

## DEM 정밀도 향상을 위한 2-pass DInSAR 방법의 적용

윤근원 · 김상완 · 민경덕 · 원중선

연세대학교 지구시스템과학과

### Application of 2-pass DInSAR to Improve DEM Precision

Geun-Won Yoon, Sang-Wan Kim, Kyung-Duck Min, and Joong-Sun Won

Department of Earth System Sciences, Yonsei University

**Abstract :** In 2-pass differential SAR interferometry(DInSAR), the topographic phase signature can be removed by using a digital elevation model(DEM) to isolate the contribution of deformation from interferometric phase. This method has an advantage of no unwrapping process, but applicability is limited by precision of the DEM used. The residual phase in 2-pass differential interferogram accounts for error of DEM used in the processing provided that no actual deformation exists. The objective of this paper is a preliminary study to improve DEM precision using low precision DEM and 2-pass DInSAR technique, and we applied the 2-pass DInSAR technique to Asan area.

ERS-1/2 tandem complex images and DTED level 0 DEM were used for DInSAR, and the precision of resulting DEM was estimated by a 1:25,000 digital map. The input DEM can be improved by simply adding the DInSAR output to the original low precision DEM. The absolute altitude error of the improved DEM is 9.7 m, which is about the half to that of the original DTED level 0 data. And absolute altitude error of the improved DEM is better than that from InSAR technique, 15.8 m. This approach has an advantage over the InSAR technique in efficiently reducing layover effects over steep slope region. This study demonstrates that 2-pass DInSAR can also be used to improve DEM precision.

**Key Words :** 2-pass DInSAR, DEM, Precision Improvement

**요약 :** 2-pass Differential Interferometry(DInSAR)에서는 digital elevation model(DEM)을 이용하여 interferogram에서 지형의 위상을 제거함으로써 지형과 변위에 대한 두 가지의 위상 효과를 분리한다. 이 방법은 phase unwrapping 단계가 필요 없다는 장점이 있는 반면에 사용되는 DEM의 정밀도가 높아야 한다는 제약이 있다. 2-pass DInSAR를 이용하여 미세한 지각 변위의 인지가 가능하다. 두 SAR 자료의 관측 기간 중 변위가 없는 경우에는 잔여 위상은 사용된 DEM의 오차를 반영한다. 따라서, 본 연구에서는 DEM의 정밀도를 향상시키기 위해 낮은 정밀도의 DEM을 사용하는 방법에 대한 기초 연구로써 아산만 지역에 2-pass DInSAR 방법을 시험 적용하였다.

ERS 1/2 tandem SAR 자료와 DInSAR 계산을 위해 DTED level 0을 사용하였으며, 얻어진 결과의

정밀도 분석을 1:25,000 수치지도와 비교하였다. 생성된 DEM의 절대 고도 오차 평균은 9.7 m이며, 이는 일반적인 InSAR 방법에 의해 얻어진 DEM의 절대 고도 오차 평균 15.8 m와 DTED level 0의 절대 고도 오차 평균 18.1 m보다 향상된 결과를 보였다. 이 방법은 사면의 경사도가 높은 경우 InSAR에서 나타나는 layover 영향을 효과적으로 줄일 수 있다. 즉, DInSAR 방법은 지각의 변위 관측뿐만 아니라 지형 고도 자료가 부족한 지역에서 정밀도를 향상시키는데 활용될 수 있음을 보여주고 있다.

## 1. 서론

SAR(Synthetic Aperture Radar)는 마이크로파 영역의 신호를 안테나에서 송신하여 산란체로부터 반사된 파를 수신하기 때문에 지표면의 형태적, 물리적 특성에 민감하다. 또한, SAR 자료는 반사 신호의 진폭뿐만 아니라 안테나와 산란체간의 거리를 나타내는 위상 정보를 제공한다. 동일한 산란체로부터 다른 위치에서 획득된 두 SAR 자료간의 위상차를 이용하는 방법을 radar SAR interferometry(InSAR)라 한다. 또한, 여러 개의 SAR 자료를 이용하여 지표의 변위량을 정밀하게 측정할 수 있는데, 이를 differential SAR interferometry(DInSAR)라고 한다. DInSAR의 기본 개념은 interferogram에서 지형의 위상을 제거함으로써 변위에 대한 위상 효과를 분리하는 것이다. 지형에 대한 위상은 기존의 정밀 지형 자료나 또 다른 interferogram을 사용하여 계산된다. DInSAR는 SEASAT 자료를 사용한 Gabriel(1989)에 의해 처음 소개되었으며, DInSAR의 2-pass 방법은 Massonnet *et al.*(1993)에 의해 발전되었고, 3-pass 나 4-pass 방법은 Gabriel(1989)이 처음 제안하였으며 Zebker(1994)등에 의해 발전되었다. DInSAR는 미국 서부 지진의 변위 측정(Massonnet *et al.*, 1993), 아테네 지진의 변위 측정(Kontoes *et al.*, 2000), 현장 자료를 함께 이용한 화산 지역의 지진 연구(Kobayashi *et al.*, 1999), 일본 Izu 반도의 지각 변위(Fujiwara *et al.*, 1998)와 지반 침하, 빙하 관측 등 많은 분야에 널리 활용되고 있다.

또한, InSAR를 이용한 DEM 추출에 관한 연구는 Gabriel과 Goldstein(1988)이 radar interferometry

를 이용하여 SIR-B 자료로 절대고도를 계산하였으며, Rufino *et al.*(1998)은 ERS 1/2 tandem SAR 자료로부터 DEM을 생성하였다. DEM 정밀도 향상 기법은 phase unwrapping 단계에서 낮은 coherence나 신호대 잡음비를 가지는 지역을 제외시키는 방법(Fazio *et al.*, 1993), 지상기준점을 사용하지 않고 baseline 파라미터와 정밀도가 낮은 DEM을 사용하는 방법(Seymour, 1999), SAR 영상으로 생성되어지는 InSAR DEM의 layover나 shadowing, temporal decorrelation 등에 의해 오차가 생기는 지역에 대해 SPOT 스테레오 영상을 사용하는 방법(Honikel, 1998) 등이 있다.

