

한국 서해안 강화 남부 갯벌 퇴적물 및 지형의 장기적인 변화

우한준⁺

한국해양과학기술원 관할해역지질연구단

Long-term Changes of Sediment and Topography at the Southern Kanghwa Tidal Flat, West Coast of Korea

Han Jun Woo⁺

Korean Seas Geosystem Research Unit, Korea Institute of Ocean Science and Technology

요 약

강화 남부 갯벌의 장기적인 퇴적환경 변화를 파악하기 위하여 1997년과 2011년 여름철 표층 퇴적물의 분포와 1998년 4월과 2013년 3월의 갯벌 고도를 비교하였다. 표층퇴적물은 1997년에 동부의 펄, 서부의 모래 펄 퇴적물이 우세하였으나, 2011년에는 동부의 선두리와 동검도 갯벌은 펄과 모래 펄, 중부의 동막리 갯벌은 모래 펄, 그리고 서부의 여차리와 장화리 갯벌은 모래와 펄 모래 퇴적물이 우세하게 분포하였다. 지난 14년 동안 펄 퇴적물 면적은 감소하였으나, 모래와 펄 혼합 퇴적물의 면적은 동쪽으로 확장되었다. 갯벌의 장기적인 지형 변화는 지난 15년 동안 동막리와 여차리 갯벌은 퇴적, 장화리 갯벌은 침식된 것으로 나타났다. 이러한 변화들은 1990년대 이후 강화 남부 갯벌 주변에 여러 종류의 인공구조물 건설에 의하여 지역적인 수리적 변화가 영향을 주었을 것이다.

핵심용어 : 강화 갯벌, 표층퇴적물, 지형, 장기적 변화, 수리적 변화

Abstract

Comparisons of surface sediment distributions in summer 1997 and 2011 and elevations on the tidal flats in April 1998 and March 2013 had been used for understanding the long-term changes of sedimentary environments at southern Kanghwa tidal flat, west coast of Korea. The mud sediments dominated in the eastern part and sandy mud sediments dominated in the western part of the tidal flat in 1997. In 2011, the surface sediments were dominant mud and sandy mud at Sunduri and Tonggum in the eastern part, sandy mud at Tongmakri in the middle part, and sand and muddy sand at Yeochari and Changhwari tidal flats in the western part. The area of mud sediments had decreased, but that of sand-mud mixed sediments extended to eastward tidal flat for 14 years. The long-term topographic changes showed that deposition occurred at Tongmakri and Yeochari and erosion occurred at Changhwari tidal flat during 15 years. These changes should be effected the local hydrodynamic changes by several constructions near the tidal flat since the 1990s.

Keywords : Kanghwa tidal flat, Surface sediment, Topography, Long-term changes, Hydrodynamic change

1. 서론

담수와 염수가 혼합되는 전이지역인 하구는 많은 영양염의 유입으로 세계에서 가장 생산성이 높은 생태계로 다양한 동식물이 서식하고 있으며, 하구 주변에 세계 인구의 약 60%가 생활하고 있다(Costanza et al., 1997). 하구는 많은 생물들의 산란지와 서식지, 육지에서 유입되는 오염물질의 정화지, 자연재해의 완충지, 수산물 생산지, 해상 운송지 그리고 아름다운 경관지 등 다양한 가치를 가지고 있다(Barbier et al., 2011). 하구 주변에는 강, 조석 그리고 해류의 크기에 따라 다양한 규모의 염습지, 갯벌 그리고 삼각주가 발달되어 있다.

강에서 유입된 퇴적물이 해류와 조류에 의하여 운반되어 형성되는 하구 갯벌은 하구를 따라 육지쪽으로 길게 형성되고 연안과 만나는 지역에서 퇴적물의 공급량에 따라 다양한 범위로 형성되어 다양한 동식물의 자연적인 서식처 역할을 하고 있다.

그러나 하구는 다양한 생태적 및 사회경제적 가치에도 불구하고 인간활동의 편리성을 위하여 세계적으로 다양한 개발 압력을 받고 있는 지역이다. 우리나라의 대표적인 하구인 한강, 금강, 영산강, 섬진강 그리고 낙동강 하구는 1970년도 이후 간척, 매립, 하구둑 건설 등 다양한 개발에 의하여 크게 파괴되어 하구순환의 제한, 하구 갯벌의 파괴, 생물 다양성 감소 및 수질 악화 등의

⁺ Corresponding author : hjwoo@kiost.ac

환경적 문제가 되고 있다. 공유수면 매립계획은 하구 갯벌의 훼손을 가중 시키고 있으며, 제2차 공유수면매립과 연안개발이 끝나는 2011년에는 2002년에 비하여 하구 갯벌의 약 30%가 추가적으로 훼손되는 것으로 나타났다 (Noh et al., 2006). 특히 하구 갯벌 주변의 인공구조물 건설은 해류와 조류의 변화를 야기하여 퇴적물의 형태 변화와 자연적이지 못한 침식/퇴적 등을 야기하는 원인이 된다. 이러한 퇴적물의 형태와 지형 변화는 생물 서식지에 영향을 미쳐 생물 다양성의 감소로 이어져 생태계에 악 영향을 미치게 된다.

