Article

위성영상 분석기술을 이용한 시흥갯벌의 지형 및 노출시간 분석

구본주* · 김민규

한국해양과학기술원 해양생태계연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Analysis on Topography and Exposure Duration of Siheung Tidal Flat Using Remote Sensing Techniques

Bon Joo Koo* and Minkyu Kim

Marine Ecosystem Research Division, KIOST
Ansan 426-744, Korea

Abstract : In order to investigate the topography and exposure duration of the Siheung tidal flat, tidal ranges and DEM constructed by remote sensing techniques were analyzed. A cross-sectional diagram of the intertidal area reveals that it is relatively flat in the upper zone and then abruptly plunges into the bottom of the main channel where elevations increase in an upstream direction. The waterline during the Highest Low Water (HLW) is drawn back to the bottom of the channel at the middle part of the tidal flat and is formed along the slant of the channel during the Lowest High Water (LHW). The intertidal zone is located between -410 cm and 510 cm in terms of elevation and its total area is 0.65 km². An area between the Highest High Water (HHW) and Lowest High Water (LHW), occupying about 80% of the total area, occupies 0.52 km² of total area and accounts for 56% of the exposure duration. The boundary of wetland protection area in the Siheung tidal flat did not exactly coincide with the intertidal regime and differs by more than 15%. This study, which precisely analyzed the tidal flat area, tidal environment, and topography, would be useful in making a conservation plan and in learning how to use a wetland protection area in a sustainable manner.

Key words : digital elevation model, remote sensing, Siheung tidal flat, wetland protection area

1. 서 론

무안갯벌이 국토해양부 고시 제2008-718호에 의거하여 2001년 12월에 제1호 습지보호지역으로 지정된 이후 총 11개 지역이 습지보호지역으로 지정되어 보호 및 관리되고 있다(국토해양부 2012a). 시흥갯벌은 국내 유일이자 세계적으로도 찾아보기 힘든 사행성 내만갯골로 서식지 특이성이 뛰어날 뿐만 아니라, 희귀식물인 모새달 군락, 천연기념물인 황조롱이, 2종 멸종위기보호종인 붉은발말뚝

게 등이 서식하는 환경으로 그 생태적 가치가 높은 지역이다. 시흥갯벌은 이러한 생태적 가치를 인정받아 2012년 2월에 제 11호 습지보호지역으로 지정되었다.

조석, 퇴적물 성질과 노출시간, 면적 등과 같은 물리적 요인들은 갯벌환경의 특성을 이해하고 환경변화를 추적하는데 있어 중요한 요인이다(Rainey et al. 2000). 이러한 요인들에 대한 과거조사는 짧은 노출시간, 이동수단의 제한 등 시·공간적 접근성의 제한으로 인하여 어려움을 수반하였다(Ryu et al. 2008). 그러나 최근에는 인공위성의 분광 해상도 및 시·공간 해상도의 발전을 통해 인공위성을 이용한 갯벌 모니터링 조사방법이 증가추세이며 향후

*Corresponding author. E-mail : bjkkoo@kiost.ac

활용범위도 증가할 것으로 전망된다(Butler and Walsh 1998; Ryu et al. 2008).

그러나 시흥갯벌 습지보호지역을 포함한 경기·인천 갯벌에 대한 기존 연구는 식생이나 대형저서동물 등과 같은 생물학적 관점에서의 연구(최 등 1998; 홍 2000; 신과 안 2005)가 대부분을 차지하며, 인공위성 영상분석을 통한 갯벌환경에 대한 연구는 김 등 (2001)과 윤 (2001) 등의 연구만이 있을 뿐이다. 특히 시흥갯벌 습지보호지역의 갯벌 환경에 대한 연구는 국토해양부 (2012b)가 주관한 갯벌 기본조사의 일환으로 수행된 퇴적상에 대한 연구를 제외하고는 전무한 실정이다. 이 또한 습지보호구역 바깥쪽의 3개 정점에서 수행되었을 뿐으로 습지보호지역의 환경 및 생태를 파악하기 위한 기반 연구는 크게 미흡하였다.

