

인공위성 SAR 영상을 이용한 몽산포 조간대의 Ridge-Runnel 및 연흔 관찰

장소영 · 한향선 · 이훈열[†]

강원대학교 지구물리학과

Observation of Ridge-Runnel and Ripples in Mongsanpo Intertidal Flat by Satellite SAR Imagery

Soyeong Jang, Hyangsun Han, and Hoonyol Lee[†]

Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : In this study, we analyzed ridge-runnel structure and ripple marks by using Envisat ASAR, JERS-1 SAR images and in-situ data in Mongsanpo intertidal flat located in Taean-Gun, Korea. A group of light-and-dark lines parallel to the shoreline, alternating 3-5 times, were observed in the intertidal flat in Envisat ASAR images. The patterns are related to ridge-runnel structure in the intertidal flat exposed to air. Well-drained runnels, typically with ripple marks, showed strong backscattering while runnels submerged by surface water or ridges, typically smooth with no ripple, have weak backscattering coefficients in Envisat ASAR images. In JERS-1 SAR images, however, the backscattering was very low on the entire intertidal flat and no ridge-runnel structure could be observed. The wavelengths of ripple marks measured from in-situ observations have ranges from 4 to 10 cm that satisfies the Bragg scattering condition of the 1st-order in Envisat ASAR images operating in C-band, but not in JERS-1 SAR that used L-band. Through this study using SAR images, we could successfully analyze the sedimentary conditions of intertidal flats with ridge-runnel and ripple marks which are not easily observed by optical sensors. It is expected that the results of this study with SAR images will contribute to the sedimentary research over intertidal flats.

Key Words : ripple mark, ridge-runnel, intertidal flat, SAR, Bragg scattering.

요약 : 이 논문에서는 Envisat ASAR, JERS-1 SAR 영상과 현장조사 자료를 이용하여 ridge-runnel 구조 및 연흔이 잘 발달해 있는 태안 몽산포 조간대를 분석하였다. Envisat ASAR 영상에서는 밝고 어두운 띠가 해안선과 평행한 방향으로 3-5회 반복되어 관찰되었으며, 이는 노출된 조간대에서 ridge-runnel 구조로 판단하였다. 배수가 이루어져 지표잔존수가 없고 연흔이 발달해있는 runnel에서는 강한 후방산란을 보이고, 연흔이 없는 ridge나 배수가 잘 되지 않아 연흔이 물속에 잠겨 있는 runnel에서는 산란이 거의 없다. 반면에 JERS-1 SAR 영상에서는 조간대 전체가 매우 약한 신호를 보였으며, ridge-runnel 구조가 전혀 관찰되지 않았다. 현장에서 측정된 연흔의 파장은 대부분 4-10 cm 범위 내에 분포하며, 이는 C-밴드인 Envisat ASAR 영상에서 Bragg 산란의 첫 번째 모드에 의한 강한 후방산란을 일으키는 조건이 되지만,

접수일(2010년 3월 29일), 게재확정일(2010년 4월 15일).

[†] 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

L-밴드인 JERS-1 SAR 영상에서는 그렇지 않다. 본 연구에서는 SAR 영상을 이용하여 광학영상으로는 쉽게 관찰되지 않는 ridge-runnel 구조 및 연흔이 발달된 조간대의 분석이 가능함을 보였으며, 향후 조간대 퇴적상 연구에 SAR 영상이 다양하게 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

1. 서론

조간대 갯벌은 조차와 지형구조, 갯벌 구성 입자에 따라 다양한 퇴적구조를 나타낸다. 우리나라 서해안의 갯벌들은 대부분이 대조차의 특성을 가지지만 지역적으로 지형 및 퇴적물 입자가 상이하여 지질학적, 물리적 다양성을 가지고 있다(해양수산부, 2005). 이러한 조간대 갯벌의 연구에는 넓은 면적에 대한 동시적 접근이 가능한 인공위성 영상이 많이 활용되어 왔다. 특히 Synthetic Aperture Radar(SAR) 영상은 날씨나 태양고도의 영향을 받지 않고 영상 획득이 가능하며, 후방산란의 특성을 이용하여 광학영상에서는 확인이 어려운 퇴적상 분석이 가능하기 때문에 그 활용성은 매우 크다(Van der Wal *et al.*, 2005).

