

JERS-1 L-band SAR Interferometry 를 이용한 연안매립지 지반침하 관측

김상완 · 이창욱 · 원중선*

연세대학교 지구시스템학과

Ground Subsidence Estimation in a Coastal Reclaimed Land Using JERS-1 L-band SAR Interferometry

Sang-Wan Kim, Chang-Wook Lee and Joong-Sun Won*

Department of Earth System Sciences, Yonsei University

We measured subsidences occurred in a coastal reclaimed land, Noksan industrial complex, from May 2, 1996 to February 21, 1998, using 5 interferograms of JERS-1 L-band SAR. SAR with a spatial resolution of about 16 m can detect the two-dimensional distribution of subsidence that is difficult to be estimated from in situ measurements. Accuracy of the subsidences estimated by 2-pass DInSAR was evaluated using the measurements of Magnetic Probe Extensometer (accuracy of ± 1 mm) installed at 42 stations. DInSAR measurements were well correlated with the field measurements showing an average correlation coefficient of 0.77. The correlation coefficient was further improved to be 0.87 (with RMSE of 1.44 cm) when only highly coherenced (>0.5) pixels were used. The slope of regression line was 1.04, very close to the unit value. In short, DInSAR measurements have a good linear relation with field measurements so that we can effectively detect a subsidence in the coastal reclaimed area especially using pixels of high coherence (>0.5). The maximum accumulated subsidence was about 60 cm in the study area, while the subsidence in the northern and south western areas were less than 20 cm. The results show that DInSAR is extremely useful for geotechnical applications as well as observation of natural deformation.

Key words : Differential SAR interferometry (DInSAR), Reclaimed land, Subsidence rate, JERS-1, L-band SAR

JERS-1 L-밴드 SAR 위성에서 얻어진 5개의 interferogram을 이용하여 1996년 5월 2일부터 1998년 2월 21일 사이 연안매립지인 녹산 국가산업단지의 공단조성과정에서 발생한 지반침하량을 계산하였다. 약 16 m의 공간해상도를 갖는 레이더 관측결과는 현장측정 자료로부터 관측되기 어려운 세밀한 침하 양상을 잘 반영하였다. 정확도 검증을 위해 2-pass DInSAR로 구한 침하량을 Magnetic Probe Extensometer(측정정밀도: ± 1 mm)를 사용하여 총 42개소에서 측정된 현장자료와 비교하였다. 5개의 쌍으로부터 추정된 DInSAR 침하량과 실측침하량의 평균 상관계수는 0.77이다. 추정된 DInSAR 침하량 중 0.5 이상의 긴밀도를 갖는 점들만을 이용하여 계산한 경우 상관계수는 0.87이며, RMSE는 1.44 cm로 더욱 좋은 결과를 나타낸다. 또한 추정된 회귀선의 기울기는 1.04로 실측값과 DInSAR 추정값이 기울기 1에 가까운 선형관계를 잘 만족하고 있음을 보여준다. 즉 DInSAR 결과 긴밀도 0.5 이상의 지점을 이용하면 효과적으로 연안매립지의 침하량을 관측할 수 있다. DInSAR를 이용하여 계산된 녹산 국가산업단지에서 발생한 최대 누적침하량은 약 60 cm 정도이며, 연구지역의 북쪽과 남서쪽에서는 약 20 cm 이하의 침하가 관측되었다. 이러한 결과는 자연적인 지표변위 관측뿐만 아니라 지반공학적인 응용분야에서도 DInSAR 기술이 매우 중요한 역할을 맡을 수 있음을 보여준다.

주요어 : Differential SAR interferometry (DInSAR), 매립지, 침하율, JERS-1, L-band SAR

*Corresponding author: jswon@yonsei.ac.kr

1. 서 론

경제성장과 더불어 농업용지 및 주거용지의 수요에 대한 증가가 날로 증가되고 있으나 경제성 있는 토지의 확보가 어려워, 최근 연약지반에서의 단지개발이 광범위하게 추진되고 있다(한국토지공사, 1998). 연약지반은 충적평야, 해안매립지, 골짜기부 등에 퇴적되어 있는 충적층 가운데 점토, 실트 및 세립토 등의 토질로 구성되어 있어, 지반의 강도가 작고 침하 등의 변형이 크기 때문에 연약지반을 개량하기 위해 다양한 공법들이 수행되고 있지만, 설계시 예측한 지반의 거동과 실제 지반의 거동은 상당한 차이가 있다. 매립지에서는 주로 압입에 의한 지반침하가 발생한다. 지반침하율은 성토량과 성토시기를 결정하는데 중요하며 성토량은 성토토사의 확보 및 비용과도 관련이 있으므로, 현장 계측결과와 지속적인 분석은 잔류 침하량 및 부등 침하량을 추정하여 공사비 절감 및 공법개선책을 수립하는데 매우 중요한 역할을 한다. 전통적으로 매립지 지반 침하는 지표 또는 지중에 매설된 침하계를 이용하여 관측된다(일반적으로 수백 m 이상의 간격). 침하계에 의한 측량은 고정밀도를 가지고 선택된 지역을 관측할 수는 있으나 넓은 지역에 적용할 경우에는 많은 시설비용과 부지조성공사를 진행하는 동안 매설된 시설물의 관리에 어려움이 따를 뿐만 아니라 침하량의 이차원적인 해석에 많은 제한이 따른다.

