

# ERS-Envisat SAR Cross-Interferometry를 이용한 고정밀 DEM 생성에 관한 연구

## A Study on High-Precision DEM Generation Using ERS- Envisat SAR Cross-Interferometry

이원진<sup>1)</sup> · 정형섭<sup>2)</sup> · Zhong Lu<sup>3)</sup>

Lee, Won-Jin · Jung, Hyung-Sup · Lu, Zhong

### Abstract

Cross-interferometric synthetic aperture radar (CInSAR) technique from ERS-2 and Envisat images is capable of generating submeter-accuracy digital elevation model (DEM). However, it is very difficult to produce high-quality CInSAR-derived DEM due to the difference in the azimuth and range pixel size between ERS-2 and Envisat images as well as the small height ambiguity of CInSAR interferogram. In this study, we have proposed an efficient method to overcome the problems, produced a high-quality DEM over northern Alaska, and compared the CInSAR-derived DEM with the national elevation dataset (NED) DEM from U.S. Geological Survey. In the proposed method, azimuth common band filtering is applied in the radar raw data processing to mitigate the mis-registration due to the difference in the azimuth and range pixel size, and differential SAR interferogram (DInSAR) is used for reducing the unwrapping error occurred by the high fringe rate of CInSAR interferogram. Using the CInSAR DEM, we have identified and corrected man-made artifacts in the NED DEM. The wave number analysis further confirms that the CInSAR DEM has valid signal in the high frequency of more than 0.08 radians/m (about 40 m) while the NED DEM does not. Our results indicate that the CInSAR DEM is superior to the NED DEM in terms of both height precision and ground resolution.

Keywords : Cross-interferometry, DEM, DInSAR

### 초 록

교차간섭기법은 ERS-2와 Envisat SAR 데이터를 이용하여 긴 기선거리를 지니면서도 양질의 간섭도를 제작할 수 있다. 또한 긴 기선거리에 의해서 고도에 대한 프린지 변화율이 약 5m 내외로 계산되며 이는 매우 정밀한 DEM생성을 가능하게 한다. 본 연구에서는 ERS-2와 Envisat 교차 간섭기법으로부터 정밀한 DEM을 추출하는 효율적인 방안을 제안하였으며 경사가 매우 완만한 알래스카지역에서 교차간섭기법으로 제작된 CInSAR(Cross-Interferometry SAR) DEM과 기존에 존재하는 NED(National Elevation Dataset) DEM을 비교하였다. 연구 결과 차분 간섭도 생성과정에서 NED DEM 오차라고 생각하는 부분이 발견되었으며 이 부분에 대한 CInSAR DEM과의 고도 차이에 대한 표준편차는 2.63m로 계산되었다. 하지만 전체지역에 대해서는 NED DEM과 CInSAR DEM의 고도값 차이에 대한 표준편차는 약 1m로 NED DEM과 매우 유사한 값이 계산되었다. 이는 연구대상 지역이 매우 편평한 지형으로 양질의 DEM이 구축되어 있으므로 매우 유사한 값이 계산된 것으로 판단된다. 하지만 두 DEM에 대한 공간주파수 분석을 하였을 경우 CInSAR DEM은 약 0.08 rad/m(약 40m) 보다 고주파영역에서도 높은 파워 스펙트럼 값을 지닌 반면 NED DEM은 그렇지 못하였다. 결과적으로 16m로 해상도로 구축된 CInSAR DEM의 경우 NED DEM보다 약 2.5배 공간해상도가 높아졌으며 경사가 심하지 않은 지역에서도 정밀한 DEM이 생성되었다.

핵심어 : 교차간섭기법, 수치고도모델, 차분간섭기법

1) 정희원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 박사과정(E-mail:twother@uos.ac.kr)

2) 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 조교수(E-mail:hsjung@uos.ac.kr)

3) U.S. Geological Survey(USGS), U.S.A.(E-mail:lu@usgs.gov)

## 1. 서론

레이더 간섭기법은 복소수 형태로 취득되는 SAR 자료의 특징을 이용하여 두 SAR 자료 간의 위상차를 계산함으로써 지표의 3차원 정보를 획득할 수 있는 기법으로 지표변화 탐지, 수치표고자료(DEM) 제작, 자연재해 관측 등 많은 분야에 활용이 되고 있다(Gens 등, 1996).

특히 레이더 간섭기법을 이용한 DEM 제작은 넓은 지역에 대하여 빠른 시간 내에 DEM 구축이 가능하기 때문에 1980년대 후반부터 많은 연구가 이루어지고 있다(Zebker 등, 1995; Lanari 등, 1996; 김창오 등, 2005). 2000년에는 이와 같은 레이더 간섭기법을 적용하여 위도 60°N~57°S 사이의 전지구적인 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) DEM을 생성함으로써 매우 큰 발전을 이루었다. SRTM DEM의 경우 현재 전 지구적으로 90m 해상도, 미국은 30m 해상도의 DEM을 제공하고 있으며 고도 정확도는 약 16m로 알려져 있다(Rabus 등, 2003; Smith 등, 2003).

레이더 간섭기법에 의하여 생성된 DEM은 크게 3가지 요소에 의하여 오차를 포함한다. 첫 번째는 Temporal decorrelation으로 두 SAR 자료간의 촬영시기 차이에 의하여 발생한다. 두 개 이상의 SAR 자료를 이용하는 레이더 간섭기법에서는 두 영상간의 긴밀도는 중요한 정보이며, 특히 토래, 눈, 수목 등과 같이 지표의 변화가 심한 지역에서는 두 SAR 자료의 데이터 획득 시간 차이가 커짐에 따라 긴밀도가 매우 감소한다. 두 번째는 두 SAR 자료간의 데이터 획득 위치 차이에 의하여 긴밀도가 감소하는 Baseline decorrelation이고, 마지막은 SAR 자료 획득 시점에서의 대기효과가 상이하여 이로 인한 위상차에 의하여 DEM에 오차가 포함되는 경우이다. 위의 3가지 요소를 고려하여 DEM 오차를 최소화하기 위한 조건은 위성간의 짧은 기선거리(Baseline)와 데이터 획득시간 차이를 최소화 하는 것이다. 그러나 짧은 기선거리는 양질의 간섭도(interferogram)의 생성을 가능하게 하지만 고도에 따른 프린지(fringe) 변화율을 작게 하기 때문에 일반적인 레이더 간섭기법을 이용한 정밀 DEM 생성에 한계가 있다.