강화도 남단 갯벌은 한강, 임진강, 예성강들로부터 유입된 퇴적물에 의하여 형성된 하구형 갯벌로서 모래, 펄 그리고 혼합 갯벌이 나타나며 해안과 동검도 부근에서 갈대, 천일사초 그리고 칠면초 군락이 나타난다. 이 지역은 연안개발이 비교적 제한되었던 시기에는 생물 다양성이 높고, 철새 도래지로 대규모 하구역 자연 갯벌로서 존재하였으나, 수도권에서 가깝고 인근에 도시 건설들로 인하여 1980년대 이후 대규모 개발 사업과 매립 등이 이루어 졌다. 갯벌의 상당수 해안선은 인공 해안선으로 변화되었으며, 황산도와 김포 지역의 매립, 인천 신공항 건설, 초지대교와 영종대교 건설 등으로 하구 순환, 조류와 해류의 변화 등 수리에너지가 상당히 변화 되었다. 특히 인천국제공항 건설 기간인 1992년부터 2001년 사이에는 영종도와 용유도 사이 간석지 매립, 영종대교와 공항 고속도로 건설 등으로 유속과 조위 변화 그리고 외해와 하구와의 순환 변화 등으로 지형(퇴적/침식)과 퇴적상이 상당히 변화 되었다(Woo and Je, 2002; Woo et al., 2004; Lee et al., 2011). 강화도 남단 갯벌의 지형 및 퇴적물 변화는 저서생물의 서식에 영향을 미쳐 종 다양성의 감소와 수산물 생산의 감소를 가져왔다(KORDI, 2007). 한강 하구역인 강화도 남단 지역은 현재에도 개발 압력에 노출되어 있어 조력 발전소 건설을 위한 논란이 있는 지역이다. 이 연구의 목적은 생태계에 중요한 요소인 강화도 남단 갯벌 퇴적물 및 지형의 장기적인 변화를 파악하고자 한다. 퇴적환경의 장기 변화 파악을 위하여 2011년 강화도 남단 갯벌의 퇴적물과 인천국제공항 건설 시기인 1997년 퇴적물의 특성과 퇴적물 이동 양상을 비교하고자 한다. 지형 변화 파악을 위하여 1998년에 설정된 동막리, 여차리, 장화리 측선들의 고도와 2013년에 이들 측선들에서 측량된 고도를 비교하였다.

2. 연구 지역

강화도는 서해안 중부에 위치하며, 주변 전체 갯벌의 면적은 북부 청주사초를 포함하여 약 105km²에 달하며, 여차리-동막리-동검리를 잇는 남부지역의 갯벌(Fig. 1)의 면적은 약 90km²로 강화도 전체 갯

벌 면적의 약 86 %를 차지한다(KHOA, 1981). 강화도 남부 갯벌은 한강, 임진강, 예성강들로부터 강화도 동부의 300-1,500m 폭의 비교적 좁은 염하수로와 서부의 약 1,200-3,800m 폭의 석모수로를 통하여 유입되는 퇴적물에 의하여 형성된 하구 갯벌이다. 조석은 전형적인 반일주조로 평균조차는 5.72m 이며, 대조차는 7.98m 이다. 조류는 장봉수로 등 남부에서는 창조류가 우세하나, 한강수 유출의 영향을 받는 염하수로와 석모수로에서는 전반적으로 낙조류가 우세하게 나타난다(KHOA, 1981). 강화도 주변에는 석모도, 영종도, 불음도, 장봉도, 세어도 등 수많은 유무인도가 있으며, 예성강과 석모수호가 만나는 지점에는 역 델타형의 삼각주인 청주사초가 발달하고 있다.

염하수로와 석모수로는 한강으로부터 유출되는 담수와 조석에 따른 해수의 혼합으로 연직 염분 경사가 뚜렷한 완전혼합형 하구의 특성을 보여 주변에는 다양한 퇴적 환경들이 발달되어 있다. 강화도 남부 갯벌에는 모래, 펄, 혼합갯벌 등 다양한 종류의 갯벌이 존재하며, 이러한 갯벌들은 생물들에게 다양한 서식지를 제공하였다. 그러나 이 지역은 1990년대 이후 수도권 개발에 따른 한강종합개발, 김포와 황산도 매립, 인천 신공항 건설, 교량과 공항 고속도로 건설 등 인위적인 개발로 인하여 해수 순환과 조류와 해류 변화에 따라 퇴적상 및 생물상의 지속적인 변화가 있었다(Lee et al., 2011).

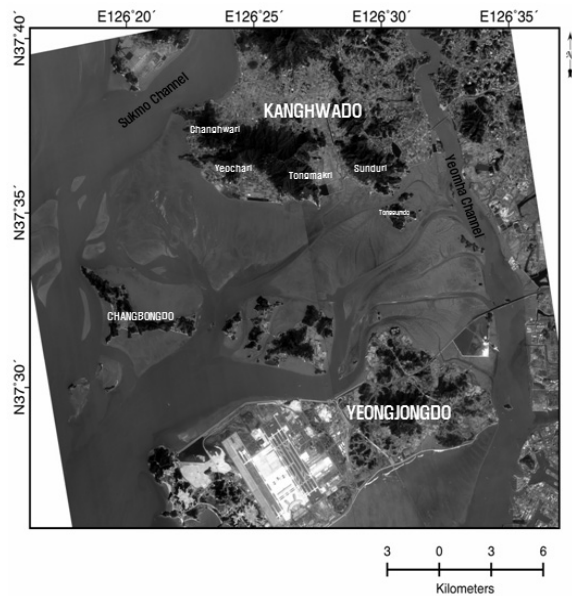


Fig. 1. The Landsat ETM+ image of the southern Kanghwa tidal flat

3. 연구 방법

강화도 남부 갯벌의 표층 퇴적환경을 파악하기 위하

여 2011년 9월에 83 정점에서 표층퇴적물을 채취하였다 (Fig. 2). 표층퇴적물 시료는 5g 씩을 1000ml 비이커에 넣고 10% 과산화수소(H₂O₂)와 24시간동안 반응시켜 유기물을 완전히 제거시킨 후, 1N 염산(HCl)을 첨가하여 패각편과 같은 탄산염질 생물기원 물질을 완전히 제거하였다. 분석 준비된 시료는 4φ(0.0625mm)체로 습식 체질(wet sieving)에 의하여 체에 남은 4φ이하의 조립질과체를 통과한 4φ이상의 세립질 퇴적물로 분리하였다(Folk, 1968). 조립질 퇴적물은 오븐에서 건조 후 0.5φ간격의 체가 단계별로 장착된 자동 Ro-tap sieve shaker에 넣어 15분간씩 체질하여 입도별로 무게를 구하였다. 세립질 퇴적물은 약 2g 씩을 50ml 비이커에 넣고 0.1% Calgon(분산제)을 첨가하여 초음파분쇄기와 자기 진동기로 균질하게 분산시킨 후 X-선 입도분석기인 Sedigraph 5000D (micromeritics)로 각 입도별 백분율을 구하여 입도를 분석하였다. 입도분석자료를 이용하여 갯벌분류의 기본이 되는 퇴적상과 평균입도, 분급도 등 통계변수들을 Folk and Ward (1968)의 방법에 따라 구하였다.

