

## GB-SAR 간섭기법으로 측정된 X-밴드 대기 굴절률의 상대습도, 기온 및 기압에 따른 변화

이재희\*\*\* · 이훈열\*† · 조성준\*\* · 성낙훈\*\* · 김광은\*\*

\*강원대학교 지구물리학과, \*\*한국지질자원연구원 광물자원연구본부

### Change of Refractive Index of Air in X-band due to Atmospheric Humidity, Temperature and Pressure measured by GB-SAR Interferometry

Jae-Hee Lee\*\*\*, Hoonyol Lee\*†, Seong-Jun Cho\*\*, Nak-Hoon Sung\*\* and Kwang-Eun Kim\*\*

\*Department of Geophysics, Kangwon National University

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

**Abstract :** In this paper, we analyzed the phase change of 5-triangular trihedral corner reflectors by using X-band Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) system. Each reflector was set as a stationary target at a different distance from the system. We obtained total 123 full-polarization images during 40 hours continuously at 20 minute interval. Results of SAR interferometric analysis showed phase changes of maximum 2 radians and followed similar pattern with atmospheric data. Through a GB-SAR phase formula that includes refractive index in the air, we performed regression analysis for refractive index as a function of atmospheric humidity, temperature and pressure. As a result, refractive index of air in X-band showed relatively high coefficient of determination with humidity and temperature (0.72 and 0.76 on average, respectively) but not so with pressure (0.34). The refractive index of air in X-band changed by  $3.14 \times 10^{-5}$  during the measuring time with a humidity range of 50% ~ 90% and a temperature range of  $-1^{\circ}\text{C} \sim 9^{\circ}\text{C}$ . We expect that a total expression of refractive index of air including humidity, temperature and pressure can be calculated when more extensive data would be collected at various atmospheric conditions.

**Key Words :** synthetic aperture radar, interferometry, humidity, temperature, pressure, refractive index

**요약 :** 이 논문은 X-밴드 Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) 시스템을 이용하여 5개의 삼각삼면반사체(triangular trihedral corner reflector)의 시간에 따른 위상변화를 분석하였다. 각각의 반사체는 시스템으로부터의 거리를 다르게 설정하여 고정시켰고 모든 편파에 대한 영상을 20 분 간격으로 123 회, 총 40 시간 동안 연속 측정하였다. SAR 간섭기법(interferometry)을 이용한 분석 결과 반사체는 고정된 상태임에도 불구하고 시간에 따라 최대 2 radian의 위상차가 나타났으며 기상요소와 유사한 추세를 보였다. 대기 중 굴절률을 고려한 GB-SAR 위상관계식을 통하여 대기 중 습도, 기온 및 기압의 변화

에 따른 마이크로파 굴절률의 변화 양상을 회귀분석을 통하여 살펴보았다. 그 결과 X-밴드의 굴절률은 습도 및 기온과 비교적 높은 선형적 관계를 보였으나(평균 결정계수 각각 0.72, 0.76) 기압과는 그렇지 않았다(결정계수 0.34). 실험 기간 동안 습도는 약 50 %에서 90 %까지, 기온은 -1 °C에서 9 °C까지 변화였으며 X-밴드 굴절률의 변화는 약  $3.14 \times 10^{-5}$ 였다. 향후 보다 다양한 기상조건에서 실험이 이루어진다면 습도, 기온 및 기압 조건에 따른 굴절률의 포괄적 관계식을 유추할 수 있을 것으로 기대된다.

## 1. 서론

주로 인공위성이나 항공기에 탑재되어 운용되는 SAR(Synthetic Aperture Radar)시스템을 최근 지상에서도 설치하여 운용하는 경우가 늘고 있다. 이를 지상 SAR(Ground-Based SAR)시스템이라고 하며 안테나의 움직임은 대부분 인공위성 및 항공기와 비슷하게 선형으로 유지되므로 Linear-SAR라고도 한다. 이러한 GB-SAR 시스템은 인공위성이나 항공기 SAR와는 다르게 이동 중에 정지 상태에서 마이크로파를 송수신 할 수 있어 도플러 효과를 배제할 수 있고 영상화 정밀도가 향상된다(이훈열 외, 2007a). 또한 연구 목적에 따른 장비 교체가 용이하고 반복측정시간 및 각종 간섭기법을 위한 시스템 구성의 선택도 자유로워진다. GB-SAR 시스템은 이러한 장점을 바탕으로 산사태 및 눈사태 감지(Leva et al., 2003; Luzi et al., 2007; Tarchi et al., 2003)와 각종 시설물의 안정성 평가(Pieraccini et al., 2002) 등 다양한 분야에서 적용되고 있다.