이 연구는 인공위성영상 분석기술을 이용하여 습지보호 구역으로 지정된 시흥갯벌의 첫째, 수치표고모델(Digital elevation model, 이후 DEM)을 생성하고, 둘째, 조석환경 모니터링 통해 노출시간을 분석하며, 셋째, 지형 분석과 면적을 산출하는 것을 목적으로 수행되었다. 이는 시흥갯벌의 보전대책 수립 및 지속가능한 이용을 위한 기반자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구방법

연구지역

인공위성영상 분석을 통해 갯벌면적을 산출하기 위해 방산대교에서부터 장현천의 갑문까지를 연구지역으로 설정하였다(Fig. 1). 시흥시 월곶포구 근처의 방산대교에서부터 내만으로 깊숙이 형성된 V자형 갯골과 그 주변 염습지를 포함하며, 좌표상으로는 위도 37도 23분~37도 24분과 경도 126도 45분~126도 48분의 위경도에 해당하는 지역이다. RTK-DGPS를 이용한 실고도 측량을 위하여 조사

선 1~조사선 4을 설정하였다.

조위 및 노출시간 분석

시흥갯벌의 수위변화 분석을 위해 인천조위관측소에서 2011년 8월 1일부터 2012년 7월 31일까지 10분 간격으로 측정된 해양조사원의 조위자료를 이용하였다. 이로부터 Excel 프로그램을 이용하여 약최고고조위(HHW: Highest High Water), 평균고조위(MHW: Mean High Water), 최저고조위(LHW: Lowest High Water), 최고저조위(HLW: Highest Low Water), 평균저조위(MLW: Mean Low Water), 그리고 약최저저조위(LLW: Lowest Low Higher Water)를 산출하였다. 각 조위는 국토해양부 (2009)에서 지정한 기준에 의해 산출되었다. 그리고 상기 6개의 조위에 해당하는 갯벌상의 각 고도에서 분석기간 동안의 총 노출시간, 최대연속노출시간, 평균연속노출시간, 최소연속노출시간을 각각 분석하였다.

갯벌지형 분석

수치표고모델(DEM)

본 연구에서는 시흥갯벌 지형 분석 및 면적 산출을 위해 갯벌 DEM을 생성하였으며, DEM은 Ryu et al. (2002)에 의한 waterline법을 이용하여 작성되었다. Waterline 및 DEM을 분석하기 위하여 획득된 모든 영상은 지상기준점(Ground Control Points, GCPs)을 선정하여 동일 좌표로 기하보정을 하였으며, 이 과정에서 root mean square(rms) 오차는 0.4 cm 이하였다. 기준기하보정이 실시된 영상으로부터 디지털이징을 통해 waterline을 수치화 하였으며, 이 과정에는 상용 프로그램인 ER-Mapper가 이용되었다.

해안선(waterline)의 추출은 density slicing 방법을 이용하였다. 이 방법은 물과 조간대의 경계를 이루는 영상의 digital number(DN) 값을 찾아내어 이를 경계로 두 지역을

Fig. 1. Study site and transect lines for height measurement with RTK-DGPS

Table 1. Date and absolute elevation of the waterline of Landsat 7 images

Satellite	Date	Absolute elevation of the waterline (cm)
Landsat	2001-12-20	-57
	2002-09-10	-154
	2006-10-07	-450
	2007-12-13	-250
	2008-12-15	-358
	2009-06-01	280
	2011-03-11	51
	2012-10-23	151

구분하는 것으로 매우 간단하고 빠르게 해안선을 추출할 수 있는 방법이다. 특히, 상용 프로그램에서 히스토그램(histogram)을 조절한 후 래스터(raster) 자료의 경계를 빠르게 벡터(vector)화 할 수 있으므로 많은 자료를 사용할 경우 편리하게 사용할 수 있다. 갯벌지형에서 물과 조간대의 경계가 가장 뚜렷하게 나타나는 Landsat 7영상 4번 밴드를 해안선 추출에 이용하였다(유 2001). 조위가 다른 각 영상으로부터 추출된 해안선과 현장조사 시 획득된 수준측량 자료를 이용하여 최소곡률법(minimum curvature)에 의해 내삽을 진행하였으며 이를 통해 DEM을 생성하였다.

