

레이더 간섭기법을 이용한 수치고도모델 해상도 향상에 관한 연구

김창오* · 김상완**,** · 이동천* · 이용욱**** · 김정우†

세종대학교 지구정보공학과*, 연세대학교 지구시스템학과**

Division of Marine Geology and Geophysics, Univ. of Miami, FL, USA***

대한측량협회 측량정보기술연구원 선임연구원****

A Study on the Enhancement of DEM Resolution by Radar Interferometry

Chang-Oh Kim*, Sang-Wan Kim**,**, Dong-Cheon Lee*,
Yong-Wook Lee****, and Jeong Woo Kim†

Dept. of Geoinformation Engineering, Sejong University, Korea*

Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University, Korea**

Division of Marine Geology and Geophysics, Univ. of Miami, FL, USA***

Korean Association of Surveying & Mapping Institute for Geomatics****

Abstract : Digital Elevation Models (DEMs) were generated by ERS-1/2 and JERS-1 SAR interferometry in Daejon area, Korea. The quality of the DEM's was evaluated by the Ground Control Points (GCPs) in city area where GCPs were determined by GPS surveys, while in the mountain area with no GCPs, a 1:25,000 digital map was used. In order to minimize errors due to the inaccurate satellite orbit information and the phase unwrapping procedure, a Differential InSAR (DInSAR) was implemented in addition to the traditional InSAR analysis for DEM generation. In addition, DEMs from GTOPO30, SRTM-3, and 1:25,000 digital map were used for assessment the resolution of the DEM generated from DInSAR. 5-6 meters of elevation errors were found in the flat area regardless of the usage and the resolution of DEM, as a result of InSAR analyzing with a pair of ERS tandem and 6 pairs of JERS-1 interferograms. In the mountain area, however, DInSAR with DEMs from SRTM-3 and the digital map was found to be very effective to reduce errors due to phase unwrapping procedure. Also errors due to low signal-to-noise ratio of radar images and atmospheric effect were attenuated in the DEMs generated from the stacking of 6 pairs of JERS-1. SAR interferometry with multiple pairs of SAR interferogram with low resolution DEM can be effectively used to enhance the resolution of DEM in terms of data processing time and cost.

Key Words : InSAR, DInSAR, Daejon, DEM, Resolution Enhancement.

요약 : ERS-1/2 및 JERS-1 SAR 영상의 레이더 영상 간섭기법을 이용하여 대전지역의 수치고도모델 (DEM)을 제작하였다. 도심지역에서는 GPS 측량으로부터 추출된 지상기준점(GCP)를 이용하여 생성된 DEM의 정밀도를 분석하였고, GCP가 없는 산악지역에서는 1:25,000 수치지도로부터 추출된 DEM과의 상

대적 고도차를 이용하여 정확도를 평가하였다. 위성의 궤도오차 및 phase unwrapping에 의한 고도 오차를 최소화하기 위해 DEM 생성에 이용되는 전통적인 InSAR 기법 외에 DInSAR 기법을 추가로 적용하였다. 또한 DInSAR 기법 적용시 사용된 DEM의 해상도에 따른 결과의 정밀도를 분석하기 위해 GTOPO30, SRTM-3, 그리고 1:25,000 수치지도로부터 생성된 DEM을 사용하였다. 하나의 ERS tandem 간섭쌍과, 6개의 JERS-1 간섭쌍 분석 결과, 위상간섭기법 적용 시 평지 지역에서의 정밀도는 DEM 사용 여부 및 사용된 DEM의 해상도에 무관하게 약 5-6 m의 고도오차를 보인다. 반면 산악지역에서는 SRTM-3 및 1:25,000 수치지도 DEM을 이용한 DInSAR 기법이 phase unwrapping에 의한 오차를 줄이는데 매우 효과적이었다. 또한 6개의 JERS-1 간섭쌍의 중첩을 통해 제작한 DEM의 경우 레이더 영상의 낮은 신호대잡음비 및 대기오차에 의한 오차를 줄일 수 있었다. 다수의 SAR 간섭쌍과 저해상도 DEM을 이용한 위상간섭기법은 저비용으로 빠른 시간 내에 DEM 해상도를 향상하는데 매우 효과적인 수단으로 사용될 수 있다.

1. 서론

동일한 지점에서 촬영된 두 개 이상의 레이더영상(Imaging Radar, SAR)의 위상정보를 이용하여 정밀 지형고도 및 지표면의 변위를 측정하는 간섭기법(Radar Interferometric SAR, InSAR)은 지난 1990년대 이후 급속하게 발전한 마이크로파 원격탐사의 핵심 기술 중의 하나이다. 이는 산란체로부터 반사된 레이더 영역의 파를 수신하여 얻어지는 두 개 이상의 복소수 영상으로부터 위상차를 계산하여 지표의 3차원 정보를 얻는 기술로, DEM 제작 외에 다수의 레이더영상과 수치 고도모델(Digital Elevation Model, DEM)을 이용하여 지표의 변위를 정밀 측정하는데 널리 사용되고 있다(Graham, 1974; Gabriel and Goldstein, 1988; Massonnet and Feigl, 1998).

InSAR를 이용한 DEM 추출에 관한 연구는 1980년대 후반부터 활발하게 이루어져 왔다. SAR 영상은 기상 조건이나 시간대의 제약 없이 취득이 가능하며, 하나의 간섭쌍을 이용하여 넓은 지역(약 100×100km)의 DEM을 빠른 시간 내에 구할 수 있다는 장점이 있다. Gabriel and Goldstein (1988)은 SIR-B 자료에 InSAR 기법을 적용하여 절대고도를 계산하였으며, Rufino *et al.* (1998)은 ERS-1/2 tandem 레이더영상 자료로부터 DEM을 생성하였다. DEM의 정밀도를 향상하는 기법에 관한 연구는 1990년 초반부터 연구가 이루어져 왔는데 여기에는 phase unwrapping(위상 불구속화) 단계에서 낮은 coherence(간밀도)나 신호대잡

음비(S/N ratio)를 가지는 지역을 제외시키는 Fazio *et al.* (1993)의 방법, 지상 기준점을 사용하지 않고 기선 파라미터와 정밀도가 낮은 DEM을 사용하는 Seymour (1999)의 방법, 그리고 InSAR DEM의 layover나 shadowing, temporal decorrelation 등에 의해 오차가 생기는 지역에 대해 SPOT 스테레오 영상을 적용한 Honikel (1998)의 연구 등이 있다.

차분간섭기법(Differential InSAR, DInSAR)을 이용한 DEM 추출에 관한 연구는 정밀도 향상을 위하여 2-pass DInSAR 방법을 적용한 윤근원 외(2001)의 연구가 있는데, 2-pass DInSAR는 두 개의 레이더 영상 자료와 하나의 DEM을 사용하는 방법으로 지형위상 제거 시 phase unwrapping이 필요하지 않다는 장점이 있는 반면(Massonnet *et al.*, 1996) 정밀도가 높은 DEM이 필요하다는 제약이 따른다(Rosen *et al.*, 1996). 하지만 정밀도가 높은 DEM은 한정된 지역에만 존재하고, 이에 따라 높은 정밀도 DEM이 없는 경우 정밀한 지표 변위의 계산에 어려움이 따를 수 있다. 반면에 낮은 정밀도의 DEM을 사용하는 경우 사용된 DEM의 오차가 2-pass DInSAR의 잔여 위상에 존재하는 점을 역으로 이용하여, 정밀도가 낮은 DEM의 고도 오차를 보정함으로써 DEM의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

이 연구에서는 인공위성 레이더 영상자료 및 다양한 해상도의 DEM을 이용하여 대전 및 인근지역(동경 127도 13.2분 - 127도 30분, 북위 36도 13.5분 - 36도 28.2분 사이)의 DEM을 제작 한 후 GPS 측량으로부터 추출한 지상기준점(Ground Control Point, GCP)를

이용하여 정확도를 평가하였다. Fig. 1에서 사각형으로 표시된 부분이 연구지역으로 KOMPSAT-1 및 Landsat 영상을 이용하여 나타내었다. 이 연구에 사용된 레이더 영상자료는 ERS-1/2 tandem pair 및 JERS-1 이며, 저해상 DEM은 GTOPO30, SRTM-3, 및 1:25000 수치지도에서 도출된 자료를 이용하였다. InSAR 및 DInSAR 영상 자료처리는 연세대학교 지구 시스템과학과 원격탐사연구실에서 개발한 소프트웨어인 GeoRadar를 사용하였다.

