원격탐사자료를 이용한 인공구조물 건설에 의한 군산 유부도 조간대의 지형변화 및 표면특성에 관한 연구

Zhen Xu · 김덕진[†] · 김승희
서울대학교 지구환경과학부

Research of Topography Changes by Artificial Structures and Scattering Mechanism in Yoobu-Do Inter-tidal Flat Using Remote Sensing Data

Zhen Xu, Duk-jin Kim[†] and Seung Hee Kim
School of Earth and Environment Sciences, Seoul National University

Abstract : Large-scale coastal construction projects, such as land reclamation and dykes, were constructed from the late twentieth century in Yoobu-Do region. Land reclamation combined with the dynamics of tidal currents may have accelerated local sedimentation and erosion resulting in rapid reformation of coastal topography. This study presents the results of the topography changes around Yoobu-Do by large-scale coastal constructions using time-series waterline extraction technique of Landsat TM/ETM+ data acquired from 1998 to 2012. Furthermore, the Freeman-Durden decomposition was applied to fully polarimetric RADARSAT-2 SAR data in order to analyze the scattering mechanisms of the deposited surface. According to the case study, the deposition areas were over 4.5 km² and distributed in the east, northeast, and west of Yoobu-Do. In the eastern deposition area, it was found that the scattering mechanism was difference from other deposition areas possibly indicating that different types of soil were deposited.

Key Words : tidal flat, topography change, remote sensing, waterline, synthetic aperture radar, Freeman-Durden decomposition

요약 : 20세기 후반부터 유부도 주위에서 하구언 축조 등 비교적 큰 규모의 간척사업들이 진행되었다. 이러한 간척사업의 시작으로 인공구조물들이 연안에 축조됨에 따라 주변 해역의 해류, 조위 및 조류의 변화를 야기하여 퇴적 및 침식으로 인한 연안지형의 변화가 예상된다. 따라서 이 연구에서는 유부도 조간대를 포함하는 Landsat TM/ETM+자료를 1998년부터 2012년까지 획득한 후 waterline 기법을 적용하여 인공구조물 축조에 의한 지형변화를 탐지하였다. 그 결과 유부도의 동쪽, 북동쪽, 서쪽 조간대에서 주로 퇴적이 일어났으며 그 면적이 약 4.5 km² 이상 되었다. 한편, RADARSAT-2의 완전편파 SAR자료에 Freeman-Durden decomposition을 적용하여 퇴적이 뚜렷이 일어난 지역에 대한 산란특성을 분석하였다. 그 결과 동쪽 퇴적지역은 서쪽 및 북동쪽의 퇴적지역과는 다른 산란특징이 관찰되었으며, 이는 퇴적환경의 차이로 인해 다른 종류의 퇴적물이 퇴적되어 발생한 것으로 여겨진다.

접수일(2012년 12월 27일), 수정일(1차 : 2013년 1월 19일, 2차 : 2월 8일), 게재확정일(2013년 2월 9일).

[†] 교신저자: 김덕진(djkim@snu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

한반도는 3면이 바다로 둘러싸여 있고 서·남해안의 연안 대부분이 갯벌로 형성되어있어, 크기와 가치 면에서는 세계 5대 갯벌중의 하나로 주목 받고 있다. 또한 조간대의 대부분은 수심이 얇고 조수간만의 차이가 크며 구불구불한 리아스식 해안으로 파도의 힘을 분산시켜 면적이 넓고 경사가 완만한 갯벌을 형성하고 있다. 이러한 지형적 특징 때문에 간척가능지로서의 잠재력이 매우 커 20세기 후반부터 비교적 큰 규모의 간척사업이 진행되었으며, 대표적으로 새만금 방조제와 같은 기네스북에 등재될 정도의 매우 큰 간척사업도 진행되었다. 이러한 간척사업의 시작으로 인공구조물들이 연안에 축조됨에 따라 주변 연안의 해류, 조위, 파랑 패턴 등을 변화시켜 연안 지형이 많이 바뀌고 있다. 따라서 이러한 연안 지형의 변화를 정량적으로 모니터링 할 수 있도록 퇴적 및 침식에 대한 주기적인 관측이 필요하다.

