

## MAI (Multiple Aperture SAR Interferometry) 간섭도의 지형위상보정

정형섭\*† · 종루\*\*

\* 서울시립대학교 공간정보공학과,

\*\* Cascades Volcano Observatory, U.S. Geological Survey (USGS)

## Topographic Phase Correction of MAI (Multiple Aperture SAR Interferometry) Interferogram

Hyung-Sup Jung\*† and Zhong Lu\*\*

\* Department of Geoinformatics, The University of Seoul,

\*\* Cascades Volcano Observatory, U.S. Geological Survey (USGS)

**Abstract** : MAI (multiple aperture SAR interferometry) method has been recently developed to improve the measurement accuracy of along-track surface deformation. By means of split-beam SAR processing, this novel technique produces forward- and backward-looking interferograms, which are combined to generate an MAI interferogram. The along-track surface deformation can then be derived from the MAI interferogram. The achieved accuracy of the along-track surface deformation is approximately 8 cm for interferograms with a coherence of 0.6. It is commonly recognized that the topographic phase on an MAI interferogram can be ignored. However, in this paper, we have generated an MAI interferogram from an ALOS PALSAR interferometric pair spanning the 2010 Haiti earthquake, and shown that the topographic phase distortion on the MAI interferogram can reach to about  $3.45 \times 10^{-4}$  rad./m. This distortion corresponds to an along-track surface deformation of about 98 cm. We have proposed an efficient method to remove the topographic phase distortion. After correcting the distortion, the topographic phase distortion on the MAI interferogram is reduced to about  $7.82 \times 10^{-6}$  rad./m. This means that the proposed method can effectively remove the topographic distortion on the MAI interferogram to improve along-track surface deformation measurement.

**Key Words** : SAR, InSAR, MAI, ALOS PALSAR, topographic phase

**요약** : 최근 비행방향으로의 지표변위 관측정밀도를 향상시키는 MAI(multiple aperture SAR interferometry)기법이 개발되었다. 이 MAI기법은 split-beam InSAR 처리를 통하여 forward-looking 간섭도와 backward-looking 간섭도를 제작하고, 이 두 개의 다른 두 간섭도로부터 MAI 간섭도를 생성하여 비행방향 지표변위를 관측하는 것으로 비행방향 지표변위를 0.6의 긴밀도(coherence)에서 약 8 cm의 정밀도로 관측을 가능하게 한다. 현재까지 이러한 MAI 간섭도에서 지형위상은 무시 가능한 것으로 알려져

있었다. 그러나 본 연구에서 2010년 아이티에서 발생한 지진 발생 전과 후의 ALOS PALSAR 간섭쌍을 이용하여 MAI 간섭도를 제작하였고, 이 MAI 간섭도에서 지형위상이  $3.45 \times 10^{-4}$  rad./m로 왜곡되고 있는 것을 보였다. 이러한 지형위상왜곡은 약 98 cm의 비행방향 지표변위에 해당된다. 또한 MAI 간섭도의 지형 위상왜곡을 효과적으로 보정하는 방법을 제안하였으며, 지형위상왜곡을 약  $7.82 \times 10^{-6}$  rad./m까지 저감시켰다. 이는 제안한 방법이 지형위상왜곡을 효과적으로 제거함을 보인다.

## 1. 서론

근래에 개발된 레이더 간섭(Interferometric Synthetic Aperture Radar; InSAR)기법은 2차원적으로 수 십  $\text{km}^2$  이상의 넓은 지역에서 수 cm 내지 수 mm 정도의 측정 민감도를 지니고 지표변위를 관측하는데 성공적으로 이용되어온 기술이다. 과거 15년 동안 레이더 간섭기법은 지진(Massonnet *et al.*, 1993; Fialko *et al.*, 2005), 화산(Massonnet *et al.*, 1995; Amelung *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2010), 빙하(Joughin *et al.*, 1996), 산사태(Tarchi *et al.*, 2003), 지하수 팽팽(Amelung *et al.*, 1999), 매립지 침하(Kim *et al.*, 2005), 폐광산침하(Jung *et al.*, 2007) 등에 활용되어 왔다.

그러나 레이더 간섭기법은 안테나의 관측방향(line-of-sight; LOS)으로의 1차원 지표변위만을 관측할 수 있기 때문에 지진활동, 화산분출, 산사태, 빙하이동 등에 있어 지표변위의 메카니즘을 입체적으로 분석하는데 한계를 지니고 있다. 많은 연구자들은 이러한 단점을 극복하고 2차원 또는 3차원의 지표변위를 관측하기 위한 연구를 진행해 왔다. 패스가 다른 여러 장의 영상으로부터 레이더 간섭기법을 이용하여 ground range방향과 지표 수직방향의 지표변위를 결정하는 방법(Fialko, 2004)이 알려져 있지만, 비행방향으로의 지표변위를 관측할 수 없는 단점을 지녔다. 또한, 두 영상 또는 여러 영상간의 상관계수를 이용하는 방법(Fialko *et al.*, 2005)이 제안되어 3차원 지표변위를 관측하는데 널리 이용되었지만, 측정된 지표변위의 정밀도가 매우 낮아 수십 cm 이상의 지표변위에만 적용될 수 있었다.