2-pass DInSAR는 2개의 SAR 자료와 하나의 DEM을 사용하는 방법으로 phase unwrapping이 필요하지 않다는 장점이 있는 반면(Massonnet *et al.*, 1996) 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 DInSAR의 잔여 위상에 존재하는 점을 역으로 이용하여, 정밀도가 낮은 DEM의 고도오차를 보정함으로써 DEM의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 본 연구의 목적은 2-pass DInSAR를 적용하여 정밀도는 낮으나 쉽게 구할 수 있는 DTED level 0의 정밀도를 높이기 위한 기초 연구를 수행하는 것으로 아산만 지역에 시험 적용을 하였다. 이 방법은 특히 지형에 의한 위상을 우선 제거함으로써 경사가 심한 사면에서 흔히 발생하는 오차를 줄이고 foreshortening과 layover 영향을

최소화 할 수 있다는 장점이 있다.

## 2. 기초 이론

관측기간 동안에 주시 방향(line-of-sight)으로  $\delta\rho$ 만큼 변위를 가지는 두 개의 안테나와 산란체의 거리를 각각  $\rho$ 와  $\rho+\delta\rho$ 라하고 파장을  $\lambda$ 라 하면, 위상차  $\phi$ 는

$$\phi = -(4\pi/\lambda)\delta\rho \quad (1)$$

가 된다. 하지만, Fig. 1과 같이 위성이 실제로 두 번째 관측 시 정확히 첫 번째 관측과 같은 위치를 갖는 것은 어렵다. 즉, 실제로 지표 변위가 없어도 관측 위치의 차이에 의한  $d\rho$ 가 존재한다. 따라서, 총 변위량은 관측기간 동안의 실제로 지표의 변위로 인해 생긴  $\delta\rho$ 와 위성의 위치와 보는 각도에 의해 생긴  $d\rho$ 로 구성된다. 총 변위량  $d\rho+\delta\rho$ 는 코사 인법칙에 의해 다음과 같이 된다.

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

식 (2)에서  $(d\rho+\delta\rho)^2 \ll \rho^2$ 이므로  $2\rho$ 로 나누어주

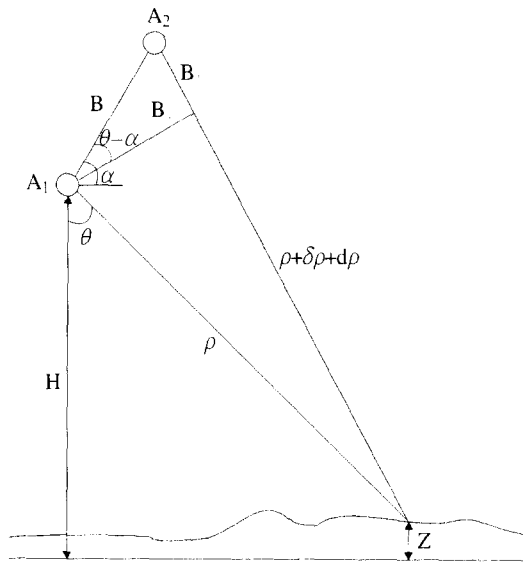


Fig. 1. Imaging geometry for 2-pass DInSAR.

고  $(d\rho+\delta\rho)^2$ 의 차수에 대한 항을 무시하면,

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

거리  $\rho$ 는 일반적으로 baseline  $B$ 보다 매우 큰 값이므로

$$d\rho+\delta\rho \approx -B\sin(\theta-\alpha) \quad (4)$$

실제 지표 변위가 없는 지형에 의한 경우만 고려하면,

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

가 된다. Interferogram은 지형과 지표 변위에 대한 영향을 모두 가지고 있으므로 지형에 대한 위상을 제거해야 한다. 이를 위해 DEM을 이용하여 지형에 대한 위상을 제거해줄 수 있다. 지형과 보는 각도에 의해 계산되는 synthetic interferogram의 위상은 다음과 같다.

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

$H$ 는 위성의 고도이며  $\alpha$ 는 수평과 baseline이 이루는 각이다. 이 위상을 interferogram에서 화소대 화소로 빼주면 변위의 값만 남게 된다. Interferogram의 위상은 지형과 변위에 대한 정보를 함께 가지고 있는데, 지형에 대한 민감도는 미터 단위로 인지가 가능하지만, 변위에 대한 민감도는 센티미터 단위로 인지가 가능하다. 지형의 변위가 존재하지 않고 지형에 의해서만 계산되는 interferogram의 위상을  $\phi_i$ 라고 한다면 식 (1)과 (5)에 의해서

$$\phi_i = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel i} \quad (7)$$

이 된다. 또한, 변위를 포함하고 있는 interferogram의 위상을  $\phi_d$ 라고 하였을 때 지표의 변위가 없다면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\frac{\phi_d}{\phi_i} = \frac{B_{\parallel d}}{B_{\parallel i}} \quad (8)$$

즉, 위상의 비는 baseline의 수평 성분의 비와 같게 된다. 따라서, 변위가 존재할 경우에는 식 (9)와 같이 변위를 포함하고 있는 interferogram에서 지형에 대한 위상을 제거할 수 있다.

$$\phi_d = -\frac{B_{\text{slr}}}{B_{\text{tr}}} \phi_t = -\frac{4\pi}{\lambda} \delta\rho \quad (9)$$

식 (7)을 미분을 하면

$$d\phi_t = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta - \alpha) d\theta \quad (10)$$

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

$$\frac{d\phi_t}{dZ} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \cos(\theta - \alpha) d\theta}{\rho \sin\theta} \quad (11)$$

