

고해상도 위성영상을 활용한 갯벌 퇴적상 변화 연구

최종국 · 유주형*

한국해양연구원 해양위성센터

A Study on the Sedimentary Facies Change in the Tidal Flat Using High Spatial Resolution Remotely Sensed Data

Jong-Kuk Choi and Joo-Hyung Ryu*

Korea Ocean Satellite Centre, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan 426-744, Korea

The surface sediment distribution in a tidal flat in 2001 was compared with that of 2008 using high spatial resolution remote sensing images and a GIS-based analysis. Maps of the surface sedimentary facies for each time frame were induced by an IKONOS data acquired in February, 2001 and a KOMPSAT-2 data acquired in April, 2008 using an object-based classification method. The area ratio of each surface sedimentary facies were estimated, and the results were compared each other for deducing the change in the sedimentary facies during the time interval. The result showed that the percentage of grains larger than very fine sand (0.0625 mm) has increased considerably since the early 2000s in the Hwangdo tidal flat. Mud flat facies has decreased 5.81% in the late 2000s compared with the early 2000s. However, mixed flat and sand flat have increased 4.46% and 2.14%, respectively. A field campaign also supported the result. This study showed that the monitoring of changes in the surface sedimentary facies in the tidal flat is possible through a GIS-based analysis using high spatial resolution remote sensing images.

Key words : Hwangdo tidal flat, surface sedimentary facies, high spatial resolution remote sensing, Geographic information system (GIS)

이 연구에서는 공간해상도 4 m 급의 고해상도 위성인 IKONOS 및 Kompsat-2 영상자료와 현장조사 자료를 기반으로 지리정보시스템 분석기법을 적용하여 천수만 황도 갯벌의 표층 퇴적상 분포의 변화 양상을 파악하였다. 2001년 2월에 획득된 IKONOS 영상과 2008년 4월에 획득된 KOMPSAT-2 영상을 이용하여 객체 기반 분류법 (object-based classification)에 의해 갯벌의 표층 퇴적상 분포도를 작성하였다. 두 시기에 얻어진 퇴적상 분포도로부터 각 퇴적상의 면적을 추출하고, 이를 통해 두 시기 동안 연구지역 갯벌의 표층 퇴적상 변화를 분석하였다. 분석 결과, 황도 갯벌에서는 2000년 대 초반에 비해 전반적으로 모래 성분이 증가하여 펄 퇴적상의 상당 부분이 혼합 퇴적상으로 변화한 것으로 나타났다. 펄 퇴적상은 2000년대 초에 비해 후반에 5.81% 증가하였으나, 혼합 퇴적상과 모래 퇴적상은 각각 4.46%와 2.14% 증가하였다. 2004년 4월과 2009년 5월 및 2010년 5월 현장조사 결과에 대한 비교분석을 통해 이를 확인할 수 있었다. 연구 결과, 고해상도 위성영상과 지리정보시스템 분석기법의 활용을 통해 갯벌 표층 퇴적상 분포의 변화 양상을 모니터링하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

주요어 : 황도 갯벌, 표층 퇴적상 분포, 고해상도 위성영상, 지리정보시스템

1. 서 론

우리나라 서해안에 넓게 형성되어 있는 갯벌은 대규모 간척사업을 통하여 농업, 공업 용지, 신도시 건설,

연안구조물 설치 등으로 활용범위를 넓혀 왔다. 간척 사업에 의한 가용면적의 확대는 육지로부터 오염물질의 유입에 따른 연안오염 증가, 해안선 변화에 따른 해류, 조류의 변화 등으로 연안퇴적물의 침식/퇴적 등

*Corresponding author: jhryu@kordi.re.kr

연안 환경의 변화를 야기 시키고 있다 (Woo *et al.*, 2005). 이렇듯 갯벌의 퇴적환경은 다양한 환경 인자에 의해 지속적으로 변화하고 있으며, 이러한 갯벌 지형 특성과 함께 환경 변화에 영향을 미치는 주요 요소 중 하나는 표층 퇴적물의 특성 및 분포이다. 따라서 갯벌 표층 퇴적물의 분포를 파악하여 이의 변화양상을 연구하는 것은 연안 환경변화를 파악하는데 도움이 된다.

이러한 갯벌 퇴적상 연구를 위하여 원격탐사 자료가 꾸준히 활용되어 왔다. Batholdy and Folving (1986)은 Dannish Wadden Sea에 대해 5개의 Landsat 영상을 이용하여 표층 퇴적물을 분류하고, 함수율이 광학반사도 특성을 좌우하는 중요한 요인임을 밝힌 바 있으며, Yates *et al.* (1993)은 영국 동쪽 해안의 Wash 갯벌 지역에 대해, 현장조사 자료와 Landsat-5 Thematic Mapper (TM) 위성영상 자료를 이용하여 최대우도 분류 방법, 회귀 모델 및 분광합성 모델에 의해 표층 퇴적상 분류를 시도한 바 있다. 국내의 경우, Ryu (2001)는 곰소만의 모래톱 주변을 대상으로 현장조사에 의해 입도, 함수율 시료를 채취하여 Landsat TM 및 EOS-Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) 영상과의 상관관계를 구하고, 이를 통해 위성자료 이용 시 Folk (1968)의 분류기준 보다는 갯벌 특성에 맞는 새로운 분류기준이 적용되어야 함을 제안한 바 있다. 또한, Ryu *et al.* (2003)은 현장조사 자료와 위성자료의 상관계수를 구하고 Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) 자료를 이용하여 갯벌 표층 퇴적물 분류 시 효과적인 새로운 입도 기준을 제시하였다. 이렇듯 주로 10-30 m 정도의 해상도를 갖는 중저해상도 위성영상이 활용되어 왔으나, 낮은 해상도로 인하여 정밀한 갯벌 표층 퇴적상 분포 연구에 한계가 있었다. 이에, 최근에는 고해상도 위성영상을 기반으로 한 갯벌 표층 퇴적상 분류가 시도되어 왔으며 (Rainey *et al.*, 2003; Ryu *et al.*, 2005), 기존의 픽셀 기반의 분류방법과는 다른 고해상도 영상 기반에 적합한 새로운 분류 방법이 필요하게 되었다. 객체 기반의 분류방법 (object-based classification)은 주로 고해상도 위성영상에 적용되며, 픽셀 기반의 영상자료를 공간적으로 연속적이고 균질한 “객체 (object)”라는 segment로 변환한 후, 현장조사를 통해 기 정의된 분류 지표를 각 객체에 할당하는 방식의 분류 방법이다 (Conchedda *et al.*, 2008). 객체 기반의 분류 방법은 공간적으로 인접한 영역의 특성을 분류 과정에서 고려하여 할당하여 줄 수 있다는 장점을 가지고 있으며 (Desclee *et al.*, 2006), 일

반적으로 픽셀 기반의 분류 방법에 비해 더욱 정밀한 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다 (Blaschke and Strobl, 2001). 그러나 아직까지 갯벌 표층 퇴적상 분류를 위해 객체기반 분류방법이 적용된 예는 없다.

