

GB-SAR 간섭기법을 이용한 반사체의 인위적 변위탐지 및 대기습도보정

이재희*** · 이훈열*† · 조성준** · 성낙훈** · 김정호**

*강원대학교 지구물리학과, **한국지질자원연구원 광물자원연구본부

Detection of Artificial Displacement of a Reflector by using GB-SAR Interferometry and Atmospheric Humidity Correction

Jae-Hee Lee***, Hoonyol Lee*†, Seong-Jun Cho**, Nak-Hoon Sung**, and Jung-Ho Kim**

*Department of Geophysics, Kangwon National University

**Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract : In this paper we applied Ground-Based Synthetic Aperture Radar(GB-SAR) interferometry to detect artificial displacement of a reflector and performed an atmospheric humidity correction to improve the accuracy. A series of GB-SAR images were obtained using a center frequency of 5.3 GHz with a range resolution of 25 cm and a azimuth resolution of 0.324° , all in full-polarization (HH, VV, VH, HV) modes. A triangular trihedral corner reflector was located 160 m away from the system, and the artificial displacements of 0-40 mm was implemented during the GB-SAR image acquisition. The result showed that the RMS error between the actual and measured displacements, averaged in all polarization data, was 1.22 mm, while the maximum error in case of the 40 mm displacement was 2.72 mm at HH-polarization. After the atmospheric correction with respect to the humidity, the RMS error was reduced to 0.52 mm. We conclude that a GB-SAR system can be used to monitor the possible displacement of artificial/natural scatterers and the stability assessment with sub-millimeter accuracy.

Key Words : GB-SAR, interferometry, displacement, atmospheric humidity correction.

요약 : 이 논문에서는 지상용 SAR (GB-SAR) 시스템의 간섭기법을 이용하여 특정 산란체의 인위적 변위를 탐지하고 대기습도보정을 통하여 정확도를 향상시켰다. GB-SAR 자료는 중심주파수 5.3 GHz, 거리 해상도 25 cm, 방위해상도 0.324° 로 모든 편파(HH, VV, VH, HV)에 대해 얻어졌다. 삼각삼면반사체(triangular trihedral corner reflector)를 시스템 전방 160 m 지점에 위치시킨 후 인위적으로 0 - 40 mm의 변위를 주어 측정하였다. 그 결과, 모든 편파에서 실제 변위와 GB-SAR 시스템을 통한 측정 변위의 RMS 오차는 1.22 mm로 나타났으며, 실제변위 40 mm 일 때의 최대 측정오차는 HH편파에서 2.72 mm로 나타났다. 대기 중 습도에 대한 보정을 실시하였고 그 결과, RMS 오차는 0.52 mm로 줄어들었다. 이를 통해 GB-SAR 시스템은 밀리미터 이하의 정밀도가 요구되는 자연산란체나 인공구조물의 변위측정 및 안정성 평가 분야에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

접수일(2010년 4월 13일), 수정일(1차 : 2010년 4월 19일), 게재확정일(2010년 4월 20일).

† 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

1. 서론

지상에 위치한 인공구조물이나 자연구조물의 변위 혹은 안정성 평가는 주로 건축·토목·방재 분야를 중심으로 매우 활발한 연구가 이루어지고 있다. 여기에는 GPS를 이용한 방법(Nikitopoulou *et al.*, 2006; Tamura *et al.*, 2002), 캠프코더와 망원렌즈를 이용한 영상처리방법(Lee and Shinozuka, 2006), 광학 센서를 이용한 방법(Li *et al.*, 2004), 그리고 지상 레이저 스캐너를 이용한 방법(Abellan *et al.*, 2006; Monserrat and Crosetto, 2008)등이 있으며, 각 방법에 따라 탐지 가능한 변위의 정밀도는 수 센티미터에서 수 밀리미터이다. 하지만 가시광역을 이용하는 비접촉 센서 방식은 태양고도나 기상상태에 따라 시야가 제한되는 경우는 측정이 불가능하며 또한 접촉 센서의 경우 점자료의 한계성을 가지기도 한다.

원격탐사는 넓은 지역을 동시에 탐지할 수 있는 비접촉 센서기법으로서 각광받고 있으며, 특히 기상상태나 태양고도에 영향이 적은 마이크로파를 사용하는 합성구경레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR) 영상을 이용한 간섭기법(interferometry)은 지상의 변위를 측정하는데 최근 많은 발전을 이루어 왔다(이훈열, 2006). 그러나 인공위성 및 항공기를 이용한 SAR 간섭기법의 경우 자료취득의 주기가 통상 수 십일이 걸리고 해상도에도 제한이 있어, 건설, 토목, 및 방재분야에서 실용화 단계에 있지 못하다.