인공위성 SAR(Synthetic Aperture Radar)를 이용한 cross-track 레이더 interferometry 기술은 지난 1990년대 동안 지표의 고도 정보 추출(Zebker *et al.*, 1994a) 및 지진(Massonnet *et al.*, 1993; Zebker *et al.*, 1994b), 화산(Massonnet *et al.*, 1995; Amelung *et al.*, 2000), 빙하(Joughin *et al.*, 1996), 지반침하(Fruneau *et al.*, 2000; Strozzi *et al.*, 2001) 등에 의한 표면산란체의 미세한 변위와 대기층과 관련된 연구(Tarayre and Massonnet, 1996; Hanssen *et al.*, 1999) 등 많은 분야에 응용되어 왔다. 최근에는 전통적인 DInSAR(Differential SAR Interferometry) 개념을 벗어나 긴밀도가 높은 고정된 산란체인 Permanent Scatterer(PS)를 이용한 레이더 interferometry 기술이 도심지역 및 광산지역 등에서의 침하현상 관측(Ferretti *et al.*, 2000; Colesanti *et al.*, 2002)에 적용되고 있다. PSInSAR(Permanent Scatterer SAR Interferometry) 기술은 연구지역에서 획득된 거의 모든 SAR 영상을 활용할 수 있으며, 대기에 의한 영향을 효과적으로 제거할 수 있고 장기간에 걸쳐 발생하는 지표변위의 시

계열 분석이 용이하다는 장점이 있지만 인접한 PS 사이의 phase unwrapping에는 몇 가지 제약이 있다(Ferretti *et al.*, 2000).

지반공학 분야에서 DInSAR 기술의 활용성은 수십 km 이상의 넓은 지역에 걸쳐서, 수십 m의 공간해상도로, 수 cm 내지 수 mm 정도의 측정민감도를 가지고 수직 변위량을 측정할 수 있다는 데 있다. 기본적으로 레이더 interferometry는 표면반사체의 공간적인 변위량을 복원할 수가 없고 단지 레이더 관측방향으로의 변위만을 관측할 수 있어 공간적인 변위 벡터를 복원하는데 한계가 있다(Massonnet and Rabaute, 1993). 그러나 매립지에서 발생하는 침하현상과 같이 수평방향의 변위량이 무시될 수 있는 경우 더욱 정확한 측정이 가능하다. 높은 공간해상도로 계산된 지반침하량은 공학적인 설계 및 모델링에 중요한 입력값으로 사용 가능하며, 이러한 결과는 효과적인 공사진행을 통한 공사비 절감에 매우 중요한 요소이다. 연약지반 개량공사 중에 발생하는 침하량은 연약지반의 두께에 의해 크게 좌우되지만, 대략 연간 수십 cm 내지 1 m 범위의 값을 보이는데 이정도 크기의 변위는 레이더 interferometry 기술을 이용하여 측정하기에 적합하다. 그러나 지반성토과정에서 발생하는 temporal decorrelation(Zebker and Villasenor, 1992)이 가장 큰 제약사항이다. 비록 이런 측면에서 본 연구에서 사용한 L-band SAR가 C-band에 비해 더 효과적이지만 성토 작업이 수행된 지역에서는 거의 interferometric phase가 형성되지 않는다는 단점이 있다.

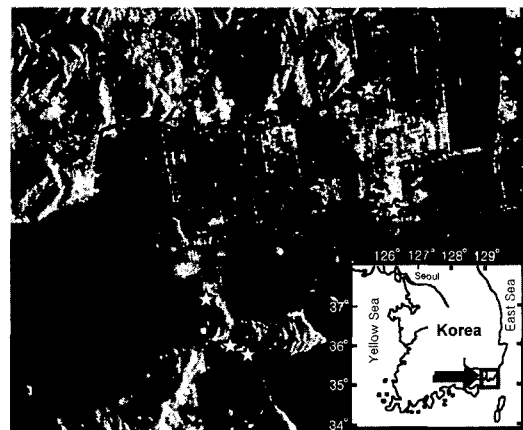


Fig. 1. JERS-1 SAR multi-image reflectivity map of the study area. The test site (thick black line) is about 2×4 km wide. The black squares represent the field measuring sites and the stars represent PSs used to evaluate the accuracy of displacement calculated by DInSAR.