지금까지 연안 지형에 대한 조사는 연구자가 직접 현장에 들어가 수행하는 현장조사 위주의 방법에 의해 연구되어 왔다. 그러나 하루에 두 번씩 반복되는 조석으로 인한 시간적인 제약과 대부분 펄로 구성된 갯벌의 특성으로 인해 접근과 이동이 어려워 현장조사를 통한 주기적인 정보 획득에는 많은 한계가 있다. 또한, 연안에서의 구조물 축조에 따른 퇴적물 이동과 지형 변화는 매우 복잡한 현상이므로 단기간에 제한적인 지역에 대한 관측만으로는 전체적인 지형 변화 패턴과 특성을 이해하는데 많은 어려움이 따를 수 있다(Kim and Park, 2009). 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 원격탐사기술을 적용한 연안환경 변화 탐지 및 모니터링 연구가 활발하게 진행되었다. 원격탐사자료를 이용하여 조간대의 waterline을 추출하고, 추출된 waterline에 고도(elevation)를 내삽(interpolation)하여 Digital Elevation Model (DEM)을 생성 할 수 있는 기법을 통해, 과거와 현재의 DEM을 비교하는 연구가 효과적으로 사용되고 있다(Mason *et al.*, 1997; Mason *et al.*, 1998; Ryu *et al.*, 2002). 국내에서도 물과 육지의 경계인 waterline을 정확하게 추출할 수 방법에 대한 연구와, waterline 기법과 현장조사자료를 결합하여 지형변화를 탐지하는 연구가 많이 진행되었다(Ahn *et al.*, 1992; Ryu *et al.*, 2000; Park *et*

al., 2003; Ryu *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2011). 하지만 지금까지의 연구들은 주로 공간적인 지형변화의 탐지에만 중점을 두었고 지형변화가 일어난 곳의 환경특성을 분석하는 연구는 거의 시도되지 않았다.

합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar; SAR)는 마이크로파를 사용하는 능동센서로서 송신된 마이크로파가 지표면에 닿은 후 센서로 되돌아오는 신호(backscattering)의 강도를 측정한다. 이는 지표면의 유전상수(dielectric constant), 표면 거칠기(surface roughness) 및 지표면의 기하적 구조(geometry)와 같은 물리적 특성에 따라 달라지므로 갯벌의 퇴적환경 특성을 파악하는데 적합하다(Kim *et al.*, 2010). 더욱이, 갯벌 퇴적지형의 경우 급격한 경사지가 존재하지 않고 식생이 분포하지 않으며 전반적으로 높은 함수율을 유지해 표면 거칠기가 레이더 후방산란(backscattering)에 결정적인 요소로 작용한다. 따라서 SAR자료는 갯벌지형에서 표면 거칠기에 따라 달라지는 산란 특성을 관측하는데 있어 유용하다(Park *et al.*, 2009). Jang *et al.* (2010)은 SAR 영상으로부터 ridge-runnel 구조 및 연흔이 발달된 조간대의 특징을 파악하는데 활용하였고, Kim *et al.* (2010)은 SAR영상을 이용하여 레이더 후방산란계수(backscattering coefficient)와 퇴적환경 요소들과의 관계를 파악하고 긴밀도(coherence)를 추출하여 퇴적상과 비교한 연구를 수행하기도 하였다.

이 연구에서는 충청남도 서천군 장항읍의 유부도 조간대에 대해 Landsat 위성영상을 이용하여 waterline 기법으로 인공구조물의 축조에 의한 지형변화를 탐지하고, SAR 영상을 이용하여 퇴적이 일어난 곳의 산란특성을 관찰하고자 한다.

2. 연구지역 및 자료

유부도는 한국의 서해안 중부, 동경 126° 36′, 북위 35° 48′에 위치하고 동쪽에는 금강, 남쪽에는 새만금 방조제와 인접해있다. 지난 20여년간 금강 하구언, 군·장 국가공단, 새만금 방조제 등을 포함한 비교적 큰 규모의 인공구조물이 잇달아 축조되었다. 금강 하구언은 1988년 금강 하구 상류지역에 건설되었고, 이후 수문을 연 상태로 해수유통을 하다가 1994년 8월부터

Fig. 1. Landsat satellite images acquired around the study area. The left and right images were obtained before and after Saemangeum embankment was constructed, respectively.

