

수륙경계선 방법과 위상간섭기법을 이용한 강화도 남단 갯벌의 DEM 생성 연구

A Study of DEM Generation in the Ganghwado Southern Intertidal Flat Using Waterline Method and InSAR

이 윤 경⁺ / 유 주 형^{**} / 홍 상 훈^{***} / 원 중 선^{****} / 유 흥 룡^{*****}
Yoon-Kyung Lee⁺ / Joo-Hyung Ryu^{**} / Sang-Hoon Hong^{***} /
Joong-Sun Won^{****} / Hong-Rhyong Yoo^{*****}

:: Abstract ::

Digital Elevation Model (DEM) of intertidal flat can be widely used not only for scientific fields, coastal management, fisheries, ocean safety, military, but also for understanding natural and artificial topographic changes of the tidal flat. In this study, we generated DEM of the Ganghwado southern intertidal flat, the largest tidal flat in the west coast of the Korean Peninsula, using waterline method and interferometric synthetic aperture radar (InSAR). Constructed DEM which applied waterline method to the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ images closely expresses overall topographic relief of tidal flat. We found that the accuracy was determined by the number of waterlines which reflect various tidal conditions. The application of InSAR to the ERS-1/2 and ENVISAT images showed that only ERS-1/2 tandem pairs successfully generated DEM in the part of northern Yeongjongdo, but construction of DEM in the other areas was difficult due to the low coherence caused by a lot of surface remnant waters. In the near future, Kompsat-2 will provide satellite images having multi-spectral and high spatial resolution within a relatively short period at different sea levels. Application of waterline method to these images will help us construct a high precision tidal flat DEM. Also, we should develop DEM generation method using single-pass microwave satellite images.

Keywords: DEM, waterline method, InSAR, tidal flat, Ganghwado

+ To whom corresponds should be addressed. jhryu@kordi.re.kr

* 비회원·연세대학교 지구시스템학과 박사과정

** 정회원·한국해양연구원 해양위성연구단 선임연구원·이학박사

*** 비회원·연세대학교 지구시스템학과 이학박사

**** 비회원·연세대학교 지구시스템학과 교수

***** 비회원·한국해양연구원 해양위성연구단 책임연구원·이학박사

:: 요 지 ::

조간대 Digital Elevation Model (DEM)은 순수 학문적 분야, 연안역 관리, 수산활동, 해상안전, 군사적 목적은 물론 자연적·인위적 환경 변화가 심한 조간대의 지형변화를 파악하는데 활용될 수 있다. 본 연구에서는 서해안에서 가장 큰 규모인 강화도 남단 조간대를 대상으로 광학위성자료를 이용한 수륙경계선 방법과 마이크로파 위성자료를 이용한 위상간섭기법을 적용하여 조간대 DEM을 생성하였다. 광학 위성영상인 Landsat-5 TM과 Landsat-7 ETM+ 에 수륙경계선 방법을 적용하여 생성된 DEM은 조간대의 전체적인 지형 형태를 잘 나타내었으나, 그 정밀도가 다양한 조석 상태를 반영하는 수륙경계선들의 갯수에 의해 결정됨을 알 수 있었다. 마이크로파 위성영상인 ERS-1/2와 ENVISAT 에 위상간섭기법을 적용하여 DEM을 생성한 결과, 하루간격의 ERS-1/2 tandem 간섭쌍을 이용하여 영종도 북단 일부 조간대에 대해 DEM 제작이 가능하였으나, 그 밖의 지역에서는 높은 지표잔존수 함량으로 인한 낮은 긴밀도로 인하여 DEM 제작이 어려웠다. 향후 우리나라 다목적위성-2호를 이용하여 단기간에 다양한 조위를 갖는 높은 공간해상도를 갖는 위성영상을 얻음으로 수륙경계선 방법에 의한 DEM 생성의 정밀도를 높일 수 있을 것이다. 또한 계획 중인 single-pass 마이크로파 위성자료를 이용한 조간대 DEM 제작을 위한 기술개발이 요구된다.

핵심용어: 수치표고모델, 수륙경계선 방법, 위상간섭기법, 조간대, 강화도

1. 서론

연안은 육지와 바다가 만나는 장소로 홍수태풍 등의 급격한 변화를 완화시키는 완충지 역할을, 육상기원 물질의 유입통로 역할을 한다. 또한, 일차 생산이 높고 다양한 생물의 생체량이 풍부하여 생태적 서식지로서의 역할을 하며 큰 경제적 가치를 지녀 인간에 의한 이용이 활발하다. 이 지역이 제공하는 경제적, 심미적, 생태적 이점을 이용하기 위하여 인구 및 산업시설이 밀집되어 있고 이에 따른 인위적인 환경 변화가 큰 문제로 제기되고 있다. 최근 서해 연안에 대규모 간척 사업이 활발히 진행되면서 갯벌의 보전이나 개발이나 하는 관점에서 많은 연구가 시도되고 있으며, 우리나라 서해 갯벌의 실질적인 가치를 정량적으로 평가하기 위한 연구들이 진행되고 있다(유만호와 최중기, 2005; 안순모, 2005; 양은진 외, 2005; 조병철 외, 2005). 조간대에서의 물리·화학·생물·지질학적 관점에서 수행되는 모든 연구에서 조간대의 지형 또는 노출시간은 조간대 환경을 결정하는 필수적 요소이다. 따라서 시공간적으로 조간대 지형을 파악함으로써 조간대의

생태·퇴적학적 환경을 이해할 수 있고 조간대 지형에 대한 정량적 DB는 연안역 관리, 수산 활동, 선박 안전항해, 군사적 목적 등에 있어서 매우 중요하다.

