌이다(Fig. 1). 강화 남부 갯벌은 육지로부터 최대 거리 약 6km, 면적은 약 90km²로 강화도 전체 갯벌 면적의 약 86%를 차지한다(수로국, 1981). 강화도 동부에는 300~1,500m 폭의 비교적 좁은 염하수로가 있고, 서부에는 약 1,200~3,800m 폭의 석모수로가 있다. 강화도 서부에는 석모도, 교동도가 있고, 이 외에도 영종도,

불음도, 장봉도, 세어도 등 수 많은 유무인도가 산재한다. 조석은 전형적인 일일 2주기로 최대조차는 대부분이 8m 정도이다(국립해양조사원, 1998). 해수는 염하수로와 석모수로에서 유입되는 담수와 조석에 따른 해수의 혼합으로 염분도의 뚜렷한 구배를 나타내는 기수의 특성을 보여준다. 이 지역은 수도권 개발에 따른 한강종합개발공사, 주변의 매립에 따른 인공 구조물 설치, 인천 신공항 건설 등 인위적인 개발이 많이 이루어진 곳이다.



Fig. 1. Regional map showing the location of the Kanghwa tidal flat in 1999.

3. 연구 방법

3.1 표층퇴적물

강화 갯벌의 표층 퇴적환경을 파악하기 위하여 강화 남부에서 83정점에서 표층퇴적물을 채취하여 분석하였다. 표층퇴적물은 2003년 8월에 만조시 선박을 이용하여 채취기(Grab sampler)로 표층퇴적물을 채취하였다(Fig. 2). 현장에서 채취된 시료는 실험실로 옮겨진 후 약 5g을 1,000ml 비이커에 담아 유기물을 제거하기 위하여 10% 과산화수소수(H_2O_2)로 24시간 이상 반응시켰다. 조개껍질 등의 탄산염 성분 물질에 의한 오차를 없애기 위해 0.1N 염산(HCl)으로 반응시켜 탄산염을 제거하였다.

입도 분석이 준비된 시료는 4.0 ϕ 체를 이용하여 습식 체질(wet sieving)에 의해 조립질과 세립질 퇴적물로

분리하였다. 4.0 ϕ 이하의 모래 시료는 0.5 ϕ 간격으로 Gradex 2000 입도 분석기(Particle size analyzer)로 약 10분간 체질한 후 입도 등급별로 무게 백분율을 구하였다. 4 ϕ 이상의 펄 시료는 전체를 대표할 수 있는 시료 2g을 취해 80ml의 0.1% calgon용액을 넣고 초음파 분쇄기와 자기진동기로 시료를 균일하게 분산시킨 후, X-선 자동입도 분석기인 Sedigraph 5100을 사용하여 입도 무게 백분율을 구하였다. 입도별 무게 백분율은 도해적 방법(Inclusive Graphic Method)에 의하여 평균입도, 분급도 등의 통계변수들을 구하였다(Folk와 Ward, 1957).

3.2 주상퇴적물

강화 남단 갯벌 해역의 퇴적층서와 퇴적작용의 변화

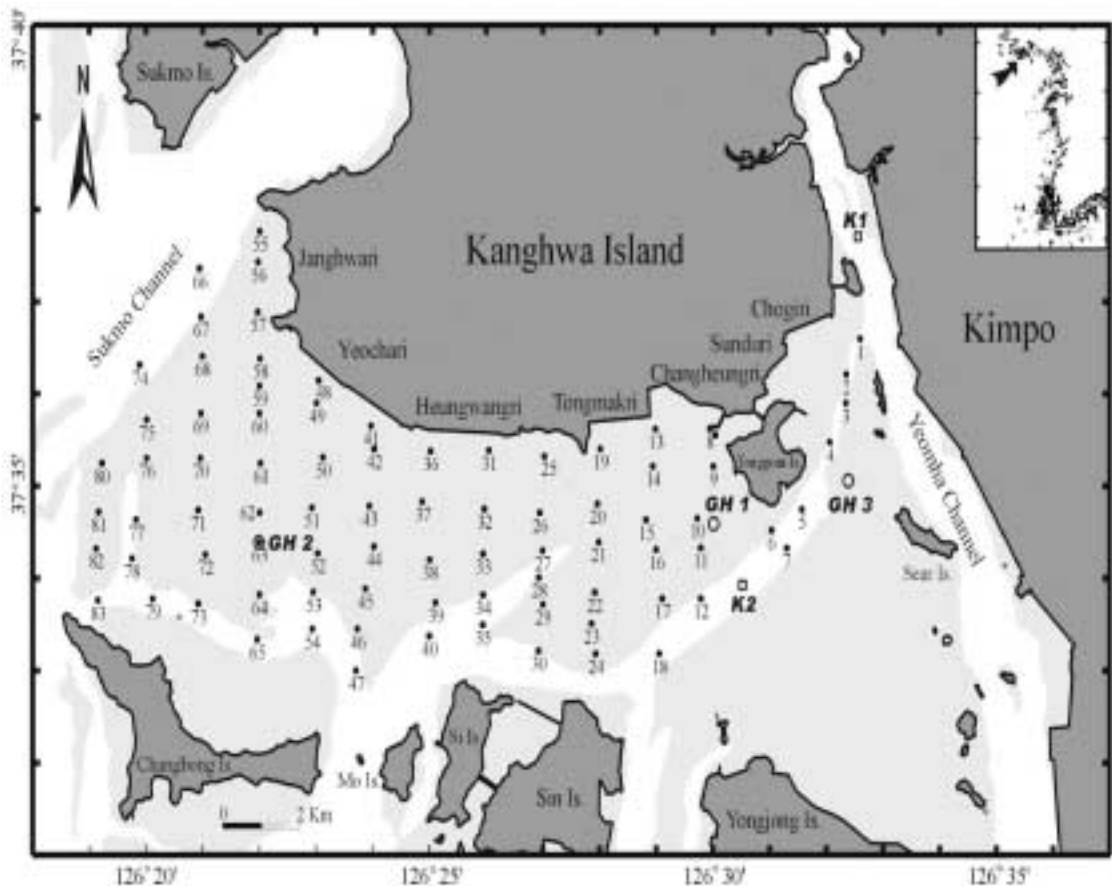


Fig. 2. Location map of Kanghwa tidal flat showing 83 surface sediment sampling stations, three core stations(GH1, GH2 , GH3) and two anchor stations (K1, K2).

