

TerraSAR-X를 이용한 조간대 관측

박정원 · 이윤경 · 원중선[†]

연세대학교 지구시스템학과

Investigation of Intertidal Zone using TerraSAR-X

Jeong-Won Park, Yoon-Kyung Lee, and Joong-Sun Won[†]

Department of Earth System Sciences, Yonsei University

Abstract : The main objective of the research is a feasibility study on the intertidal zone using a X-band radar satellite, TerraSAR-X. The TerraSAR-X data have been acquired in the west coast of Korea where large tidal flats, Ganghwa and Yeongjong tidal flats, are developed. Investigations include: 1) waterline and backscattering characteristics of the high resolution X-band images in tidal flats; 2) polarimetric signature of halophytes (or salt marsh plants), specifically *Suaeda japonica*; and 3) phase and coherence of interferometric pairs. Waterlines from TerraSAR-X data satisfy the requirement of horizontal accuracy of 60 m that corresponds to 20 cm in average height difference while current other spaceborne SAR systems could not meet the requirement. HH-polarization was the best for extraction of waterline, and its geometric position is reliable due to the short wavelength and accurate orbit control of the TerraSAR-X. A halophyte or salt marsh plant, *Suaeda japonica*, is an indicator of local sea level change. From X-band ground radar measurements, a dual polarization of VV/VH-pol. is anticipated to be the best for detection of the plant with about 9 dB difference at 35 degree incidence angle. However, TerraSAR-X HH/HV dual polarization was turned to be more effective for salt marsh monitoring. The |HH-HV| value was the maximum of about 7.9 dB at 31.6 degree incidence angle, which is fairly consistent with the results of X-band ground radar measurement. The boundary of salt marsh is effectively traceable specifically by TerraSAR-X cross-polarization data. While interferometric phase is not coherent within normal tidal flat, areas of salt marsh where the landization is preceded show coherent interferometric phases regardless of seasons or tide conditions. Although TerraSAR-X interferometry may not be effective to directly measure height or changes in tidal flat surface, TanDEM-X or other future X-band SAR tandem missions within one-day interval would be useful for mapping tidal flat topography.

Key Words : TerraSAR-X, synthetic aperture radar (SAR), tidal flat, waterline DEM, Halophytes monitoring, radar interferometry (InSAR).

요약 : TerraSAR-X 자료를 이용하여 고해상 X-밴드 SAR 시스템을 이용한 조간대 갯벌 관측에의 적용 가능성을 시험하였다. 연구대상지역은 강화도 남단과 영종도를 잇는 조간대이며, 단일편파자료와 이중편파자료를 이용하였다. 연구내용은 다음과 같은 세 가지로 분류된다. 첫째, X-밴드 영상에서의 연안의 레이

접수일(2009년 7월 15일), 수정일(1차 : 2009년 8월 8일), 게재확정일(2009년 8월 24일).

[†] 교신저자: 원중선(jswon@yonsei.ac.kr)

더 반사도 특성 연구 및 waterline 추출 정밀도를 평가하였다. 연안지역의 waterline은 HH 편광자료의 레이더 반사도 특성을 통하여 추출하였을 때 가장 신뢰도가 높았으며, TerraSAR-X 시스템의 짧은 파장과 높은 궤도정밀도로 인하여 정밀한 지리좌표로의 변환이 가능하였다. 연구지역의 조간대 지형 경사도는 평균적으로 수평방향으로 60 m당 20 cm의 고도변화를 가지므로, TerraSAR-X HH 편광자료를 이용한 waterline 추출은 정밀한 조간대 DEM 추출로 응용될 수 있다. 둘째, 이중편파자료의 편파특성을 이용한 조간대 염생식물의 산란특성을 관측하였다. 조간대 수륙경계부에서 잘 관측되는 칠면초와 같은 염생식물은 해수면변화에 따른 조간대의 육지화 모니터링에 좋은 표적이 된다. TerraSAR-X 이중편파자료의 산란특성을 이용한 염생식물 관측결과는 2007년에 현장에서 취득된 실측자료와 비교하여 3 dB 이내의 정밀도로 일치하였다. 셋째, 단일편파자료의 레이더 간섭기법을 이용한 조간대 DEM 작성을 시도하였다. 조간대 내에서 육지화가 진행된 지역은 표면에 염생식물이 발달하였음에도 불구하고 높은 간섭길밀도를 나타내었다. 레이더 간섭기법을 통한 DEM의 제작은 일반적인 조간대에서는 적용이 제한적이며, TanDEM-X의 적용이 필요하다.