본 연구는 계속되는 지반침하현상 때문에 93년 10월부터 2001년 3월까지 무려 8년 넘는 공사 끝에 완공된 6,956,000 m²(약 210만평)규모의 부산 강서구에 위치한 녹산 국가산업단지(Fig. 1)에 대해 1996년 5월부터 1998년 9월까지 관측된 JERS-1 SAR 자료를 이용하여, 연약지반 개량 공사에 의해 발생한 지반침하량을 계산하고자 한다. 또한 현장 관측자료와 DInSAR를 이용하여 측정된 결과를 비교 분석함으로써 지반공학적인 분야에서 DInSAR 기술의 응용가능성 및 타당성을 살펴보고자 한다.

2. 연구방법 및 자료

JERS-1이 운행되는 동안 본 연구지역에서 총 19개의 SAR 자료가 획득되었다. 녹산 국가산업단지는 해안을 매립한 곳으로, 1995년 말 1차 매립공사가 완료되기 이전의 자료는 전혀 interferometric pair가 형성되지 않으며, 이에 따라 1996년 5월 2일부터 1998년 9월 29일까지 총 13개의 JERS-1 SAR 자료만을 사용하였다. 이 기간동안 연구지역은 부지조성을 위한 인위적인 성토 작업이 진행되고 있었으므로 PS가 존재하지 않는다. 또한 연약지반 개량공사와 같은 인공적인 작업에 의해 발생하는 침하현상은 공간적으로 불규칙할 뿐만 아니라 급변하므로 PSInSAR에서와 같이 공간적으로 드물게 분포된 점의 위상만으로는 phase unwrapping(Goldstein *et al.*, 1988)을 수행할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 전통적인 DInSAR 기술을 이용하여 침하량을 구하였다.

DInSAR 기술을 이용하여 지표변위를 관측하기 위해서는 2-pass(Massonnet *et al.*, 1993), 3-pass 또는 4-pass(Gabriel *et al.*, 1989; Zebker *et al.*, 1994b) 방법이 있으나, 지속적인 지반침하 현상을 정확하게 관측하기 위해서는 2-pass 방법이 가장 효과적이다(Massonnet and Feigl, 1998). 2-pass 방법은 SAR 자료 외에 DEM(Digital Elevation Model)이 필요하다. 본 연구에서는 국립지리원에서 발간한 1:25,000 수치지도를 삼각망(Tin) 기법을 이용하여 15 m 간격의 DEM을 생성하였다. 그러나 국립지리원에서 발간한 수치지도에는 녹산국가산업공단 지역의 등고선이 포함되어 있지 않으며, 연구지역 내에 넓게 분포하고 있는 충적층 지대 및 도심지역에서 등고선이 없기 때문에 수치지도로부터 정확한 DEM을 구할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 ERS tandem

pair(ERS-1: 1995-12-17, ERS-2: 1995-12-18)를 이용하여 추가적으로 DEM을 추출하였다. 물론 ERS tandem pair 역시 자료획득 기간(1일)동안 발생한 지표변위에 의해 영향을 받지만 그 기간동안 현장 계측 자료로부터 추정된 연구지역의 평균 침하량은 -0.20 cm(표준편차 0.18 cm)로 단지 -1.8 m의 고도오차를 유발하므로 무시할 수 있다. ERS pair의 수직 baseline은 -315.38 m 이므로 interferogram 내에서 한 fringe(2π 위상 주기)에 대응하는 고도변화를 나타내는 ambiguity height(Massonnet and Rabaute, 1993)는 -25.8 m로 매우 작다. 대부분의 산악지역에서는 기하학적 decorrelation(Zebker and Villasenor, 1992)에 의한 위상 엘리어싱(aliasing)과 layover 효과 때문에 DEM을 추출할 수 없지만 상대적으로 평지에서는 정밀한 DEM을 생성할 수 있다. 일반적으로 ERS tandem DEM의 정밀도는 긴 baseline(<500 m)인 경우에도 5~6 m로 제한된다(Ferretti *et al.*, 2001). 비록 정확도 분석이 수행되지는 않았으나 연구지역이 2×4 km의 좁은 지역이며 지형경사가 완만하므로 수 m 이내의 정밀도를 가질 것으로 판단된다. JERS-1 SAR 자료와 DEM을 사용하여 생성된 differential interferogram을 phase unwrapping하여 연구지역에서 발생한 수직방향의 지반침하량을 구하고 이 값들을 지반조성공사 중 현장에서 계측된 침하량과 비교하여 정확도분석을 수행하였다. 본 연구의 전체적인 수행과정을 간략하게 도표화하면 Fig. 2와 같다.