이 연구에서는 2001년과 2008년에 각각 촬영된 고해상도 광학위성 영상자료 및 영상 촬영 시기와 유사한 계절적 시기에 수행된 현장조사 자료를 기반으로 천수만 황도 갯벌의 표층 퇴적상 분포의 변화 양상을 파악하고자 한다. 고해상도 위성영상 자료와 현장조사 자료를 이용하여 객체 기반 분류 방법에 의해 황도 갯벌의 표층 퇴적상을 분류하고, 분류 결과 상에 나타난 각 표층 퇴적상들이 차지하는 면적 분포를 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 통해, 2001년과 2008년 두 시기의 연구결과를 공간적으로 비교함으로써, 두 시기 간의 갯벌 표층 퇴적상의 분포가 어떻게 변화하였는지 파악하고자 한다.

2. 연구지역 및 연구자료

연구지역은 충청남도 태안군 천수만에 위치한 황도 갯벌로서, 천수만은 서해 중부 연안에 위치하며, 만 입구와 안면도 연육교 밑의 수로를 통하여 해수유통이 이루어지는 반폐쇄성 내만으로 만의 내부에는 많은 섬과 사퇴, 암초, 갯벌 등 다양하고 복잡한 환경과 지형을 가지고 있다 (Woo *et al.*, 2005). 천수만은 수심 25 m 이내의 천해성 만으로 태안군의 안면도, 서산시의 간월도, 보령시의 서해지선으로 둘러싸여 있다 (Fig. 1a). 총 수면적이 380 km²이었으나, 1984년 서산 AB 지구 간척사업에 따른 방조제 축조와 부암호 및 간월호의 담수호 조성, 홍보지구 간척사업에 따른 방조제 건설로 인하여 그 면적이 약 180 km²로 감소하였다 (So *et al.*, 1998). 천수만의 조석은 반일주조이며, 대조차 633 cm, 소조차 286 cm로서 평균조차가 459 cm인 대조차 환경에 속하고 최대유속은 창조류가 약 100 cm/sec, 낙조류는 약 70 cm/sec 이다. 천수만 안면도에 인접한 황도 갯벌은 폭 1.65 km, 길이 5.15 km 정도이며, 갯벌 중심부는 조류로와 세곡이 복잡하게 발달되어 있다. 연구지역의 퇴적상은 만조선에서 저조선 방향으로 펄 퇴적상, 혼합 퇴적상 그리고 모래 퇴적상으로 구성되어 있다 (Kim *et al.*, 1989).

황도 갯벌의 표층 퇴적상 분포를 파악하기 위하여 공간해상도 4 m 급의 IKONOS 위성 자료와 다목적실용위성 2호 (Korean MultiPurpose SATellite, KOMPSAT-2) 위성자료를 사용하였다. IKONOS 영상은 2001년 2

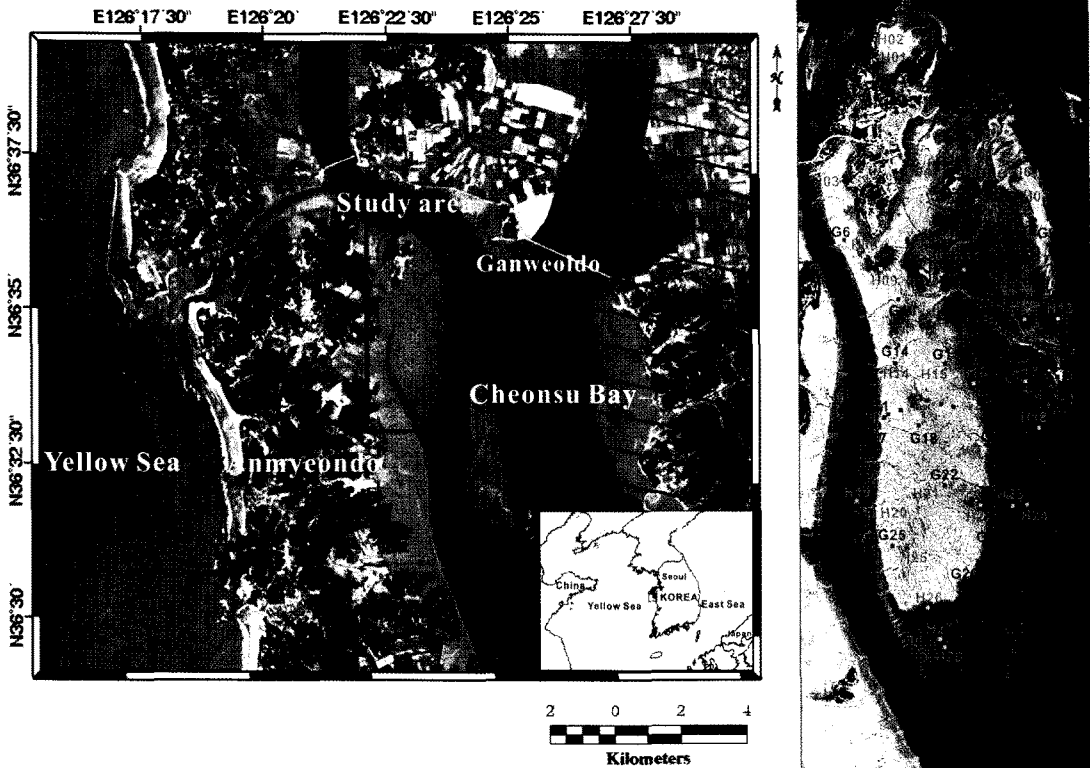


Fig. 1. (a) The Landsat ETM+ image of the Cheonsu Bay and Hwangdo tidal flat acquired on February 14, 2002. (b) The IKONOS RGB (432 bands) composite image of the Hwangdo tidal flat acquired on February 26, 2001 overlaid with 45 sampling positions (dots in red) and 28 sampling positions (dots in blue) for sedimentary facies acquired in March, 2004 and May, 2009, respectively.