ERS-1/2 tandem 영상은 1996년 1월 22일에 획득

된 ERS-1 영상 (Fig. 2(a))과 1996년 1월 23일에 획득된 ERS-2 영상 (Fig. 2(b))을 각각 주영상과 부영상자료로 사용하였다. JERS-1 레이더 영상 자료는 1992년 9월부터 1998년 10월 사이에 획득된 영상 중 11개를 사용하였으며, 55개의 간섭쌍을 제작하였고, 기선 (baseline) 간격 및 시간간격을 고려하여 연구에 가장 적합한 6개의 간섭쌍 만을 연구에 이용하였다. 연구에 사용한 간섭쌍의 정보는 Table 1과 같고, Fig. 3에 도시된 영상은 Table 1에서 5번에 해당된다. JERS-1은 ERS에 비해 더 많은 영상을 이용할 수 있을 뿐 만 아니

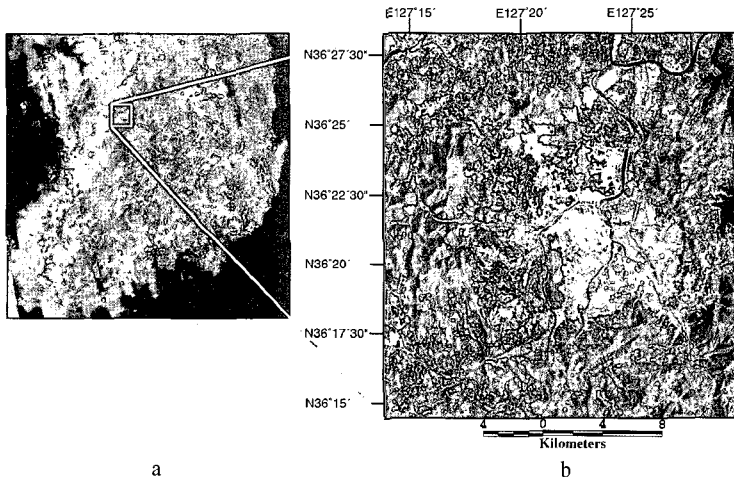


Fig. 1. Location of study area (127°13.2'E - 127°30'E, 36°13.5'N - 36°28.2'N).

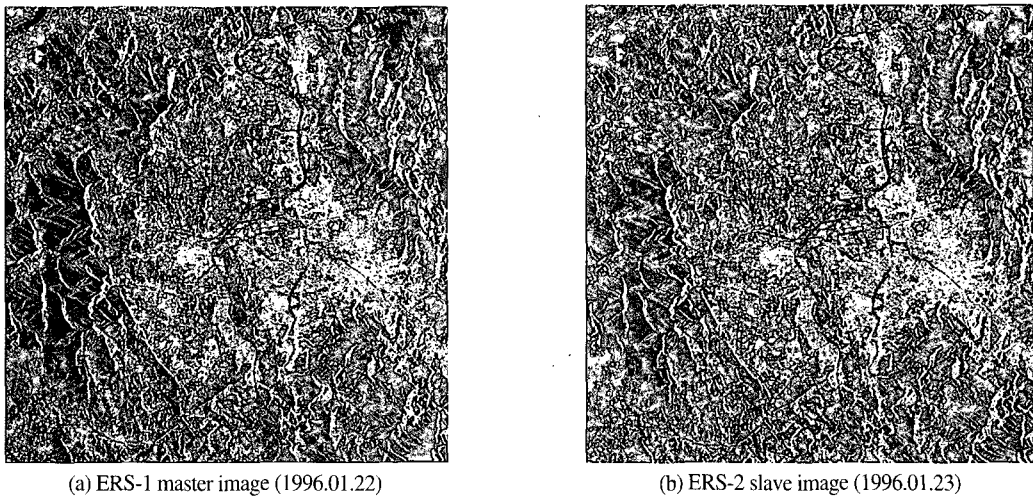
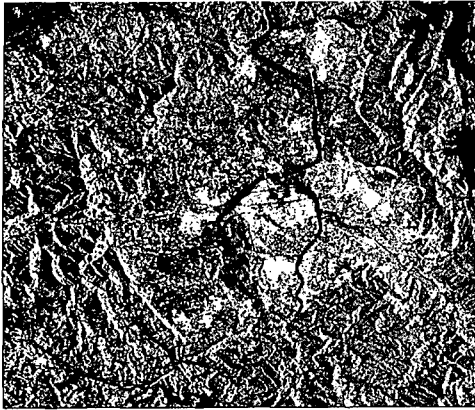
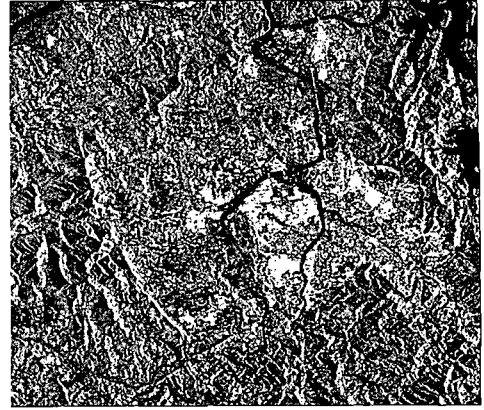


Fig. 2. ERS-1/2 tandem pair images.



(a) JERS-1 master image (98.07.06)



(b) JERS-1 slave image(98.08.19)

Fig. 3. JERS-1 master and slave images.

Table 1. Description of JERS-1 imagery used for SAR interferograms.

No	Master	Slave	Duration	B _⊥ (ha)
1	93-10-24	93-12-07	44	700.39(-79.3)
2	97-01-24	97-04-22	88	409.31(-133.3)
3	98-01-11	98-02-24	44	-785.05(70.2)
4	98-02-24	98-04-09	44	-287.51(194.7)
5	98-07-06	98-08-19	44	872.73(-64.1)
6	98-08-19	98-10-02	44	788.76(-70.9)

* ha: elevation correspond to each fringe, i.e., elevation change correspond to 2π phase shift.

라 L-band를 이용하기 때문에 temporal decorrelation의 영향을 적게 받는 장점이 있다.

2-pass DInSAR를 위해 사용된 DEM은 해상도 1km의 GTOPO30, 우주왕복선 엔더버호에 장착된 두 개의 SAR 안테나로부터 획득된 자료를 이용하여 제작된 해상도 90m의 SRTM-3, 1:25000 수치지도로서 10m 해상도 자료이다. 이 연구에서는 우선 ERS-1/2 영상을 통해 InSAR 기법을 적용하여 DEM을 제작하였고, 또한 위에서 언급한 다양한 해상도의 DEM에 DInSAR 기법을 적용하여 각 DEM에 대해 향상된 DEM을 만들어 정확도를 비교하였으며, 끝으로 SRTM-3 DEM과 JERS-1 영상에 DInSAR 기법을 적용하여 제작한 DEM과 정확도를 비교하였다.

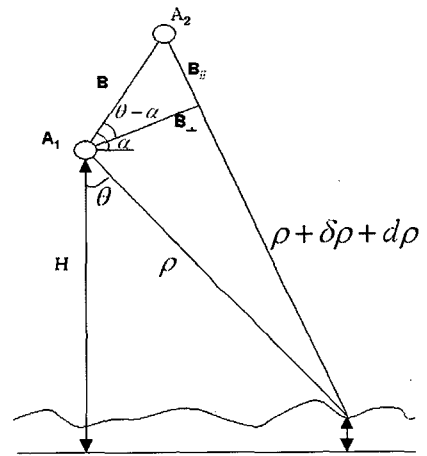


Fig. 4. Geometry of Radar Interferometry.

2. 레이더 간섭기법 이론

InSAR의 자료취득 방법은 안테나의 관측방법에 따라 single-pass와 repeat-pass로 나눌 수 있다. 하나의 비행체에 두 개의 안테나가 장착되어 두 개의 자료를 동시에 얻는 것이 single-pass 방법이고, 동일한 센서를 가지고 있는 두 위성의 서로 다른 비행 (ERS-1, ERS-2) 또는 동일한 위성(ERS-1/2, JERS-1, Radarsat-1 등)의 두 궤도에서 관측한 자료를 이용하는 것을 repeat-pass 방법이라고 한다. InSAR의 일반적인 기하학적 구성은 Fig. 4와 같다.