를 파악하기 위해, 2003년 6월에 Push core로 약 100cm 미만의 주상퇴적물 시료 3개를 채취하였다 (Fig. 2). 주상퇴적물시료는 직경 7.5cm의 PVC 파이프에 채취하였다. 채취된 주상시료의 교란을 방지하고 운반을 위해 양 끝단을 스티로폼과 고무마개로 막은 후 절연 테이프로 완전히 밀봉하여 보관·운반하였다.

실험실로 운반된 주상퇴적물 시료는 교란되지 않도록 보관하였으며, 시료 분석을 위하여 전기톱을 사용하여 수직방향으로 절개한 후 퇴적물의 색상, 생흔 및 퇴적구조, 입도 변화 등을 기재한 후, 분석 자료와 비교하기 위하여 사진 촬영하였다. 한쪽 면에서 아크릴 상자 (1x4x30cm)에 원상태의 시료를 채취하여 슬랩을 제작하였고, 반대 면에서는 입도, 함수율 등의 분석을 위한 시료를 깊이에 따라 채취하고 포장하여 보관하였다. 절개 시에는 PVC 파편이 퇴적물에 혼입되지 않도록 주의하였다. 퇴적물 슬랩은 육안으로 판독이 불가능한 퇴적구조를 파악하기 위해 X-선 촬영기(Softex M-1005)를 이용하여 촬영하였다. 촬영 시에는 퇴적물의 특성(퇴적물 입도와 함수율)에 따른 X-선 투과와 반사를 조절하도록 X-선 노출시간과 강도를 조절하여 40cm 거리에서 촬영하였다. 현상 인화된 X-선 사진은 주로 퇴적구조를 판독하고 육안자료와 입도분석 자료를 참조하여 퇴적작용을 분석하였다.

3.3 부유 퇴적물 유출입

염하수로와 동검도 남부 수로 2개 지점을 통해 유출입하는 부유퇴적물의 양과 조석의 특성을 관측하기 위해 각각 2003년 6월 대조기에 각각 1 조석주기(13 시간)동안 정선관측을 실시하였다(Fig. 2). 정선 관측지점은 수심 0.5m하 그리고 해저면 1m 상부, 그리고 그 중간 깊이의 수층에 대해, 음향 도플러 유속계의 일종인 RCM 9(Anderaa Co.)을 이용하여 유속, 유향, 수온, 염분, 탁도를 30분 간격으로, 부유퇴적물 농도는 1시간 간격으로 측정하였다. 관측은 측심기(Raytheon, DE719D-MK2)를 사용하여 정확한 수심을 확인한 후 실시하였다. 부유퇴적물의 농도를 실측하기 위하여 수

층에서 채수펌프(Jacob Co., Model Mini 200)를 이용하여 3개 수층에서 1ℓ 씩의 해수를 채수하여 부유퇴적물을 여과하였다. 부유물질 농도는 상층, 중층, 저층의 3개 수층에서 1시간 간격으로 관측하였다. 부유퇴적물이 여과된 여과지를 실험실에서 60℃로 하루 동안 건조시킨 후 무게를 측정하여 여과지의 무게를 제하여 부유퇴적물의 양으로 환산하였다.

정선관측 정점에서 전 수층에서 측정된 유속, 유향, 수심 그리고 부유퇴적물 농도값을 이용하여 만 입구에서의 세립질 부유퇴적물의 유·출입율은 다음과 같은 식에 의해 계산하였다(Gao 등, 1990).

$$f_s = (1/T) \int_T CV \sin \alpha dt$$

$$= (1/25) [\sum_{i=1}^{25} C_i V_i \sin \alpha_i + (1/2) (C_1 V_1 \sin \alpha_1 + C_{26} V_{26} \sin \alpha_{26})]$$

여기서, f_s 는 각 층에서의 net sediment flux(kgm⁻²s⁻¹), C는 부유퇴적물 농도(kg m⁻³), V는 유속(ms⁻¹), T는 관측시간(time span: 12.5 시간동안 30분 간격으로 관측을 실시하여 대표 시간치는 25), 그리고 각각의 아래첨자는 시계열자료를 나타낸다.

1 조석주기 동안 순 부유 퇴적물 이동량(net suspended sediment transport: Q_s , 10³kg m⁻¹)은 다음 식에 의해 계산되었다.

$$Q_s = (Q_1^2 + Q_2^2)^{1/2}$$

여기서, Q_1 과 Q_2 는 Q_s 중에서 각각 동-서 방향과 남-북 방향의 성분을 말한다.

$$Q_1 = \int_T \int_H CV \sin \alpha dh dt$$

$$= [\sum_{i=1}^{25} H_i \langle C_i V_i \sin \alpha_i \rangle + (1/2) (H_1 \langle C_1 V_1 \sin \alpha_1 \rangle + H_{26} \langle C_{26} V_{26} \sin \alpha_{26} \rangle)] \times 12.5 \times 3600$$

$$Q_2 = \int_T \int_H CV \cos \alpha dh dt$$

$$= [\sum_{i=1}^{25} H_i \langle C_i V_i \cos \alpha_i \rangle + (1/2) (H_1 \langle C_1 V_1 \cos \alpha_1 \rangle + H_{26} \langle C_{26} V_{26} \cos \alpha_{26} \rangle)] \times 12.5 \times 3600$$