Bechor and Zebker(2006)는 최근 비행방향으로의 지표변위 관측정밀도를 향상시키는 multiple aperture SAR interferometry (MAI) 기법을 개발하였다. 이 기법은 split-beam InSAR 처리를 통하여 forward-

looking 간섭도와 backward-looking 간섭도를 제작하고, 이 두 개의 다른 두 간섭도로부터 MAI 간섭도를 생성한다. 이러한 방법은 상관계수를 이용하는 방법에 비하여 정밀도가 매우 높으며, ERS SAR영상을 이용할 경우, 0.6의 긴밀도(coherence)에서 약 8 cm의 정밀도로 비행방향의 지표변위를 관측할 수 있는 것으로 알려져 있다(Bechor and Zebker, 2006). 또한, ALOS PALSAR영상을 이용할 경우, 3차원 지표변위를 동쪽과 수직방향으로 각각 약 2 cm의 정밀도로, 북쪽방향으로 약 4 cm이하의 정밀도로 관측할 수 있는 것으로 알려져 있다(Jung *et al.*, 2011). Jung *et al.*(2009)은 일반적인 InSAR 간섭도에서 나타나는 flat-Earth 위상과 지형위상(topographic phase)이 MAI 간섭도에서도 나타나는 것을 증명하였다. 이와 같은 flat-Earth 위상과 지형위상은 일반적인 InSAR 간섭도에서는 수직기선(perpendicular baseline)에 의하여 나타나는 것과 달리 MAI 간섭도에서는 forward-looking 간섭도와 backward-looking 간섭도의 수직기선 차이에 의하여 나타난다(Jung *et al.*, 2009). Bechor and Zebker (2006)는 지형에 의한 왜곡은 무시가능하다고 한 반면, Jung *et al.*(2009)은 수직기선에 비하여 수직기선 차이는 일반적으로 매우 작은 값을 지니기 때문에 지형위상은 MAI 간섭도에서 큰 영향을 주지 않는다고 하였다. 그래서 그들은 2차 다항식을 이용하여 flat-Earth 위상과 지형 위상을 먼저 제거한 후, 1차 다항식을 이용하여 고도에 따른 coregistration오차에 의하여 나타나는 잔류 지형 위상을 제거하는 이분법적인 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 지형위상이 큰 MAI 간섭도에서 지형위상의 영향으로 인하여 flat-Earth 위상을 2차 다항식에 정확하게 피팅할 수 없는 단점을 지닌다. 따라서 이 방법을 이용한 flat-Earth 위상과 지형 위상의 제거는 효과적이지 못하다.

이 연구에서는 2010년 아이티에서 발생한 지진 발생

전과 후의 ALOS PALSAR 간섭쌍을 이용하여 MAI 간섭도를 제작하고, MAI 간섭도에 나타나는 지형위상 왜곡을 분석한다. 또한, 이러한 MAI 간섭도의 flat-Earth 위상과 지형위상은 Jung *et al.*(2009)에 의하여 제안된 방법에 의해 효과적으로 제거할 수 없음을 보이고, 지형위상을 고려한 2차 다항식을 이용하여 flat-Earth 위상과 지형위상을 효과적으로 제거하는 방법을 제안한다.

## 2. 방법론

### 1) MAI 기법

MAI 기법은 한 RAW SAR 영상으로부터 한 장의 single-look-complex(SLC) 영상을 제작하는 것이 아니라, subaperture 처리기법을 이용하여 forward-

looking and backward-looking SLC 영상과 같이 두 장의 SLC 영상을 제작한다(Jung *et al.*, 2009). 그러므로 일반적인 레이더 간섭기법에서 간섭쌍인 두 장의 SAR RAW 영상으로부터 두 장의 SLC 영상을 제작하여 간섭도를 제작한다. 이와 같은 일반적인 기법과 달리 MAI 기법에서는 두 장의 SAR RAW 영상으로부터 forward-looking SLC 영상과 backward-looking SLC 영상을 각각 두 장씩 제작하기 때문에 총 4장의 SLC 영상을 얻고, 이로부터 forward-looking 간섭도와 backward-looking 간섭도를 제작한다. MAI 간섭도는 forward-looking 간섭도와 backward-looking 간섭도의 위상차로부터 비행방향의 지표변위를 관측할 수 있다.

Fig. 1(a)는 제로도플러 주파수로 촬영된 SAR RAW 영상으로부터 일반적인 SAR영상의 제작기하를 나타내고, Fig. 1(b)는 forward-looking SLC 영상과