수문작동이 시작되어 현재까지 인위적으로 담수를 위해 방류하고 있으며 그 양은 연간 60억 톤에 달한다 (Kwon and Lee, 1999). 1990년과 1992년에는 군산내항 및 외항의 심도 유지와 항만보호를 위해 군산외항 주변으로 북측 도류제(Fig. 1의 North jetty) 및 남측 도류제가 착공되었고, 약 3 km에 이르는 군·장 신항만 북방파제가 1998년 2월 착공하여 2004년 11월에 북측 도류제 서쪽에 북동-남서방향으로 건설되었다(Lee and Um, 2007; Baek, 2008). 1991년부터는 만경·동진강하구 주변해역의 40,100 ha의 지역을 간척하는 새만금 간척사업이 시작되어 총 길이가 33.3 km에 이르는 새만금 방조공사가 시작되었다. 그러나 환경문제로 인해 2000년부터 약 3년간 고군산군도 남측의 2호와 북측의 4호 방조제의 일부 구간이 미 축조된 상태에서 공사가 중단되어 이 개방구간을 통해 해수가 유통되는 상태로 지속되었다. 이후 공사가 재개되어 2003년 6월에 새만금 북측 4호방조제가 완공되었으며, 2006년 4월에 새만금 남측 방조제 물막이 공사의 완료로 15년간의 공사를 마쳤다. 이후 1호방조제와 2호방조제 사이의 신시 배수갑문과 2호방조제와 3호방조제 사이에 가력 배수갑

문이 축조되었으며 이 두 배수갑문을 통해 해수가 유통되고 있다.

Fig. 1의 왼쪽 영상은 인공구조물(금강 하구둑 제외)이 축조되기 전의 Landsat TM(1989년 5월 17일) 위성영상이고, Fig. 1의 오른쪽 영상은 인공구조물들이 모두 축조된 후 촬영된 Landsat ETM+ 위성영상(2012년 6월 17일)이다. Fig. 1(d)에서 삼각형 숫자들은 새만금 1호부터 4호 방조제를 나타낸다. 두 시기의 영상을 획득할 때의 조위는 각각 395 cm와 386 cm으로 9 cm밖에 차이가 나지 않아 육안으로도 어느 정도 지형의 변화를 확인할 수 있다.

이 연구에서는 waterline 추출을 통한 연안 지형변화 탐지를 위해 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)에서 쏘아 올린 자원탐사위성인 Landsat TM과 Landsat ETM+ 영상을 사용하였다. 연구지역에 대한 Landsat영상이 촬영된 시간범위는 1988년부터 2012년까지 총 70개의 자료이며, 각각의 위성자료가 획득된 시각에 해당하는 조위자료는 국립해양조사원 군산외항 조위관측소에서 실측한 자료를 이용하였다. 군산외항 조위관측소는 북위 35° 58' 32", 동

Table 1. List of Landsat satellite images used for DEM generation and their tidal heights

No.	Acquisition date	Satellite	Tidal height (cm)
1	Sep. 27, 1988	Landsat TM	21
2	Aug. 05, 1989	Landsat TM	204
3	Oct. 19, 1990	Landsat TM	62
4	Feb. 24, 1991	Landsat TM	508
5	Mar. 12, 1991	Landsat TM	395
6	Oct. 06, 1991	Landsat TM	277
7	Dec. 02, 1991	Landsat TM	477
8	Sep. 03, 2011	Landsat ETM+	197
9	Jan. 25, 2012	Landsat ETM+	16
10	Apr. 30, 2012	Landsat ETM+	495
11	Jun. 17, 2012	Landsat ETM+	386
12	Aug. 04, 2012	Landsat ETM+	106
13	Oct. 07, 2012	Landsat ETM+	252
14	Oct. 23, 2012	Landsat ETM+	405

경 126° 33' 47"에 1980년에 설치되었고, 1980년 3월부터 2006년까지는 10분 단위를 조위를 측정하였고 2007년부터 현재까지는 1분 간격으로 조위를 측정하고 있다(Fig. 1b의 별표). 총 70개의 Landsat영상 중 waterline 기법을 통해 약 20년 전후에 해당하는 Digital Elevation Model (DEM)을 생성하기 위해 1991년 이전의 Landsat 영상과 2011년 이후의 Landsat 영상을 사용하였다(Table 1). 한편, 지형변화가 뚜렷한 지역의 레이더 산란 특성을 관찰하고자 2012년 6월 2일에 촬영된 RADARSAT-2 다중편파 SAR 영상도 확보하였다.

3. 연구방법

1) Landsat 위성영상을 이용한 waterline 기법 및 면적 변화 분석

Waterline 기법은 비교적 단기간에 다양한 조석 상태의 위성자료를 다수 획득하여 조간대와 물의 경계면을 추출한 후, 이들에 절대고도 값을 대입하고 내삽(interpolation)함으로써 DEM을 생성하는 것을 말한다. 처리과정은 다음과 같이 몇 단계로 나눌 수 있다.