Ground-Based SAR (GB-SAR)는 인공위성 및 항공기에서 주로 운용되는 SAR 센서를 지상에 설치하여 높은 해상도의 마이크로파 영상을 얻는 장비로서, 사용자의 목적과 편의에 따라 시간과 장소 및 장비의 선택이 용이하여 다양한 파장, 편파, 해상도, 및 입사각을 구현할 수 있다. 또한 GB-SAR의 RF 측정은 시스템의 이동간 정지된 상태에서 이루어질 수 있기 때문에 매우 높은 정밀도로 변위의 반복측정이 가능하다(이훈열 외, 2007a). 이러한 GB-SAR의 장점을 이용하여 사면 안정성 평가 및 이에 의한 침하량 계측, 눈사태 및 산사태 감지, 댐 및 빌딩의 안정성 평가 등 다양한 분야에 적용되고 있으며 최근 들어 많은 기술 개발이 이루어지고 있다(Casagli *et al.*, 2003; Leva *et al.*, 2003; Luzi *et al.*, 2007; Noferini *et al.*, 2007; Pieraccini *et al.*,

2002; Tarchi *et al.*, 1999; Tarchi *et al.*, 2003).

이 논문에서는 강원대/한국지질자원연구원이 개발한 C-밴드 GB-SAR 시스템을 이용하여 삼각삼면반사체(triangular trihedral corner reflector)의 인위적 변위를 측정하고 오차를 분석하였다. 또한 마이크로파 전파속도에 영향을 끼치는 대기 중 습도에 영향을 분석하고 측정값에 대한 습도보정을 실시하여, GB-SAR를 이용한 변위측정의 정밀도를 향상시키는 방법을 제시하고자 하였다. 실험 및 분석 시 모든 편파에 대한 데이터를 이용함으로써 편파에 따른 결과의 차이를 확인하였다.

2. GB-SAR 변위탐지

1) 실험 개요

GB-SAR 시스템은 대전에 위치한 한국지질자원연구원의 본관 우측 옥상에 설치되었으며, 관찰지역은 지질자원연구원의 잔디밭 일대로 설정하였다(Fig. 1(a)). 잔디밭에서 안테나까지의 수직적 높이는 21m 높이다. 잔디밭은 시스템으로부터 약 50m에서 200m까지이며, 그 후방에는 나무와 도로 등이 있다. 시스템으로부터 약 100m에서 110m 거리에는 많은 나무들이 분포되어 있는 두 개의 언덕이 위치한다. 또한 언덕의 뒤편으로 5개의 지자기 관측함이 있다. 습도보정식의 산출을 위해선 안정된 산란체가 필요하였는데 이를 위해 90m 지점의 나무 1 그루와 120m, 150m 지점에 위치한 지자기 관측함 3 개를 비롯한 총 4개를 선택하였다. 관찰지역에 대한 인공위성 영상은 Fig. 1(b)와 같다.

실험은 2007년 7월 18일 오후 4시부터 6시 30분까지 수행되었으며, 실험에 사용한 각종 변수는 Table 1에 나타내었다. 변위측정을 위하여 사용된 삼각삼면 반사

Table 1. Parameters for the GB-SAR experiment

Measurement parameters	
Center frequency	5.3 GHz
Range bandwidth	600 MHz
IF Bandwidth	1 kHz
Number of sampling	1601
Power	33 dBm
Azimuth Step	0.05 m
Azimuth length	5 m