시흥갯벌의 면적을 분석하기 위한 DEM 생성시 사용된 영상은 Landsat 7영상이며 2001년부터 2012년까지의 기간 동안 총 8장의 영상을 이용하였다(Table 1). 2003년부터 Landsat 7 위성의 scan line corrector (SLC)의 고장으로 영상의 약 22%에 해당하는 지역이 영상으로 획득되지 않아 검은색으로 표시되는 현상이 나타난다. 본 분석에 사용된 위성영상 중 2장은 2003년 이전의 영상으로 SLC 고장의 영향을 받지 않았으며, 나머지 6장의 영상은 상기 고장의 영향을 대부분 받지 않은 위성영상이었다. SLC고장의 영향을 받는 연구지역은 영상이 획득된 시간대에 노출된 지역이었으므로 waterline을 추출하는 과정에는 영향을 받지 않았다. Waterline 방법에 의해 생성되는 DEM의 정

밀도는 waterline 추출의 정확도와 추출된 해안선에 얼마나 정밀한 절대고도 값을 대입할 수 있는지에 의해 결정된다(Choi et al. 2011). 추출된 waterline에 절대고도 값을 대입함으로써 조위가 측정된 조위관측소와 연구지역 간의 시·공간적 조위 오차값을 보완하고 DEM의 정밀도를 높일 수 있다. 보정에 사용된 실고도 측량값은 국토지리정보원의 안양 456 삼각점으로부터 수준측량에 의해 유도되었다. 추출된 waterline은 2012년 6월에 획득한 조사선 1~조사선 4의 58개 정점에서 RTK-DGPS를 이용하여 실측한 고도 자료와 비교를 통해 정밀보정을 거친 후 분석에 이용되었다. 실고도 측정에 사용된 Leica Geosystems사의 RTK-DGPS는 X, Y 좌표 오차가 약 1 cm 이내이며 고도 오차(Z 좌표)는 약 2 cm 이내이다. 측정된 고도자료는 조위 자료와 동일하게 평균해수면(Mean Sea level) 기준 고도로 환산하여 정밀 보정과정에 사용되었다.

갯벌면적 산출

상기 6개의 기준 조위에 해당하는 갯벌상의 고도를 DEM으로부터 추출하여 각 고도간의 면적과 갯벌 전체 면적을 산출하였다. 전체 면적은 약최고조위(HHW)와 약최저조위(LLW) 높이의 사이 구간을 대상으로 산출하였다. 또한 갯벌지역은 6개의 조위(약최고조위(HHW), 평균고조위(MHW), 최저고조위(LHW), 최고저조위(HLW), 평균저조위(MLW), 약최저조위(LLW))를 기준으로 각 조위 형성시 노출된 면적을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

조석환경 및 수위

조위분석에 이용된 2011년부터 2012년까지의 조사기간(12개월) 동안의 조석양상을 Fig. 2에 나타내었다. 조사기간 동안 약최고조위(HHW)는 평균해수면 기준 492 cm, 약최저조위(LLW)는 -515 cm였으며, 최대조차는 1,007 cm에 달했다. 그리고 최저고조위(LHW)는 63 cm, 최고저조위(HLW)는 -67 cm로 최저조차는 130 cm

Fig. 2. The real-time tidal variation measured in Incheon tidal station

였다. 평균고조위(MHW)와 평균저조위(MLW)는 각각 303 cm와 -322 cm로 평균조차는 625 cm였다.

갯벌지형과 노출시간

시흥갯벌의 지형은 대부분의 지역에서 상부의 평탄한 지역이 10 m에서 100 m의 길이로 형성되어 있었으며, 하부에서는 급격한 기울기로 수로와 연결되는 구조를 보였다(Fig. 3). 평탄한 지형은 하류지역(조사선 2~조사선4 구간)에서 상대적으로 넓었으며, 그 넓이는 상류로 갈수록 감소하였다. 수로 바닥의 고도는 상류지역으로 갈수록 증가하는 경향이 뚜렷하였다. 하류의 수로기준 북측지역과 상류 일부지역은 직접적으로 해수영향을 덜 받는 지역이었으며, 이곳에는 염생식물이 광범위하게 서식하였다. 하류의 수로기준 남측지역(평탄한 지형)은 약최고고조위(HHW) 시에는 해수에 잠기는 환경이었다. 한편, 조석의