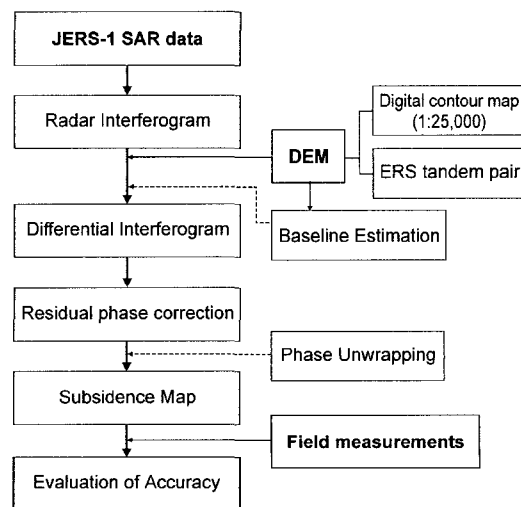


Fig. 2. Schematic diagram of data processing.

3. SAR 자료를 이용한 침하관측

3.1. Differential Interferogram의 생성

레이더 interferometry 기술을 이용하여 지표에서 발생하는 변위를 탐지하기 위해서는 interferogram으로부터 지형기록에 의한 위상을 제거해 differential interferogram을 구하여야 한다. 그러나 본 연구지역은 매립지이기 때문에 지형의 기록이 거의 없는 평지 지역이므로 interferogram으로부터 지형에 의한 위상을 제거할 필요 없이, 변위가 발생하지 않은 몇 개 기준점의 고도와 위상, 연구지역의 평균고도 등을 고려해 단순하게 변위를 계산할 수도 있다(이창욱, 2002). 다만 interferogram 작성 시에도 지구타원체에 의한 위상을 제거하기 위해서는 정확한 baseline 정보가 요구된다. ERS-1/2 위성의 경우 네덜란드 Delft 공대의 ERS orbital data(Scharroo *et al.*, 1998)과 독일의 precise orbits(Reigber *et al.*, 1996)은 수십 cm 이내의 정밀도를 가지고 제공되지만, JERS-1 위성의 경우에는 정확한 궤도정보가 제공되지 않기 때문에 궤도추정 과정이 신뢰할 수 있는 interferogram 및 differential interferogram 작성에 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 정확한 baseline을 계산하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다.

1 단계) 두 SAR 자료를 이용하여 지구타원체에 의한 위상을 가지고 있는 interferogram(ϕ_{real}) 작성.

2 단계) master 궤도와 DEM을 이용하여 시뮬레이션된 SAR 영상과 실제 master SAR 영상의 정합을 통한 master 궤도의 수정.

3 단계) 수정된 master 궤도를 이용하여 지리좌표계 DEM을 레이더좌표계 DEM으로 변환.

4 단계) 초기 궤도를 사용하여 영상중심에서의 baseline 길이와 각도(B_c , α_c), 및 azimuth 시간에 따른 baseline 길이 및 각도 변화율(δB , $\delta\alpha$)을 계산 (Fig. 3 참조).

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($\phi_{diff} = \phi_{real} - \phi_{sim}$)의 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 관

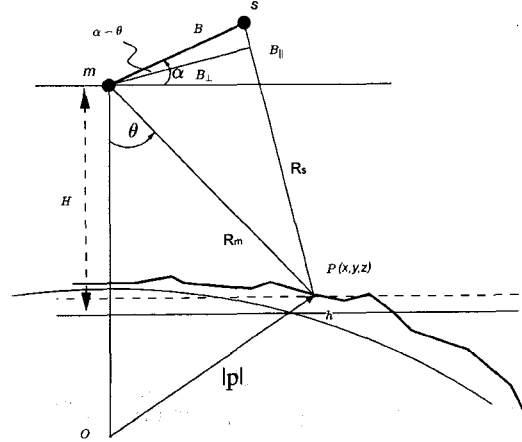


Fig. 3. SAR geometry. Where B is the length of baseline between master (m) and slave (s) satellite, $\alpha - \theta$ is the angle between the baseline and horizontal plane, and θ is the angle between the look direction of master satellite and vertical axis.

찰)에 의해 5 단계~7 단계 반복수행.

위의 방법을 1996년 10월 25일과 1997년 1월 21일 획득된 JERS-1 SAR pair에 적용한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 두 SAR 영상의 위상차인 interferogram(ϕ_{real})이며, Fig. 4(b)는 DEM으로부터 시뮬레이션된 SAR 영상, Fig. 4(c)는 최종 수정된 baseline에 의해 시뮬레이션된 interferogram(ϕ_{sim})이다. Fig. 4(d)는 Fig. 4(a)로부터 4(c)의 위상을 제거한 differential interferogram으로 지표면 변위에 의한 위상을 나타낸다. 시뮬레이션된 SAR 영상에서 보논바와 같이 연구지역 주변은 고도변화가 매우 심한 지역이고, 이 interferometric pair의 ambiguity height는 -97.6 m로 작은 값을 가지고 있음에도 불구하고 지형과 지구타원체에 의한 위상이 잘 제거된 것을 볼 수 있다.