월 26일 오전 11시 20분에 획득된 영상이며, 영상 획득 당시의 조위는 78 m로 간조 시에 얻어진 것이다. 또한, KOMPSAT-2 영상은 2008년 4월 8일 오전 10시 54분에 획득된 영상이며, 영상 획득 당시의 조위는 73 m로 역시 간조 시에 얻어진 것이다. Table 1은 두 영상자료의 밴드별 특징을 나타낸 것이다. 두 영상자료의 밴드별 특징은 유사하나, 대상체의 미세한 분광 특징에 대한 관측 능력 차이에 따라 분류 정확도가 다

르게 나타날 것으로 예상된다. IKONOS 영상자료를 이용하여 황도 갯벌의 퇴적상 분포를 파악하기 위한 현장 자료는 Ryu *et al.* (2005)이 연구지역에서 2004년 3월 만조 때 선박을 이용하여 Grab sampler에 의해 29개 정점에서의 채취한 표층 퇴적물 및 간조 시 황도 갯벌 중심부분을 황으로 가르며 14개 정점에서 채취한 입도 시료 등 총 43개의 입도 자료를 사용하였다. 또한, KOMPSAT-2 영상자료를 이용하여 퇴적상

Table 1. Band characteristics of IKONOS and KOMPSAT-2

Band	IKONOS		KOMPSAT-2	
	Spectral resolution (μm)	Spatial resolution (m)	Spectral resolution (μm)	Spatial resolution (m)
1	0.45-0.52	4	0.45-0.52	4
2	0.52-0.60		0.52-0.60	
3	0.63-0.69		0.63-0.69	
4	0.76-0.90		0.76-0.90	
Panchromatic	0.45-0.90	1	0.50-0.90	1
Swath	11 km		15 km	

분포를 파악하기 위한 현장 자료는 2009년 5월 만조 때 선박을 이용하여 Grab sampler에 의해 28개 정점에서 채취한 입도 자료를 사용하였다. 각각의 영상

과 현장조사 자료에는 연도의 차이는 있으나, 계절적으로는 유사한 시기에 얻어진 자료이므로 이를 통해 갯벌 표층 퇴적상 분포를 파악하는 데에는 무리가 없

Table 2. Grain size analysis by in situ measurements in March, 2004 (*Folk, 1968), sZ : sandy silt, sM : sandy mud, (g)sM : gravelly sandy mud, zS : silty sand, mS : muddy sand, (g)mS : gravelly muddy sand, gS : gravelly sand

Station No.	Composition (%)				Sediment Type*	Statistical Parameters			
	Gravel	Sand	Silt	Clay		MZ	St.Dev.	Skew.	Kurt.
C1	0	22.6	50.7	26.7	sM	6.5	2.9	0.3	0.8
C2	0	19.2	56.2	24.6	sZ	6.4	2.6	0.3	0.9
C3	0	26.9	53.9	19.2	sZ	5.9	2.6	0.4	1.1
C4	0	61.5	29.8	8.7	zS	3.9	2.1	0.7	1.3
C5	0	37.8	45.5	16.7	sZ	5.4	2.5	0.4	1.1
C6	0	47.2	38.4	14.4	sZ	4.9	2.4	0.5	1.2
C7	0	46.5	40.3	13.2	sZ	4.8	2.4	0.4	1.2
C8	0	50.2	38.7	11.1	zS	4.4	2.2	0.5	1.3
C9	0	79.9	15.6	4.5	zS	3.1	1.5	0.6	1.9
C10	0	79.1	16.1	4.8	zS	3.2	1.5	0.6	1.9
C11	0	73.4	20.0	6.7	zS	3.5	1.8	0.7	1.8
C12	0	64.0	23.9	12.1	mS	4.0	2.4	0.8	1.2
C13	0	76.9	14.4	8.8	mS	3.5	2.1	0.7	2.5
C14	7.1	92.9	0	0	gS	0.3	0.8	-0.5	1.4
G1	0	27.6	50.0	22.4	sZ	6.0	2.7	0.4	0.9
G2	0	70.1	23.3	6.7	zS	3.6	1.9	0.6	1.4
G3	5.4	88.7	3.3	2.6	gS	0.1	1.3	0.4	2.4
G4	1.2	72.7	18.0	8.1	(g)mS	3.3	2.4	0.6	1.9
G5	0	98.4	0.4	1.1	S	1.6	0.7	-0.1	1.4
G6	0	16.9	58.5	24.7	sZ	6.7	2.8	0.4	1.0
G7	0	87.5	8.6	3.9	zS	2.5	1.2	0.5	2.4
G8	0	75.5	17.7	6.9	zS	3.3	1.9	0.6	1.8
G9	0	92.3	5.1	2.6	S	2.3	0.9	0.5	1.8
G10	0.5	53.6	32.5	13.4	(g)mS	4.6	2.4	0.6	1.1
G11	0	86.3	10.3	3.5	zS	2.7	1.2	0.6	2.2
G12	0.3	89.1	6.7	4.0	(g)mS	2.7	1.1	0.5	2.6
G13	1.0	92.2	3.5	3.3	(g)S	2.5	1.1	0.2	2.6
G14	0	17.9	50.8	31.4	sM	6.8	2.9	0.3	0.7
G15	0	68.5	24.3	7.2	zS	3.5	2.0	0.7	1.3
G16	1.2	87.2	7.1	4.5	(g)mS	2.5	1.7	0.2	3.8
G17	0	26.8	51.5	21.8	sZ	6.2	2.7	0.4	0.9
G18	0	51.7	37.6	10.7	zS	4.4	2.1	0.5	1.3
G19	0	66.8	25.3	8.0	zS	3.6	2.0	0.7	1.6
G20	0.2	83.5	10.7	5.7	(g)mS	3.0	1.5	0.6	2.7
G21	0	10.4	53.9	35.7	sM	7.3	2.6	0.3	0.6
G22	0	54.4	34.4	11.2	zS	4.3	2.2	0.6	1.3
G23	0	74.1	17.8	8.1	zS	3.5	2.1	0.8	1.8
G24	0	18.5	49.4	32.2	sM	6.8	2.9	0.3	0.7
G25	0	36.4	45.8	17.8	sZ	5.4	2.7	0.4	1.0
G26	0	48.8	36.6	14.6	sZ	4.8	2.5	0.5	1.1
G27	1.6	67.0	19.6	11.9	(g)mS	4.0	2.3	0.7	1.7
G29	0	84.2	12.9	2.9	zS	2.9	1.1	0.6	1.7
G31	0	78.2	16.5	5.3	zS	3.1	1.6	0.7	1.9

을 것으로 생각된다. Fig. 1b에 2004년 3월 입도 자료의 채취 위치가 붉은 색 점으로 표시되어 있으며, G 정점은 Grab sampler에 의해, C 정점은 걸어가면서 채취한 샘플 위치를 나타낸다. Fig. 1b의 파란색 점은 2009년 5월 입도 자료의 취득 위치를 나타내며 모두 Grab sampler에 의해 채취된 시료이다. 샘플링 위치의 정확한 확인을 위해 수평 오차 1 m의 GPS (Trimble Co. Pathfinder Pro XR) 측량을 실시하였다. 모든 입도 자료는 Folk (1968)의 퇴적상 기준에 의해 0.0625 mm 크기 이상인 모래입자가 30% 미만은 펄 퇴적상, 30-70%는 혼합 퇴적상 그리고 70% 이상은 모래 퇴적상으로 분류하였다. Table 2와 3은 각각 2004년 3월에 취득된 총 43개 입도 자료의 분석 결과와 2009년 5월에 취득된 28개 입도 자료의 분석 결과를 나타낸 것이다.