이 된다. 식 (11)은 지표면의 고도에 따른 위상의 민감도를 나타내는 식이다. 이와 유사하게 변위에 대한 위상차 변화율은 식 (9)로부터

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

이 된다. 식 (11)의  $\rho$ 가  $B$ 보다 매우 크기 때문에 식 (12)의 변위에 대한 경우가 식 (11)의 지형의 경우보다 민감도가 훨씬 크다. Zebker(2000)에 의하면 어느 지역의 ERS의 경우 동일한 영상에서 1 m의 지형에 대해서는  $4.3^\circ$ 의 위상을 보이지만, 1 m의 변위에 대해서는  $12800^\circ$ 의 위상을 보여 약 3,000배가 더 민감함을 나타냈다. 따라서, 변위에 대해서는 센티미터 또는 밀리미터까지 측정이 가능하다(Zebker et al., 2000). 본 연구에서는 변위에 대한 위상보다는 지형 고도에 대한 위상을 연구하였기 때문에 변위 발생 경우와 같은 센티미터 단위의 민감도를 기대할 수 없다. 그러나, 입력하는 DEM과 실제 얻어진 interferogram의 위상차를 계산하여 지형 고도를 보정한다는 점에서 InSAR에서 얻어진 지형 고도보다 정밀한 값을 얻을 수 있음을 쉽게 예상할 수 있다.

### 3. 자료 및 연구 방법

#### 1) 위성 자료 및 DEM

본 연구의 시험 적용을 위해 1995년 12월 21일에 획득된 ERS-1 영상과 1995년 12월 22일에 획득된 ERS-2 영상을 각각 주영상과 부영상자료로 사용하였다. 사용된 SAR 자료는 single-look complex(SLC) 자료로 독일의 D-PAF에서 수신 후 신호 처리된 것으로 CEOS(Committee on Earth Observation System) 형식으로 저장되어 있다. 2-pass DInSAR를 위한 입력 DEM으로는 NIMA(National Imagery and Mapping Agency)에서 제공하는 DTED level 0를 사용하였으며, 결과에 대한 정밀도 검증은 국립지리원에서 발간한 1:25,000 수치지도를 사용하였다. 1:25,000 수치지도는 총 16개를 이용하였으며 수치도화시 최대 오차 범위는 평면 위치는 10.0 m, 등고선은 5.0 m, 표고점은 2.5 m이다. 그러므로, 1:25,000 지형도가 갖는 전체 오차는 수치도화 오차를 포함하면 이보다 커진다. 또한, 항공 사진의 촬영 년도는 북위  $37^\circ$ 를 기준으로 위의 지역은 총 8개 중 7개가 1995년이며, 아래 지역은 8개 모두 1991년이다. 수치지도의 등고 레이어를 추출 후에 격자화를 하였으며 TM 좌표계로 되어 있는 1:25,000 수치지도를 DTED level 0의 좌표계와 동일하게 위경도 좌표계로 바꾸어 주었다. 위도와 경도의 화소 간격은 약 0.9677초 간격으로 재배열을 하여  $DEM_{25000}$ 을 생성하였다. DTED level 0은 총 4개를 이용하였고 각각의 정밀도는 Table 1과 같다(<http://geoengine.nima.mil>), DTED level 0은 화소 간격이

Table 1. Precision of  $DEM_{DTED}$  in the study area.

	Min. longitude	Max. longitude	Min. latitude	Max. latitude	Absolute horizontal accuracy	Absolute vertical accuracy
DTED level 0	126°	127°	36°	37°	95m	30m
	126°	127°	37°	38°	23m	18m
	127°	128°	36°	37°	120m	45m
	127°	128°	37°	38°	25m	23m

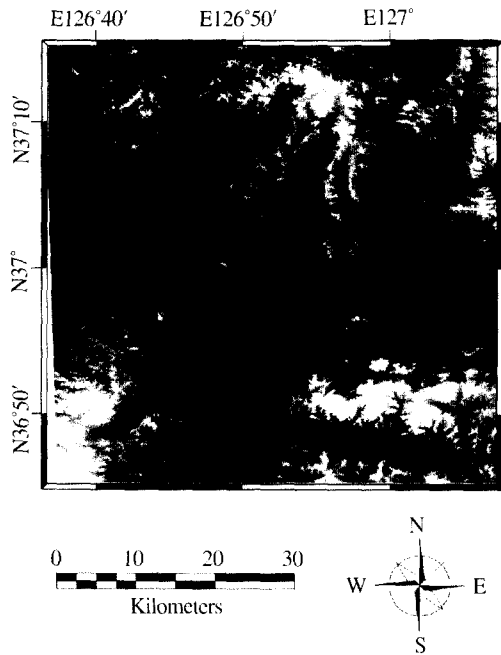


Fig. 2. Gray leveled image of  $DEM_{25000}$  in the study area.

30초로 되어 있으나, 분석을 위하여 1:25,000 수치

지도와 같은 간격인 약 0.9677초 간격으로 최소근 린법(nearest neighborhood)을 적용하여 재배열을 하였다. Fig. 2는 연구 지역의 1:25,000 수치지도로 생성한  $DEM_{25000}$ 이다.

## 2) 연구 방법

SAR SLC 영상과 DTED level 0로부터 생성한 DEM( $DEM_{DTED}$ )를 입력 자료로 하여 CNES의 DIAPASON (Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature)을 이용하여 2-pass DInSAR 계산을 하였다. 생성된 differential interferogram은 SAR 영상이 ERS 1/2 tandem SAR 자료이기 때문에 변위가 존재하는 것을 기대하기는 어려우며, 따라서 계산된 위상에는 변위는 없다고 가정할 수 있다. 즉, SAR로부터 생성되는 지형 고도 자료와 입력 지형 고도 자료인 DEM이 정확하다면 변위는 0 m에 값을 가져야 한다. 하지만, 잔여 위상을 나타내는 fringe가 존재하는 것은 변위를 나타내는 fringe라기보다는 입력 지형 고도 자료인 DEM의 고도 오차라고 생각할

