

영상레이더를 이용한 목포 지반침하 관측

김상완^{1,2} · 김창오¹ · 원종선³ · 김정우^{1,*}

¹세종대학교 지구정보공학과, 지질재해정보연구소

²Division of Marine Geology and Geophysics, Univ. of Miami, FL, USA

³연세대학교 지구시스템과학과

Measurement of Ground Subsidence in Mokpo Area from Radar Interferometry

Sang-Wan Kim^{1,2}, Chang-Oh Kim¹, Joong-Sun Won³ and Jeong Woo Kim^{1,*}

¹Dept. of Geoinformation Eng. & Geohazard Information Lab., Sejong University, Seoul 143-747, Korea

²Division of Marine Geology and Geophysics, Univ. of Miami, FL, USA

³Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Mokpo city is a coastal city located at the south western coast of the Korean Peninsula. Large regions within Mokpo are subjected to significant subsidence because about 70% of the city area is a reclaimed land from the sea. Although no confidential quantitative measurements are available up to the present, the subsidence rate is as much as several cm per year. In this study, we aimed to estimate the subsidence rate over Mokpo city by using twenty-six JERS-1 SAR dataset from September 1992 to October 1998. Several tens of differential interferograms were processed from JERS-1 dataset and STRM 3-arc DEM. The results indicate continuous subsidence in Dongmyung-dong, Hadang-dong and Wonsan-dong in city, and the subsidence velocity reach over 4 cm/yr in the most highly sinking area. For facilitating the analysis of time-varying surface change, we also carried out an interferometric SAR time series analysis using permanent scatterer and consequently determined space-time maps of surface deformation at each acquisition time of JERS-1 SAR.

Key words : Mokpo, Subsidence, JERS-1, SAR, DInSAR, PSInSAR

목포시는 한반도 서남쪽에 위치한 연안도시로, 시 면적의 약 70%가 바다를 매립하여 이루어진 도시이다. 매립에 의한 지반침하 현상이 여러 지역에서 빈번하게 보고되고 있음에도 불구하고 정량적인 관측이 거의 이루어지지 않았다. JERS-1 L밴드 SAR 위성에서 얻어진 26개의 영상을 이용하여 1992년 9월 25일부터 1998년 10월 4일 사이 목포시에서 발행한 침하량을 측정하였다. JERS-1 SAR 영상과 SRTM 3초 DEM을 이용하여 60여개의 간섭도를 작성하였다. 간섭도 관측결과 동명동, 하당동, 원산동 일대에서 지속적인 침하가 발생하였으며, 주요 침하 지역에서 침하속도는 4 cm/yr를 넘는 곳도 있다. 시간에 따른 침하 양상에 대한 분석을 보다 용이하게 하기 위해 고정산란체(PS)를 이용한 분석 기법도 적용하였으며, 결과적으로 JERS-1 SAR 자료의 각 관측 시기에 대한 지표변위도를 구하였다.

주요어 : 목포, 지반침하, JERS-1, 영상레이더, DInSAR, PSInSAR

1. 서 론

1.1. 연구배경

영상레이더(SAR) 자료를 이용한 간섭(Interferometry) 기술, 즉 InSAR (Interferometric SAR)는 두

레이더 영상 사이의 위상차를 계산하여 지구표면의 3차원 정보를 추출하는 기술이다. 이 기술은 지진, 산사태, 화산활동과 같은 지질재해에 의한 지표변위나 지하시설물 건설, 지하수 유출 등에 의한 인위적인 지반 침하를 관측하는데 매우 효과적이는데, 이는 많은 시간과 비용이

*Corresponding author: jwkim@sejong.ac.kr

소모되는 현장 측량에 비해 훨씬 경제적이며 또한 광범위한 지역에 대해 높은 공간해상도(수십여 m)를 가지고 시간에 따른 변화를 측정하는데 용이하기 때문이다 (Massonnet and Feigl, 1998; Bürgmann *et al.*, 2000).

InSAR를 이용한 대표적인 지표변위 관측기법에는 차분간섭기법(Differential Interferometric SAR, DInSAR) 및 지표의 고정산란체(Permanent scatterer)를 이용한 PS 간섭기법(Permanent Scatterer Interferometric SAR, PSInSAR)이 있다. DInSAR는 Gabriel *et al.* (1989)이 SEASAT 자료를 이용하여 최초로 지표 변위를 측정된 연구 결과를 발표하였다. DInSAR는 간섭도(Interferogram)에서 지형기복에 의한 위상을 제거하는 방법에 따라 2-pass, 3-pass, 4-pass 방법으로 나뉘며, 이 중 Massonnet *et al.* (1993)에 의해 발전된 2-pass 방법이 현재 가장 널리 사용되고 있다. PSInSAR(Permanent Scatterer SAR Interferometry) 기술은 간섭도(coherence)가 높은 고정 산란체(PS)를 이용하는 기술로써, 연구지역에서 획득된 거의 모든 SAR 영상을 활용할 수 있으며, 대기에 의한 영향을 효과적으로 제거할 수 있고 장기간에 걸쳐 발생하는 지표변위의 시계열 분석이 용이하다는 장점이 있다(Ferretti *et al.*, 2001).

DInSAR 기법을 적용한 지반 침하 관측 사례로는 광산지역의 침하(Raymond *et al.*, 1997), 파리의 지반 침하(Fruneau *et al.*, 2000), 지하수 유출에 의한 일본 간도 지방의 지반침하(Nakagawa, 2000), L-밴드 JERS-1 영상을 이용한 매립지 지반침하(Kim and Won, 2003; Kim *et al.*, 2005) 및 백두산 및 부산지역의 지표면 변위관측(김상완, 2004) 등이 있다. PSInSAR를 이용한 지반침하 관측 사례로는 ERS 자료를 이용하여 캘리포니아 Pomona 도심의 7년 간의 침하량을 측정된 Ferretti *et al.* (2000)의 연구 외에, 산사태 및 구조운동에 의한 변위를 관측한 Colesanti *et al.* (2003), L-밴드 JERS-1 레이더 영상을 이용한 광산 침하(정한철 등, 2004) 등의 연구가 있다.

1.2. 연구지역

목포시의 면적은 47.24 km²로, 북위 34°44'(허사도)에서 34°50'(대양동), 동경 126°27'(옥암동)에서 126°17'(외달도)를 경계로 하며, 인구 약 25만 명이 거주하는 항구 도시이다. Fig. 1은 1995년 9월에 촬영된 목포 및 인근의 Landsat TM 영상이다. 목포는 3분의 2 이상이 바다를 매립하여 이루어진 도시로, 여러 지역에서

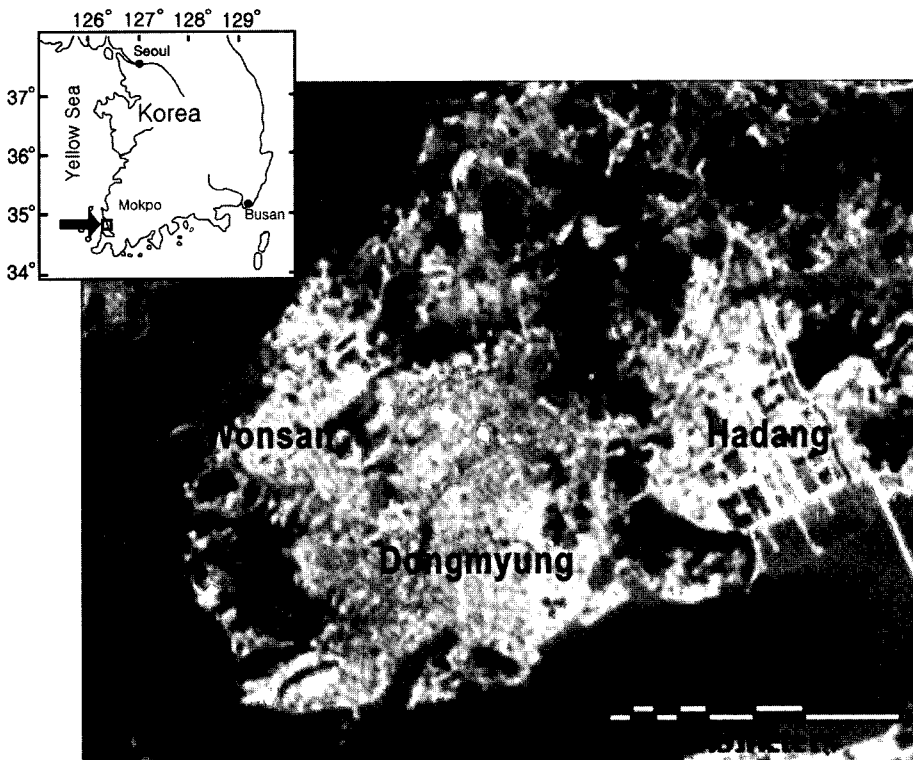


Fig. 1. The location map and the Landsat TM image of the study acquired on September, 1995.