2000년 Envisat 위성이 발사되면서 기존의 ERS-2와 짧은 데이터 획득 시간차를 지니며 약 31Mhz의 중심주파수 차이에 의하여 긴 기선거리를 지니면서도 양질의 간섭도를 제작할 수 있는 교차 간섭기법(cross-Interferometric SAR, CInSAR)이 등장하면서 기존의 레이

더 간섭기법의 한계를 극복한 DEM 제작이 가능하게 되었다. 교차 간섭기법은 ERS-2와 Envisat 위성이 동일지역에 대하여 28분 차이로 영상을 획득하기 때문에 Temporal decorrelation 및 대기효과가 거의 발생하지 않으며, 두 위성간의 긴 기선거리에 의하여 고도에 대한 프린지(fringe) 변화율이 약 5m내외로 매우 정밀한 DEM 생성이 가능하다.

서로 다른 센서에서 획득되는 자료를 이용하는 교차 간섭기법은 1990년대에 기본적인 이론이 정립되었으며(Gatelli 등, 1994) ERS-Envisat 위성에 대하여 반송 주파수 차이에 의하여 긴 기선거리에서도 긴밀도가 유지됨을 증명하였다(Guarnieri 등, 2000). 특히 2002년 Envisat 위성이 발사된 후 실제 두 자료를 이용한 정밀 DEM 생성의 가능성이 제시되었다(Arnaud 등, 2003). 또한 Colesanti 등(2003)은 교차 간섭기법을 이용하여 1m 이내의 고도정밀도를 지닌 DEM 제작이 가능함을 보였으며, Hong 등은(2005) 교차 간섭기법을 이용하여 연안지역에서의 정밀 DEM 생성이 가능함을 보고한 바 있다. 기존의 ERS-Envisat을 이용한 교차 간섭기법은 ERS-2 위성의 불안정한 도플러 중심 주파수 영역으로 인하여 교차 간섭기법 적용이 쉬운 특정 지역에 대하여서만 이루어졌으며, 주로 교차 간섭기법을 이용한 정밀 DEM 제작의 가능성에 무게를 두었다. 또한 기존의 연구가 특정 지역에 대하여 정밀 DEM 생성하였다면 다양한 지역에 대하여 교차 간섭기법을 적용하여 DEM을 생성하는 연구도 진행되었다(Wegmuller 등, 2009). 그러나 기존의 연구에서는 주로 교차 간섭기법을 적용함에 있어서 정밀 DEM 생성의 가능성만을 제시하고 효과적인 방법론을 제시하지 못하는 한계가 있으며, 실제 DEM과 비교를 통한 자료 분석이 미비하였다.

본 연구에서는 교차 간섭기법이 지니는 특성을 이론적으로 설명하고 그 특성에 의하여 고정밀 DEM이 생성될 수 있음을 이론적으로 증명하였다. 또한 교차간섭기법의 실제 적용을 위하여 ERS-2 및 Envisat 위성에 의해 취득된 두 개의 SAR 데이터에서 각 센서의 차이를 고려한 Azimuth 방향 및 Range 방향에 대한 필터링 및 정합을 수행하여 교차 간섭도를 생성하였다. 다음으로 교차 간섭기법 특징에 의한 매우 많은 프린지(fringe)의 위상 불구속화 단계(Phase Unwrapping)의 오차를 줄이고자 DinSAR(Differential Interferometry SAR)기법을 적용하여 차분된 간섭도를 생성하고 이를 이용하여 최종적으로 고정밀 DEM을 생성하였다. 생성된 DEM과 기존에 존재

하는 NED DEM 비교를 수행하기 위하여 연구 대상 지역 중 기존에 존재하던 NED DEM과 새롭게 생성된 CInSAR DEM에서 같은 지역을 선정하여 고도값 프로파일 추출 및 전체 지역에 대한 DEM 고도값을 비교하였다. 마지막으로 CInSAR DEM의 정밀도 확인을 위하여 NED DEM과의 공간 해상도 비교를 수행하였다. 본 연구를 통하여 교차 간섭기법의 높은 고도 민감도를 이용하여 기존에 존재하던 InSAR 기법으로 해결하지 못하였던 경사가 완만한 지역에 대한 고정밀 DEM 제작이 가능할 것으로 기대된다.

## 2. Cross-interferometry 방법론 및 데이터 처리 과정

ESA(European Space Agency)는 2007년 9월부터 2008년 2월 사이에 ERS-2/Envisat tandem mission을 수행하였다. 이를 통하여 ERS-2와 Envisat 위성으로부터 많은 교차 간섭쌍을 획득하게 되었으며 기존 이론 위주의 교차 간섭기법에 대한 연구를 폭 넓게 적용하는 계기가 되었다. 이번 장에서는 ERS-2와 Envisat 센서의 특성을 파악하고 교차 간섭기법의 이론적 배경 및 그 처리 과정에 대하여 기술함으로써 정밀 DEM 생성을 위한 효과적인 방법론을 제시하고자 한다.