여기서, α 는 진복에 대한 유향, H는 수심, 그리고 $\langle \rangle$ 는 수심평균값을 의미한다. 즉, 수심평균은 다음과 같이 정의된다.

$$\langle C_i V_i \sin \alpha_i \rangle = (1/H_i) \left[\sum_{j=2}^{n+1} D_j (C_{i,j} V_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + C_{i,j+1} + V_{i,j+1} + \sin \alpha_{i,j+1}) + 0.5 \times C_{i,1} V_{i,1} \sin \alpha_{i,1} + 1.5 \times C_{i,n} V_{i,n} \sin \alpha_{i,n} \right]$$

그리고,

$$\langle C_i V_i \cos \alpha_i \rangle = (1/H_i) \left[\sum_{j=2}^{n+1} D_j (C_{i,j} V_{i,j} \cos \alpha_{i,j} + C_{i,j+1} + V_{i,j+1} + \cos \alpha_{i,j+1}) + 0.5 \times C_{i,1} V_{i,1} \cos \alpha_{i,1} + 1.5 \times C_{i,n} V_{i,n} \cos \alpha_{i,n} \right]$$

여기서 D_j 는 수직관측지점에 인접한 수층간의 수심차이며, n은 관측된 수층의 전체수이다. Q_s 의 최종적인 방향은 Q_1 과 Q_2 로부터 결정된다. Q_s 와 f_s 간의 상호관계는 다음과 같다.

$$Q_s \sin \theta = T \int_H f_s dh$$

위 식에서 θ 는 Q_s 방향과 관측정점들이 위치한 측선방향간의 각도이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 표층퇴적물

강화 남부 갯벌과 주변 조하대 퇴적물의 유형을 파악하기 위하여, 2003년 8월에 총 83개의 표층퇴적물을 채취하여 입도의 특성을 분석하였다. 표층퇴적물의 퇴적상은 모래 자갈(sandy gravel), 모래, 자갈 모래 및 자갈이 약간 함유된 모래(sand, gravelly sand, slightly gravelly sand), 자갈 펄모래, 자갈이 약간 함유된 펄모래, 펄모래 및 실트 모래(gravelly muddy sand, slightly gravelly muddy sand, muddy sand, silty sand), 모래 실트, 실트, 자갈 펄, 자갈이

약간 함유된 모래펄 및 모래펄(sandy silt, silt, gravelly mud, slightly gravelly sandy mud, sandy mud) 그리고 펄(mud) 등 5개의 퇴적상으로 구성되어 있었다(Fig. 3(d)). 전반적으로 강화도 남부에는 모래와 펄이 섞인 모래펄 퇴적물이 우세하였으며, 서부에는 모래 퇴적물이 우세하게 분포 하였다.

모래 자갈 퇴적상은 장봉도 북부 수로에 분포하였다. 모래, 자갈 모래 및 자갈이 약간 함유된 모래 퇴적상은 신도 북부 수로와 강화도와 장봉도 사이의 서부 갯벌에 분포하였다. 자갈 펄모래, 자갈이 약간 함유된 펄모래, 펄모래 및 실트 모래 퇴적상은 강화 남단 갯벌 서쪽에 부분적으로 분포하였다. 모래 실트, 실트, 자갈 펄, 자갈이 약간 함유된 모래펄 및 모래펄 퇴적상은 강화 남단 갯벌에 가장 넓은 범위로 분포 하고 있었다. 펄 퇴적상은 동검도 남부와 시도 서북부에 분포하였다.

강화도 남부 갯벌 표층퇴적물의 1997, 1999, 2000, 2003년 여름철 퇴적상을 비교하면(Fig. 3), 1997년에 비해서 1999년에 펄 퇴적상이 장봉도와 신도 사이까지 확장되었다. 2000년에는 펄 퇴적상이 해안선에 가까운 지역에서는 동막리까지 확장되었으나, 신도 북부 펄 갯벌은 모래펄 퇴적상으로 변화되었다. 2003년에는 동검도 남부에 일부만 펄 퇴적상이 분포함으로써 면적이 크게 감소하였다. 모래펄 퇴적상은 1999년에 여차리 연안 쪽으로 면적이 감소하며 감소된 지역이 펄모래 퇴적상으로 변화하였으나, 2000년에 선두리 갯벌 중앙부를 따라 수로쪽으로 확장되었다. 2003년에는 모래펄 퇴적상은 강화 남단 동부 갯벌까지 확장하여 강화 남단 갯벌에 가장 넓은 범위로 분포 하였다. 장봉도 북부의 퇴적상은 6년 동안 자갈과 모래의 성분이 유입되어 다양한 퇴적상으로 변화하였다. 전반적으로 6년 동안의 강화 남단 갯벌의 여름철 년변화는 모래펄 퇴적상이 크게 확장되는 경향을 보였다.

6년 동안 강화 남부 갯벌에 나타나는 퇴적물 분포 변화에 의하면, 장봉도 북부 갯벌에서 다양한 퇴적상이 나타나는 것으로 보아 이 지역은 강과 외해에서 유입된 펄과 모래가 다양한 수리적 요인에 의하여 지역에 따라서 서로 다른 퇴적작용이 활발히 이루어지는 것으로 보이