지반 침하가 보고되고 있음에도 불구하고 정량적인 관측이 거의 이루어지지 않았다(대한매일 99-11-23; 중앙일보 99-11-23; 연합뉴스 2001-3-20).

이 연구에서는 1992년에서 1998년 사이에 촬영된 26개의 JERS-1 SAR 영상을 이용하여 목포시 일대에서 발생한 지반 침하를 관측하고자 한다. 목포 지역의 지표 변위를 보다 정량적으로 관측하기 위하여 DInSAR 및 PSInSAR 기법을 모두 적용하였다. 특히 PSInSAR

에 의한 지반 침하 연구는 국내에서 아직 많이 수행되지 않은 바, 이는 이 기법을 적용할 만큼 충분히 많은 (약 30개) 레이더 영상이 축적된 지역이 제한적이기 때문이다. 또한 JERS-1 위성은 근본적으로 레이더 간섭기법을 수행하기 위해 설계된 위성이 아니므로, 수 km 이상의 기선거리를 갖는 간섭쌍(interferometric pair)이 많고, 또한 ERS-1/2 위성에 비해 궤도정보가 상대적으로 부정확해 적용에 어려움이 있다. Fig. 2는 영상획득

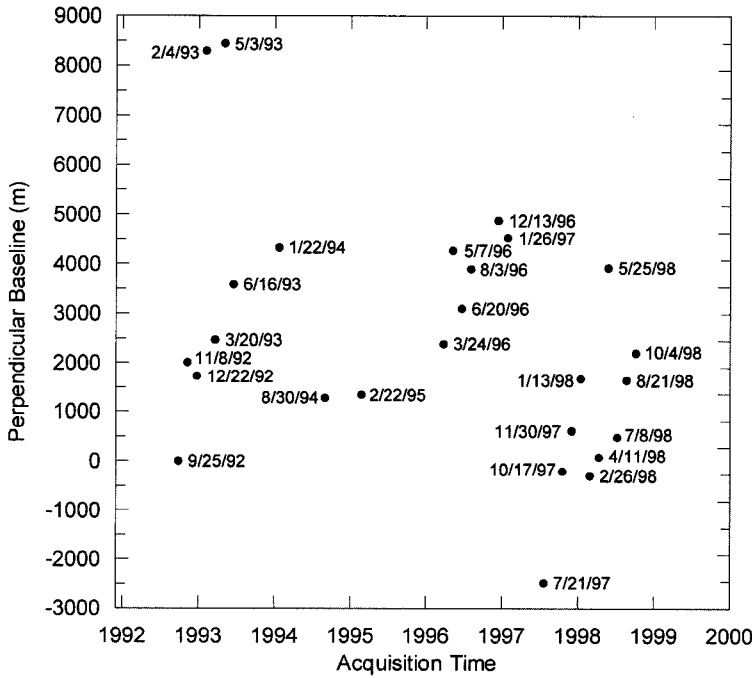


Fig. 2. JERS-1 SAR image sets over Mokpo city. Dots are the images with their acquisition dates and relative perpendicular baselines with respect of the first data (1992-9-25).

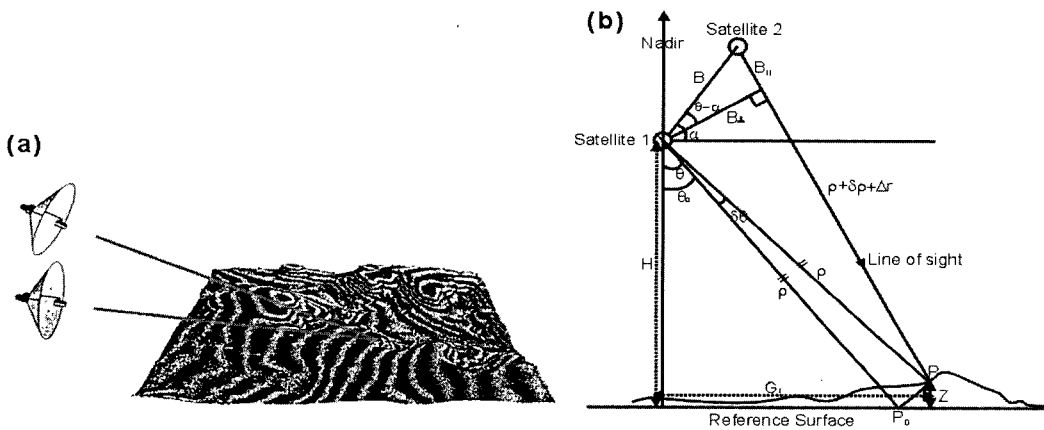


Fig. 3. (a) Schematic diagram of SAR interferometry, (b) Geometry of SAR interferometry.

날짜 및 1992년 9월 15일 자료를 기준으로 계산된 각 간섭쌍의 수직기선거리(B_⊥)를 보여준다.

2. 이 론

2.1. Differential InSAR 기법

레이더 간섭도는 두 개의 레이더 영상 자료간의 위상차로, 식(1)에서와 같이 간섭위상은 지형고도, 지구 타원체에 기인한 거리차이, 두 관측 사이에 발생한 지표 변위와 관련되어 있다(Zebker *et al.*, 1994). Fig. 3(a)는 지형 및 지구타원체에 의해 생성되는 위상 간섭 형태를 나타내는 모식도이며, Fig. 3(b)는 레이더 간섭 기법을 구성하는 위성과 지표 사이의 기하학적 관계를 표현한 것이다.

레이더 간섭 기술을 이용하여 지표에서 발생하는 변위를 탐지하기 위해서는 간섭도로부터 지형고도 및 지구타원체에 의한 위상을 제거해 차분간섭도(Differential Interferogram)를 구하여야 한다. 지형고도와 지구타원체에 의한 위상은 위성의 궤도와 지표고도모델(Digital Elevation Model, DEM)과 같은 고도정보 자료로부터 계산될 수 있다.

$$\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda}(\delta\rho + \Delta r) \quad (1)$$

레이더 간섭기법으로부터 생성된 차분간섭도는 필터링(Goldstein and Werner, 1998)과 위상불구속화(phase unwrapping)(Ghiglia and Pritt, 1998) 등의 과정을 거친 후 다음 식을 이용하여 레이더 주시방향(Line-of-sight)에서의 관측 변위량으로 변환된다.

$$\Delta r = -\Phi_{uw} \frac{\lambda}{4\pi} \quad (2)$$

여기서 Φ_{uw} 는 불구속화된 위상이며 λ 는 SAR 센서의 파장으로 JERS-1의 경우 23.53cm이다. 연구 지역에서 수직변위만 발생한다고 가정하면 다음 식을 이용하여 주시방향으로 변위값은 수직변위값으로 변환될 수 있다.

$$\Delta V_{\text{displacement}} = \Delta r \frac{1}{\cos\theta_{inc}} \quad (3)$$

여기서, θ_{inc} 는 입사각으로 관측위체에 따라 차이가 있지만, 연구지역의 중심에서 계산된 값은 평균값은 약 37.2° 정도이다. 따라서 2 π 만큼의 위상 변화는 약 15.4 cm 정도의 수직변위에 해당한다.

DInSAR 기법 적용 시 두 개의 레이더 영상과 DEM을 이용하여 작성된 차분 위상간섭도에서 관측되는 위상은

$$\phi_{diff} = \phi_{\text{deformation}} + \phi_{\text{DEM}_{\text{error}}} + \phi_{\text{atmosphere}} + \phi_{\text{noise}} \quad (4)$$

로 표현되며, $\phi_{\text{deformation}}$ 여기서는 두 레이더 영상의 관측기간 동안 발생한 지표 변위에 의한 성분, $\phi_{\text{DEM}_{\text{error}}}$ 는 DEM 오차에 의한 위상, $\phi_{\text{atmosphere}}$ 는 영상 촬영 당시의 습도, 온도, 압력 등과 같은 대기상태에 의한 성분, 그리고 ϕ_{noise} 는 센서 및 시간 간격, 기선거리(Baseline)에 의한 decorrelation으로 구성된다. $\phi_{\text{DEM}_{\text{error}}}$ 는 위성의 수직 기선거리에 비례하여 발생하며, $\phi_{\text{atmosphere}}$ 는 대기 영향을 받은 특정 레이더 영상과 관련되어 나타나므로, 비록 정량적인 관측은 어렵지만 여러 간섭도 비교 분석을 통해 DInSAR 기법에서 DEM 오차와 대기에 의한 성분 여부를 판단할 수 있다.

