

영상 레이더 간섭기법 및 차분간섭기법을 이용한 수치고도모델 생성과 정확도 평가

Generation and Assessment of DEM from InSAR and Differential InSAR

김창오¹⁾ · 김정우²⁾

Kim, Chang Oh · Kim, Jeong woo

Abstract

SAR interferometry (InSAR) is a technique to generate 3-Dimensional spatial information using complex data pairs observed by antennas at different locations. In case of the Two-pass differential SAR interferometry (DInSAR), the topographic phase signature can be separated from the contribution of surface deformation in the interferometric phase. In this study, InSAR and DInSAR were implemented with ERS-1/2 tandem pair to produce DEM. The accuracy of the Resulting DEMs was analyzed.

Keywords : InSAR, DInSAR, DEM

요 지

SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상은 반사 신호의 상대적 거리를 나타내는 위상 정보를 제공한다. 영상 레이더 간섭기법(InSAR)은 동일한 지표면에 대해 다른 위치에서 획득된 두 SAR자료간 위상차를 이용하여 지표면의 3차원 공간정보를 획득하는 기술이다. 차분간섭기법(DInSAR)의 간섭도에는 지형과 변위에 의한 위상이 복합적으로 포함되어 있으므로, 지형정보에 대한 정보를 나타내는 수치표고모델(DEM)을 이용하여 지형의 위상을 제거함으로써 지형과 변위에 대한 위상 효과를 분리하게 된다. 두 SAR 자료의 관측 기간 중 변위가 없는 경우에는 잔여 위상은 DEM의 오차를 반영한다. 본 연구에서는 영상 레이더 간섭기법을 이용하여 ERS-1/2 tandem 간섭쌍으로 DEM을 제작하였고, 차분간섭기법(DInSAR)으로 원래의 DEM 값을 갱신하여 정확도를 향상시켰다. 제작된 DEM은 GPS 측량을 통해 획득된 검사점(check point)를 이용하여 정확도를 평가하였다.

핵심용어 : 레이더 간섭기법, 차분간섭기법, 수치고도모델

1. 서 론

오늘날 세계적으로 광학 센서와 마이크로파 센서가 탑재된 위성이 개발되고 있으며, 이에 대한 관심과 활용이 증대되고 있다. 지상측량이나 항공사진측량을 이용하는 방법은 정확도 면에서 큰 장점을 가지고 있지만, 데이터 획득 영역이 작고, 많은 비용과 인력, 시간을 요하는 단점을 가진다. 이를 보완하기 위해 데이터를 효율적으로 취득할 수 있는 위성 영상을 이용하는 방법이 요즘 연구되

고 있다. SAR는 광학영상과 달리 기상조건이나 관측 시간에 구애 받지 않고 데이터를 취득할 수 있는 장점이 있다. 동일한 지점에서 얻어지는 두 개 이상의 SAR 자료를 통해 위상정보를 이용하여 정밀한 지형고도 및 지표면의 변위를 측정하는 기술을 레이더 간섭기법이라 하고, 다수의 SAR 자료와 DEM을 이용하여 지표의 변위량을 정밀하게 측정하는 것을 차분간섭기법이라 한다. 차분간섭기법의 기본 개념은 간섭도에서 지형 위상을 제거함으로써 변위에 대한 위상 효과를 분리하는 것이다. 레이더 간섭

1) 연결저자 · 정회원 · 세종대학교 지구정보공학과 석사과정(E-mail:cokim@sju.ac.kr)

2) 세종대학교 지구정보공학과 부교수(E-mail:jwkim@sejong.ac.kr)

기법을 이용한 DEM 추출에 관한 연구는 Gabriel and Goldstein(1988)이 레이더 간섭기법을 이용하여 SIR-B 자료를 절대고도로 계산하였으며, Rufino et al.(1998)은 ERS-1/2 tandem SAR자료로부터 DEM을 생성하였다. DEM 정밀도 향상 기법은 위상 불구속화(phase unwrapping) 단계에서 낮은 간섭도(coherence)나 신호대잡음비를 가지는 지역을 제외시키는 방법(Fazio de al., 1993), 지상기준 점을 사용하지 않고 기선 파라미터와 정밀도가 낮은 DEM을 사용하는 방법(Seymour, 1999), SAR 영상으로 생성되어지는 레이더 간섭기법 DEM의 layover나 shadowing, temporal decorrelation 등에 의해 오차가 생기는 지역에 대해 SPOT 스테레오 영상을 사용하는 방법(Honikel, 1998) 등이 있다.

2-pass 차분간섭기법은 2개의 SAR 자료와 하나의 DEM을 사용하는 방법으로 위상 불구속화가 필요하지 않다는 장점이 있는 반면, DEM의 정밀도가 높아야 된다는 제약이 있다(Rosen et al., 1996). 하지만, 전세계적으로 정밀도가 높은 DEM이 있는 지역은 많지 않으며, 이에 따라 높은 정밀도 DEM이 없는 경우 정밀한 지표 변위 계산에 어려움이 따를 수 있다. 반면, 낮은 정밀도 DEM을 사용하는 경우 사용된 DEM의 오차가 2-pass 차분간섭기법의 잔여 위상에 존재하는 점을 역으로 이용하여, 정밀도가 낮은 DEM의 고도 오차를 보정함으로써 DEM의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 ERS-1/2 tandem 간섭쌍을 이용하여 영상 레이더 간섭기법과 다양한 해상도의 DEM(GTOPO30 DEM, SRTM-3 DEM, 1:25000 수치지도에서 도출된 DEM)을 차분간섭기법에 적용하여 DEM 정밀도를 향상시킨 후, GPS 측량을 통해 획득된 검사점을 기준으로 하여 정확도 평가를 수행하고자 한다.