### 2.1 Cross-interferometry 방법론

레이더 간섭기법을 적용하기 위한 간섭쌍은 관측 방법에 따라 single-pass와 repeat-pass로 구분되며 대부분의 인공위성에서 획득된 자료는 repeat-pass를 방법을 따르

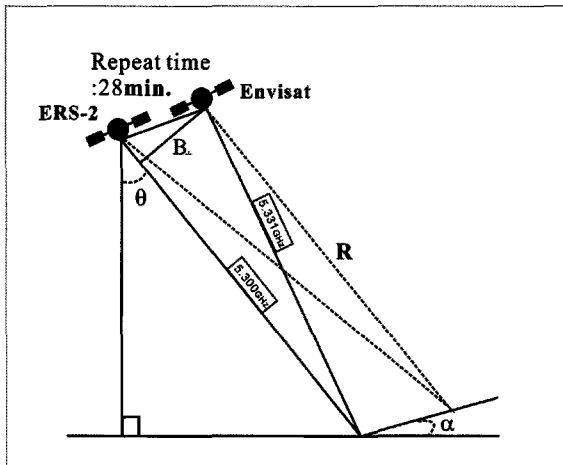


그림 1. ERS-2와 Envisat 레이더 간섭쌍 기하

게 된다. Repeat-pass를 통해 획득된 데이터를 이용하는 레이더 간섭 기법의 경우 위성의 위치에 따라 지역적 입사각이 다르며 이는 두 SAR 자료간의 스펙트럼 차이 효과를 발생시킨다(Gatelli 등, 1994). 특히 ERS-2/Envisat을 이용하는 Cross-interferometry의 경우 두 센서 특성 차이에 의하여 31Mhz의 반송주파수 스펙트럼 차이가 존재한다(그림 1). 반송 주파수 차이에 의한 효과를 확인하기 위하여 일반적인 레이더 간섭기법에서의 지역적 입사각 차이에 의한 주파수 변이는 다음과 같이 정의된다(Gatelli 등, 1994)

$$\Delta f = -\frac{cB_{\perp}}{\lambda R \tan(\theta - \alpha)} \quad (1)$$

여기서, c는 빛의 속도, B<sub>⊥</sub>는 수직기선, λ는 레이더 파장, R은 경사거리(slant range), θ는 입사각(incidence angle) 및 α는 지표의 경사각을 각각 나타낸다. 식 (1)에서 수직기선거리를 제외한 모든 파라미터는 위성의 특성 및 기하적인 요소에 의하여 고정되는 요소로써 주파수 차이에 의한 보상 수직 기선거리는 다음과 같이 유도가 된다 (Colesanti 등, 2003).

$$B_{comp \perp} = -\frac{\Delta f R \tan(\theta - \alpha)}{f_2} \quad (2)$$

식 (2)에서 ERS-2와 Envisat 센서의 반송주파수 차이인 31MHz를 이용하면 약 2km의 보상 수직거리가 계산되며 이는 ERS-1/ERS-2를 이용한 임계기선거리(critical baseline)인 1100m 보다 매우 큰 값이다. 이러한 수직기선거리 보상 효과는 간섭도를 생성할 수 있는 최대 수직기선거리를 더 길게 하여 ERS-2와 Envisat SAR 영상의 스펙트럼 중첩을 높일 수 있으며 이와 더불어 획득된 두 SAR 자료 스펙트럼에서 중첩되는 부분만을 이용하는 common band filtering 기법을 적용함으로써 높은 긴밀도를 유지할 수 있을 뿐 아니라 높은 고도 민감도(height ambiguity)를 유지할 수 있다. 교차 간섭기법에서의 고도 민감도는 다음과 같다(Guarnieri 등, 2000).

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_{comp \perp}} \Rightarrow \frac{c \times \cos(\theta - \alpha)}{2\Delta f} \approx 5 \cos(\theta - \alpha) \quad (3)$$

편평한 지역을 가정한다면 식 (3)에 의해 계산되는 고

도 민감도는 약 4.6m이다. 이는 ERS-1/ERS-2의 경우 수십~수백m 이상의 고도 민감도를 보이는 것에 비하여 지형 정보획득에 매우 유리하며 평탄한 지역에서도 높은 정밀도의 DEM을 기대 할 수 있다. 또한, ERS-Envisat 교차간섭기법은 약 28분의 짧은 repeat-time을 지니고 있기 때문에 짧은 데이터 획득 시간 차를 이용하면 지형변화, 전리층 및 대기 등에 의한 간섭쌍 간의 위상 지연 효과를 최소화 할 수 있으므로 정밀한 DEM 생성이 가능하다. 이와 같이 ERS-Envisat 교차간섭기법은 일반적인 레이더 간섭 기법에서 제한 사항으로 작용하던 Baseline Decorrelation, Temporal Decorrelation 및 대기효과를 획기적으로 최소화할 수 있다. 즉, 이 기법은 긴 기선거리에서도 높은 긴밀도를 유지함으로써 양질의 간섭도가 생성이 되며 결과적으로 정밀 DEM 생성을 가능하게 한다.

## 2.2 데이터 처리과정

ERS-2와 Envisat 영상을 이용하는 교차 간섭기법은 기존의 동일 위성에서 획득된 영상을 이용하는 방법보다 자료처리 과정에서 특별한 주의가 요구된다. 본 연구에서 제시한 교차 간섭기법을 위한 효율적인 데이터 처리 과정은 다음과 같다.

### 2.2.1 정합 및 필터링

ERS-2와 Envisat 영상을 이용하는 교차 간섭기법은 각 센서 특성에 의하여 range와 azimuth 방향으로 서로 다른 해상도를 지니기 때문에 자료 처리과정이 쉽지 않다. 특히 서로 다른 위성에서 획득된 두 영상의 상호정합(co-registration)과정은 동일 위성간의 정합보다 정밀한 처리를 요구한다. 본 연구에서는 두 영상의 상호정합을 정밀하게 처리하기 위하여 RAW 데이터로부터 SLC(Single Look Complex)영상 생성과정에서 Doppler 주파수를 일치시키기 위한 azimuth common band filtering을 적용하였다. 이는 자료 획득 당시 위성 자세나 속도 변화로 인한 안테나의 squint 각 변화로 인하여 발생하는 도플러 중심 주파수 변화를 보정함으로써 간섭쌍의 도플러 스펙트럼 긴밀도를 향상시키기 위하여 적용된다. 또한, 서로 다른 해상도를 갖는 ERS-2와 Envisat 영상의 정밀 상호정합을 위하여 근사적으로 두 영상의 위치를 정합하는 개략정합(course co-registration)과 서브픽셀의 정밀도로 두 영상의 위치를 정합하는 정밀정합(fine registration)으로 나누어 수행한다. ERS-2와 Envisat 센서는 31MHz의 반송주파수 차이로 인하여 스펙트럼 이동 효과가 크

게 발생하여 긴밀도 저하를 증가시키므로, 두 영상에 대한 정합을 수행함과 동시에 range common band filtering을 수행하여 스펙트럼 긴밀도를 향상시킨다. 이와 같이 생성된 교차 간섭도는 높은 고도 민감도로 인하여 수많은 프린지(fringe)가 존재한다.