우선, 위성영상에서 바다와 육지의 경계를 추출하는 waterline 추출 작업이 필요하다. 현재까지 여러 가지 경계 추출 알고리즘들이 개발되어 왔지만 위성영상이 촬영될 때 다양한 기상조건에서 촬영되므로 자동화

된 waterline 추출기법은 일정한 오차가 동반될 수 있고, 특히 조간대에서는 물과 육지의 경계가 모호하여 더 큰 오차가 유발되기도 한다(Lee and Jurkevich, 1990; Ryu *et al.*, 2002). 본 연구의 대상지는 면적이 작아서 waterline을 추출함에 있어 보다 세분화된 분석기법이 필요하였다. Waterline 추출에 대한 오차를 최소화하기 위해 물과 육지의 구분이 상대적으로 잘되는 Landsat TM 및 ETM+ 영상의 4번 밴드를 중심으로, 기타 다른 밴드영상들을 함께 일일이 참고하면서 최대한 객관적인 기준으로 디지털라이징(digitizing)하여 waterline을 추출하였다.

그 다음, 추출된 waterline에 국립해양조사원에서 설치한 군산외항 조위관측소에서 실측한 조위정보를 고도로 대입하였고 triangulated irregular network (TIN) 및 내삽을 통해 DEM을 생성하였다. 군산외항 조위관측소는 대상지와 매우 가까운 거리에 위치하여 있고, 실제 2007년부터 1분 단위로 조위를 실측하고 있기 때문에 비교적 높은 정확도를 가지고 있다고 볼 수 있다. 2007년 이전의 10분 단위 조위자료는 선형 내삽(linear interpolation)을 통해 위성영상이 촬영될 때의 조위를 산출하였다. 비록 10분 단위로 기록된 조위자료를 선형 내삽하여 사용하더라도, 2007년 이후에 제공된 1분 단위의 조위자료와 비교해 본 결과 최대 오차범위는 2cm 이내로서 그 차이가 크지 않았다.

또한, 위성영상으로부터 추출된 waterline을 이용하

여 해당 시간의 조위상태에서 노출되는 면적을 계산하였고 그 변화를 비교 분석하였다.

2) SAR 영상을 이용한 산란특성 분석

최근 다중편파(multi-polarization) SAR시스템이 개발되기 전까지 단일편파(single-polarization) SAR자료를 이용한 조간대 퇴적상의 연구는 일부 제한적으로만 가능하였다(van der Wal *et al.*, 2005). 반면 다중편파 SAR자료는 전자기파의 수직·수평 성분의 조합을 통해 지표면의 산란특성을 보다 자세히 파악 가능하게 하였다(Cloude and Pottier, 1996; Cloude and Pottier, 1997; Yamaguchi *et al.*, 2005). 하지만 다중편파 SAR자료의 활용분야는 대부분 육상의 토지피복 분류나 나대지에서의 표면 거칠기나 수분함유량 추출에만 한정되어있고(van Zyl, 1989; Ferro-Famil *et al.*, 2001; Hajnsek *et al.*, 2003), 갯벌지형에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다가 최근에 와서야 일부 진행이 되고 있다(Park *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011). 이 연구에서도 다중편파 SAR자료를 이용하여 퇴적이 뚜렷하게 발생한 지역에 대한 레이더 산란특성을 분석하고자 한다.

유부도 지역을 촬영한 RADARSAT-2 다중편파 SAR 자료를 획득하여 지표면 산란특성 분석에 자주 이용되는 model-based target decomposition 중의 하나인 Freeman-Durden decomposition을 수행 하였다. Freeman-Durden decomposition은 전자기파의 산란을 유발하는

산란체의 물리적 구조를 모델화하여 전자기파의 산란 특성을 표면산란(surface scattering), 이중산란(double-bounce scattering), 체적산란(volume scattering)으로 분해하는 기법이다. 산란모델은 공분산 행렬(covariance matrix)에서 추출해 낼 수 있으며 자세한 이론설명은 Freeman and Durden (1998)을 참조할 수 있다. 일반적으로 지표면이 평평하거나 건물 및 식생 등이 존재하지 않을 경우 표면산란이 우세하게 나타나고, 인공적인 건물이 존재하는 경우는 이중산란, 식생이 많은 지역은 체적산란 등이 주로 발생하게 된다. 인공적인 구조물 및 식생이 없는 지역이라고 하더라도 토양의 종류에 따른 표면의 거칠기 및 유전율의 차이에 따라 상대적인 표면산란의 정도는 차이가 나게 되며, 이는 정규화된(normalized) Freeman-Durden decomposition을 통해 확인할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

1) Landsat 위성영상을 이용한 waterline 추출 분석결과

Waterline 기법을 적용하기 위해, 먼저 바다와 육지의 경계를 추출하는 작업을 진행하였다. Fig. 2는 1988년부터 2012년까지 획득된 70개의 Landsat TM 및 ETM+ 위

Fig. 2. Waterlines extracted from Landsat TM and ETM+ satellite images. The red lines represent waterlines from 1989 to 1991, and the green lines are from 2011 to 2012.

