

영상레이더에 의해 관측된 부산시 사상구 지역의 지반침하

김 상완¹⁾ · 홍 상훈¹⁾ · 정 한철¹⁾ · 이 창욱¹⁾ · 원 중선¹⁾

1. 서 론

영상레이더 SAR (Synthetic Aperture Radar)를 이용한 레이더 interferometry (InSAR) 기술은 지난 1990년대 동안 지표의 고도 정보 추출 및 지진, 화산, 빙하, 지반침하 등에 의한 표면산란체의 미세한 변위와 대기층과 관련된 연구 등 많은 분야에 응용되어 왔다[1][2][3]. 지반 침하는 세계 여러 곳에서 발생하고 있으며, 대표적인 침하의 원인으로는 지진 및 화산, 지하 시설물의 건설, 폐광산의 공동, 그리고 지하수 유출 등이 있다. 전통적으로 지반침하는 정밀한 측량조사로 관측되는데, 측량은 고정밀도를 가지고 선택된 지역을 관측할 수는 있으나 넓은 지역에 적용할 경우에는 많은 시간과 비용이 요구되며, 현장조사계획 수립을 위해 침하지역에 대한 사전 정보가 필요하다. DInSAR(Differential SAR Interferometry) 기술은 수백 km² 이상의 넓은 지역을 수십 m의 공간해상도를 가지고 지반침하의 변위량을 수cm에서 수mm 까지 측정할 수 있다는 장점이 있다.

낙동강 하구 삼각주 지역은 우리나라에서 가장 연약지반 심도가 깊고 특성이 매우 다양한 충적 연약지반이다. 특히 부산시 사상구는 서쪽에 양산단층과 경계되고 있으며, 1990년대 부산시 제 2호 지하철 공사와 관련하여 침하현상이 발생하기도 하였다. 본 연구는 부산시 사상구 일대(Fig. 1)를 JERS-1 및 RADARSAT SAR 영상을 이용하여 지반침하 현상을 관측하는데 목적이 있다.

2. 자료처리

두 개의 SLC(Single Look Complex) SAR 자료를 이용하여 지표의 변위를 관측하기 위한 관계식은 다음과 같다.

$$\phi_{diff} = \phi_m - \phi_s - \phi_f - \phi_{topo}, \quad (1)$$
$$\Delta z = -\phi_{diff} \frac{\lambda}{4\pi}$$

여기서, ϕ_m 은 주영상의 위상, ϕ_s 는 부영상의 위상, ϕ_f 는 지구타원체에 의한 위상, ϕ_{topo} 는 지형의 고도변화에 의한 위상을, 그리고 Δz 는 위성관측방향으로의 지표 변위값을 나타낸다. λ 는 위성 센서의 파장으로 JERS-1의 경우 L-band(23.5 cm)이며, RADARSAT의 경우 C-band(5.6 cm)이다. ϕ_f 를 정확히 구하기 위해서는 위성의 정밀

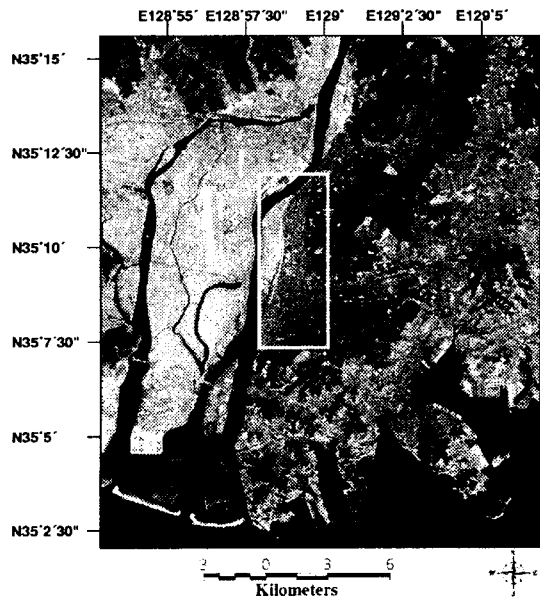


Fig. 1. IRS image. The inset rectangle is the region of the study area.