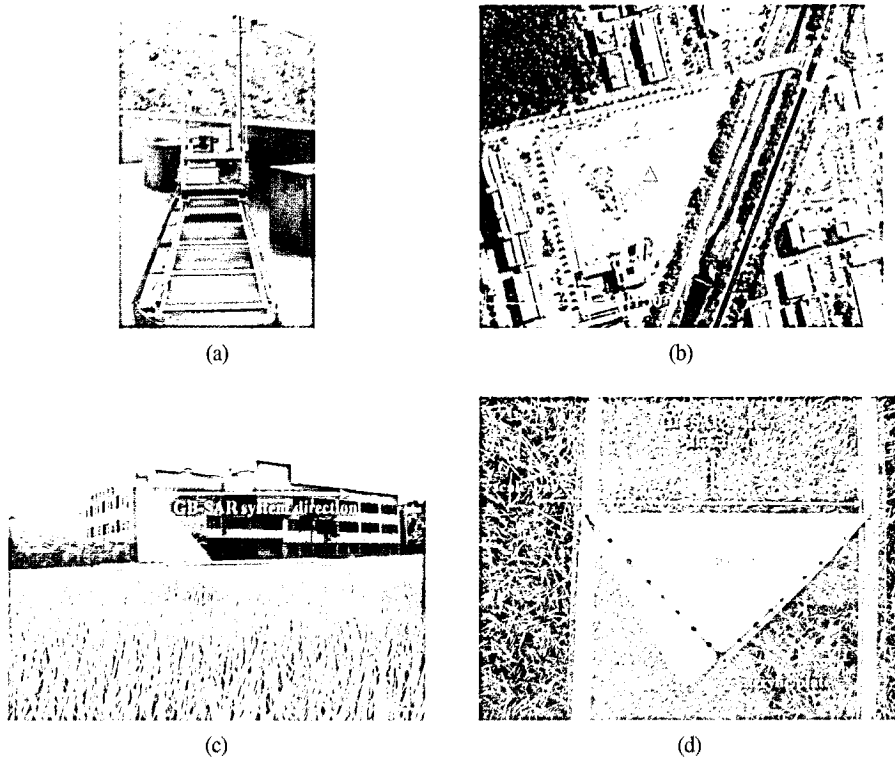


Fig. 1. Photos of the experimental setup. (a) GB-SAR system. (b) Aerial view of experiment location. The 4 check symbols are the stable targets while the triangle represent the location of the triangular trihedral corner reflector. (c) Side view of the reflector on top of a acrylic plate. (d) Top view of the reflector with the scale-bar on the plate.

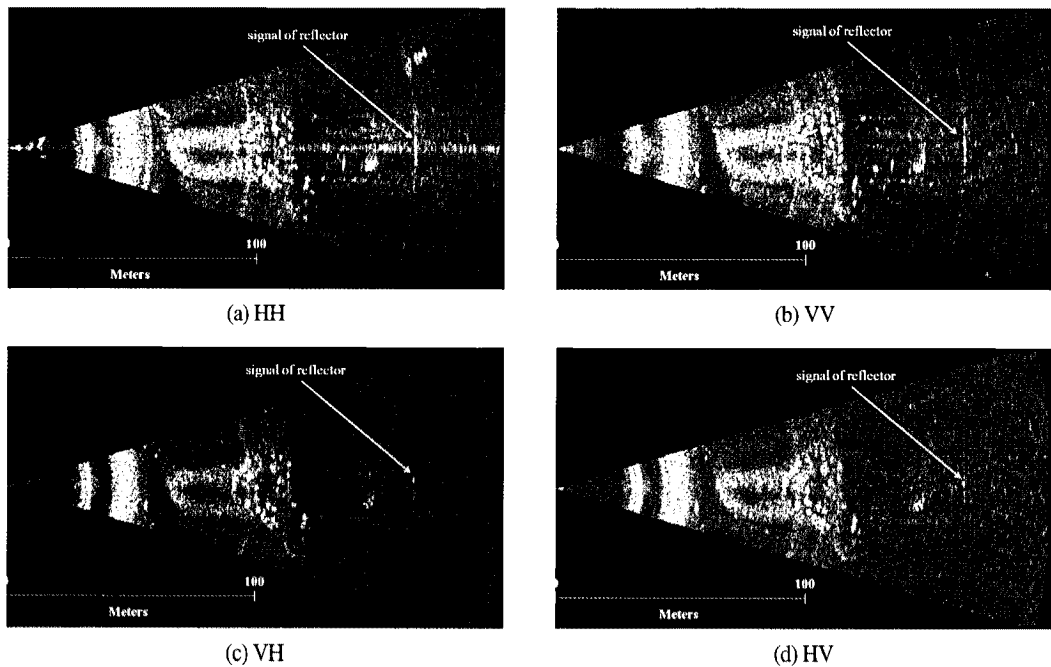


Fig. 2. GB-SAR amplitude images of (a) HH, (b) VV, (c) VH, and (d) HV polarization. The reflector signal is much stronger in co-polarization than cross-polarization images due to the nature of a triangular trihedral corner reflector used in this experiment.

Table 2. Coefficients of atmospheric correction function

$$\Delta\phi = -4\pi R(ah+b), [47\% \leq h \leq 58\%]$$

	a	b
HH	3.61×10^{-5}	-1.73×10^{-3}
VV	3.74×10^{-5}	-1.78×10^{-3}
VH	3.13×10^{-5}	-1.50×10^{-3}
HV	3.34×10^{-5}	-1.59×10^{-3}

체는 두개의 언덕 뒤편인 시스템으로부터 약 160m 지점에 배치하였다(Fig. 1(c), (d)). 이 반사체를 밀리미터 단위로 정밀하게 움직일 수 있도록, 양 끝단에 자를 부착한 아크릴 판에 올려놓았다. GB-SAR 측정 간에 반사체의 위치를 일정 간격만큼 이동시켰으며, 이동간격은 -1, -6, -10, -30, -40mm으로 하였다. 여기서 음수는 반사체가 시스템 방향으로 이동하여 거리(range)가 짧아졌음을 의미한다.