Fig. 3. Tidal height and exposed area of Yoobu-Do corresponding to the satellite data acquisition time.

성영상에서 추출된 waterline이다. 1989년 파란색으로 부터 2012년 빨간색으로 변화하도록 표시하였다.

70개의 위성자료 중에서 시계열적으로 가장 많이 분포된 200 cm 이상 300 cm 이하의 조위에 해당하는 위성 영상들로부터 waterline을 추출하여 노출된 유부도의 면적변화를 분석하였다(Fig. 3). Fig. 3(a)의 x축은 조위이고 y축은 그 조위에서의 노출면적을 나타낸다. Fig. 3(b)에서는 x축이 위성영상이 획득된 날짜를 나타내고 왼쪽 y축은 위성영상의 촬영시각에 해당하는 조위를, 오른쪽 y축은 노출면적을 각각 나타낸다.

일반적으로 조위와 노출면적은 반비례 관계를 가지지만, Fig. 3(a) 그래프를 살펴보면 조위가 감소함에도 면적이 일정하게 증가하는 현상이 나타나지 않는다. 더욱이, 1989년 2월 26일과 1989년 8월 5일의 노출면적에 비해 2009년 2월 1일, 2010년 2월 20일, 2010년 2월 4

일의 노출면적은 작은 조위차이임에도 불구하고 큰 차이를 보여주고 있다. 1989년 이전에는 유부도 주변지역에 인공구조물들이 축조되기 전이고 1988년에 완공된 금강하구언도 1994년부터 수문 작동을 시작하였기에 거의 인공구조물의 영향을 받지 않은 상태라고 볼 수 있다. 그러나 조위가 크게는 40 cm가 높은 2000년 이후의 모든 시기 노출면적보다 작다는 것은 그 사이에 심각한 지형변화(퇴적)가 가속화 되었다는 것을 알 수 있다. 또한, 2003년 11월 16일과 2010년 2월 20일의 경우 조위 차이가 비록 1 cm이지만 면적의 차이는 조위 차이가 똑같이 1 cm인 2011년 3월 11일과 2012년 10월 17일의 면적과 비교하면 많이 증가했다는 것을 알 수 있다. 한편 동일한 자료를 시간에 따른 조위 및 노출면적의 변화를 나타낸 Fig. 3(b)의 그래프를 살펴보면, 1991년 10월 6일부터 1999년 9월 2일 사이와 2004년 4월 24일부

Fig. 4. Changes of the waterlines between 1991 and 2011. The green lines represent the waterlines extracted from Landsat images obtained before 1991, and the red lines are waterlines obtained after 2011. All waterlines correspond to the tidal heights of between 200 cm and 300 cm.

(a) 1991_DEM

(b) 2012_DEM

Fig. 5. Generated DEM of Yoobu-Do using waterline method.

터 2008년 5월 5일 사이의 구간에서는 조위가 증가함에도 노출면적도 같이 증가하는 경향을 뚜렷이 보여주고 있다. 이는 이 기간 동안에 퇴적이 분명히 일어났다는 것을 말해준다.

Fig. 4는 1991년 전의 Landsat영상으로부터 추출된 waterline과 2011년 이후의 Landsat영상으로부터 추출된 waterline들을 나타낸다. 파란색 계열의 선은 1991년 전의 waterline들이고 빨간색 계열의 선은 2011년 이후의 waterline들이다. 1991년 이전과 2011년 이후의 waterline들을 비교해볼 때, 유사한 시기 동안에는 조위에 의한 면적의 변화 및 그 분포 패턴이 비슷하지만, 완전히 다른 두 시기를 비교해볼 때는 그 패턴이 많이 다르며 면

적 변화가 수평적으로 특정된 방향으로 확장된 것을 확인할 수 있다. 특히, 과거에는 유부도 양쪽에 조그만 섬들을 사이에 두고 좁은 수로가 있었지만 이 수로를 따라서 대부분 퇴적이 일어나면서 유부도와 연결된 큰 지형이 형성된 것을 관찰할 수 있다. 정량적인 면적의 변화를 파악하기 위해, 조위가 비슷하고 조석상태가 모두 썰물인 과거 1989년 2월 26일과 가장 최근의 2012년 10월 7일 위성영상에서 추출해 낸 waterline의 면적을 비교해 보았다. 2012년 10월 7일에 비해 1989년 2월 26일의 조위가 21 cm 높음에도 불구하고 노출면적은 16.96 km^2 에서 21.42 km^2 로 증가하여 적어도 4.5 km^2 이상 퇴적면적이 확장된 것을 알 수 있다.