2.2. Permanent Scatterer InSAR 기법

이탈리아 POLIMI (POLitecnico di Milano) SAR 연구소에서 개발된 방법으로 지표변위 관측 분야에서 SAR 자료의 활용성을 배가한 기술이다. PSInSAR 기법을 적용하기 위해서는 우선 N+1개의 레이더 영상 중 기준이 되는 주영상(master)을 정하고, 나머지를 전부 부영상(slave)으로 놓고 DInSAR 방법을 적용하여 N개의 차분간섭도를 생성한다. 차분간섭도에 남은 잔여 위상은 식(5)와 같이 세분될 수 있다.

$$\Phi_{i,x} = a_i + P_{ci}x + P_{ni}y + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{i,x} + \frac{\epsilon_{i,x}}{h_{ai}} + \alpha_{i,x} + n_{i,x} \quad i=1 \dots N. \quad (5)$$

식(5)에서 X는 range, azimuth 방향의 공간좌표(x, y)를 나타낸다. α_i 는 기본 위상값, P_{ci} , P_{ni} 는 선형의 줄무늬(fringe) 값, α_i 는 대기영향에 의한 위상, n_i 는 decorrelation noise, ϵ_i 는 DEM에 존재하는 고도오차를 나타내며, Δr_i 는 주시방향으로의 산란체의 움직임을 나타낸다. Δr_i 는 다시 시간에 일차 비례하는 선형 변위와 나머지 비선형 변위로 구분할 수 있다.

$$\Delta r_i = v_r \cdot t_i + \mu_{NLi} \quad (6)$$

v_r 은 주시방향으로의 평균 속도이며, t_i 는 주영상과 i번째 부영상의 시간 간격이다.

연구지역으로부터 안정된 위상값을 제공하는 PSC (Permanent Scatterer Candidate)를 이용하여 차분간섭도에 잔여하는 기본 위상값과 선형 성분을 제거하기 위해서는 각 PSC에서의 고도 오차와 변위 성분을 정확히 구하여야 하며, 반대로 PSC의 고도 오차와 변위 성분을 구하기 위해서는 기본 및 선형 성분값이 요구된다. 따라서 이들은 크게 두 단계로 분리되어 반복연산을 통해 적절한 값으로 수렴하게 된다.

각 차분간섭도에서 기본 위상 값과 잔여하는 선형의 줄무늬 값을 계산하고 PSC에서의 고도오차와 주시방향으로의 속도 성분을 구하고 나면 나머지 잔여 위상(LPR)으로부터 대기에 대한 성분을 계산한다. PSC가 많을수록 좀더 정확한 대기 성분에 관한 위상을 계산할 수 있지만, 근거리 내의 대기에 대한 성분들은 상관관계가 매우 높기 때문에 PS가 1 km² 당 3-4 이상 주어진다면 PS에서의 대기에 대한 성분들을 공간적으로 평활화 시켜 전체 연구지역 내의 대기에 의한 효과를 구할 수 있다(Ferretti *et al.*, 2000). 일반적으로 1 km² 이내의 지역에서 대기에 의한 위상의 분산치는 0.1 rad² 이내이다(Williams *et al.*, 1998).

대기에 대한 성분을 계산하기 위해서는 LPR에서 먼저 시간 축으로 비선형 움직임으로 판단되는 저주파 성분을 분리하고 공간적으로 여러 PS에서의 대기에 대한 성분을 평활화시키면 된다.

$$a(X, t_i) = [w(X, t)]_{HP(time)} + [\bar{w}(X)]_{LP(Space)} \quad (7)$$

여기서 $\bar{w}(X)$ 값은 잔여 위상들의 평균값으로, 모든 차분 간섭도에서 공통적으로 나타나는 값이므로 주영상의 대기성분 값에 해당한다. HP (time)와 LP (Space)는 각각 시간상의 high-pass, 공간상의 low-pass 필터를 뜻한다. 각 레이더 간섭도의 기본 위상값, 궤도오차와 저주파(십 km 이상의 파장)의 대기로 인해 발생하는 선형의 줄무늬 값, 그리고 지역적인 대기 성분들의 합을 APS (Atmospheric Phase Screen)라 한다.

각 레이더 간섭도에서 APS 값을 제거한 이후에는 모든 화소들에 대해 고도 오차와 주시방향으로의 속도 성분을 계산한다. 위상에 대한 성분들의 분석이 정확히 이루어지고, 주기도를 이용한 unwrapping 추정이 올바르게 수행되었으면 각 화소의 간밀도는 decorrelation이 적은 PS에 대해서 1에 가까운 값을 보인다. N개의 레이더간섭도들의 차분 위상에서 APS, 고도 오차, 변위에 의한 성분을 제거하고 남은 잔여 위상($e^{j\Delta w_i}$)의 상관도를 다음과 같이 정의하며 이는 간밀도로 간주될 수 있다(Ferretti *et al.*, 2001).

$$\gamma \approx \left| \frac{\sum_{i=1}^N e^{j\Delta w_i}}{N} \right| \quad (8)$$

γ 는 [0, 1] 값을 가지며 1에 가까울수록 간밀도는 높고 decorrelation은 낮은 것을 의미한다. 식(8)의 간밀도는 시계열 분석에 의한 독립된 화소의 위상에 대한 구성 성분들이 분류되고 decorrelation의 정도에 대해서 계산되기 때문에 공간 해상력이 좋을 뿐만 아니

라, PS 선정 시 높은 신뢰성을 제공한다.

3. 자료처리

3.1. 차분간섭도 제작

목포지역의 지반침하 관측을 위해 일본의 NASDA (National Space Development Agency of Japan)로부터 1992년 9월 15일부터 1998년 10월 4일 까지 획득된 26개의 JERS-1 SAR 영상(path: 88, row: 242)을 수집하였다(Fig. 2 참조). JERS-1의 경우 이론적으로 간섭영상이 형성되지 않는 최대 수직기선거리(critical base-line)는 약 6 km 이지만, 두 개의 SAR 자료를 이용한 간섭도 제작시 간섭쌍의 기선거리와, 획득시간 간격의 증가는 geometric decorrelation과 temporal decorrelation을 야기하여 간섭도에서 추가적인 위상오차를 발생시킨다(Zebker and Villasenor, 1992). 본 연구에서는 2-pass 차분간섭기법(Massonnet and Feigl, 1998)을 이용하여 수직기선거리가 1 km 이내인 63개의 차분간섭도를 제작하였다. SAR 간섭도로부터 지형고도에 의한 위상을 제거하기 위해 국립지리원 발행 1:25,000 수치지도를 이용하여 10 m 간격의 DEM을 제작하였으며, 또한 3 초(약 90 m) 간격의 SRTM-3 DEM을 이용하였다. SRTM-3 DEM은 2000년 2월에 발사된 우주왕복선 엔더버호에 장착된 두개의 SAR 안테나로부터 획득된 자료를 이용하여 제작된 DEM (<http://www.jpl.nasa.gov/srtm>)으로 1초 간격으로 획득된 SRTM-1 DEM을 3×3 평균하여 제공된다. 1초 간격의 SRTM-1 DEM의 상대수직오차는 50~100 m 규모에서 ±6 m(90% 신뢰도)이다(Rabus *et al.*, 2003).

차분간섭도 작성 시 사용된 DEM 오차에 의한 잔여 위상은 간섭쌍의 수직 기선거리에 비례하여 나타나게 된다. 수치지도 DEM을 이용하여 작성된 44일 간격(지표변위 성분을 무시할 수 있다.)의 차분간섭도로부터 목포 시내에서 약 20~30 m에 이르는 DEM 오차가 관측되었다. 이러한 고도 오차는 1:25,000 수치지도에 도심지역의 등고선이 없기 때문에, 불규칙 삼각망, 최소곡률 기법 등을 이용하여 백터 등고선 자료를 격자화(griding)하는 과정에서 발생한 것이다. SRTM-3 DEM은 3초 간격으로 1:25,000 수치지도로 획득될 수 있는 DEM보다 해상도가 낮지만, InSAR 기법을 이용하여 2차원적으로 획득된 자료이기 때문에 도심지역과 같이 지형기복이 심하지 않은 지역에서 정확한 고도값을 제공한다. 수치지도 DEM과 달리 SRTM-3 DEM을 사용하여 작성된 차분간섭도에서는 고도오차에 의

한 위상이 거의 관측되지 않았다. 따라서 본 논문에서 제시된 모든 차분간섭도는 SRTM-3 DEM을 이용하여 제작한 것이다.