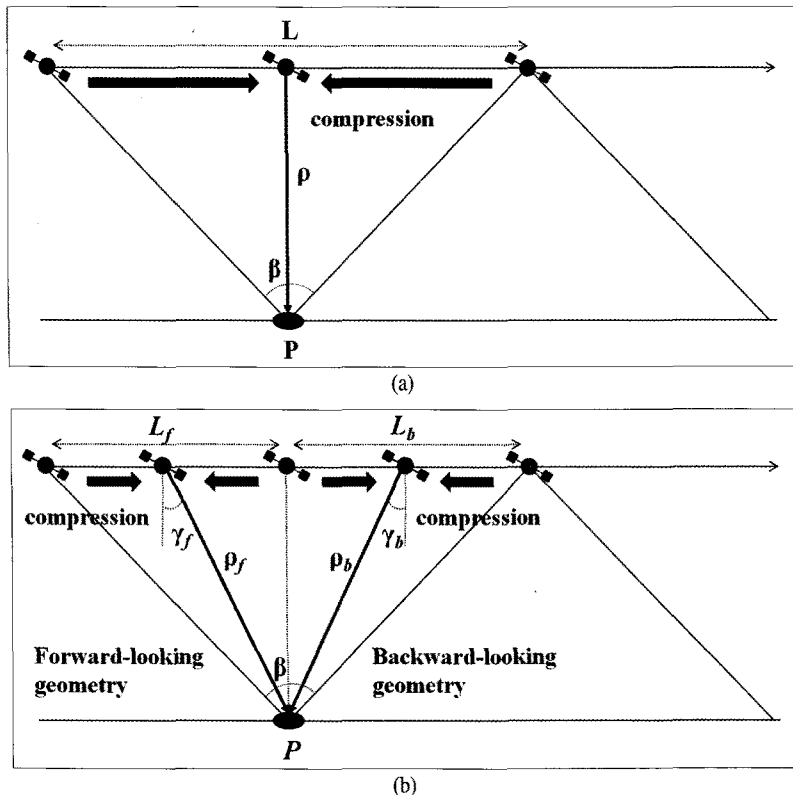


Fig. 1. (a) Full aperture SAR geometry and (b) multiple aperture SAR geometry in which forward- and backward-looking SLC images are produced. The  $L$  is full aperture swath,  $L_f$  and  $L_b$  are respectively forward- and backward-looking sub-aperture swath,  $\beta$  is antenna angular beam width,  $\rho$  is slant range distance,  $\rho_f$  and  $\rho_b$  are respectively forward- and backward-looking slant range distances,  $\gamma_f$  and  $\gamma_b$  are the squint angles of forward- and backward-looking images, respectively.

backward-looking SLC 영상의 제작 기하를 나타낸다. Fig. 1과 같이 일반적인 SAR SLC 영상은 full aperture swath를 모두 압축하여 제작되는 반면, forward-looking SLC 영상과 backward-looking SLC 영상은 sub-aperture swath를 압축하여 제작된다. forward-looking SLC 영상과 backward-looking SLC 영상은 서로 다른 기하에서 얻은 신호를 이용하여 압축하기 때문에 slant range distance와 squint angle이 다르다(Fig. 1(a) 참조). 이러한 squint angle의 차이로부터 MAI 간섭위상( $\phi_{MAI}$ )은 다음과 같이 정의된다(Bechor and Zebker, 2006).

$$\phi_{MAI} = \frac{2\pi}{l}x \quad (1)$$

여기서,  $x$ 는 비행방향의 지표변위이다. 일반적인 레이더 간섭위상의 한 프린지(fringe)가  $\lambda/2$ ( $\lambda$ 는 레이더 파장)인 반면, MAI 간섭위상의 한 프린지는  $l$ 이다. 레이더 파장이 약 23.6 cm이고, azimuth방향으로의 유효 안테나 크기가 약 890 cm인 ALOS PALSAR 시스템 파라미터를 고려하면, 레이더 간섭위상의 한 프린지는 11.8 cm인 반면, MAI 간섭위상의 한 프린지는 890 cm이다.

MAI 간섭도에 의한 비행방향의 측정 정밀도( $\sigma_x$ )는 식 (1)에 의하여 다음과 같이 정의할 수 있다(Bechor and Zebker, 2006).

$$\sigma_x = \frac{l}{2\pi} \sigma_{\phi, MAI} \quad (2)$$

여기서는 MAI 위상의 표준편차로 아래와 같이 정의된다(Jung et al., 2009).

$$\sigma_{\phi, MAI} = \frac{1}{\sqrt{N_{L, MAI}}} \frac{\sqrt{1-c^2}}{c} \quad (3)$$

여기서,  $c$ 는 긴밀도를 나타내며,  $N_{L, MAI}$ 는 MAI 간섭도의 유효 멀티룩 값을 나타내며, 일반적인 레이더 간섭도의 유효 멀티룩 값의 절반이다(Jung et al., 2009).

Fig. 2는 decorrelation에 대한 비행방향 지표변위의 표준편차를 보인다. MAI 간섭도에서 긴밀도가 높을수록(decorrelation이 낮을수록), 유효 멀티룩 값이 클수록 비행방향 지표변위의 표준편차는 작아진다. 긴밀도가 0.9인 MAI 간섭도에서 5 cm이하의 정밀도로 비행방향 지표변위를 관측하고자 한다면, 40이상의 멀티

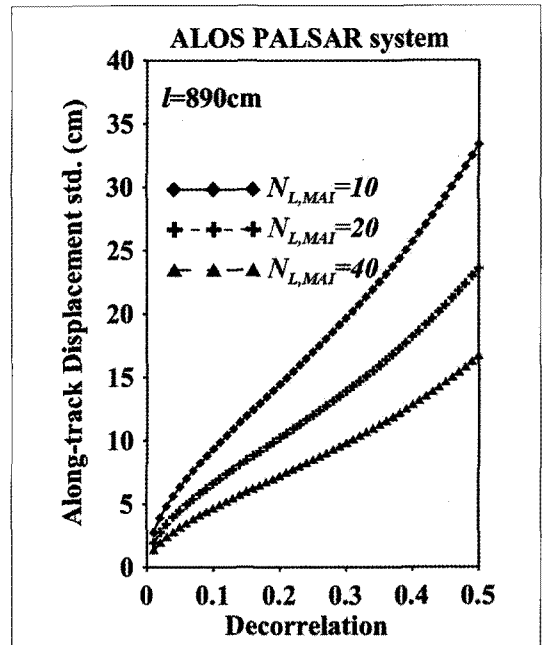


Fig. 2. Variation of standard deviation of along-track deformation with respect to decorrelation. Values of  $l = 890$ cm,  $N_{L,MAI} = 10, 20$  and  $40$  are used to calculate the standard deviation, where  $l$  is effective antenna length,  $N_{L,MAI}$  is the number of looks.

룩을 이용해야만 한다.

## 2) MAI 간섭도의 flat-Earth 위상과 지형위상

Jung et al.(2009)는 MAI 간섭도에서도 InSAR 간섭도에서와 같이 flat-Earth 위상과 지형위상이 나타난다는 것을 밝힌 바 있다. 이와 같은 MAI 간섭도의 위상왜곡은 InSAR 간섭도와는 달리 forward-looking 간섭도와 backward-looking 간섭도의 수직기선 차이( $\Delta B_{\perp}$ )에 비례한다(Jung et al., 2009).