강화도 남부 갯벌 표층퇴적물의 순 이동경로를 알아보기 위하여 평균입도, 분급도, 왜도의 통계학적 변수를 이용하였다. 통계학적 자료는 inverse distance 방법에 의하여 0.3분 간격의 격자망에 대하여 각각의 자료를 구한 후, 이를 기본적으로 Gao and Collins (1992)의 방법을 응용하여 순퇴적물 이동경로를 추정하였다. 표층퇴적물이 A지점에서 B지점으로 이동되면서 나타날 수 있는 입도의 통계변수 특징은 여러 가지 존재할 수 있다. 하지만, 1960년대 이후 이에 대한 여러 연구자들의 결론에 의거하여 McLaren and Bowels (1985)는 다음과 같이 두 가지 경우의 수로 정리하였다.

$$\text{Case 1: } \sigma_B^2 < \sigma_A^2, \mu_B > \mu_A \text{ and } Sk_B < Sk_A$$

$$\text{Case 2: } \sigma_B^2 < \sigma_A^2, \mu_B > \mu_A \text{ and } Sk_B < Sk_A$$

여기서, 아래첨자 A와 B는 정점 지역을 나타낸다. 퇴적물의 순 이동방향을 추정하기 위해 인접하는 두 지역의 통계변수가 위 두 가지 경우에 해당될 때 A에서 B지점으로 이동된 것으로 추정하였다.

위에 요약된 두 가지 경우(Case 1, 2)가 퇴적물의 순 이동 방향을 나타내지만, 이 경우들이 퇴적물의 이동경로를 절대적으로 가리키는 것은 아니다. 따라서 이러한 잡음(noise)을 없애기 위하여 반정량적 필터링 기법(semi-quantitative technique)을 이용하여 실질적인 값들만을 추출해 내었다.

첫 번째 단계는 정점 격자점에 대해서 각각의 ‘이웃 지점(neighbouring)’들과 입도 통계변수들(평균값, 분급도, 왜도)의 비교를 통해서 ‘경향벡터(trend vector)’를 정의하

였다. 여기서 언급된 이웃지점을 정의하기 위하여 채취된 두 지점간의 최대거리를 고려하여 특정거리 “ D_{cr} (characteristic distance)”을 정한다. 그래서 만약 채취된 두지점간의 거리가 D_{cr} 보다 가까우면 이들은 이웃지점으로 간주되어 상호간의 입도 통계변수 값을 비교한다. 이 결과가 위에서 기술한 Case 1 또는 Case 2에 속하면 분급도가 불량한 쪽에서 양호한 쪽으로 퇴적물의 순 이동을 나타내는 경향벡터가 형성된다. 이때 입도의 평균값, 분급도, 왜도 모두가 조합 비교되어 결정적으로 이러한 경향을 나타내기 때문에 어느 한 변수 값에 의존하지 않고는 변수 자체들 만에 기본해서 벡터의 크기를 결정하기는 어렵다. 따라서 편의상 경향벡터의 크기는 단위값(unity)으로 정하였다.

각 비교 격자점에서 D_{cr} 의 크기에 따라 상호간의 통계변수 값을 비교하는 이웃지점들의 수가 변할 수 있으므로 결정되는 단위벡터 역시 하나 이상이 존재할 수 있다. 따라서 각 단위벡터의 합을 실시하여 하나의 대표 벡터를 만든다.

$$\vec{R}(x,y) = \sum_1^n \vec{r}(x,y) \quad (\text{식 1})$$

여기서, n은 일정 격자점에서 결정된 경향벡터의 수이며, $\vec{r}(x,y)$ 는 각각의 경향벡터이고 $\vec{R}(x,y)$ 는 경향벡터의 합이다. 이 합에는 실제 이동경향과 앞서 기술한 잡음성분이 합쳐져 있는 상황이다.

각 격자점에서의 벡터의 합에 포함되어 있는 잡음성분을 제거하기 위하여 D_{cr} 내에 있는 대표벡터들에 대해 평균을 실시한다. 다양한 잡음성분들은 빈도수영역(domain frequency)에서 살펴볼 때 이들은 상당히 높은 빈도수의 파동형태로 존재한다. 따라서 이 성분들은 어느 특정 격자점에서의 대표벡터와 D_{cr} 내에 있는 이웃 격자점에서의 대표벡터들과 평균을 통해서 제거될 수 있다. 잡음성분을 제거하는 평균방법은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{R}_{av}(x,y) = \frac{1}{k+1} [\vec{R}(x,y) + \sum_1^k \vec{R}_j] \quad (\text{식 2})$$

여기서, \vec{R}_j 는 (식 1)에 의해 이웃 격자점들에서 계산된 경향벡터의 합이며, k는 이러한 이웃 격자점들의 전체 개수이다. (식 2)에 의해 계산된 $\vec{R}_{av}(x,y)$ 가 실제 “이동벡터(transport vector)”라 정의되며, 이는 잡음성분의 영향을 거의 받지 않는 잔류경향을 나타낸다. 이렇게 계산된 이동벡터의 정렬성은 신뢰도 검정 (significance test)을 통해 재확인하였다.