GB-SAR 간섭기법을 적용할 때 측정 오차를 최소화 하는 것은 매우 중요하다. 본 연구와 동일한 모션 장치를 이용하여 C-밴드 영역에서 반사체의 변위를 측정하는 연구인 이재희 외(2010)에서 실제 변위가 40 mm일 때 GB-SAR 시스템을 통한 측정 변위의 최대 오차는 약 2 mm로 나타났으나 대기습도보정을 실시하여 오차를 밀리미터 이하로 감소시킨 바 있다. Luzi et al.(2004), Pipia et al.(2008)에서는 습도 외에 기온과 기압을 포함하여 대기 굴절률 변화에 따른 보정을 실시하였으나 Noferini et al.(2005)은 습도만을 이용한 보정으로 정밀도를 향상시켰다. 한편 Zebker et al.(1997)과 Noferini et al.(2007)에서는 대기요소 중 습도가 대기 굴절률 변화에 가장 큰 영향을 끼친다고 밝혔다.

한편, 이재희 외(2010)에서는 변위측정을 위해 삼각 삼면반사체를 움직여가며 실험하였으며 대기습도보정

을 위해서 연구지역 내에 위치한 구조물의 신호를 사용하였다. 총 4 개의 구조물을 사용하였는데 동일한 형태와 재질, 크기는 아니었다(나무 1, 지자기 관측함 3). 또한 실험은 약 2 시간 30 분에 걸쳐 총 6 회 수행되었는데 습도는 47~58 %로 약 11 %의 습도변화만이 발생하였다.

본 연구에서는 동일한 모양과 재질, 크기로 제작된 5 개의 고정된 삼각삼면반사체를 이용하여 보다 큰 습도 변화를 관찰할 수 있도록 약 40 시간 동안 모니터링 하였다. GB-SAR 위상지연 현상을 관찰하고 이를 통해 습도와 기온 및 기압의 변화가 X-band의 대기 중 굴절률에 미치는 영향을 분석하였다. 이 실험에 사용된 X-밴드는 2011년 발사 예정인 Kompsat-5 COSI와 비슷한 주파수 대역으로, 향후 인공위성 SAR의 대기에 의한 신호지연을 검보정 하기 위한 기초연구로서도 의미를 갖는다.

## 2. GB-SAR 실험

### 1) 실험 개요

실험에 사용된 레일 시스템은 한국지질자원연구원 건물의 옥상에 설치되었고 관찰방향은 잔디밭 일대로 이재희 외(2010)와 동일하게 설정하였다(Fig. 1). 삼각 삼면반사체의 배치는 시스템으로부터 135, 147, 157, 167, 178 m이며, 편의를 위해 가까운 것으로부터 A, B, C, D, E로 명명하였다(Fig. 1). 이재희 외(2010)의 경우 물체의 변위 탐지 정밀도 파악을 위해 반사체를 움직이며 측정하였으나, 본 연구의 경우 대기습도변화에 의한 위상변화 분석이 목적이므로 반사체를 고정시켜 측정하였다. RF 시스템의 일부 장비는 이전 실험과 차이를 보이는데 이는 측정 주파수 대역이 C-밴드에서 X-밴드로 변경되었기 때문으로 안테나, 벡터 네트워크 분석기