차가 적은 조금 때의 만조(LHW)시에는, 하류에서는 V 자형 갯골이 형성되는 고도 근처에 해수면이 형성되었으나, 상류 구간에서는 수로 바닥까지 해수가 침범하지 못했다(Fig. 3, Fig. 5C). 약최고저조위(HLW) 형성시에는 V 자형 수로를 따라 일부 하류구간이 해수에 덮혔으나(Fig. 5D), 약최저저조위(LLW) 시에는 전체 갯골로부터 해수가 완전히 빠져 나가는 양상을 보였다(Fig. 5E). 시흥갯벌 내에서 가장 낮은 고도는 방산대교 근처의 V 자형 골에서 관측되었으며, 그 높이는 평균해수면 기준 -410 cm에 해당하였다. 즉, 조사대상지역은 최고저조위(HLW) 보다 높은 고도에 해당하였으며, 따라서 조금기간을 제외하면 간조 시에는 대부분 지역이 대기에 노출되는 특성을 보였다. 지형적으로는 상류지역으로 향할수록 고도가 증가하는 경향을 보였으며, 특히 V 자형 골의 고도는 장현천 인근 상류쪽으로 향하며 증가하는 경향이 뚜렷했다.

Fig. 3. The cross-sectional diagram of study area indicating slope and sea level for 3 tidal height on Siheung tidal flat. Numbers in the parentheses mean the height of bottom for 4 transect lines

Table 2. Distribution of exposure time at 6 different tidal levels for Aug. 2011-Jul. 2012

	Tidal level					
	HHW 492 cm	MHW 303 cm	LHW 63 cm	HLW -67 cm	MLW -322 cm	LLW -515 cm
Total	365 days	328 days	204 days	146 days	29 days	~1 hrs
Max exposure time	335 days	10 days	12 hrs	7 hrs	4 hrs	<1 hrs
Min exposure time	30 days	9 hrs	6 hrs	2 hrs	<1 hrs	<1 hrs
Mean exposure time	182 days	22 hrs	7 hrs	5 hrs	2 hrs	<1 hrs

분석된 6개 조위가 형성되었을 때 갯벌상의 해당고도에서의 노출시간을 계산하였다(Table 2). 노출시간 분석에 이용된 시간은 총 365일이었다. 약최고고조위(HHW) 형성 시 해당 고도에서는 전체 분석기간 동안 1회 해수에 침수되었으며 침수시간이 10분으로 짧아 총 노출시간은 약 365일이었다. 반대로 약최저저조위(LLW) 형성 시 해당 고도는 1회만 노출되었으며 총 노출시간은 약 1시간이었다. 최저고조위(LHW)에 해당하는 고도에서 총 노출시간은 204일이었으며, 최대 연속노출시간은 약 12시간이었다. 이 고도에서 최소 연속노출시간은 6시간이었으며, 평균 연속노출시간은 약 7시간이었다. 최고저조위(HLW)의 해당고도에서 총 노출시간은 146일이었으며, 최대 연속노출시간은 약 7시간이었다. 이 지역의 최소 연속노출시간은 2시간이었으며, 평균 연속노출시간은 약 5시간이었다.

갯벌지형과 면적

Waterline 방법을 이용하여 시흥갯벌의 DEM을 생성하였다(Fig. 4). 수준측량을 실고도 자료의 절대고도 값과 DEM 상의 고도값을 비교하여 검증한 결과, 시흥갯벌 DEM의 rms 오차는 9.4 cm, 표준편차 4.4 cm의 정밀도를 나타냈다. 곰소만 조간대 DEM의 rms 오차 10.9 ± 7.3 cm (유 2001)와 새만금 조간대 DEM의 rms 오차 9.9 ± 9.8 cm(나 2003)와 비교하였을 때, 본 연구에서 생성된 DEM은 다른 지역에 적용한 DEM과 유사한 수준의 정밀도를 나타냈다.