1. 서론

대표적인 연안습지인 조간대는 생태적, 환경적, 경제적으로 높은 가치를 지닌 수륙경계부이다. 특히 세계 5대 갯벌 중 하나인 우리나라의 조간대는 외국과 비교하여 매우 넓게 분포해 있으며, 해수위의 변동이나 인간의 활동, 퇴적 및 침식작용 등의 환경 인자에 의해 끊임없이 변화하고 있다. 이러한 조간대의 지형변화를 정량적으로 연구하기 위해서는 넓은 지역을 주기적으로 관측해야 하며, 이에 위성원격탐사를 이용한 다양한 분석이 시도되고 있다. 본 연구에서는 TerraSAR-X 자료를 이용하여 조간대의 물리적 특성을 연구하기 위한 적용실험을 수행하였으며, 1) X-밴드 SAR (Synthetic Aperture Radar) 영상의 반사도 특성을 이용한 waterline 추출, 2) 편파자료를 이용한 염생식물 모니터링, 3) SAR 영상의 간섭기술을 이용한 DEM 작성에 대하여 연구하였다.

2. 연구지역

한반도 서해안의 강화도와 영종도 사이에 발달한 조간대는 높은 조차로 인하여 약 105km²의 넓은 지역에 걸쳐 발달하였으며, 한강, 임진강, 예성강으로부터 유입되는 퇴적물에 의한 퇴적/침식 작용이 활발하다(한국해양연구원, 1998) (Fig. 1). 조석은 전형적인 일일 2주기로 연중 25회의 고고조와 저고조의 반복이 뚜렷하고,

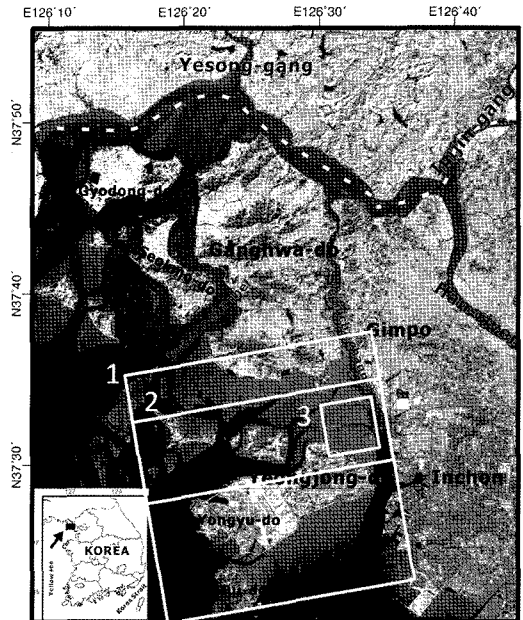


Fig. 1. Location map and Landsat image of the study area. Area 1 is the coverage of acquired TerraSAR-X image. Area 2 and 3 are the location corresponding to figure 5 and 6, respectively.

월간변화는 7월을 제외한 전기간에 걸쳐 조금과 사리의 부등현상이 뚜렷하다(우한준, 제종길, 2002). 특히 이 지역은 세계자연기금과 아시아 습지보호협약이 목록화한 우리나라 주요습지의 10.45%, 경기도 해안 습지 전체의 20%에 해당하는 부분으로 환경적 가치가 매우 높게 평가되고 있다(국립공원관리공단, 1998). 그러나 영종도 신공항건설 등의 대규모 토목공사로 인하여 자연갯벌 훼손문제가 발생하고 있으며, 조류로의 인위적인

변화에 따른 주변 조간대의 퇴적물 특성과 생태계의 변화가 빠르게 진행되어 다양한 분야의 연구자들의 관심이 집중된 주요 모니터링 지역이다.