3. 연구방법

공간해상도 4 m의 고해상도 위성자료인 IKONOS 영상 (2001년 2월) 및 KOMPSAT-2 영상자료 (2008년 4월)와 현장조사 자료 (2004년 3월 및 2009년 5월)를 이용하여 갯벌의 표층 퇴적상 분류도를 제작하고, 각 두 시기의 퇴적상 분포 양상을 비교하고자 하는 것이 이 연구의 목적이다. 이를 위해 먼저 1) 연구 지역의 갯벌에 대해, 고해상도 위성영상을 기반으로 한 분류방법으로 이용되고 있는 객체 기반의 분류 방법에 의한 표층 퇴적상 분류도를 작성하였다. 2) 두 시기에 대해 작성된 연구지역의 표층 퇴적상 분류도에 대해, 각 퇴적상별로 면적 비율을 계산하였다. 마지막으로, 3) 두 시기의 퇴적상별 분포 양상을 비교함으로써, 연구

Table 3. Grain size analysis by in situ measurements in May, 2009 (*Folk, 1968), sZ : sandy silt, sM : sandy mud, (g)sM : gravelly sandy mud, zS : silty sand, mS : muddy sand, (g)mS : gravelly muddy sand, gS : gravelly sand

Station No.	Composition (%)				Sediment Type*	Statistical Parameters			
	Gravel	Sand	Silt	Clay		MZ	St.Dev.	Skew.	Kurt.
H1	7.72	14.35	72.22	5.7	gM	4.75	2.79	-0.84	3.98
H2	1.87	15.49	75.03	7.61	(g)sM	5.41	1.92	-0.62	6.29
H3	2.39	13.09	75.08	9.44	(g)sM	5.51	2.09	-0.72	6.66
H4		29.5	62.55	7.95	sZ	5.15	1.76	0.76	3.42
H5		42.03	47.59	10.38	sZ	4.83	2.3	0.77	3.73
H6	0.31	94.19	3.1	2.39	(g)S	2.25	1.54	3.53	18.69
H7		82.96	14.04	3	zS	2.85	1.9	1.9	7.33
H8		40.15	54.22	5.63	sZ	4.76	1.87	1.28	5.44
H9		69.64	27.19	3.17	zS	3.79	1.71	1.7	6.38
H10		69.33	25.78	4.89	zS	3.67	2	1.64	5.86
H11	0.07	78.05	18.96	2.91	(g)mS	3.48	1.63	2.21	9.41
H12	1.97	86.97	8.73	2.33	(g)mS	2.58	1.74	1.67	8.84
H13		91.42	6.89	1.69	S	2.59	1.43	2.43	11.71
H14		21.31	66.68	12	sZ	5.63	1.92	0.52	3.6
H15		54.64	40.84	4.53	zS	4.37	1.66	1.4	5.06
H16		82.64	15.59	1.77	zS	3.37	1.32	2.48	10.92
H17	0.96	69.25	26.59	3.2	(g)mS	3.66	1.79	1.1	6.15
H18		71.69	25.55	2.77	zS	3.78	1.52	1.72	6.84
H19		22.54	68.29	9.17	sZ	5.49	1.82	0.88	4.34
H20		22.6	69.06	8.34	sZ	5.44	1.75	0.86	4.23
H21		53.84	41.67	4.5	zS	4.37	1.67	1.51	5.88
H22		61.77	35.32	2.91	zS	4.11	1.51	1.72	7.54
H23	0.21	66.63	29.48	3.69	(g)mS	3.75	1.83	1.22	5.49
H24		64.72	32.17	3.11	zS	3.9	1.61	1.39	5.43
H25		51.54	43.41	5.04	zS	4.49	1.72	1.56	5.94
H26		72.63	24.79	2.58	zS	3.8	1.46	2.34	10.59
H27		79.32	18.64	2.04	zS	3.51	1.36	2.5	11.29
H28		80.14	18.26	1.61	zS	3.51	1.24	2.62	12.18

지역의 표층 퇴적상 변화를 파악하였다.

연구지역의 표층 퇴적상 분류를 위해 객체 기반의 분류 방법을 적용하며, 이는 Definiens[®] Developer 7 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 Definiens Imaging Co.에서 고해상도 위성영상에 적합하도록 개발한 객체 기반 이미지 분석을 위한 상용 프로그램이다 (Walsh *et al.*, 2008). 이것은 많은 유형의 이미지와 벡터 데이터에 대해서 정보와 데이터의 융합 기능을 제공하며, 이미지 객체들의 계층망을 생성해주는 다해상도 이미지 분할 기능으로 다양한 스케일 분석이 가능하다. 먼저, 연구에 사용된 IKONOS 및 KOMPSAT-2 영상을 광학반사도 및 texture 등 특성을 고려하여 유사한 특징을 보이는 부분들 즉, 객체로 분류하였다. 각 이미지 객체들에 대해, 현장 조사 자료를 기반으로 2004년 3월의 자료에서는 연구 지역을 횡으로 가로질러 채취한 14개 샘플 위치의 입도 자료를, 2009년 5월의 자료에서는 임의 선택된 샘플 위치에서의 입도 자료를

각각 트레이닝 데이터로 하여 각 이미지 등의 상관성 등을 고려하여, 퇴적상을 부여하였다. 두 시기의 퇴적상 분류도에 대해 GIS 상용 프로그램인 ArcGIS software의 공간분석 기능을 이용하여 각 퇴적상들이 연구지역에서 차지하는 픽셀의 개수를 계산하고, 이로부터 각 퇴적상의 면적 비율을 계산하였다.

4. 연구결과

4.1. 연구지역의 갯벌 표층 퇴적상 분류

Fig. 2a와 2b는 각각 2001년 2월 26일의 IKONOS 위성영상과 2008년 4월 8일의 Kompsat-2 위성영상으로부터 작성된 연구지역의 표층 퇴적상 분류도이다. 연구지역인 황도 갯벌의 표층은 크게 펄 퇴적상 (mud flat), 혼합 퇴적상 (mixed flat), 모래 퇴적상 (sand flat) 및 사주 (sand shoal)로 분류되었으며, 모두 공간해상도 4 m의 ArcGIS grid 파일 형태의 래스터 데이터베