갯벌의 지형 변화는 동막리, 여차리와 강화리 갯벌에

대한 장기적인 변화를 파악하기 위하여 2013년 3월에 RTK-GPS를 사용하여 갯벌 지형을 측량하였다(Fig. 2). 각 측선들은 1998년에 설정된 갯벌의 위치에서 고도를 측량하여 각 측선 갯벌 단면도(평균해수면 기준)를 구하고, 1998년 4월에 광과거리 측정기(Wild T2 Universal Theodolite and Geodimeter 220)와 수준의 (Pentax Pal 2S Level)를 이용하여 수준측량에 의한 갯벌 단면도와 비교하였다.

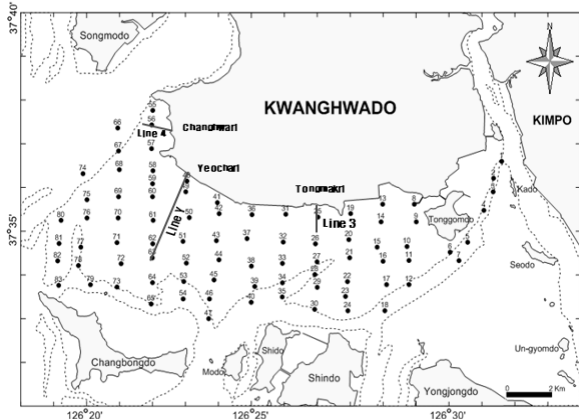


Fig. 2. Location map showing 83 surface sediment sampling stations at the southern Kanghwa tidal flat.

4. 연구 결과

강화도 남부 갯벌의 2011년 9월 표층퇴적물은 펄 (mud), 모래 펄(sandy mud), 모래(sand), 펄 모래(muddy sand), 자갈이 약간 함유된 펄 모래(slightly gravelly muddy sand) 그리고 펄 모래 자갈 또는 자갈 펄 모래 (muddy sandy gravelly muddy sand or gravelly muddy sand) 등 6개의 퇴적상으로 구성되어 있었다(Fig. 3a). 일반적으로 강화도 남부 갯벌은 모래 펄 퇴적상이 우세하고, 동쪽은 펄성분, 서쪽은 모래 성분이 우세하게 분포하고 있었다. 펄 퇴적상은 강화도 동부 염화수로 부근, 선두리의 해안선에서 조하대 방향 그리고 동막리 연안에 분포하고 있었다. 모래 펄 퇴적상은 동검도 주변과 동막리 갯벌에 넓게 분포하며, 여차리 해안선에 석모수로 방향으로 길게 분포하였다. 모래 퇴적상은 동검도 남동쪽 갯벌에 일부, 신도 북부의 조하대 부근 그리고 서부의 여차리 해안선과 동막리-여차리-장화리 갯벌의 모래 펄과 펄 모래 퇴적상 사이에 분포하며, 특히 여차리-장화리 갯벌 중간부터 조하대까지 상대적으로 넓게 분포하였다. 펄 모래 퇴적상은 동막리-여차리 갯벌의 모래와 자갈이 약간 함유된 펄 모래 퇴적상 사이에 분포하며, 여차리 갯벌의 중부에서 하부까지 연결되었다. 자갈이 약간 함유된 펄 모래 퇴적상은 동막리와 여차리 사이의