3. 연구방법 및 결과

1) Waterline 추출

조간대는 지표의 노출시간이 짧기 때문에 현장조사를 통해 넓은 지역의 변화를 한번에 관측하는 데에는 많은 시간과 비용이 소요된다. 조간대의 삼차원적인 지형 변화를 정밀하게 관측하기 위해서는 DEM(Digital Elevation Model)이 필요하다. 항공기 LIDAR를 이용하면 단기간에 정교한 DEM을 만들 수 있지만, 자료가 불연속적이고 비용이 많이 소요된다. LIDAR 이외의 원격탐사 방법으로 조간대 DEM을 만들기 위해 일반적으로 많이 활용되는 기법은 waterline 추출 방법이다. Waterline은 영상 취득 당시의 조위에 해당하는 등고선을 나타내므로, 각각 다른 조위에서 얻어진 waterline 간의 보간을 통하여 조간대 DEM을 제작할 수 있다. 또한 주기적으로 제작된 DEM간의 비교를 통해 퇴적량이나 침식량의 변화를 산출할 수 있다(Ryu *et al.*, 2008). 다분광 광학영상 자료를 이용한 waterline 추출은 그동안 유용하게 적용되어 왔으나, 광학영상의 특성상 기상 조건에 의한 촬영의 제약이 있기 때문에 짧은 기간 동안 다양한 조위의 waterline을 얻기는 힘들다. 이에 반하여 SAR는 기상조건에 의한 제약이 거의 없기 때문에 동일한 기간 내의 영상자료 수집에 있어 수급이 안정적이다.

SAR 영상으로부터 waterline 추출 시, 레이더파의 중심주파수는 추출된 waterline의 위치에 영향을 미친다(Valenzuela, 1978). 이는 레이더파의 파장에 따라 해파에 반응하는 Bragg scattering의 발생지역이 차이 나기 때문이다. X-밴드의 Bragg resonance는 기존의 C-밴드나 L-밴드의 경우에 비해 실제의 수륙경계선에 가까운 곳에서 발생하기 때문에 gray-value threshold 방법을 이용할 때 보다 정확한 위치를 구해낼 수 있다(Kim *et al.*, 2007). 또한 해파와의 Bragg resonance는 VV 편파에서 민감하게 발생하므로 waterline의 추출에는 HH 편파가 유리하다.

Waterline의 추출을 위하여 우선 TerraSAR-X

SLC 영상으로부터 후방산란계수(σ^0)를 구하고 영상의 스펙클 자체의 통계특성을 이용하는 EPOS 필터(Hagg and Sties, 1994)를 통하여 노이즈를 줄인 후, gray value threshold 방법을 통하여 해수와 조간대의 경계를 구분하였다.

추출된 waterline을 바탕으로 조간대의 DEM을 작성하기 위해서는 waterline에 좌표를 부여해야 한다. 본 연구에서는 역좌표부여 방법(Hong *et al.*, 2006)을 통하여 TerraSAR-X 영상의 지리좌표를 부여하였고, SRTM DEM과 역좌표부여 방법을 통해 부여되는 TerraSAR-X 영상 자체의 좌표정밀도는 4 m 이내이다(박정원 외, 2008).

구해진 waterline의 위치정밀도를 정량적으로 파악하기 위하여 실측자료와의 비교를 수행하였다. 실측자료는 한국해양연구원에서 2006년 6월에 강화도 남단 동막리 앞 조간대에서 측선을 따라 수준측량을 수행한

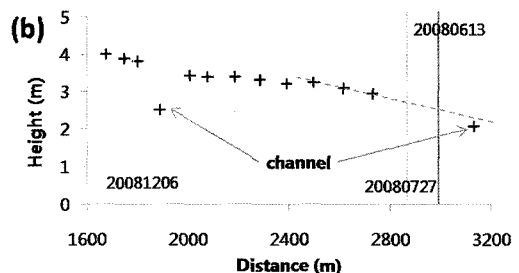
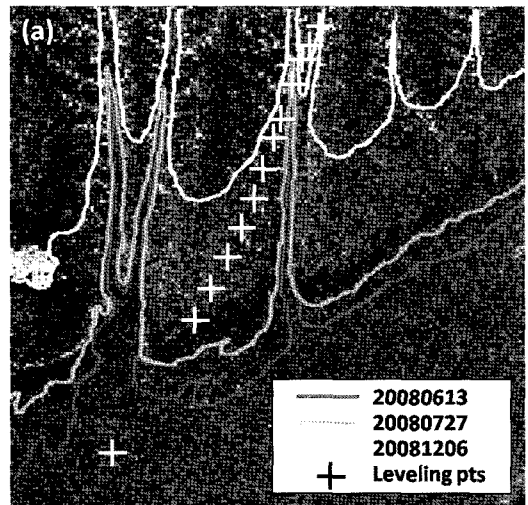