현재 우리나라는 선박을 이용한 음향측심(echo sounding)으로 천해역(조간대 포함) 지형을 조사하고 있으나, 이 방법은 조간대 측심환경의 열악성으로 인하여 조간대 지역에 대한 조밀한 간격의 측심 자료를 얻기도 어려울 뿐만 아니라 지속적인 업데이트가 어려운 실정이다. 수준측량이나 Real-Time Kinematic Global Positioning System(RTK GPS)를 이용한 실측 조사에 의한 조간대 지형도 제작도 많은 인력과 시간, 비용, 접근성 등의 문제로 어려움이 많다. 따라서 공간적인 자료를 접근 없이 얻을 수 있는 원격탐사 자료를 이용하여 조간대 DEM을 얻으려는 시도는 여러 가지로 이루어져 왔다. Radar Interferometry(InSAR, 위상간섭기법)를 이용하는 방법, Light Detection and Ranging(LIDAR) 측량, 광학과 Synthetic Aperture Radar(SAR) 자료로부터 수륙경계선을 추출하여 DEM을 만드는 수륙경계선 방법 등이 사용되어

왔다 (Greidanus *et al.*, 1999; Chen and Rau, 1998; 안충현 등, 1992; Wimmer *et al.*, 2000; Rosso *et al.*, 2006; Ryu *et al.* 2000). 위의 방법들은 노출과 침수가 반복되는 조간대의 특성으로 인하여 방문주기(또는 시간적 해상도)에 제약이 많은 위성보다는 항공기를 이용하는 것이 일반적이다.

지표면의 정밀 DEM을 얻기 위해 개발된 InSAR 방법은 repeat-pass 위성자료의 경우, 조간대의 전체적인 DEM을 얻기 위해서는 긴밀도(coherence)가 좋으면서 또한 물이 빠졌을 경우의 쌍 영상을 얻기가 매우 어려우므로 InSAR를 이용하여 조간대에서의 DEM을 얻기 위해서는 single-pass에 의해 자료를 획득할 수 있는 airborne InSAR가 많이 활용되어 왔다 (Wimmer *et al.*, 2000). 또한 LIDAR와 수륙경계선 방법들도 항공기를 이용함으로써 높은 공간 해상도와 시간 해상도로 인하여 정밀하고 효과적으로 조간대 지형을 파악할 수 있다. 그러나 센서를 보유하고 있는 않은 나라에서는 자료의 획득이 용이하지 않고, 센서를 보유하고 있더라도 휴전선과 같이 군사적으로 민감한 지역이나 비행기의 이착륙이 잦은 공항 주변 지역의 경우 항공기의 사용에 제약을 받는다. 따라서 우리나라 서해안과 같이 넓게 발달한 조간대 지역과 군사 경계선에서 멀지 않은 강화도 지역에서는 경제적으로 자료의 입수가 용이한 위성영상을 이용하는 조간대 DEM 제작 기법이 연구될 필요가 있다. 위성영상을 이용한 방법은 장기적이고 주기적으로 자료의 획득이 가능하며 과거의 자료들을 이용하여 과거 조간대 DEM 생성이 가능함으로 조간대 지형 변화를 파악하는데도 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구에서는 강화도 남단 조간대에 대해 광학위성영상으로부터 얻어진 수륙경계선들과 관측된 조위자료를 이용하여 조간대 DEM을 제작하고 수준측량 측선과 비교하였다. 또한 서로 다른 센서에서 획득된 두 개의 SAR 위성영상의 위상차이를 이용하는 위성간섭기법을 적용하여 조간

대 DEM 제작을 위한 가능성을 파악하고자 한다. InSAR 기법은 temporal decorrelation 때문에 아직까지 조간대에서 DEM을 제작하기 어려우나, 앞으로 계획하고 있는 DLR의 TerraDEM 이나 Cartwheel 개념의 single pass DEM에 의하여 적용이 가능하므로 지속적인 연구가 필요하다.

2. 연구지역 및 자료

2.1 연구지역

강화도는 경기만 북부의 동경 126도 20분 - 126도 35분, 북위 37도 29분 - 37도 37분에 위치한다. 강화도 동부에는 300 - 1500 m 폭의 비교적 좁은 염하수로가 있고, 서부에는 약 1200 - 3800 m 폭의 석모수로가 있다. 강화도 서부에는 석모도, 교동도가 있고, 이외에도 영종도, 불음도, 장봉도, 세어도 등 수많은 유무인도가 산재한다. 한강과 강화도의 염하수로 입구인 유도 북서부에는 장방형의 사초가, 예성강과 석모수로가 만나는 지점에는 역 델타형의 삼각주인 청주사초가 발달하고 있다. 조석은 전형적인 일일 2주기로 연중 25회의 고고조와 저고조의 반복이 뚜렷하고, 월간변화는 7월을 제외하고는 전 기간에 걸쳐 조금과 사리의 부등현상이 뚜렷하다 (우한준과 제종길 2002). 특히 이 지역은 세계자연기금(IUCN)과 아시아 습지보호협약(Asian Wetlands Bureau; AWB)이 목록화한 우리나라 주요습지 107,308.6ha 의 10.45%, 경기도 해안 습지 전체의 20%에 해당하는 중요한 부분으로 그 가치가 매우 높게 평가되고 있다(국립공원관리공단, 1998).