주요어 : 지반침하, SAR, DInSAR, 사상구

1) 연세대학교 지구시스템학과 (sangwan@yonsei.ac.kr)

한 레도정보가 요구되며, 또한 ϕ_{topo} 는 DEM과 정밀 레도정보로부터 계산된다. 연구지역의 DEM은 1:25,000 수치지도와 하나의 ERS-1/2 tandem pair를 이용하여 생성되었다. 사상구 지역은 지형의 고도변화가 거의 없는 평지이므로 ϕ_{topo} 의 계산은 무시될 수 있으나, JERS-1 및 RADARSAT 위성의 레도정보가 매우 부정확(일반적으로 수십~수백 m까지)하기 때문에 ϕ_f 를 정확하게 추정하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 정확한 baseline(두 레도간의 거리)을 계산하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다[4].

- 1 단계) 위성 레도와 DEM을 이용하여 시뮬레이션된 SAR 영상과 실제 SAR 영상의 정합을 통한 주·부영상의 레도 수정
- 2 단계) 두 SAR 자료를 이용하여 지구타원체에 의한 위상을 가지고 있는 interferogram(ϕ_{real}) 작성
- 3 단계) 수정된 master 레도를 이용하여 지리좌표계 DEM을 레이더좌표계 DEM으로 변환
- 4 단계) 초기 레도를 사용하여 영상중심에서의 baseline 길이와 각도(B_c, α_c), 및 azimuth 시간에 따른 baseline 길이 및 각도 변화율($\delta B, \delta \alpha$)을 계산
- 5 단계) 4개의 baseline parameter와 레이더좌표계 DEM을 이용하여 지구타원체 위상을 제거하지 않은 interferogram을 시뮬레이션(ϕ_{sim})
- 6 단계) ϕ_{real} 과 ϕ_{sim} 을 이용하여 differential interferogram($\phi_{diff} = \phi_{real} - \phi_{sim}$)을 계산
- 7 단계) differential interferogram에서 남아있는 선형의 위상성분 제거 및 연구지역 주변에서 변위가 없다고 판단되는 화소에서의 위상이 상수값을 갖도록 baseline 수정
- 8 단계) 정성적 판단(differential interferogram의 관찰)에 의해 5 단계~7 단계 반복수행

3. 결과해석

JERS-1 영상으로부터 생성된 interferogram 중 가장 대표적인 두 개의 결과(9505/9809와 9508/9808 pair)는 Fig. 2와 같다. 비록 이들 interferogram으로부터 지형에 의한 위상이 아직 제거되지 않았지만 부산시 사상구 일대는 거의 평지의 도심지역으로 지형에 의한 위상영향은 무시할 수 있다. 사상구에 나타나는 fringe의 부호는 이 지역에서 침하현상이 발생하고 있음을 나타내며, 양산단층대를 따라 남북방향으로 약 5 km의 연장성을 보이며 침하하고 있다. 지표

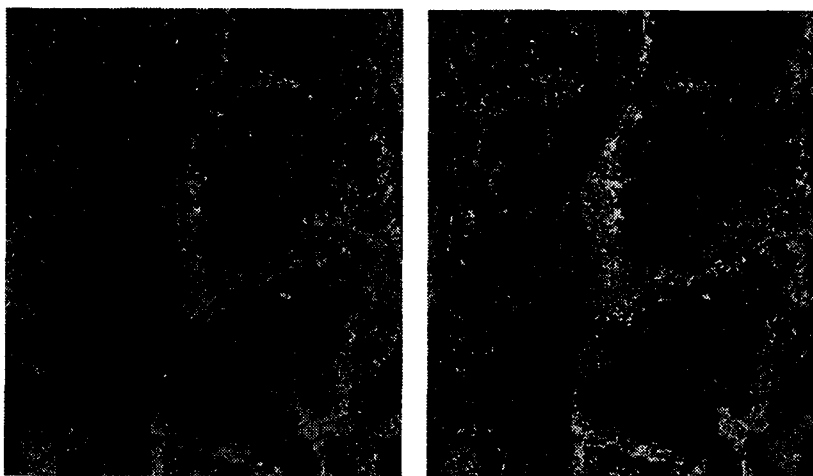


Fig. 2. JERS-1 interferogram: (a) 9505/9809 pair, (b) 9508/9808 pair.