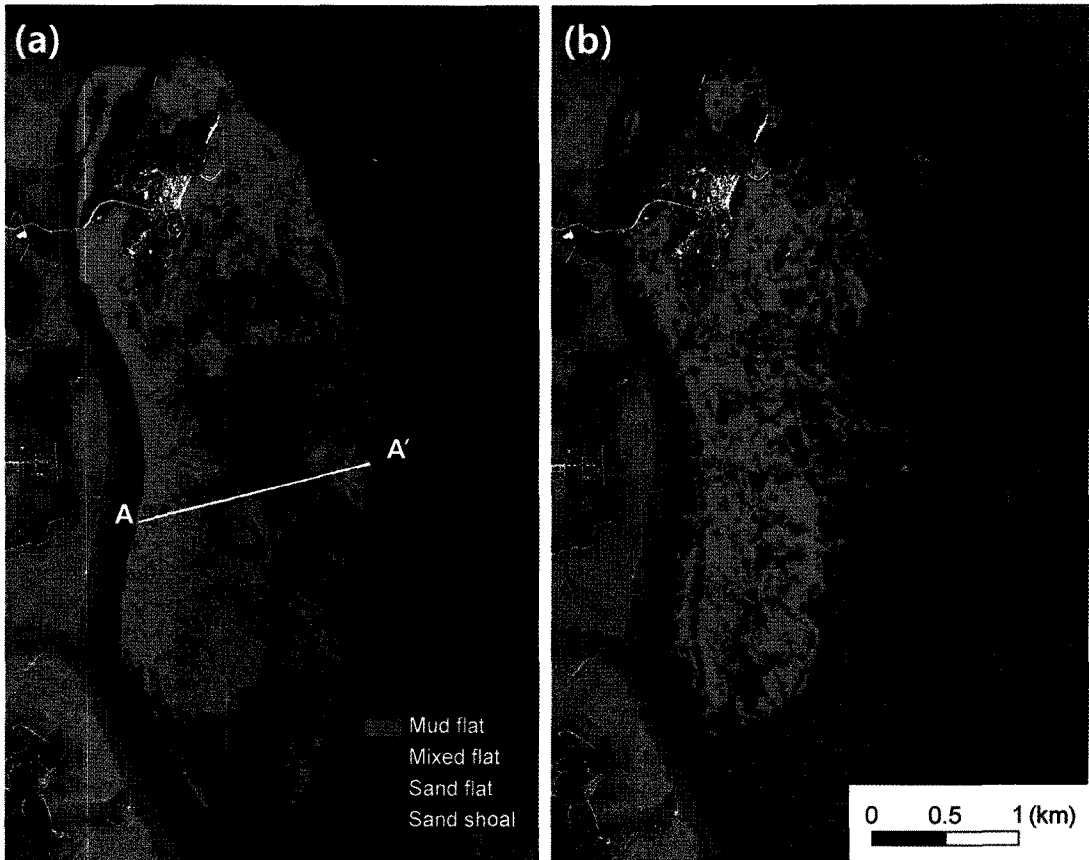


Fig. 2. The distribution map of surface sediment facies derived from (a) the IKONOS image and (b) the KOMPSAT-2 image.

이스로 작성되었다. Fig. 2b는 IKONOS 영상자료로부터 작성된 2000년대 초반의 퇴적상 분류도를, 당시에 작성된 지형고도모델 (digital elevation model, DEM) 과 중첩하여 표현한 것이다. 연구지역 서쪽이 남북방향으로 높은 고도를 보이고 있으며, 이로부터 서쪽으로는 급격한 경사로 낮아지고 동쪽으로는 간조선까지 완만한 경사를 가지는 것을 알 수 있다. 황도 갯벌의 표층 퇴적상은 펄 퇴적상 및 혼합 퇴적상이 주로 높은 고도에 위치하고 있으며, 모래 퇴적상이 고도가 낮은 지형에 위치하고 있음을 보여주고 있다. 이 지역은 펄 퇴적상 또는 혼합 퇴적상 지역이 고도가 높아 노출시간이 길고 또한 조류로와 세곡이 복잡하게 발달되어 있어 지표잔존수가 남아 있지 않으므로 영상에서 밝게 나타난다. 반면에, 모래 퇴적상 지역은 낮은 지형으로 인해 노출시간이 짧고 조류로의 발달이 미약하여 지표잔존수의 영향으로 광학반사도가 낮게 나타나는 특징이 있다 (Ryu *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2010).

각 시기별로 작성된 연구지역의 표층 퇴적상 분류도는 각각 ArcGIS 그리드 포맷의 래스터 데이터베이스로 변환되었다. 각 그리드 맵에 대해, 현장조사를 통해 취득된 입도 자료들의 분류 결과와의 공간적 상관관계를 분석함으로써 분류도에 대한 검증을 수행하였다. 그

결과 에러 매트릭스를 작성하여, 전체적인 분류의 정밀도를 분석하였다. Table 4와 5는 각각 IKONOS 영상과 KOMPSAT-2 영상으로부터 작성된 갯벌 표층 퇴적상 분류도에 대한 에러 매트릭스이다. IKONOS 영상으로부터 작성된 분류도의 경우, 펄 퇴적상, 모래 퇴적상 및 사주는 100% 정확하게 분류되었다. 그러나 혼합 퇴적상은 총 14개의 정점 중 10개만 맞게 분류되었고 1개의 자료가 펄 퇴적상으로, 3개의 자료가 모래 퇴적상으로 오분류되었다 (Table 4). 각 입도자료를 보면 펄 퇴적상으로 오분류된 정점은 G10 (53.6%) 이었고, 모래 퇴적상으로 오분류된 정점들은 C12 (64.0%), G19 (66.8%)와 G27 (67.0%)이었다. 모래 퇴적상으로 오분류된 혼합 퇴적상 정점들은 모래입자 퍼센트가 70%에 가까운 점들로, 영상자료 분석 시 모래 퇴적상의 특성이 나타날 것으로 생각된다. 따라서 퇴적학적 기준으로 보면 오분류라고 말 할 수 있으나, 실제적으로는 IKONOS 위성자료의 광학 특성과 분류 결과 퇴적상이 매우 잘 일치하는 결과인 것이다. KOMPSAT-2 영상으로부터 작성된 분류도의 경우도 펄 퇴적상, 모래 퇴적상 및 사주는 100% 정확하게 분류되었다. 혼합 퇴적상은 11개의 정점 중 1개가 펄 퇴적상으로, 2개가 모래 퇴적상으로 오분류되었다 (Table 5).

Table 4. Error matrix of the surface sediment facies classification derived from IKONOS image by object-based method

		Reference data (in situ measurement)				Row total
		Mud flat	Mixed flat	Sand flat	Sandbar	
Classification	Mud flat	9	1*			10
	Mixed flat		10			10
	Sand flat		3**	17		20
	Sandbar				3	3
Column total		9	14	17	3	43
Overall accuracy = 90.7%						

*G10 (53.6%), **C12 (64.0%), G19 (66.8%), G27 (67.0%)

Table 5. Error matrix of the surface sediment facies classification derived from KOMPSAT-2 image by object-based method

		Reference data (in situ measurement)				Row total
		Mud flat	Mixed flat	Sand flat	Sandbar	
Classification	Mud flat	7	1*			8
	Mixed flat		8			8
	Sand flat		2**	9		11
	Sandbar				1	1
Column total		7	11	9	1	28
Overall accuracy = 89.3%						

*H8 (40.2%), **H9 (69.7%), H17 (69.3%)

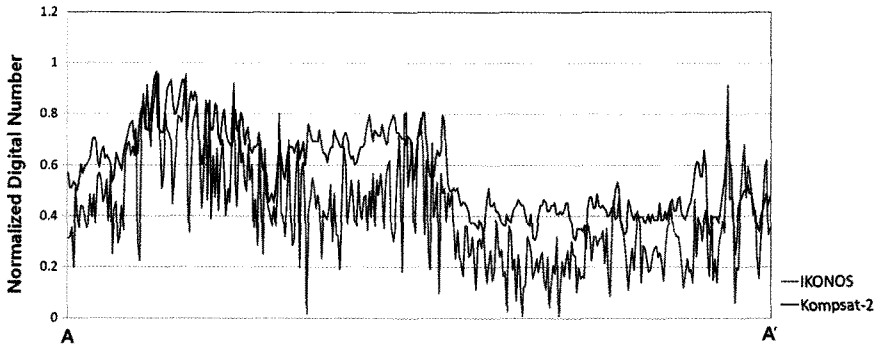


Fig. 3. A comparison of normalized digital number (DN) between IKONOS and KOMPSAT-2 data used in this study for the line A-A' in Fig. 2a.