PSInSAR는 하나의 영상을 주영상으로 선택한 후 나머지를 부영상으로 하여 간섭도를 제작한다. 간섭쌍들 간의 기선거리와 시간간격을 고려하여, Fig. 2에서 시·공간적으로 중앙에 위치한 1996년 3월 24일 영상을 주영상으로 선정하여 총 25개의 차분간섭도를 제작하였다. 간섭도에는 SAR 위성의 궤도오차에 의한 선형의 잔여 줄무늬가 존재할 수 있다. ERS 위성의 경우 ESA의 정밀 궤도나 네덜란드 Delft 공대의 궤도는 수십 cm 이내의 정밀도를 가지고 제공된다(Reigber *et al.*, 1996; Scharroo *et al.*, 1998). 따라서 이 정밀궤도를 이용하여 추정된 ERS 기선거리의 미세한 잔여오차는 PSInSAR의 초기 자료처리 반복과정 통해 보정될 수 있다(Ferretti *et al.*, 2000). 이와 달리 JERS-1 SAR 자료의 헤더파일에 기록된 궤도벡터로부터 계산된 기선거리 오차는 수백 m에 이르기도 한다. 일반적

으로 이러한 궤도오차(또는 기선거리 오차)는 초기 차분간섭도에서 나타나는 선형의 잔여 위상을 관측하고 모델링한 후 이를 제거하기 위한 부영상의 궤도수정 또는 기선거리 최적화를 통해 수행된다(Massonnet and Feigl, 1998; Buckley, 2000). 그러나 기선거리가 긴, 즉 h_a 가 작은 대부분의 간섭쌍은 초기 궤도오차에 의한 잔여 줄무늬의 수가 매우 많을 뿐만 아니라 간섭도가 극히 낮아 잔여 줄무늬 모델링이 불가능하다. 지상기준점을 이용한 일차적인 궤도수정은 차분간섭도에 나타나는 잔여 줄무늬의 수를 줄여 이러한 관측을 용이하게 하므로, 매우 큰 기선거리를 가지고 있는 간섭쌍을 이용 가능케 한다.

본 연구에서는 SRTM-3 DEM으로부터 자동 추출된 100여개의 지상기준점을 이용하여 일차 궤도수정을 수행하고, 이 궤도로부터 작성된 차분간섭도의 잔여 줄무늬를 모델링한 후 부영상의 궤도벡터를 수정하는 방법을 적용하였다(김상완, 2004). 26개의 자료로부터 작성된 25개의 간섭쌍 중 수직기선거리가 3.5 km(간섭

Table 1. Summary of the JERS-1 SAR interferometric pairs for PSInSAR application.

| No. | SAR image | | Perpendicular Baseline (Ambiguity Height, m) | Time Interval (days) | Coherence mean |
|-----|-----------|----------------|---|-------------------------|-------------------|
| | Master | Slave | | | |
| 1 | | 92-09-25 | -2304.3 (21.8) | -1276 | 0.28 |
| 2 | | 92-11-08 | -274.4 (179.9) | -1232 | 0.40 |
| 3 | | 92-12-22 | -643.6 (77.9) | -1188 | 0.41 |
| 4 | | 93-03-20 | 192.4 (-260.1) | -1100 | 0.43 |
| 5 | | 93-06-16 | 1218.7 (-41.1) | -1012 | 0.36 |
| 6 | | 94-01-22 | 1989.4 (-25.1) | -792 | 0.31 |
| 7 | | 94-08-30 | -1096.2 (45.1) | -572 | 0.41 |
| 8 | | 95-02-22 | -1001.6 (49.1) | -396 | 0.45 |
| 9 | | 96-05-07 | 1911.1 (-26.2) | 44 | 0.38 |
| 10 | | 96-06-20 | 809.9 (-61.9) | 88 | 0.50 |
| 11 | 96-03-24 | 96-08-03 | 1543.8 (-32.5) | 132 | 0.39 |
| 12 | | 96-12-13 | 2556.1 (-19.6) | 264 | 0.28 |
| 13 | | 97-01-26 | 2243.8 (-22.3) | 308 | 0.31 |
| 14 | | 97-10-17 | -2573.0 (19.3) | 572 | 0.27 |
| 15 | | 97-11-30 | -1731.9 (28.6) | 616 | 0.35 |
| 16 | | 98-01-13 | -741.4 (62.9) | 660 | 0.45 |
| 17 | | 98-02-26 | -2738.8 (18.3) | 704 | 0.26 |
| 18 | | 98-04-11 | -2280.1 (21.9) | 748 | 0.29 |
| 19 | | 98-05-25 | 1575.4 (-31.3) | 792 | 0.34 |
| 20 | | 98-07-08 | -1967.5 (25.4) | 836 | 0.31 |
| 21 | | 98-08-21 | -750.9 (63.7) | 880 | 0.41 |
| 22 | 98-10-04 | -199.5 (146.5) | 924 | 0.45 | |

도 형성 최대 수직기선거리의 약 50%) 이내인 22개만이 최종 레도수정이 가능하였다. 사용되지 않은 3개의 간섭쌍(1993년 2월 4일, 1993년 5월 3일, 1997년 7월 21일)은 주영상과의 기선거리가 매우 길고 긴밀도가 매우 낮아 레도오차 수정이 불가능하였다. PSInSAR 분석에 사용된 22개 간섭쌍의 수직 기선거리, 시간간격 및 긴밀도는 Table 1과 같다.

3.2. 초기 Permanent Scatterer Candidate 선정

신호대 잡음비가 클 경우 다수의 SAR 진폭 영상 (>~30)을 이용하여 계산된 특정 화소의 진폭분산지수가 위상의 표준편차와 관련되어 있다는 통계적 특성을 이용하여, 초기 PSC (Permanent Scatterer Candidate) 추출 시 SAR 영상의 진폭분산지수(D_A)를 사용한 방법이 사용되었다(Ferretti *et al.*, 2000). 이러한 방법은 주변화소와의 긴밀도를 이용한 방법에 비해 공간해상도의 손실 없이 단일 화소의 PS를 선정할 수 있다는 장점이 있다. ERS 위성의 신호 대 잡음비가 15 dB 인데 반해, JERS-1은 육상에서 6 dB, 해양지역에서 3.5 dB이다 (ASF/JPL, 1994). 따라서 이 연구에서 사용된 영상의 개수가 26개이고, JERS-1의 경우 신호 대 잡음비가 매우 낮기 때문에 D_A 만을 이용할 경우 문제가 발생할 수 있다. 실제로 Ferretti *et al.* (2001) 연구에서 보듯이 34개의 ERS 영상을 이용하여 D_A 를 구했을 때 바

다지역은 대개 0.5 이상의 높은 값을 보이지만, 이 연구의 경우 목포 지역 바다에서의 몇몇 화소 D_A 는 0.2 이하의 낮은 값들이 나타난다. 이러한 문제는 JERS-1 위성의 약한 전력공급 문제(Shimada, 1996)와 함께 L-밴드의 특성상 바다의 표면에 의한 반사 특성이 C-밴드보다 덜 민감하기 때문으로 해석된다. 따라서 이 연구에서는 PSC 추출을 위해 D_A 뿐 만 아니라 긴밀도 영상을 함께 이용하였다.

D_A 를 계산할 시 신호 강도의 절대 비교를 위해서 획득시기가 다른 여러 레이더 영상간의 방사보정 (radiometric calibration)이 필요하다. PSInSAR의 경우에는 sigma naught를 계산하는 대신 긴밀도가 높은 일정 크기의 도심지역을 선정한 후, 그 곳에서의 평균 세기(power)가 주영상과 같도록 각 부영상들의 보정수치를 구하여 진폭값을 수정하는 것으로 충분하다 (Ferretti *et al.*, 2001). 본 연구에서는 목포시 동면동 지역의 평균 세기값을 이용하여 진폭영상을 보정한 후 D_A 를 계산하였다(Fig. 4(a)). 26개의 SAR 영상으로부터 0.24 이하인 점(PSC_{D_A})을 일차 선택하였다. 22개의 간섭쌍에서 3×9 소창문을 이용하여 긴밀도 영상을 제작하였다. Fig. 4(b)는 평균긴밀도 영상이다. 긴밀도란 공간적으로 간섭위상의 유사정도를 표현하는 것이므로, 지형 그리고 존재 할 수 있는 지표 변위에 대한 보정이 적절히 이루어지지 않으면 긴밀도는 떨어지게 된다. 특

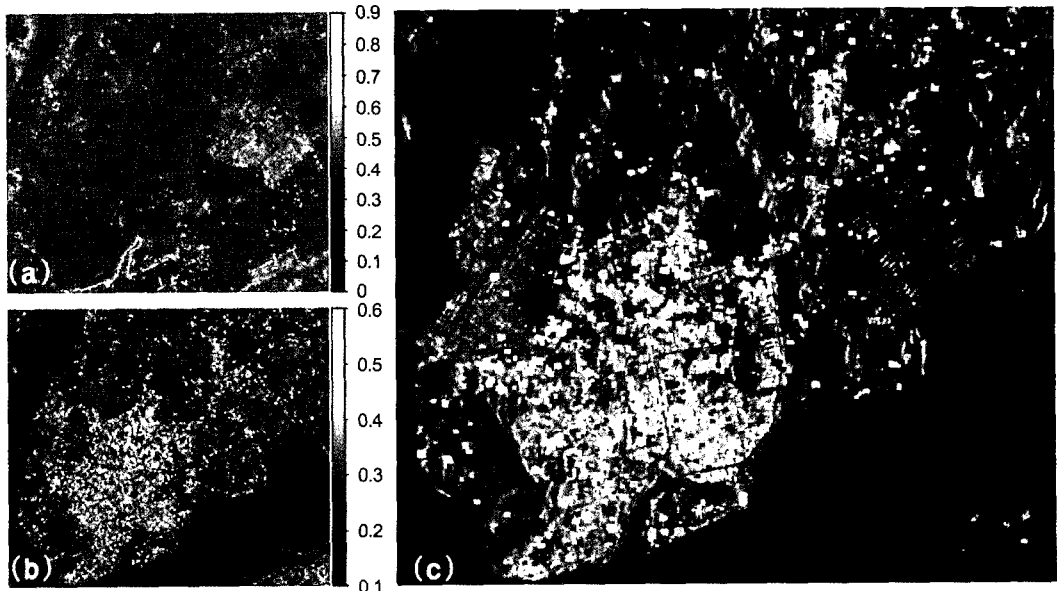


Fig. 4. Location of Permanent Scatterer Candidates (PSC). (a) amplitude dispersion index, (b) mean of coherence map, and (c) PSC: yellow dots satisfy the condition (coherence >0.4); red dots satisfy the condition (amplitude dispersion index <0.24); and green dots(PSC) satisfy both conditions.