### 2.2.2 DInSAR 기법 적용

생성된 교차간섭도에 존재하는 수많은 프린지는 phase unwrapping 과정을 어렵게 한다. 그러므로 두 SAR 자료로부터 생성된 교차간섭도에서 기존에 존재하는 DEM을 이용하여 지형에 대한 위상을 분리하면, 지형고도의 오차에 의한 프린지만 남게 되어 phase unwrapping 정확도를 높일 수 있다(윤근원 등, 2001; 김창오 등, 2005).

이러한 레이더 차분기법(differential radar interferometry; DInSAR)은 기존의 DEM으로부터 레이더 영상좌표로 시물레이션 하는 과정(Geocoding)을 요구하며, SAR 매핑 식인 Range방정식과 Doppler방정식을 이용하여 DEM으로부터 모사된 간섭도를 추출할 수 있다(Olmsted, 1993). DEM으로부터 모사된 간섭도 및 수직기선거리 보정을 통하여 지구 곡률 효과 보정(flat-earth phase correction) 및 지형 효과 보정(topographic phase correction)을 수행 하면 교차 차분간섭도를 생성할 수 있다. 생성된 교차 차분간섭도의 긴밀도 향상을 위하여 Goldstien 필터링을 적용하고, phase unwrapping을 수행하면 DEM 오차에 의한 성분만 남게 되고, 기존 DEM으로부터 모사된 간섭도를 다시 더하여 고도값으로 변환 후 지리좌표계로 변환하면 최종적으로 정밀 DEM이 생성된다. 그림 2는 ERS-2와 Envisat 영상의 교차 간섭기법을 이용한 정밀 DEM 제작과정을 나타낸다.

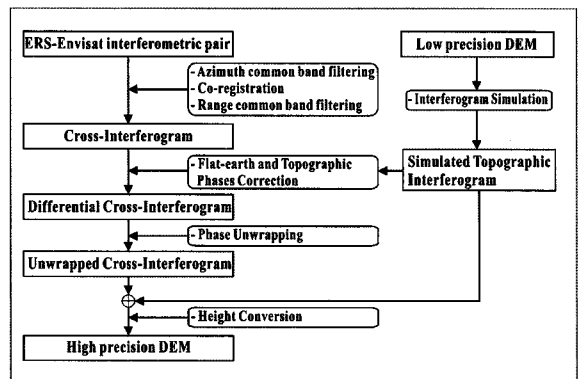


그림 2. ERS-2와 Envisat 영상의 교차 간섭기법을 이용한 정밀 DEM 제작과정

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 실험자료

본 연구에서 이용된 자료는 ERS-2/Envisat tandem mission 중 알래스카 지역에 대한 ERS-2와 Envisat SAR 레이더 간섭쌍이다. 두 SAR 영상은 31Mhz의 반송주파수를 지니며 28분간의 데이터 획득 시간 차이를 지니고 있으며, 레이더 간섭쌍의 특성은 표 1에 요약된다.

표 1. ERS-2와 Envisat SAR 영상의 특성

파라미터	ERS-2	ENVISAT
레이더 중심주파수(GHz)	5.300	5.331
연구지역	Alaska(69N~72N, 152W~157W)	
촬영일	2008-01-25	
촬영시간차(min)	28 (ERS-Envisat)	
수직기선(m)	2400	

높은 고도민감도를 지닌 교차간섭기법에 의하여 제작되는 DEM의 정밀도를 분석하기 위하여 이 연구에서는 위도 69N~72N도와 경도 152W~157W도에 위치한 알래스카 지역으로 지형이 매우 완만한 지역을 선택하였다. 그림 3은 연구에 이용된 ERS-2와 Envisat 영상의 위치를 광학영상에 함께 나타낸 것이다. 또한, 교차 차분간섭도를 제작하기 위하여 USGS에서 제공되는 약 2.44m의 고도 정밀도와 30m의 공간해상도를 지닌 NED(National Elevation Dataset) DEM을 이용하였다(Tighe 등, 2009).

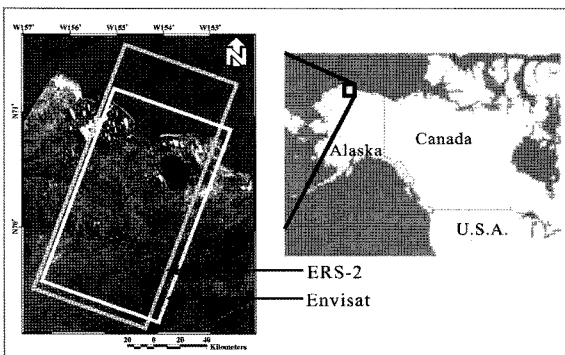


그림 3. 연구 대상 지역

#### 3.2 실험 결과

2008년 1월 25일 알래스카 지역에서 취득된 ERS-2와 Envisat RAW 데이터로부터 두 영상의 긴밀도를 높이기

위하여 Doppler 주파수를 일치시키는 azimuth common band filtering을 적용하여 각각 SLC 영상을 제작하였다. 또한, 두 ERS-2와 Envisat SLC 영상의 정밀 상호정합을 위하여 진폭상관계수를 이용하는 방법(Kwoh 등, 1994)을 적용하였다. 우선 근사적으로 두 영상의 위치를 정합하는 개략정합(course co-registration)을 수행하였고, 서브픽셀의 정밀도로 두 영상의 위치를 정합하는 정밀정합(fine registration)을 수행하였다. 특히 정밀정합의 경우, 반복적인 방법을 통하여 정합계수를 개선하였으며, 그 정합오차는 azimuth방향으로 0.09 픽셀과 range방향으로 0.36 픽셀이었다.