MAI 간섭도에 대한 flat-Earth 위상은 다음과 같이 정의된다(Jung et al., 2009).

$$\frac{\partial \phi_{MAI}}{\partial \rho} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Delta B_{\perp} \cos \theta}{\rho \sin \theta} \quad (4)$$

여기서,  $\theta$ 는 관측각이고,  $\rho$ 는 slant range distance이다. ALOS PALSAR 시스템 파라미터에 대하여 near range에서부터 far range까지의 flat-Earth 위상차는  $\Delta B_{\perp}$ 가 10 cm일 때 약 20 deg.가 되며, 이는 50 cm의 비행방향 지표변위에 해당한다. 또한, MAI 간섭도에 대한 지형위상은 다음과 같이 정의된다(Jung et al., 2009).

$$\phi_{MAI} - \phi_{MAI,f} \approx \frac{4\pi}{\lambda\rho} \cdot \frac{\Delta B_{\perp}}{\sin\theta} \cdot h \quad (5)$$

여기서,  $h$ 는 지형고도를 나타낸다. ALOS PALSAR 시스템 파라미터에 대하여 2000 m의 지형고도는  $\Delta B_{\perp}$ 가 10 cm일 때 약 1.1 deg.의 MAI 위상이 발생한다. 이는 약 2.72 cm의 비행방향 지표면위에 해당한다. 그러나 일반적으로 MAI 간섭도에 발생하는 지형위상은 지형고도에 따른 forward-looking 간섭도와 backward-looking 간섭도간의 상호정합(co-registration) 오차에 의하여 더 크게 나타날 수 있다(Jung *et al.*, 2009).

Jung *et al.*(2009)는 MAI 간섭도에 나타나는 flat-Earth 위상을 제거하기 위하여 MAI 간섭도의 위상을 2차 다항식에 피팅하여 수직기선차를 구한다. 이와 같이 계산된 수직기선차로부터 flat-Earth위상과 지형위상을 제거한 후, 1차 다항식을 이용하여 상호정합 오차에 의하여 나타나는 잔류 지형위상을 제거하는 방법을 제안하였다. 이 방법에 사용된 2차 다항식은 다음과 같다.

$$\phi_{MAI}(a, r) = \phi_0 + \phi_1 \cdot a + \phi_2 \cdot r + \phi_3 \cdot a \cdot r + \phi_4 \cdot a^2 + \phi_5 \cdot r^2 \quad (6)$$

여기서,  $a$ 와  $r$ 은 각각 azimuth와 range 픽셀 수이며,  $\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_5$ 는 모델 파라미터이다. (4)와 (6)으로부터 수직기선  $\Delta B_{\perp}$ 는 아래와 같이 계산될 수 있다(Jung *et al.*, 2009).

$$\Delta B_{\perp}(a, r) = \frac{\lambda}{4\pi} \rho(r) \Delta r_g (\phi_2 + \phi_3 a + 2\phi_5 r) \tan[\theta(r)] \quad (7)$$

여기서,  $\Delta r_g$ 는 range pixel 간격이다. 식 (7)에 의하여 계산된 수직기선으로부터 보정된 MAI 간섭도의 위상 ( $\hat{\phi}_{MAI}$ )은 상호정합 오차에 의하여 발생하는 잔류 지형위상을 다음과 같은 1차 다항식에 피팅하여 제거한다(Jung *et al.*, 2009).

$$\hat{\phi}_{MAI} = \hat{\phi}_1 + \hat{\phi}_2 \cdot h \quad (8)$$

여기서,  $\hat{\phi}_1$ 와  $\hat{\phi}_2$ 는 모델파라미터이다.

그러나 지형고도의 변화가 큰 지역에서 지형위상이 큰 경우, 식 (6)을 이용한 피팅은 제대로 이루어지지 못한다. Jo *et al.*(2010)은 산안드레아스 단층의 지표면위 관측시 지형고도에 따라 나타나는 대기 위상왜곡의 영향에 의하여 InSAR 간섭도의 위상을 식 (6)과 같이 고도에 따른 위상왜곡의 변화를 고려하지 않은 2차 다항식을 이용하여 제거할 수 없음을 보였고, 식 (6)에 고도

에 따른 위상왜곡을 고려하여 제거하였다. 이와 마찬가지로 MAI 간섭도에서 나타나는 flat-Earth 위상을 제거하기 위하여 MAI 간섭도의 위상을 다음의 2차 다항식에 피팅하여야 한다.

$$\phi_{MAI}(a, r) = \phi_0 + \phi_1 \cdot a + \phi_2 \cdot r + \phi_3 \cdot a \cdot r + \phi_4 \cdot a^2 + \phi_5 \cdot r^2 + \phi_6 \cdot h \quad (9)$$

여기서,  $\phi_6$ 는 식 (6)에 추가된 모델 파라미터이다. 지형고도의 변화가 큰 지역에서 지형위상이 큰 경우에도 식 (9)를 이용하여 효과적으로 수직기선을 식 (7)에 의하여 계산할 수 있으며, 또한 flat-Earth위상과 지형위상을 제거한 후의 MAI 간섭도에서 식 (8)을 이용하여 잔류 지형위상에 의한 왜곡도 효과적으로 제거할 수 있다.