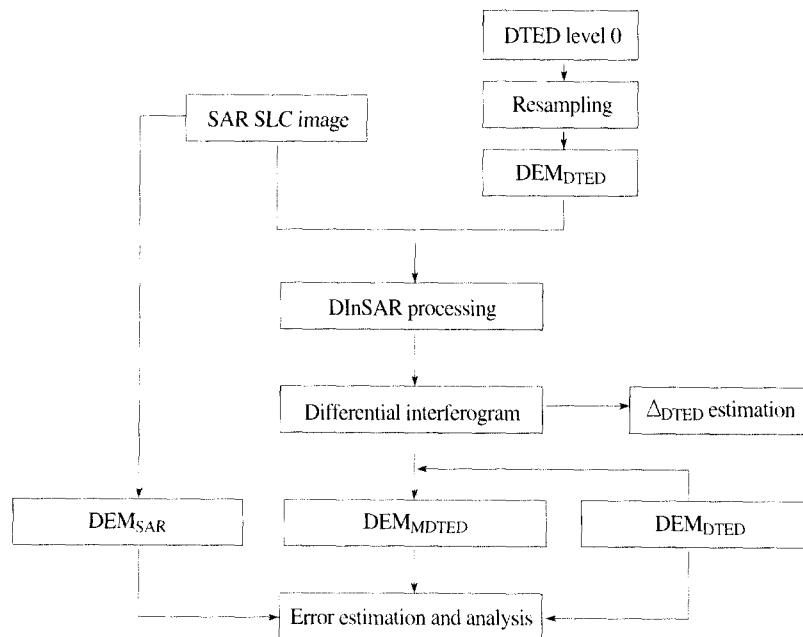


Fig. 3. Flowchart of the proposed 2-pass DInSAR processing for improving DEM precision in this study.

수 있다. 즉, differential interferogram을 고도로 환산한 값으로부터 입력된  $DEM_{DTED}$ 의 지형 고도와 SAR에 의해 관측된 지형과의 위상 차이에 의한 정보를 얻을 수 있다. 여기서 중요한 점은 제시된 방법이 InSAR 결과와 사용된 DEM과의 단순한 고도차가 아니라 위상차에 의한 계산이라는 점이다. 고도로 환산 시에는 한 fringe가 가지는 고도량의 개념인 altitude of ambiguity(Massonnet *et al.*, 1998)의 값을 이용하였다. 이와 같은 방법으로 2-pass DInSAR에 의해 계산된 지형의 고도 오차인  $\Delta_{DTED}$ 를 구하였다. 계산된  $\Delta_{DTED}$ 와  $DEM_{DTED}$ 를 화소대 화소로 더하여 정밀도가 향상된  $DEM_{DTED}$ 를 생성하였다. Fig. 3은 본 연구의 전체적인 흐름도이다.

#### 4. 적용 결과

##### 1) $DEM_{SAR}$ 생성

주영상과 부영상에 일반적인 InSAR 방법을 적용하여  $DEM_{SAR}$ 를 생성하였다. Fig. 4는 생성한 topographic interferogram으로, 생성된 topographic interferogram에서 평지, 낮은 산, 산지, 조간대의 6개 소지역으로 나눈 후 Flynn의 방법(Flynn, 1997)을 적용하여 phase unwrapping을 수행하였다. Phase unwrapping-후에는 altitude of ambiguity를 이용하여 다음과 같이  $DEM_{SAR}$ 를 계산하였다.

$$DEM_{SAR} = (\phi - \phi_f) / 2\pi \times h_a + h_f \quad (13)$$

여기서  $\phi$ 는 unwrapping한 위상이고  $\phi_f$ 는 평지

지역의 평균 위상이며,  $h_a$ 는 altitude of ambiguity이다. 또한, 절대 고도를 구하는 것이기 때문에 평지의 고도( $h_f$ )를 더하여 주었다. 고도를 계산할 때는 식 (13)과 같이  $h_a$ 를 사용하였는데, 이는 지형 기록에 대한 민감도로써 DEM을 계산하는 과정에도 유용하게 쓰일 수 있으며 식 (14)와 같이 나타낸다(Massonnet *et al.*, 1998).  $R_s$ 는 부영상의 산란체로부터의 거리이며,  $\lambda$ 는 파장,  $\theta_m$ 은 주영상의 입사각,  $d$ 는 위성의 수평 거리(horizontal separation)이다.

$$h_a = \frac{R_s \lambda \tan \theta_m}{2d} \quad (14)$$

Altitude of ambiguity는 baseline뿐만 아니라 안테나와의 상대적 거리 및 입사각에 따라 조금씩 다른 값을 갖으며, Table 2는 각각의 소지역에 대한 altitude of ambiguity 값과 위경도, 화소 수를 나타낸다.

##### 2) $DEM_{MDTED}$ 생성

주영상과 부영상을 이용하여 계산된 위상차는 DEM을 이용하여 지형에 의한 영향을 제거해 줄 수 있으며, Fig. 5는  $DEM_{DTED}$ 를 이용하여 얻어진 differential interferogram이다. 본 연구 지역에 대한 SAR 자료가 획득 기간이 하루 차이인 ERS 1/2 tandem SAR 자료이기 때문에 지각의 변위를 인지하는 것을 기대하기는 힘들다. 그러므로 Fig. 5에서의 잔여 위상 fringe는 지각의 변위에 의한 영향보다는 사용된 DTED level 0 자료의 고도 오차로 생각할 수 있다.  $DEM_{DTED}$ 를 사용하였을 때 DEM의 고도 오차로 인하여 생기는 고도 차이량을  $\Delta_{DTED}$

Table 2. Variation of altitude of ambiguity in each sub-area.