이 경우에도, 모래 퇴적상으로 오분류된 혼합 퇴적상 정점들은 모래입자 퍼센트가 70%에 가까운 점들로 판명되었다. 혼합 퇴적상과 관련되어 오분류 정점들이 나타나는 것은 필이나 모래 퇴적상의 특징이 혼재되어 나타나는 혼합 퇴적상의 특징과 관련이 있는 것으로 생각된다. 2000년대 초의 퇴적상 분류도의 분류정확도는 90.7%, 2000년대 후반의 분류도 정확도는 89.3%로 각각 계산되었으며, 두 시기 모두 비교적 높은 분류 정확도를 보였다. 즉, 객체기반 분류방법에 의한 고해상도 영상 자료 기반의 퇴적상 분류도 작성은, 정확도 관점에서 효과적이라고 할 수 있다. 두 시기 분류 정확도에 차이를 보이는 이유는, IKONOS 영상에 비해서 KOMPSAT-2 영상은 연구지역 내에서 지역별로 뚜렷한 반사도의 차이를 보이지 않으므로, 모호한 차이를 보이는 지역들 간의 분류 시 오분류가 발생되었을 가능성이 큰 것으로 판단된다. Fig. 3은 이 연구에서 사용된 IKONOS와 KOMPSAT-2 영상의 digital number (DN) 값을 0과 1사이의 값으로 정규화 (Normalize)하여, Fig. 2a의 축선 A-A'의 값을 비교한 것이다. 두 개

의 영상은 비슷한 경향의 DN 값 분포를 보이고 있으나, KOMSAT-2 영상보다 IKONOS 영상에서 인접한 지역 간의 값 차이를 뚜렷하게 보여 좀 더 거친 profile을 나타내는 것으로 판단된다.

4.2. 갯벌 표층 퇴적상 변화

Table 6은 GIS 분석 기법으로 활용하여, 2000년대 초의 퇴적상 분류도를 기반으로, 각 표층 퇴적상이 IKONOS DN값의 각 등급별로 어떻게 분포하는지를 정량적으로 나타낸 것이다. 또한 Table 7은 2000년대 후반의 퇴적상 분류도를 이용하여 KOMPSAT-2 DN값의 등급별 퇴적상 분포를 나타낸 것이다. Table 6에서 보듯이 2000년대 초반의 황도 갯벌의 표층 퇴적상은 광학반사도가 낮은 최상위 그룹의 91.23%가 모래 퇴적상인 것으로 나타났다. 광학반사도가 높아지면서 모래 퇴적상이 차지하는 비율이 낮아지는 경향을 보이고, 광학반사도가 높은 상위 6번째 그룹부터 필 퇴적상이 차지하는 비율이 더 높아진다. 필 퇴적상이 차지하는 비율은 점진적으로 높아져 광학반사도가 높은 2번째

Table 6. Distribution of each surface sediments according to the DN value of IKONOS satellite image in Hwangdo tidal flat

Class	Domain	Mud flat (%)	Mixed flat (%)	Sand flat (%)	Sand shoal (%)	
86-170	44,321	0.37	8.40	91.23	0.00	
170-179	44,941	2.87	10.08	87.05	0.00	
179-187	46,750	9.34	15.11	75.55	0.00	
187-194	42,023	17.36	19.00	63.64	0.00	
IKONOS Digital Number	194-201	41,284	27.33	19.21	53.47	0.00
	201-209	43,283	40.46	22.38	37.16	0.00
	209-218	39,244	50.17	26.64	23.18	0.01
	218-230	39,895	67.73	20.98	11.20	0.09
	230-246	38,540	91.32	4.47	1.58	2.63
	246-527	37,846	83.95	0.04	0.01	16.00

Table 7. Distribution of each surface sediments according to the DN value of KOMPSAT-2 satellite image in Hwangdo tidal flat

	Class	Domain	Mud flat (%)	Mixed flat (%)	Sand flat (%)	Sand shoal (%)
KOMPSAT-2 Digital Number	0-245	44,515	0.24	2.14	70.70	0.00
	245-252	43,561	0.49	6.68	92.83	0.00
	252-258	45,952	3.19	8.29	88.52	0.00
	258-264	44,111	12.89	14.62	72.47	0.02
	264-270	49,461	24.00	25.52	50.46	0.02
	270-275	42,613	38.04	28.28	33.63	0.04
	275-280	44,022	50.37	32.17	17.33	0.12
	280-285	39,510	58.43	32.00	9.27	0.30
	285-292	35,778	67.85	24.81	6.29	1.05
	292-477	35,222	72.42	13.92	4.34	8.99

Table 8. Comparative analysis of class coverage from results classification

Sedimentary facies	2001			2008		
	Pixels	Area (m ²)	Area ratio	Pixels	Area (m ²)	Area ratio
Mud flat	157,995	2,527,920	37.20	130,987	2,095,792	31.39
Mixed flat	62,206	995,296	14.65	79,761	1,276,176	19.11
Sand flat	197,344	3,157,504	46.46	202,824	3,245,184	48.60
Sandbar	7,200	115,200	1.70	3,756	60,096	0.90
Total	424,745	6,795,920	100.00	417,328	6,677,248	100.00