그림에서 두 개의 서로 다른 안테나에서 지표의 일정

한 점까지의 거리를 각각 ρ 와 $\rho + \delta\rho$ 로 가정하면, 두 안테나의 위상차이는

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

이며, 여기서 λ 는 파장이다. 이때 $\delta\rho$ 는 위성의 궤도에 따라 달라질 수 있으며, 식(1)은 코사인 제 2법칙에 의해

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

로 표현될 수 있으며 B 는 기선의 길이, θ 와 α 는 각각 관측각 및 안테나의 수평인 직선상에서 기선과 이루는 각이다. 식 (2)를 정리하면

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

이 되고, 식 (3)에서 $B \sin(\theta - \alpha)$ 은 기선 거리의 수평성분 ($B_{//}$)이므로

$$\delta\rho \approx -B_{//} + \frac{B^2}{2\rho} \quad (4)$$

로 표시할 수 있고, 식 (4)를 식 (1)에 대입하면 간섭도 (interferogram) 의 위상을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial\phi}{\partial\rho} \approx \frac{4\pi}{\lambda} B_{//} + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B^2}{2\rho} \quad (5)$$

여기서, 거리 ρ 는 일반적으로 기선길이 B 보다 큰 값을 가지므로 $\frac{B^2}{2\rho} \ll 1$ 이 되어 무시될 수 있으므로 다음과 같이 표현된다.

$$\delta\rho \approx -B_{//} \quad (6)$$

실제로 위성의 두 번째 관측 시 정확히 첫 번째 관측과 같은 위치를 갖는 것은 사실상 불가능하다. 다시 말해 실제 지표 변위가 없는 경우라도 관측하는 위성의 위치 차이에 의한 $d\rho$ 가 존재한다. 따라서, 총 변위량은 관측기간 동안 실제 지표의 변위로 인해 생긴 $\delta\rho$ 와 위성의 위치 및 관측 각도에 의해 생긴 $d\rho$ 로 구성되고,

$$d\rho + \delta\rho \approx -B_{//} \quad (7)$$

실제 지표 변위가 없는 지형에 의한 경우만 고려하면, 식 (7)은

$$d\rho \approx -B_{//} \quad (8)$$

이 된다. 간섭도는 지형과 지표 변위에 대한 영향을 모두 가지고 있으므로 지형에 대한 위상을 제거해야 한다. 지형과 관측 각도에 의해 계산되는 합성(synthetic)간

섭도의 위상은

$$\phi_{synthetic} = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\cos^{-1}(\frac{H-Z}{\rho}) - \alpha) \quad (9)$$

이며, 여기서 H 는 위성의 고도, α 는 수평과 기선길이가 이루는 각이다. 이 위상을 간섭도에서 화소대 화소로 제거해 주면 지표의 변위 값만 남게 된다. 간섭도의 위상은 지형의 고도와 변위에 대한 정보를 함께 가지고 있는데, 지형에 대한 민감도는 m 단위로 인지되고, 변위에 대한 민감도는 cm 단위로 인지가 가능하다.

지형에 의해 계산되는 간섭도의 위상을 ϕ_t 라고 할 때 식 (1)과 식 (8)에 의해서

$$\phi_t = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{//} \quad (10)$$

이 된다. 또한 변위를 포함하고 있는 간섭도의 위상을 ϕ_d 라고 하였을 때 지표 변위가 없다면

$$\frac{\phi_d}{\phi_t} = \frac{B_{//d}}{B_{//}} \quad (11)$$

이 된다. 즉, 위상의 비는

기선길이의 수평 성분의 비와 같게 되고, 따라서 변위가 존재할 경우에는 식 (12)와 같이 변위를 포함하고 있는 간섭도에서 지형에 대한 위상을 제거할 수 있다.

$$\phi_d = -\frac{B_{//d}}{B_{//}} \phi_t = -\frac{4\pi}{\lambda} \delta\rho \quad (12)$$

식 (10)을 미분하면

$$d\phi_t = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta - \alpha) d\theta \quad (13)$$

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

$$\frac{d\phi_t}{dZ} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \cos(\theta - \alpha)}{\rho \sin \theta} \quad (14)$$

이다. 식 (14)는 지표면의 고도에 따른 위상의 민감도를 나타낸다(윤근원 외, 2001).

3. 수치고도모델 제작

1) InSAR 기법 적용

Fig. 5는 이 연구에서 수행한 InSAR의 자료처리 과정이다. 원시(raw) 데이터인 JERS-1 레이더영상 자료는 Atlantis사의 SAR 신호처리 소프트웨어 APP를 이용하여 단일복소영상 (Single Look Complex, SLC) 자

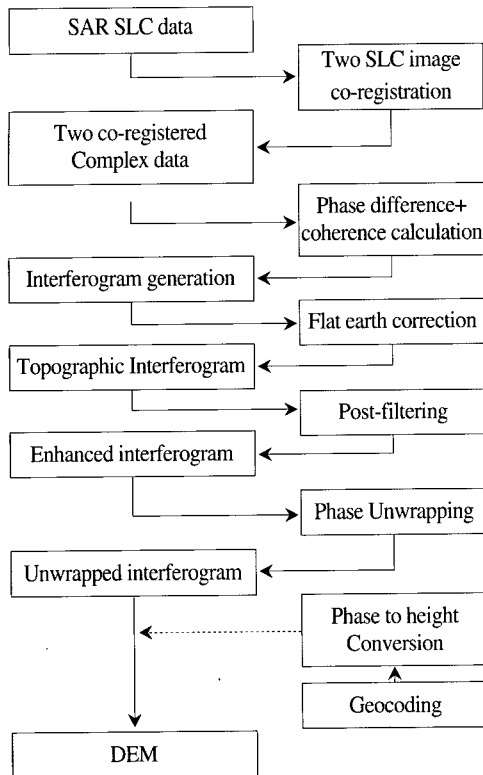


Fig. 5. InSAR Data Processing Flowchart (modified from Gens and Genderen, 1996).

자료 변환되었고, ERS-1/2 tandem 레이더영상 자료는 Eurimage로부터 SLC 형태로 수집되었다. InSAR 기법은 서로 다른 궤도를 지나면서 관측한 레이더 영상 자료를 이용하므로 지표 위의 동일한 산란체가 영상에서 서로 다른 좌표의 화소에 위치하게 된다. 이러한 자료간의 차이를 보정하기 위해서는 두 영상간의 정합(co-registration)이 필요하다. 정합은 크게 진폭상관계수를 이용하는 방법(Kwoh *et al.*, 1994)과 fringe의 명확도를 이용하는 방법(Gabriel and Goldstein, 1988)이 사용된다. 정합 결과를 이용하여 부영상을 재배열(Hanssen and Bamler, 1999) 하면 두개의 영상 레이더 자료의 위상차를 계산함으로써 간섭도를 구할 수 있다. 간섭 위상은 동일한 산란체에 대한 두 영상 자료에서 발생하는 거리 차이와 관련되어 있으며, 기선길이, 지구타원체, 지형고도와 연관되어 있다(Zebker and Goldstein, 1986).

다음 단계로 간섭도의 위상으로부터 지구타원체의

의한 위상을 제거하였다. 지구 곡률에 의한 위상은 지구 타원체 방정식, range 방정식, 도플러 방정식을 이용하여 계산된, 주영상 내의 특정 점에 대응하는 주영상과 부영상의 위성궤도 좌표와 기준 타원체 위에서의 점의 좌표로부터 구하였다(Kampes and Usai, 1999). 실제로 지구타원체에 의한 위상 변화는 매우 선형적이어서, 영상에 분포하는 임의의 점들을 이용하여 지구타원체 위상을 구한 후 2차원 다항식에 최적화하여 영상 전체에서의 위상을 계산하였다. 한편 지구 곡률 위상이 보정된 후의 간섭도에 남아 있는 많은 잡음을 제거하기 위한 후처리 필터링(Carrasco *et al.*, 1996; Goldstein and Werner, 1998)을 통해 레이더 영상에서 특징적으로 나타나는 speckle 노이즈에 의한 위상 오차를 줄였다. 이렇게 후처리 필터링된 Enhanced Interferogram은 phase unwrapping 시 오차 발생을 줄일 수 있다.

다음 단계로 $(-\pi, \pi$ 구간의 값으로 구속화된 간섭도의 위상을 절대 위상값으로 변환하는 과정인 phase unwrapping(Ghiglia and Pritt, 1998; Chen, 2001)을 수행하여 unwrapped 간섭도를 제작하였다. Phase unwrapping에서는 가중된 불연속선의 합을 최소화시키며 영상내의 모든 화소에서 절대 위상을 구할 수 있는 Flynn의 방법(Flynn, 1997)을 사용하였다. 마지막으로, geocoding 단계를 거쳐 DEM을 제작하였다.