연구지역에서 총 13개의 differential interferogram이 작성되었다. 각 pair의 master와 slave 영상의 획득 날짜와 ambiguity height는 Table 1과 같다. Ambiguity height가 작을수록 지형에 의한 위상을 적게 포함하고 있기 때문에 DInSAR에 효과적이며, 반면 이 값이 크면 지형고도자료를 추출하는데 효과적이다. 대체로 약 100 m~250 m 정도의 ambiguity height를 가지고 있으나, 9605/9606 pair가 4101.3 m로 매우 크며 9710/9711과 9805/9807 pair가 각각 -34.8 m와 21.7 m로 매우 작은 값을 가지고 있다. 총 13개 pair 중 연구지역 내에서 비교적 높은 긴밀도를 유지하고 있는 5개의 pair (9605/9606, 9610/9701,

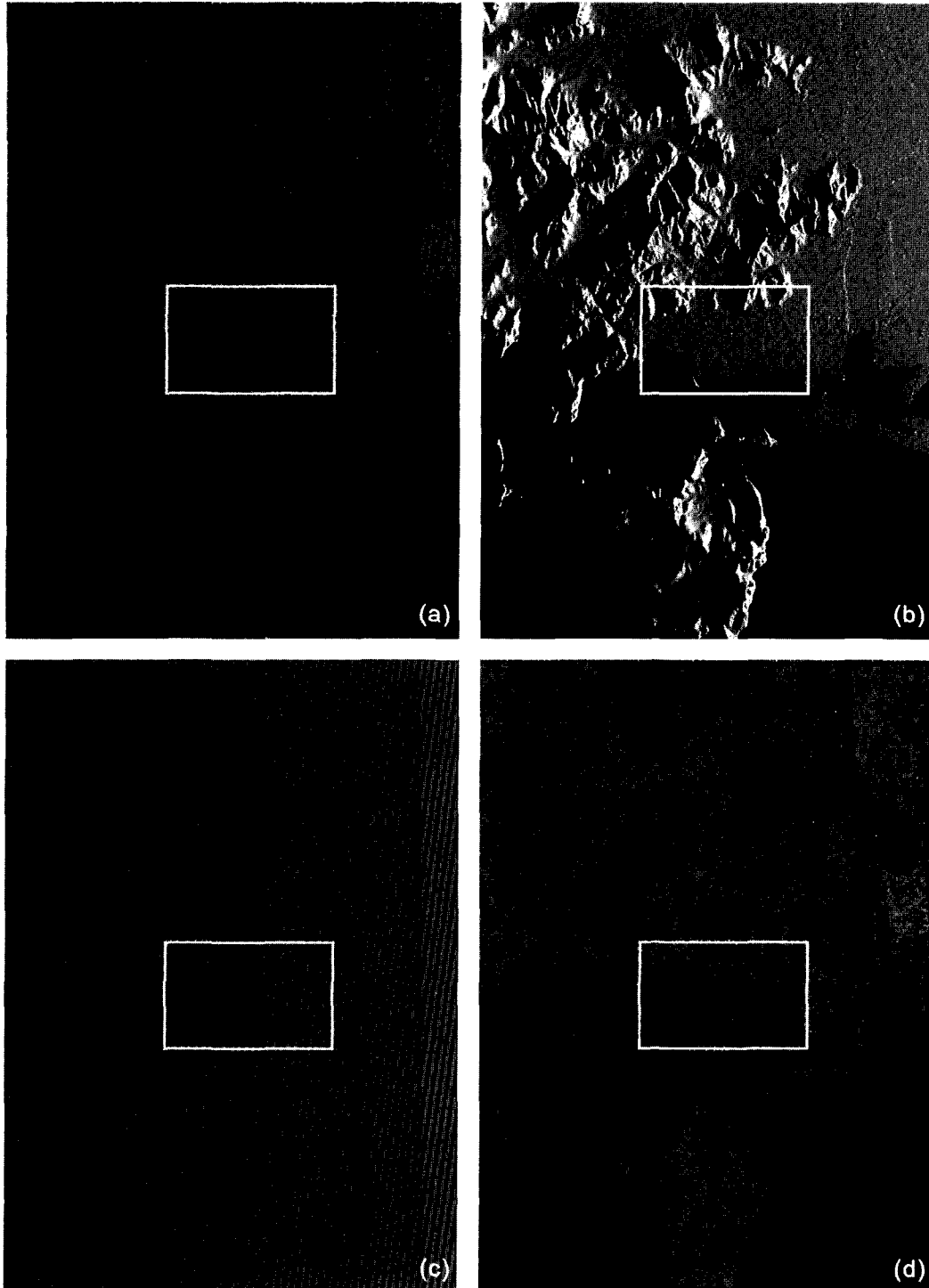


Fig. 4. Flat earth correction and topography phase subtraction for 9610/9701 pair. (a) Original interferogram, (b) Simulated SAR image from DEM, (c) Simulated interferogram of flat earth and topographic phase, (d) Resulting differential interferogram.