Area	lat. of center(deg.)	log. of center(deg.)	$h_a$ (m)	No. of row × col.
A-A'	37.0663	127.0237	29.52	154 × 179
B-B'	37.0709	126.8300	31.67	240 × 200
C-C'	36.9524	126.7281	32.38	183 × 366
D-D'	37.0797	126.9157	30.75	192 × 196
E-E'	36.8977	126.9800	29.40	130 × 108
F-F'	37.1230	126.7473	32.78	60 × 67

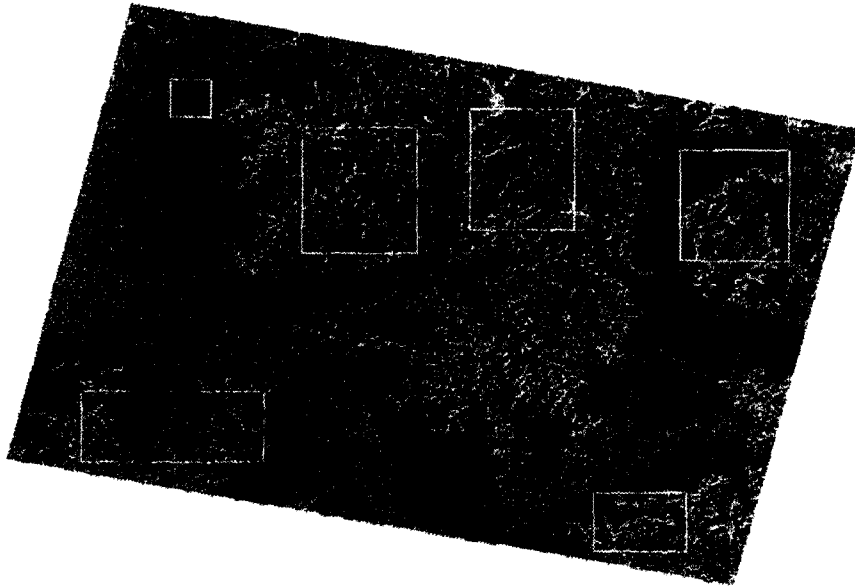


Fig. 4. Topographic interferogram and locations of the profiles.

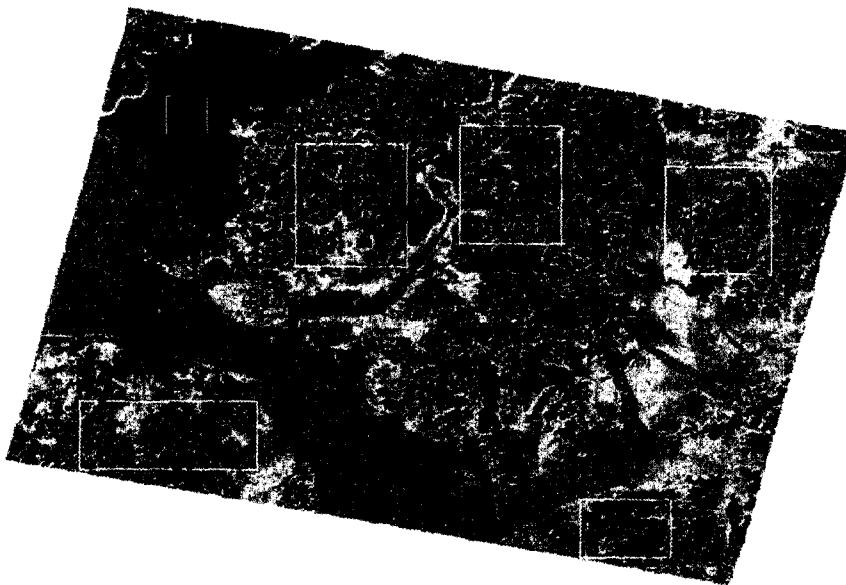


Fig. 5. Differential interferogram and locations of the profiles.

라고 한다면 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta_{DTED} = (\theta - \theta_f) / 2\pi \times h_a \quad (15)$$

앞에서의 식 (13)과 유사하나 식 (15)는 절대 고도를 구하는 것이 아니라 고도 차이량을 계산한

것이므로  $h_f$ 의 항은 고려하지 않았다. 또한, 여기서 위상  $\phi$ 는 잔여 위상으로 DTED level 0 자료를 이용하여 지형 고도가 제거된 위상인 점이 다르다. 즉, InSAR 방법에서는 안테나의 관측 각도에 대한 사면의 경사도가 큰 경우 layover 효과로

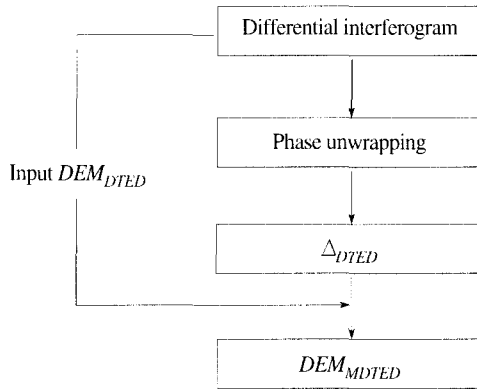


Fig. 6. Algorithm for updating DEM through 2-pass DInSAR technique.

fringe가 끊어지는 현상이 나타나지만 2-pass DInSAR를 적용하여 Fig. 5와 같이 잔여 위상을 구하는 경우 layover 영향을 최소화할 수 있다. 계산된 고도 차이량  $\Delta_{DTED}$ 로부터 DEM 정밀도 향상 가능성을 검토하기 위해 Fig. 6과 같이  $\Delta_{DTED}$

와  $DEM_{DTED}$ 를 화소대 화소로 더하여  $DEM_{MDTED}$ 를 생성하였다. 즉,  $DEM_{MDTED}$ 는 식 (16)과 같이 계산될 수 있다.

$$DEM_{MDTED} = \Delta_{DTED} + DEM_{DTED} \quad (16)$$

### 3) $DEM_{DTED}$ , $DEM_{SAR}$ 와 $DEM_{MDTED}$ 의 결과 비교

입력 자료로 사용된  $DEM_{DTED}$ 와 앞 절에서 생성한  $DEM_{SAR}$  및  $DEM_{MDTED}$ 의 정밀도를 분석하기 위해서 1:25,000 수치지도 자료인  $DEM_{25000}$ 과 비교하여 보았다. 6개의 소지역의 축선을 따라 지형의 고도를 비교한 그림은 Fig. 7과 같으며  $DEM_{25000}$ 을 기준으로 각 DEM에 대하여 식 (17)과 같이 절대 고도 오차를 구한 후 평균, 표준편차, 최대값, 최소값과 상관 관계를 계산한 결과는 Table 3과 같다.

$$Absolute\ altitude\ error = |DEM_{DTED} \text{ (or } DEM_{SAR} \text{ or } DEM_{MDTED}) - DEM_{25000}| \quad (17)$$

Table 3. Error statistics of each profile with respect to  $DEM_{25000}$ .