본 연구를 통해 얻은 원시자료는 gbsar 프로그램의 Deramp-FFT 방법으로 영상화하였다(이훈열 외, 2007b). Fig. 2의 GB-SAR 영상에서는 약 100m 지점에 위치한 언덕과 나무들의 위치를 확인할 수 있으며, 그 뒤에 있는 강한 신호의 지자기 관측함들의 신호도 확인할 수 있다. 또한 약 160m 지점에 위치한 반사체의 신호도 매우 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 HH, VV 영상에서 매우 뚜렷하게 보이는 반면 HV, VH에서는 비교적 약한 신호가 감지되어, 동종편파(co-polarization)에서만 강한 반사를 일으키는 삼각삼면반사체의 특징이 잘 나타나 있음을 알 수 있다.

2) GB-SAR 차분간섭기법

파장 λ 인 마이크로파를 중심주파수로 사용하는 GB-SAR 영상에서 거리 R 에 위치한 산란체의 위상(phase)은 다음과 같이 표현된다.

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

또한, 시간 차이를 두고 얻어진 각각의 GB-SAR 영상에서 최초 거리 R_0 에 있는 산란체가 시스템 방향으로 r_1, r_2, \dots, r_n 만큼 변위를 일으켜 거리가 R_1, R_2, \dots, R_n 까지 변한다면 이에 따른 위상차는 다음과 같다.

$$\phi_n - \phi_0 = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_n - R_0) = \frac{4\pi}{\lambda} r_n \quad (2)$$

이 때, 변위에 대한 위상의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{\delta\phi}{\delta r} = -\frac{4\pi}{\lambda} \quad (3)$$

본 연구에서는 중심주파수를 5.3 GHz로 설정하였으며, 이에 따른 변위변화율은 -0.222 radian/mm 로 나타난다.

연속된 GB-SAR 영상에서 얻어진 위상의 변화는 phase unwrapping 과정을 거쳐 거리의 변화, 즉 산란체의 변위로 계산된다. 이러한 방법을 식 (2)에서와 같이 위상을 차분한다 하여 차분간섭기법(Differential Interferometry)라 통상적으로 지칭한다. GB-SAR를 이용한 DInSAR 기법은 레일을 통한 정확한 반복 측정을 통해 산란체의 변위 및 구조적 안정성을 정밀하게 측정할 수 있다.

3) 변위측정 결과

Fig. 3은 반사체의 실제 변위와 GB-SAR 차분간섭기법에서 측정된 변위를 비교한 것으로서, 대각선은 실제변위와 측정변위가 일치하는 경우이다. Fig. 3(a)의 HH편파에서 반사체의 실제 변위가 -1, -6, -10mm인 경우, 실제 변위와 측정 변위의 오차는 1mm 이내로 나타나지만, -30, -40mm의 경우에는 약 2-3mm로 상대적으로 큰 오차를 보인다. 기타 편파에서 측정오차는 HH 편파에서와 같이 -1, -6, -10mm의 경우 1mm 이내로 나타났으며 VH편파의 경우 -30mm 이동 시의 오차까지 1mm 이내로 나타났다(0.62mm). 공통적으로 모든 편파에서의 최대 오차는 -40mm 이동 시로, HH, VV, VH, HV 편파 순서로 각각 2.72, 1.90, 1.36, 2.57mm로 나타났으며 각 편파별 RMS 오차는 각각 1.56, 1.12, 0.76, 1.45mm로 나타났다(Table 3).

Table 3. RMS errors between the measured and actual displacements before and after atmospheric humidity corrections

RMS error Polarization	Before Atmospheric Correction(mm)	After Atmospheric humidity Correction(mm)
HH	1.56	0.22
VV	1.12	0.62
VH	0.76	0.78
HV	1.45	0.47
Average	1.22	0.52