2. 기초이론

SAR 간섭기술의 자료 취득 방법은 안테나의 관측방법에 따라, 하나의 비행체에 두 개의 안테나가 장착되어 두 개의 자료를 동시에 얻는 single-pass 방법과, 동일 위성의 반복 궤도(예, JERS-1, RADARSAT-1, ERS-1, ERS-2 등) 또는 동일 시스템을 가지고 있는 위성의 서로 다른 비행(ERS-1/2 tandem 쌍)으로 관측한 자료를 이용하는 repeat-pass 방법이 있다. Repeat-pass 안테나의 일반적인 기하학적 구성은 그림 1과 같다.

두 안테나에서 지표까지의 거리를 ρ 와 $\rho + \delta\rho + d\rho$ 로 놓았을 때, 두 안테나의 위상차이는

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}(\delta\rho + d\rho) \quad (1)$$

이다. 여기서 λ 는 센서의 파장, $\delta\rho$ 는 두 관측 사이에 발생한 지표변위, $d\rho$ 는 위성의 위치와 보는 각도에 의해 생긴 거리차이이다. 총 변위량 $d\rho + \delta\rho$ 는 코사인 제 2법칙에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$(\rho + \delta\rho + d\rho)^2 = \rho^2 + B^2 - 2\rho B \sin(\theta - \alpha) \quad (2)$$

B 는 기선의 길이이며, θ 는 관측각, α 는 안테나의 수평인 직선상에서 기선과 이루는 각이다. $(d\rho + \delta\rho)^2 \ll \rho^2$ 이므로 2ρ 로 나누고, $(d\rho + \delta\rho)^2$ 의 차수 항을 무시하면 다음과 같다.

$$\delta\rho + d\rho \approx -B \sin(\theta - \alpha) + \frac{B^2}{2\rho} \quad (3)$$

이때 $\frac{(\delta\rho)^2}{2\rho} \ll 1$ 이므로 무시될 수 있다. 또한 식 (3)에서 $B \sin(\theta - \alpha)$ 은 기선 거리의 수평성분($B_{||}$)이므로 아래와 같이 나타낼 수 있고

$$\delta\rho + d\rho \approx -B_{||} \quad (4)$$

실제 지표 변위가 없는 지형에 의한 경우만 고려하면,

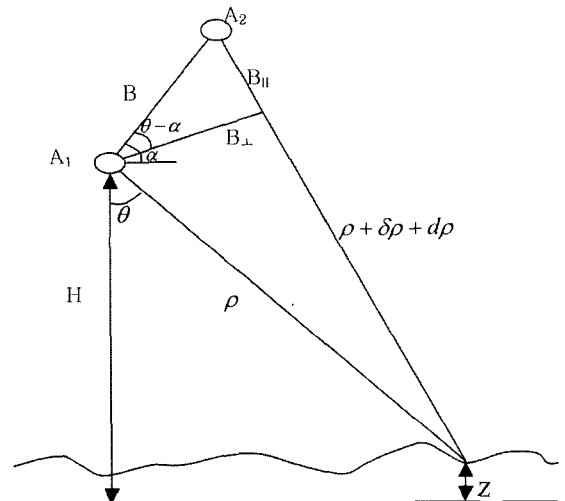


그림 1. 레이더 기하학

$$d\rho \approx -B_{//} \quad (5)$$

이다. 간섭도는 지형과 지표 변위에 대한 영향을 모두 가지고 있으므로 지형에 대한 위상을 제거해야 하는데, 이를 위해 DEM을 이용하여 지형에 대한 위상을 제거해 줄 수 있다. 지형과 보는 각도에 의해 계산되는 레이더 간섭 기법의 위상은 다음과 같다.

$$\phi_{synthetic} = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\cos^{-1}(\frac{H-Z}{\rho}) - \alpha) \quad (6)$$

H는 위성의 고도이며 α 는 수평과 기선을 이루는 각이다. 이 위상을 간섭도에서 화소대 화소로 빼주면 변위의 값만 남게 된다. 간섭도의 위상은 지형과 변위에 대한 정보를 함께 가지고 있는데, 변위가 존재하지 않고 지형에 의해서만 계산되는 간섭도의 위상을 ϕ_t 라 한다면 식 (1)과 식 (5)에 의해

$$\phi_t = \frac{-4\pi}{\lambda} B_{//t} \quad (7)$$

이 된다. 식 (7)을 미분하면

$$d\phi_t = \frac{-4\pi}{\lambda} B \cos(\theta - \alpha) d\theta \quad (8)$$

$Z = H - \rho \cos \theta$ 이고 $dZ = \rho \sin \theta d\theta$ 이므로, 지형에 대한 위상차 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{d\phi_t}{dZ} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \cos(\theta - \alpha)}{\rho \sin \theta} \quad (9)$$

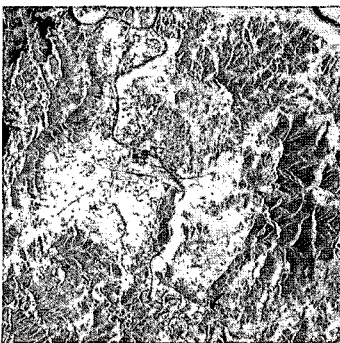
이는 지표면의 고도에 따른 위상의 민감도를 나타내는 식이다(윤근원 외, 2001). 간섭도에서 나타나는 한 줄무늬(fringe) 즉 2π 변화에 대응하는 고도값을 altitude of ambiguity (ha)라 한다(Massonnet and Feigl, 1998).

$$ha = -\frac{\lambda}{2} \frac{\rho \sin \theta}{B \cos(\theta - \alpha)} = -\frac{\lambda}{2} \frac{\rho \sin \theta}{B_{\perp}} \quad (10)$$

3. 자료 및 연구방법

본 연구에 사용된 자료는 동경 127° 13.2'~127°30', 북위 36°13.5'~36°28.2'로 대전 및 그 근교에 해당하는 ERS-1/2 tandem SAR 영상으로 1996년 1월22일에 획득된 ERS-1 영상(그림 2(a))과 1996년 1월23일에 획득된 ERS-2 영상(그림 2(b))을 각각 주영상과 부영상자료로 사용하였다. 그리고, 레이더 간섭기법 및 차분간섭기법에 의한 영상 자료처리는 연세대학교 지구시스템과학과 원격탐사연구실에서 개발한 GeoRadar를 사용하여 처리했다. 생성된 간섭도(그림 2(c))에서 한 줄무늬에 해당하는 고도값 ha(식 (10))는 약 -90.4m이다.