Fig. 2. Extracted waterlines and leveling points. (a) Three waterlines and leveling points overlaid on TerraSAR-X imagery. (b) Comparison of leveling data and extracted waterline from TerraSAR-X data.

것으로, 2008년 6월 13일, 7월 27일, 12월 6일에 각각 촬영된 TerraSAR-X 영상으로부터 구해진 waterline 위에 중첩하였다(Fig. 2(a)).

Gray value threshold 방법으로 waterline을 결정할 때의 경계값은 영상촬영 당시의 조간대 및 해수의 표면상태에 따라 달라지기 때문에 gradient 분석을 통해 후방산란계수가 크게 바뀌는 경계를 기준으로 결정하였다. 해양조사원의 1시간 실측 조위자료를 내삽하여 추정된 결과, TerraSAR-X 영상 촬영 시기의 조위는 인천 검조소 검조자료를 기준으로 2008년 6월 13일 자료에서는 약 226 cm, 7월 27일 자료에서는 약 272 cm, 12월 6일 자료에서는 약 378 cm였다. 위 자료를 바탕으로 연구지역에 해당하는 조위를 얻기 위해서 연구지역과 인천검조소의 위치 차이에 의해 발생하는 조차를 보정하였다. 보정방법은 다음의 식과 같으며, 개정수인 조시차와 조고비 그리고 평균해면은 국립해양조사원의 조석표를 참고하였다. 이 때 연구지역에 해당하는 개정수와 평균해면값은 지리적으로 가까운 영종도 지역의 값을 이용하였다.

$$\text{연구지역의 조위} = [\text{표준항(인천)의 조위} - \text{표준항(인천)의 평균해면}] \times \text{조고비} + \text{연구지역의 평균해면}$$

위 식에 의해 보정된 조위는 2008년 6월 13일 영상에서는 약 234 cm, 7월 27일 영상에서는 약 281 cm, 12월 6일 영상에서는 약 389 cm이다. Fig. 2(b)는 측선의 고도와 추출된 waterline의 위치를 비교한 것이다. 추출된 waterline이 측점상에 있지 않기 때문에 waterline의 주변 측점을 통해 단순히 선형적인 외삽을 한 결과, 2008년 6월 13일 영상과 7월 27일 영상에서 waterline이 걸리는 지점의 고도는 약 264 cm, 276 cm였다. 2008년 12월 6일 영상의 waterline은 거의 측점과 일치하는 위치에 나타났으며, 고도는 382 cm였다. 지형변화의 선형성을 가정한 상태에서 오차요인으로 생각할 수 있는 것은 조위조건에 따른 후방산란계수의 변화를 들 수 있다. 6월 13일 영상은 썰물시에 촬영된 것이기 때문에 실제 waterline에 가까운 부분에는 잔존수가 많아 전반사로 인한 후방산란계수의 감소가 발생할 수 있다. 따라서 영상에서의 waterline의 위치가 실제의 위치보다 고도가 높은 지역에서 추출될 수 있다. 반면에 7월 27일 영상과 12월 6일 영상은 밀물시에

촬영된 것이며, 조간대의 노출시간이 상대적으로 길어 잔존수의 영향이 적기 때문에 비교적 정확한 고도를 추출할 수 있다. 그러나 정량적인 waterline의 정밀도 평가를 위해서는 더 다양한 조위의 영상이 필요하다. 특히, 썰물시의 자료는 잔존수의 영향을 크게 받기 때문에 지표노출시간에 따른 보정을 반드시 고려해야 할 것이다.