Fig. 6. Estimated topography changes by subtracting 1991_DEM from 2012_DEM.

Table 1에 나타난 Landsat 영상들로부터 추출된 waterline들과 군산외항 조위관측소에서 실측한 조위자료를 고도로 대입한 후 내삽 및 TIN 구성을 통하여 최종적으로 1991년 이전의 DEM (1991_DEM)과 2011년 이후의 DEM (2012_DEM)을 생성하였다(Fig. 5). 또한 이 두 시기 DEM의 차이를 이용하여 지난 20여년동안 유부도 조간대 지역에서 발생된 수직적인 지형변화도 탐지하였다(Fig. 6). 그 결과, Fig. 6의 Deposition_1, Deposition_2, Deposition_3으로 표시된 부분에서 많은 퇴적이 일어난 것을 관찰할 수 있었고, 유부도의 남동쪽과 북쪽에서는 주로 침식이 일어난 것을 알 수 있었다.

지금까지 분석한 일련의 뚜렷한 퇴적 및 침식지형의 변화가 유부도 근처에서 일어난 여러 인공구조물 축조와 관련이 있는 것은 분명하지만, 각각의 구조물들이 어느 지역에 얼마만큼의 지형변화를 야기했는지를 이러한 분석결과들만 가지고 파악하기에는 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 유부도 주변의 인공구조물 건설에 의한 해양환경 변화연구를 함께 살펴보면 그 원인을 짐작해 볼 만하다.

Kwon and Lee (1999)의 연구에 의하면 금강 하구 독수문작동 후 M2와 S2분조의 진폭이 급격히 증가하고 위상은 다소 감소하였다고 한다. 또한 군산항의 항로

유지와 군장국가공단 건설을 위한 연안매립 등으로 금강하구의 남쪽수로 북방방조제와 북방방파제가 건설되면서(Fig. 6의 North jetty와 North break water) 수로 폭이 장기간에 걸쳐 변화되었고, 준설로 인하여 수로 수심이 변화되어 왔다고 한다. 또한, Kim *et al.* (2006)은 유부도 외해 쪽으로 4개의 관측 점에 HF radar를 설치하여 새만금 4호 방조제 끝막이 공사 전후인 2002년과 2004년에 해류의 분산도를 비교했는데, 4호 방조제 끝막이 공사가 끝나기 전 낙조류는 주로 서쪽과 남쪽, 창조류는 북동쪽으로 향하였지만, 방조제 끝막이 공사 후에는 동서방향의 흐름이 미약해지고 남북방향으로의 왕복 성이 강해졌다는 결과를 제시하였다.

이러한 관측연구결과들을 종합해 볼 때 북방방조제와 북방방파제가 건설되면서 유부도 주변에 조류의 흐름을 크게 약화시켜 과거에는 분리되어 있던 유부도 주변 작은 섬들이 연결이 된 것으로 보이며, 특히, 2003년 새만금 4호 방조제 끝막이 공사가 완료되면서 동서방향의 흐름보다 남북방향의 흐름이 강해지면서 유부도 주변으로 흐르는 흐름을 더욱더 약화시켜 퇴적환경이 잘 형성된 것으로 보인다. 한편, 금강하구의 남쪽도류제와 북측도류제의 건설 및 준설로 인해 수심이 깊어지고, 또한 금강 하구 독수문작동으로 인해 M2 및 S2 분조의 진폭이 증가하면서 유부도의 남동쪽에 침식

Fig. 7. Results of the Freeman-Durden decomposition (left) and the averaged power of surface, double-bounce, and volume scattering in each deposition area (right).

Fig. 8. Results of the normalized Freeman-Durden decomposition (left) and the averaged normalized value of surface, double-bounce, and volume scattering in each deposition area (right).

환경이 형성된 것으로 여겨진다.

2) SAR 영상을 이용한 퇴적지역 산란특성 분석 결과

과거 20년 동안 퇴적이 뚜렷하게 발생한 Deposition_1, Deposition_2, Deposition_3 지역에 대하여 전자기파 산란특성을 분석하여 퇴적환경이 서로 어떻게 다른지를 파악하고자 하였다. 이를 위해 2012년 6월 2일에 획득된 다중편파 RADARSAT-2 SAR영상을 이용하여 Freeman-Durden decomposition을 수행하였다(Fig. 7).