강화도 전체 갯벌의 면적은 최저 저조면 시 약 105km²에 달하며, 여차리-동막리-동검리를 잇는 남부지역 즉, 강화도 남단 조간대는 육지로부터 최대 거리 약 6km, 면적 약 90km²로 강화도 조간대 면적의 약 86%를 차지하고 있다(한국해양연구소, 1998). 이 지역은 한강 하구에 위치하여 서해로 유입되는 한강의 지류와 분류의 영향을 동시에 받으며, 염하수로와 석모수소에서 유

입되는 담수와 조석에 따른 해수의 혼합으로 염분도의 뚜렷한 구배를 나타내는 기수의 특성을 보여 주변에는 다양한 환경들이 조성되어 있다. 본 연구의 관심 지역은 강화도 남단 조간대와 영종도 상단 조간대로(그림 1) 이 지역은 육지로부터 많은 양의 유기물과 영양염의 유입으로 인한 부영양화, 수도권 개발에 따른 한강종합개발공사와 김포지구 쓰레기 매립지에 따른 인공구조물 설치, 인천 신공항 건설, 영종대교, 초지대교 등의 개발 사업으로 인한 자연갯벌 훼손 문제가 발생하고 있다(안순모, 2005).

2.2 연구자료

원격탐사에 이용되는 전자파의 파장영역 따라 크게 광학 원격탐사와 마이크로파 원격탐사로 나눌 수 있다. 광학 원격탐사는 지표 대상물의 반사율에 대한 정보를 얻는 것으로 관측되는 전자파의 복사원은 태양이고 관측되는 파장영역은 $0.3\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 이다. 광학원격탐사에서는 여러 개의 전자기파 파장대를 이용하여 대상체나 대상 지역으로부터 반사, 방사 및 산란된 에너지를 수집하는 다중분광 (Multispectral) 영상이 많이 활

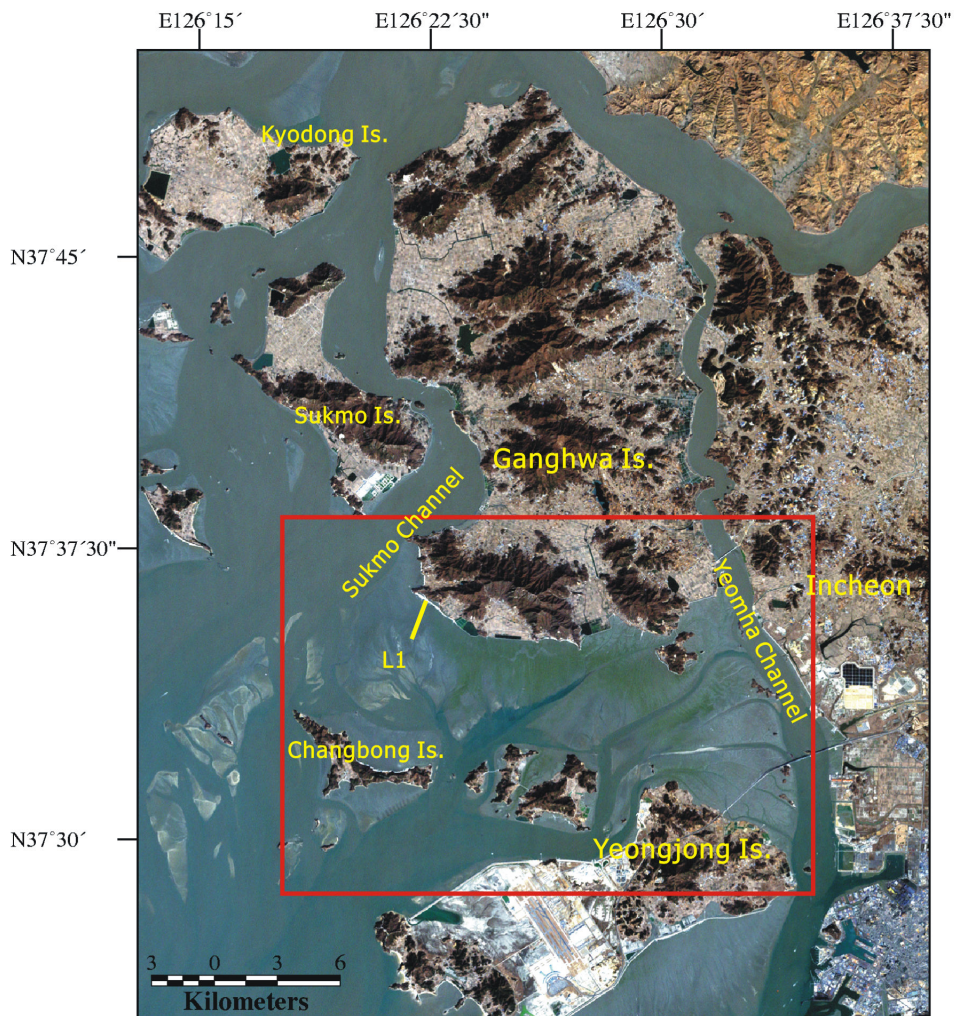


Figure 1. The Landsat ETM+ image of the Southern tidal flat of Ganghwado acquired at Feb. 14, 2002. Line A is levelling position were measured at April 2003. The red box represents the study area.