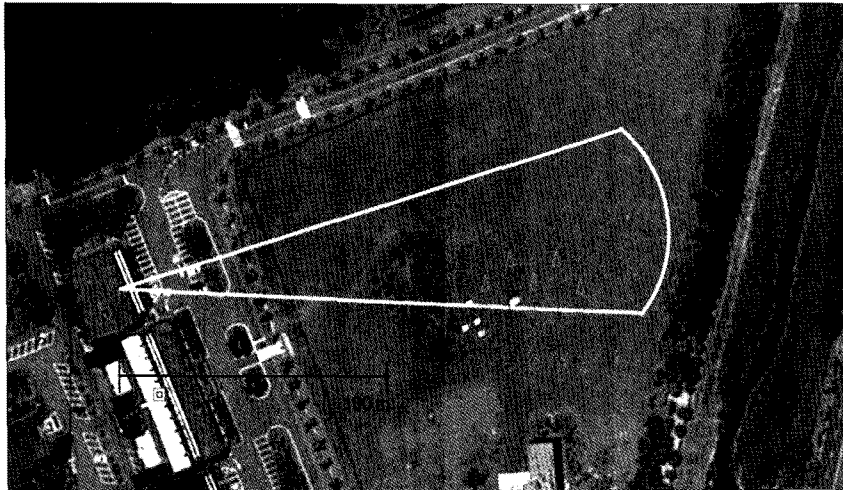


Fig. 1. Photo of the experiment location. 5 red triangles indicate triangular trihedral corner reflectors that used as stationary targets.

Table 1. Parameters for the GB-SAR Experiment

Date and Time		5 PM Feb. 6, 2009~9 AM Feb. 8, 2009 (40 hours)
Atmosphere	Humidity	50.4~90.1 %
	Temperature	-1.2~9.0 °C
	Pressure	1020.9~1026.2 hPa
Range	Center frequency	9.65 GHz
	Bandwidth	600 MHz
	Polarization	HH, VV, HV, VH
	Range sampling	1601
	Power	37 dBm
Azimuth	Azimuth scan length	5 m
	Azimuth step	5 cm
	Azimuth sampling	101

(VNA) 그리고 마이크로파 앰프가 변경되어 사용되었다. 중심주파수는 9.65 GHz, 밴드 폭은 9.35~9.95 GHz로 설정하였다. VNA는 Agilent E8362B로, 앰프는 6 W의 파워를 가지는 X-밴드용을 사용하였다. 모든 실험 변수는 Table 1에 나타내었다.

실험은 HH, VV, VH, HV의 모든 편파에 대해 2009년 2월 6일 오후 5시부터 8일 오전 9시까지 총 123 회 연속 수행되었다. 한 번의 측정에 소요되는 시간은 약 20 분으로 모든 실험을 수행하는데 걸린 시간은 약 40 시간이다. 데이터 획득은 모든 편파에서 이루어졌는데 대기 굴절률의 변화가 편파에 따라 다르게 나타나는지 확인하기 위함이었다.

## 2) GB-SAR 영상화 및 위상변화

획득된 데이터는 Deramp-FFT 알고리즘(이훈열 외, 2007b)을 이용하여 영상화하였으며 모든 편파에 대한 amplitude 영상을 Fig. 2에 예시하였다. Fig. 2에서 송신과 수신 신호가 동일한 동종편파(HH, VV) 영상과 송·수신이 다른 교차편파(VH, HV) 영상은 눈에 띄는 차이를 보인다. 동종편파 영상에서 5개의 반사체의 신호는 모두 잘 나타났으나, 교차편파 영상의 경우 모든 반사체의 신호는 동종편파의 그것에 비해 약하게 나타났으며 이 중 B와 C는 식별이 불가능하다. 이러한 결과는 안정된 신호 획득을 위해 사용한 반사체의 형태가 삼각삼면반사체로써 이론적으로 교차편파에서 후방산란을 하지 않기 때문으로 해석된다.