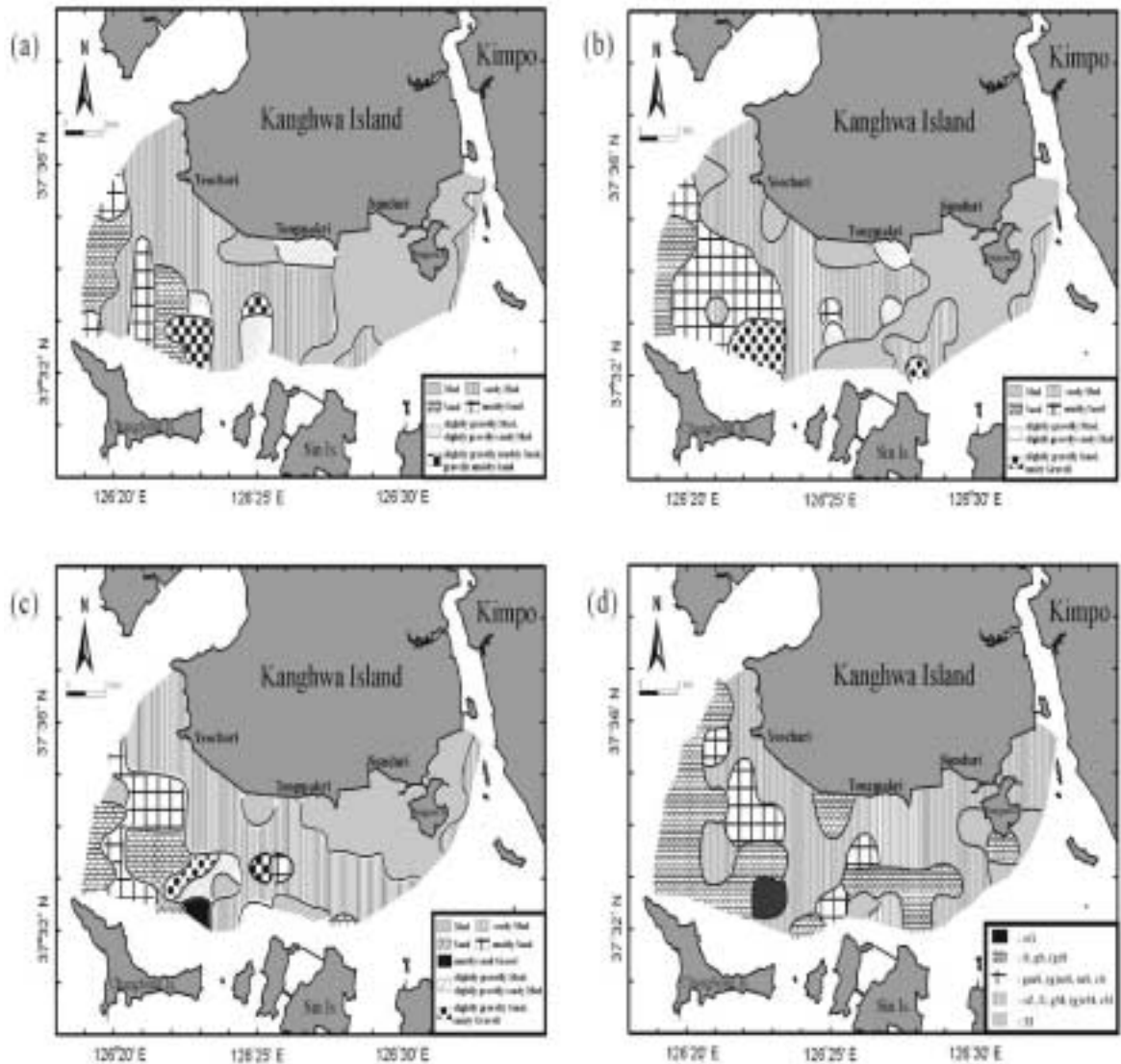


Fig. 3. Distribution of surface sediment facies on Kanghwa tidal flat in summer between 1997 and 2003.(a: 1997, b: 1999, c: 2000, d: 2003).

며, 강화 남단 갯벌 서부에 우세한 모래펄 퇴적물은 동부로 상당히 확장되어 강화 남단 갯벌의 대부분이 모래펄 퇴적상으로 변화되었다.

4.2 주상퇴적물

강화도 갯벌의 퇴적환경과 퇴적작용의 변화를 추적하기 위해 강화도 남단 갯벌에서 3점의 주상시료를 채취하였다(Fig. 2). GH-1 주상 퇴적물 시료는 동검도에서 남서쪽으로 약 2km 떨어진 지점의 갯벌에서 채취하

였다. 시료의 길이는 103cm이며, 절개면의 색깔은 연한 녹색을 띤 회색이다. 퇴적물의 구성은 실트가 약 68-75%로 대부분을 차지하며, 점토는 20-25%, 모래는 4-8%의 구성비를 보인다(Fig. 4). 평균입도와 분급도는 각각 6.5ϕ , 2.2ϕ 내외로 큰 변화가 없다. 함수율은 대체로 30-35% 범위의 값을 가진다. X-선 사진 관찰 결과, 시료의 대부분에서 저서 생물에 의한 교란 구조가 나타나며, 일부 구간에서 생물 교란 작용을 받은 실트-점토 호층 엷리 구조가 관찰된다(Fig. 5).

GH-2 주상 퇴적물 시료는 여차리 해안에서 남쪽으

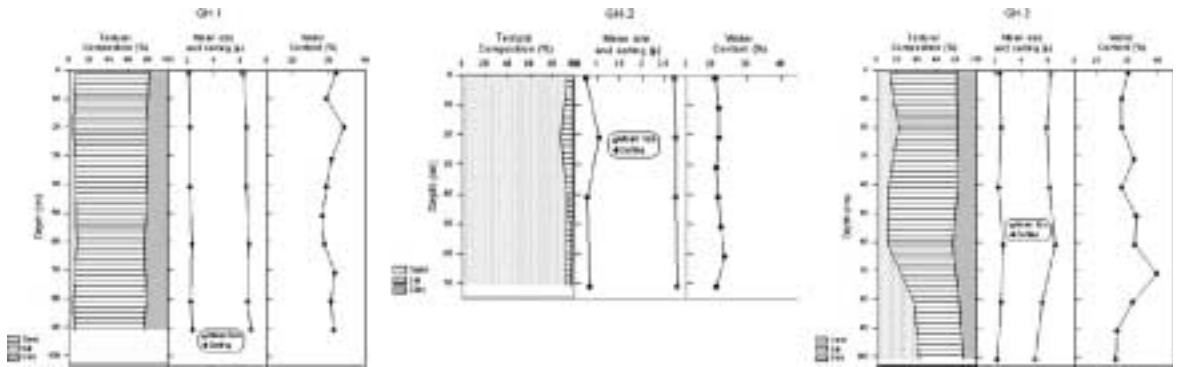


Fig. 4. Textural composition, mean size and sorting, and water content of core sediments.