TerraSAR-X는 고해상, 고정밀, 짧은 파장의 특성으로 인하여 기존의 위성 SAR 시스템에 비해 양질의 waterline을 추출할 수 있는 가능성이 높으며, 11일의 비교적 짧은 관측주기로 인하여 단기간 내에 퇴적/침식 작용에 의해 변화되지 않는 waterline DEM 작성이 가능할 것이다.

2) 염생식물 탐지

염습지의 분포는 최고조위와 노출시간, 그리고 조간대의 수리적, 물리적인 특성에 따라 변화하며, 이러한 환경변화는 염습지에 서식하는 염생식물의 군집위치를 변화시킨다. 이는 염생식물의 서식지가 조간대 퇴적물의 염분농도에 의존하여, 육지화가 진행되어 염분도가 떨어지면 점점 염분도가 높은 바다쪽으로 그 군집이 이동하기 때문이다. 따라서 염생식물 분포의 변화는 조간대의 육지화를 나타내는 지시자 역할을 하기 때문에 장기간에 걸친 주기적 모니터링이 필요하다.

칠면초는 염습지에 서식하는 대표적인 염생식물로, 강화도 남단 조간대 중 고도가 높은 곳에 널리 분포하고 있다. 이곳의 칠면초는 인천공항이 건설되어 조류의 흐름과 퇴적상이 바뀌기 시작한 때부터 번성하기 시작하여 비교적 짧은 시간 내에 군집범위가 확대되었다. spectrometer의 칼로로필 탐지를 통해 칠면초의 위치를 파악할 수 있으나 그 분광학적 특성이 육상식물에 비해 두드러지지 않기 때문에 광학위성영상을 통해 칠면초를 구분하기란 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 칠면초와 같은 염생식물의 군락지를 SAR 영상의 편파별 산란특성을 통해 구분하고자 한다.

우선 현장조사를 통해 칠면초 군락지의 X-밴드 산란 특성을 조사하였다. 조사지역은 강화도 남동쪽에 위치하는 동검도 주변으로, 강화도와 동검도를 잇는 제방도로의 서쪽은 염생식물이 크게 번성하지만 제방도로의 동쪽은 식생이 전혀 발달하지 않는 대비되는 특징을 보인다. 현장측정은 2008년 8월 22일에 흥익대 전파응용

연구실의 도움으로 X-밴드 standard horn antenna를 이용하여 25, 35, 45도 각도에서 HH/HV/VH/VV 편파를 모두 관측하였다. Fig. 3에 나타난 측정결과를 통해 입사각이 커짐에 따라 후방산란량은 적어지며 VV 편파에서 가장 강한 후방산란이 관측되는 것을 볼 수 있다. 연구에 사용된 TerraSAR-X 이중편파 자료의 입사각은 31.6°로, 현장관측 결과에 따르면 이 입사각에서 후방산란계수는 VV/VH 이중편파자료에서는 약 10.2 dB, HH/HV 이중편파자료에서는 약 7.1 dB의 차이를 보여야 할 것이다.

TerraSAR-X 이중편파 자료는 2008년 6월 27일에 취득된 HH/HV 편파자료와 2008년 9월 23일에 취득된 VV/VH 편파자료를 사용하였다. 두 자료는 약 3개월의 시간간격을 가지므로 동일한 상태의 칠면초를 관측하였다고 볼 수는 없기 때문에 HV편파와 VH편파가 유사한 값을 갖는 픽셀을 중심으로 영상에서 구해진 후방산란계수를 비교하였다. Table 1은 칠면초가 번성한 제방도로 서쪽과 식생이 없는 제방도로 동쪽에서 각각 50개의 검사점을 취하여 구한 평균과 표준편차를 나타낸다. 칠면초가 번성한 서쪽 지역에서의 측정 표준편차는 1.5 dB내외로 비교적 안정된 신호가 관측되나, 식생 없이 노출된 동쪽 조간대는 시간과 장소에 따라 지표조건이

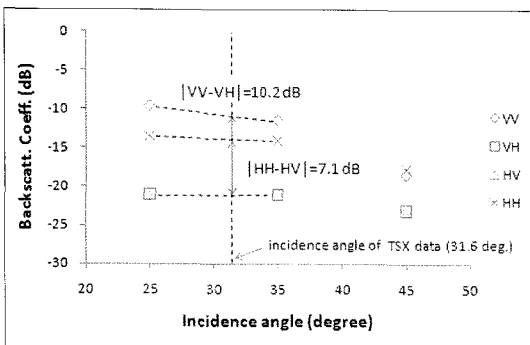


Fig. 3. X-band ground radar measurement over the halophyte Suaeda japonica (Data was measured by microwave application laboratory of the Hongik University).