그룹 및 최상위 그룹에서는 각각 91.32%와 83.95%가 펄 퇴적상인 것으로 나타났다. Table 7에서 보듯이 2000년대 후반의 황도 갯벌 표층 퇴적상 역시 광학반사도가 낮은 지역에서 모래 퇴적상이 높은 비율을 차지하고 있는 경향이 잘 나타나고 있다. 두 시기에 있어, 전체적인 모래 퇴적상과 사주의 분포 경향은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타난다. 또한 2000년대 초반과 마찬가지로, 광학반사도가 높은 상위 6번째 그룹부터 펄 퇴적상이 가장 높은 비율을 차지하면서 그 비율 또한 점차 높아진다. Table 7에서 주목할 것은, 펄 퇴적상의 감소와 함께 혼합 퇴적상의 비약적인 증가이다. 2000년 초반에 비해 광학반사도가 낮은 지역에서의 혼합 퇴적상의 분포가 상대적으로 감소하였으나, 광학반사도가 높아지면서 급격히 늘어나고 있음을 알 수 있다. 이와 함께, 펄 퇴적상의 분포는 2000년 초반에 비해 그 비율이 뚜렷하게 감소하였다. 이러한 결과는, 2000년대 초반 이후에 황도 갯벌에서는 모래 퇴적상의 분포 양상에는 뚜렷한 변화가 없었으나, 전반적으로 모래 성분이 증가했음을 지시하는 결과로 판단된다. 즉, 펄 퇴적상 분포 지역과 혼합 퇴적상 지역에 모래 입자가 증가하여 펄 퇴적상의 상당 부분이 혼합 퇴적상으로 변화되었음을 지시해 주는 결과로 분석된다. Fig. 2b에서 보듯이, 연구지역 북쪽의 황도 주변

으로 과거 펄 퇴적상으로 분류된 지역이 현저히 줄어들고 혼합 퇴적상으로 분류된 지역으로 변화되었다. 또한, 황도 갯벌의 전반에서 혼합 퇴적상 분포 지역의 면적이 늘어났음을 알 수 있다.

두 시기 퇴적상 변화를 정량적으로 비교하기 위하여, 퇴적상 분류 결과 이미지에서 각 퇴적상별로 점유하고 있는 격자수를 계산하고, 이로부터 점유면적의 백분율을 구하였다 (Table 8). 펄 퇴적상의 경우, 37.20%에서 31.39%로 5.81%나 면적이 감소한 것을 알 수 있다. 반면에, 혼합퇴적상은 2000년대 초반에 비해 2000년대 후반에 4.46%가 증가한 것으로 나타났으며, 모래 퇴적상 또한 2.14% 증가하였다. 사주는 0.8% 감소한 것으로 분석되어 뚜렷한 변화가 없는 것으로 나타났다. 결과적으로 두 시기 동안 펄 퇴적상의 면적이 대폭 감소하고, 반면에 혼합 퇴적상 및 모래 퇴적상의 면적이 증가한 것으로 분석되었다.

퇴적상 분류 결과로부터 관측한 퇴적상 변화 분석 결과를 현장조사 자료 비교를 통해 확인하였다. Fig. 4는 2004년 3월과 2009년 5월에 취득된 샘플의 위치를 모래입자 비율과 함께 표현한 것이다. 또한 분홍색으로 표현된 부분은 2000년대 초반에는 펄 퇴적상이었으나, 2000년대 후반에 혼합 퇴적상으로 변화된 것으로 관측된 지역이다. 황도와 인접한 갯벌 북서쪽의 "A" 지

역과 갯벌 남서쪽의 “B” 지역에서 확인할 수 있듯이, 2004년 샘플 자료에 비해 2009년 샘플 자료의 모래입



Fig. 4. Locations where the mud flat facies changed into the mixed flat facies (area in pink) overlaid with the sampling positions acquired on March, 2004 (points in red), and May, 2009 (points in blue) with the percentage of grains larger than very fine sand (0.0625 mm).

자 구성 비율이 현저히 증가하였음을 알 수 있다. 그러나 퇴적상이 바뀌지 않은 갯벌의 중앙 부분과 최남단 부분에서는 모래입자 구성 비율의 뚜렷한 변화가 일어나지 않았음을 확인할 수 있다. 2004년의 샘플링 위치와 동일한 위치에서 입도자료를 비교하기 위하여, 2010년 5월 동일위치에서 샘플링을 실시하였다. Table 9는 2004년 시료 중 펄 퇴적상에 해당하는 샘플 위치에서 취득한 입도 자료를 서로 비교한 결과이다. 총 9개의 샘플 위치 중 4개 정점이 혼합 퇴적상으로 변화하였으며, C1 및 C2의 경우는 여전히 펄 퇴적상이지만 모래 입자 비율이 증가하여 혼합 퇴적상에 가까운 25% 이상의 모래 입자 구성 비율을 보였다. 반면에, G1 및 C3 정점은 모래 입자의 비율이 20% 이하로 감소한 것으로 나타났다. G6 정점의 경우, 사주에 가까운 95.83%의 비율로 변화한 것으로 나타났으나, 이는 분석 상의 오류를 확인해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론 및 토의

이 연구에서는 공간해상도 4 m 급의 고해상도 위성인 IKONOS 및 Kompsat-2 영상자료와 현장조사 자료를 기반으로 2000년대 초와 2000년대 후반의 천수만 황도 갯벌의 표층 퇴적상 분포의 변화 양상을 파악하였다.

고해상도 영상자료와 현장조사 자료를 기반으로 객체 기반 분류법에 의해 각 시기의 퇴적상 분류도를 작성한 결과, 2000년대 초의 퇴적상 분류도의 분류정확도는 90.7%, 2000년대 후반 분류도의 정확도는 89.3%로 각각 계산되었으며, 두 시기 모두 비교적 높은 분류 정확도를 보였다. 일부 정점에서 오분류된 결과가 나왔으나, 전반적으로 각 위성자료의 광학 특성

Table 9. Comparison between grain-size samples of March, 2004 which had been mud flat facies and that of May, 2010 at the same locations

Station	2001			2008		
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
G1	27.60	49.98	22.42	18.23	56.81	24.93
G6	16.89	58.45	24.66	95.83	3.03	1.08
G14	17.85	50.79	31.36	46.64	37.43	15.93
G17	26.77	51.47	21.76	41.27	41.18	17.55
G21	10.41	53.86	35.73	59.11	27.52	13.37
G24	18.46	49.35	32.19	38.92	39.20	21.88
C1	22.58	50.74	26.68	25.96	47.93	26.08
C2	19.23	56.22	24.55	26.59	50.64	22.49
C3	26.94	53.89	19.17	17.43	58.89	23.68

과 분류 결과 퇴적상이 매우 잘 일치하는 결과를 보인 바, 객체기반 분류방법에 의한 고해상도 영상 자료 기반의 퇴적상 분류도 작성이 매우 효과적이라고 할 수 있다.

GIS 분석 방법을 적용하여 황도 갯벌의 표층 퇴적상과 영상의 광학반사도 간의 상관관계를 정량적으로 분석한 결과, 두 시기 모두 펄 퇴적상에서는 광학반사도와 뚜렷한 양의 상관관계를, 모래 퇴적상에서는 광학반사도와 뚜렷한 음의 상관관계를 보였다. 이는 펄 퇴적상 또는 혼합 퇴적상 지역은 지형이 상대적으로 높은 지역에 위치하여 노출시간이 길어 잔존지표수가 남아 있지 않게 됨에 따라 광학 반사도가 높게 나타나고, 모래 퇴적상 지역은 상대적으로 낮은 지역에 위치하고 있어 노출시간이 짧아 지표잔존수가 남게 되어 낮은 광학 반사도를 보이는 황도 지역의 특징을 잘 나타내는 것이다.