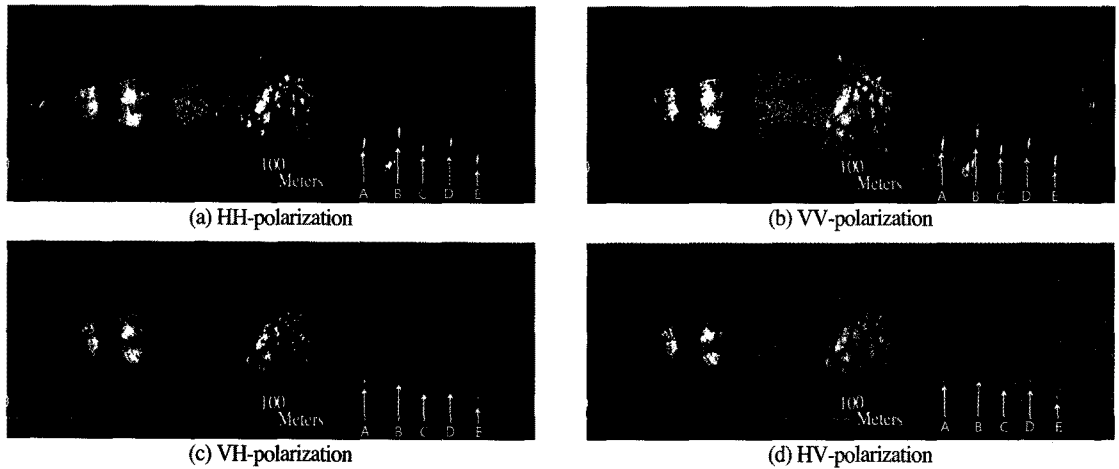


Fig. 2. GB-SAR amplitude images.

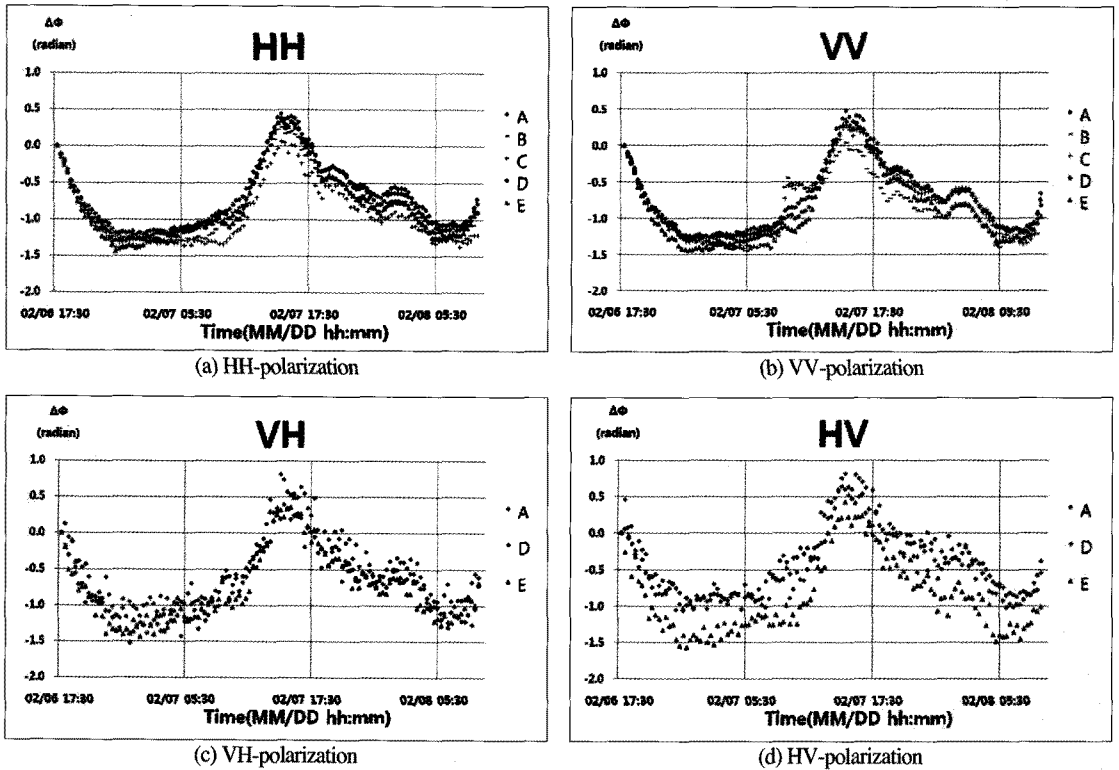


Fig. 3. Phase changes relative to the first image in (a) HH, (b) VV, (c) VH and (d) HV during the experiment.