히 기선 길이가 긴 간섭쌍에서 더욱 큰 영향을 받게 되는데, 차분과정에서 사용된 DEM이 PS, 즉 건물, 육교, 동상과 같은 큰 시설물의 높이를 반영할 만큼 정확하지 않기 때문에 PS에서의 긴밀도가 떨어지게 된다. 따라서 약 2.5 km 이상의 기선길이를 갖는 간섭쌍 4 개를 제외하고 18 개의 간섭쌍만을 이용하여 긴밀도가 0.4 이상인 점(PSC_{coh})을 선정하였다. PSC_{DA}와 PSC_{coh} 사이의 교집합을 최종 PSC로 선정하였으며, 그 분포는 Fig. 4(c)와 같다. 추출된 PSC는 대부분 도심지에 고루 분포하고 있는 반면 산악 또는 해양지역에는 거의 존재하지 않는다. 이는 추출된 PSC가 적절한 고정 산란체임을 지시한다.

3.3. 대기효과 추정 및 변위 속도 계산

진폭분산지수와 긴밀도를 이용하여 선정된 PSC로 대로 먼저 반복 알고리즘을 이용하여 각 PSC에서의 고도오차와 주시방향으로의 변위성분 그리고 기본위상값과 선형의 잔여 줄무늬 값을 구하였다. 수렴을 위한 조건으로 속도의 경계값을 0.1cm/yr, DEM 오차의 경계값을 1m로 설정하였으며, 매 반복과정에서 PSC의 긴밀도가 낮은 점들, 다시 말해 PSC 긴밀도의 분포를 정규분포로 가정하고 하위 0.5%를 선택하여 제거하였다. 차분간섭도로부터 기본 위상 값, 선형의 잔여 줄무늬 값, 고도오차, 지표변위성분을 제거하여 잔여 위상값(LPR)을 구하였다. 이 LPR에 대해 시간 축으로 440일 기간의 삼각 필터를 이용해서 저주파 성분을 제거시키고, 공간적으로는 남은 위상값을 가지고 크리깅 내삽 및 저주파 필터링을 이용해서 대기에 대한 성분들을 구하였다. LPR에서 계산된 각 레이더 간섭도에 포함된 대기에 대한 성분들의 분산은 최고 0.176 rad², 최저 0.003 rad², 그리고 평균 0.039 rad²이다.

APS (대기효과+궤도오차)가 보정된 레이더 간섭도를 이용하여 연구지역내의 모든 화소에 대해 고도오차와 주시방향의 속도를 구하였다. 고도오차간격 1m, 속도간격 0.1cm/yr의 격자망을 사용하여 식(8)의 긴밀도 값이 최대가 되는 고도 오차와 주시방향의 속도를 계산하였다. 고도오차와 속도의 범위는 DEM의 대략 정밀도와 차분간섭도에서 관측되는 대략의 변위속도를 고려하여, -100~100 m, -6~3cm/yr로 설정하였다.

4. 결과 및 해석

4.1. 2-Pass DInSAR 적용 결과

JERS-1 SAR 영상 26개와 SRTM-3 DEM을 이용

하여 생성된 63개의 차분간섭도 중 긴밀도가 높고 다양한 시기에 발생한 변위를 보여주는 15개의 대표적 지표 변위도는 Fig. 5와 같다. 목포지역에서 관측된 지표 변위는 연약지반 침하에 의해 발생하는 수직변위성분이 주요한 것으로 가정될 수 있으므로, 식(3)을 이용하여 주시방향의 변위량을 수직변위성분으로 변환하였다. Fig. 5의 변위도에서 청색은 침하가 거의 발생하지 않은 지역이며, 녹색은 약 6cm, 적색은 12cm 이상의 침하가 관측기간 동안 발생했음을 나타낸다. SAR로부터 관측된 변위도의 화소 크기는 28×28 m이며, 색이 없는 화소들은 낮은 긴밀도로 인해 계산에서 제외된 점들이다. 이러한 침하 관측도는 현장 측량이나 GPS 관측과 같은 기존 방법으로부터 획득할 수 없는 매우 높은 공간해상도를 가지고 침하발생지역과 침하량에 대한 매우 정밀한 정보를 제공한다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 목포시 동명동, 하당동 그리고 원산동에서 뚜렷한 침하가 관측된다. 동명동 일대의 침하가 가장 뚜렷하며 넓은 범위에 걸쳐 침하가 발생하였음을 알 수 있다. 또한 이들 지역에서 발생한 침하는 1992년부터 1998년 까지 다양한 관측시기를 갖는 간섭도 모두에서 관측되기 때문에 일시적으로 발생하는 침하가 아닌 지속적인 침하임을 알 수 있다. Fig. 5(a)의 92-11-8/92-12-22 간섭쌍은 44일간의 변위를 보여주는 것으로 지표변위가 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5(a)에 표시된 동명동을 가로지르는 profile에 대한 관측 침하값의 단면도로 침하양상에 따라 네 지역으로 분류하였다. A 지역은 지반침하가 발생하지 않는 안정된 지역으로 약 ±1cm 이내의 진동은 다양한 위상오차에 의한 관측에러로 판단된다. B 지역은 침하가 발생하고 있으며, 93-3-20/96-3-24와 94-1-22/96-5-7 간섭쌍에서 관측된 침하량이 97년 말 이후에 약 1년동안 발생한 침하량과 거의 비슷하다. 이것은 97년 이후부터 이 지역의 침하 속도가 증가하였음을 시사한다. C 지역의 침하는 관측기간에 비례하여 침하량이 발생한 것으로 보아 지속적으로 발생한 것으로 판단된다. 이 지역의 97년 이후 침하는 B 지역과 거의 동일한 값을 보이므로, 92년-96년 동안 B 지역의 침하는 C 지역에 비해 다소 느리게 진행되다가 97년 이후부터 거의 동일한 침하 속도를 보여주는 것으로 해석된다. 이러한 특징은 94-8-30/95-2-22 침하관측쌍에서도 관측된다. 이 기간동안 B지역의 침하는 거의 발생하지 않은 반면, C 지역에서는 약 1.5cm의 침하가 관측된다. D 지역은 노이즈에 영향을 받은 지역으로, 침하가 발생한 것은 분명하나, 그 양은 확실하지