Table 1. Result of TerraSAR-X multi-polarization observation

σ^0	Location	HH	HV	VH	VV
Mean	Tidal Flat	-6.1	-17.8	-17.6	-5.6
	Halophytes	-4.3	-12.2	-12.3	-4.8
Std.	Tidal Flat	2.2	2.1	2.2	1.8
	Halophytes	1.5	1.6	1.5	1.9

달라지기 때문에 더 큰 표준편차를 갖는다. 칠면초와 같은 식생지대는 체적산란의 증가로 인하여 교차편파에서 일반조간대에 비해 5 dB 이상의 후방산란계수 증가를 보이므로 식생지대와 비식생지대의 구분이 용이하다. 이는 칠면초의 낮은 높이(약 30 cm)와 X-밴드의 짧은 파장(3.11 cm)에서의 특징적인 현상으로, 긴 파장을 갖는 L-밴드(24 cm) ALOS PALSAR 영상에서는 칠면초에 의한 교차편파에서의 후방산란계수의 증가가 관측되지 않았다.

Fig. 4는 지상레이더의 현장관측값과 TerraSAR-X 영상의 측정값을 비교한 것이다. HH/HV 이중편파자료에서 두 편파의 차이는 7.9 dB로, 지상레이더로 측정값인 7.1 dB보다 0.8 dB 높게 관측되었다. 반면에 VV/VH 이중편파자료에서 두 편파의 차이는 7.5 dB로, 지상레이더 측정값인 10.2 dB보다 2.7 dB 낮게 관측되었다.

측정값의 차이를 보이는 이유로서 우선 측정일자차이로 인해 칠면초의 물리적 외형의 변화를 들 수 있다. 칠면초의 번성기이자 개화기는 8-9월으로, 시기적으로 두 측정일자(HH/HV: 6월 27일, VV/VH: 9월 23일)의 사이에 해당한다. 따라서 칠면초의 빠른 성장 및 개화에 따라 체적산란의 비율이 증가할 수 있으며, 이는 교차편파의 후방산란계수를 높여 결과적으로 VV/VH 이중편파 자료에서 두 편파의 차이를 줄이는 요인으로

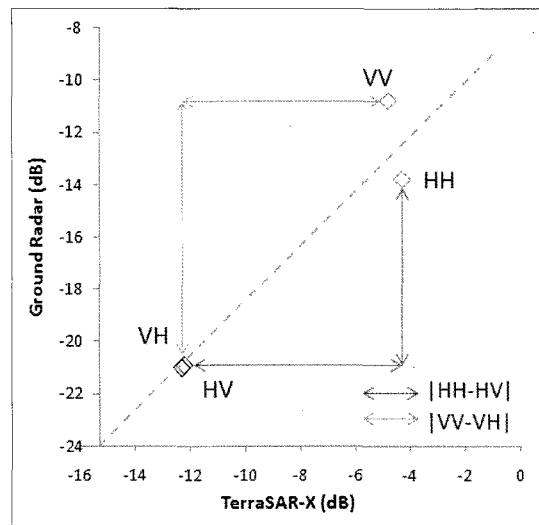


Fig. 4. Comparison of polarimetric signature from halophyte between X-band ground radar and TerraSAR-X data.

작용할 가능성이 있다. 실측값과의 차이를 발생시키는 다른 요인으로는 지상레이더와 위성 SAR와의 시스템 차이로 인한 bias를 들 수 있다.