교차편파에서 식별이 불가능하였던 B, C 반사체는 위상 획득 시 제외하여 동종편파의 경우 615개(123회 × 5개의 반사체)의 위상을, 교차편파의 경우 369개(123회 × 3개의 반사체)의 위상을 획득하였다. Fig. 3에는 모든 편파에서의 시간에 따른 위상변화를 그래프로 나타내었다. 모든 편파에서 최대 위상 차이는 약 2 radian(-1.5~0.5

radian)으로 나타나 편파에 따른 차이는 크지 않았으며, A~E 반사체의 위상차이도 크지 않았다.

모든 편파에서 유사한 흐름을 보이는 것이 있는데 일정한 주기를 가지며 최대와 최소치를 반복하고 있는 것이 특징이다. 실험차수 1과 70은 최소 위상 차이를, 30과 100은 최대 위상 차이를 보이고 있는데 20분의 실험

시간을 고려할 때 모두 약 24시간의 시간차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉 위상변화는 24 시간을 주기로 일정하게 증가와 감소를 반복하고 있다고 판단할 수 있다.

### 3) 위상 분석

GB-SAR 영상에서 위상은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서  $\lambda$ 는 진공상태에서 마이크로파의 파장,  $R$ 은 시스템에서 반사체까지의 거리,  $n$ 은 대기의 굴절률을 나타낸다. 대기 굴절률은 대기 중 습도와 기온 및 기압의 함수로서 각 인자 간에 영향을 끼치며 굴절률 변화를 유도한다. 이는 약 24 시간의 주기로 증가와 감소를 반복하는 위상변화 결과와 부합한다. 안정된 신호획득을 위해 반사체를 고정시켰을 때 발생하는 GB-SAR 영상의 위상변화는 마이크로파의 대기 중 굴절률에 따른 것으로 해석할 수 있으며, 위상차는 아래와 같다.

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}\Delta nR \quad (2)$$

따라서 실험이 이루어진 때의 대기 중 습도와 기온 그리고 기압 데이터를 획득하여 동일 시간의 위상변화와 비교함으로써 각 대기요소와 위상변화의 관계를 정량적으로 분석할 수 있다.

### 3. 대기요소와 굴절률

위상변화와 비교를 할 대기요소는 실험장소와 직선 거리로 약 1km 지점에 위치한 대전지방기상청의 자동 관측시스템(Automatic Weather System, AWS)의 자료를 이용하였다. AWS 자료는 습도와 기온 그리고 기압을 분단위로 획득한 것으로, 각각의 실험이 수행되는 시간에 대하여 평균값을 그 영상에서의 대기요소 값으로 가정하였다. Fig. 4의 (a), (b), (c)는 실험이 수행된 시간에 따른 각 기상요소의 변화를 나타낸다. (a)와 (b)는 각각 상대습도와 기온을 나타내며 모두 24 시간을 주기로 각각 50%~90%, -1℃~9℃의 범위에서 일정한 반복양상을 보인다. 하지만 (c) 기압은 오전까지의 변화는 뚜렷한 반복양상을 따르지 않다가 실험 후반부인