DEM으로부터 6개의 기준 조위에 해당하는 고도를 추출하였으며(Fig. 5), 각 조위 형성 시 노출된 갯벌의 면적을 Table 3에 나타내었다. 평균고조위(MHW), 최저고조위(LHW), 최고저조위(HLW), 평균저조위(MLW) 시의 해수에 잠기는 지역의 면적은 각각 0.29 m^2 , 0.52 km^2 , 0.29 km^2 , $\approx 0.65 \text{ km}^2$ 였다. 약최저저조위(LLW)일 때의 해수면은 시흥갯벌의 최저고도보다 낮은 고도에 위치하였기 때

문에 조사지역 내 해수침범을 받는 실제 조간대 면적은 0.65 km^2 였다. 이 값은 습지보호지역 내에서 실제로 해수 침범의 영향을 받는 시흥갯벌의 면적을 의미한다.

국토해양부에서 고시한 시흥갯벌 습지보호지역의 면적은 0.71 km^2 이다(국토해양부 2012a). 이 면적은 국토지리정보원 수치지도(ver 2.0, 1/5000축적)를 이용하여 GIS 분석기법으로 산출되었다. 반면, 본 연구에서 DEM을 분석하여 산출된 갯벌의 면적은 0.65 km^2 로 국토해양부에서 산출한 습지보호지역 면적에 비해 약 15% 이상 작았다. 국토해양부에서 설정한 습지보호지역은 설정된 48개의 정점을 이은 선과 수치지도 상의 해안선을 순차적으로 연결한 면적 내의 지적공부에 등록된 토지가 제외된 공유수면만을 대상으로 하였다(Fig. 6). 국토해양부에서 제공한 면적정보는 습지보호지역의 면적이며, 습지보호지역 내의 실제 갯벌면적과는 차이가 있었다.

본 연구 결과는 일부의 한계를 포함하고 있다. Waterline 방법은 다음 세 가지 가정을 필요로 한다(유 2001). (1) Waterline은 영상획득 당시의 조석상태를 반영하는 등고선이다. (2) waterline 방법에 이용된 위성자료의 획득시기 사이에 조간대의 지형변화는 없다. (3) 추출된 waterline의 절대고도를 알고 있다. 실고도 측량 값과 DEM의 고도를 비교했을 때 rms 오차가 $9.4 \pm 4.4 \text{ cm}$ 으로 다른 연구의 정밀도와 유사한 수준이었기 때문에 본 연구결과는 첫 번째 가정을 만족한 것으로 판단되었다. 그리고 waterline에 해당하는 조위 값 대신 실고도 측량 값을 추출된 해안선에 대입함으로써 세 번째 가정도 만족시킬 수 있었다. 두 번째 가정을 만족시키기 위해서는 센서가 탑재된 비행기를 이용하여 하루에 여러 차례 자료를 획득하거나 많은 위성 자료를 단기간에 받아야 한다(유 2001). 그러나 시흥갯벌에서 생성된 DEM의 경우, 분석에 이용된 각 영상의 촬영시기가 최대 11년의 차이가 있었기 때문에 빠르게 변화하는 조간대 퇴적환경을 고려한다면, DEM의 오차를 발생케 하는 원인으로 작용했을 것으로 판단된다.

Fig. 4. Vertical distribution described from DEM of Siheung tidal flat (rmse: $9.4 \pm 4.4 \text{ cm}$)

Fig. 5. Areas flooded by sea water for 5 different sea levels. Area for LLW omitted as exposed for all area

Table 3. Exposed intertidal areas at 6 different tidal levels

	Tidal level					
	HHW	MHW	LHW	HLW	MLW	LLW
	492 cm	303 cm	63 cm	-67 cm	-322 cm	-515 cm
Area	0 km ²	0.29 km ²	0.52 km ²	0.59 km ²	≈0.65 km ²	0.65 km ²
Total						0.65 km ²

Fig. 6. The areal comparison of wetland protection area in Siheung tidal flat measured by (A) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (inner green line; 0.71 km²) and (B) tidal flat affected on flooding of sea water analysed in this study (inner red line; 0.65 km²)