이와 같이 결정된 정합계수를 이용하여 부영상(slave image)을 주영상(master image)의 기하에 맞게 기하를 보정해주었고, 반송주파수 차이로 인한 range방향의 스펙트럼 이동 효과를 range common band filtering을 이용하여 보정하였으며, azimuth방향으로 5폭과 range방향으로 1폭의 멀티룩 처리를 통하여 교차 간섭도를 제작하였다. 이와 같이 생성된 교차 간섭도는 약 2,400m의 긴 수직기선거리로 인하여 지구 곡률 위상과 지형 위상에 의한 수많은 프린지를 지녔으며, 이러한 수많은 프린지 때문에 생성된 교차 간섭도에서 지구 곡률 위상만을 제거한 후 phase unwrapping을 수행하여 DEM을 제작하는 일반적인 방법을 적용할 수 없었다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 존재하는 저정밀 DEM으로부터 지형에 대한 위상값을 구하여 교차 간섭도에서 이를 제거한 후 MCF 알고리즘(Minimum Cost Flow Algorithm)을 이용하여 Phase unwrapping을 수행하였다(Constantini, 1998). 이렇게 제작된 교차 차분간섭도는 짧은 취득시간으로 인하여 대기 효과와 지형 변동이 포함하지 않는다고 가정할 수 있기 때문에 DEM의 오차로 간주할 수 있다. 즉, 만약 DEM이 정확하다면, 교차 차분간섭도는 전체 연구지역에 걸쳐 동일한 위상값(제로 위상)을 지닐 것인 반면, 위상값이 일정하지 않다면, 이는 DEM의 오차 때문에 발생한 것으로 생각할 수 있다.

본 연구에 이용된 DEM은 USGS에서 제공되는 NED이며, 이 자료는 매우 다양한 자료에 의하여 제작된 것으로 주기적으로 갱신을 하여 전체 지역에 대하여 약 2.44m의 정밀도를 지닌 양질의 DEM을 제공한다. 그러나 지역에 따라 다른 DEM 자료를 사용하여 구축하였기 때문에 지역적으로 DEM이 맞지 않는 단점이 존재한다(Gesch 등, 2001). 이와 같이 NED DEM은 양질의 DEM 정보를 제공하고 있지만, 다양한 자료로부터 제작되었

고, 일부지역을 지속적으로 갱신하기 때문에 지역에 따라 그 정밀도 차이를 보일 수 있다. 그림 4는 연구지역의 교차 차분간섭도를 나타낸다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 교차 차분간섭도는 남북방향과 동서방향으로 분명한 줄무늬 효과와 사각형 모양으로의 분명한 위상차를 지녔다. 이는 NED DEM 제작시 부분적으로 DEM 자료를 갱신하면서 발생하거나, 상호 다른 자료를 이용하여 DEM을 생성하면서 발생한 것이다. 이와 같이 교차 차분간섭도는 정밀 DEM제작에 활용될 수 있을 뿐 아니라, 제작된 DEM의 고도 오차의 크기와 분포를 정확하게 판단할 수 있는 근거 또한 제공할 수 있다.

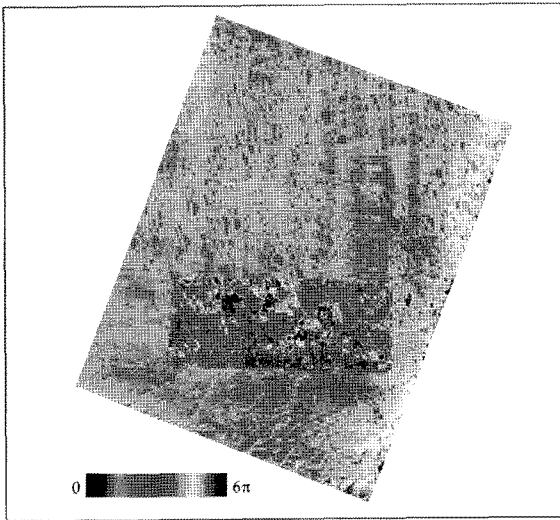


그림 4. 연구지역에 대한 교차 차분간섭도

고도오차를 나타내는 교차 차분간섭도는 NED DEM으로부터 지형 효과를 모사한 간섭도와 합하는 과정을 거쳐 고도값으로 변환되어 최종 DEM을 제작하는데 이용되었다. 그림 5는 ERS-2와 Envisat 영상의 교차 간섭기법을 이용하여 제작한 정밀 DEM이다. 이와 같은 CInSAR DEM은 ERS-2와 Envisat영상의 ground range 해상도를 고려하여 16m의 공간해상도로 제작되었다. CInSAR DEM의 개선정도를 확인하기 위하여 그림 5의 A지역과 B지역을 확대하여 NED DEM과 CInSAR DEM을 비교하였다.