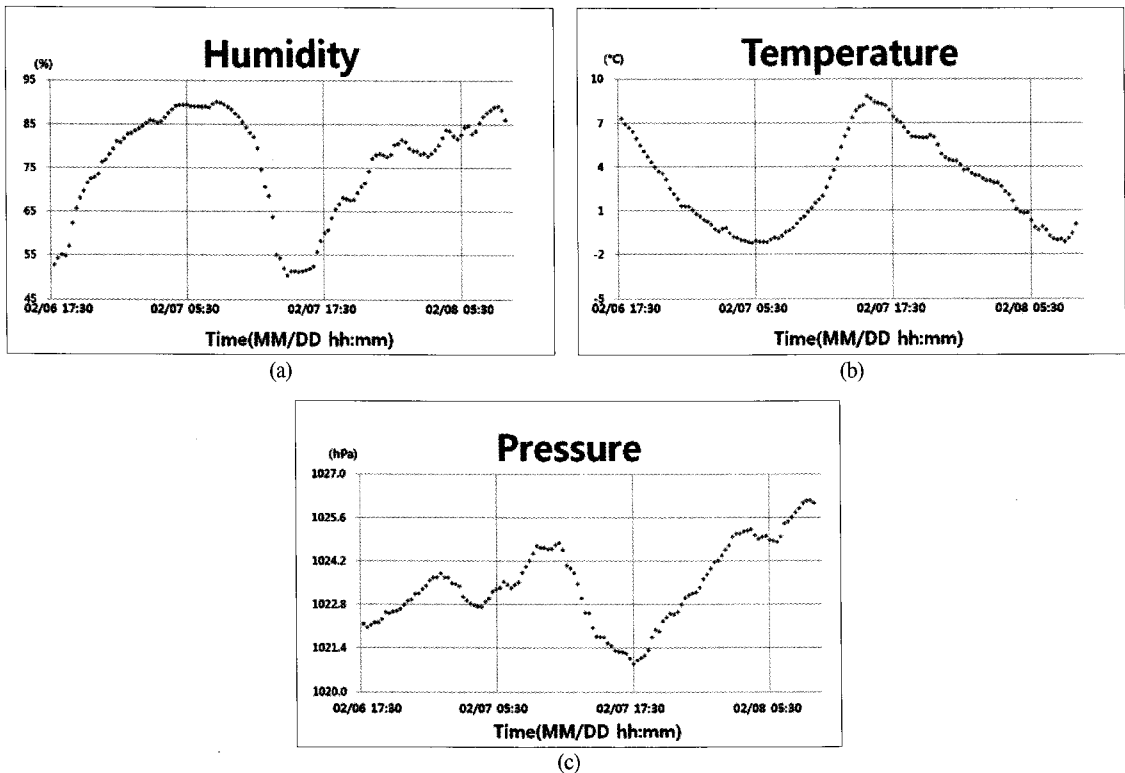


Fig. 4. Atmospheric conditions during the GB-SAR experiment. (a) Atmospheric humidity, (b) Temperature and (c) Pressure.