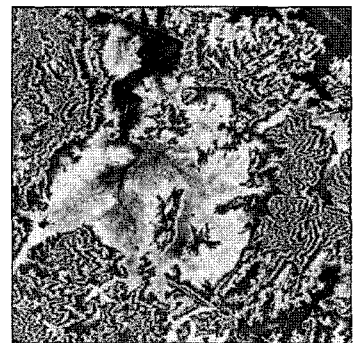
2-pass 차분간섭기법을 위해 사용된 DEM은 해상도 1km의 GTOPO30의 DEM, 우주왕복선 엔더버호에 장착된 두 개의 SAR 안테나로부터 획득된 자료를 이용하여 제작된 해상도 90m의 SRTM-3 DEM, 1:25000 수치지도로서 해상도 10m 간격의 DEM이다. 레이더간섭기법에 의한 DEM과 앞에서 언급한 서로 다른 국내의 DEM을 이용한 차분간섭기법에 의한 DEM의 정확도를 평가하기 위해 GPS에 측량에 의한 검사점을 이용하였다.



(a) ERS-1 master 영상



(b) ERS-2 slave 영상



(c) ERS-1/2 간섭도(ha=-90.4m)

그림 2. ERS-1/2 tandem pair 영상 및 간섭도

4. 자료처리 및 결과 분석

연구에서 사용한 자료처리 과정은 그림 3과 같다. 레이더 간섭기법(그림 3(a))에서는 초기신호처리를 거친 원시 데이터의 단일복소영상(SLC: Single Look Complex)을 만든 후, 기선의 보정을 통하여 두 영상의 상호좌표등록을 수행하고, 긴밀도 계산을 한 후 간섭도를 생성했다. 또한 여기서 만들어진 간섭도는 지구 곡률에 의한 위상값도 가지고 있으므로 이를 보정해 주어야 한다. 위상의 불규속화(phase unwrapping)단계에서 위상은 지표면의 기복과 관련되어 있는 것으로 다른 물리적인 특성과 관련된 양을 추정하기 위해 사용된다. 마지막으로 표고값으로 변환하여 DEM이 생성된다.

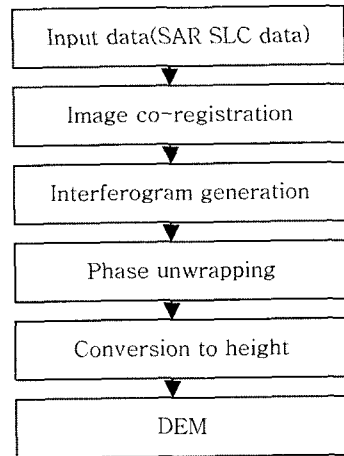
그림 3(b)는 본 연구에서 적용한 2-pass 차분간섭기법을 이용한 DEM 생성 기법을 나타내는 흐름도로써, 두개의 단일복소영상(SLC) 자료와 입력 DEM으로 GTOPO30, SRTM-3, 1:25000 수치지도를 이용한다. 레이더 간섭기법과 마찬가지로, 두 영상간의 정합이 필요하고, 정합을 거친 후 부영상을 재배열 한다. 재배열 후 위상차 계산을 통해 간섭도가 생성되고, 지구 곡률 보정을 해준다. SAR 자료는 주영상과 부영상의 영상 취득 간격이 짧고, 긴밀도가 높은 것을 선택하였으므로, 변위가 존재하기는 어려우며, 계산된 위상에서는 변위가 없다고 가정할 수 있다. 다음 단계는, 입력 DEM을 사용하여 simulated interferogram 생성한다. 이때 입력 DEM은 GTOPO30, SRTM-3, 1:25000 수치지도를 각각 사용한다.

DEM을 이용하여 SAR 영상을 시뮬레이션하기 위해서는 위성의 영상취득 계수(PRF, 센서의 파장, 첫 번째 azimuth 획득시간, 첫 번째 range 획득시간 및 궤도정보가 요구되므로 리더파일 등으로부터 해당정보를 추출해야 한다. 시뮬레이션을 위해 SAR 영상으로부터 선택된 지역의 좌표는 지리좌표계로 변환되어 입력된 DEM으로부터 해당영역을 추출한다. 이때 레이더 좌표계에서 특정한 line과 pixel에 대응하는 지리좌표를 구하기 위해서 Doppeler, Range, Ellipsoid등의 세가지 방정식이 사용된다(Olmsted, 1993; Kamps and Usai, 1999).

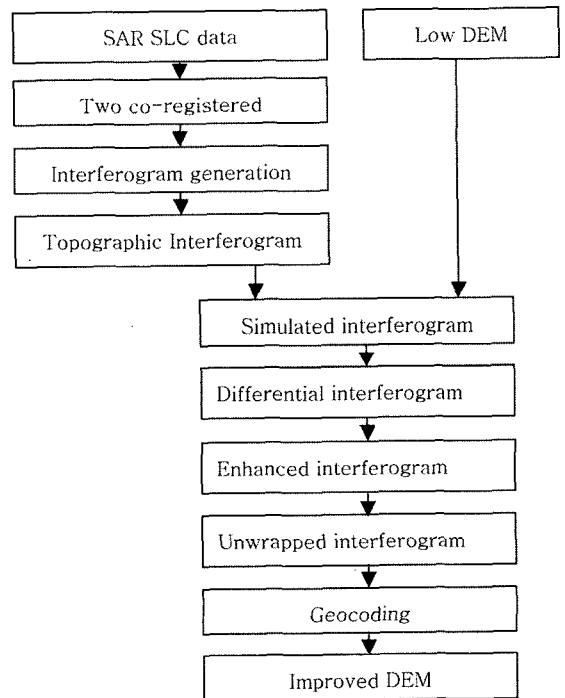
추출된 DEM은 실제 SAR 영상의 화소 간격에 충분히 대응될 수 있도록 bilinear, bicubic등의 방법을 이용하여 내삽되어야 한다. 내삽된 고도값들은 DEM의 좌표를 이용하여 지구중심 직교 좌표계로 변환되고, 다시 이 값은 레이더 좌표계로 변환한다. 지리 좌표계상의 한 점을 레이더 좌표계로 변환하기 위해서는 앞의 세 방정식 중