변위량은 약 2/3 fringe로 이 지역에서 수직침하만이 발생하고 있다고 가정하면 약 10 cm의 침하에 해당한다. 침하대 중 사상구 북쪽의 덕포역 주변 침하는 대부분 1996년~1997년 사이에 집중되어 발생하였으며, 1997년 후반 이후로는 더 이상 침하현상이 진행되지 않고 있는 것으로 밝혀졌다[5]. 남쪽 감전동 일대의 침하현상은 최소 1995년부터 1998년까지 지속적으로 관측되고 있고 있으며, Fig. 2의 두 pair에서 주영상과 부영상 자료 획득 시간간격이 약 3년이므로 침하율은 3 cm/year에 해당한다.

JERS-1 위성이 1998년 10월에 운행이 중지되었기 때문에, JERS-1 위성 영상만으로는 1998년 이후의 침하현상을 관측할 수 없다. 연구지역에서 2000/09/25, 2002/09/15, 2002/11/02, 2003/01/13에 촬영된 4개의 RADARSAT 자료(ascending, F4 mode)가 획득되었다. RADARSAT 자료는 C-band이기 때문에 두 SAR 자료 획득 시간 차이에 의한 temporal decorrelation이 매우 크지만, 연구지역이 도심지역이기 때문에 baseline이 짧은 pair인 경우, 긴 시간간격의 pair에서도 긴밀도는 유지되었다. Fig. 3a는 2000/09/25에 획득된 RADARSAT 자료의 진폭영상이며, Fig. 3b는 DEM을 이용하여 시뮬레이션된 SAR 영상이다. 주 영상의 궤도정보가 이미 시뮬레이션 SAR 영상을 이용하여 보정되었으므로 Fig. 3a와 3b는 정확히 정합되어 있다. Fig. 3c는 GCPs와 SAR 시뮬레이션을 이용하여 보정된 궤도를 이용하여 생성된 0009/0301 pair의 초기 differential interferogram으로, 다수의 잔여 fringe가 관찰된다. 이는 궤도의 부정확성에 기인하는 것으로, 앞에서 제시한 방법을 이용하여 baseline을 보정하였으며, 결과는 Fig. 3d와 같다. 감전동 일대에서 지반침하를 지시하는 반원형태의 fringe가 관찰된다. Fig. 3e는 0009/0209 pair의 결과로 비록 시간간격은 0009/0301 pair 보다 짧지만 baseline이 길어 상대적으로 더 낮은 긴밀도를 보인다. 0009/0301 pair와 같이 감전동 일대에서 반원형태의 fringe가 관측된다. Fig. 3d의 A-A'를 따라 긴밀도와 unwrapped 위상은 Fig. 3f에 도시되었다. 9.3 radian의 위상증가를 보여주며, 이는 아래 식에 의해 5.8 cm의 수직변위에 해당된다.

$$\frac{5.6 \text{ cm}}{2\pi \times 2 \times \cos(44.28^\circ)} \times 9.3 = 5.8 \text{ cm}$$

0009/0301 pair의 시간간격이 865일 이므로 침하율은 약 2.5 cm/year에 해당한다.

JERS-1 및 RADARSAT 자료를 이용한 DInSAR 결과, 부산시 사상구 감전동 일대에서 1995년 이후로 지속적인 침하현상이 관측되었다. 또한 JERS-1과 RADARSAT을 이용하여 관측된 침하율은 각각 약 3 cm/year, 2.5 cm/year로 비슷한 정도를 보이고 있다. 침하원인으로는 지하수 유출(지하철공사 및 지하수 과다 개발 등)에 의한 침하의 가능성이 있으나, 현장조사자료 수집과 더불어 모델링을 통한 추후 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] Amelung F., Galloway D L., Bell J W., Zebker H A., Laczniak R J. (1999) Sensing the ups and downs of Las Vegas : InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, v. 27, p. 483-486.
- [2] Sneed, M., Ikehara, M. E., Balloway, D. L., and Amelung, F. (2001) Detection and Measurement of Land Subsidence Using Global Positioning System and Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1996-98. *Water-Resources Investigations Report 01-4193*, US Geological Survey, USA.
- [3] Wright, P. and Stow R. (1999) Detecting mining subsidence from space. *International Journal of Remote Sensing*, v. 20, p. 1183-1188.

- [4] 김상완, 이창욱, 홍상훈, 원중선 (2002) 인공위성레이더를 이용한 지반침하 관측. 2002년도 춘계 공동학술발표회 논문집, 한국자원공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리탐사학회, 대한지질학회, p. 286-289.
- [5] 김상완, 이창욱, 원중선 (2002) JERS-1 L-band SAR Interferometry를 이용한 연안매립지 지반침하 관측. 자원환경지질, 35권, p. 465-478.