2) DInSAR 기법 적용

Fig. 6은 두 개의 SLC 자료와 저해상도 DEM의 2-pass DInSAR기법을 이용한 DEM 제작과정을 나타내는 흐름도이다. 간섭도로부터 초기 지형위상을 제거하기 위해 사용된 DEM의 해상도에 따른 결과를 비교하기 위해, GTOPO30, SRTM-3, 1:25000 수치지도 DEM을 이용하였다. 또한 InSAR 기법과 마찬가지로, 두 영상간의 정합이 필요하고, 정합을 거친 후 부영상을 재배열 하였다. 재배열 후 위상차 계산을 통해 간섭도가 생성되고, 지구 곡률 보정을 하였다.

지구 곡률에 의한 위상은 기존 DEM(GTOPO30, SRTM-3, 1:25000 수치지도 DEM)을 사용하여 모사(simulated) 간섭도를 제작하여 제거하였다. 레이더 영상을 시뮬레이션 하기 위해서는 위성의 영상취득 계수(PRF, 센서의 파장, 첫 번째 azimuth 획득시간, 첫 번

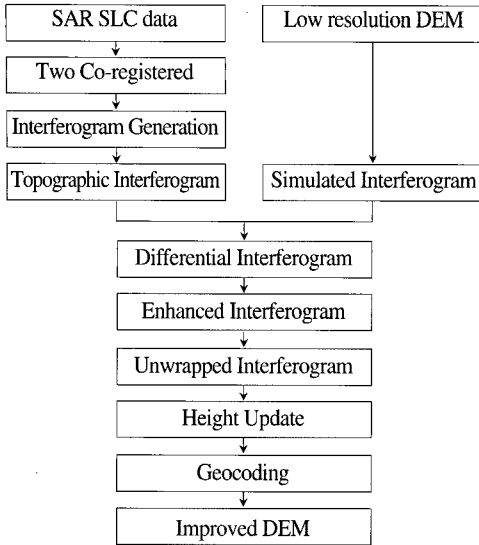


Fig. 6. Data Processing Flowchart for DEM enhancement by 2-pass DInSAR.

째 range 획득시간) 및 궤도정보가 요구되므로 리더파일 등으로부터 해당정보를 추출해야 한다. 시뮬레이션을 위해 레이더 영상으로부터 선택된 지역의 좌표는 지리좌표계로 변환되어 입력된 DEM으로부터 해당 영역을 추출한다. 이때 레이더 좌표계에서 특정한 라인과 픽셀에 대응하는 지리좌표를 구하기 위해서 Doppler, Range, Ellipsoid 등의 세 가지 방식이 사용된다 (Olmsted, 1993; Kampes and Usai, 1999). 추출된 DEM은 실제 레이더 영상의 화소 간격에 충분히 대응될 수 있도록 bilinear, bicubic 등의 방법을 이용하여 내삽 되어야 하며, 내삽된 고도값들은 DEM의 좌표를 이용하여 지구중심 직교 좌표계로 변환되고, 다시 레이더 좌표계로 변환되었다.

차분간섭도는 real 간섭도와 simulated 간섭도 차를 통해 구할 수 있다. InSAR 기법과 마찬가지로 간섭도에 남아 있는 많은 잡음을 제거하기 위한 후처리 필터링을 통해 레이더 영상에서 특징적으로 나타나는 speckle noise에 의한 위상 오차를 줄여 enhanced 간섭도를 제작 하였다. 저해상, 저정밀도의 기존 DEM을 이용하여 제작된 차분간섭도에 남아 있는 위상은 다음 몇 가지 성분의 합으로 표현될 수 있다.

$$\phi_{diff} = \phi_{deformation} + \phi_{DEM_error} + \phi_{atmosphere} + \phi_{noise} \quad (15)$$

연구에서 사용된 간섭쌍은 취득 간격이 짧을 뿐만 아니라 (Table 1 참조), 지표 변위가 발생하지 않는 지역으로 가정할 수 있으므로 지표변위성분 $\phi_{deformation}$ 은 무시할 수 있다. 대기에 의한 위상성분 $\phi_{atmosphere}$ 은 두 레이더 영상의 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 영상의 획득시기의 대기변화에 의한 오차를 포함하게 된다. 동일 지역에 대해 여러 개의 간섭쌍이 이용 가능한 경우, 대기 영향에 의한 위상 성분은 시공간적으로 임의로 분포한다고 가정될 수 있으므로 중첩을 통해 대기 영향을 줄일 수 있다.

이 연구에서는 대기에 의한 위상 성분 및 speckle noise에 의한 위상 오차를 줄이기 위해 6 개의 JERS-1 간섭쌍을 이용하여 각 화소의 긴밀도를 가중치로 하여 평균하는 방법을 사용하여 중첩 하였다. 차분간섭도로부터 지표 변위와 대기에 의한 위상 성분을 제거하면 최종적으로 남아있는 위상은 차분에 사용된 DEM의 오차에 의한 성분만이 남아있게 된다. 잔여 위상을 unwrapping한 후 DEM을 이용하여 모사된 위상값에 unwrapped 위상성분, 즉, DEM 오차에 의한 성분을 더한 후 레이더 좌표계에서의 고도값으로 변환되고, 다시 이 값을 지리좌표계로 변환하여 새로운 DEM을 제작 하였다.

4. 수치고도모델 정확도 분석

Fig. 7은 이 연구에서 제작한 DEM으로, (a)는 ERS-1/2 tandem 자료를 이용하여 제작된 DEM, (b), (c), (d)는 각각 DInSAR를 적용하여 GTOPO30, SRTM-3 및 1:25000 수치지도 DEM을 이용하여 제작한 DEM 이다. 이 연구에서 생성된 DEM은 WGS84 타원체, UTM 좌표체계를 사용했다. 한편 이 연구에서는 ERS 영상에서 GPS측량으로 구한 GCP의 동일지점의 좌표값을 얻기 위해 정사영상을 제작하였다 (Fig. 8). 레이더 좌표계 [azimuth time, range time]인 레이더 영상 또는 DEM을 지리좌표계인 UTM 좌표계로 변환하기 위해서

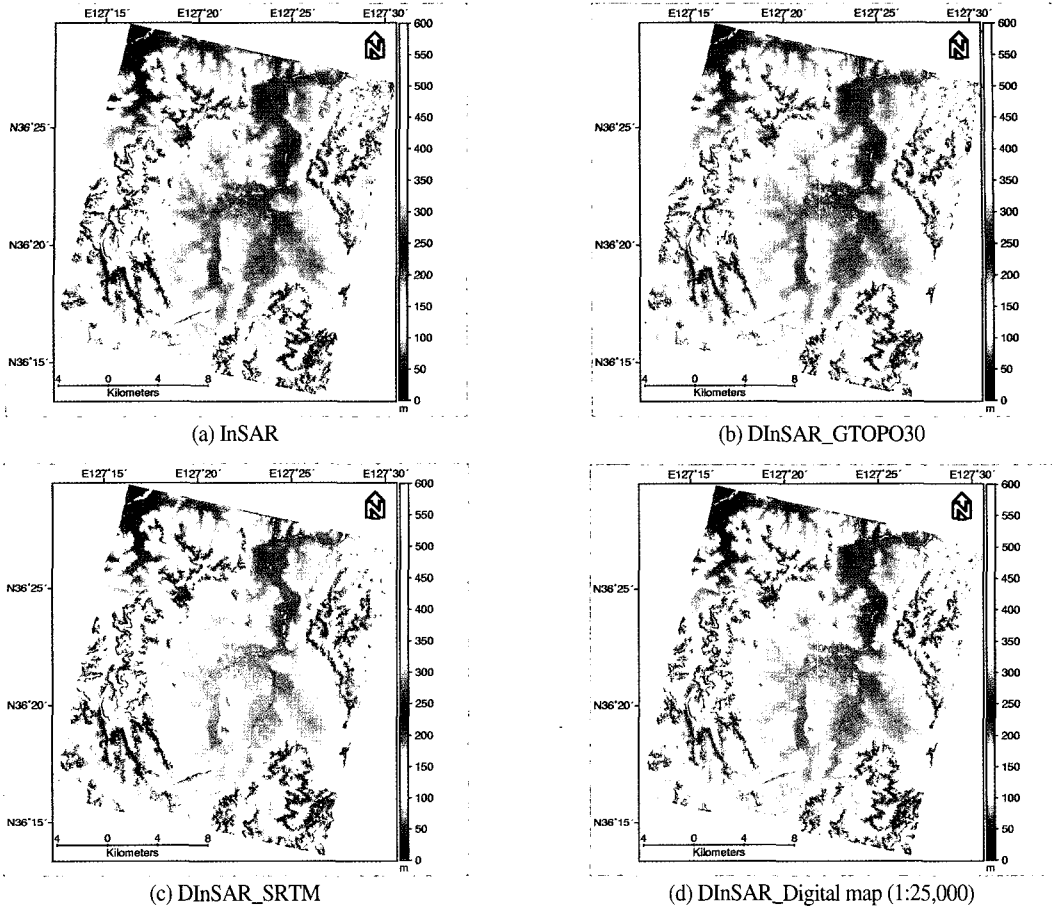


Fig. 7. DEMs generated from Radar Interferometry.