dopperler 방정식만을 사용해 구할 수 있다(Kim,2004). 다음 단계는 Differential Interferogram을 만드는 것이다. Differential Interferogram은 Real Interferogram과 simulated interferogram의 차를 통해 구할 수 있다.

다음 단계로 레이더 간섭기법과 마찬가지로 간섭도에



(a) 레이더 간섭기법



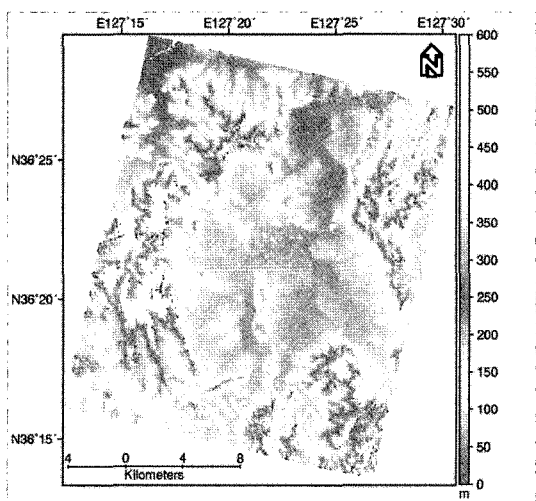
(b) 2-pass 차분간섭기법

그림 3. 자료처리 과정도

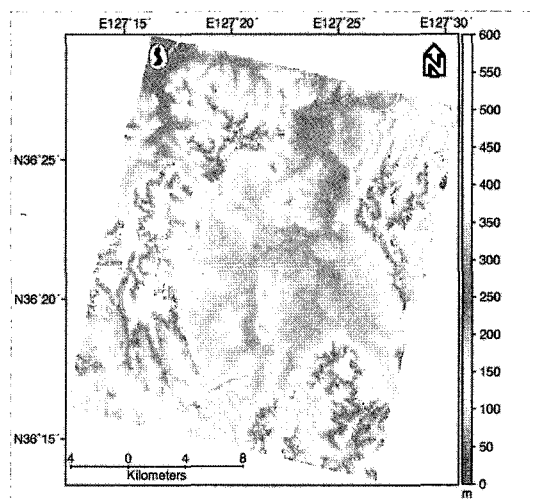
남아 있는 많은 잡음을 제거하기 위한 후처리 필터링 (Carrasco et al., 1996; Goldstein and Werner, 1998)을 통해 SAR 영상에서 특징적으로 나타나는 speckle noise에 의한 위상 오차를 줄여 Enhanced Interferogram을 만든다.

저 해상도 그리고/또는 저 정밀도를 갖는 기존 DEM을 이용하여 생성된 Differential interferogram에 남아 있는 위상은 DEM 오차와 대기 영향에 의한 위상을 포함하고 있다. 대기에 의한 위상성분은 두 SAR 자료의 획득시기에 관측된 기상자료를 이용하여 보정하는 방법이 있다. 이 경우 최소 수 km 마다 기상 관측자료가 필요하므로 현실적으로

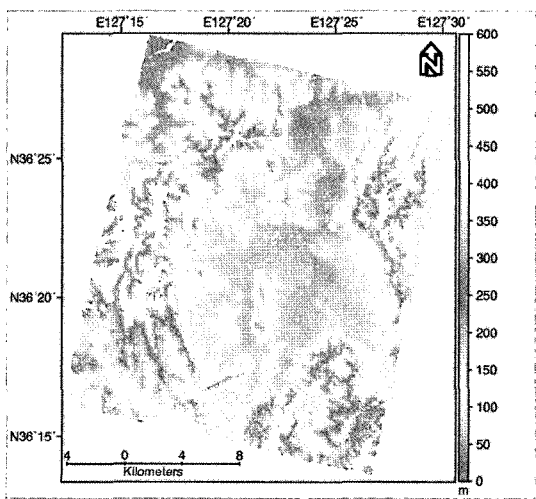
이러한 보정은 불가능하다. 따라서, 단일 간섭쌍을 이용하여 생성된 DEM은 두 SAR 자료 획득시기의 대기변화에 의한 오차를 포함하게 된다. 동일 지역에 대해 여러 개의 간섭쌍이 이용 가능한 경우, 대기 영향에 의한 위상 성분은 시·공간적으로 랜덤하게 분포한다고 가정될 수 있으므로 증첩을 통해 대기영향을 줄일 수 있다. 다음 단계로 가중된 불연속선의 합을 최소화 시키며 영상내의 모든 화소에서 절대 위상을 구할 수 있는 Flynn(1997)을 적용하여, 위상불구속화(Phase unwrapping)를 수행하여 Unwrapped interferogram을 만든다. DEM을 이용하여 모사된 위상값