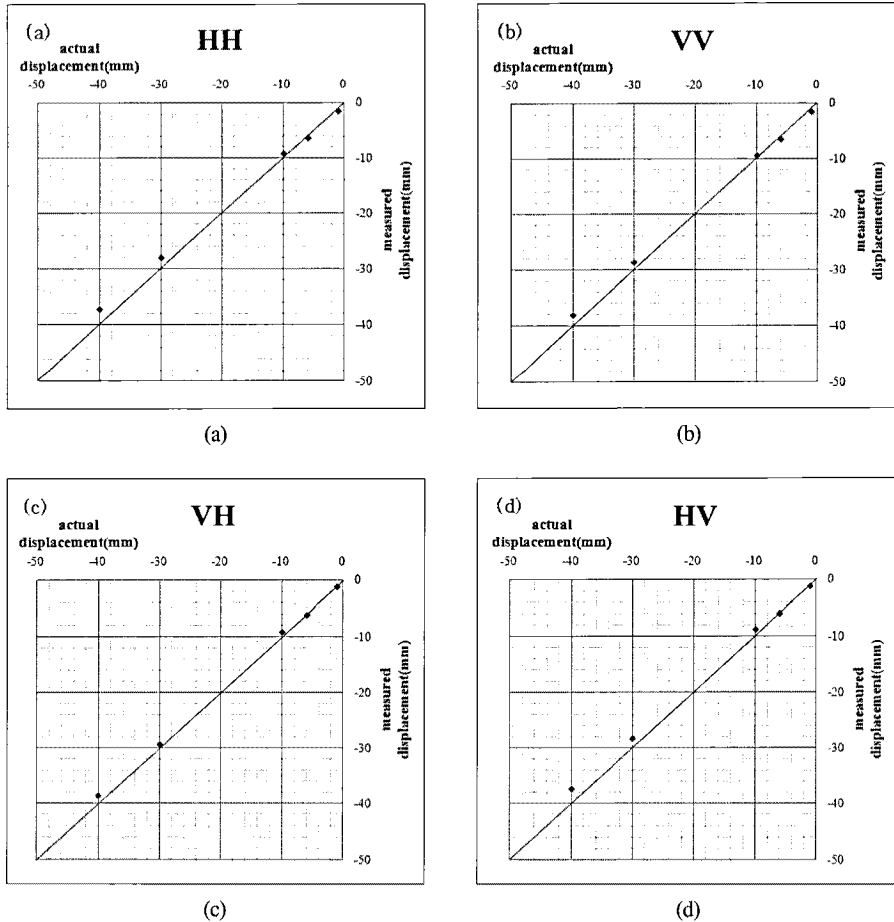


Fig. 3. Comparisons between the actual and measured displacements in (a) HH, (b) VV, (c) VH, and (d) HV polarization.

3. 대기습도보정

인공위성 SAR를 이용한 지표의 변위탐지 시 간섭쌍의 궤도에 시공간적 차이(기선)가 발생하기 때문에, 지구타원체, 지형고도, 대기 오차를 보정하여 정밀도를 높이고 있다. 그러나 GB-SAR 시스템의 작동 방식은 동일 안테나 위치에서 반복 측정이 이루어지므로 지구타원체 및 지형고도에 대한 위상의 보정은 생략이 가능하다. 하지만 마이크로파의 전파과정에서 발생할 수 있는 대기에 의한 효과는 여전히 보정의 대상이 된다. GB-SAR 시스템을 통한 변위 분석에 대한 이전 연구 중 Luzzi *et al.*(2007)과 Noferini *et al.*(2005) 그리고 Pipia *et al.* (2008) 에서도 온도와 습도 그리고 기압이 GB-SAR 위상측정에 영향을 미치는 것으로 확인한 바 있다.

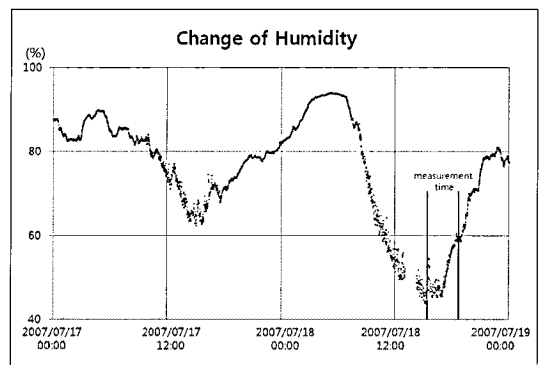


Fig. 4. Atmospheric relative humidity during the two days including the measurement time.