Table 1. JERS-1 SAR interferometric pairs.

No.	Acquisition date		Time interval (day)	Ambiguity height (m)
	Master	Slave		
1*	1996-05-06	1996-06-15	44	4101.3
2	1996-06-15	1996-10-25	132	258.6
3*	1996-10-25	1997-01-21	88	-97.6
4	1996-10-25	1997-06-02	220	-215.0
5*	1997-01-21	1997-06-02	132	108.9
6	1997-10-12	1997-11-25	44	-34.8
7*	1997-11-25	1998-01-08	44	-79.8
8	1997-11-25	1998-02-21	88	-264.2
9*	1998-01-08	1998-02-21	44	107.9
10	1998-02-21	1998-07-03	132	184.5
11	1998-05-20	1998-07-03	44	21.7
12	1998-07-03	1998-08-16	44	-70.2
13	1998-07-03	1998-09-29	88	204.7

*pairs used for the analysis.

9701/9706, 9711/9801 및 9801/9802) 만이 세밀한 분석에 이용되었고 나머지 pair는 보조적 해석에 이용되었다. 일반적으로 baseline이 짧고(즉 ambiguity height가 크고) pair의 시간 간격이 짧은 경우 높은 긴밀도를 유지하나, 본 연구지역에서는 인위적인 작업(성

토, 굴착 등)에 의한 영향 때문에 시간 간격과 temporal decorrelation의 관계가 무관하게 나타난다.

변위가 없는 점들의 위상값을 이용하여 Differential interferogram 위상의 절대 위상값으로 변환이 필요하며 또한 보정된 baseline의 정확성 검증이 요구된다. 이를 위해 연구지역 주변에서 추출된 permanent scatterer(PS)에서의 위상값을 추출하였다. PS는 98-01-08 영상을 master로 작성된 12개 interferometric pair의 긴밀도를 기준하여 선택하였다. 일반적으로 소창문의 크기가 클 경우는 신뢰도가 높은 PS를 추출할 수 있으나 정확한 점을 추출하는데 어려움이 있으며, 소창문의 크기가 작을 경우는 정확한 점을 추출할 수 있으나 신뢰성이 낮다(Ferretti *et al.*, 2001). 따라서 본 연구에서는 소창문 크기가 5×15에서 0.5, 3×9에서 0.6 이상의 긴밀도를 갖는 점들만을 추출하였다. 대기에 의한 영향을 줄이기 위해 가능한 연구지역에서 가까운 곳에서 추출하였으며, 매립지 밖에 있으며 변위가 없는 지역에서 추출하였다. 추출된 PS는 5개의 그룹(총 48점)으로, 각 그룹은 각각 4, 13, 12, 9, 그리고 10 개의 인접한 점으로 구성되어 있다. 추출된 PS 그룹의 위치는 Fig. 1에 표시되어 있다. 주분석에 이용된 5개 쌍에서 48점 PS의 위상을 추출하여 Fig.