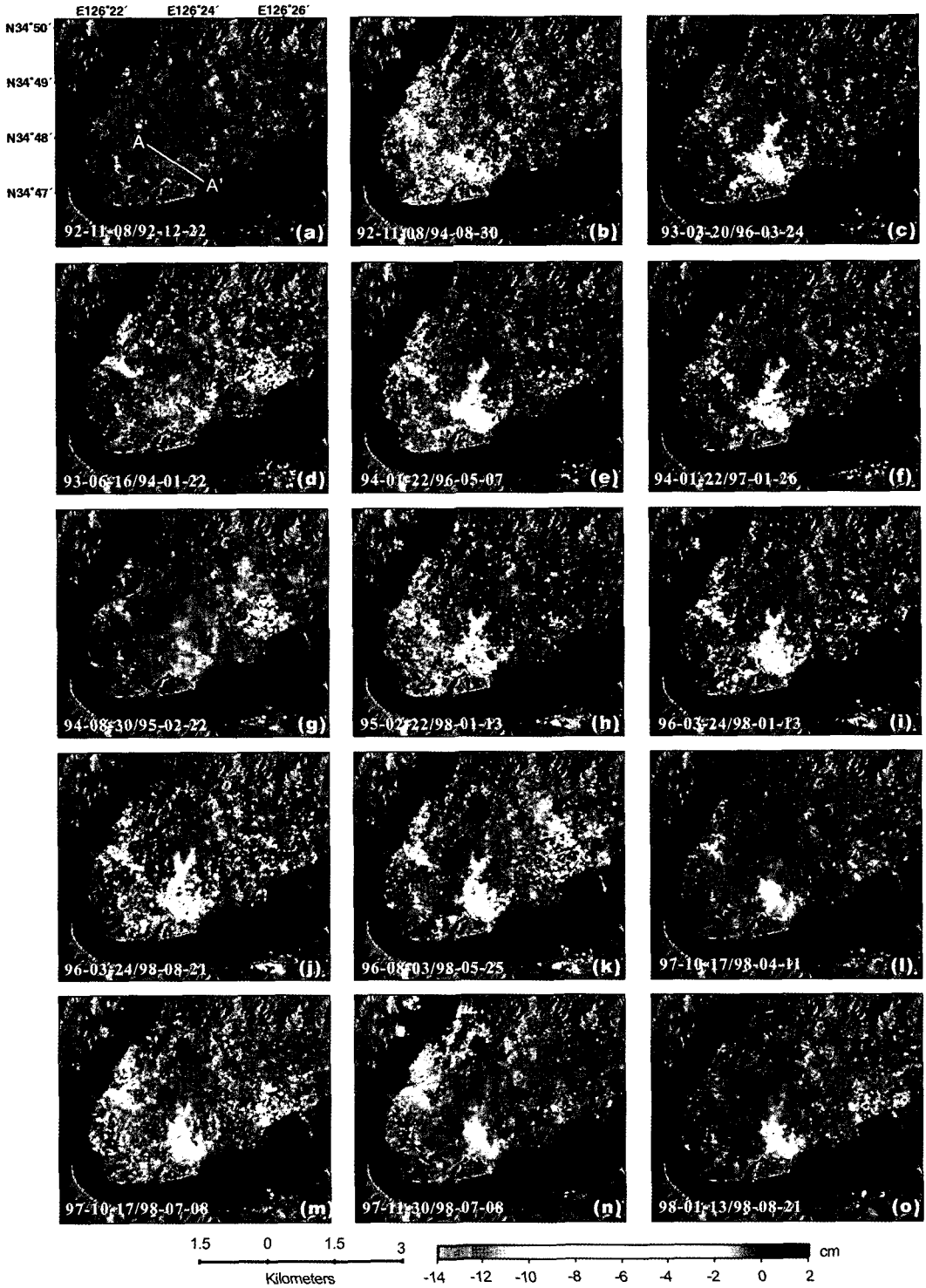


Fig. 5. Differential interferograms of JERS-1 SAR dataset corrected for topography in UTM coordinate. Color scale represents vertical displacement of the surface. Background image is the multi-image reflectivity map generated from mean of a number of SAR image. Areas of loss of radar coherence are uncolored.

않다. 97년 이후의 짧은 기간동안 관측된 침하량을 고려할 때 93-96년 동안 발생한 침하가 위성불구속화 어려움에 의해 매우 낮은 값으로 산정된 것으로 판단된다. 이와 같이 전통적인 DInSAR에 의한 지표변위 관측은 긴밀도가 낮은 경우 위성불구속화 실패로 인해 오차를 야기시킬 수 있다. 또한 각 간섭쌍의 관측기간 동안 발생한 변위를 계산할 수는 있지만, 각 SAR 자료 획득 시각에서의 변위를 정량적으로 계측하는데 어려움이 있다.

4.2. PSInSAR 적용 결과

차분간섭도로부터 APS를 제거하고 나서 모든 화소에 대해 DEM 오차, 지표변위 및 긴밀도를 구하였다. 최종 PS를 선별하기 위해 일반적으로 관측값의 신뢰도를 나타내는 긴밀도 값이 사용된다(Ferretti *et al.*, 2001). 그러나 비록 긴밀도가 다소 낮더라도 주변 화소들의 결과와 일치성이 유지되는 점들 역시 PS로 간주되어질 수 있다. 본 연구에서는 다음 조건을 만족하는

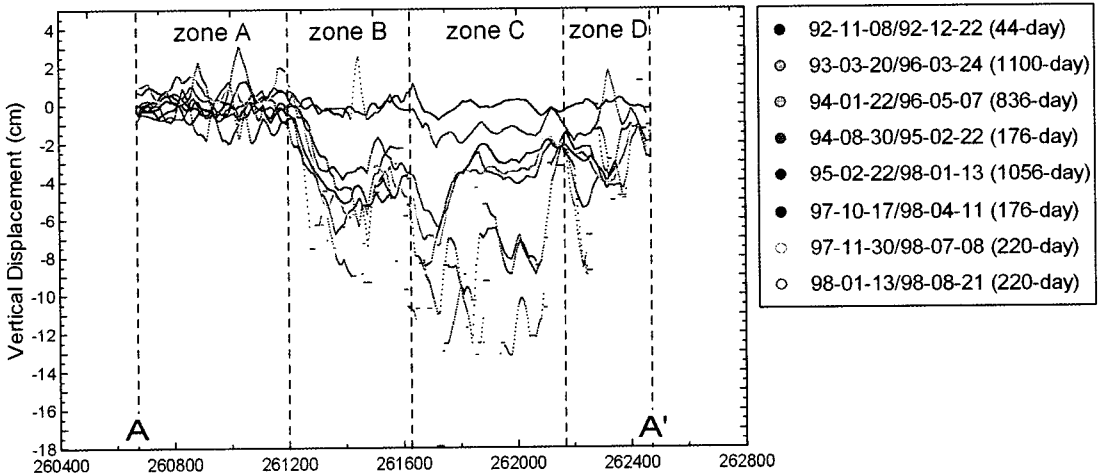


Fig. 6. Subsidence profiles along the line A-A' described in Fig. 5(a).

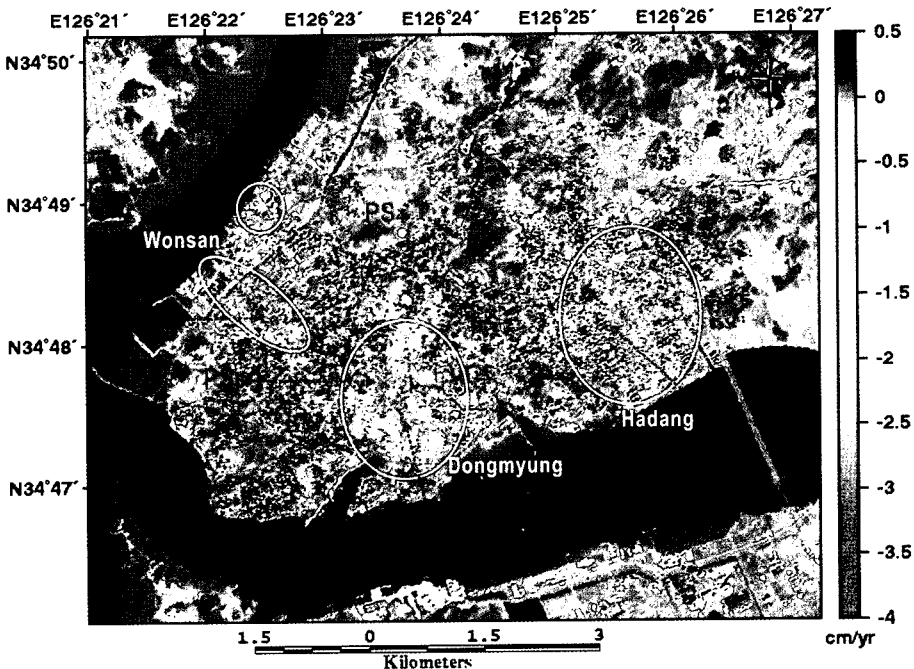


Fig. 7. Estimated LOS velocity and location of the PSs over Mokpo city.

점을 최종 PS로 선별하였다: 첫 번째, 긴밀도가 0.56 이상인 점들만을 선택한다. 둘째, 11×11 윈도우에서 남아 있는 PS의 변위값 평균과 표준편차를 구한 후 정규분포 80% 안에 들어 있지 않는 점을 제외한다. 셋째, 두 번째 경우에서 표준편차가 2cm/yr 이상인 경우는 잡음인 것으로 가정하고 제거한다. 긴밀도와 일치성을 이용한 방법은 시간적·공간적으로 안정된 변위를 갖는 화소이므로 보다 높은 신뢰도를 제공할 수 있다. 한편 연구 지역 중 해당동 지역은 주영상인 1996-06-20 자료와 1993-6-16 이전에 획득된 자료를 사용하여 생성된 간섭도에서 매우 많은 노이즈가 발생하였다. 이는 1993-6-16일 이전에 이 지역에서 단지 신설, 부지 정리 등과 같은 건설공사에 의해 지표 특성이 변화되었기 때문으로 판단된다. 따라서 해당동 일대는 22개의 간섭도 중 1993/6/16 자료부터 1998/10/4 까지 획득된 18개의 간섭도만을 이용하여 PSInSAR 분석을 수행하였다.