### 3. 실험 결과

본 연구에서는 2010년 1월 12일 발생한 지진 전과 후의 ALOS PALSAR 간섭쌍을 이용하여 1) MAI 간섭도에 나타나는 지형위상 왜곡을 분석하였고, 2) 지형위상 왜곡의 효과적 제거를 위한 방법을 제안하고 검증하였다. 실험에 이용된 ALOS PALSAR RAW 영상은 descending orbit에 의하여 획득된 것으로 지진 발생 전인 2009년 3월 9일에 획득된 FBS (fine beam single polarization)모드 영상과 지진 발생 후인 2010년 1월 25일에 획득된 FBS모드 영상이다. 이 간섭쌍은 약 796 m의 수직기선을 지닌다. Table 1은 본 연구에 이용된 ALOS PALSAR 영상의 특징을 요약한다.

한 장의 ALOS PALSAR RAW 데이터로부터 서로 다른 도플러중심주파수를 이용하여 두 장의 SLC 영상을 제작하였다. Forward-looking SLC 영상은 333.4 Hz의 도플러 중심주파수로부터 backward-looking SLC 영상은 -474.7 Hz의 도플러 중심주파수로부터 794.8 Hz의 azimuth 처리 밴드폭을 이용하여 생성되었다. 이러한 도플러 중심주파수와 밴드폭은 azimuth common band filtering에 의하여 계산되었다(Jung *et al.*, 2009). 두 장의 RAW 데이터로부터 총 4장의 SLC 영상(두 장의 forward-looking SLC 영상과 두 장의 backward-looking SLC 영상)을 생성하였다. Forward-looking 간섭도는 두 장의 forward-

Table 1. Characteristics of MAI pair used in this study

AcquisitionDate	BeamMode	$f_{DC,f}^{1)}$ (Hz)	$f_{DC,c}^{1)}$ (Hz)	$f_{DC,b}^{1)}$ (Hz)	$\Delta f_{D,S}^{1)}$ (Hz)	$B_{\perp}^{2)}$ (m)	$\Delta B_{\perp}^{2)}$ (m)	SNR <sup>3)</sup>
09/03/2009 25/01/2010	FBS <sup>4)</sup> FBS	333.4	-70.7	-474.7	794.8	796.2	0.27	51.3

- 1)  $f_{DC,f}$ ,  $f_{DC,c}$ , and  $f_{DC,b}$  denote the forward, average, and backward Doppler Centroids, and  $\Delta f_{D,S}$  is the sub-aperture processing bandwidth.
- 2)  $B_{\perp}$  is the perpendicular baseline of the forward-looking interferogram, and  $\Delta B_{\perp}$  is the perpendicular baseline difference estimated by the second order polynomial model proposed in this study.
- 3) SNR is the mean signal to noise ratio calculated by 32 looks.
- 4) FBS is the fine beam single polarization.

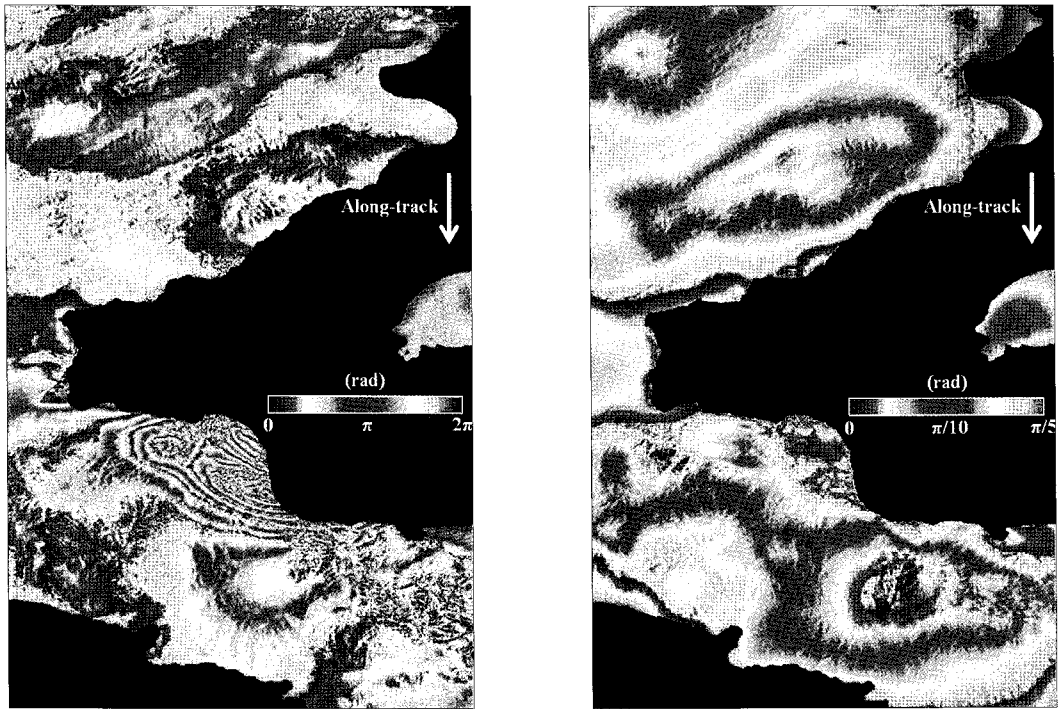


Fig. 3. (a) InSAR interferogram and (b) MAI interferogram without flat-Earth and topographic corrections.

looking SLC 영상으로부터 backward-looking 간섭도는 두 장의 backward-looking SLC 영상으로부터 일반적인 레이더 간섭기법을 이용하여 생성되었다. 이러한 두 간섭도는 우선 range방향으로 3룩(look)과 azimuth방향으로 10룩의 멀티룩처리를 적용한 후 flat-Earth 위상과 지형위상을 제거하였고, 긴밀도를 향상시키기 위하여 다시 range방향으로 5룩과 azimuth방향으로 5룩을 적용하여 제작하였다. 그래서 간섭도에 적용된 멀티룩 처리는 range방향으로 15룩과 azimuth방향으로 50룩이었으며, 이들 간섭도의 픽셀크기는 range와 azimuth방향으로 각각 약 112m × 126m 였