Sub-Area	DEM	Absolute altitude error					rms(m)
		Mean(m)	s.d.(m)	Max.(m)	Min.(m)	Corr. coef.	
A-A'	$DEM_{DTED}$	3.2	3.74	18.0	0.0	0.52	4.92
	$DEM_{SAR}$	3.0	2.90	11.4	0.0	0.80	4.18
	$DEM_{MDTED}$	2.8	2.05	9.1	0.0	0.86	3.13
B-B'	$DEM_{DTED}$	4.8	4.01	21.6	0.0	0.68	6.28
	$DEM_{SAR}$	4.9	4.28	15.4	0.0	0.88	6.48
	$DEM_{MDTED}$	3.7	2.75	13.9	0.0	0.90	4.62
C-C'	$DEM_{DTED}$	15.9	11.63	43.1	0.0	0.66	19.74
	$DEM_{SAR}$	6.4	6.39	30.2	0.0	0.84	9.06
	$DEM_{MDTED}$	7.3	5.80	29.9	0.0	0.91	9.39
D-D'	$DEM_{DTED}$	21.6	12.36	53.2	0.1	0.43	24.84
	$DEM_{SAR}$	20.8	13.99	52.6	0.0	0.45	25.06
	$DEM_{MDTED}$	9.4	8.82	40.2	0.0	0.83	12.90
E-E'	$DEM_{DTED}$	53.1	26.94	114.8	9.2	0.98	59.57
	$DEM_{SAR}$	49.3	36.74	132.7	0.1	0.96	61.47
	$DEM_{MDTED}$	24.6	23.18	86.0	0.0	0.97	33.79
F-F'	$DEM_{DTED}$	10.0	0.00	10.0	10.0	.	10
	$DEM_{SAR}$	10.1	0.64	11.3	8.7	.	10.16
	$DEM_{MDTED}$	10.2	0.65	11.3	8.7	.	10.21
total sub-area	$DEM_{DTED}$	18.1	9.78	114.8	0.0	0.65	28.04
	$DEM_{SAR}$	15.8	10.82	132.7	0.0	0.79	27.84
	$DEM_{MDTED}$	9.7	7.21	86.0	0.0	0.89	15.98



또한, 식(18)과 같이  $rms$ 를 계산하였으며  $N$ 은 자료의 수이다.

$$rms = \frac{\sum_{i=1}^N (DEM_{DTED_i}(\text{or } DEM_{SAR_i} \text{ or } DEM_{MDTED_i}) - DEM_{25000_i})^2}{N} \quad (18)$$

주로 고도 40 m 이하의 평지로 되어있는 A-A'와 B-B' 지역은  $DEM_{DTED}$ 와  $DEM_{SAR}$ ,  $DEM_{MDTED}$

의 평균과 표준 편차는 수 십 cm 내외로 큰 차이를 보이지 않지만,  $DEM_{25000}$ 과의 상관 관계는  $DEM_{DTED}$ ,  $DEM_{SAR}$ ,  $DEM_{MDTED}$ 의 순서로 높아지며  $DEM_{DTED}$ 보다  $DEM_{SAR}$ 와  $DEM_{MDTED}$ 가 훨씬 더 높은 상관 관계를 보인다. C-C' 지역은 Fig. 7의 (c)에서와 같이  $DEM_{DTED}$ 는 완만한 기복을 보이면서  $DEM_{25000}$ 과 큰 차이를 나타내지만  $DEM_{SAR}$ 와  $DEM_{MDTED}$ 는  $DEM_{25000}$ 과 같은 기복