SAR 영상과 현장조사 자료를 기반으로 한 조간대의 연구는 국내외적으로 활발히 진행되어 오고 있다. Van der Wal *et al.*(2005)은 ERS-1 SAR 영상을 이용하여 연흔(ripple mark)이 형성되어 있는 조간대를 관찰하였고, SAR 영상에서 추출된 후방산란계수(backscattering coefficient)와 현장에서 측정된 연흔의 물리적 특성을 비교하여 퇴적상을 분석하였다. Park *et al.*(2009)은 다편파 SAR 영상과 다양한 산란 모델을 이용하여 조간대 펄 갯벌에서의 지표 산란 특성을 분석하였고, 조간대 연구를 위한 다편파 SAR 영상의 활용성을 평가하였다. 이외에도 Radarsat-1, TerraSAR-X 영상과 같이 다양한 SAR 영상을 이용하여 조간대의 레이더 산란특성 및 퇴적구조를 분석하고, waterline의 추출을 통한 조간대 DEM 제작기법 개발이 활발히 진행되고 있다(류주형 외, 2000; 박정원 외, 2009). 그러나 SAR 영상으로부터 조간대의 지형구조 중 하나인 ridge-runnel의 구조적 특성과 연흔의 물리적 성질을 분석한 사례는 아직까지 보고된 바 없다.

조간대에서 연흔은 조수에 의해 생성된다. 해수가 파형의 형태로 전파될 때 해수와 그에 포함된 퇴적물 입자는 원형의 궤도를 따라 회전운동을 한다(Allen, 1979). 이 회전운동의 강도는 해수면에서 가장 강하며, 수심이

깊어질수록 약해져 바닥(bed)에서는 회전운동의 궤도가 납작한 타원형의 모양으로 변형된다. 이 때 바닥에서 회전운동의 최대 수평속도가 입자들을 이동시킴으로써 물결모양의 연흔이 만들어지며, 조류의 운동 및 속도, 퇴적물의 입자크기에 따라 연흔의 크기와 모양이 달라진다. 또한 파랑의 운동과 흐름의 세기에 따라 대칭 연흔과 비대칭 연흔으로 구분될 수 있다(Tanner, 1967). 모래로 구성된 조간대에서는 대칭 연흔과 비대칭 연흔이 모두 형성될 수 있다.

Ridge-runnel 구조는 완만한 기울기를 가지는 모래 해변 및 조간대에서 고도가 높고 낮은 채널 형태의 구조가 해안선에 평행하게 발달하는 퇴적구조를 의미한다(King and Williams, 1949; Orme and Orme, 1988). 만조가 진행되는 동안에는 조수에 의해 이동된 퇴적물이 쌓여 주변부보다 고도가 높은 swash bar가 형성되는데 이를 ridge라 한다. 그리고 ridge가 완전히 물에 잠기면 swash bar의 미세 퇴적물들은 물의 순환에 의해 상대적으로 고도가 낮은 주변부로 침전된다. 이 부분을 runnel이라 한다. 간조시기에는 ridge에서 배수가 빠르게 일어나고 runnel에서는 상대적으로 느리다(Moore *et al.*, 1984; Owens and Frobel, 1977). 이러한 ridge-runnel은 조간대로 이동되는 입자의 크기와 유속에 따라 그 구조가 변화할 수 있으며, 연흔의 잔존에도 영향을 준다(Carling *et al.*, 2009; Chauhan, 2000; Vincent *et al.*, 1990; Williams *et al.*, 2008).

본 연구에서는 SAR 영상을 이용하여 몽산포 조간대에서 매우 특징적으로 나타나는 연흔과 ridge-runnel 구조를 관찰하였으며, 현장 조사 자료와 함께 조간대의 퇴적구조에 따른 레이더 산란특성을 해석하였다.

2. 연구지역 및 자료처리

충청남도 태안군 몽산포 조간대(Fig. 1)는 평균조차가 468 cm로 대조차 지역에 해당하며, 지형적으로는 연안사주가 없고 외해로 열린 상태인 개방형의 특징을