그림 6은 그림 5의 A지역을 확대하여 나타낸다. 이 지역의 평균고도가 약 5.19m이고, 고도의 표준편차는 약 0.77m로 매우 편평한 지역이다. 짧은 수직기선거리를 지닌 일반적인 InSAR DEM은 이 지역과 같이 경사가 매우

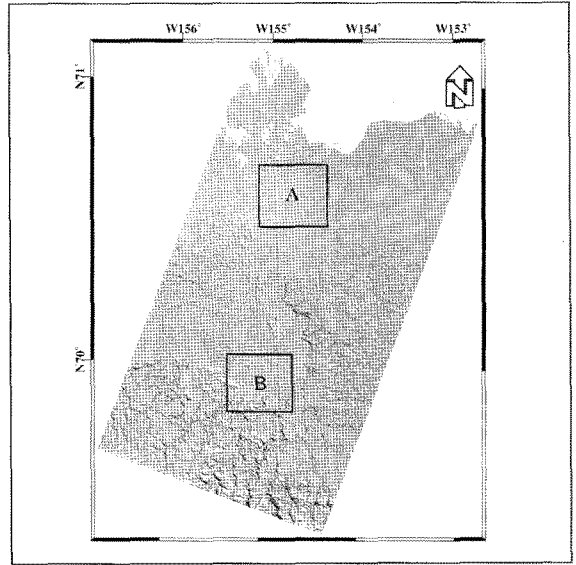


그림 5. ERS-2와 Envisat 영상의 교차 간섭기법을 이용하여 제작한 정밀 CInSAR DEM

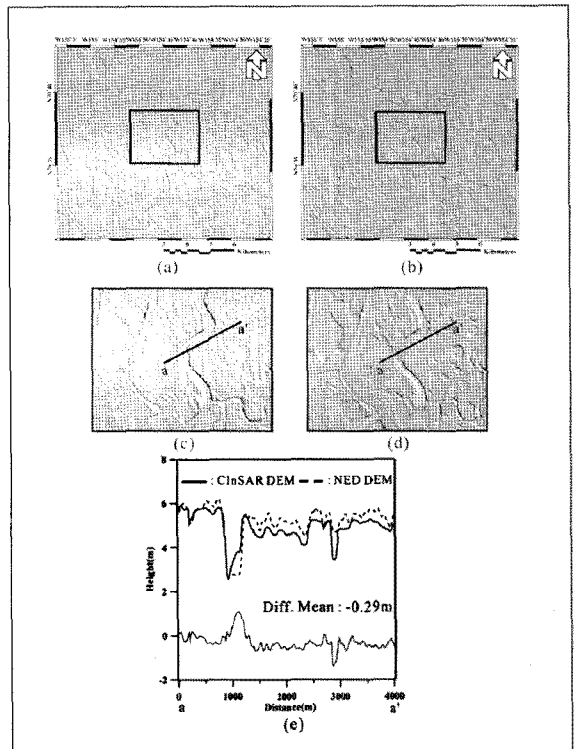


그림 6. 그림 5의 A지역에 대한 NED DEM과 CInSAR DEM의 비교: (a)는 NED DEM을 (b)는 CInSAR DEM, (c)와 (d)는 각각 (a)와 (b)의 박스를 확대하여 표현하며 (e)는 (c)와 (d)의 a-a' 프로파일을 표현.

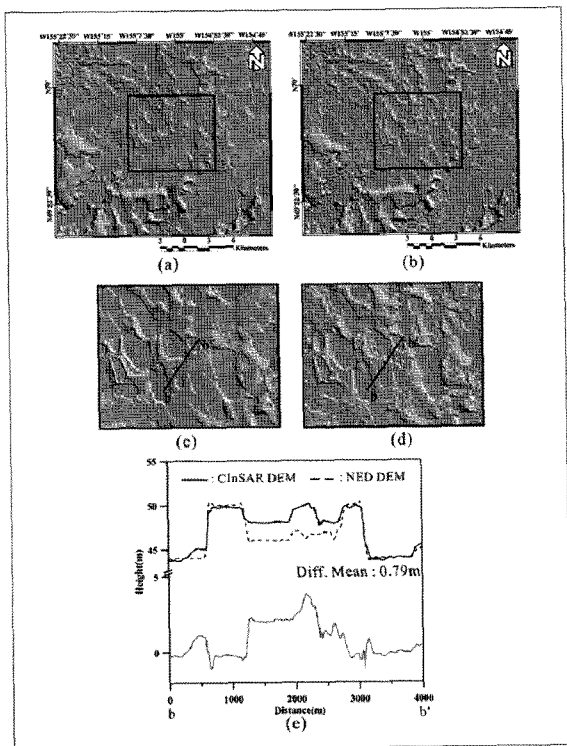


그림 7. 그림 5의 B지역에 대한 NED DEM과 CInSAR DEM의 비교: (a)는 NED DEM을 (b)는 CInSAR DEM, (c)와 (d)는 각각 (a)와 (b)의 박스를 확대하여 표현하며 (e)는 (c)와 (d)의 b-b' 프로파일을 표현.

완만한 지역에는 적용되기 어렵다. 그러나 그림 6(b)에서 볼 수 있듯이 교차간섭기법을 이용하여 제작한 DEM은 수 cm의 고도 차이를 표현할 수 있었다. 그림 6(c)와 (d)는 그림 6(a)와 (b)의 사각형을 확대하여 표현한 것으로 그림 6(d)의 CInSAR DEM이 그림 6(c)의 NED DEM보다 좋은 공간해상도를 지니고 있음을 확인할 수 있다. 그림 6(e)는 그림 6(c)와 (d)의 프로파일 a-a'을 통하여 두 DEM의 고도값을 비교한 것이다. NED DEM의 고도값에서 CInSAR DEM 고도값 차를 계산한 결과 오차 평균과 표준편차는 각각 -0.29m와 0.37m로 크게 차이를 보이지 않았지만, 급격한 고도차를 지니는 호수와 수계에서 최대 약 1m 정도의 고도 차이를 보였다. 이는 NED DEM과 CInSAR DEM의 제작시기 차이에서 기인했을 가능성이 크다.

그림 7은 그림 5의 B지역을 확대하여 나타낸다. 이 지역의 평균고도는 약 46.36m이고, 고도의 표준편차는 약 2.37m로 A지역에 비하여 고도 변화가 심한 지역이다. 특히 이 지역은 교차 차분간섭도에서 확인할 수 있는

NED DEM의 오차를 포함한다(그림 4, 그림 8 참조). 특히 그림 7(c)와 그림 7(d) b-b' 부분의 고도값 프로파일 중간부분에 최대 약 2m 이상의 차이를 확인할 수 있으며 이는 기존 A 지역에서 가장 많은 고도 차이가 발생한 지역이 호수 주변에서 DEM 제작시기에 따른 오차에 의해 판단되는 반면 B 지역에서 최대 차이가 발생한 부분은 차분간섭도에서 남아있던 DEM 오차에 의한 것으로 생각된다. 차분간섭도에 남아있는 위상값은 지형의 효과를 제거하기 위해 사용된 DEM의 오차를 포함하고 있으므로 이 차이에 의하여 고도값 프로파일에서 차이를 보이는 것으로 생각된다.