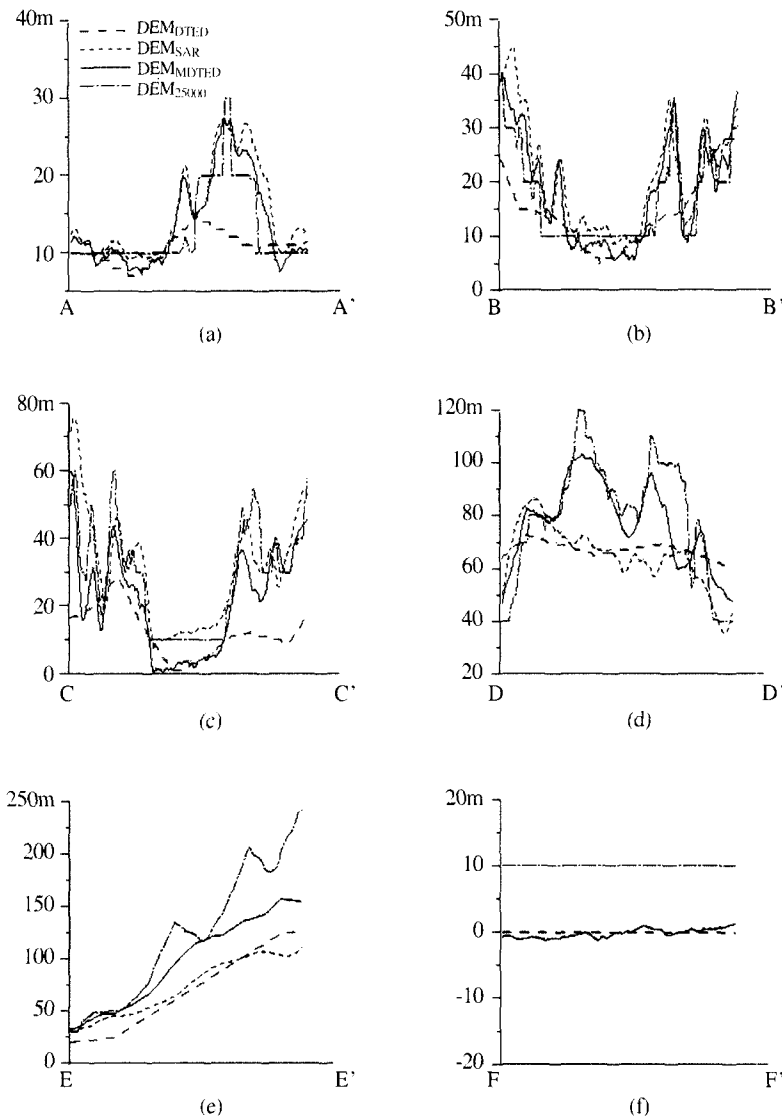


Fig. 7.  $DEM_{DTED}$ ,  $DEM_{SAR}$ ,  $DEM_{MDTED}$  and  $DEM_{25000}$  profile of sub-area. The locations of each profile are shown in Fig. 4 and 5.

을 보이면서 매우 유사하다. Table 3에서 C-C' 지역  $DEM_{DTED}$ 의 평균은 15.9 m인 반면에  $DEM_{SAR}$ 와  $DEM_{MDTED}$ 는 각각 6.4 m와 7.3 m로 향상된 결과를 나타낸다. 반면, 비교적 급경사지역인 D-D'와 E-E' 지역에서는 Fig. 7 (d), (e)와 Table 3에서와 같이  $DEM_{SAR}$ 가  $DEM_{DTED}$ 와 비슷한 고도 오차를 갖으며  $DEM_{25000}$ 과는 평균이 각각 약 20 m와 50 m 정도의 큰 차이를 보이고 있다. 이는 급경사면에서 InSAR의 지형 위상이 foreshortening 혹은 layover 현상으로 인하여 일부 fringe의 손실로 phase unwrapping 과정에서 오차가 발생한 것으로 판단된다. 그러나,  $DEM_{MDTED}$ 는 고도가 높은 D-D' 지역에서는 평균은 9.4 m, 표준 편차는 8.82 m로  $DEM_{DTED}$ 나  $DEM_{SAR}$ 보다 약 2배가 향상되었으며, 상관 계수도 0.83으로 훨씬 개선된 것을 알 수 있다. 또한, E-E' 지역에서도  $DEM_{MDTED}$ 가 비록  $DEM_{25000}$ 과 평균이 24.6 m로 비교적 큰 차이를 보이고 있으나  $DEM_{DTED}$  및  $DEM_{SAR}$ 에 비하면 역시 약 2배 정도 향상된 결과를 보이고 있다. rms도 역시 D-D', E-E' 지역에서  $DEM_{MDTED}$ 가  $DEM_{DTED}$ ,  $DEM_{SAR}$ 보다 약 2배 정도 향상되었다. F-F' 지역은 조간대 지역으로 매우 낮은 경사( $1^\circ$  이하)를 갖는 완만한 지형으로 1:25,000 수치지도 자체에서 이를 전혀 반영하고 있지 못하고 있다. 따라서, 정량적인 비교를 하기는 어려우나, 기존의 지형도에 비해  $DEM_{MDTED}$ 가 조간대의 지형을 어느 정도 잘 반영하고 있다. 전체 소지역의 6개 측선에 대해서는  $DEM_{MDTED}$ 의 평균은 9.7 m이며, 이는  $DEM_{DTED}$ 보다는 약 46%가 향상되었으며  $DEM_{SAR}$ 보다는 약 39% 향상되었다. 상관 관계도  $DEM_{MDTED}$ 가 0.89로  $DEM_{DTED}$ 와  $DEM_{SAR}$ 의 0.65와 0.79보다 더 향상되었다. rms는  $DEM_{DTED}$ ,  $DEM_{SAR}$ ,  $DEM_{MDTED}$ 가 각각 28.04 m, 27.84 m, 15.98 m이다.

실험 결과를 요약하면 다음과 같다. 비교적 완만한 경사를 갖는 지역에서는 InSAR와 본 연구에서 제시한 2-pass DInSAR 방법이 유사한 정밀도를 갖는다. 그러나, 사면의 경사도가 증가할수록 InSAR에서 직접 구한 지형 고도의 경우 ERS의

낮은 입사각(약  $23^\circ$ )으로 인하여 오차가 증가한다. 그러나, 2-pass DInSAR 방법을 적용하는 경우 훨씬 향상된 결과를 얻을 수 있다. 즉, 주영상과 부영상만으로 생성된 DEM보다 정밀도가 낮은 DEM을 이용하여 2-pass DInSAR 방법을 적용 결과 얻어진 DEM이 더 정밀도가 높아짐을 알 수 있다. 그 이유는  $DEM_{SAR}$ 가 급경사지역에서 생길 수 있는 foreshortening 및 layover와 같은 현상에 영향을 많이 받아 phase unwrapping의 어려움이 있지만,  $DEM_{MDTED}$ 는 이 영향을 효과적으로 줄일 수 있기 때문이다. 또한, DInSAR가 InSAR에 비하여 위상차에 민감하기 때문에 세밀한 지형 변화를 보여 줄 수 있다. 자세한 방법과 정밀도는 향후 연구가 필요하다. 이와 같은 접근 방법은 특히 지형 자료가 거의 없는 지역에서는 매우 효과적인 것이다.