이 논문에서는 이와 같은 대기요소 중 가장 영향력이 높은 습도에 의한 마이크로파의 지연효과에 대해 분석하여 정밀도 향상의 여부를 확인하고자 하였다. 습도보

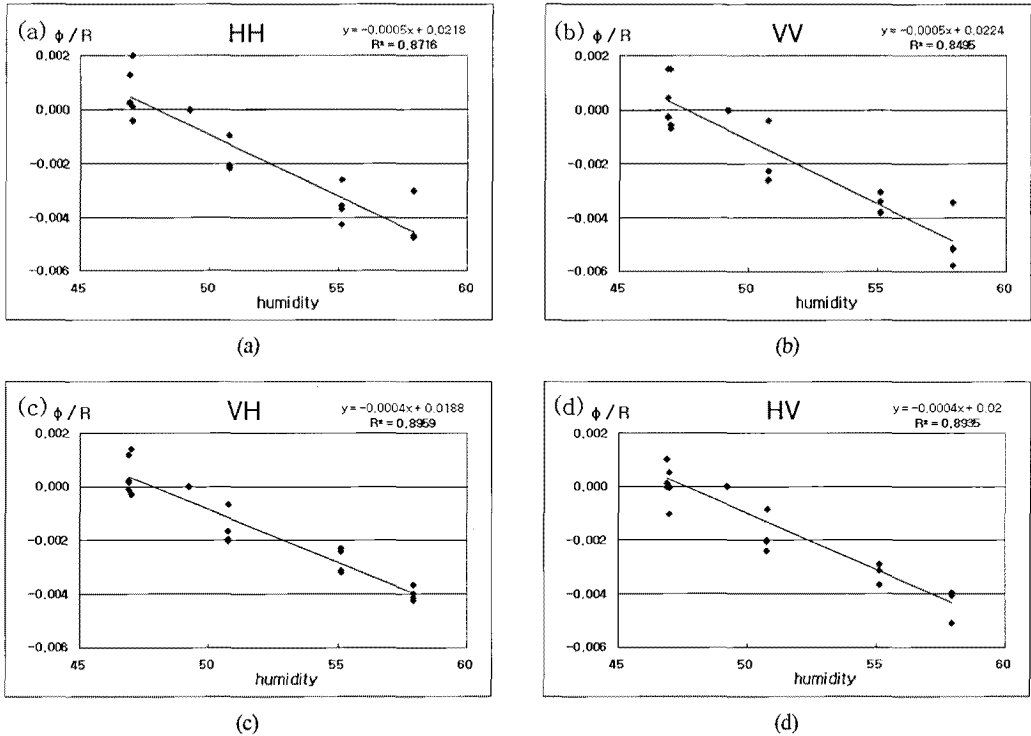


Fig. 5. Relationship between relative humidity and phase/range values extracted from the stable targets (4 targets \times 6 measurement = 24 data points) at each polarization.

정을 위해 실험 장소에서 약 1 km 떨어진 곳에 위치한 대전지방기상청의 분 단위 상대습도 자료를 획득하였다(기상청). 하루 동안의 습도 변화를 나타내기 위하여 실험이 수행된 약 2시간 30분을 포함한 7월 17일과 18일의 48시간 상대습도 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5는 상대습도에 따른 위상/거리를 비교한 그래프이다. 안정된 산란체로 선정된 4 개의 물체들은 시스템으로부터의 거리가 각각 다르므로, 이 효과를 상쇄시키기 위해 위상을 거리로 나눈 값과 대기 중 습도의 상관관계를 알아본 것이다. 그 결과 매우 높은 상관성을 보이는 것을 알 수 있으며, 선형적인 회귀분석 통해 아래의 습도보정식을 얻었다.

$$\frac{\Delta\phi}{R} = -4\pi(ah + b) \quad (4)$$

여기서, a 와 b 는 습도보정 상수이며 습도(h)는 백분율로 나타낸다. 각 편파에서 획득한 24개의 위상값(4 targets \times 6회 측정)을 이용하여 편파별로 습도보정식을 각각 산출하였다(Table 2). 이 때, 각 식에서 적용된 습도(h)의 범위는 47~58%이다.

Fig. 6은 습도보정 후 실제변위와 측정변위를 비교한 결과이며, 각각의 RMS 오차는 Table 3에 나타내었다. 실제변위와 측정변위의 RMS 오차는, 습도보정 전 평균적으로 1.22mm이었으나 보정 후에는 0.52mm로 줄어들어, GB-SAR를 이용한 산란체 변위 측정의 정밀도가 습도보정을 통해 향상되었음을 알 수 있었다.