용되고 있다. 마이크로파 원격탐사에는 대상체의 마이크로파 복사를 관측하는 수동 마이크로파 원격탐사와 레이더에서 생성된 전자기파가 송신되어 대상체와 반응한 뒤 생성된 후방산란파를 관측하는 능동 마이크로파 원격탐사가 있다. 사용되는 파장영역은 0.8cm ~ 100cm이다.

본 연구에 사용된 광학위성영상은 다중분광위성인 Landsat TM과 Landsat ETM+ 이고, 능동 마이크로파위성은 ERS-1,2 SAR와 ENVISAT ASAR이다. 지구관측위성인 Landsat은 육상 자원 탐사용 상용위성으로 1972년 발사된 Landsat-1 MSS(Multi-spectral sensor)를 시작으로 총 7개의 시리즈가 개발되어 발사되었으며 현재 Landsat-5 TM(Thematic Mapper)과 Landsat-7 ETM+(Enhanced Thematic Mapper)이 운용 중에 있다. Landsat-5 TM과

Landsat-7 ETM+의 가장 큰 장점은 센서의 밴드별 분광특성이 지구 자원 탐사에 알맞게 개발되었고, Landsat-7 ETM+의 밴드 1에서부터 5까지는 Landsat-5 TM과 동일하며 공간해상도도 동일하여 과거자료와의 비교가 편리하다는 것이다. 능동 마이크로파 위성인 ERS-1은 C 밴드 SAR 센서를 가지며 1991년부터 10년간 운용되면서 방대한 지구 관측 자료를 구축하였다. 1995년에 후속 시리즈인 ERS-2 SAR가 2001년에는 ENVISAT ASAR가 발사되어 현재 운용 중에 있다. 표 1은 사용된 위성 센서의 특징을 요약한 것이다.

본 연구에서는 표 2와 같이 Landsat-5 TM 4개와 Landsat-7 ETM+ 2개의 광학위성영상과, ERS-1/2 SAR 5개와 ENVISAT ASAR 3개의 마이크로파 위성영상을 사용하였다.

Table 1. Satellite Optic/SAR Satellites with characteristic parameters.

Satellite	Sensor	Year	Repeat period	Wavelength
Landsat-5	TM	1984 -	16 days	0.45 - 12.5 μm
Landsat-7	ETM+	1994 -	16 days	0.45 - 12.5 μm
ERS-1	SAR	1991 - 2000	35 days	5.65 cm
ERS-2	SAR	1995 -	35 days	5.65 cm
ENVISAT	ASAR	2001 -	35 days	5.62 cm

Table 2. Summary of satellite images used in this study.

No.	Satellite	Sensor	Date	Local time (hh:mm)	Tide condition (cm)
1	ERS-1	SAR	1995-12-21	11:16	64.86
2	ERS-2	SAR	1995-12-22	11:16	-3.93
3	Landsat-5	TM	1999-05-21	10:49	803
4	Landsat-5	TM	2001-11-18	10:43	222
5	Landsat-5	TM	2001-12-20	10:43	483
6	Landsat-5	TM	2002-01-05	10:43	633
7	Landsat-7	ETM+	2002-01-29	10:59	6.3
9	Landsat-7	ETM+	2002-09-10	10:58	361
11	ERS-2	SAR	2006-02-17	11:14	237
12	ENVISAT	ASAR	2006-02-17	10:46	305
13	ERS-2	SAR	2006-03-24	11:14	629
14	ENVISAT	ASAR	2006-03-24	10:46	622
15	ERS-2	SAR	2006-04-28	11:14	59
16	ENVISAT	ASAR	2006-04-28	10:46	80

3. 연구방법

3.1 수륙경계선을 이용한 DEM 생성방법

광학위성자료를 이용한 수륙경계선 방법은 비교적 단기간에 다양한 조석 상태의 위성자료로부터 조간대와 해수의 경계면인 수륙경계선을 추출한 후, 이들에 절대고도 값을 대입하고 내삽함으로써 조간대 DEM을 생성하는 것이다. 이 방법에서의 가정은 획득된 많은 위성 자료들이 조간대 지형변화를 무시할 수 있을 만큼 단기간에 그리고 다양한 조석상태에 언어져야 한다는 것과 추출된 수륙경계선은 등심선이라는 것이다. 수륙경계선 방법으로부터 생성된 조간대 DEM은 얼마나 다양한 조석상태의 위성자료를 획득할 수 있고 이로부터 수륙경계선이 얼마나 정밀하게 등심선으로 추출되었느냐 하는 것이 DEM의 형태를 결정하고, 추출된 수륙경계선에 얼마나 정확한 절대고도 값을 대입시키느냐 하는 것이 DEM의 정밀도를 좌우하게 된다(유주형, 2000). 이 방법은 과거로부터의 자료를 얻기 쉬워 과거 DEM 생성이 가능하고 광역적 DEM을 만들 수 있는 장점이 있지만, 획득된 최고·최저 조위 수륙경계선 사이의 영역에서만 DEM 생성이 가능하고 현장의 조위 관측 자료가 필요한 단점이 있다.