다. 이와 같이 멀티룩 처리를 지형위상제거 전후로 나누어 적용하는 것은 아이티 지역의 지형고도가 매우 높고 가파르기 때문에 지형위상이 존재하는 상태에서 멀티룩을 적용하면 긴밀도가 떨어지는 현상을 최소화할 수 있다. 또한, 각 간섭도의 긴밀도를 높이기 위하여 Goldstein 필터를 적용하였다. 초기 MAI 간섭도는 forward-looking 간섭도와 backward-looking 간섭도의 위상차를 이용하여 제작되었다.

Fig. 3은 flat-Earth 위상과 지형위상을 보정한 InSAR간섭도와 flat-Earth 위상과 지형위상을 보정하지 않은 초기 MAI간섭도를 보인다. Fig. 3(b)의 초기

MAI 간섭도는 flat-Earth 위상왜곡보다 지형고도에 의한 위상왜곡이 매우 심하게 나타나는 것을 알 수 있다. Bechor and Zebker(2006)는 MAI 간섭도에서 지형고도에 의한 위상왜곡은 나타나지 않는다고 하였다. 또한, Jung *et al.*(2009)은 MAI 간섭도에서 flat-Earth 위상이 지형위상보다 매우 크고 지형위상은 적은

양이기 때문에 무시가능하다고 하였다. 그러나 그림 3(b)와 같이 매우 가파른 지형고도가 나타나는 경우 flat-Earth 위상보다 지형위상이 더 크게 나타날 수 있음을 보인다. 이와 같은 지형위상은 식(5)에 의한 수직기선의 차이보다 forward-looking 간섭도와 backward-looking 간섭도간의 상호정합 오차에 의하여 발생된다. 상호정합 오차는 forward-looking 간섭도와 backward-looking 간섭도가 관측방향이 차이를 지니고 있고, 이러한 관측방향의 차이에 의하여 발생한다.

Fig. 4는 초기 MAI 간섭도에서 지형고도에 따른 MAI 위상의 변화를 나타낸다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 지형고도에 따른 MAI 위상 변화는  $3.45 \times 10^{-4}$  rad./m 로 2000 m의 고도차이에 의하여 나타나는 MAI 위상 변화는 0.69 rad,가 되며, 이는 약 98 cm의 비행방향 지표변위로 나타난다. 그러므로 비행방향 지표변위를 정확히 측정하기 위해서는 초기 MAI 간섭도에 나타나는 지형위상 왜곡의 제거가 필수적이다.

Fig. 5(a)는 초기 MAI 간섭도에서 Jung *et al.*(2009)에 의하여 제안된 방법에 따라 모델링된 flat-Earth 위상을 보이며, Fig. 5(b)는 초기 MAI 간섭도에서 본 연구에서 제안한 식 (9)를 이용하여 모델링된 flat-Earth 위상과 지형위상을 보인다. Jung *et al.*,

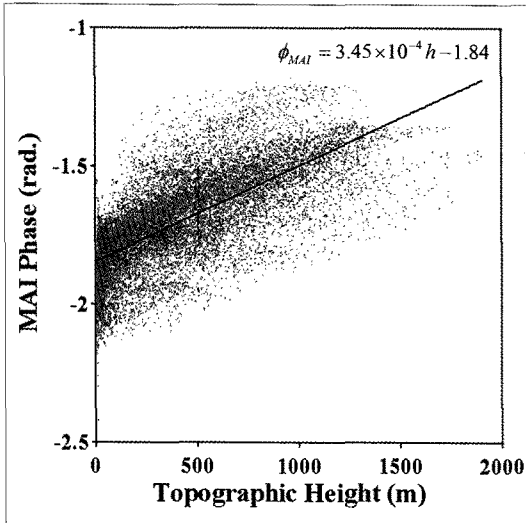


Fig. 4. Variation of MAI phases in the MAI interferogram (Fig.5 (b)) without flat-Earth and topographic corrections with respect to topographic height.

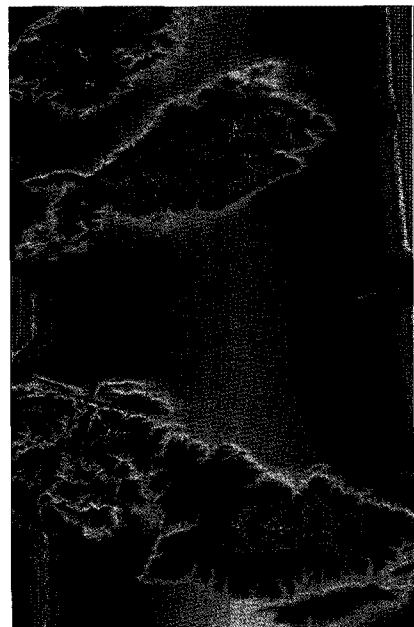
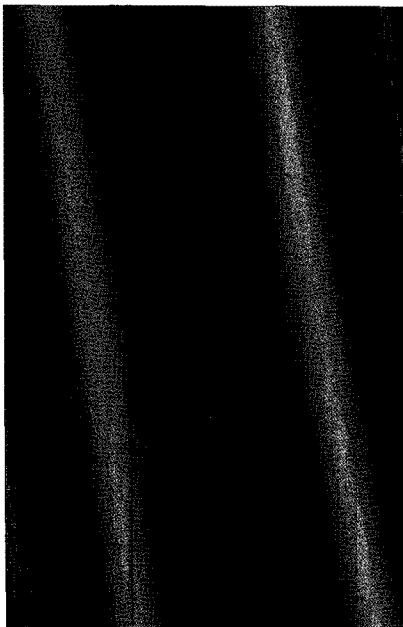