이를 각 편파별로 살펴보면, 보정 후 HH 편파의 RMS 측정오차가 0.22mm로 가장 작았으며, VV, HV 편파에서도 측정 정밀도의 향상이 두드러졌다. 그러나 VH 편파의 경우 습도보정 후 측정오차가 오히려 커진 것을 볼 수 있다. 이러한 원인으로는 크게 두 가지를 들 수 있다. 먼저 이론적으로 교차편파(cross-polarization) 후방산란을 하지 않는 삼각삼면반사체의 특성 때문에 전반적으로 교차편파의 신호가 약했을 것으로 추정할 수 있다. 또한 안정된 산란체로 선정되어 습도보정식 유도에 사용된 물질의 재질과 모양이 각기 달라 편파별 특성을 정확하게 반영하지 못했을 가능성도 있다. 차후 실험에서는 동일한 재질과 모양의 산란체를 각각 고정과 변위 산란체로 설정하여 오차를 줄여야

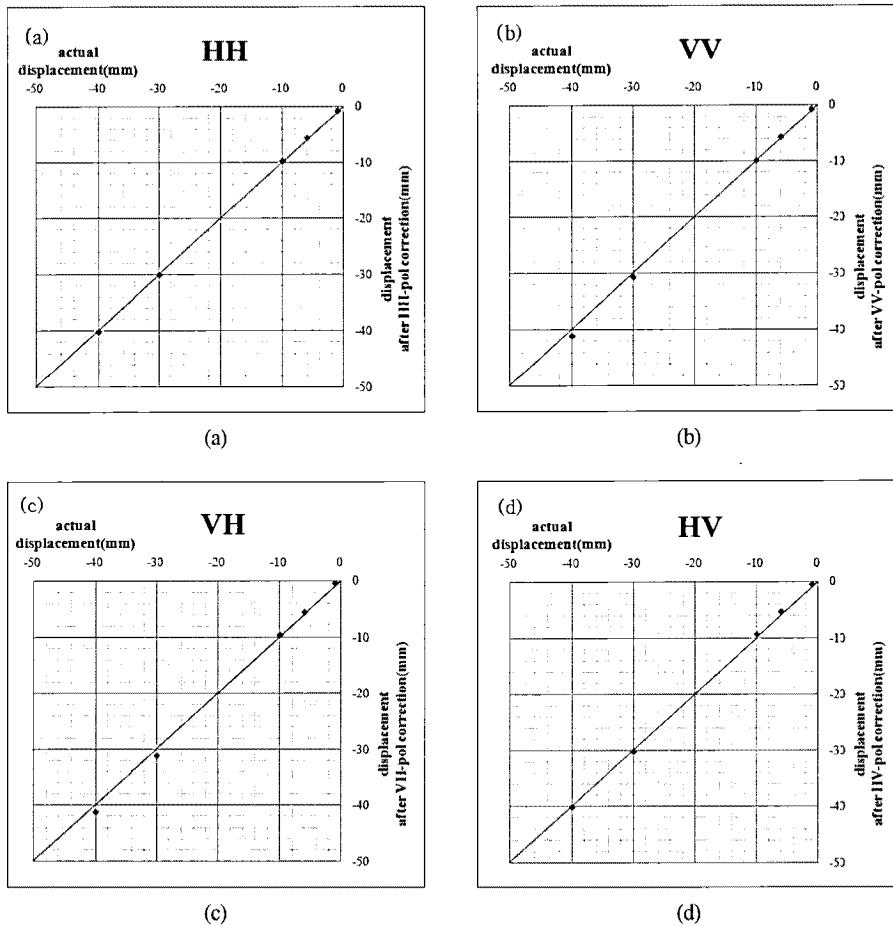


Fig. 6. Comparisons between the actual and the atmospherically corrected displacement in (a) HH, (b) VV, (c) VH, and (d) HV polarization.

할 것으로 보인다. 하지만 동일한 교차편파인 HV에서는 보정이 잘 이루어졌으므로 알 수 없는 또 다른 원인에 의한 것으로 판단할 수 있으며 이에 대한 연구가 더 수행해야 할 것으로 판단된다.

한편, 습도 뿐 만이 아니라 온도 및 기압과 안정된 산란체의 위상변화의 상관성도 살펴보았다. 그러나 온도는 습도와 서로 독립적이지 않았고, 기압과의 상관성은 그리 크지 않았다. 습도, 온도, 기압을 모두 고려한 대기 보정식을 실험적으로 구하기 위해서는 보다 많은 조건 하에서 얻어진 자료가 필요하며, 이는 향후 연구과제로 남아있다.

4. 결론

이 논문에서는 C-밴드 GB-SAR 시스템을 이용하여 시스템으로부터 약 160m 지점에 위치한 삼각삼면반사체의 인위적 변위를 측정하였다. 측정변위를 실제변위와 비교한 결과 RMS 오차는 모든 편파를 평균했을 때 1.22mm였으며, 40mm 최대변위일 때의 최대 측정오차는 2.72mm로 나타났다. 대기 중 습도와의 상관성을 고려하여 습도보정을 실시한 결과 RMS 오차는 평균적으로 0.52mm로 줄어들었다. 이를 통해 GB-SAR 시스템의 변위 측정 능력을 확인하였으며, 습도보정이 이루어질 경우 밀리미터 이하의 측정 정확도를 확보할 수 있는 것을 알 수 있었다.