Decomposition 수행결과 유부도 지역은 전반적으로 표면산란이 우세한 지역으로 퇴적 토양으로 인해 생성이 된 후 아직까지 식생이 자라지 않은 지형임을 알 수 있다. 나아가 정규화된 표면산란, 이중산란, 체적산란 분석을 통해 뚜렷이 퇴적인 일어난 부분만 살펴보면 (Fig. 8의 흰 실선), Deposition_2와 Deposition_3은 서로 유사한 산란특성을 보이는 반면 Deposition_1지역은 이

들과는 다소 다른 산란특성을 보임을 확인할 수 있다.

보다 정량적인 차이를 확인하기 위해 Deposition_1, Deposition_2, Deposition_3 지역의 표면산란, 이중산란, 체적산란 값을 평균하여 비교하였다(Fig. 7의 오른쪽). 그 결과, 이중산란과 체적산란은 각각의 퇴적 지역에서 큰 차이를 보이지 않는 반면, 표면산란의 평균값은 Deposition_1지역에서 다른 두 지역보다 약 7 dB 높게 나타났다. 뿐만 아니라 정규화 된 표면산란, 이중산란, 체적산란의 평균 값을 비교해보았을 때도 Deposition_1 지역에 표면산란이 Deposition_2와 Deposition_3보다 약 0.1이 높은 반면 체적산란 값은 약 0.1이 낮은 것으로 나타났다(Fig. 8의 오른쪽). 이러한 차이는 토양의 수분함량이나 표면의 거칠기 차이로 인해 발생될 수 있으나, 2012_DEM을 통해 퇴적이 뚜렷이 일어난 부분의 고도를 비교해 보았을 때 서로 유사한 높이들을 지니고 있

어 밀물과 썰물로 인한 토양수분의 차이는 거의 없다고 볼 수 있으므로, 이러한 산란특성의 차이는 표면 거칠기의 차이로 인해 기인한다고 볼 수 있다. 조간대 지역의 표면 거칠기 차이는 그 지역을 구성하는 퇴적물의 입자크기(입도)와 관계가 있으므로(van der Wal *et al.*, 2005), Deposition_1 지역에는 Deposition_2나 Deposition_3과는 달리 다른 종류의 토양이 퇴적이 되었거나 퇴적 환경이 서로 다를 수 있다. 실제로 Seo and Park (2007)에 의해 수행된 현장조사자료에 의하면 유부도 남측수로 하구내만에서 외해로 가면서 입도가 커진다는 조사결과가 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 유부도 지역에 대해 waterline 기법을 적용하여 1991년부터 2012년 사이 인공구조물의 축조에 의한 지형변화를 관찰하였고 퇴적이 주로 일어난 지역에 대해 SAR자료를 이용하여 Freeman-Durden decomposition을 통해 산란특성을 분석하였다.

그 결과 유부도의 동쪽, 북동쪽, 서쪽에서 퇴적이 주로 일어났으며, 남동쪽 및 북쪽에서는 침식이 약하게 일어난 것으로 확인되었다. 이러한 퇴적 및 침식의 지형변화와 인공구조물 축조와의 직접적이고 명료한 인과관계를 파악하는 데는 다소 역부족이었지만 그 연관성은 충분히 확인할 수 있었다. 한편, 뚜렷한 퇴적지형을 보이는 지역에 대한 전자기파 산란특성을 비교해 본 결과 모든 퇴적지형이 동일한 퇴적물로 구성되지 않고 서로 다른 퇴적환경으로 인해 다른 종류의 퇴적물이 쌓인 것으로 여겨지며, 기존 현장조사결과도 이를 뒷받침 해준다.

향후 유부도 주변의 넓은 지역에 대한 입도조사를 비롯한 세밀한 현장조사와 보다 많은 시계열 SAR자료를 확보하여 퇴적물 표면특성의 시간적 변화를 관찰한다면 그 기원에 대한 연구도 수행될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-

2081)의 지원으로 수행되었습니다. 이 연구에 사용된 RADARSAT-2 자료는 SOAR 프로그램을 통해 MDA로부터 제공되었습니다.