Fig. 5. (a) flat-Earth phase based on equation (6) (Jung *et al.*, 2009), and flat-Earth and topographic phases based on equation (9) of this paper

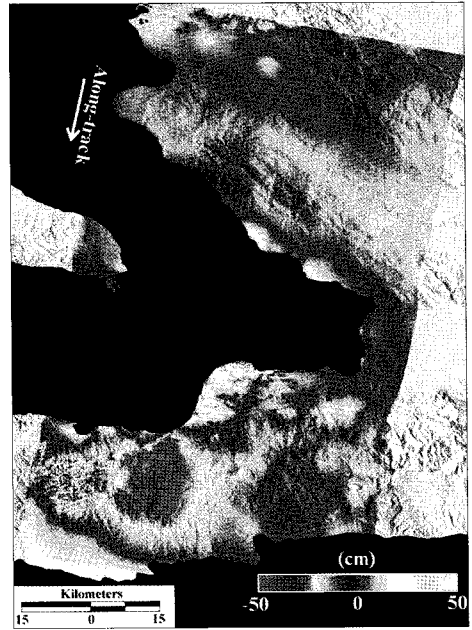
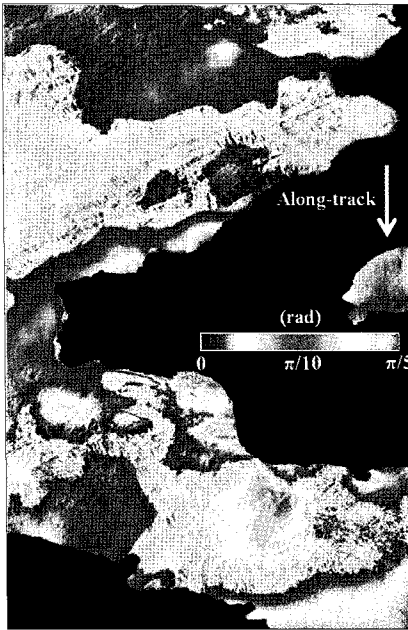


Fig. 6. (a) MAI interferogram corrected by the proposed method and (b) the along-track deformation measured from the MAI interferogram.

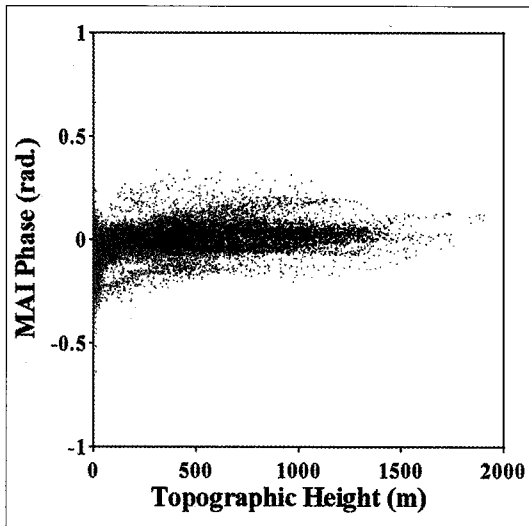


Fig. 7. Variation of MAI phases in the corrected MAI interferogram of Fig.6 (a) with respect to topographic height.

(2009)에 의하여 제안된 방법은 초기 MAI 간섭도에서 지형외곡에 의한 효과를 무시하고 2차 다항식에 피팅하기 때문에 영상의 사선방향으로 높은 고도를 지나는 특성을 반영하여 영상의 중심부분에서 과보정되는 경향을 지닌다. 반면, 본 연구에서 제안한 방법은 초기 MAI 간섭도에서 지형외곡에 의한 효과를 고려하여 2차 다항식

에 피팅한다. 그러므로 이 방법은 Fig. 3(b)의 초기 MAI 간섭도에서 나타나는 지형위상외곡을 효과적으로 반영하며, 이 방법에 의한 지형위상의 제거는 과보정되는 경향을 지니지 않는다.

Fig. 6(a)는 본 연구에서 제안하는 방법에 의하여 flat-Earth위상과 지형위상을 제거한 MAI 간섭도와 MAI 위상으로부터 관측한 비행방향 지표변위를 나타낸다. Fig. 3(b)의 초기 MAI 간섭도는 지형에 따른 위상외곡이 분명한 반면, Fig. 6(a)의 보정된 MAI 간섭도는 지형에 따른 위상외곡이 나타나지 않는다. Fig. 6(b)로부터 2010년 아이티 지진에 의한 비행방향으로의 지표변위는 최대 50 cm까지 발생하였음을 알 수 있다. 또한 Fig. 7은 보정된 MAI 간섭도에서 지형고도에 따른 MAI 위상의 변화를 나타낸다. Fig. 4와는 달리 뚜렷한 지형고도에 따른 변화는 나타나지 않는다. 지표변위가 비교적 적은 지역에서 지형고도에 따른 위상변화는 약  $7.82 \times 10^{-6}$  rad./m로 무시될 수 있었다.

그러나 본 연구에서 제안한 방법은 영상을 기반으로 2차 다항식에 피팅하여 MAI 간섭도에서 지형위상을 제거한다. 이러한 방법은 영상내의 모든 지역에서 지표변위가 나타날 때 지형위상의 정확한 보정에는 한계가 있을 수 있다. 이와 같은 경우에는 GPS관측 결과를 이



용하여 검증하는 것이 필수적이다. 본 연구에서 검증한 결과 또한 항 후 GPS관측 결과를 이용하여 검증할 예정이다.