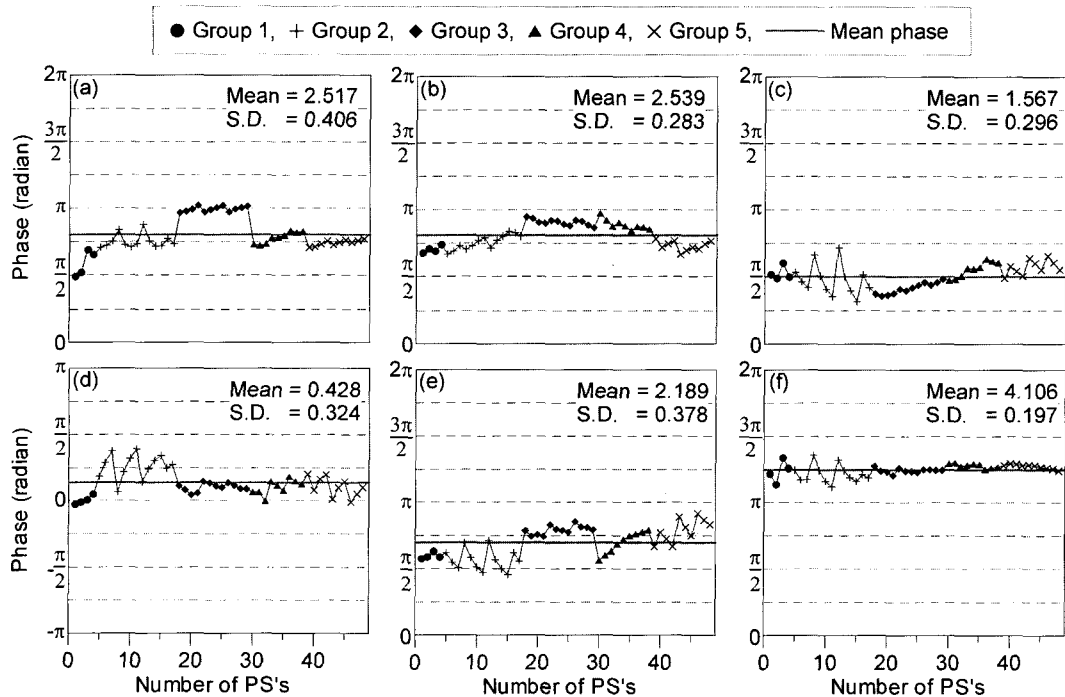


Fig. 5. Phases at PS's. (a) 9605/9606 pair, (b) 9610/9701 pair, (c) 9701/9706 pair, (d) 9711/9801 pair, (e) 9801/9802 pair, (f) 9802/9807 pair.

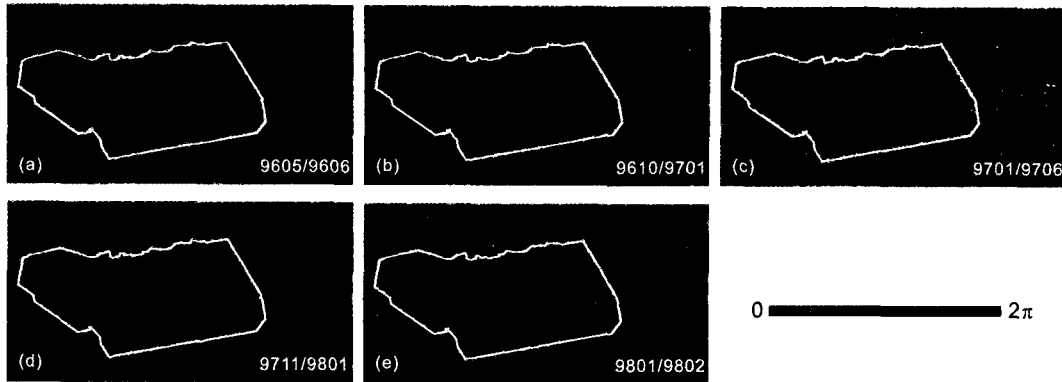


Fig. 6. Resulting differential interferograms. (a) 9605/9606 pair, (b) 9610/9701 pair, (c) 9701/9706 pair, (d) 9711/9801 pair, (e) 9801/9802 pair.

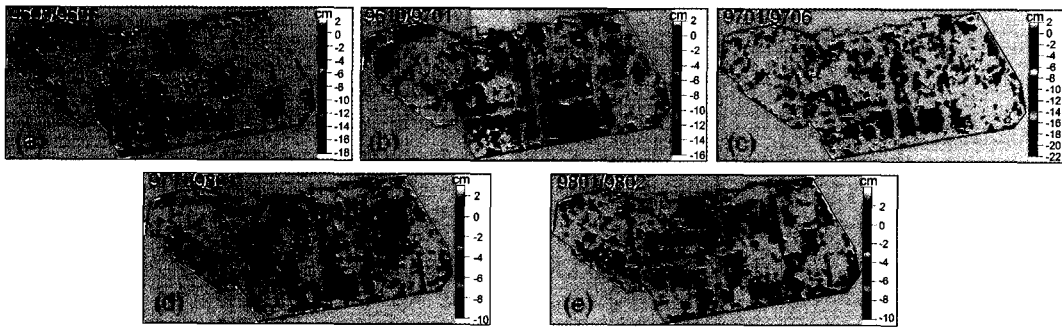


Fig. 7. Subsidence maps estimated by DInSAR. Pixels with low coherence(<0.3) were removed. (a) 9605/9606 pair, (b) 9610/9701 pair, (c) 9701/9706 pair, (d) 9711/9801 pair, (e) 9801/9802 pair.

5에 도시하였다. Fig. 5(f)는 9802/9807 pair의 위상으로 13개의 pair 중 PS에서 가장 안정된 값을 보여주며, 대부분 균일한 위상값을 갖는 것을 알 수 있다.