본 연구에서는 Ryu et al.(2002)이 고퍸소만 지역에서 바다와 조간대의 경계를 파악했던 연구에 기초하여 TM과 ETM+ 밴드 4 영상에 density slicing 방법을 적용하여 수륙경계선을 추출하였다. 위성자료를 이용한 density slicing 방법은 물과 조간대의 경계를 이루는 DN 값을 찾아내어 이를 경계로 나누어주는 것으로 매우 간단하고 빠르게 수륙경계선을 추출할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 단일 밴드를 사용하게 되므로 밀물과 썰물의 조석상태에 따라 밴드들의 특성이 달라짐으로 밴드 선정에 주의를 요한다.

수륙경계선에 대입할 절대고도 값을 얻기 위하여 인천 검조소에서 실측하는 조위 값을 사용하였다. 연구지역에 해당하는 정확한 조위 값을 얻기 위하여 강화도 남단 지역과 인천 검조소의 위

치차이에 의해 발생하는 조차를 보정하였다. 보정에 사용된 개정수인 조시차와 조고비 그리고 평균해면은 조석표를 참고하였다(국립해양조사원, 2000). 이 때 연구지역에 해당하는 개정수와 평균해면 값이 제공되지 않으므로 지리적으로 가장 가까운 영종도 지역의 값으로 식(1)과 같이 계산하여 사용하였다.

$$\text{영종도의 조고} = (\text{표준항(인천항)의 조고} - \text{표준항(인천항)의 평균해면}) \times \text{영종도의 조고비} + \text{영종도의 평균해면} \quad (1)$$

3.2 위상간섭기법을 이용한 DEM 생성방법

SAR 영상은 진폭 크기 정보와 함께 위상 정보도 제공한다. 동일한 지역에 대해 획득된 두 SAR 영상의 위상 차이를 이용하여 지표면의 DEM을 추출하는 방법을 위상간섭기법이라 한다. 위상간섭기법은 두 개의 SAR 영상간의 정합, 부영상의 재배열, 간섭도 필터링, phase unwrapping, geocoding 등의 많은 과정을 거쳐야 한다. 서로 다른 궤도를 지나면서 관측한 SAR 자료는 동일한 산란체가 영상에서 서로 다른 좌표의 화소에 위치하므로 이러한 자료간의 차이를 보정하기 위해서는 두 SAR 영상간의 정합과정이 필요하다. 정합 결과를 이용하여 부영상을 재배열한 후 공액복소수를 취한 후 주영상과 곱하게 되면 두 자료의 위상차에 해당하는 간섭도를 구할 수 있다. 일반적으로 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)을 높이기 위해 azimuth와 range 전처리 및 후처리 필터링을 수행한다. 간섭도는 $-\pi \sim \pi$ 의 값으로서 절대 위상으로 변환하는 phase unwrapping 과정이 요구된다.

위상간섭 기법을 사용하는 DEM 생성방법은 대기나 기상 상태에 관계없이 자료를 얻을 수 있으며 높은 정밀도로 DEM 제작이 가능하고, 또한 3-pass나 4-pass 자료들을 이용할 경우 수 cm 단위로 지형변화 탐지가 가능한 장점이 있다. 하지만 지금까지 SAR 위성영상들을 이용하여 조

간대 DEM을 생성할 수 없었던 이유는 repeat-pass인 경우, 최대한 노출되었을 때의 영상 쌍을 얻기 힘들며, 쌍 간에 조위차로 인하여 조간대 환경이 달라지게 되어 긴밀도 높은 영상을 얻기 어려웠기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 하루차이로 두개의 위성인 ERS-1과 2에서 얻어진 tandem 자료와 ERS-2 위성과 ENVISAT 위성으로부터 30분 간격으로 얻어진 자료를 이용하는 교차위상간섭 방법을 새롭게 적용하였다.

4. 연구결과

광학위성영상을 사용한 수륙경계선 방법을 적용하기 위하여 총 6개의 Landsat TM과 ETM+ 영상을 사용하였다. 최단기간 동안 다양한 조위를 갖는 영상을 얻기 위해 2001년 11월부터 2002년 9월까지 10개월 동안의 영상을 집중적으로 획득하였지만 미세한 조간대의 지형을 파악하기에는 영상의 수가 적어서 태풍이나 장마처럼 강으로부터 유입되는 퇴적물의 양이 급격히 많아지는 여름을 제외한 기간 중 대조 때의 고조선의 조위를 갖는 영상인 1999년 5월 영상을 추가하였다. 밀물과 썰물의 조위 상태를 고려하여 밴드를 선정한 뒤 density slicing 방법을 적용하여 수륙경계선을 추출하였다. 그림 2(a)는 6개의 Landsat 자료로부터 추출된 수륙경계선들로 각기 다른 조위 때의 지형을 유추가능하다. 추출된 수륙경계선에 조차가 보정된 실측조위를 대입한 뒤 minimum curvature 방법을 사용하여 내삽함