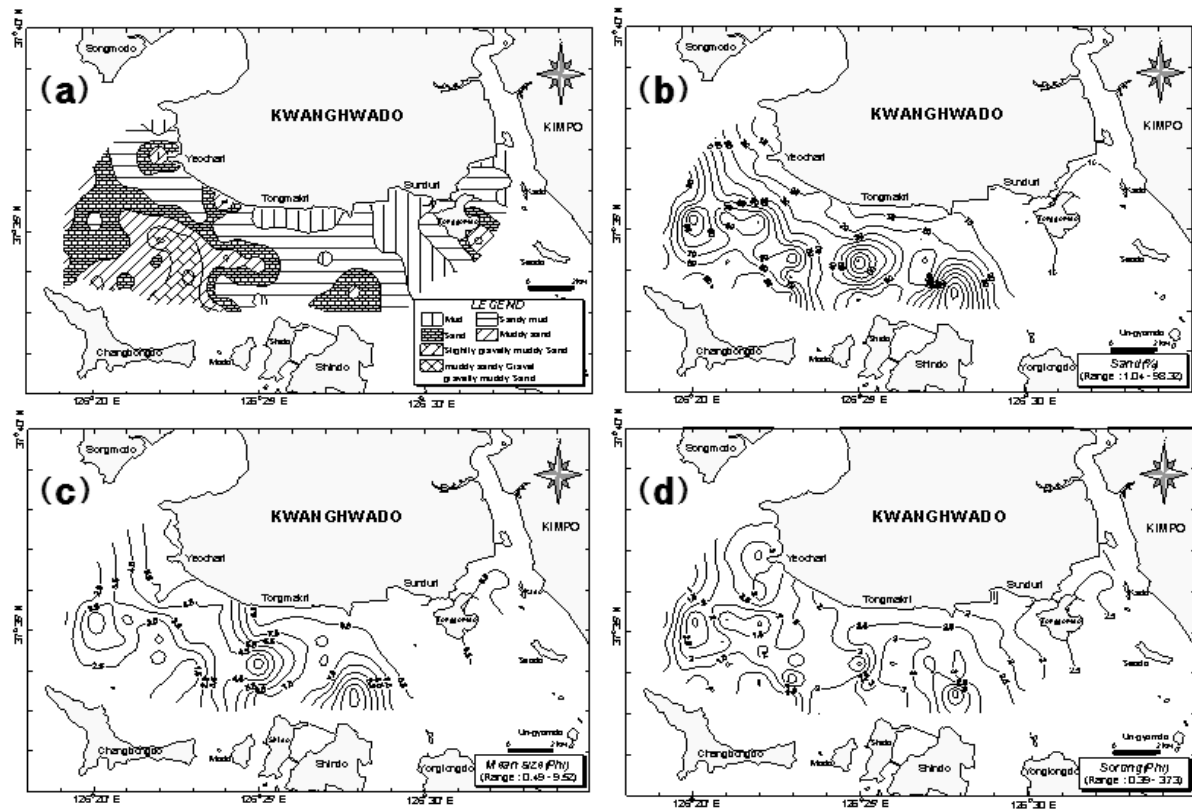


Fig. 3. Distribution of surface sediment characteristics on the southern Kanghwa tidal flat in September 2011. (a) surface sediment facies (b) percentage of sand (c) mean grain size (d) sorting.

갯벌 중부 지역에서 장봉도의 북동 방향의 조하대까지 연결되었다. 펄 모래 자갈 또는 자갈 펄 모래 퇴적상은 자갈이 약간 함유된 펄 모래 퇴적상 범위에 소규모로 부분 분포하고 있었다. 표층퇴적물의 모래 함량(%)은 동검도와 선두리 갯벌에서는 10% 내외로 분포하고 있었다. 선두리에서 서쪽 갯벌은 일반적으로 해안선에서 조하대 방향으로 모래 함량은 점차 증가하는 경향을 보이며, 장봉도 북부의 여차리 갯벌 조하대 부근에서 80% 이상 나타나고 있었다(Fig. 3b).

표층퇴적물의 평균입도는 0.5-9.5 ϕ 의 범위로 분포하고 있으며 동부 지역이 서부 지역에 비하여 상대적으로 세립한 평균입도를 보였다(Fig. 3c). 일반적으로 동막리와 여차리 갯벌은 해안선에서 조하대 방향으로 조립한 입도를 나타내고 있었다. 여차리 해안선 부근에서는 4.5-5.5 ϕ 의 분포를 보이며 석모수로 부근에서 2.5 ϕ 이하인 고운 모래 크기의 입도가 분포하고 있었다. 분급도는 일반적으로 매우 불량하며 여차리 갯벌에서 장봉도 방향으로 점차 양호해 지는 경향을 보였다(Fig. 3d). 특히 동막리 갯벌에서 상대적으로 더욱 더 불량한 분급도를 보여 주었다.

강화도 남부 갯벌 83개 표층퇴적물의 평균입도, 분급도, 왜도의 통계학적 변수를 이용하여 Gao and Collins (1992)의 방법을 응용하여 순 퇴적물 이동경로를 추정하였다. 특정거리(D_{tr}) 0.03°로 계산된 결과에 의하면, 2011년 여름철에 동부인 동검도 주변에서는 퇴적물 이동이 상대적으로 약하나, 서부에서는 석모수로를 통하여 유입된 퇴적물이 동막리 방향으로 이동하는 양상을 보여주었다(Fig. 4). 강화도 남부 갯벌의 중부에서는 선두리 갯벌과 신도 북부 수로를 통하여 퇴적물이 이동되어 동막리 갯벌에 집적되는 양상을 보여주고 있었다. 서부의 장화리와 여차리 갯벌에서는 해안선에서 중앙부까지는 석모수로서 이동되는 퇴적물이 해안선과 거의 평행하게 동막리 갯벌까지 이동되며, 중앙부에서 장봉도 북부 수로까지는 퇴적물 이동이 상대적으로 미약한 양상을 보였다. 2011년 여름철 표층퇴적물의 순 이동경로 양상에 의하면, 표층퇴적물은 동막리 갯벌에서 퇴적이 활발히 진행되며, 장화리 갯벌의 해안선에서 중앙부까지는 여차리와 동막리 갯벌로 이동되는 경향을 보여 침식이 진행되는 것으로 보인다.

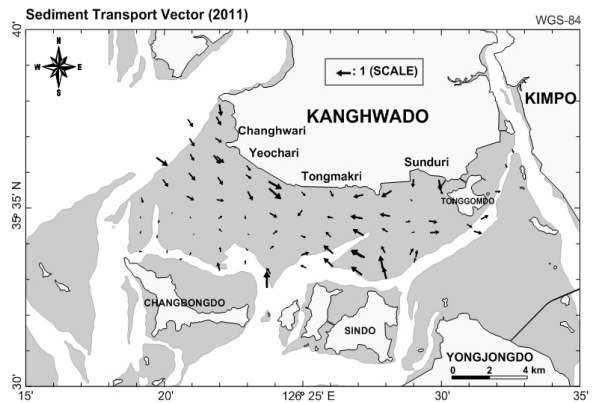


Fig. 4. Calculated transport vectors based on textural parameters of the surface sediments on the southern Kanghwa tidal flat in September 2011.

강화도 남부 동막리, 여차리와 장화리 갯벌의 지형을 파악하기 위하여 2013년 3월에 RTK-GPS를 사용하여 1998년에 설정된 측선에서 지형을 측량하였다. 동막리 측선(Line 3)은 강화도 남부 갯벌 중앙에 위치하며 길이는 1,000m이다. 동막리 갯벌은 평균해수면 상부에 위치하고 있으며, 해안선에서 200m 지점의 고도는 평균해수면으로부터 1.707m이며, 외해 쪽으로 1,000m 지점은 평균해수면으로부터 0.223m로 경사도는 0.11° 이었다(Fig. 5a). 여차리 측선(Line Y)은 강화도 남부 갯벌 서부에 위치하며 해안선으로부터 3,800m 길이로 약 1,200m부터 평균해수면 아래에 위치하고 있었다. 해안선에서 200m 지점의 고도는 평균해수면으로부터 1.559m이며, 외해 쪽으로 3,800m 지점은 평균해수면으로부터 -4.066m로 경사도는 0.09° 이었다(Fig. 5b). 이 지역에서는 해안선으로부터 2,200m, 3,000m에서 수로가 존재하며, 3,800m 이후에는 주 수로로 연결되었다. 장화리 측선(Line 4)은 석모수리와 가까운 지역에 있으며, 해안선에서 약 650m부터 평균해수면 아래에 위치하고 있으며 길이는 1,100m이다(Fig. 5c). 이 측선은 해안선에서 200m 지점의 고도는 평균해수면으로부터 1.404m이며, 외해 쪽으로 1,100m 지점은 평균해수면으로부터 -1.579m로 경사도는 0.17° 이었다.