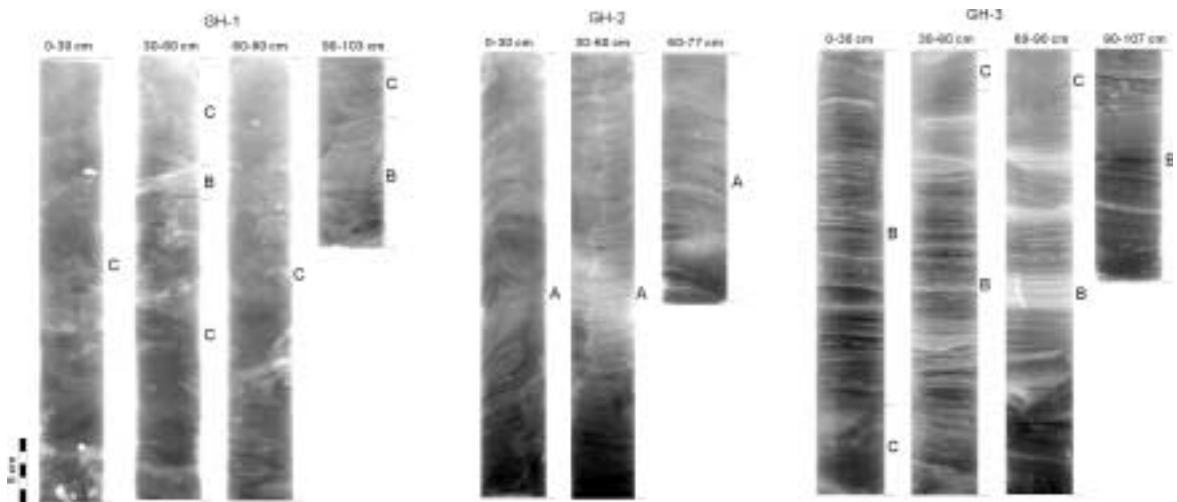


Fig. 5. X-radiographs of core sediments. Symbols on the right side of columns indicate sedimentary facies (see text for explanation).

로 약 4km 떨어진 지점의 갯벌에서 채취하였다. 시료의 길이는 77cm이며, 절개면에서는 모래층이 주를 이루며, 연녹색의 니질 층이 협재하는 것이 관찰된다. 퇴적물의 구성은 모래가 약 87-93%로 대부분을 차지하며, 소량의 실트(4-10%)와 점토(2-3%)를 함유한다 (Fig. 4). 평균입도는 2.7-2.8 ϕ 이며, 분급도는 0.8-1.0 ϕ 로 양호하다. 함수율은 대체로 22% 내외의 값을 가진다. X-선 사진 관찰 결과, 시료의 전 구간에서 사교하는 모래 층리가 관찰된다(Fig. 5).

GH-3 주상 퇴적물 시료는 동검도 동측 조수로 인근에서 채취하였다. 시료의 길이는 107cm이며, 절개면의 색깔은 녹회색을 띤다. 퇴적물의 구성은 실트가 약 44-70%로 주를 이루며, 점토는 14-20%, 모래는 10-43% 범위에서 변화하며, 특히 최하부 20cm 구간에서 모래 함량의 증

가가 뚜렷하다(Fig. 4). 평균입도는 5.0-6.5 ϕ , 분급도는 2.1-2.4 ϕ 의 값을 가진다. 함수율은 대개 25-40% 사이에서 변화한다. X-선 사진 관찰 결과, 시료의 대부분에서 실트-점토 호층 엷리 구조가 관찰되며, 일부 구간에서 저서 생물에 의한 교란 구조가 나타난다(Fig. 5).

이들 주상시료는 X-선 사진상의 퇴적구조와 입도 조성을 기준으로 크게 세 개의 퇴적상으로 구분된다 (Figs. 4 and 5). 퇴적상 A는 서로 교차하는 사층리가 발달된, 분급이 양호한 모래층으로 이루어져 있다 (Figs. 4 and 5). 이 퇴적상은 소규모의 모래 저면구조 (bed forms)의 이동에 의해 형성된 것으로 해석되며, 세립질 퇴적물이 거의 퇴적되지 않는 지속적으로 강한 유속에 노출된 환경에서 형성된 것으로 여겨진다. 퇴적상 A는 GH-2 주상 시료에서만 나타나며, 시료 전체를

이루고 있다(Fig. 5).

퇴적상 B는 실트-점토 호층 엽리 구조가 발달된 실트 층으로 이루어져 있다(Figs. 4 and 5). 이 퇴적상은 일상적인 갯벌 환경에서 창조, 낙조시 퇴적되는 실트 엽리와 정조시에 퇴적되는 점토 엽리가 교호하여 형성된 것으로 해석되며, 전형적인 펄 갯벌 퇴적상을 대표한다. 퇴적상 B는 흔히 생물교란된 실트층(퇴적상 C)과 교호하여 나타나며, 저서 생물의 교란에 의해 부분적으로 구조가 파괴된 양상을 보인다(Fig. 5). 반면, 비교적 두꺼운 층후를 가지는 퇴적상 B는 상대적으로 빠른 퇴적률로 인해 실트-점토 호층 엽리 구조가 저서 생물에 의해 교란되지 않고 보존되어 형성된 것으로 여겨진다.