## 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 2-pass DInSAR를 이용하여 DEM 정밀도를 향상할 수 있는 기초 연구를 수행하였다. 2-pass DInSAR를 통하여 얻어진 differential interferogram을 phase unwrapping하여 계산된 고도 차이량인  $\Delta_{DTED}$ 와 입력된  $DEM_{DTED}$ 를 화소대 화소로 값을 더하여  $DEM_{MDTED}$ 를 생성하였다. 이와 같이 생성된  $DEM_{MDTED}$ 를 1:25,000 지형 자료를 기준으로  $DEM_{DTED}$ 와 비교한 결과,  $DEM_{MDTED}$ 의 절대 고도 오차 평균은 9.7 m로  $DEM_{DTED}$ 의 18.1 m에 비하여  $DEM_{MDTED}$ 의 평균이 46% 향상되었다. 또한, SAR 영상만으로 생성되어지는  $DEM_{SAR}$ 와 비교한 결과  $DEM_{SAR}$ 의 절대 고도 오차 평균은 15.8 m로  $DEM_{MDTED}$ 가  $DEM_{SAR}$ 보다 39% 향상되었다. rms도  $DEM_{MDTED}$ 가  $DEM_{DTED}$ 와  $DEM_{SAR}$ 가 2배 정도 향상되었다. 이는 DEM에 의해 지형의 영향을 제거해준 후 변위의 영향을 포함하고 있는 잔여 위상을 이용하는 경우가 foreshortening 및 layover의 영향을 더 적게 받은 것을 보여준다. 특히 ERS 1/2 SAR는 입사

각이 작기 때문에, 급경사인 지역은 layover 현상에 많은 영향을 받을 수 있다. 따라서, 정밀도가 낮은 DEM을 사용하여 DInSAR를 적용시키는 방법이 비교적 경사도가 큰 지역에서는 DEM의 정밀도를 향상시키기에 효과적이라고 판단된다.

DEM을 생성할 때 중요한 단계로는 phase unwrapping이 있다. 현재도 많은 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이에 따라 여러 가지 알고리즘이 개발되고 있는 상태이다. 본 연구에서는 여러 가지 알고리즘 중에 Flynn(1997)의 방법으로 phase unwrapping을 일괄적으로 처리하였다. Flynn의 방법은 가중된 불연속선의 합을 최소화시키며 영상내의 모든 화소에서 절대 위상을 구할 수 있다. 대상 자료의 특성에 따라 방법의 효율성이 있겠지만 Flynn의 방법은 Goldstein *et al.*(1988)의 branch cut 방법이나 minimum  $L^P$ -norm 방법에 비해 지역적 특성과 무관하게 가장 효과적이다(김상완 외, 2000). 따라서, 전체적으로는 가장 효율적인 방법이라고 볼 수는 있으나, 자료와 지역의 특성에 따라 여러 가지 방법의 phase unwrapping 차이의 영향을 고려할 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다.

한반도 지형은 사면 경사도가 비교적 높은 관계로 ERS-1/2의 입사각(약  $23^\circ$ )은 단순한 InSAR 방법의 적용이 어려운 경우가 많다. 그러나, 입사각에 대한 다양한 선택이 가능한 RADARSAT-1이나 JERS-1의 경우 안테나 빔의 입사각이 ERS-1/2보다 크므로 이를 이용하는 것이 바람직하다. 특히, RADARSAT-1을 이용하는 경우는 fine beam mode 4-5번을 선택하는 것이 효과적이다. 그러나, ERS-1/2를 제외한 다른 SAR 탑재 위성들의 GPS 시스템이 없는 관계로 궤도가 부정확하기 때문에 궤도 정보에 대한 연구가 필요하다. ERS-1/2를 이용하는 경우는 본 연구에서 제시한 낮은 정밀도의 DEM을 사용하여 DEM 정밀도를 향상하는 방법이 효과적이다. 따라서, DEM의 정밀도를 향상시키기 위해 baseline 계수를 이용한 정밀도 개선 방법에 대한 연구와 적용이 지속적으로 된다면 DEM 정밀도 향상에 많은 기여를 할 것이다.

## 참고문헌

- 김상완, 이효재, 원중선, 2000. SAR Interferometry Phase Unwrapping 비교 분석: Branch cut, Minimum discontinuity 및 Minimum  $L^P$ -norm 방법을 중심으로, 대한원격탐사학회 춘계 학술대회 논문집, (3): 96-101.
- Fazio, M. D., F. Vinelli, 1993. DEM reconstruction in SAR interferometry: Practical experiences with ERS-1 SAR data, Proc. of 1993 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo, Aug. 18-21, 1993. Vol. 3, 1207-1209.
- Flynn, T. J., 1997. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity, *J. Opt. Soc. Am.*, 14(10): 2692-2701.
- Fujiwara, S., P. A. Rosen, 1998. Crustal deformation measurements using repeat-pass JERS 1 synthetic aperture radar interferometry near the Izu Peninsula, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 103(B2); 2411-2426.
- Honikel, M., 1998. Improvement of InSAR DEM accuracy Using Data and Sensor Fusion, Proc. of 1998 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seattle, WA, Jul. 6-10, 1998, Vol. 5, 2348-2350.
- Kobayashi, S., N. Fujii, and S. Okubo, 1999. Detection of Volcano Deformation and Coseismic Movements Using JERS-1 L-band SAR Differential Interferometry; Combination with Other Geodetic Measurements, Proc. of 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Jun. 28-Jul. 2, 1999, Vol. 2, 800-802.
- Kontoes, C., P. Elias, O. Sykioti, P. Briole, D. Remy, M. Sachpazi, G. Veis and I. Kotsis, 2000. Displacement field and fault model for the September 7, 1999 Athens earthquake

- inferred from ERS2 satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 27(24): 3989-3992.
- Massonnet, D., K. L. Feigl, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Review of Geophysics*, 36(4):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.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, and T. Rabaute, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364(8): 138-142.
- 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*, 101(E10): 23109-23125.
- Rufino G., A. Moccia, S. Esposito, 1998. DEM Generation by Means of ERS Tandem Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 36(6):1905-1912.
- Seymour M. S., 1999. Refining Low-quality Digital Elevation Models Using Synthetic Aperture Radar Interferometry, Ph. D. Dissertation, University of British Columbia.
- Zebker H. A., F. Amelung, and S. Jonsson, 2000. Remote sensing of volcano surface and internal processes using radar interferometry, (P. J. Mousinis-Mark, J.A. Crisp, and J. H. Fink, editors), *Remote sensing of active volcanism*, American Geophysical Union, Washington, DC, 179-205.