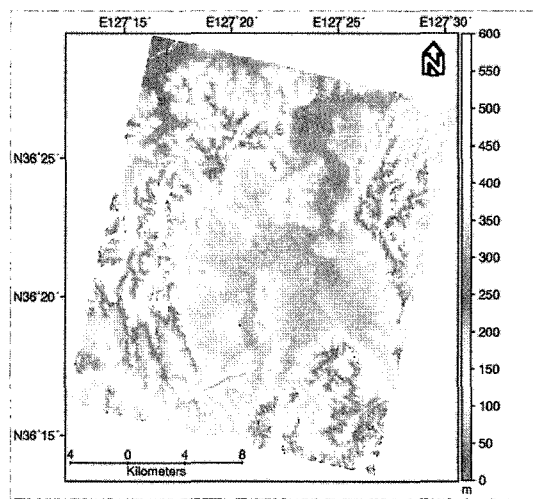
(a) InSAR



(b) DInSAR_GTOPO30



(c) DInSAR_SRTM



(d) DInSAR_Digital map(1:25,000)

그림 4. DEM 생성

에 Unwrapped 위상성분(=DEM 오차에 의한 성분)을 더한 후 고도값으로 변환되어 새로운 DEM이 생성된다.

생성된 DEM(그림 4)은 검사점들을 이용하여 정확도를 평가하였고, 그림 5는 상대적으로 해상도가 높은 1:25000 수치지도로부터 도출된 차분간섭기법 DEM을 3차원으로 시각화한 것이다. 본 연구에서 생성된 DEM은 WGS84 타원체, UTM좌표체계를 사용했다. ERS 영상에서 측량으로 구한 검사점의 동일지점의 좌표값을 얻기 위해 정사영상을 생성하였다. 레이더 좌표계(azimuth time, range time)로 변환하기 위해서는 영상 내 각 지점의 고도값이 이용되는데, 서로 다른 자료와 방법에 의해 제작된 DEM의 고도값이 일치하지 않기 때문에 서로 다른 네 개의 정사영상을 제작하였다. Layover현상 때문에 정사영상 내에서 사면의 경사가 급한 곳에는 영상이 심하게 왜곡되어 보이는데, 이런 현상을 감소하기 위해 격자 크기를 다르게 하였다. Layover현상은 사면의 경사가 레이더 관측각보다 클 경우 전사면 정상부에서의 레이더 신호가 전사면 하부

보다 먼저 도달하여 정상부와 하부가 뒤바뀌어 나타나는 현상이다. ERS 영상의 경우 관측각이 약 23°로 매우 작기 때문에 산악지역에서 Layover현상이 빈번하게 나타난다.



그림 6. GCP의 분포

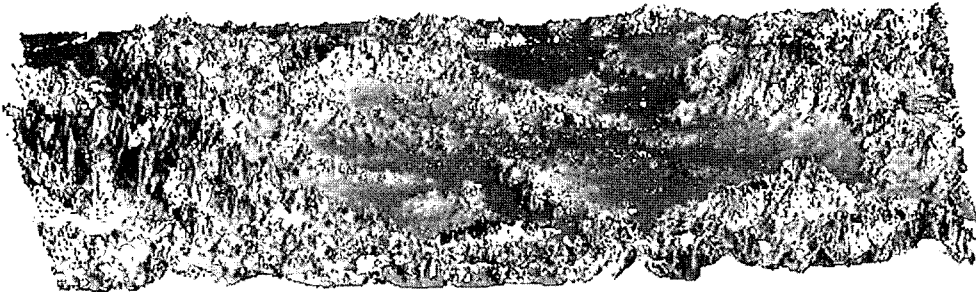


그림 5. DInSAR_Digital map(1:25,000)의 3차원 시각화

표 1. 검사점의 3차원 좌표값(UTM 좌표계, 단위:m) (계속)

GCP	GPS 측량			InSAR		
	중좌표	횡좌표	고도	중좌표	횡좌표	고도
1	4,024,983.691	352,832.730	68.821	4,024,969.940	352,839.710	80.322
2	4,021,898.021	354,298.181	82.889	4,021,935.680	354,285.680	85.621
3	4,023,167.810	359,158.105	85.964	4,023,178.820	359,121.900	88.289
4	4,018,707.535	350,331.467	88.766	4,018,716.050	350,284.360	81.922
5	4,015,005.587	351,982.443	122.441	4,014,969.010	351,958.270	122.750
6	4,021,847.422	357,269.304	84.534	4,021,893.500	357,242.200	82.598
7	4,020,328.323	355,019.092	72.113	4,020,376.690	355,042.110	69.066
8	4,024,119.104	358,341.563	80.998	4,024,096.650	358,351.060	79.673
9	4,016,096.924	358,537.874	149.886	4,016,021.430	358,598.580	159.807
10	4,023,851.290	356,876.859	63.344	4,023,825.350	356,864.990	63.815
11	4,019,890.241	352,204.214	76.488	4,019,838.480	352,254.340	65.190
12	4,023,625.363	355,250.930	80.309	4,023,632.130	355,261.400	77.820

표 1. 검사점의 3차원 좌표값(UTM 좌표계, 단위:m)