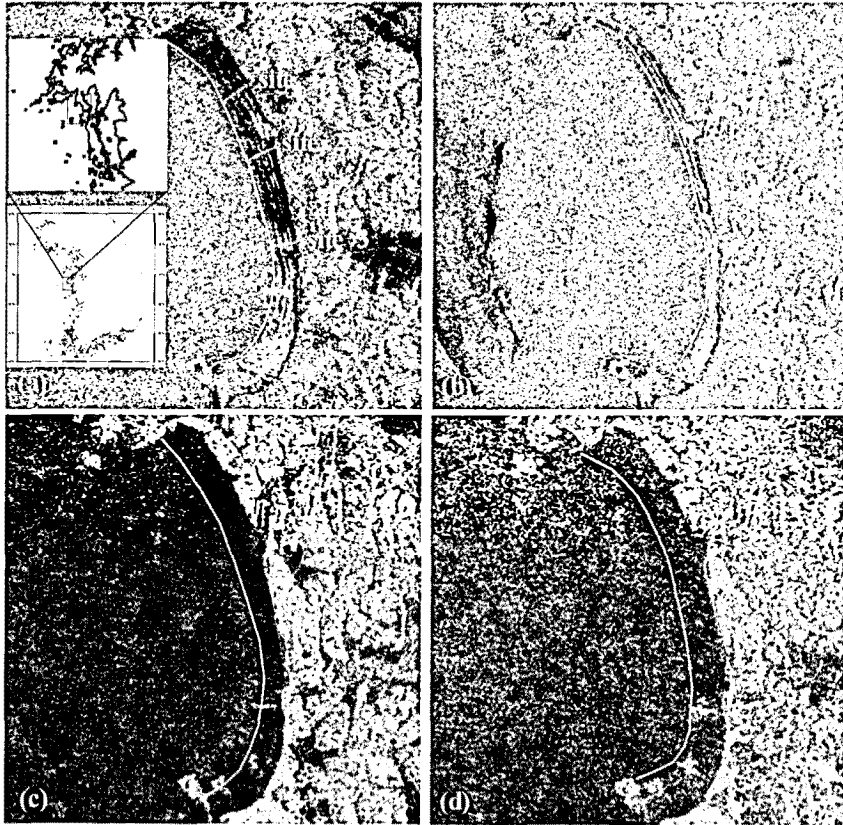


Fig. 1. Study area and examples of SAR images used in this study. (a) Envisat ASAR image (2004/07/02, flow). (b) Envisat ASAR image (2004/08/06, ebb) (c) JERS-1 SAR image (1996/06/20, ebb). (d) JERS-1 SAR image (1997/07/21, flow). Site 1, 2, and 3 are the location of *in-situ* observation. Yellow lines in each image represent the waterline.

가진다(해양수산부, 2005). 몽산포 조간대는 폭이 가장 500 m이며, 해안선 길이는 6 km에 달한다(오재경과 금병철, 1998). 이 지역의 표층 퇴적물은 니질(mud) 함량이 부족한 사질(sand)이며 약간의 역사질(slightly gravelly sand)이 포함되어 있고, 중립질 모래와 조립질 모래가 6%, 세립질 모래가 94%로서 기원이 다른 두 가지 모래가 존재한다(강대균, 2003). 또한 시기적으로 동절기에서 하절기로 갈수록, 그리고 공간적으로는 외해로 갈수록 세사가 집중되어 있다.

본 연구에서는 몽산포 조간대를 관찰하기 위하여 2004년에 획득된 2개의 Envisat ASAR 영상과 1996년, 1997년에 획득된 JERS-1 SAR 영상 2개를 사용하였다(Table 1). Envisat 영상(Fig. 1a, 1b)과 JERS-1 영상(Fig. 1c, 1d)은 모두 간조시기에 획득되었다. 모든 SAR 영상은 multi-look 작업을 수행하고 기하보정을 통해 20 m 해상도로 재배열하였으며, 후방산란계수를 추출하였다. 후방산란계수는 calibration factor와 레이더의 입사각을 이용하여 획득하였다.

Table 1. SAR images and tide information used in this study

Satellite	Aquisition Date (yyyymmdd)	Polarization	Orbit	Incidence angle (degree)	Local time (hh:mm)	Tidal Height (cm)	Tidal
Envisat	20040702	VV	D	22.84	10:46	171	flow
	20070806			22.83	10:46	380	ebb
JERS-1	19960620	HH	D	38.80	11:20	232	ebb
	19970721			39.01	11:19	101	flow

Envisat ASAR 영상에서는 몽산포 조간대와 가장 가까운 조위 관측소인 안흥 관측소에서 관측된 조위자료를 이용하여 waterline을 추출하였다. Fig. 1(a), 1(b)에 표시한 노란색 실선은 ASAR 영상이 촬영된 시각의 waterline을 의미한다. ASAR 영상에서 추출된 waterline을 연안정보도의 등수심선 벡터와 함께 사용하여 조간대의 대략적인 DEM(digital elevation model)을 생성하였다. DEM 제작에 필요한 고도 정보가 부족하였으나 조간대의 고도차가 크지 않고 완만한 경사를 가지면서 고도가 변화하므로 대략적인 DEM 생성이 가능하였다. 생성된 DEM을 이용하여 조간대와 바다의 구별이 쉽지 않은 JERS-1 SAR 영상에서 waterline을 추출하였고, 이를 Fig. 1(c), 1(d)에 각각 노란색 실선으로 나타냈다.