는 영상 내 각 지점의 고도값이 이용되는데, 서로 다른 자료와 방법에 의해 제작된 DEM의 고도값이 일치하지 않기 때문에 서로 다른 네 개의 정사영상을 제작하였다. 한편 이 연구에서 사용한 ERS 영상의 경우 관측각이 약 23°로 매우 작기 때문에 산악지역에서 Layover 현상이 나타나며, 이 때문에 정사영상 내에서 사면의 경사가 급한 곳에는 영상이 심하게 왜곡되어 보인다.

레이더 영상으로부터 제작된 DEM의 정확도 분석을 위해 GPS를 이용하여 측량된 GCP를 사용하였다. 광학 영상과는 달리 레이더 영상은 speckle noise가 나타나기 때문에 정사영상으로부터 GCP 지점을 선택하는데 어려움이 있다. 이 연구에서는 총 52 중 13개의 GCP 지점만이 사용 가능하였으며, 이들의 GCP의 분포는 Fig. 9와 같다.

Table 2는 3차원 UTM 좌표로 GCP 및 ERS tandem 자료를 사용한 InSAR 및 DInSAR로부터 계산된 DEM의 좌표이다. 그리고 GPS 측량성고를 기준으로 각각의 DEM에 대한 종좌표오차, 횡좌표오차 및 고도오차를 계산하여 Table 3 및 Fig. 10에 도시하였다. 결과적으로 GTOPO30의 경우 고도오차가 28.4m에서 5.5m로, 1:25000 수치지도의 경우에는 23.9m에서 5.8m로 향상되었지만 SRTM-3의 경우에는 5.5m에서 5.5m로 변화가 없는데, 이는 GCP 지점이 도심지역에 많이 분포되어 상대적으로 산악지역의 GCP를 비교하지 못해 정밀도가 형성되지 않은 것으로 해석된다.

DInSAR를 이용하여 생성된 DEM은 InSAR에 비해 산악지역에서 나타날 수 있는 layover 현상에 의한 오차와 위성 궤도에 의한 오차를 줄일 수 있다는 장점이

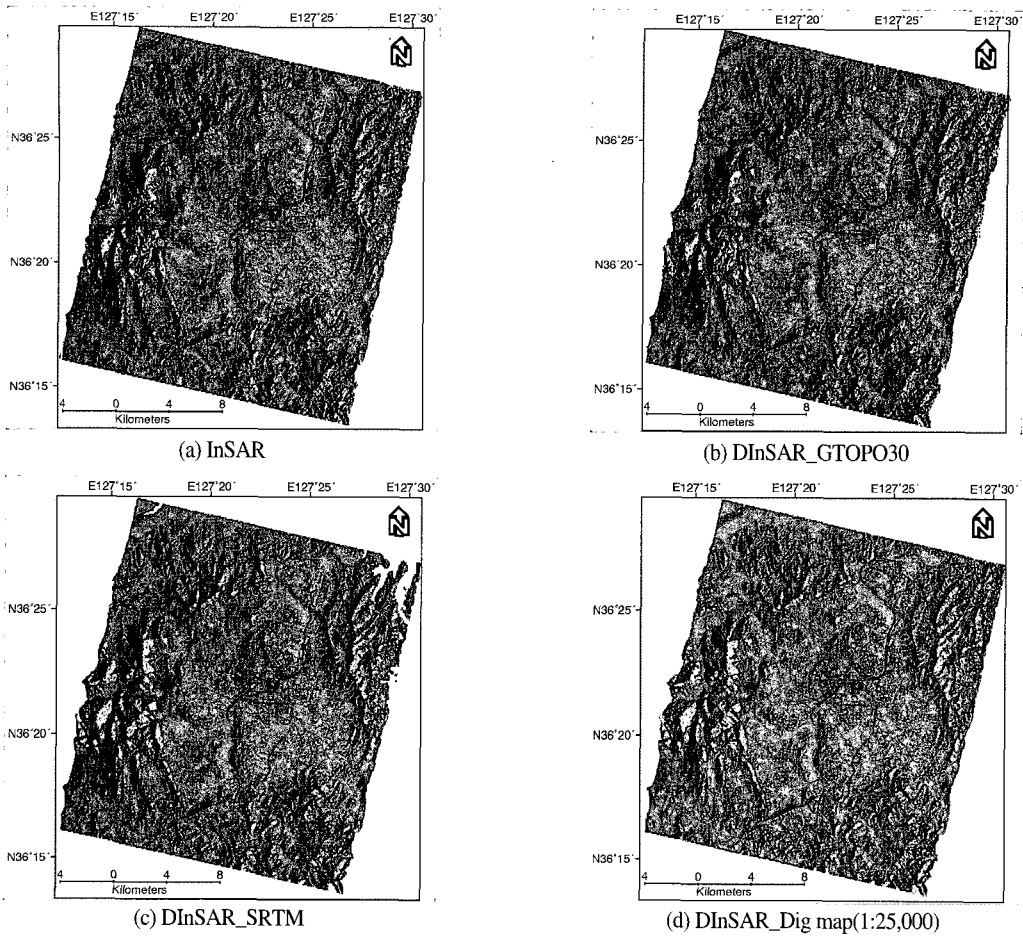


Fig. 8. Ortho-Images.

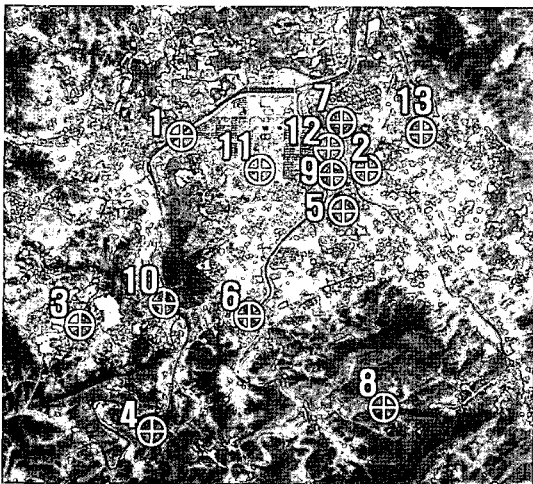


Fig. 9. Distribution of GCPs used for DEM error estimation.

있다. 독일의 Delft 공대에서 제공하는 ERS 위성 궤도는 수 cm의 정밀도를 가지고 있어 (Scharroo and Visser, 1998), 궤도오차에 의한 영향이 적기 때문에 도심지역과 같은 평지에서 계산된 InSAR 및 DInSAR 고도 오차는 유사하다. 이 연구에서는 산악지역에서 발생할 수 있는 phase unwrapping에 의한 DEM 오차 여부를 규명하기 위해, ERS 영상과 해상도가 10m인 1:25000 수치지도를 이용하여 제작된 DEM (Fig. 7(d))을 기준으로 고도값의 상대적인 차이를 구하였다.

Fig. 11은 수치지도를 기준으로 산출된 DEM의 상대 오차분포로 그림에서 청색(+) 및 적색(-)으로 나타난 부분이 오차가 큰 지역이다. 이로부터 GTOPO30과 InSAR를 이용한 DEM이 산악지역에서 phase unwrapping 오차에 의한 고도값의 급격한 변화가 일

Table 2. 3-D coordinate of GCPs.