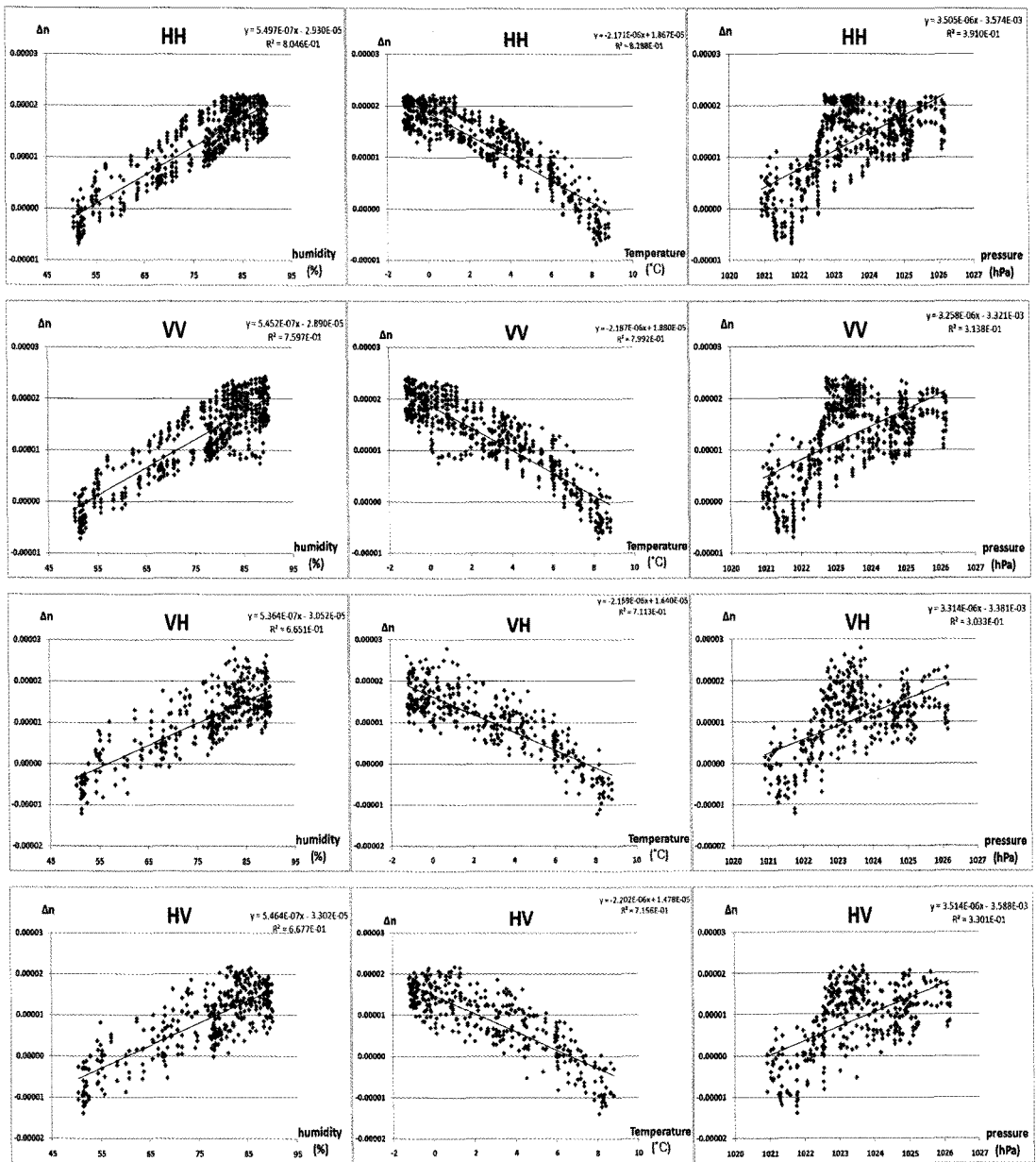


Fig. 5. Changes of refractive index of air in X-band as a function of humidity, temperature and pressure at various channels.

2월 7일 오후부터는 습도의 변화양상과 비슷한 모습을 보이고 있다.

실험 간 발생한 습도, 기온, 기압의 변화와 위상변화의 상관관계를 확인하고자 하였는데 이때는 각 요소만의 1차 함수로 가정하여 분석하였다. 식 (2)를 굴절률의 변화에 대한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta n = -\frac{\lambda}{4\pi R} \Delta \phi \quad (3)$$

예를 들어 157m 지점에 위치한 반사체에서의 최대 위상변화인 2 radian은 굴절률이 약  $3.14 \times 10^{-5}$  변화한 것으로 판단할 수 있다.

각 대기요소와  $\Delta n$ 의 관계를 그래프로 표현하였으며 모든 편파에 대한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이를 아

Table 2. Results of regression and coefficients of determination ( $R^2$ ) between refractive index of air in X-band and humidity ( $h$ ), temperature ( $T$ ) and pressure ( $P$ ).

$$\Delta n = ah + b, [50.4 \leq h \leq 90.1\%]$$

$$\Delta n = cT + d, [-1.2 \leq T \leq 9.0^\circ\text{C}]$$

$$\Delta n = eP + f, [1020.9 \leq P \leq 1026.2\text{hPa}]$$

	humidity (h)			temperature (T)			pressure (P)		
	$a \times 10^7$	$b \times 10^5$	$R^2$	$c \times 10^6$	$d \times 10^5$	$R^2$	$e \times 10^6$	$f \times 10^3$	$R^2$
HH	5.497	-2.930	0.81	-2.171	1.867	0.83	3.505	-3.574	0.39
VV	5.452	-2.890	0.76	-2.187	1.880	0.80	3.258	-3.321	0.31
VH	5.364	-3.052	0.67	-2.159	1.640	0.71	3.314	-3.381	0.30
HV	5.464	-3.302	0.67	-2.202	1.478	0.72	3.514	-3.588	0.33