	DInSAR_GTOPO30				DInSAR_SRTM				DInSAR_Digital map(1:25,000)			
	종좌표	횡좌표	원고도	갱신 후 고도	종좌표	횡좌표	원고도	갱신 후 고도	종좌표	횡좌표	원고도	갱신 후 고도
1	4,024,973.31	352,792.53	31.1	76.4	4,024,976.68	352,822.86	69.3	72.9	4,024,974.44	352,785.27	40	76.1
2	4,021,922.00	354,283.09	51.2	86.1	4,021,924.82	354,288.00	85.3	82.1	4,021,927.63	354,293.79	82.5	87.2
3	4,023,167.85	359,116.94	44.8	90	4,023,177.51	359,126.42	89	89.2	4,023,173.05	359,122.00	55.5	90.6
4	4,018,709.03	350,288.21	62.1	84.7	4,018,738.37	350,326.36	93.6	82	4,018,719.30	350,294.08	67.9	80.6
5	4,014,969.49	351,962.38	107.4	122.4	4,014,972.75	351,963.94	123.7	119.8	4,014,965.31	351,964.93	96.8	122.1
6	4,021,908.65	357,251.76	49.2	83.7	4,021,861.01	357,252.38	88.7	78.9	4,021,899.84	357,245.59	70.6	83.7
7	4,020,377.05	355,097.37	44.5	70	4,020,372.35	355,040.81	75.7	65.9	4,020,374.87	355,041.69	53.2	69.6
8	4,024,139.35	358,382.37	49.6	79.6	4,024,148.68	358,396.01	85.7	75.1	4,024,116.13	358,381.36	59.4	78.8
9	4,016,021.97	358,598.03	155.6	160	4,016,016.26	358,610.08	165.6	157.2	4,016,011.96	358,609.75	131.5	161.3
10	4,023,820.40	356,865.16	34	63.2	4,023,826.34	356,862.89	66	60.7	4,023,825.82	356,863.00	49.5	63.9
11	4,019,859.48	352,250.38	42.4	66.7	4,019,862.88	352,257.26	74.8	64.7	4,019,863.65	352,253.21	50	67
12	4,023,616.50	355,264.27	46.4	81	4,023,622.95	355,268.57	83.7	78.7	4,023,628.56	355,268.57	54.3	80.7

표 2. 검사점에서의 측량성과를 기준으로 산출된 DEM의 오차(UTM 좌표계, 단위:m)

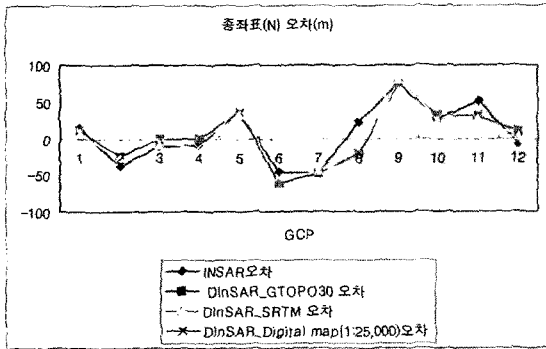
GCP	INSAR 오차			DInSAR_GTOPO30 오차				DInSAR_SRTM 오차				DInSAR_Digital map(1:25,000) 오차			
	종좌표 오차	횡좌표 오차	고도 오차	종좌표 오차	횡좌표 오차	GTOPO30 고도오차	갱신 후 고도오차	종좌표 오차	횡좌표 오차	SRTM 고도오차	갱신 후 고도오차	종좌표 오차	횡좌표 오차	1:25000 고도오차	갱신 후 고도오차
1	13.751	-6.98	-11.5	10.381	40.2	37.7	-7.6	7.011	9.87	-0.5	-4	9.251	47.46	28.8	-7.3
2	-37.659	12.501	-2.7	-23.98	15.091	31.7	-3.2	-26.8	10.181	-2.4	0.8	-29.609	4.391	0.4	-4.3
3	-11.01	36.205	-2.3	-0.041	41.165	41.1	-4.1	-9.7	31.685	-3.1	-3.3	-5.24	36.11	30.5	-4.7
4	-8.515	47.107	6.8	-1.495	43.257	26.6	4	-30.84	5.107	-4.9	6.7	-11.765	37.39	20.8	8.2
5	36.577	24.173	-0.3	36.097	20.063	15	0.1	32.837	18.503	-1.2	2.7	40.277	17.51	25.6	0.3
6	-46.078	27.104	1.9	-61.23	17.544	35.3	0.8	-13.59	16.924	-4.2	5.6	-52.418	23.71	14	0.9
7	-48.367	-23.018	3	-48.73	-78.278	27.6	2.2	-44.03	-21.72	-3.6	6.2	-46.547	-22.6	19	2.5
8	22.454	-9.497	1.3	-20.25	-40.807	31.4	1.4	-29.58	-54.45	-4.7	5.9	2.974	-39.8	21.6	2.2
9	75.494	-60.706	-9.9	74.954	-60.156	-5.7	-10.1	80.664	-72.21	-15.7	-7.4	84.964	-71.9	18.4	-11.4
10	25.94	11.869	-0.5	30.89	11.699	29.3	0.1	24.95	13.969	-2.7	2.6	25.47	13.86	13.9	-0.5
11	51.761	-50.126	11.3	30.761	-46.166	34.1	9.8	27.361	-53.05	1.7	11.8	26.591	-49	26.5	9.5
12	-6.767	-10.47	2.5	8.863	-13.34	33.9	-0.7	2.413	-17.64	-3.4	1.6	-3.197	-17.6	26	-0.4
RMSE	37.86	31.78	6.05	36.65	40.8	30.62	5.06	33.88	33.95	5.49	5.69	36.81	36.52	21.95	5.73

그림 6은 검사점들의 분포를 나타낸 것이고, 표 1은 검사점의 3차원 좌표값을 UTM좌표계로 나타냈다. 그리고, 표 2는 GPS 측량성과를 기준으로 각각의 DEM에 대한 종좌표오차, 횡좌표오차, 고도 오차를 나타내는 것이고, 그림 7은 이를 각각의 오차로 나타내고 있다. GTOPO30의 경우 고도오차를 30.62m에서 5.06m로 향상시켰고, 1:25,000 수치지도의 경우에도 고도오차를 21.95m에서 5.73m로 향상시켰음을 알 수 있다. SRTM-3의 경우 5.49m에서 5.69m로 크게 변화가 없다. 또한 간섭기법을 이용