(UTM, unit: m)

	GCP			InSAR		
	Coordinate		Elevation	Coordinate		Elevation
	Vertical	Horizontal		Vertical	Horizontal	
1	4024983.691	352832.730	68.821	4024969.940	352839.710	80.322
2	4023167.810	359158.105	85.964	4023178.820	359121.900	88.289
3	4018707.535	350331.467	88.766	4018716.050	350284.360	81.922
4	4015005.587	351982.443	122.441	4015020.000	351976.490	119.697
5	4021847.422	357269.304	84.534	4021893.500	357242.200	82.598
6	4020328.323	355019.092	72.113	4020376.690	355042.110	69.066
7	4024119.104	358341.563	80.998	4024096.650	358351.060	79.673
8	4016096.924	358537.874	149.886	4016021.430	358598.580	159.807
9	4023851.290	356876.859	63.344	4023833.960	356885.650	65.069
10	4019890.241	352204.214	76.488	4019838.480	352254.340	65.190
11	4023625.363	355250.930	80.309	4023632.130	355261.400	77.820
12	4024683.080	356920.190	67.118	4024696.630	356921.600	63.440
13	4025080.935	360056.493	107.630	4025085.220	360040.730	114.222

	DInSAR_GTOPO30				DInSAR_SRTM				DInSAR_Digital map(1:25,000)			
	Coordinate		Elevation		Coordinate		Elevation		Coordinate		Elevation	
	Vertical	Horizontal	Original	Enhanced	Vertical	Horizontal	Original	Enhanced	Vertical	Horizontal	Original	Enhanced
1	4024973.310	352792.530	31.093	76.408	4024976.680	352822.860	69.347	72.867	4024974.440	352785.270	40.000	76.145
2	4023167.850	359116.940	44.828	90.020	4023177.510	359126.420	89.017	89.223	4023173.050	359122.000	55.451	90.625
3	4018717.690	350327.480	91.800	81.725	4018738.370	350326.360	93.645	82.030	4018719.300	350294.080	67.927	80.582
4	4015015.160	351986.160	108.644	116.615	4014972.750	351963.940	123.682	119.781	4015024.170	351974.450	93.334	117.262
5	4021841.890	357277.510	49.817	81.895	4021822.020	357275.520	89.566	80.839	4021840.810	357277.510	70.847	82.429
6	4020377.050	355097.370	44.478	69.956	4020372.350	355040.810	75.665	65.940	4020374.870	355041.690	53.162	69.592
7	4024139.350	358382.370	49.624	79.606	4024116.930	358354.850	84.792	75.769	4024116.130	358381.360	59.377	78.750
8	4016021.970	358598.030	155.564	160.010	4016016.260	358610.080	155.597	157.245	4016011.960	358609.750	131.504	161.304
9	4023820.400	356865.160	34.032	63.246	4023830.570	356870.920	65.031	60.999	4023831.340	356874.470	49.466	64.543
10	4019859.480	352250.380	42.368	66.667	4019862.880	352257.260	74.781	64.651	4019863.650	352253.210	50.000	66.969
11	4023616.500	355264.270	46.432	81.046	4023622.950	355268.570	83.693	78.700	4023628.560	355268.570	54.310	80.741
12	4024699.430	356921.600	35.840	61.920	4024694.920	356916.850	67.540	63.570	4024693.830	356921.600	40.000	63.864
13	4025083.290	360040.730	113.678	107.384	4025080.990	360057.030	113.609	103.274	4025085.230	360058.100	80.144	104.179

어나는 반면 (Fig. 11(a), (b)), SRTM-3 DEM과 DInSAR를 이용하면 이러한 현상은 나타나지 않음을 알 수 있다 (Fig. 11(c)). Fig. 11(c)에서 원으로 표시된 부분들이 산악 지역으로, (a)나 (b)에 비해 특히 오차가 적음을 알 수 있다.

또한 이 연구에서는 다양한 간섭쌍의 중첩을 통한 대기영향 및 speckle noise 저감 효과를 알아보기 위해 11개의 JERS-1 SAR 영상을 이용하였다. ERS 단일 간섭

쌍을 이용한 결과와 비교하기 위해서는 동일 지역의 ERS 영상 중첩 결과를 구하는 것이 바람직하나 영상 자료의 수가 매우 제한적이므로 이 연구에서는 ERS에 비해 상대적으로 많은 영상을 활용할 수 있는 JERS-1 영상(Table 4)을 중첩하여 DEM을 제작하였다. 앞선 ERS를 이용한 결과, 즉 단일 간섭쌍과 다양한 해상도 DEM을 이용하여 제작된 DEM의 정확도를 분석한 결과와는 달리 이번에는 중첩에 의한 노이즈 저감 영향을

Table 3. DEM errors estimated from GPS surveys.

(UTM, unit: m)

GCP	INSAR Error			DInSAR_GTOPO30 Error			
	Vert.	Hori.	Elev.	Vert.	Hori.	Elev.	Enh. Elev.
1	13.751	-6.98	-11.501	10.381	40.2	37.728	-7.587
2	-11.01	36.205	-2.325	-0.04	41.165	41.136	-4.056
3	-8.515	47.107	6.844	-10.155	3.987	-3.034	7.041
4	-14.413	5.953	2.744	-9.573	-3.717	13.797	5.826
5	-46.078	27.104	1.936	5.532	-8.206	34.717	2.639
6	-48.367	-23.018	3.047	-48.727	-78.278	27.635	2.157
7	22.454	-9.497	1.325	-20.246	-40.807	31.374	1.392
8	75.494	-60.706	-9.921	74.954	-60.156	-5.678	-10.124
9	17.33	-8.791	-1.725	30.89	11.699	29.312	0.098
10	51.761	-50.126	11.298	30.761	-46.166	34.12	9.821
11	-6.767	-10.47	2.489	8.863	-13.34	33.877	-0.737
12	-13.55	-1.41	3.678	-16.35	-1.41	31.278	5.198
13	-4.285	15.763	-6.592	-2.355	15.763	-6.048	0.246
RMSE	33.379	29.877	6.196	29.072	36.706	28.402	5.531

GCP	DInSAR_SRTM Error				DInSAR_Digital map (1:25,000)Error			
	Vert.	Hori.	SRTM	Elev.	Vert.	Hori.	Elev.	Enh. Elev.
1	7.011	9.87	-0.526	-4.046	9.251	47.46	28.821	-7.324
2	-9.7	31.685	-3.053	-3.259	-5.24	36.105	30.513	-4.661
3	-30.835	5.107	-4.879	6.736	-11.765	37.387	20.839	8.184
4	32.837	18.503	-1.241	2.66	-18.583	7.993	29.107	5.179
5	25.402	-6.216	-5.032	3.695	6.612	-8.206	13.687	2.105
6	-44.027	-21.718	-3.552	6.173	-46.547	-22.598	18.951	2.521
7	2.174	-13.287	-3.794	5.229	2.974	-39.797	21.621	2.248
8	80.664	-72.206	-15.711	-7.359	84.964	-71.876	18.382	-11.418
9	20.72	5.939	-1.687	2.345	19.95	2.389	13.878	-1.199
10	27.361	-53.046	1.707	11.837	26.591	-48.996	26.488	9.519
11	2.413	-17.64	-3.384	1.609	-3.197	-17.64	25.999	-0.432
12	-11.84	3.34	-0.422	3.548	-10.75	-1.41	27.118	3.254
13	-0.055	-0.537	-5.979	4.356	-4.295	-1.607	27.486	3.451
RMSE	31.122	28.477	5.458	5.494	29.462	34.045	23.949	5.752

알아보는 것이 목적이므로 DInSAR를 이용한 DEM을 제작하기 위해서 SRTM-3 DEM 만을 이용하였다. 11 개의 JERS-1 영상으로부터 총 55개의 간섭쌍을 만들었고, 이 중에서 baseline과 시간 간격을 고려해 최적의 간섭쌍 6개를 추출하였다(Table 1 참조). 이들을 이용하여 DEM과 긴밀도, 그리고 multilooked master 영상을 제작하였고, 이로부터 다음과 같이 가중치 평균을 구해 중첩된 DEM을 아래의 수식으로부터 제작하였다.

$$DEM_{stacking}(x, y) = \sum_{i=1}^6 \gamma_i(x, y) DEM_i(x, y) \quad (16)$$

여기서 $\gamma_i(x, y)$ 는 i 번째 간섭쌍의 공간좌표 (X, Y) 점에서의 긴밀도, 그리고 $DEM_i(x, y)$ 는 i 번째 간섭쌍으로부터 계산된 고도값이다. GCP를 이용하여 6개의 JERS-1 간섭쌍 9310/9312, 9701/9704, 9801/9802, 9802/9804, 9807/9808, 9808/9810 으로부터 계산된 고도오차는 각각 8.3m, 9.9m, 9.8m, 20.9m, 7.1m, 그