Fig. 7은 목포시 지역에서 최종적으로 추출된 PS에서 산출된 지표변위 속도이다. 목포시 동명동 일대와 해당 그리고, 산정동 일대에서 뚜렷한 침하가 관측되며, 최대 침하량은 약 4cm/yr에 이른다. Fig. 8은 변위속도를 계산하는 과정에서 산출된 DEM 오차를 도시한 것으로, 수백 m 이상의 지역적인 규모에서 사용된 DEM의 오차가 거의 없음을 알 수 있다. 대부분의

DEM 오차는 고층건물이 밀집해 있는 지역에서 발생한다. 이러한 지역에서 레이더 신호는 건물 벽 또는 옥상으로부터 후방 산란된 것들인데, DEM이 이러한 건물의 높이를 충분히 반영하지 못하기 때문이다.

PSInSAR로부터 계산된 모든 PS들은 각 SAR 관측 시각에서의 변위 정보를 제공한다. 관측시각과 B_L에 따른 위상의 추이를 자세히 살펴보기 위해 주요 침하 지역에서 높은 긴밀도를 가지고 있는 5개의 PS를 선정하였다(Fig. 7 참조). PS₁(동명동), PS₂(원산동), PS₃(하당동), PS₄(산정 2동) 그리고 PS₅(연동)에서 위상변화는 Fig. 9과 같다. 각 PS의 위그림은 차분 위상으로부터 DEM 오차를 추정된 그림이며, 아래 그림은 DEM 오차를 보정한 후의 위상으로 시간에 따른 PS의 위상변화 즉 지표변위를 추정된 것을 도시한 것이다. 지표변위에 의한 시간에 따른 위상 변화와 DEM 오차에 의한 B_L에 따른 위상변화가 선형의 관계를 가지고 있음이 뚜렷하게 관측된다. PS₁의 긴밀도는 0.93이고 추정된 고도 오차는 -3.0m, 그리고 주시방향으로의 변위 속도는 -4.6cm/yr이다. 선형의 변위 성분으로부터 분리된 잔여 성분은 위상 잡음과 비선형 지표변위를 포함한다. PS₂, PS₃에서의 변위 속도는 -3.7cm/yr, -1.8cm/yr이며, 긴밀도는 0.91, 0.95이다. PS₄는 안정된 지역에서 추출된 것으로 주시방향으로 변위속도는

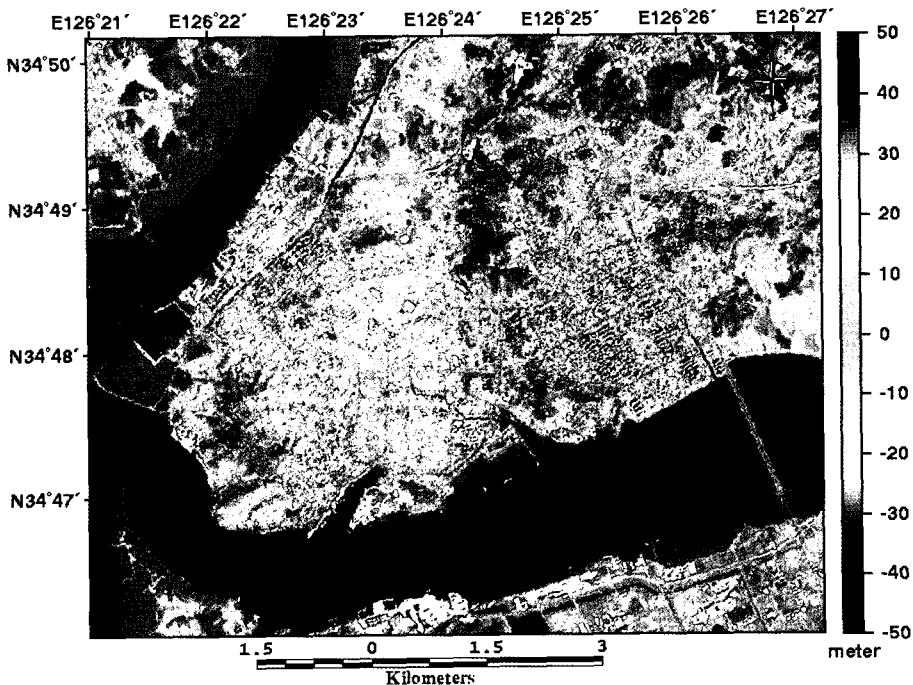


Fig. 8. Estimated DEM error of the PSs.

0.1cm/yr로 지표 상승을 의미한다. 그러나 이러한 값은 관측오차에 기인하는 것이다. PSInSAR를 이용하여 관측된 고도오차 및 변위성분 관측한계는 간섭쌍의 기선 거리 분포, 시간간격 및 신호 대 잡음비를 이용하여 계산될 수 있다(Ferretti *et al.*, 2001). 이 연구에서

사용된 Table 1의 자료를 이용하여 계산된 고도오차 정확도는 $\sigma_{\text{alt}} \approx 1.02 \text{ m}$ 이며, 주시방향으로의 속도에 대한 정확도는 $\sigma_{\text{alt}} \approx 0.19 \text{ cm/yr}$ 이다. PS₅는 Fig. 6의 B 구역에 근처에 위치한 관측점으로, 시간에 따른 비선형적인 침하양상을 극명하게 드러내고 있다. 비록 계

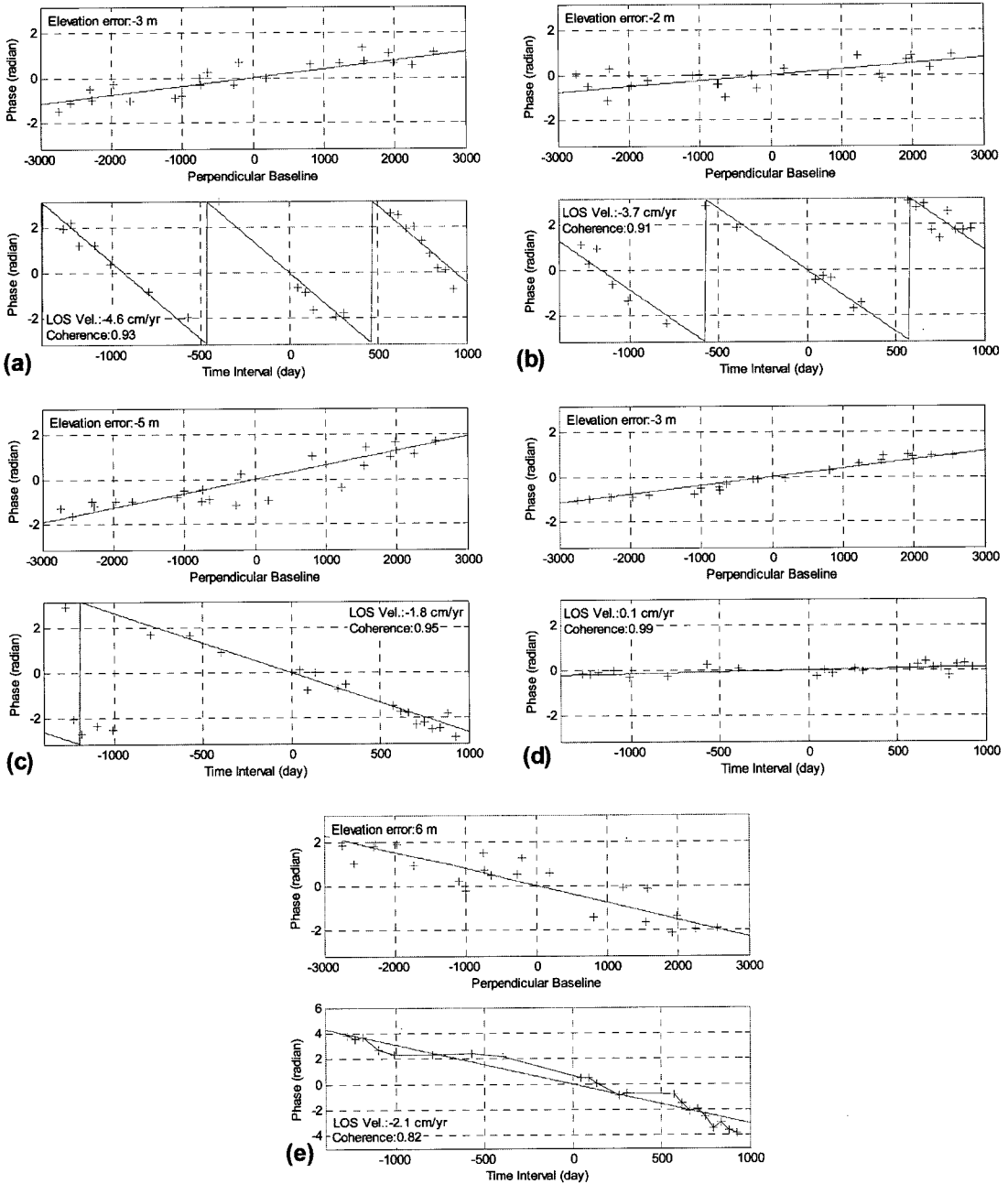


Fig. 9. Temporal series evolution (from 1992 to 1998) of the displacement of five selected permanent scatterers. The zero value in horizontal axis (time interval) corresponds to the date of Mar. 23, 1996. Each diagram shows DEM error and mean subsidence rate in LOS estimated at (a), (b), (c), (d), and (e).