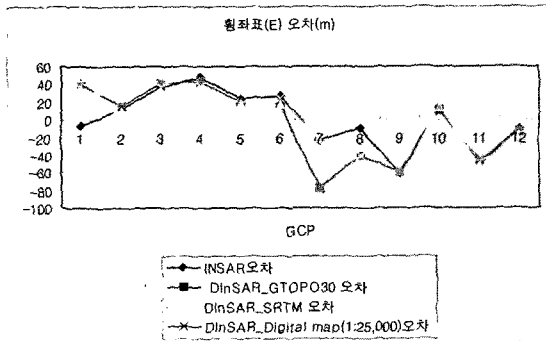
하여 제작한 DEM의 경우 6.05m의 오차를 가지고 있어, 하나의 SAR 간섭쌍을 이용하여 생성된 네가지 DEM 모두 약 5-6m의 RMSE를 보이고 있다. 기존 DEM의 차분 간섭기법을 이용한 DEM 갱신 방법은 위성의 궤도오차에 의한 오차와 위상 불균속화 오류에 의한 오차를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 그런데 ERS 위성의 경우 Delft 공대에서 제공하는 궤도정보(Scharroo and Visser, 1998)가 수 cm 이내의 정밀도를 가지고 있으므로 궤도 오차에 의한 오류가 거의 없어 간섭기법과 차분간섭기법간의 차

이를 잘 보여주지 못했다. 또한 위상 불구속화 오류는 산악지역에서 빈번하게 발생하는데, 연구에서 사용된 검사점이 모두 대부분 평지에 있어 방법간의 차이를 잘 나타내지 못하였다.

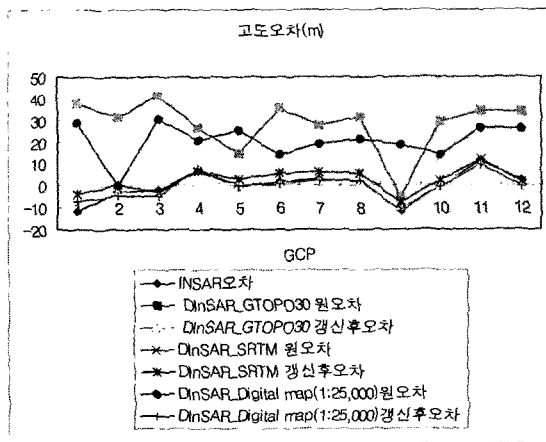
간섭위상의 불구속화 오류에 의한 오차 발생 여부를 구



(a) 종좌표의 오차

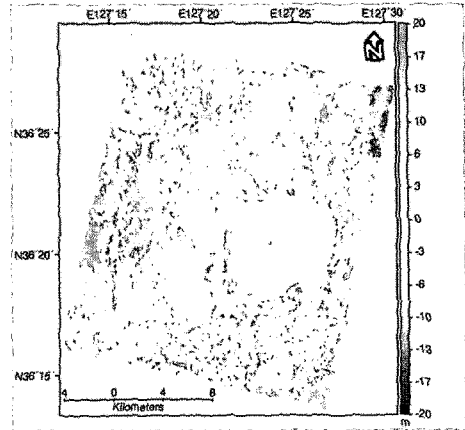


(b) 횡좌표의 오차

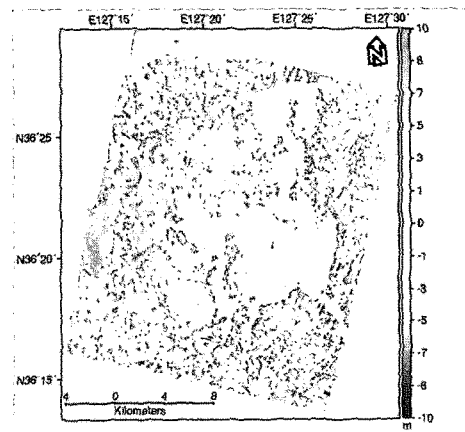


(c) 고도오차

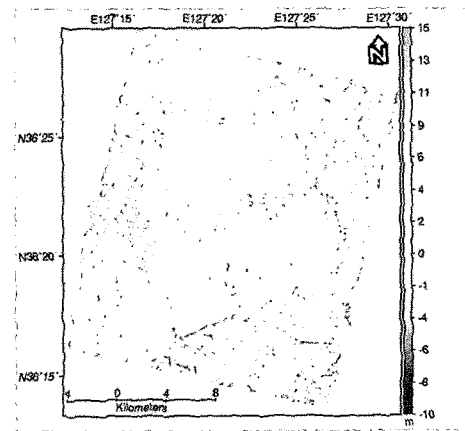
그림 7. 생성된 DEM의 오차



(a) DInSAR_Digital map(1:25,000) - InSAR영상



(b) DInSAR_Digital map(1:25,000) - DInSAR_GTOPO30



(c) DInSAR_Digital map(1:25,000) - DInSAR_SRTM

그림 8. 수치지도와 ERS-1/2 간섭쌍의 차분간섭기법으로 산출된 DEM(DInSAR_Digital map(1:25,000))과의 상대 오차분포