퇴적상 C는 다양한 생물 교란 흔적을 나타내는 실트 층으로 이루어져 있으며, 전체 주상 퇴적물 중에서 가장 흔하게 산출된다(Figs. 4 and 5). 이 퇴적상은 비교적 퇴적률이 낮고 지속적으로 저서 생물에 의한 교란 작용에 노출된 갯벌에서 형성된 것으로 여겨진다.

주상 시료별 퇴적상의 분포를 보면, 동검도 동측 조수로 인근에서 취득된 GH-3은 전체 시료가 대부분 퇴적상 B로 이루어져 있어 최근 급격한 퇴적 작용이 일어나고 있음을 의미하고 있다(Fig. 5). 반면 연안 쪽에 가

까운 GH-1시료는 주로 퇴적상 C로 이루어져 있어, 이 지역은 상대적으로 퇴적률이 낮은 것으로 추정된다(Fig. 5). 외해 쪽의 GH-2는 전체가 퇴적상 A로 이루어져 있어, 이 지역은 파랑 등의 지속적인 재동 작용에 의해 주로 모래 퇴적물만 퇴적되고 있는 것으로 여겨진다(Fig. 5).

4.3 부유퇴적물 유출입

정선관측은 염하수로의 초지대교 부근(정점 K1)에서 2003년 6월 16일 07:15~19:45까지, 동검도 남부 수로(정점 K2)에서 2003년 6월 17일 08:10~20:40까지 각각 12시간 30분 동안 실시하였다(Fig. 2). 염하수로(K1)의 6월 16일 조차는 최대 810cm로 대조기에 속하였다. 관측기간 중 밀물 유속은 2.05~126.12cm/s 범위이며, 밀물 시작부터 표층에서부터 강해져 약 4시간 후에는 126.12cm/s로 최강유속을 보이지만, 이후 점차 약해져 3시간 후에는 최저 유속을 보였다(Fig. 6). 썰물에는 3.81~155.45cm/s 범위로, 썰물 시작 후 약 2시간 후에 표층에서 155.45cm/s의 최강유속을 보였다. 염하수로의 유속분포는 일반적으로 표층과 중층보다 저

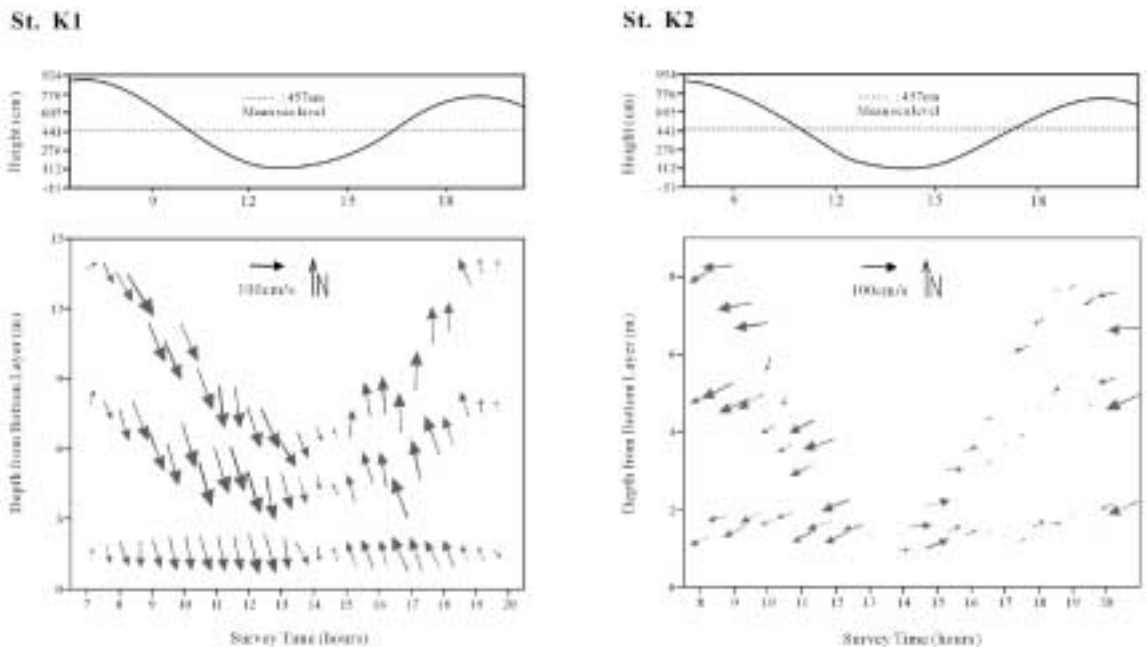


Fig. 6. Tidal current speeds and directions for one tidal cycle at station K1 and K2.

층에서 유속이 상대적으로 약하게 나타나며, 썰물시 유속이 상대적으로 강한 경향을 보였다. 유향은 밀물시 북북서(NNW) 방향이 우세하며, 썰물시에는 남남동(SSE) 방향이 우세하였다(Fig. 6). 유향 자료에 의하면, 염하수로의 조류는 밀물시 외해로부터 염하수로를 따라 한강으로 해수가 유입되며 썰물시 이와 반대로 한강에서 염하수로를 통하여 강화 남부로 유출되는 것으로 나타났다.

부유퇴적물의 양은 1 조석주기 동안 19.00~361.20mg/l 이며, 썰물시 상대적으로 높은 양이 측정되었다. 특히 썰물후기에 모든 수층에서 300mg/l 이상의 높은 값이 측정되었다. 따라서 염하수로의 부유퇴적물은 주로 썰물 후반기에 한강에서 염하수로를 통하여 강화 남부로 유출되는 것으로 나타났다.