## 5. 결론

최근 비행방향으로의 지표변위 관측정밀도를 향상시키는 MAI 기법이 개발되었다. 이 기법은 ERS-1/2를 이용할 경우 0.6의 긴밀도에서 약 8 cm의 정밀도로 비행방향의 지표변위를 관측할 수 있고, ALOS PALSAR를 이용할 경우 동쪽과 수직방향으로 약 2 cm의 정밀도로, 북쪽방향으로 약 4 cm이하의 정밀도로 3차원 지표변위를 관측할 수 있다. 현재까지 이러한 MAI 간섭도에서 지형위상은 무시 가능한 것으로 알려져 있었다.

본 연구에서는 2010년 아이티에서 발생한 지진 발생 전과 후의 ALOS PALSAR 간섭쌍을 이용하여 MAI 간섭도를 제작하였다. MAI 간섭도에서 지형위상은  $3.45 \times 10^{-4}$  rad./m의 왜곡을 나타내었다. 이 지형위상왜곡은 2000 m의 고도차에서 0.69 rad.의 위상왜곡을 보이며, 이는 약 98 cm의 비행방향 지표변위에 대응한다. 또한, MAI 간섭도의 지형위상왜곡을 효과적으로 보정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 MAI 간섭도의 위상에서 flat-Earth 위상을 모델링할 때 사용하는 2차 다항식에 고도에 따른 위상변화를 고려하는 방식이다. 제안한 방법에 따라 MAI 간섭도의 flat-Earth 위상과 지형위상을 제거하였고, 지표변위가 적은 지역에서 지형고도에 따른 위상변화는 약  $7.82 \times 10^{-6}$  rad./m로 저감되었다. 이러한 결과는 제안한 방법이 MAI 간섭도에서 지형고도에 따른 위상왜곡을 효과적으로 제거하였음을 나타낸다. 그러나 연구에 사용된 영상내의 모든 지역에서 지표변위가 나타났기 때문에 지형위상 보정이 정확한 지를 검증하기 위해서는 GPS 관측결과를 이용해야만 한다. 항 후 GPS 관측 결과를 이용하여 검증할 예정이다.

## 사 사

PALSAR data were provided under the Group

on Earth Observation Geohazards Supersite programme, and are copyrighted by JAXA and ME. 이 논문은 2009년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- Amelung, F., S. Jonnson, H. A. Zebker, and P. Segall, 2000. Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galapagos observed with radar interferometry, *Nature*, 407: 993-996.
- Amelung, F., D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and R. J. Lacznik, 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas; InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation, *Geology*, 27(6): 483-486.
- Bechor, N. B. D. and H. A. Zebker, 2006. Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair, *Geophysical Research Letter*, 33(16): L16311.
- Fialko, Y., 2004. Probing the mechanical properties of seismically active crust with space geodesy: Study of the coseismic deformation due to the 1992 Mw 7.3 Landers (southern California) earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 109: doi:10.1029/2003JB002756.
- Fialko, Y., D. Sandwell, M. Simons, and P. Rosen, 2005. Three dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of the shallow slip deficit, *Nature*, 435: 295-299.
- Jo, M.-J., J.-S. Won, S.-W. Kim, and H.-S. Jung, 2010. A time-series SAR observation of surface deformation at the southern end of the San Andreas Fault Zone, *Geosciences Journal*, 14:277-287.
- Joughin, I., S. Tulaczyk, M. Fahnestock, and R.

- Kwok, 1996. A mini-surge on the Ryder Glacier, Greenland, observed via satellite radar interferometry, *Science*, 274: 228-230.
- Jung, H.-C., S.-W. Kim, H.-S. Jung, K.-D. Min, and J.-S. Won, 2007. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis, *Engineering Geology*, 92: 1-13.
- Jung, H.-S., J.-S. Won, and S.-W. Kim, 2009. An improvement of the performance of multiple aperture SAR interferometry (MAI), *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47:2859-2869.
- Jung, H.-S., Z. Lu, J. S. Won, M. P. Poland, and A. Miklius, 2011. Mapping three-dimensional surface deformation by combining multiple-aperture interferometry and conventional interferometry: application to the June 2007 eruption of Kilauea volcano, Hawaii, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8:34-38.
- Kim, S.-W., C.-W. Lee, K.-Y. Song, K.-D. Min, and J.-S. Won, 2005. Application of L-band differential SAR interferometry to subsidence rate estimation in reclaimed coastal land, *International Journal of Remote Sensing*, 26(7): 1363-1381.
- Lee, C.-W., Z. Lu, O.-I. Kwoun, and J.-S. Won, 2008. Deformation of Augustine volcano, Alaska, 1992-2005, measured by ERS and ENVISAT SAR interferometry, *Earth Planets and Space*, 60: 447-452.
- Lee, C.-W., Z. Lu, H.-S. Jung, J.-S. Won, and D. Dzurisin, 2010. Surface Deformation of Augustine Volcano (Alaska), 1992-2005, From Multiple-Interferogram Processing Using a Refined SBAS InSAR Approach, *U.S. Geological Survey Professional papers*, 1769: 453-465.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Fiegl, and T. Rabaute, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364: 138-142.
- Massonnet, D., P. Briole, and A. Arnaud, 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375: 567-570.
- Tarchi, D., N. Casagli, R. Fanti, D. D. Leva, G. Luzi, A. Pasuto, M. Pieraccini, and S. Silvano, 2003. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy, *Engineering Geology*, 68(1-2): 15-30.