래와 같은 1차식의 관계로 놓고 추세를 구하였다.

$$\Delta n = ah + b, [50.4 \leq h \leq 90.1\%]$$

$$\Delta n = cT + d, [-1.2 \leq T \leq 9.0^\circ\text{C}] \quad (4)$$

$$\Delta n = eP + f, [1020.9 \leq P \leq 1026.2\text{hPa}]$$

여기서  $a, b, c, d, e, f$ 는 추세선 상수,  $h$ 는 대기 중 상대습도,  $T$ 는 기온,  $P$ 는 기압이다. 산출된 각 기상요소별 추세선 상수와 결정계수를 Table 2에 나타내었다.

굴절률의 변화와 습도 그리고 기온의 변화는 모든 편파에서 높은 선형적 결과를 나타냈다. 습도의 경우 동종 편파에서는 비교적 높은 결정계수(HH: 0.81, VV: 0.76)를 보였으나 교차편파에서는 이보다 다소 낮은 결정계수(VH, HV 모두 0.67)를 보였다. 이러한 결과는 기온을 이용한 경우도 동일하여 HH와 VV편파에서의 결정계수는 각각 0.83, 0.80이고 VH와 HV편파에서는 각각 0.71, 0.72의 값을 나타냈다. 결과적으로 습도와 기온의 경우는 모든 편파에서 위상변화와 비교적 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 하지만 기압의 경우는 모든 편파에서 0.4 이하의 낮은 결정계수를 보여 기압의 변화는 굴절률과 비교적 큰 관련이 없음을 알 수 있었다.

## 5. 결론

X-밴드 GB-SAR 시스템을 이용하여 습도와 기온 그리고 기압의 영향을 받는 굴절률 변화와 위상변화의 관계를 파악하였다. 안정된 신호 획득을 위해 고정된 상태의 삼각삼면 반사체를 사용하였으며, 모든 반사체는

시스템과의 거리를 다르게 설정하였다. 동종편파인 HH 편파와 VV편파에서는 모든 반사체의 탐지가 가능했지만 VH와 HV편파의 일부에서는 불가능하였다.

반사체의 위상변화는 크게 시스템으로부터의 거리와 시간에 따라 발생하였다. 약 45 m 간격으로 놓인 두 반사체의 최대 위상 차이는 약 0.26 radian을 보였으나, 동일 지점에서 시간에 따른 최대 위상 차이는 약 1.8 radian을 보여 시간에 따른 변화폭이 더 큰 것으로 나타났다.

각 기상요소와 굴절률 변화의 관계를 일차식으로 표현하여 이때의 기울기 및 결정계수를 산출하였다. 결정계수를 통해 굴절률 변화는 습도와 기온의 영향은 많이 받으나 기압의 경우 그렇지 않은 것으로 판단하였다. 특히 기온의 경우가 가장 큰 상관성이 있는 것으로 나타났는데 이는 습도가 가장 큰 영향을 끼친다는 다른 연구자들의 선행논문과는 상이한 결과였다. 하지만 본 연구에서 사용한 데이터는 2월이라는 한시적 시점에서 얻은 결과이므로, 보다 다양한 기상조건에서 획득된 데이터 사용이 필요할 것으로 판단되며 이 경우 포괄적인 결론 도출이 가능할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 2011년도 한국지질자원연구원의 정부출연 사업인 '광상 맞춤형 자원탐사 채광 최적기술개발'의 지원을 받았다.

## 참고문헌

- 이재희, 이훈열, 조성준, 성낙훈, 김정호, 2010. GB-SAR 간섭기법을 이용한 반사체의 인위적 변위 탐지 및 대기습도보정, 대한원격탐사학회지, 26(2):123-131
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Zebker, H. A., P. A. Rosen, and S. Hensley, 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *Journal of Geophysical Research*, 102(B4):7547-7563