동검도 남부 수로(K2)의 6월 17일 조차는 최대 740cm로 대조기에 속하였다. 관측기간 중 밀물 유속은 0.59~76.55cm/s 범위이며, 밀물 시작부터 표층에서부터 강해져 약 2시간 후에는 76.55cm/s로 최강유속을 보이지만, 이후 점차 약해져 2시간 후에는 최저 유속을 보였다(Fig. 6). 썰물에는 7.92~105.29cm/s 범위로, 썰물 시작 후 약 1시간 후에 중층에서 105.29cm/s의 최강유속을 보였다. 동검도 남부 수로의 유속분포는

일반적으로 표층에서 유속이 상대적으로 강하게 나타나며, 썰물시 유속이 상대적으로 강한 경향을 보였다. 유향은 밀물시 동동북(EEN) 방향이 우세하며, 썰물시에는 서서남(WWS) 방향이 우세하였다(Fig. 6). 유향 자료에 의하면, 동검도 남부 수로의 조류는 밀물시 외해로부터 염하수로 방향으로 해수가 유입되며 썰물시 이와 반대로 염하수로에서 남서 방향의 수로를 통하여 신도쪽으로 유출되는 것으로 나타났다.

부유퇴적물의 양은 1 조석주기 동안 16.8~667.2mg/l 이며, 조석과 수층과는 관계없이 불규칙하게 나타났다. 일반적으로 썰물시 저층에서 높은 부유물질 농도가 측정되었다. 동검도 남부 수로는 수심이 얇아 조석 변화에 민감하고 수로 주변 갯벌에서 재부유된 부유물질 때문에 규칙적인 경향을 보이지 않지만 썰물시 염하수로에서 이동된 부유물질이 이 수로를 통하여 신도쪽으로 유출되는 것으로 보인다.

부유세립질 퇴적물의 이동량은 부유퇴적물 농도가 조석에 따라 크게 변화하더라도 조석의 영향이 제거된 잔여유속 (residual flow)분포에 의해 좌우된다(Nichols, 1977). 각 수층에서 계산된 잔여유속은 육지쪽으로 향하는 양(+)의 방향과 외해 쪽으로 향하는 음(-)의 방향으로 표시하였다(Table 1). 염하수로 (정점

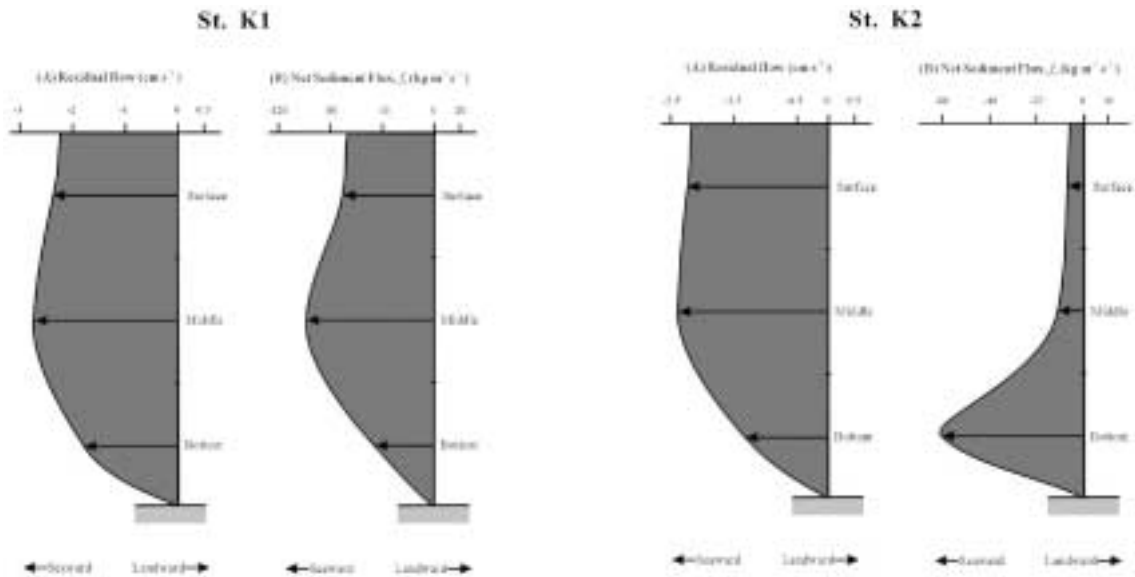


Fig. 7. Calculated residual flow (A) and net sediment flux (B) throughout water column for one tidal cycle at station K1 and K2.

Table 1. Summary of residual flow, net sediment flux and net suspended sediment transport load for one tidal cycle at station K1 and K2.

Station	Layer	Rf*	fs*	Net sediment transport	
		(cm s ⁻¹)	(×10 ⁻³ kg m ⁻² s ⁻¹)	Qs*(kg m ⁻¹)	Dir.(deg.)
K1	Surface	-23.8	-69.7	309,217.9	167
	Middle	-27.2	-98.1		
	Bottom	-17.8	-44.5		
Station	Layer	Rf*	fs*	Net sediment transport	
		(cm s ⁻¹)	(×10 ⁻³ kg m ⁻² s ⁻¹)	Qs*(kg m ⁻¹)	Dir.(deg.)
K2	Surface	-22.4	-7.0	128,123.1	250
	Middle	-23.8	-10.5		
	Bottom	-13.2	-60.4		

* R_f denotes residual flow, f_s net suspended sediment flux and Q_s net suspended sediment transport load. Negative value indicates seaward movement.