퇴적상 분포에 대한 정량적 분석 결과를 토대로, 두 시기에 대해 황도 갯벌 표층의 각 퇴적상의 면적 비율을 계산하고, 그 기간 동안의 변화 양상을 파악하였다. 두 시기 모두 광학반사도가 낮은 최상위 그룹에서 모래 퇴적상이 가장 높은 분포를 보였으며, 광학반사도가 높아짐에 따라 모래 퇴적상이 차지하는 비율이 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 2000년 초반에는 광학반사도가 높은 그룹에서 펄 퇴적상이 가장 우세하게 나타나고 그 비율이 지속적으로 높아졌으나, 2000년대 후반에는 광학반사도가 높은 그룹에서 혼합 퇴적상의 비율이 뚜렷하게 증가한 것으로 분석되었다. 이는 모래 퇴적상의 분포 양상에는 큰 변화가 없으나, 전반적으로 0.0625 mm 이상 입자 크기를 갖는 모래 성분이 증가하여 펄 퇴적상의 상당 부분이 혼합 퇴적상으로 전이되었음을 지시해 주는 결과로 분석된다. 각 퇴적상별로 점유면적 비를 분석한 결과, 2000년대 초반에 비해 2000년대 후반 펄 퇴적상은 5.81% 감소하고 혼합 퇴적상과 모래 퇴적상은 각각 4.46%와 2.14% 증가한 것으로 나타났다. 사주의 면적에는 뚜렷한 변화가 없었다. 이러한 변화는 두 시기의 입도 분석 자료 비교 및 추가적인 현장조사를 통해서도 확인할 수 있었다. 연구지역 북서쪽에서는 황도와 안면도를 잇는 연육교 건설 공사가 최근 몇 년 동안 진행되어 왔으며, 이로 인한 퇴적물의 이동 양상의 변화가 황도 갯벌의 퇴적상 분포에 영향을 주었을 가능성이 있을 것으로 판단된다. 특히, 북쪽의 황도 주변의 육지와 인접한 지역에서 퇴적상 분포의 변화가 많이 일어난 것은 이에 대한 가능성이 큼을 시사한다. 따라서 향후 퇴적 및

침식 관계, 조류의 변화, 그에 따른 조류로 형태의 변화 등 추가적인 연구를 통해 황도 갯벌 표층 퇴적상 변화의 원인을 밝히기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이 연구의 결과, 고해상도 위성영상 자료와 현장조사 자료 및 GIS 분석을 통해 갯벌 표층 퇴적상 분포의 변화 양상을 모니터링하는 것이 가능한 것으로 판단된다. 특히, 이 연구의 결과를 계기로 국내 고해상도 위성영상인 다목적실용위성 2호 (Kompsat-2)는 물론, 2010년 발사 예정인 다목적실용위성 3호 (Kompsat-3)가 갯벌의 퇴적환경 연구에 적극적으로 활용되기를 기대한다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원의 “해양위성센터 기능고도화 사업 (PE98620)”과 공공기술연구회의 “위성자료 공공활용 연구 - 해양분야 위성촬영연구 사업 (2011년도 과제)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Bartholdy, J. and Folving, S. (1986) Sediment classification and surface type mapping in the Danish Wadden sea by remote-sensing, *Netherlands Journal of Sea Research*, v.20(4), p.337-345.
- Blaschke, T. and Strobl, J. (2001) What's wrong with pixels? Some recent development interfacing remote sensing and GIS, *GeoBIT/GIS*, v.6, p.12-17.
- Choi, J.K., Ryu, J.H., Lee, Y.K., Yoo, H.R., Woo, H.J. and Kim, C.H. (2010) Quantitative estimation of intertidal sediment characteristics using remote sensing and GIS, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, v.88(1), p.125-134.
- Conchedda, G., Durieux, L. and Mayaux, P. (2008) An object-based method for mapping and change analysis in mangrove ecosystems, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, doi:10.1016/j.isprsjrs.2008.04.002.
- Desclee, B., Bogaert, P. and Defourny, P. (2006) Forest change detection by statistical object-based method, *Remote Sensing of Environment*, v.102, p.1-11.
- Folk, R.L. (1968) A review of grain size parameters, *Sedimentology*, v.6, p.73-93.
- Kim, Y.S. (1989) The sedimentology of Holocene intertidal deposits in Cheonsu Bay, west coast of Korea (Korean ed.), *Jour. Korean Earth Science Society*, v.10(1), p.134-151.
- Rainey, M.P., Tyler, A.N., Gilvear, D.J., Bryant, R.G. and McDonald, P. (2003) Mapping intertidal estuarine sediment grain size distributions through airborne remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, v.86, p.480-490.

- Ryu, J.H. (2001) Quantitative Estimation of Geomorphologic Change and Analysis of Sediment Characterization in Gomso Bay Tidal Flat by Remote Sensing (Korean ed.), Ph.D. dissertation of Yonsei University.
- Ryu, J.H., Won, J.S. and Min, K.D. (2002) Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: a case study in Gomso Bay, Korea, *Remote Sensing of Environment*, v.83, p.442-456.
- Ryu, J.H., Choi, J.K., Na, Y.H. and Won, J.S. (2003) Characteristics of Landsat ETM+ image for Gomso Bay tidal flat sediments (Korean ed.), *Korean Journal of Remote Sensing*, v.19(2), p.117-133.
- Ryu, J.H., Woo, H.J., Park, C.H. and Yoo, H.R. (2005) Classification of sedimentary facies using IKONOS image in Hwangdo tidal flat, Cheonsu Bay (Korean ed.), *Jour. Korean Wetland Society*, v.7(2), p.6-31.
- So, J.G., Jeong, G.T. and Chae, J.W. (1998) Numerical Modeling of Changes in Tides and Tidal Currents Caused by Embankment at Chonsu Bay (Korean ed.), *Jour. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, v.10(4), p.151-164.
- Walsh, S.J., McCleary, A.L., Mena, C.F., Shao, Y., Tuttle, J.P., Gonzalez, A. and Atkinson, R. (2008) QuickBird and Hyperion data analysis of an invasive plant species in the Galapagos Islands of Ecuador: Implications for control and land use management, *Remote Sensing of Environment*, v.112(5), p.1927-1941.
- Woo, H.J., Choi, J.U., Ryu, J.H., Choi, S.H. and Kim, S.R. (2005) Sedimentary Environments in the Hwangdo Tidal Flat, Cheonsu Bay (Korean ed.), *Jour. Korean Wetland Society*, v.7(2), p.53-67.
- Yates, M.G., Jones, A.R., McGrorty, S. and Goss-Custard, J.D. (1993) The use of satellite imagery to determine the distribution of intertidal surface sediments of the Wash, England, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, v.36(4), p.333-344.

2010년 10월 30일 원고접수, 2011년 2월 24일 게재승인