으로서 그림 2(b)와 같이 강화도 남단 조간대의 DEM을 생성하였다. 강화도 남단 조간대의 경우 상부조간대에서 하부조간대로 갈수록 완만하게 지형이 낮아지고, 강화도 남단 조간대 동쪽의 조류로가 많이 발달되어 있는 곳은 서쪽보다 고도가 전체적으로 높은 것으로 나타났다. 조류로가 복잡하게 발달되어 있는 영종도 북단 조간대는 고도가 상대적으로 매우 높으며 동쪽으로 갈수록 급한 경사를 이루며 서쪽은 지형이 완만하게 낮아지는 것으로 나타났다. 수륙경계선 방법으로 생성된 조간대 DEM의 정밀도를 알아보기 위하여 수준측량 자료와 비교해 보았다. 수준측량은 2003년 4월 강화도 여차리 조간대에서 측정되었으며 그림 1의 Line A와 같이 총 16개의 정점이고 그 길이는 약 1.3 km 이다. 그림 2(c)는 이 측선에서의 수준측량과 수륙경계선 방법에 의해 얻어진 DEM 값을 비교한 것이다. 절대오차의 평균은 18.1 cm로 같은 방법으로 곰소만 조간대에 적용한 결과인 7.3 cm에 비해 상대적으로 큰 오차를 보였다(Ryu et al., 2000). 이렇게 큰 오차가 발생한 원인은 수준측량 측선이 짧고 측선과 교차하는 수륙경계선들은 3개만 추출되어(그림 2(c)의 붉은점) 수륙경계선 사이의 작고 세밀한 지형의 형태를 반영하지 못했기 때문으로 생각되며, 또한 위성자료들과 현장조사가 이루어진 시기와 계절이 일치하지 않았기 때문으로 생각된다. 강화도 조간대는 과거부터 현재까지 많은 인공구조물에 의해 많은 지형변화가 예상되는 지역이며, 특히 강화도 서남부 조간대는 표층퇴적상이

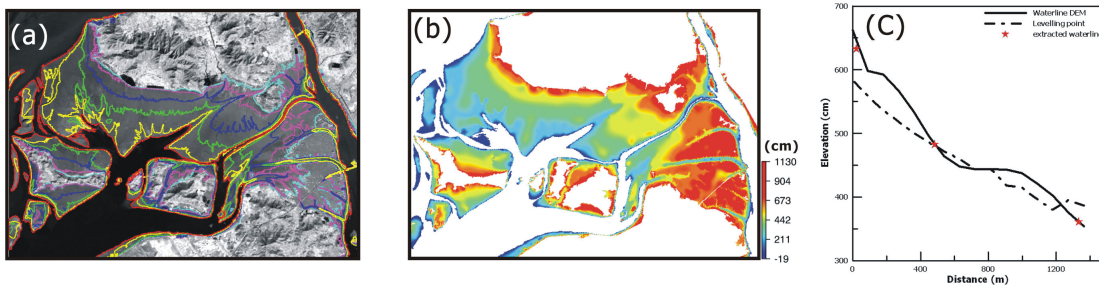


Figure 2. (a) Waterline extracted from 6 Landsat images, (b) Intertidal DEM generated by waterline method, (c) Comparison of generated intertidal DEM and levelling data.

Table 3. SAR image combination used for interferogram

No.	SAR images		Perpendicular baseline (Ha) [m]	Time interval
	Master	Slave		
1	95-12-21(E1*)	95-12-22(E2*)	287.0 (32.7)	1 day
2	06-02-17(E2)	06-02-17(ES*)	-805.4 (-11.7)	30 min
3	06-03-24(E2)	06-03-24(ES)	-284.1 (-33.1)	30 min
4	06-04-28(E2)	06-04-28(ES)	-327.0 (-28.7)	30 min

E1*: ERS-1, E2*: ERS-2, ES*: ENVISAT

모래퇴적상으로 되어 있어 동남부 조간대의 펼쳐적상에 비해 많은 지형변화가 발생하기 때문에 시기와 계절의 불일치와 함께 지형변화가 조간대 DEM의 정밀도에 많은 영향을 주었을 것으로 판단된다. 그러므로 조간대 DEM의 정밀도를 높이기 위해서는 보다 다양한 조석 상태에서 얻어진 많은 위성자료와 DEM이 생성된 기간의 수준측량자료가 필요하다.

위상간섭기법에 사용된 SAR 영상은 총 8개로 간섭쌍을 이루는 영상의 시간 차이를 최대한 작게 하여 영상을 선정하였다. 생성된 교차 간섭쌍은 표 3과 같이 1995년 획득된 ERS-1/2 SAR 영상의 하루 차이로 관측된 tandem 쌍이고, 2006년에 획득된 영상은 약 30 분 간격을 가지는 3쌍의 ERS-ENVISAT 교차 간섭쌍이다. 2006년에 해당하는 3쌍의 ERS-2 SAR와 ENVISAT ASAR의 교차 간섭쌍을 획득하였지만 짧은 기선거리와 큰 도플러 중심 주파수의 차이로 인하여 간섭도 제작이 불가능하였다. 그러나 1995년에 획득된 tandem pair인 ERS-1/2 SAR 영상영상은 그림 3(a), (b)와 같이 조위가 낮을 때의 영상으로 그림 3(c)과 같이 조간대 내에서 전체적으로 두 영상 간의 긴밀도가 매우 높게 나타난다. 따라서 그림 3(d)와 같이 영상의 간섭도를 제작할 수 있었다. 제작된 간섭도를 phase unwrapping 과정을 거쳐 고도값으로 변화하였다. 위상간섭 기법으로 생성된 조간대의 DEM은 그림 3(e)과 같다. 생성된 DEM은 영상 간의 긴밀도가 낮은 부분이 DEM에 포함되어 잡음처럼 매우 튀는 값을 취하여 수륙경계선방법에