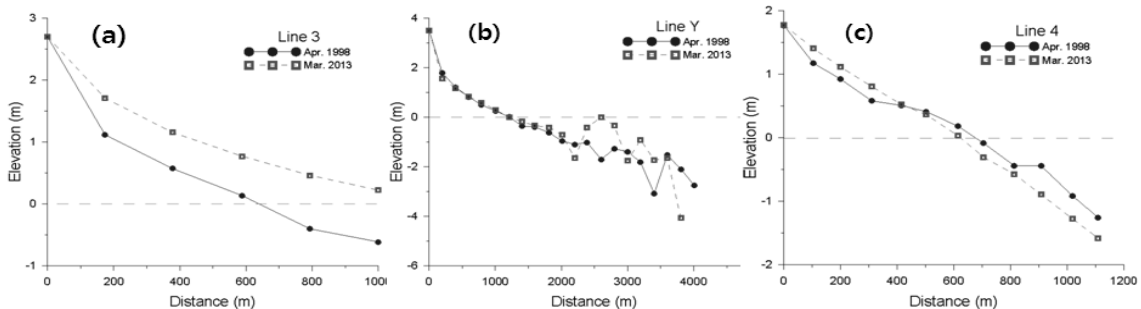


Fig. 5. The elevation in cross section on the Line 3(a), Line Y(b) and Line 4(c) in April 1998 and March 2013.

5. 논의 및 결론

강화도 남부 갯벌 주변에는 1980년대부터 2000년대 초반까지 다양한 개발이 이루어져 수리적인 조건 변화에 의하여 장기적으로 갯벌의 지형과 퇴적상이 변화되었으며, 이에 따라 생물상의 변화가 있었다(Woo and Je, 2002; Woo et al., 2004; KORDI, 2008; Lee et al., 2011). 강화도 남부 갯벌 표층 퇴적물의 여름철 분포는 1997년부터 2003년까지 석모수로 주변 갯벌에는 모래 퇴적물의 분포 지역이 확장되었으며, 서부의 모래 펄 퇴적물이 동부의 펄 퇴적물 지역으로 상당히 확장하여 대부분 모래 펄 퇴적상으로 변화되었다(Woo et al., 2004). 1997년 8월의 퇴적상은 동쪽은 동검도를 중심으로 펄 퇴적상이

우세하였으며, 모래 펄 퇴적상은 남부에서 여차리 방향으로 넓게 분포하였다(Fig. 6). 6년 후인 2003년 강화도 남부 갯벌에는 모래 펄 퇴적상이 크게 확장되는 경향을 보였다. 강화도 남부 갯벌의 2011년 여름철 퇴적물 분포를 1997년 여름철 퇴적물 분포와 비교하면, 동쪽인 동검도 주변은 모래의 유입으로 인하여 모래 펄과 모래 퇴적상으로 변화 되었으며, 선두리 갯벌의 펄 퇴적상 분포 지역이 상당히 감소하였다. 동막리 갯벌에서는 모래 펄 퇴적상 지역이 선두리 갯벌 방향으로 증가하였으나, 서쪽인 여차리, 장화리 갯벌에서는 모래 펄 퇴적상 지역이 감소하고 모래와 펄 모래 퇴적상 지역이 상당히 확장되었다.

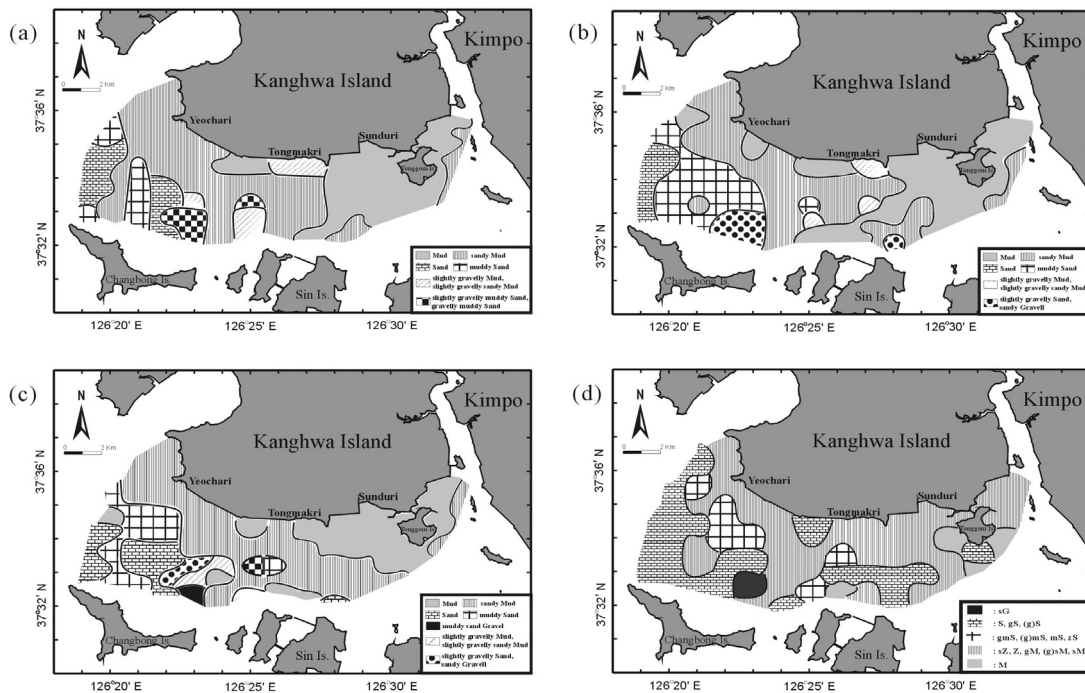


Fig. 6. Distribution of surface sediments on the southern Kanghwa tidal flat in summer of 1997(a), 1999(b), 2000(c) and 2003(d) (Woo et al., 2004).