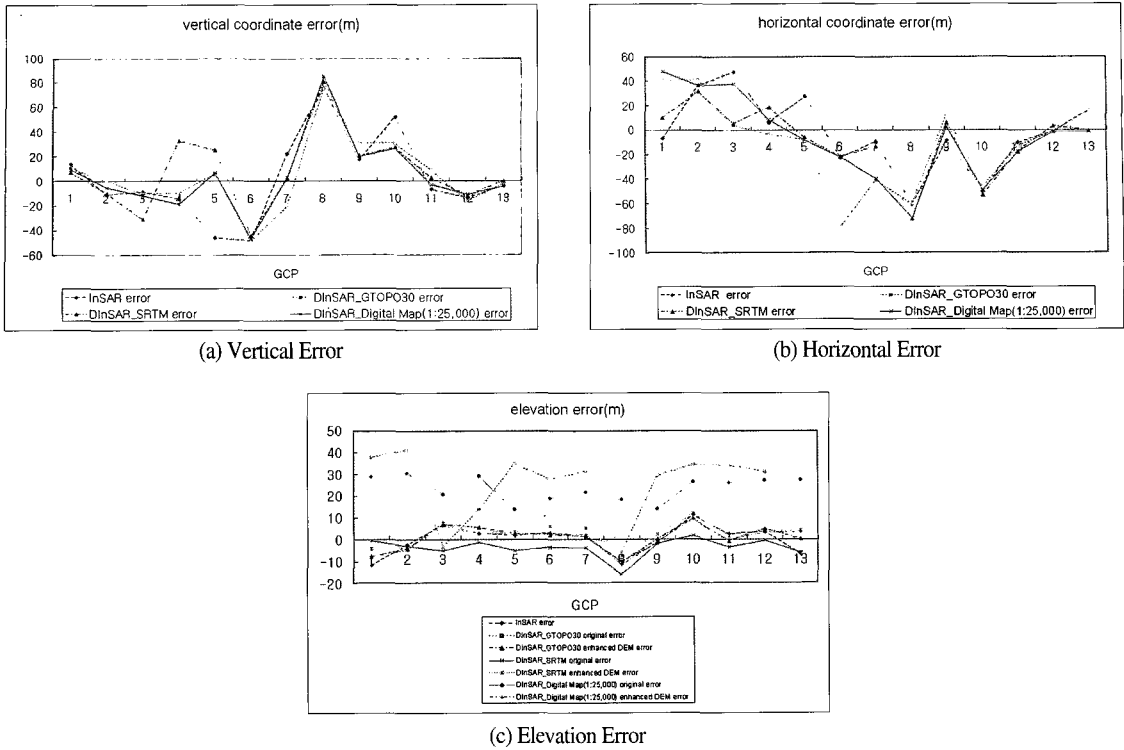


Fig. 10. Vertical, horizontal, and elevation errors.

Table 4. Elevation from GCP survey and JERS-1 image pairs.

(unit: m)

No.	GCP	SRTM	93109312	97019704	98019802	98029804	98079808	98089810	Stacked DEM
1	68.821	70.179	48.447	75.341	-	73.371	75.179	87.481	72.579
2	85.964	88.471	84.133	74.69	90.663	67.134	90.541	105.303	85.447
3	88.766	93.086	91.26	90.029	86.546	69.905	92.358	-	85.169
4	122.441	122.071	119.942	-	112.990	92.167	108.564	134.917	114.375
5	84.534	89.968	78.672	89.549	92.779	65.707	92.494	100.495	86.698
6	72.113	74.120	69.776	79.337	90.766	60.397	79.498	87.774	77.183
7	80.998	82.610	79.175	74.339	87.951	57.996	78.239	106.956	80.894
8	149.886	151.983	146.21	-	-	-	-	163.32	154.602
9	63.344	66.282	-	-	-	-	-	65.783	65.783
10	76.488	77.595	86.017	83.453	95.479	51.375	-	-	78.115
11	80.309	83.874	71.881	59.434	83.776	57.641	88.036	95.274	72.347
12	67.118	67.770	56.306	76.987	68.447	51.638	69.116	68.63	68.024
13	107.63	112.836	-	-	106.094	80.208	-	-	94.360

:- null (no values due to low coherence)

리고 15.7m 이다 (Fig. 12, Table 5). JERS-1 간섭쌍의 경우 시간간격이 최소 44일로 ERS tandem 영상 (1일) 보다 길어 temporal decorrelation 영향에 의해 ERS

결과보다 높은 오차를 보이고 있다 (Table 3 및 5 참조). 그럼에도 불구하고 식 (16)을 이용하여 JERS-1 간섭쌍 6개를 중첩한 DEM의 고도 오차는 5.5m로 단일 간섭쌍

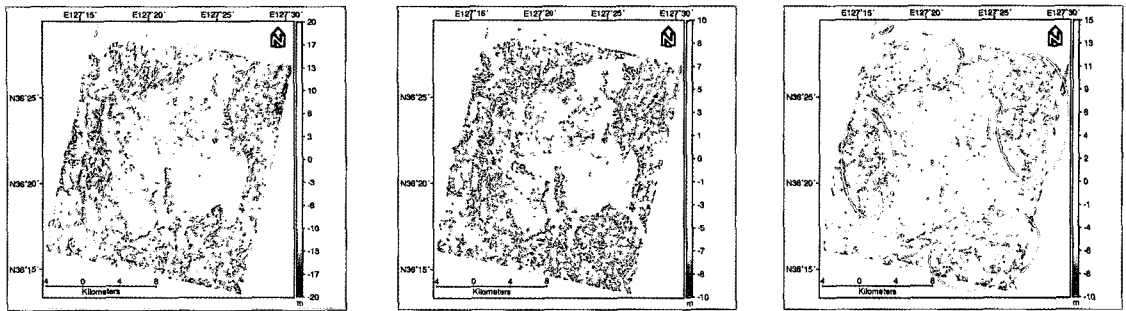


Fig. 11. Relative error distribution of DEM from low-resolution DEMs. (a) DInSAR_Digital map (1:25,000) and InSAR images, (b) DInSAR_Digital map(1:25,000) and DInSAR_GTOPO30, and (c) DInSAR_Digital map (1:25,000) and DInSAR_SRTM

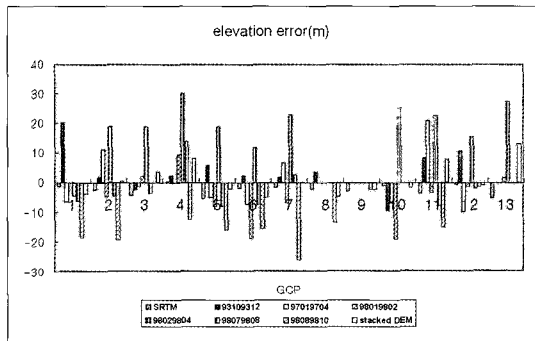


Fig. 12. DEM errors (JERS-1 images).

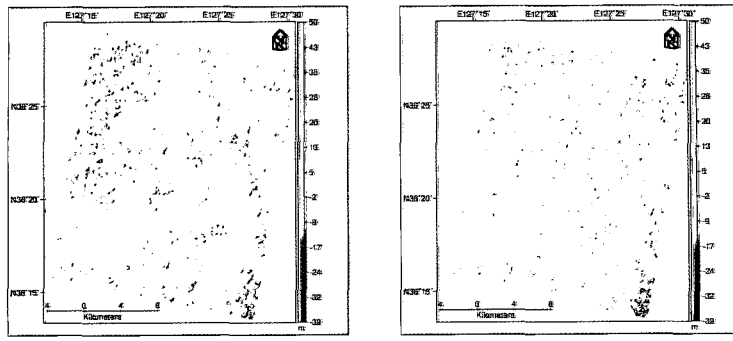
간섭쌍의 결과 보다 정밀도가 향상되었음을 알 수 있다. Fig. 13은 SRTM-3 DEM과 JERS-1으로부터 추출된 각 DEM의 차이로 SRTM-3 DEM 오차 또는 대기영향에 의해 발생한 고도차이를 보여준다. 즉 Fig. 13 (b)-(g)의 고도차는 입력 DEM 오차와 대기영향, 그리고 위상노이즈를 포함하며, Fig. 13 (a)는 중첩을 통해 대기영향과 위상 노이즈가 저감되고 DEM 오차만이 표현된 것으로 간주 될 수 있다.

Table 5. JERS-1 DEM errors estimated from GCP survey.