의해 생성된 DEM이 cm단위를 갖는 것과 달리 m단위를 갖게 된다. 그러나 강화도 남단 조간대 서쪽 이외의 지역은 약 12m 의 범위로 수륙경계선방법에 의해 생성된 DEM과 동일한 범위를 갖는다. 생성된 DEM은 수륙경계선 방법을 적용하여 생성된 DEM과 같이 전체적으로 강화도 남단은 상부조간대에서 하부조간대로 갈수록 완만해지고 영종도 북쪽은 고도가 높게 나왔다. 그러나 강화도 남단 조간대의 서쪽지역의 고도값이 불규칙한 값으로 깨져서 나타나는데 이것은 이 지역에 해당하는 두 영상의 긴밀도가 낮기 때문이다. 그 이유로는 이 지역이 모래퇴적상으로 되어 있어 영종도 북단 조간대에 비해 조류로의 발달이 미약하며 지형이 낮아 지표잔존수가 넓게 분포함으로써 두 영상간의 긴밀도가 떨어짐으로서 InSAR를 이용한 조간대 DEM 생성이 불가능한 것으로 판단된다. 수준측량의 측점이 긴밀도가 낮은 지역에 해당하고 측정 시기 또한 5년의 차이를 보이기 때문에 현장 실측 자료를 통한 DEM 정밀도 검증은 할 수 없었다.

5. 결론 및 토의

광학위성영상과 마이크로파 위성영상을 이용하여 조간대 DEM을 만들 수 있는 기법을 알아보고 강화도 남단 조간대 지역에 대해 적용하여 보았다. 위성자료를 이용하는 경우, 영상 획득 주기가 제한적이므로 수륙경계선 방법은 다양한 조위의 자료를 얻기 어려우며, InSAR 방법은 조위가 최저인 한 쌍의 SAR 영상을 얻기가 어려워 조간

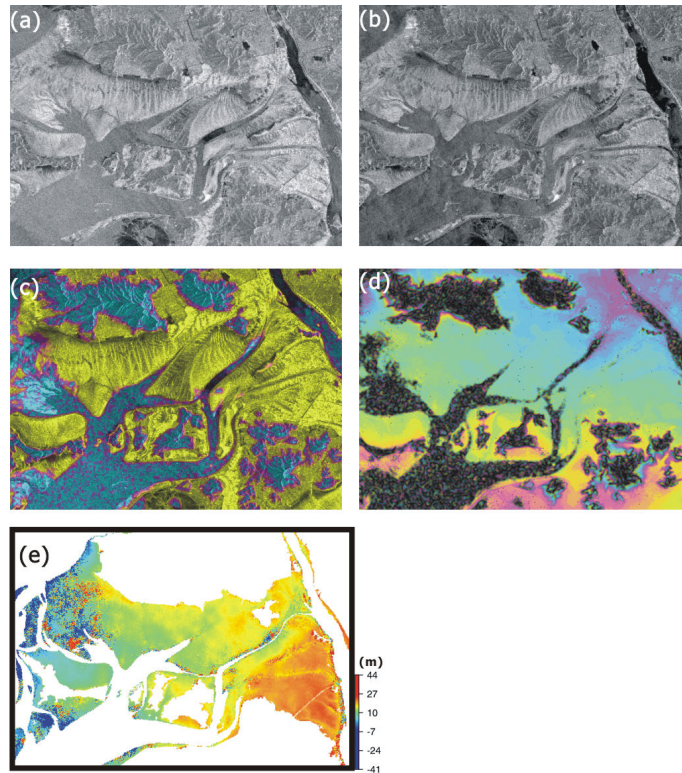


Figure 3. (a) ERS-1 master image acquired at Dec. 21, 1995, (b) ERS-1 slave image acquired at Dec. 22, (c) ERS-1 coherence map, (d) ERS-1/2 interferogram, (e) Intertidal DEM generated by InSAR.

대 전체에 대한 DEM을 만들기는 어려운 것으로 판단된다. 그러나 위성영상은 과거부터 자료가 축적되어 있고 광역적·공간적으로 전체적인 조간대 지형 경향을 파악하는데 매우 유용한 것으로 분석되었다.

수륙경계선 방법으로 생성된 조간대 DEM은 사용된 수륙경계선의 최저·최고 조위 사이의 지역에 대하여 강화도 남단 조간대의 지형 형태를 파악할 수 있었다. 따라서 만들어진 DEM으로부터 조간대의 노출시간이 계산됨으로서 퇴적환경이나 생태학적 연구의 공간적 분석을 가능케 할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 지표잔존수의 함량이 크고 지형의 경사도가 완만하며 조간대가 넓게 분포하는 강화도 서남부 조간대의 경우 추출되는 수륙경계선의 수가 너무 적어 수륙경계선 사이의 미세한 지형을 파악하는데 한계가 있었다. 또한 영종도 상부 조간대의 경우, 최고 조위

를 갖는 1999년 5월 21일의 수륙경계선보다 높은 지형이 넓게 분포함으로써 고도를 정확히 알 수 없는 조간대의 면적이 매우 넓게 나타났다. 이렇게 수륙경계선 방법의 사용에 있어서, 추출되는 최저·최고 조위의 수륙경계선 범위를 벗어난 지역에 대해서는 수준측량 자료나 음향측심 자료 등의 보조 자료를 통한 보완이 필요할 것으로 생각된다.