SAR 영상에서 관찰되는 조간대의 산란 특성을 해석하기 위해 현장에서의 실측 조사가 수행되었다. 현장조사가 수행된 지역은 Fig. 1(a)에 3개의 적색 점선(site 1, 2, 3)으로 표시하였다. 현장조사는 2007년과 2009년 사이에 총 5회 실시하였으며, 조간대의 ridge-runnel 구조를 확인하고 연흔의 유무와 파장, 파고를 측정하였다. 또한 지표 잔존수와 토양의 수분함량 정도를 파악하였다. 연흔의 파장과 파고 측정은 총 2회의 현장조사에서 이루어졌다.

3. 자료 해석

Fig. 1(a), (b)의 Envisat ASAR 영상에서 밝고 어두운 띠 패턴이 조간대 전체에 걸쳐 나타나는 것이 관찰되었다. 이러한 패턴은 필 갯벌에서는 관찰되지 않는 것으로, ridge-runnel 구조가 잘 발달된 사질해변에서 연흔에 의한 산란 때문으로 판단하였다. 반면에 JERS-1 SAR 영상(Fig. 1c, 1d)에서는 간조 시기임에도 이 패턴이 나타나지 않는 것을 확인하였다. 이러한 채널 형태의 패턴이 광학영상에서도 관찰되는지 확인하기 위하여 2004년 3월 23일에 획득된 Landsat-7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) 영상을 확인하였다(Fig. 2). Fig. 2(a)는 ETM+ 가시광선 영상의 RGB 조합으로 ASAR 영상에서와 같은 패턴은 관측되지 않았다. 각각의 파장에 따른 영상 분석을 수행한 결과 중 적외선 영상인 band-5 영상에서 띠 모양의 패턴이 희미하게 관찰되었다(Fig. 2b). ETM+의 band 5는 토양의 수분함량에 민감하게 반응하는 1.55~1.75 μm 의 파장대를 사용하므로 배수가 완전히 이루어지지 않은 채널에서 반사도가 약하게 관찰됨을 알 수 있다. 그러나 이 경우에도 패턴의 구분이 쉽지 않으며, 조간대 전체에 걸쳐 수분이 존재할 경우 Fig. 2(b)에서 확인되는 희미한 패턴도 관찰이 되지 않을 수 있다. 또한 연흔의 유무에 따른 반사도의 특징은 공간해상도 1 m급 혹은 수 십 cm급의 광학영상에서는 표현될 수 없을 것으로 사료된다. 따라서 몽산포 조간대에서 관찰되는 채널 형태의 패

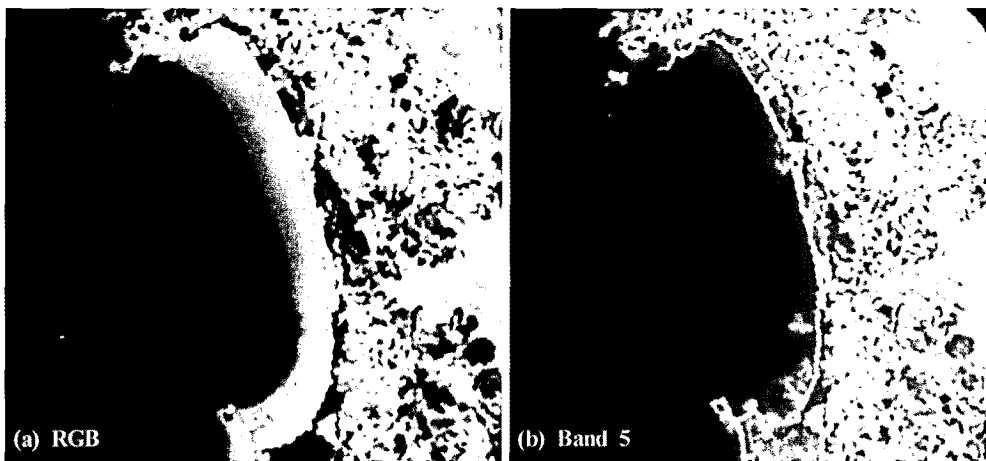


Fig. 2. Landsat-7 ETM+ image (2004/03/23). (a) An RGB image with band-3, 2, 1 composite does not show any pattern of ridge-runnel. (b) The band-5 image (mid-infrared) of ETM+ that faintly shows the ridge-runnel pattern.