참고문헌

- Ahn, C.H., K. Kajiwar, R. Tateishi, and H.R. Yoo, 1992. The generation of a digital elevation model in tidal flat using multitemporal satellite data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 8(2): 131-145 (in Korean with English abstract).
- Baek, H.Y., 2008. Characteristics of Sea Level, Tidal and Sub-tidal Current Variations in the Saemangeum Coastal Area, Kunsan National University, Kunsan, MA, Korea (in Korean with English abstract).
- Cloude, S.R. and E. Pottier, 1996. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2): 498-518.
- Cloude, S.R. and E. Pottier, 1997. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1): 68-78.
- Ferro-Famil, L., E. Pottier, and J.-S. Lee, 2001. Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 2332-2342.
- Freeman, A. and S.L. Durden, 1998. A three component scattering model for polarimetric SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 963-973.
- Hajnsek, I., E. Pottier, and S.R. Cloude, 2003. Inversion of surface parameters from polarimetric SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 727-744.
- Jang, S., H. Han, and H. Lee, 2010. Observation of

- ridge-runnel and ripples in Mongsanpo intertidal flat by satellite SAR imagery, *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(2): 115-122 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.-S., S.-H. Lee, Y.-T. Son, H.-K. Kwon, K.-H. Lee, Y.-B. Kim, and O.-J. Jeong, 2006. Changes of surface M2 currents as observed by HF radar before and after Saemangeum fourth tidal dyke closing, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 11(2): 37-48 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.J., W.M. Moon, G. Kim, S.-E. Park, and H. Lee, 2011. Submarine groundwater discharge in tidal flats revealed by space-borne synthetic aperture radar, *Remote Sensing of Environment*, 115: 793-800.
- Kim, K.L., J.-H. Ryu, S.W. Kim, and J.K. Choi, 2010. Application of SAR data to the study on the characteristics of sedimentary environments in a tidal flat, *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(5): 497-510 (in Korean with English abstract).
- Kim, T. and S. Park, 2009. Camera monitoring of topographical changes of Daehang-ri intertidal flat outside Saemangeum Sea Dike No.1, *Journal of the Korean Society For Marine Environmental Engineering*, 21(6): 453-461 (in Korean with English abstract).
- Kwon, H. and S. Lee, 1999. Physical environment changes in the Keum River estuary by the dyke gate operation I. Mean sea level and tide, *Journal of Korean society of Oceanography*, 4(2): 93-100 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-H. and J.-S. Um, 2007. Water depth change caused by artificial structures in Geum River estuary: spatio-temporal evaluation based on GIS, *Journal of the Korean Geographical Society*, 42(1):121~132 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-S. and I. Jurkevich, 1990. Coastline detection and tracing in SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4): 662-668.
- Lee, Y.K., J.H. Ryu, J.K. Choi, J.G. Soh, J.A. Eom, and J.S. Won, 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): 857-869.
- Mason, D.C., I. Davenport, and R.A. Flather, 1997. Interpolation of an inter-tidal digital elevation model from heightened shorelines: a case study in the western Wash, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45(5): 599-612.
- Mason, D.C., I. Davenport, R.A. Flather, and C. Gurney, 1998. A digital elevation model of the inter-tidal areas of the Wash produced by the waterline method, *International Journal of Remote Sensing*, 19(8): 1455-1460.
- Park, E.J., and C.Y. KU, 2003. Efficiency assessment of analysing coastal geomorphic landscape change by satellite image interpretation, *Korean Journal of Remote Sensing*, 38(5): 822-834 (in Korean with English abstract).
- Park, S. and J. Jeong, 2003. Extraction of DEM in the southern tidal flat of Kanghwa Island using satellite image, *The Journal of GIS Association of Korea*, 11(1):13-22 (in Korean with English abstract).
- Park, S.-E., W.M. Moon, and D.-J. Kim, 2009. Estimation of surface roughness parameter in intertidal mudflat using airborne polarimetric SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(4): 1022-1031.
- Ryu, J.H., J.-S. Won, and K.D. Min, 2002. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: a case study in Gomso Bay, Korea, *Remote Sensing of Environment*, 83(3): 442-456.
- Ryu, J.H., C.H. Kim, Y.K. Lee, J.-S. Won, S.S. Chun, and S. Lee, 2008. Detecting the intertidal morphologic change using satellite data, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78(4): 623-

- 632.
- van der Wal, D., P.M.J. Herman, and A. Wielemaker-van den Dool, 2005. Characterisation of surface roughness and sediment texture of intertidal flats using ERS SAR imagery, *Remote Sensing of Environment*, 98: 96-109.
- van Zyl, J., 1989. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(1): 36-45.
- Yamaguchi, Y.T. Moriyama, M. Ishido, and H. Yamada, 2005. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(8): 1699-1706.