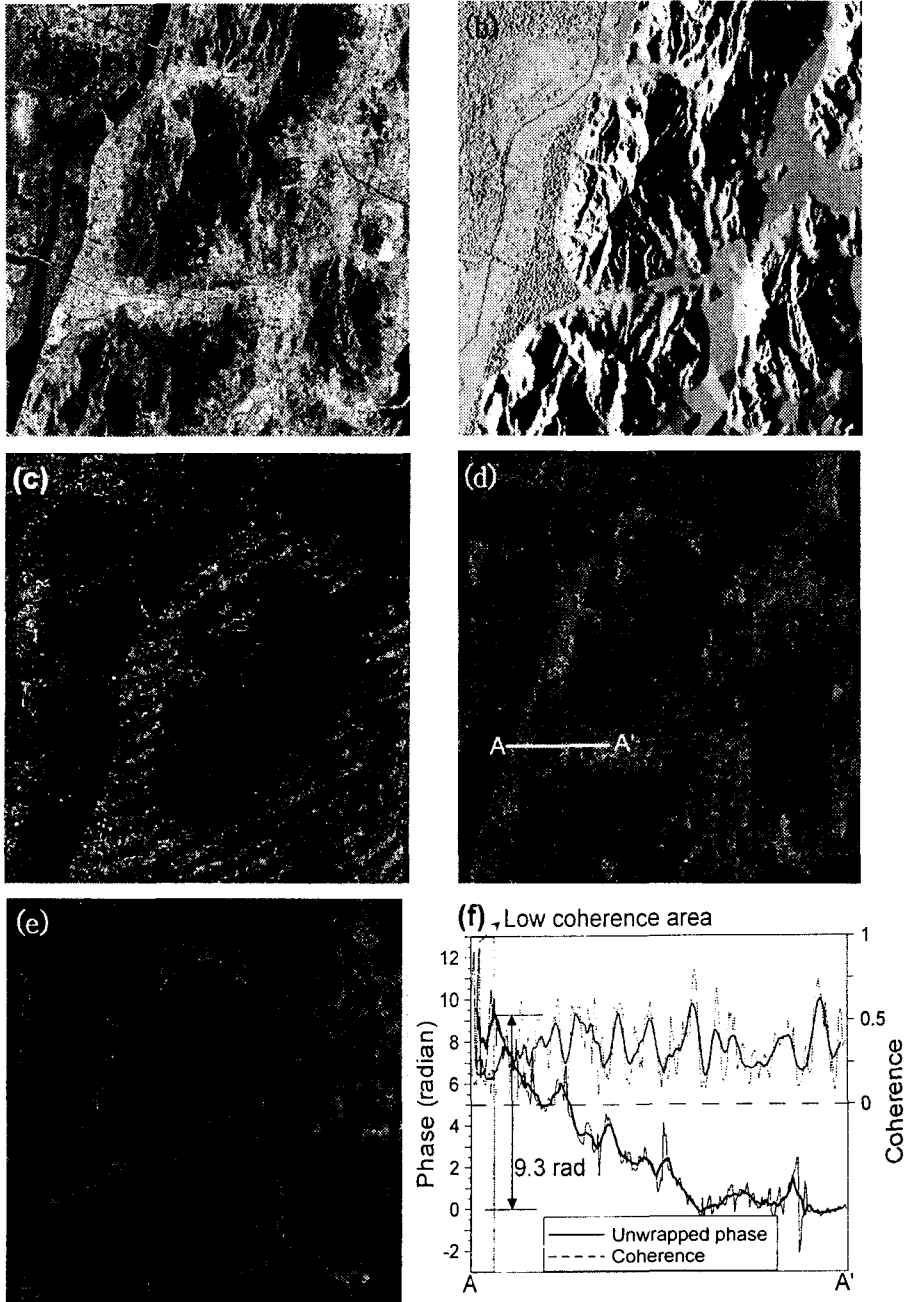


Fig. 3. Results of RADARSAT pair: (a) RADARSAT amplitude image(2000/09/25), (b) simulated SAR image, (c) initial differential interferogram(0009/0301 pair), (d) final differential interferogram(0009/0301 pair), (e) final differential interferogram(0009/0209 pair), and (f) phase and coherence profiles along the line A-A'.