턴은 SAR 영상에서만이 뚜렷이 관찰될 수 있는 퇴적구조이며, 이를 바탕으로 SAR 영상이 광학영상보다 연흔이 발달한 조간대 퇴적구조 연구에 더 유용함을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 Envisat ASAR 영상과 JERS-1 SAR 영상으로부터 현장조사가 이루어진 site 1, 2, 3에 대한 후방산란계수를 나타낸 그래프로, 각각 바다(A, B, C)에서부터 육지(A', B', C')까지의 후방산란계수를 추출한 것이다. 후방산란계수는 Fig. 3(a)의 흰색 실선을 따라 추출되었다. Fig. 3(b), (c), (d)에서 적색으로 표시한 두 개의 세로 막대는 ridge-runnel 구조와 연흔이 존재하는 구간을 나타낸다. Envisat ASAR 영상에서 어둡게 보이는 채널은 연흔이 지워져 매끄러운 표면을 가지는 ridge라 판단되었으며, 후방산란계수는 -17.5~20 dB의 범위를 가졌다. 반면에 배수가 잘 이루어지고 연흔이 존재하여 밝게 보이는 채널(runnel)에서는 -9~-12.5 dB의 범위에 후방산란계수가 분포하였다. JERS-1 SAR 영상에서의 후방산란계수는 조간대와 바다에서 모

두 작은 값(-13~-16 dB)을 가지며, 육지에서는 조간대와 바다보다 후방산란이 강하여 최대 -2.5 dB의 값이 추출되었다.

Fig. 4는 몽산포 조간대에서 간조시기에 촬영한 현장 사진으로, ridge-runnel 구조와 연흔의 존재를 확인할 수 있다. Fig. 4(a)의 왼쪽 부분에서 연흔과 지표잔존수가 남아있는 runnel을 확인할 수 있으며, 그 오른쪽으로 배수가 모두 이루어지고 연흔이 없어 부드러운 표면을 가지는 ridge를 볼 수 있다. 연흔은 밀물과 썰물 때 바닥에서 파의 진동에 의해 생성된 후 간조시기에 Fig. 4(b)와 같이 물 밖으로 노출된다. 연흔이 노출된 경우 레이더의 파장에 따라 Bragg 산란이 일어날 수 있으며, 매우 강한 후방산란을 일으키게 된다. 조간대 현장에서는 Fig. 4(c)와 같이 연흔이 세파대(swash zone)와 빠른 유속에 의해 지워진 흔적이 있는 ridge가 관찰되었으며, 이러한 경우 거칠기에 의한 산란이 약해져 SAR 영상에서 작은 후방산란이 관찰된다. Fig. 4(d)는 runnel에서 연흔의 형태가 보존되어 있으나 간조 시 배