1997년 여름철 표층 퇴적물 입도 변수에 따른 순 퇴적물 이동경로를 추정하면, 여차리를 경계로 서부 장화리 전면 갯벌에서는 점차적으로 서남쪽으로 이동되어 석모수로 외해쪽으로 빠져나가는 양상을 보이고 있으며, 장봉도 북부의 갯벌에서는 북서쪽으로 이동되는 양상을 보였다(Fig. 7a). 중앙의 동막리 갯벌에서는 주수로 쪽에서 갯벌로 이동되어, 점차적으로 남동쪽으로 이동하여 동검도 남서부 선두리 갯벌에 집적되는 양상을 보이고 있었다. 이러한 퇴적물의 순 이동경로 양상으로부터 갯벌의 퇴적물 변화를 추정하여 보면 선두리와 동검도 주변 갯벌에서 퇴적이 가장 활발하게 일어나며, 여차리 갯벌에서는 상대적으로 느린 속도의 퇴적이 진행되었을

것이다. 반면, 장화리 전면 갯벌의 퇴적물은 외해쪽으로 빠져 나가는 경향을 보임에 따라 침식이 진행되었을 것이다.

2000년 여름철의 강화 남부 갯벌에서는 동막리 갯벌을 중심으로 동부에서는 동검도 방향인 동쪽으로 퇴적물이 이동하며, 서부에서는 장화리 갯벌의 해안선에서 중앙부까지와 여차리 갯벌에서 동막리 갯벌로 이동되는 양상을 보였다(Fig. 7b). 이러한 퇴적물의 순이동경로 양상으로 동막리와 선두리 갯벌에서 퇴적이 진행되며, 장화리와 여차리 갯벌의 해안선 부근(약 1km)에서는 침식이 진행되었을 것이다. 10년 이상이 지난 2011년 표층 퇴적물 이동양상은 과거보다 이동 벡터의 규모면에서

상대적으로 작아졌으며, 1997년과 2000년에는 선두리 갯벌에서 퇴적이 활발하게 진행되었을 것으로 추정되나, 2011년에는 동막리 갯벌에서 상대적으로 많은 퇴적이 일어날 것으로 보인다. 이러한 변화들은 대규모 건설 공사인 인천국제공항과 영종대교, 공항고속도로 건설 등이

진행되는 동안과 주변 인공구조물 건설 후에 염하수로 주변의 동쪽은 조류의 유속이 감소되고 조위는 증가하였으며, 서쪽은 유속이 증가하는 수리학적 변화가 퇴적물 분포와 이동에 변화를 주었을 것이다(KORDI, 2007, Lee et al., 2011).

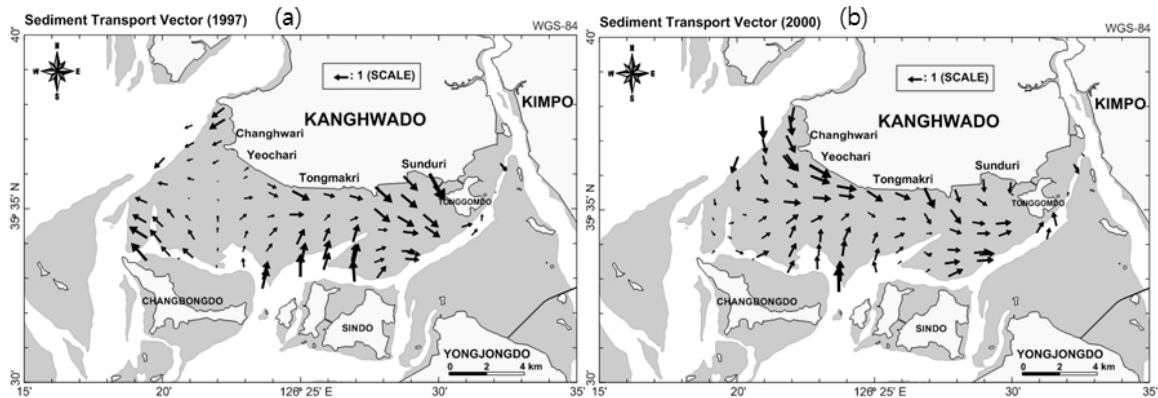


Fig. 7. Calculated transport vectors based on textural parameters of the surface sediments on the southern Kanghwa tidal flat in summer 1997(a) and 2000(b).