그림 8은 B지역의 좌측 부분과 우측 부분에 대한 영상으로 NED DEM과 CInSAR DEM의 고도차이가 높은 곳을 확대하였다. 그림 8에서 확인할 수 있듯이 NED DEM에서 고도의 차이가 거의 없이 편평하게 표현된 지역이 CInSAR DEM에서는 수-수십 cm의 정밀도로 정밀하게 지형을 표현하는 것을 알 수 있다. 또한 NED DEM에서 나타나는 남북방향의 고도오차가 CInSAR DEM에서는 정확하게 보정되었다(그림 8(c)와 (d)).

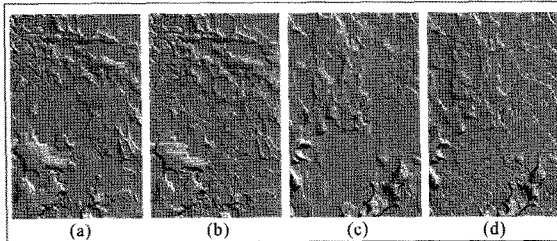


그림 8. NED DEM과 CInSAR DEM의 비교: (a)와 (c)는 NED DEM을 (b)와 (d)는 CInSAR DEM을 표현.

그림 9는 NED DEM과 CInSAR DEM의 공간해상도를 비교하기 위하여 파수영역에서의 두 DEM의 파워 스펙트럼을 표현한 것이다. 전체 연구지역에서의 NED DEM 고도값에서 CInSAR DEM 고도값 차를 계산한 결과 평균은 약 0.07m였으며, 표준편차는 약 1m였다. 확실한 고도오차를 포함하는 지역(그림 4 참조)의 경우 고도차의 표준편차가 2.63m로 비교적 큰 값이 계산되었으며 이를 제외한 지역만 고려할 경우, 표준편차는 약 0.58m로 NED DEM과 매우 비슷한 결과가 도출되었다. 이는 연구 대상지역이 고도차가 심하지 않는 편평한 지역이며 NED의 DEM의 경우 기존의 SRTM DEM, ASTER DEM에 비하여 정확도가 높기 때문에(Tighe 등, 2009) CInSAR DEM의 고도값과 매우 유사하게 계산된 것으로

판단된다. 더욱이 그림 6과 7에서 확인할 수 있듯이 일반적으로 고도오차의 대부분은 호수와 수계지역에서 나타났기 때문에 전반적으로 연구지역의 NED DEM은 CInSAR DEM과 차이는 매우 유사함을 알 수 있다.

그러나 파수영역에서의 파워 스펙트럼은 확실한 차이를 보였다(그림 9). 이러한 차이는 두 DEM 공간해상도 차이에서 기인한다. NED DEM과 CInSAR DEM의 파워 스펙트럼은 0rad/m에서 약 0.08 rad/m까지의 저주파영역에서는 거의 차이를 보이지 않았지만, 약 0.08rad/m에서 나이퀴스트 파수인 0.19rad/m의 고주파영역에서는 확실한 차이를 보였다. 즉, CInSAR DEM가 약 0.08 rad/m보다 고주파영역에서도 높은 파워 스펙트럼 값을 지닌 반면, NED DEM은 그렇지 못했다. 이러한 결과는 약 0.08 rad/m의 파수는 약 40m의 공간해상도에 해당하므로, 16m의 공간해상도를 지니는 CInSAR DEM은 NED DEM보다 약 2.5배만큼 공간해상도가 좋다는 것을 의미하며, 교차간섭기법을 이용하여 약 16m의 공간해상도로 수-수십cm의 정밀도를 지닌 정밀 DEM을 생성할 수 있다는 것을 보인다. 그러나 CInSAR DEM의 정확한 정밀도 관측은 측량자료, 라이다자료 등과 같은 실측자료를 이용하여 이루어질 필요가 있다.

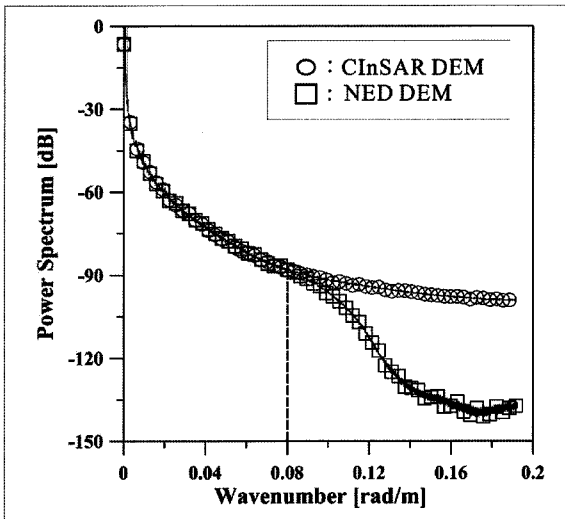


그림 9. 파수영역에서의 NED DEM과 CInSAR DEM의 비교

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ERS-2와 Envisat 교차 간섭기법으로부터 정밀한 DEM을 추출하는 효율적인 방법을 제안하였으며, 지형이 매우 완만한 알래스카지역에 대하여 교차

간섭기법으로 제작된 CInSAR DEM과 기존에 존재하는 NED DEM을 비교하였다.

제안된 CInSAR DEM 추출기법은 1) azimuth common band filtering을 통한 SLC 영상의 제작, 2) 정밀상호정합 및 range common band filtering을 통한 교차간섭도 제작, 3) 지구 곡률과 지형 위상의 제거를 통한 교차 차분간섭도 제작, 4) phase unwrapping을 통한 unwrapped 교차 차분 간섭도 제작, 5) 모사된 차분간섭도와 unwrapped 교차 차분 간섭도의 합성 및 6) 고도자료로의 변환을 포함하여 이루어진다.