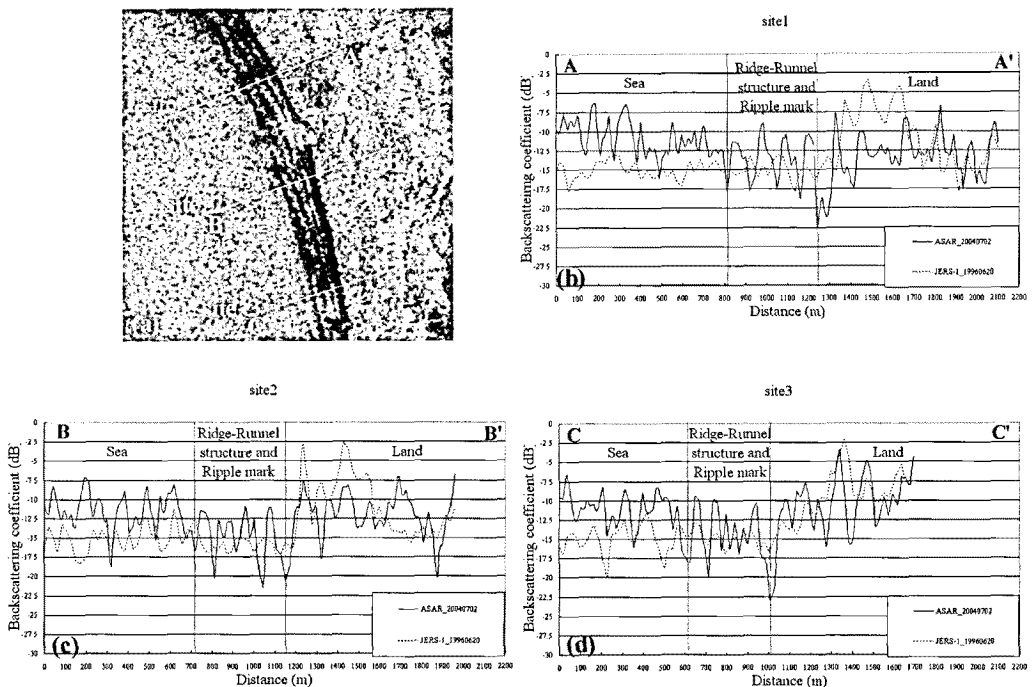


Fig. 3. Backscattering coefficient of Envisat ASAR and JERS-1 SAR images. (a) Backscattering coefficient lines for the site 1, 2, and 3 shown over the Envisat ASAR image (2004/07/02). Backscattering coefficient profiles of the site 1 (b), site 2 (c), and site 3(d). The solid lines are backscattering coefficient of Envisat ASAR image (2004/07/02) while the dotted lines are those of JERS-1 SAR image. Ridge-runnel structure and ripple marks reside between the two vertical lines.

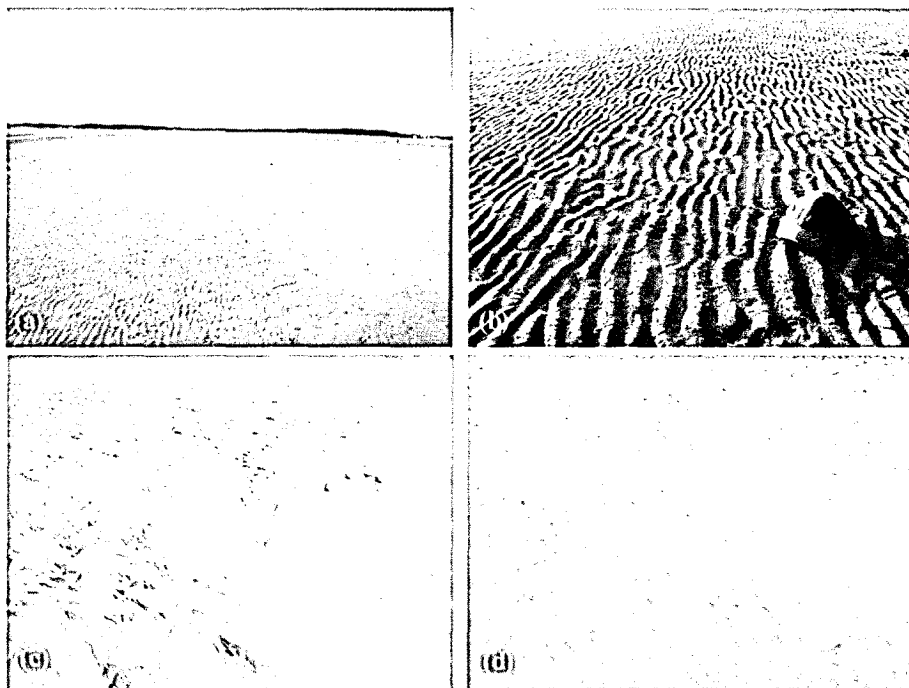


Fig. 4. Ripples and ridge-runnel structure in Mongsanpo intertidal flat. (a) Runnel in the left of the image with ripples and ridge with no ripple on the right (2007/08/23). (b) Well-drained symmetric ripples on runnel (2007/08/23). (c) Smooth surface of a ridge with no ripple (2009/12/16). (d) Ripples under water (2009/04/24).

수 초기에 연흔이 물 밖으로 노출되지 않는 모습을 나타낸다. 이와 같이 배수가 거의 이루어지지 않아 연흔의 형태가 노출되지 않는 경우 후방산란은 매우 작아진다. 이러한 지역은 waterline 근처에서도 자주 발견되었으며, 노출시간이 짧은 runnel에서 주로 관찰되었다.

SAR 영상의 후방산란계수와 현장에서 조사된 자료의 분석을 통해 ridge-runnel 구조에서는 연흔의 유무 뿐만 아니라 조석의 순환에 의한 배수의 여부도 레이더의 산란 특성에 큰 영향을 끼침을 알 수 있었다. 또한 강한 후방산란의 주된 원인은 배수가 완전히 이루어져 지표잔존수가 없는 지역에서 공기 중에 노출된 연흔임을 추정할 수 있었다. Envisat ASAR 영상에서 관찰되는 연흔에 의한 후방산란은 단순한 표면 거칠기와 유전상수로 설명하기에는 매우 강한 것으로서, 레이더의 파장과 입사각 및 연흔의 파장에 따라 보강간섭의 조건이 달라지는 Bragg 산란에 의한 효과로 해석할 수 있다. Bragg 산란은 주로 해파에서 Capillary wave에 의한 강한 후방산란을 설명하는 것으로, 그 조건식은 다음과 같다(Long, 2001).