이 실험을 통해 GB-SAR 시스템은 밀리미터 이하의

정밀도가 요구되는 자연산란체나 인공구조물의 변위 측정 및 안정성 평가 분야에 적용이 가능할 것으로 예상된다. 이를 위해서는 GB-SAR 시스템의 현장 적용성, 개별 산란체의 산란 특성 및 거동 특성에 따른 측정의 오차에 대한 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2010년도 한국지질자원연구원의 정부출연 사업인 '광상 맞춤형 자원탐사 채광 최적기술개발(GP2009-023)'의 지원을 받았다.

참고문헌

- 이훈열, 2006. SAR 관련 논문 통계 분석에 의한 SAR 시스템, 기술, 활용분야 고찰, 대한원격탐사학회지, 22(2): 153-174.
- 이훈열, 조성준, 성낙훈, 김정호, 2007a. GB-SAR의 개발(I): 시스템 구성과 간섭기법, 대한원격탐사학회지, 23(4): 237-245.
- 이훈열, 조성준, 성낙훈, 김정호, 2007b. GB-SAR의 개발(II): 영상화 기법, 대한원격탐사학회지, 23(4): 247-256.
- 기상청, 지상관측자료-지역별상세관측자료(AWS), 대전, 온라인 http://203.247.66.10/weather/observation/aws_table_popup.jsp (accessed 07 April, 2010).
- Abellan, A., Vilaplana, J.M., Martinez, J., 2006. Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Nuria(Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering geology*, Vol.88(3-4), 136-148.
- Casagli, N., P. Farina, D. Leva, G. Nico, and D. Tarchi, 2003. Ground-Based SAR interferometry as a tool for landslide monitoring during emergencies. 2003 IGARSS, Toulouse, France, 21-25 July, 2003. Vol.4, 2924-2926.
- Lee, J. J and M. Shinozuka, 2006. A vision-based system for remote sensing of bridge displacement, *NDT&E International*, 39(5): 425-431.
- LI, H. N., D. S. Li, and G. B. Song, 2004. Recent application of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering, *Engineering Structures*, 26(11):1647-1657.
- Leva, D., G. Nico, D. Tarchi, J. F. Guasch, and J. Sieber, 2003. Temporal analysis of a Ground-Based SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 745-752.
- Luzi, G., M. Pieraccini, D. Mecatti, L. Noferini, G. Guidi, F. Moia, and C. Atzeni, 2004. Ground-Based Radar interferometry for landslides monitoring: Atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11): 2454-2466.
- Luzi, G., M. Pieraccini, D. Mecatti, L. Noferini, G. Macaluso, A. Tamburini and C. Atzeni 2007. Monitoring of an Alpine glacier by means of Ground-Based SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 4(3): 495-499.
- Monserat, O. and Crosetto, M., 2008. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1), 142-154.
- Nickitopoulou, A., K. Protopsalti, and S. Stiros, 2006. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises, *Engineering Structure*, 28(10): 1471-1482.
- Noferini, L., M. Pieraccini, D. Mecatti, G. Luzi, C. Atzeni, A. Tamburini, and M. Broccolato, 2005. Permanent Scatterers analysis for atmospheric correction in Ground-Based SAR

- interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(7): 1459-1471.
- Noferini, L., M. Pieraccini, D. Mecatti, G. Macaluso, C. Atzeni, M. Mantovani, G. Marcato, A. Pasuto, S. Silvano and F. Tagliavini, 2007. Using GB-SAR technique to monitor show moving landslide, *Engineering Geology*, 95(3-4): 88-98.
- Pieraccini, M., D. Mecatti, L. Noferini, G. Luzi, G. Franchioni, and C. Atzeni, 2002. SAR interferometry for detecting the effects of earthquakes on buildings, *NDT&E International*, 35(2002): 615-625.
- Pipia, L., X. Fabregas, A. Aguasca, and C. L. Martinez, 2008. Atmospheric artifact compensation in Ground-Based DInSAR application, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 5(1): 88-92.
- Tamura, Y., M. Matsui, L. C. Pagnini, R. Ishibashi, and A. Yoshida, 2002. Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(12-15): 1783-1793.
- Tarchi, D., H. Rudolf, G. Luzi, L. Chiarantini, P. Coppo, and A.J. Sieber, 1999. SAR interferometry for structural changes detection: A demonstration test on a dam, 1999 IGARSS, Hamburg, Germany, 28 June-2 July, 1999. Vol.4, 1522-1524.
- 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.