5. 결 론

시흥갯벌에서 해수 침범의 영향을 받는 조건대는 평균 해수면 기준 -410 cm~492 cm 고도 범위에 위치하였으며, 그 면적은 0.65 km²이었다. 시흥갯벌의 기울기는 상부에서 평탄하다 수로 쪽으로 가면서 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 수로바닥의 고도는 하류에서 상류로 갈수록 점진적으로 증가하였다. 최저저조위(HLW) 시에는 갯골 중부 지역의 수로바닥 위치까지 해수면이 형성되었으며, 최저고조위(LHW) 시의 해수면은 V 자형 갯골이 시작되는 높이를 따라 형성되었다. 약최고고조위(HHW)와 최저고조위(LHW) 사이에 해당하는 지역(면적: 0.52 km²)이 시흥갯벌 면적 중 약 80%를 차지하였으며, 이 지역은 총 시간

의 56% 이상 대기에 노출되었다. 이 지역은 2종 멸종위기종인 붉은발말뚝개 및 희귀 염생식물인 모새달 군락의 서식지로 시흥갯벌 습지보호지역의 보전 및 관리 계획을 수립하는데 있어 그 관심이 집중 될 필요가 있었다. 본 연구는 시흥갯벌 내 서식하는 보호종들의 서식면적과 현존량을 파악하는 등의 습지보호지역의 보전대책 수립 및 지속 가능한 이용을 위한 연구의 기반자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 한국해양과학기술원 기관고유사업(PE98917)의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 국토해양부 (2009) 수로조사와 관련된 평균해수면, 기본수주면 및 약최고고조면에 관한 사항. 국립해양조사원, 국토해양부고시 제 2009-22호, 5 p
- 국토해양부 (2012a) 시흥갯벌 습지보호지역 지정. 국토해양부 해양생태과, 국토해양부 고시 제2012-64호, 3 p
- 국토해양부 (2012b) 연안습지 기초조사-습지보호지역 모니터링. 해양수산부 해양생태과, 11-1192000-000005-10, 250 p
- 김태훈, 신상민, 이규성 (2001) Landsat 위성영상을 이용한 경기만 갯벌 지형의 변화 분석. In: 대한원격탐사학회 2001년도 학술대회 논문집, pp 116-121
- 나영호 (2003) 원격탐사를 이용한 새만금 조간대의 지형변화 및 광학반사 특성 연구. 공학석사 학위논문, 연세대학교, 118 p
- 신경미, 안영희 (2005) 경기도 제부도의 갯벌 식생에 관한 연구. In: 한국환경생태학회 학술대회 논문집, pp 102-106
- 유주형 (2001) 원격탐사를 이용한 곰소만 조간대의 지형변화 및 퇴적물 특성 연구. 공학박사 학위논문, 연세대학교, 127 p
- 윤여상 (2001) 광학 영상을 이용한 경기만 갯벌 추출 방법 개발. 공학석사 학위논문, 인하대학교, 71 p
- 최진우, 김동성, 신상호, 제종길 (1998) 서해 경기만 대부도 모래갯벌에서의 대형저서동물 분포. *Ocean and Polar Res* **20**(2):97-104
- 홍재상 (2000) 인천 갯벌의 생물다양성 - 대형저서동물을 중심으로. In: 한국조류학회 국제심포지움 일정 및 발표논문집, pp 45-59
- Butler DR, Walsh SJ (1998) The application of remote sensing and geographic information systems in the study of geomorphology: an introduction. *Geomorphology* **21**(3-4):179-181
- Choi JK, Oh HJ, Koo BJ, Ryu JH, Lee S (2011) Crustacean habitat potential mapping in a tidal flat using remote sensing and GIS. *Ecol Model* **222**:1522-1533
- Rainey MP, Tyler AN, Bryant RG, Gilvear DJ, McDonald P (2000) The influence of surface and interstitial moisture on the spectral characteristics of intertidal sediments: Implications for airborne image acquisition and processing. *Int J Remote Sens* **21**(16):3025-3038
- Ryu JH, Kim CH, Lee YK, Won JS, Chun SS, Lee S (2008) Detecting the intertidal morphologic change using satellite data. *Estuar Coast Shelf Sci* **78**(4):623-632
- Ryu JH, Won JS, Min KD (2002) Waterline extraction from Landsat TM in a tidal flat: A case study in Gomso Bay, Korea. *Remote Sens Environ* **83**(3):443-457

Received Oct. 18, 2013

Revised Nov. 29, 2013

Accepted Dec. 9, 2013