$$\lambda_r = \frac{n\lambda}{2\sin\theta_i} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

n = order number

λ_r = ripple wavelength

λ = radar wavelength

θ_i = incidence angle

식 (1)로부터 Bragg 산란의 첫 번째 모드인 $n=1$ 일 때, 본 연구에 사용된 C-밴드의 Envisat ASAR 영상에서는 연흔의 파장이 약 7.2 cm일 경우 Bragg 산란이 발생하는 반면, L-밴드인 JERS-1은 약 18.7 cm 파장의 연흔에서 발생된다. Bragg 산란을 일으키는 파장이 몽산포 조간대에 분포하는 연흔의 파장과 일치하는지 확인하기 위해 현장에서 측정된 연흔의 파장에 대해 통계분석을 수행하였다.

Fig. 5(a)와 (b)는 각각 2007년 8월과 2008년 3월의 현장조사에서 측정된 연흔의 파장을 히스토그램으로 나타낸 것이다. 측정 시기 별로 파장의 차이는 약간 존재하였으나, 대부분 4-10 cm 범위 내에 분포하였다. 이는

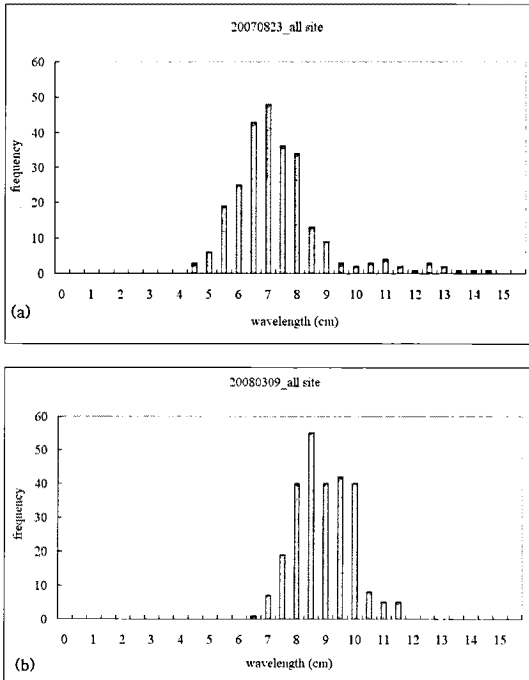


Fig. 5. Histograms of ripple wavelength measured on (a) 23 August 2007 and (b) 9 March 2008. The first order Bragg scattering occurs at the ripple wavelength of 7.2 cm for C-band and 18.7 cm for L-band.

C-밴드인 Envisat ASAR 영상(Fig. 1a, 1b)에서 Bragg 산란의 첫 번째 모드($n=1$)를 유발하는 조건에 해당한다. 반면에 JERS-1 SAR 영상(Fig. 1c, 1d)에서는 간조 시기의 영상임에도 ridge-runnel 구조와 연흔에 의한 강한 후방산란이 관찰되지 않는데, 이는 L-밴드의 긴 파장에 비해 연흔의 파장이 짧아 거칠기나 Bragg 산란에 의한 후방산란이 거의 일어나지 않기 때문이다.

$n>1$ 인 경우 $n=1$ 일 때 계산된 파장의 n 배수에 해당하는 파장의 연흔에서 Bragg 산란이 발생한다. 예를 들어 $n=2$ 일 때, Envisat ASAR 영상에서는 14.4 cm, JERS-1 SAR 영상에서는 37.4 cm의 파장을 가지는 연흔이 존재해야 Bragg 산란이 일어나게 된다. 따라서 몽산포 조간대의 연흔에서는 $n=1$ 인 경우에 Bragg 산란이 일어나는 것으로 해석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 Envisat ASAR 영상과 JERS-1 SAR 영상을 이용하여 ridge-runnel 구조가 나타나는 태안

몽산포 조간대의 연흔을 관찰하고 산란 메커니즘을 분석하였다. Envisat ASAR 영상에서는 조간대의 표면에서 밝고 어두운 띠의 패턴이 반복되어 나타나는 것이 관찰되었다. ASAR 영상에서 관찰되는 띠 패턴 중 강한 후방산란은 배수가 잘 된 연흔에 의한 것이며, 약한 후방산란은 연흔이 지워져 표면의 거칠기가 감소한 ridge 이거나 배수가 불량한 runnel에서 발생하는 것으로 나타났다. 연흔에 의한 산란은 Bragg 산란에 의한 보강간섭 효과로 해석할 수 있었다. 현장에서 관찰된 연흔의 파장을 분석한 결과 C-밴드인 Envisat ASAR 영상에서 강한 Bragg 산란이 일어나는 반면에 L-밴드인 JERS-1 SAR 영상에서는 Bragg 산란이 일어나지 않는 것으로 확인되었다.