3) 레이더 간섭기법의 적용

TerraSAR-X 자료에 레이더 간섭기법을 적용하여 조간대와 염생식물 서식지 관측을 시도하였다. 그러나 고해상 X-밴드 자료의 간섭기법 적용에는 여러 가지 제약사항이 있다. 우선 X-밴드는 C-밴드나 L-밴드에 비하여 짧은 파장을 사용하기 때문에 temporal decorrelation의 영향을 크게 받으며, 대기지연효과에 의한 간섭위상의 왜곡이 발생한다. 또한 고해상화로 인하여 지형기복이 심한 지역에서는 서브픽셀 단위의 정합정밀도가 떨어지기 때문에 간밀도가 낮아진다. 그럼에도 불구하고 TerraSAR-X의 정규 관측 주기인 11일 간격의 간섭쌍에서는 전반적으로 양호한 간밀도를 보인다. 수목이 발달한 지역은 식생발달이 활발한 여름철에는 낮은 간밀도로 인하여 간섭위상을 구할 수 없었으나 식생의 물리적 형상이 거의 변하지 않는 겨울철에는 높은 간밀도를 유지하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5.(a)(b) 참조).

조간대 지역을 관측하기 위해서는 영상 촬영시의 조위를 고려해야 한다. 조간대는 항상 수면 위로 노출되어 있는 것이 아니기 때문에, 낮은 조위로 인하여 조간대가 수면위로 충분히 노출되었을 때의 영상만을 선별적으로



Fig. 5. Coherence map of summer pair (a) and winter pair (b). Winter pair shows much better coherence. (c) The areas of halophyte (boxed area) maintains coherence even with long time interval.

이용해야 한다. 조간대의 간섭간밀도는 지표의 잔존수, ripple이나 미세지형, 갯벌토양의 수분함유량 등의 지표의 물리조건에 영향을 받는다. 그러나 상대적으로 지표 노출시간이 긴 대조사 조간대의 고도가 높은 곳에서는 비교적 안정적인 간밀도가 관측된다. 특히 Fig. 5.(c)에서 알 수 있듯이 지형이 높으면서 염생식물이 발달한 지역은 조수의 영향을 적게 받기 때문에 55일의 긴 시간 간격을 둔 간섭영상에서도 높은 간밀도를 보이는 것이 특징적이다. 따라서 앞서 기술한 여러 가지 제약사항에도 불구하고 짧은 촬영주기를 갖는 TerraSAR-X의 간

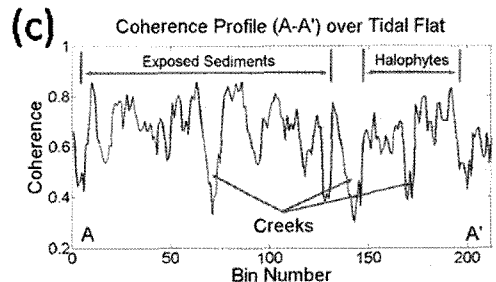
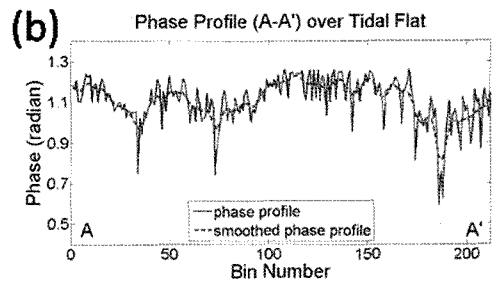
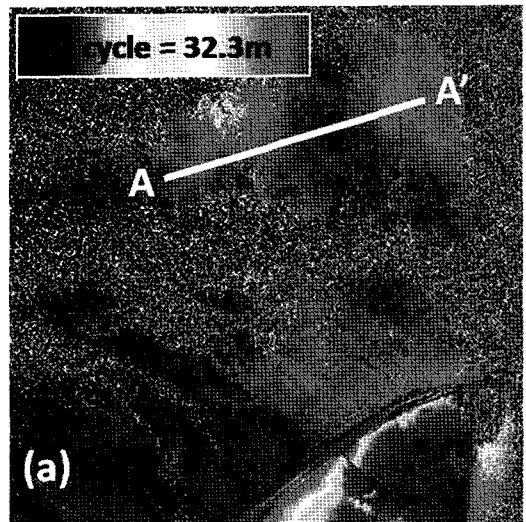


Fig. 6. Interferogram (a), phase profile (b) and coherence profile (c) of tidal flat and salt marsh. The topographic variation in tidal flat can be assumed as smooth surface.