위상간섭기법의 경우 긴밀도 높은 영상을 얻기 힘든 조간대의 지역적 특성 때문에 긴밀도를 높일 수 있는 tandem 쌍이나 다른 위성의 센서로부터 획득된 자료를 사용하는 교차 위성간섭기법을 적용하여 보았다. 강화도 남단 조간대에 위상간섭기법을 적용한 결과 영종도 북단 조간대에서만 조간대 지형을 파악할 수 있었으며, 강화도 남단 조간대 전체에서는 영상간의 긴밀도가 낮아 조간대의 DEM을 만들 수 없었다. 즉, 충분히 노

출되어 지표잔존수가 없는 조간대 지역의 DEM 제작은 가능하나, 지표잔존수가 조금이라도 남아 있는 지역에서는 긴밀도가 크게 떨어져 조간대 DEM 제작이 어려운 것으로 판단된다. 따라서 위성 InSAR 방법은 기존의 repeat-pass 자료는 물론 tandem 자료나 교차간섭 자료 등으로도 조간대 DEM 제작이 어려울 것으로 생각된다. 그러나 현재 ESA에서 준비 중인 위성에 두개의 SAR 센서가 탑재된 single-pass 방식의 위성을 활용하면 가능할 것으로 기대됨으로 지속적인 연구가 필요하다. 우리나라에서 2006년 7월에 발사한 다목적위성-2호가 성공적으로 운용이 된다면 IKONOS와 같은 공간 해상도를 갖는 국내 위성을 보유하게 됨으로서 저가에 많은 영상을 확보 할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 다양한 조위 자료를 단기간에 얻음으로서 DEM의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다.

참고문헌

- 국립공원관리공단 (1998). 『태안해안국립공원의 해안습지 및 비교대상지 조사』 (최종보고서)
- 국립해양조사원 (2000). 『조석표』 .
- 안순모 (2005). 강화도 갯벌 퇴적물의 산소요구량과 탈지소화의 계절 변화, 한국해양학회지, 바다 10(1): 47-55.
- 안충현, 이용국, 유홍룡, 오재경 (1989). 위성자료의 한국 금강 하구부근 조간대 지형 연구에 대한 응용, 대한원격탐사학회지, 5(1): 1-14.
- 양은진, 최중기, 유만호, 조병철, 최동한 (2005). 강화도 펄 갯벌에서 저서성 원생동물 분포의 시간적 변이와 박테리아 및 미세 조류에 대한 포식압, 한국해양학회지, 바다 10(1): 19-30.
- 우한준, 제종길 (2002). 강화 남부 갯벌의 퇴적환경 변화, Ocean and Polar Research, 24(4): 331-343.
- 유만호, 최중기 (2005). 강화도 장화리 갯벌에서 저서미세조류의 계절적 분포 및 일차 생산력, 한국해양학회지, 바다, 10(1): 8-18.
- 유주형, 조원진, 원중선, 이인태, 전승수, 서애숙, 김금란 (2000). 원격탐사 자료로부터 해안선 추출에 의한 조간대 DEM 생성, 대한원격탐사학회지, 16(3): 221-233.
- 조병철, 최중기, 이동섭, 안순모, 현정호 (2005). 경기만 부근 갯벌의 생지화학적 연구: 서문, 한국해양학회지, 바다, 10(1): 1-7.
- 한국해양연구소 (1998). 『갯벌의 효율적인 이용과 보존을 위한 연구』 (2차년도 연차보고서).
- Chen, L.C., and J.Y. Rau (1998). Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images, International Journal of Remote Sensing, 19(17): 3383-3397.
- Greidanus, H., E.J. Huising, Y. Platschorre, R.J.P. Van Bree, D. Van Halsema, E.M.J. Vaessen, Coastal DEMs with Cross-Track Interferometry, Proceedings of IGARSS 1999, Hamburg, Germany, CD-ROM version.
- Rosso, P.H., S.L. Ustin, A. Hastings (2006). Use of lidar to study changes associated with Spartina invasion in San Francisco Bay marshes, Remote Sensing of Environment 100: 295-306.
- Ryu, J.H., Cho W.J., Won J.S. (2000). A Study on the Geomorphological Change in Tidal-flat using Mutisource Remotely Data: A Case Study in the Gomso Bay, Hawaii, Proc. IGARSS'2000; 1892-1894.
- Ryu, Joo-Hyung, Won, Joong-Sun, Min, Kyung-Duck (2002). Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat, A case study in Gomso Bay, Korea, Remote Sensing of Environment 83: 442-456.
- Wimmer, C., Siegmund, R., Schwabisch, M., and Moreira, J. (2000). Generation of high precision DEMs of the Wadden sea with airborne interferometric SAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(5): 2234-2245.