K1)에서 계산된 잔여유속은 상층 -23.8cm/s, 중층 -27.2cm/s, 저층 -17.8cm/s 이며, 순 부유퇴적물 이동량은 309,217.9kg/m가 남남동 방향(167°)인 강화 남부와 인천 쪽으로 유출되고 있는 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 7). 또한 부유퇴적물의 순유출입양(net suspended sediment flux)은 염하수로에서 상층 -69.74gm⁻²s⁻¹, 중층 -98.10gm⁻²s⁻¹, 저층 -44.54gm⁻²s⁻¹로 계산되어 주로 표층과 중층을 통해서 외해로 유출되고 있는 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 7).

동검도 남부 수로(정점 K2)에서는 잔여유속이 상층 -22.4cm/s, 중층 -23.8cm/s, 저층 -13.2cm/s 이며, 순 부유퇴적물 이동량은 128,123.1kg/m가 서서남 방향(250°)인 신도 쪽으로 유출되고 있는 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 7). 부유퇴적물의 순유출입양(net suspended sediment flux)은 동검도 남부 수로에서 상층 -6.99gm⁻²s⁻¹, 중층 -10.50gm⁻²s⁻¹, 저층 -60.37gm⁻²s⁻¹로 계산되어 주로 저층을 통해서 외해로 유출되고 있는 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 7).

5. 결론

2003년 8월에 채취하여 분석된 강화 남부 갯벌 퇴적물은 5개의 퇴적상으로 구성되어 있었다. 전반적으로 강화 남부 갯벌은 모래 펄 퇴적물이 우세하게 분포하였다. 1997년 이후 여름철 퇴적상은 6년간에 걸쳐 변화가

뚜렷히 일어나 갯벌 동부에 우세한 펄 퇴적물이 현저히 감소하였으며, 갯벌 동부의 모래 펄 퇴적물이 서부로 확장하여 강화 남부 갯벌이 전반적으로 모래 펄 퇴적물로 변화되었다.

강화 남부 갯벌의 3개 주상시료에 대한 퇴적상 분석 결과, 사층리 모래층, 실트-점토 호층 얽리 실트층, 생물교란 실트층 등 크게 세 개의 퇴적상이 인지되었다. 주상시료에서 나타나는 이들 퇴적상의 분포로부터, 강화도 남부 갯벌의 서측 외해쪽은 파랑의 영향을 지속적으로 받는 모래 퇴적 환경으로, 동검도 서측 연안의 갯벌은 비교적 퇴적률이 낮은 가운데 생물교란 작용이 우세한 실트 퇴적 환경으로, 동검도 서측 조수로 지역은 퇴적률이 매우 높은 실트 퇴적 환경으로 해석되었다.

정선관측에 의하여 나타난 강화 남단 동부인 염하수로와 동검도 남부 수로의 일반 해양학적 특성은, 유속은 썰물시 밀물보다 강하게 나타났으며 썰물시 한강에서 많은 세립한 부유물질이 염하수로를 통하여 유출되는 것으로 나타났다. 각 수층의 부유물질 함량에 의하여 계산된 순 부유 퇴적물 이동량은 염하수로에서 한 조석 주기 동안 남남동 방향으로 309,217.9kg/m가 유출되는 것으로 나타났으며, 동검도 남부 수로에서는 한 조석 주기 동안 서서남 방향으로 128,123.1kg/m가 유출되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 한강에서 유입된 많은 부유 퇴적물이 강화 남단 동부 갯벌에 퇴적되고 있는 것을 나타낸다.

사사

본 연구는 해양수산부의 “갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용방안 연구(PM 22100)”와 한국해양연구원의 기관고유사업인 “연안역 통합관리를 위한 해양환경 변화 특성 규명(PE 87100)” 연구의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구를 위하여 현장조사와 실내분석에 도움을 주신 권수재, 장석남께 감사드립니다. 본 논문을 심사하여 주시고 좋은 의견을 주신 부경대학교 김석운 교수님과 목포대학교 장진호 교수님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

국립해양조사원, 1998년 조석표, 서지 제510호, 1998.
농어촌진흥공사, 한국의 간척, pp. 405, 1995.
수로국, 영종도에서 용매도 해도, No. 311, 1981.
우한준, 제종길, 강화 남부 갯벌의 퇴적환경 변화, Ocean and Polar Research, Vol. 24, pp. 331-343, 2002.
장진호, 한국서해안 곶소만 조간대의 퇴적작용, 서울대학교 박사학위논문, pp. 192, 1995.
최광원, 어대수, 문중양, 간척사업과 지형진화 (I), 강화도, Journal of Agricultural Engineering, Vol. 58, pp. 3-14, 1998.
한국해양연구원, 강화도 어업피해 및 경인지역 공동보상관계 보상금 분담 조사용역(1차 중간보고서), pp. 554, 2001.
Folk, R.L. and Ward, W., Brazos River bar: A

study in the significance of grain size parameters, Journal of Sedimentary Petroleum, Vol. 27, pp. 3-26, 1957.

Gao, S., Xie, Q.C. and Feng, Y.J., Fine-grained sediment transport and sorting by tidal exchange in Xiangshan Bay, Zhejiang, China, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 31, pp. 397-409, 1990.

Kim, Y.H., Holocene transgressive stratigraphy of macrotidal flat in the southeastern Yellow Sea: Gomso Bay, Korea, 서울대학교 석사학위논문, pp. 101, 1997.

Kim, Y.H., Lee, H.J., Chough, S.K., Chun, S.S., and Han, S.J., Holocene transgressive stratigraphy of macrotidal flat in the southeastern Yellow Sea: Gomso Bay, Korea, Journal of Sedimentary Research, Vol. 69, pp. 328-337, 1999.

Lee, H.J., Chu, Y.S., and Park Y.A., Sedimentary processes of fine-grained material and the effect of seawall construction in the Daeho macrotidal flat-nearshore area, northern west coast of Korea, Marine Geology, Vol. 157, pp. 171-184, 1999.

Nichols, M.M., Response and recovery of an estuary following a river flood. Journal of Sedimentary Petroleum, Vol. 47, pp. 1171-1186, 1977.