섭영상은 조간대, 특히 높이가 낮은 염생식물이 발달한 지역에서 유용하게 쓰일 수 있다.

레이더 간섭영상의 긴밀도는 두 영상의 촬영 시간 간격과 기선 길이에도 크게 영향을 받는다. 짧은 기선이 높은 긴밀도를 제공하지만, 역으로 고도민감도가 낮아지기 때문에 DEM의 정밀도가 떨어진다. 따라서 레이더 간섭기술을 이용한 조간대 DEM 제작에는 시간간격이 짧고 기선이 긴 간섭쌍이 요구된다. Fig. 6은 2008년 10월 12일과 10월 23일에 각각 촬영된 두 장의 영상에 간섭기법을 적용하여 얻은 조간대의 간섭영상과 위상 및 긴밀도의 단면도이다. 이 간섭쌍의 수직기선길이는 약 197 m로, 약 32.3 m의 고도민감도를 갖는다. 두 영상의 촬영 당시의 조위는 각각 438 cm와 279 cm로 비교적 넓은 영역의 조간대가 수면 위로 노출되어 있으며, 일부 고지대의 경우 0.7 이상의 높은 긴밀도를 보인다. 염생식물이 분포하고 있는 고지대는 노출된 퇴적지보다 0.1 정도 낮지만 여전히 높은 긴밀도를 보인다. 간섭위상의 전반적인 변화는 0.5 radian 내외의 변화를 보이며, 이는 약 2.6 m 정도의 고도변화를 나타낸다. 노이즈를 감안하더라도 조간대는 매우 평평한 지형을 가졌음을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 TerraSAR-X의 조간대 적용에 대한 세 가지 실험을 진행하였다. 그 결과로서, 첫째, TerraSAR-X 영상으로부터 추출한 waterline의 고도 정밀도는 썰물시에 10 cm 이내가 가능하며, 고해상, 고정밀의 시스템특성과 짧은 관측주기로 인하여 waterline DEM의 제작에 적합할 것으로 판단된다. 둘째, TerraSAR-X 이중편파 자료의 편파특성은 지상레이더의 실측결과와 3 dB 이내의 정밀도로 일치하였으며, 이는 이중편파자료를 통한 조간대 염생식물 탐지에 이용될 수 있을 것이다. 셋째, TerraSAR-X 자료를 이용한 레이더 간섭기법은 일부 고지대와 염생식물 군락지에서 0.6 이상의 높은 긴밀도를 보이지만 낮은 고도민감도와 노이즈의 영향으로 조간대 전반의 DEM 작성은 어렵다. 따라서 향후 TanDEM-X 또는 Cosmo-

SkyMed tandem 자료가 요구된다.

참고문헌

- 국립공원관리공단, 1998. 태안해안국립공원의 해안습지 및 비교대상지 조사.
- 박정원, 홍상훈, 원중선, 2008. TerraSAR-X를 이용한 지상기준점 추출, *대한원격탐사학회지*, 24(4): 1-9.
- 우한준, 제종길, 2002. 강화 남부 갯벌의 퇴적환경 변화, *Ocean and Polar Research*, 24(4): 331-343.
- 한국해양연구원, 1998. 갯벌의 효율적인 이용과 보존을 위한 연구.
- 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: 623-632.
- Valenzuela, G. R., 1978. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves - A review, *Boundary-Layer Meteorology*, 13(1): 61-85.
- Kim, D.-J., W. Moon, S.-E. Park, J.-E. Kim, and H.-S. Lee, 2007. Dependence of waterline mapping on radar frequency used for SAR images in intertidal areas, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(2): 269-273.
- Hagg, W. and M. Sties, 1994. Efficient speckle filtering of SAR images, *Proc. of 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, CA, USA, Aug. 8-12, 1994*, 4: 2140-2142.
- Hong, S.-H., H.-S. Jung, and J.-S. Won, 2006. Extraction of ground control points (GCPs) from synthetic aperture radar images and SRTM DEM, *International Journal of Remote Sensing*, 27(18): 3813-3829.