CInSAR DEM의 개선정도를 확인하기 위하여 NED DEM과 CInSAR DEM을 비교하였으며, 전체 연구지역에서의 NED DEM과 CInSAR DEM의 고도차이의 평균은 약 0.07m였으며, 표준편차는 약 1m로 크지 않았다. 특히 연구지역에 사용된 NED DEM이 잘못 구축되어 있는 지역을 제외하면 고도차의 표준편차가 0.58m로 매우 유사한 결과가 계산되었다. 또한, 대부분의 고도 오차는 호수와 수계지역에서 나타났기 때문에 이러한 결과는 NED DEM과 CInSAR DEM의 고도차이가 크지 않다는 것을 나타낸다.

그러나 NED DEM에서 경사가 존재하지 않는 것으로 표현된 지역이 CInSAR DEM에서는 cm 단위의 지형 변화까지도 세밀하게 표현이 가능하였으며, 파수영역에서의 두 DEM의 파워 스펙트럼은 약 0.08 rad/m의 파수(약 40m의 공간해상도)에서 차이를 보였다. 이러한 결과는 CInSAR DEM이 NED DEM에 비하여 약 2.5배만큼 좋은 16m 공간해상도에서도 정밀 DEM 생성이 가능함을 보인다.

이와 같이 높은 고도 민감도를 이용하는 교차 간섭기법은 지형이 매우 완만한 지역에서의 정밀 DEM 생성에 많은 도움이 될 것으로 기대하며, 또한 CInSAR DEM 추출기법의 중간과정으로 생성되는 교차 차분간섭도는 기존에 제작된 DEM의 오차 크기와 분포를 정확하게 알 수 있기 때문에 기존에 제작된 DEM 검수에도 활용될 수 있다. 그러나 정확한 정밀도 관측을 위하여 측량자료, 라이다자료 등과 같은 실측자료를 이용한 연구가 진행될 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받는 기초연구 사업(2009-0088950) 및 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.



## 참고문헌

- 김창오, 김상완, 이동천, 이용욱, 김정우 (2005), 레이더 간섭기법을 이용한 수치고도모델 해상도 향상에 관한 연구, 대한원격탐사학회지, 대한원격탐사학회, 제 21권, 제 4호, pp. 287-302.
- 김창오, 김정우 (2005), 영상 레이더 간섭기법 및 차분간섭기법을 이용한 수치고도모델 생성과 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 23권, 제 2호, pp. 147-156.
- 윤근원, 김상완, 민경덕, 원중선 (2001), DEM 정밀도 향상을 위한 2-pass DInSAR 방법의 적용, 대한원격탐사학회지, 대한원격탐사학회, 제 17권, 제 3호, pp. 231-242.
- Arnaud, A., Adam, N., Hanssen, R., Inglada, J., Duro, J., Closa, J., Eineder, M. (2003), ASAR ERS interferometric phase continuity, *Proceedings of IGARSS'03*, vol. 2, pp. 1133-1135.
- Colesanti, C., De Zan, F., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2003), Generation of DEM with sub-metric vertical accuracy from 30' ERS-Envisat pairs, *Proceedings of 'Fringe 03' Workshop on ERS SAR and ASAR Interferometry*, ESA-ESRIN.
- Costantini, M. (1998), A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 813-821.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. (1988), Crossed orbit interferometry : theory and experimental results from SIR-B, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, no. 5, pp. 857-872.
- Gatelli, F., Monti Guarnieri, A., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C., Rocca, F. (1994), The Wavenumber Shift in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, vol. 31, no. 4, pp. 855-865.
- Gens, R., Van Genderen, J.L. (1996), SAR Interferometry-issues, techniques, applications, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no. 10, pp. 1803-1835.
- Gesch, D., Williams, J., Miller, W. (2001), A comparison of US Geological Survey seamless elevation models with Shuttle Radar Topography Mission data, *IGARSS'01 Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 2, pp. 754-756.
- Guarnieri, A.M., Prati, C. (2000), ERS-ENVISAT Combination for Interferometry and Super-Resolution. *Proceedings of ERS-Envisat symposium*.
- Hong, S.-H., Won, J.-S. (2005), ERS-Envisat cross-interferometry for coastal DEM construction. *Proceedings of 'Fringe 05' Workshop*, ESA-ESRIN.
- Koh, L.K., Chang, E.C., Heng, W.C.A., Lim, H. (1994), DTM Generation from 35-Day repeat pass ERS-1 interferometry, *Proceedings of the Geoscience of Remote Sensing Symposium*, pp. 2288-2290.
- Lanari, R., Fornaro, G., Riccio, D., Migilaccio, M., Papathanassiou, K.P., Morira, J.R., Moreira, J.R., Schwabisch, M., Dutra, L., Puglisi, G., Fransescheeti, G., Coltelli, M. (1996), Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry : the Etna case study, *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.34, no.5, pp. 1097-1114.
- Olmsted, C. (1993), *Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide*, pp. 17-29.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., Bameler, R. (2003), The shuttle radar topography mission-a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 57, pp. 241-262.
- Smith, B., Sandwell, D. (2003), Accuracy and resolution of Shuttle Radar Topography Mission data, *Geophysical Research Letters*, vol. 30, no. 9, pp. 1467-1470.
- Tighe, M.L., Champlain, D. (2009), Accuracy comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP®USA Digital Terrain Model over Several USA Study sites, *Proceedings of the ASPRS/MAPPS 2009 Fall Conference*.
- Wegmuller, U., Maurizio S., Werner, C., Strozzi, T. (2009), DEM generation using ERS-Envisat interferometry, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 69, no. 1, pp. 51-58.
- Zebker, H.A., Werner C.L., Rosen, P.A., Hensley S. (1995), Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.32, no.4, pp. 823-836.