명하기 위해 다음과 같은 방법을 이용하였다. SAR의 경사거리 관측에 의해 특징적으로 나타나는 layover 현상은 관측각 이상의 경사를 갖는 전사면에서 발생한다. Layover 지역에서 위상정보는 손실되므로, 이 지역에서 DEM 생성은 불가능할 뿐만 아니라 위상의 불연속을 초래하므로 많은 경우에 있어서 위상 불구속화 단계에서 오차를 발생시킨다. 위상을 불구속화하는 동안 발생하는 위상 오차는 2π 의 배수로 발생하게 되며 따라서 고도 오차는 $h\lambda$ (여기서는 $-90.4m$)의 배수로 나타나게 된다. Layover 지역에서 위상불구속화 오류에 의한 오차가 나타날 경로는 산악지역의 정확도 평가는 네 가지 방법 중 해상도가 10m인 1:25000 수치지도 DEM을 기준으로 종좌표값과 횡좌표값은 같다고 가정할 후 Z값인 고도값의 상대적 차이를 구하였다. 1:25,000 수치지도 DEM은 산악지역에서 수십 이내의 오차를 가지고 있기 때문에 이 DEM과 SAR 자료를 이용하여 생성된 차분간섭도는 산악지역에서 잔여위상이 거의 존재하지 않았다. 따라서 이 차분간섭도의 위상 불구속화에 의한 오류는 없다고 충분히 가정할 수 있다. DEM의 상대적 정확도를 비교해본 결과, 레이더 간섭기법과 GTOPO30 DEM을 이용한 차분간섭기법을 통해 생성된 DEM은 layover 현상이 발생하는 산악지역에서 오차가 발생하였음을 알 수 있다(그림 8(a)의 북동쪽과 서쪽, 8(b)의 서쪽). 그러나 SRTM-3 DEM의 차분간섭기법으로 생성된 DEM(그림 8(c))에서 이러한 오차는 관측되지 않는다. 결론적으로 3초 간격의 SRTM-3 DEM을 이용한 차분간섭기법이 국내와 같은 산악지역에서 SAR 자료를 이용하여 DEM을 제작하는데 매우 효과적인임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 두 개의 SAR 자료만을 이용한 레이더 간섭기법과 두 SAR 자료 및 기존 DEM(GTOPO30, SRTM-3, 1:25,000 수치지도)을 사용하는 2-pass 차분간섭기법을 이용하여 DEM을 생성하였다. 초기 입력 DEM의 다양한 해상도 및 정확도(GTOPO30[해상도: 1km, RMSE: 30.62m], SRTM-3[해상도: 90m, RMSE: 5.49m], [해상도: 10m, RMSE: 21.95m])에 상관없이 12개의 검사점으로 부터 계산된 ERS-1/2 tandem 간섭쌍을 이용하여 생성된 네 가지 DEM의 RMSE는 모두 약 5-6m이었다. 이러한 결과는 SAR 간섭쌍을 이용하여 효과적으로 DEM을

생성할 수 있음을 보여준다.

한편 정확도 평가에 사용된 검사점의 수가 적고, 대부분이 평지 지역에 위치하여 있어, 4가지 방법을 통한 DEM 오차의 차이를 뚜렷하게 보여줄 수 없었다. 산악지역에서의 차이를 관측하기 위해 위상 불구속화 오류가 없을 것으로 가정할 수 있는 1:25,000 수치지도와 ERS-1/2 자료를 이용하여 생성된 DEM을 기준으로 다른 DEM의 상대적 정확도를 비교하였다. 간섭기법과 GTOPO30을 이용하여 생성된 DEM에서는 산악지역에서 위상 불구속화 오류에 의한 DEM 오차가 관측되는 반면 SRTM-3과 ERS-1/2 자료를 사용한 차분간섭기법으로 생성된 DEM은 이러한 오차가 관측되지 않았다. 따라서 레이더 간섭기법보다 2-pass 차분간섭기법을 사용하는 것이 산악지역에선 훨씬 효과적이라 할 수 있다. 경제적으로, 시간적 제약이 많이 따르는 지도 갱신 같은 경우에, 본 연구에서 도출한 방법을 이용한다면 효율적으로 지형, 지물의 변화 탐사와 지도 갱신을 할 수 있을 것으로 본다. 추가적 연구과제로는 산악지역의 정확한 검사점을 이용한 보다 정량적인 정확도 평가 및 다수의 SAR 간섭쌍 중첩을 통해 정밀도를 향상하는 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(과제번호 M1-0302-00-0063)의 지원으로 이루어졌으며, 대한측량협회가 주최한 2004년도 사단법인 한국측량학회 우수논문 현상공모에서 장려상인 대한측량협회회장상을 수상한 논문임을 밝히며 이에 감사를 드린다.

참고문헌

- 김상완, 이효재, 원중선 (2000), SAR Interferometry Phase Unwrapping 비교 분석: Branch. cut, Minimum discontinuity 및 Minimum L norm 방법을 중심으로, 대한원격탐사학회, 춘계 학술대회 논문집, 제3호, pp. 96-101.
- 김상완 (2004), L-밴드 영상레이더 위상간섭기법을 이용한 백두산 및 부산지역의 지표면 변위 관측.
- 윤근원, 김상완, 민경덕, 원중선 (2001), DEM 정밀도 향상을 위한 2-pass DInSAR 방법의 적용, 대한원격탐사학회, 17권, 제 3호, pp. 231-242.
- Gabriel, A. K., and Goldstein (1988), Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B, *Int. J. of Remote sens.*, Vol. 9, No. 5, pp. 857-872.
- Goldstein, R.M., Zebker H.A., and Werner C.L. (1988), Satellite

- radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping, *Radio Sci.*, Vol. 23, pp. 713-720.
- Fazio, M. D., F., Vinelli (1993), DEM reconstruction in SAR Interferometry: Practical experiences with ERS-1 SAR data, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '93. Better Understanding of Earth Environment., International, Vol. 3, pp. 1207-1209.
- Massonnet, D., and K.L. Feigl. (1998), Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Review of Geophysics*, Vol. 36, pp. 441-500.
- Rosen, P. A., S. Hensley, H. A. Zebker, F. H. Webb, and E.J. Fielding (1996), Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. E01, pp. 23109-23125.
- Flynn, T. J. (1997), Two-dimensional Phase Unwrapping with minimum weighted discontinuity, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 14, No. 10, pp. 2692-2701.
- Honikel, M. (1998), Improvement of InSAR DEM Accuracy Using Data and Sensor Fusion, Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, *IGARSS '98. 1998 IEEE International*, Vol. 5, pp. 2348-2350.
- Rufino G., A. Moccia, S. Esposito (1998), DEM Generation by Means of ERS Tandem Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, No. 6, pp. 1905-1912.
- Scharroo, R. and P.N.A.M. Visser (1998), Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, pp. 8113-8127.
- Seymour, M. S. (1999), Refining Low-quality Digital Elevation Models Using Synthetic Aperture Radar Interferometry, Doctoral thesis, the University of British Columbia.

(접수일 2005. 5. 13, 심사일 2005. 5. 23, 심사완료일 2005. 5. 24)