이 연구를 통하여 ridge-runnel 구조가 잘 발달되고 연흔이 많은 사질해변의 연구에 SAR 영상이 기타 광학 영상에 비하여 탁월함을 확인하였으며, 연구의 결과를 이용하여 SAR 영상에서 몽산포 조간대와 비슷한 특징을 보이는 서해안의 퇴적상을 분류하는데 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 보다 다양한 시기와 파장 및 편파에서 촬영된 SAR 영상을 사용하여 시기별 분석을 진행할 예정이다. 특히 고해상도 TerraSAR-X 및 COSMO-SkyMed 영상을 이용하여 X-밴드에서의 분석을 추가할 예정이다. 또한 지상용 SAR 시스템을 현장에 적용하여 다양한 파장, 편파, 조간대의 배수조건에 따른 후방산란 실험을 진행할 예정이다.

사 사

이 연구는 한국항공우주연구원의 다목적실용위성 5호 시스템종합개발사업의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 강대균, 2003. 충청남도 해안에 발달한 해변과 해안사구, 한국지구과학회지, 24(6): 568-577.
- 류주형, 조원진, 원중선, 이인태, 전승수, 서애숙, 김금란, 2000. 원격탐사 자료로부터 해안선 추출에

- 의한 조간대 DEM 생성, 대한원격탐사학회지, 16(3): 221-223.
- 박정원, 이윤경, 원중선, 2009. TerraSAR-X를 이용한 조간대 관측, 대한원격탐사학회지, 25(4): 383-389.
- 오재경, 금병철, 1998. 서해안 몽산포 대조차 해변의 퇴적학적 특성, 한국지구과학회지, 19(3): 310-317.
- 해양수산부, 2005. 우리나라의 갯벌-자연생태의 특성 (갯벌 총서 #1), 시그마프레스, pp. 6-9.
- Allen, J. R. L., 1979. A model for the interpretation of wave ripple-marks using their wavelength, textural composition, and shape, *Journal of Geological Society*, 136: 673-682.
- Carling, P. A., J. J. Williams, I. W. Croudace, and C. L. Amos, 2009. Formation of mud ridge and runnel in the intertidal zone of the Severn Estuary, UK, *Continental Shelf Research*, 29: 1913-1926.
- Chauhan, P. P. S., 2000. Bedform association on a Ridge and Runnel foreshore: Implications for the hydrography of a macrotidal Estuarine Beach, *Journal of Coastal Research*, 16(4): 1011-1021.
- King, C. A. M. and W. W. Williams, 1949. The formation and movement of sand bars by wave action, *The Geographical Journal*, 113: 70-85.
- Long, M. W., 2001. Radar reflectivity of land and sea, 3rd Edition, *Artech House, Boston, USA*.
- Moore, J. N., W. J. Fritz, and R. S. Futch, 1984. Occurrence of megaripples in a ridge and runnel system, Sapelo Island, Georgia: Morphology and processes, *Journal of Sedimentary Petrology*, 54(2): 615-625.
- Orme, A. R. and A. J. Orme, 1988. Ridge-and-runnel enigma, *Geographical Review*, 78(2): 169-184.
- Owens, E. H. and D. H. Frobel, 1977. Ridge and runnel systems in the Magdalen Islands, Quebec, *Journal of Sedimentary Petrology*, 47(1): 191-198.
- 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.
- Tanner, W. F., 1967. Ripple mark indices and their uses, *Sedimentology*, 9: 89-104.
- Van der Wal, D., P. M. J. Herman, and A. W. Dool, 2005. Characterisation of surface roughness and sediment texture of intertidal flats using ERS SAR imagery, *Remote Sensing of Environment*, 98(1): 96-109.
- Vincent, C. E., R. C. Kay, C. Chenghui, L. Li, and J. Jarvis, 1990. Morphology, sedimentary bedforms and sand transport across a ridge-and-runnel beach under the action of summer waves, *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 8(3): 197-212.
- Williams, J. J., P. A. Carling, C. L. Amos, and C. Thompson, 2008. Field investigation of ridge-runnel dynamics on an intertidal mudflat, Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, 79: 213-229.