(UTM, unit: m)

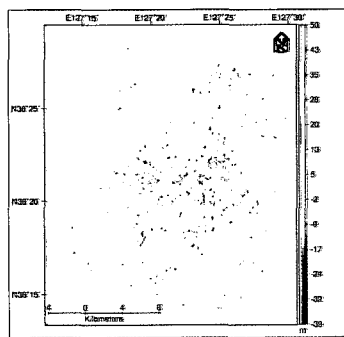
GCP	SRTM	93109312	97019704	98019802	98029804	98079808	98089810	Stacked DEM
1	-1.358	20.374	-6.52	-	-4.55	-6.358	-18.66	-3.758
2	-2.507	1.831	11.274	-4.699	18.83	-4.577	-19.339	0.517
3	-4.32	-2.494	-1.263	2.220	18.861	-3.592	-	3.597
4	0.37	2.499	-	9.451	30.274	13.877	-12.476	8.066
5	-5.434	5.862	-5.015	-8.245	18.827	-7.960	-15.961	-2.164
6	-2.007	2.337	-7.224	-18.653	11.716	-7.385	-15.661	-5.070
7	-1.612	1.823	6.659	-6.953	23.002	2.759	-25.958	0.104
8	-2.097	3.676	-	-	-	-	-13.434	-4.716
9	-2.938	-	-	-	-	-	-2.439	-2.439
10	-1.107	-9.529	-6.965	-18.991	25.113	-	-	-1.627
11	-3.565	8.428	20.875	-3.467	22.668	-7.727	-14.965	7.962
12	-0.652	10.812	-9.869	-1.329	15.48	-1.998	-1.512	-0.906
13	-5.206	-	-	1.536	27.422	-	-	13.270
RMSE	3.007	8.347	9.858	9.785	20.899	7.118	15.698	5.505

- : null (no values due to low coherence)

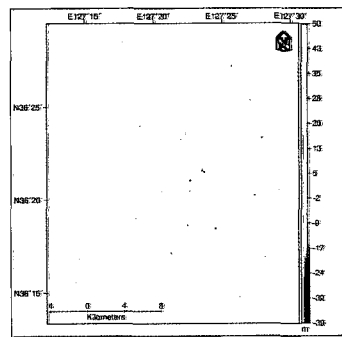


(a) SRTM-3 and stacking DEM

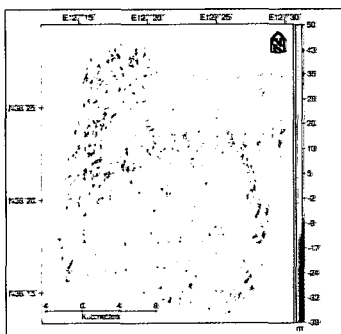
(b) SRTM-3 and 93109312 pair



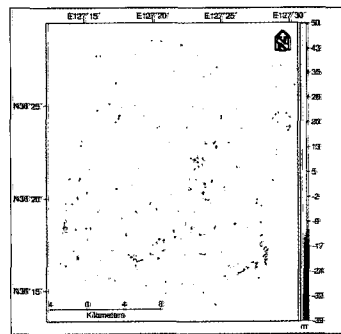
(c) SRTM-3 and 97019704 pair



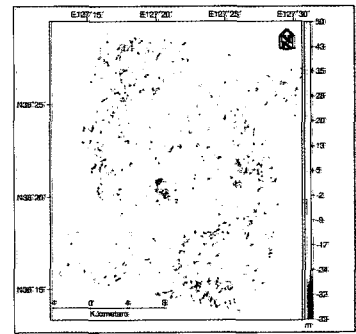
(d) SRTM-3 and 98019802 pair



(e) SRTM-3 and 98029804 pair



(f) SRTM-3 and 98079808 pair



(g) SRTM-3 and 98089810 pair

Fig. 13. Relative error distribution of DEM from SRTM-3.

5. 결론

이 연구에서는 레이더 영상의 InSAR 기법과 2-pass DInSAR 기법을 이용하여 대전 지역의 DEM을 제작하고 정밀도를 분석하였다. DInSAR 기법 적용 시 사용된 초기 입력 DEM 해상도에 따른 결과의 정밀도를 비교하기 위해 GTOPO30 (약 1km), SRTM-3 (약 90m), 그리고 1:25000 수치지도 DEM (10m)을 사용하였다.

대전 도심지역내에 분포하는 GCP를 이용하여 계산

된 입력 DEM의 평균 고도오차는 28m (GTOPO30), 5m (SRTM-3), 24m (1:25,000 수치지도)로 GTOPO30과 1:25000 수치지도 DEM은 매우 큰 오차를 보였다. ERS-1/2 tandem 간섭쌍과 세 가지 DEM을 이용하여 생성된 4개 DEM의 오차는 약 5-6m로 레이더 영상으로부터 효과적으로 DEM의 해상도를 향상시킬 수 있었다. GCP 지점이 분포하지 않은 산악지역에서 DEM의 사용 여부와 사용된 DEM의 해상도에 따른 결과를 비교하기 위해, 산악지역에서 가장 정밀한 고

도값을 보여줄 것으로 판단되는 1:25000 수치지도와의 상대적 고도차이를 구하였다. 그 결과 InSAR 기법과 GTOPO30을 이용한 DInSAR 방법에서는 산악지역에서 phase unwrapping에 기인한 수십-수백 m 정도의 오차가 발생하는 반면 SRTM-3과 1:25,000 수치지도를 이용한 DInSAR DEM에서 그러한 오차는 전혀 발생하지 않았다. 이로부터 위상간섭기법 적용 시 평지 지역에서의 정밀도는 DEM의 사용여부와 사용된 DEM의 해상도에 무관하지만, 산악지역에서는 InSAR 보다 DInSAR 기법을 적용하는 것이 phase unwrapping 오차를 줄이는데 효과적임을 알 수 있다. 또한 6개의 JERS-1 간섭쌍의 중첩을 통해 제작한 DEM의 경우 레이다 영상의 신호대잡음비 및 대기에 의한 오차를 줄일 수 있었다. 각 JERS-1 간섭쌍은 7-21 m의 고도오차를 갖는 반면, 긴밀도를 가중치로 하여 평균한 DEM은 약 6m의 고도오차를 보였다.

지상 및 항공측량에 의한 수치고도모델의 갱신은 경제적으로나 시간적으로 많은 제약이 따른다. 다수의 SAR 간섭쌍과 SRTM-3 DEM을 이용하면 저비용으로 빠른 시간 내에 효과적으로 DEM을 갱신 할 수 있다.

사 사

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업 (과제번호 M1-0302-00-0063)의 지원으로 이루어졌음을 밝힌다.

참고문헌

윤근원, 김상완, 민경덕, 원중선, 2001. DEM 정밀도 향상을 위한 2-pass DInSAR 방법의 적용, 대한원격탐사학회지, 17(3): 231-242.

Carrasco, D., S. Sanz, R. Sousa, and A. Broquetas, 1996. The Developing of a Wide Area Interferometric Processor, *Proc. FRINGE 96 Workshop*, Zurich, Switzerland, pp. 93-201.

Chen, C. W., 2001. *Statistical-Cost Network-Flow Approaches to Two-Dimensional phase unwrapping for radar interferometry*, Stanford University, Ph.D. Dissertation.

Fazio, M. D. and F. Vinelli, 1993. DEM reconstruction in SAR Interferometry: Practical experiences with ERS-1 SAR data, *Proc. IGARSS '93 - Better Understanding of Earth Environment*, pp.1207-1209.

Flynn, T. J., 1997. Two-dimensional Phase Unwrapping with minimum weighted discontinuity, *J. Opt. Soc. Am.*, 14(10): 2692-2701.

Gabriel, A. K. and R. M. Goldstein, 1988. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B, *Int. J. of Remote Sensing*, 9(5): 857-872.

Ghiglia, D. C. and M. D. Pritt, 1998. *Two-dimensional phase unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*, Wiley, New York.

Goldstein, R. M. and C. Werner, 1998. Radar interferogram filtering for geophysical application, *Geophys. Res. Letters*, 25(21): 4035-4038.

Graham, L. C., 1974. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, *Proc. IEEE*, 62(6): 63-768.

Hanssen, R. and R. Bamler, 1999. Evaluation of Interpolation Kernels for SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1): 318-321.

Honikel, M., 1998. Improvement of InSAR DEM Accuracy Using Data and Sensor Fusion, *Proc. IGARSS '98*, pp.2348-2350.

Kampes, B. and S. Usai, 1999. Doris : The Delft object-oriented Radar Interferometric software, *Proc. ITC 2nd ORS symposium*, ITC, Enschede, The Netherlands.

Kwong, L. K., E. C. Chang, W. C. A. Heng, and H.

- Lim, 1994. DTM generation from 35-days repeat pass ERS-1 interferometry, *Proc. IGARSS '94*, pp. 2288-2290.
- Massonnet, D. and K. L. Feigl, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Review of Geophysics*, 36: 441-500.
- Massonnet, D., H. Vadon, and M. Rossi, 1996. Reduction of need for Phase Unwrapping in Radar Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2): 489-497.
- Olmsted, C., 1993. Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide, pp. 17-32.
- 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, *J. Geophys. Res.*, 101(E01): 23109-23125.
- Rufino, G., A. Moccia, and S. Esposito, 1998. DEM Generation by Means of ERS Tandem Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(6): 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.*, 103: 8113-8127.
- Seymour, M. S., 1999. *Refining Low-quality Digital Elevation Models Using Synthetic Aperture Radar Interferometry*, Doctoral thesis, the University of British Columbia.
- Zebker, H. A. and M. Goldstein, 1986. Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations, *J. Geophys. Res.*, 91: 4993-4999.