강화도 남부 갯벌 주변의 수리학적 변화는 퇴적작용의 변화를 가져와 장기적으로 지형의 형태와 고도 변화를 야기하였다. 강화도 남부 갯벌 동부의 동검도 남부 갯벌은 1997년부터 2000년까지 1.03-4.83cm/year가 퇴적되었고(Woo and Je, 2002), 동검도 동부 갯벌에서 채취된 2개의 코어에서 과잉 방사능 납의 분포를 통하여 추정된 퇴적률은 3.25cm/year와 3.47cm/year로 나타났다(Woo et al., 2012). 이러한 퇴적률은 서해안의 다른 갯벌에 비하여 높은 침적률을 보여주고 있으며, 결과적으로 지형 고도를 높여 해수에 잠기는 시간이 줄어들게 되었다. 강화도 남부 갯벌 중부와 서부는 장기적으로 동막리와 여차리 갯벌은 퇴적, 장화리 갯벌은 침식된 것으로 나타났다. 2013년 봄철 고도를 1998년 봄철 고도와 비교하면, 동막리 갯벌 측선에서 최소 0.58m, 최대 0.86m 퇴적되어 평균적으로 0.70m 퇴적되었다(Fig. 5a). 여차리 갯벌 측선에서는 해안선에서 2,000m 이상 지역에서 수로의 이동이 있었으며 전체적으로 퇴적이 우세하며, 평균적으로 0.16m 퇴적되었다(Fig. 5b). 여차리 갯벌에서 최대로 침식된 해안선에서 3,800m 지점은 수로의 확장에 의한 침식으로 보이며, 최대로 퇴적된 해안선에서 2,600m 지점은 기존 수로가 채워지고 사주가 형성된 지역으로 보인다. 장화리 갯벌 측선에서는 해안선에서 400m 지역은 퇴적되었으나, 500m에서 1,100m 지역에서는 침식되어, 평균적으로 -0.09m 침식되었다(Fig. 5c).

지난 약 15년 동안 강화도 남부 갯벌의 표층 퇴적물 분포, 순 퇴적물 이동경로 양상 및 고도 변화 등을 종합하면, 강화도 주변의 대규모 개발에 의한 수리적인 변화로 퇴적 작용의 변화가 지속되었다. 이러한 수리적인 변

화는 표층 퇴적물이 1997년에 동부의 펄, 서부의 모래 펄 퇴적물이 우세하게 분포한 지역이 장기적으로 변화되어 2011년에는 선두리 갯벌에 펄, 동검도와 동막리 갯벌에 모래 펄, 그리고 여차리와 장화리 갯벌에는 모래와 펄 모래 퇴적물이 우세하게 분포하게 되었다. 또한 강화도 동부의 유속 감소로 염하수로에서 유출되는 퇴적물의 순환이 제한되어 동부 지역에서는 상대적으로 큰 퇴적작용이 지속되었고 서부의 석모수로와 장봉도 북부수로 부근에서는 유속이 상대적으로 증가하여 침식과 수로의 이동이 진행된 것으로 나타났다. 퇴적/침식 작용의 변화에 의한 고도 변화는 해수에 잠기는 시간의 변화를 가져와 염생식물 분포 지역의 변화와 갯벌에 서식하는 생물들의 서식지 변화에 영향을 주었을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국해양과학기술원 기본연구사업(NSC)인 "원격탐사 자료를 이용한 한반도 주변 환경의 생태적 기능 평가(PE98992)" 사업의 일환으로 수행되었습니다. 자료 수집과 그림 수정에 도움을 주신 이윤경 박사 및 조진형 박사에게 감사드립니다. 논문을 심사해 주시고 귀중한 의견들을 주신 심사위원들에게 감사드립니다.

References

Barbier, EB, Hacker, SD, Kennedy, C, Koch, EW, Stier, AC and Silliman, BR (2011). The value of estuarine

- and coastal ecosystem services, *Ecological Monographs*, 81(2), pp. 169-193.
- Costanza, R, d'Arge, R, Groot, R, Farber, S, Grasso, M, Hannon, B, Limburg, K, Naeem, S, O'Neill, RV, Paruelo, J, Raskin, RG, Sutton, P and van den Belt, M (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, pp. 253-260.
- Folk, RL (1968). *Petrology of Sedimentary Rocks*, Hemphills's, Austin, TX.
- Folk, RL and Ward, W (1957). Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters, *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, pp. 3-26.
- Gao, S and Collins, M (1992). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors", *Sedimentary Geology*, 80, pp. 47-60.
- KHOA. (1981). *Nautical chart from Yeongjong-do to Yongmae-do*, No. 311, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration.
- KORDI. (2007). *Investigation service for allotted amount of compensation in fishery damage in Ganghwa-do and Gyeonggi-Incheon area Korea*, BSPI 29001-1931-3, Korea Ocean Research & Development Institute.
- KORDI. (2008). *Development of management and restoration technologies for estuaries with focus on Han River estuary region*, BSPE 98101-2028-7, Korea Ocean Research & Development Institute.
- Lee, YK, Ryu, JH, Choi, JK, Soh, JG, Eom, JA and Won, JS (2011). A study of decadal sedimentation trend changes by waterline comparisons within the Ganghwa tidal flats initiated by human activities, *Journal of Coastal Research*, 27(5), pp. 857-869.
- McLaren, P and Bowles, D (1985). The effects of sediment transport on grain-size distributions, *Journal of Sedimentary Petroleum*, 55, pp. 457-470.
- Noh, B. H., Lee, C. H. et al. (2006). *Sustainable estuary management III-1*, KEI Publication No. 06-23-01.
- Woo, HJ and Je, JG (2002). Changes of sedimentary environments in the southern tidal flat of Kanghwa island, *Ocean and Polar Research*, 24(4), pp. 331-343.
- Woo, HJ, Bahk, JJ, Lee, YG, Je, JG and Choi, JU (2004). Characteristics of sediments in the Kanghwa tidal flat on the west coast of Korea, *Journal of Wetlands Research*, 6(1), pp. 167-178.
- Woo, HJ, Jang, S and Kwon, SJ (2012). Changes in sediment characteristics in the eastern tidal flat of Donggum island in Ganghwa, west coast of Korea, *Journal of Wetlands Research*, 14(3), pp. 375-384.
- 논문접수일 : 2013년 07월 11일
○ 심사의뢰일 : 2013년 07월 25일
○ 심사완료일 : 2013년 09월 06일