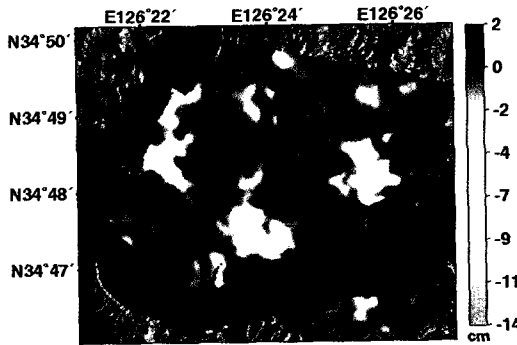


Fig. 10. Subsidence between 1996-3-24 and 1998-8-21 obtained interpolating and low-pass filtering the terrain deformation measured in correspondence of the PSs.

산된 평균 침하 속도는 -2.1cm/yr 이지만, 96년 이전에는 침하가 거의 발생하지 않다가 96년 이후에 자료부터 본격적으로 침하가 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 6의 침하 단면도로부터 유추된 이 지역의 침하 형태를 매우 잘 반영하고 있다.

PS에서 측정된 변위값을 보간하면, 각 SAR 관측시기에서의 변위도를 작성할 수 있다. Fig. 10은 1996-3-24부터 1998-8-21 사이에 발생한 침하값으로 PS에서의 변위값을 보간하고 저주파 필터링하여 작성한 것이다. 이러한 관측값은 동일기간의 DInSAR 결과(Fig. 5(j))와 비교될 수 있다. PSInSAR의 결과는 DInSAR와 비슷한 침하 양상을 보여줄 뿐만 아니라 해당동과 원산동에서 DInSAR 보다 훨씬 정밀한 변위를 보여준다.

5. 결론 및 토의

JERS-1 SAR의 레이더 간섭기법을 이용하여 92-9-25부터 98-10-4 동안 목포시에서 발생한 침하를 관측하였다. DInSAR로 구한 차분간섭도로부터 지표변위를 관측한 연구 결과, 목포시 동명동, 해당동 원산동 일대에서 침하가 관측되었다. 이들은 기간에 따라 다소 침하속도의 차이가 있지만, 대부분 지속적으로 발생한 것으로 해석되었다. 침하속도의 정량적인 분석과 도심지역에서 발생하는 지속적인 침하현상을 효과적으로 관측하기 위해 23개의 JERS-1 SAR 영상을 이용하여 PSInSAR 분석을 수행하였다. DInSAR 결과와 마찬가지로 목포시 동명동과 산정동 지역에서 뚜렷한 침하가 관측되었으며, 최대 침하량은 약 4cm/yr 정도이다. 또한 이들 지역 외에 해당동지역에서 연간 약 2~3cm 정도의 침하가 발생하고 있는 것으로 나타났다. PSInSAR를 이용하여 계산된 평균 침하도는 침하지역

을 명확하게 규명할 뿐 아니라, 낮은 긴밀도로 인해 차분간섭도에서 정확한 관측이 불가능하였던 지역에 대한 침하 양상까지 잘 드러낸다.

도심지역은 장기간 동안에도 긴밀도가 유지되므로, DInSAR 및 PSInSAR 기법을 이용하여 변위를 관측할 수 있었다. 특히 PSInSAR 기법은 각 PS에서의 시간에 따른 지표변위의 추이에 대한 정량적 해석을 가능케 하므로 광역적인 침하와 더불어 각 구조물 개별적 침하양상에 대한 정보를 제공할 수 있다. SAR 위상간섭기법을 이용한 변위관측은 광범위한 지역의 지속적인 관측을 용이하게 하기 때문에 지반침하, 산사태, 화산활동과 같은 지질재해의 감시에 매우 효과적인 수단이다. 향후 새롭게 발사될 SAR 영상이나 RADARSAT-1, ERS-2, Envisat영상 등을 이용해 목포지역의 지속적인 관측을 해야 할 것이다. 또한 관측된 침하원인 규명 및 침하 모델링을 통한 지구물리학적 해석 등도 지속적으로 수행되어야 할 과제이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(과제번호 M1-0302-00-0063)의 지원으로 이루어졌음을 밝힌다.

참고문헌

김상완 (2004) L-밴드 영상레이더 위상간섭기법을 이용한 백두산 및 부산지역의 지표면 변위 관측. 연세대학교 박사학위 논문, 157p.
 이창욱 (2002) L-밴드 JERS-1 SAR를 이용한 매립지 지반침하 관측. 연세대학교 석사학위 논문, 84p.
 정한철, 김상완, 김복철, 민경덕, 원종선 (2004) JERS-1 SAR를 이용한 가은 폐탄광 지역 지반침하 관측. 자원환경지질, v. 37, p. 509-519.
 ASF/JPL (1994) JERS-1 SAR Data Quality Assessment, <http://www.asf.alaska.edu>.
 Buckley, S. (2000) Radar Interferometry Measurement of Land Subsidence. The University of Texas at Austin, Ph. D. Dissertation.
 Bürgmann, R., Rosen, P.A. and Fielding E.J. (2000) Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and its Deformation. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., v. 28, p. 169-209.
 Colesanti, C., Fattetti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2003) Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. Engineering Geology, v. 68, p. 3-14.
 Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., v. 39, p. 8-20.
 Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2000) Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers

- in Differential SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, v. 38, p. 2,202-2,212.
- Fruneau, B. and Sarti, F. (2000) Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: isolation of deformation from atmospheric artifacts using correlation. *Geophys. Res. Lett.*, v. 27, p. 3981-3984.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. and Zebker, H.A. (1989) Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, v. 94, p. 9183-9191.
- Ghiglia, D.C. and Pritt, M.D., 1998, Two-dimensional phase unwrapping : Theory, Algorithms, and Software, Wiley, New York.
- Goldstein, R.M. and Werner, C. (1998) Radar interferogram filtering for geophysical application. *Geoph. Res. Letters*, v. 25, p. 4035-4038.
- Kim, S.W. and Won, J.S. (2003) Measurements of Soil Compaction Rate by Using JERS-1 SAR and a Prediction Model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, v. 41, p. 2683-2686.
- Kim, S.W., Lee, C.W., Song, K.Y., Min, K.D. and Won, J.S. (2005) Application of L-band differential SAR interferometry to subsidence rate estimation in reclaimed coastal land. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, p. 1363-1381.
- Massonnet, D. and Feigl, K.L. 1998, Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Review of Geophysics*, v. 36, p. 441-500.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Fiegl, K. and Rabaute, T. (1993) The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, v. 364, p. 138-142.
- Nakagawa, H., Murakami, M., Fujiwara, S. and Tobita, M. (2000) Land Subsidence of the Northern Kanto Plains caused by Ground Water Extraction detected by JERS-1 SAR Interferometry. *IGARSS'00, Hawaii, USA*, p. 2,233-2,235.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. and Bamler, R. (2003) The shuttle radar topography mission-a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 57, p. 241-262.
- Raymond, D. and Rudant, J.P. (1997) ERS1-SAR interferometry : potential and limits for mining subsidence detection. *Proceedings. 3rd ERS Symp. on Space at the service of our Environment, Florence, Italy*, p. 541-544.
- Reigber, C., Xia, Y., Kaufmann, H., Timmen, T., Bodechtel, J. and Frei M. (1996) Impact of Precise orbits on SAR interferometry. *Proc. FRINGE 96 Workshop, Zurich, Switzerland*.
- Scharroo, R. and Visser, P.N.A.M. (1998) Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. *J. Geophys. Res.*, v. 103, p. 8113-8127.
- Shimada, M. (1996) Radiometric and geometric calibration of JERS-1 SAR. *Adv. Space Res.*, v. 17, p. 79-88.
- Williams, S., Bock, Y. and Pang, P. (1998) Integrated satellite interferometry : Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. *J. Geophys. Res.*, v. 103, p. 27,051-27,067.
- Zebker, H.A. and Villasenor, J. (1992) Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, v. 30, p. 950-959.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A. and Werner, C.L. (1994) On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *J. Geophys. Res.*, v. 99, p. 19,617-19,634.