Differential interferogram의 위상 ϕ_i 는 다음과 같이 가정할 수 있다(Ferretti *et al.*, 2000).

$$\phi_i = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho_i + \alpha_i + n_i + t_i$$

여기서 $\Delta\rho$ 는 레이더 관측방향으로의 지표변위를, α_i 는 대기에 의한 오차, n_i 는 노이즈에 의한 오차, 그리고 t_i 는 고도에 의한 오차를 나타낸다. 추출된 PS는 지표 변위가 없는 곳이므로, 각 pair에서의 PS 위상의 표준편차는 대기, 노이즈, 고도오차에 의해 나타날 수 있는 기본적인 오차값으로 해석될 수 있다. 이에 관해서는 다음에 자세히 토의할 것이다. 지형과 지구타원체에 의한 위상이 제거된 differential interferogram으로부터 각 pair에서 계산된 PS 위상의 평균값을 제거하여 구한 연구지역의 최종 differential interferogram

은 Fig. 6과 같다. 각 differential interferogram의 밝기는 긴밀도에 의해 조절하여 도시하였다. 변위가 존재하지 않는 부분은 녹색을 띄며, 기타 청색 혹은 적색 등으로 표현된 지역은 변위가 존재하는 부분이다. 1997년 6월(Fig. 6(a), 6(b), 6(c))까지는 매립지 자체의 변화가 뚜렷하며, 이후 1998년 2월(Fig. 6(d), 6(e))까지는 도로의 침하가 관찰된다.

3.2. 지반침하량 계산

Differential interferogram으로부터 지반침하량을 계산하기 위해서는 phase unwrapping 과정을 거쳐야한다. Phase unwrapping은 아직까지 레이더 interferometry 기술 중에서 가장 어렵고, 결과에 많은 오차를 유발하는 중요한 자료처리과정이다. 지표변위에 의한 위상을 보다 쉽고 정확하게 unwrapping하기 위해서는 phase unwrapping을 수행하기 전에 differential interferogram으로부터 모델링에 의한 값을 미리 제거하고 난 후 나머지 위상만을 unwrapping해 다시 결합하는

방법이 효과적이다(Massonnet and Feigl, 1998). 그러나 본 연구지역의 변위는 자연적으로 발생하는 것이 아니기 때문에(즉 2차원적 평면에서 연속적인 변위를 가정할 수 없다) 약 500 m 간격의 현장 관측자료만을 이용하여 SAR 자료가 갖는 수십 m 간격의 자료를 적절하게 모델링하는 것은 불가능하다. 따라서 우리는 differential interferogram 자체를 그대로 unwrapping 하였다. 연구지역은 블록별로 다른 침하를 보여 블록간 위상의 연속성이 유지되기 힘들며, 또한 각 블록 사이의 도로부를 따라 긴밀도가 낮기 때문에 phase unwrapping에 의한 어려움이 발생할 수 있다.

Short Time Fourier Transform(STFT) 필터링(Carrasco, 1996)을 이용하여 differential interferogram을 필터링하였으며, 위상의 불연속을 잘 반영하는 minimum weighted discontinuity 알고리즘(Flynn, 1997)을 이용하여 unwrapping하였다. 이 지역에서 발생하는 지표변위는 지반 안정화 과정에서 발생하는 성토중량에 의해 중력방향으로 작용하는 변위가 주요한 것이므로, 다음 식을 이용하여 unwrapped 위상을 수직 침하량으로 변환하였다.

$$\Delta S = \frac{\phi_{unwrapped}}{2\pi} \frac{\lambda}{2\cos(\theta_{inc})}$$

여기서 λ 는 SAR 센서의 파장으로 JERS-1의 경우 23.53 cm이며, θ_{inc} 는 입사각으로 연구지역의 중심에서 계산된 값은 대략 39.7° 정도이다. 따라서 2 π 만큼의 위상 변화는 약 15.3 cm 정도의 수직변위에 해당한다.

최종 phase unwrapping을 통하여 계산된 침하량은 Fig. 7과 같다. 연구지역 주변에 분포하는 해양지역(대부분의 신호가 잡음에 의한 것으로 간주될 수 있다)의 긴밀도 분포를 참고로 하여 0.3 이하의 긴밀도를 가지고 있는 점은 신뢰성이 떨어지기 때문에 제거되었다. 또한 각 침하도는 결과의 중첩 및 현장자료와의 비교를 용이하게 하기 위해 98-01-08 자료를 기준으로 재배열되었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 전체적으로 이 지역의 침하는 블록별로 다른 양상으로 진행되고 있음을 알 수 있다. 이는 일차 매립 후 블록별로 성토작업이 이뤄졌기 때문이다. 또한 97년 11월 이후의 자료로 작성된 Fig. 7(d)와 (e)에서는 Fig. 7(a), (b), (c)와는 달리 도로부를 따라 침하가 집중되어 진행되는 현상이 관찰된다. 이것은 부동침하가 발생하고 있는 현장에서 도로를 따라 오수·상수도관 등 기반시설매설 공사를 신속히 하기 위하여, 1997년 4월에 도로부에 Pre-Loading공법(도로부지를 주변보다 5~6 m 가량 높여

침하를 촉진하는 것)을 시행하였기 때문이다. 따라서 DInSAR에 의해 관측된 침하 형태는 현장상황을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 반면 연구지역에서 계측된 현장 관측자료는 관측점의 공간적 간격이 넓어 이러한 2차원적인 침하 양상을 관측하는데 한계가 있다.

4. 현장 관측값과의 비교

본 연구지역에서는 (주)도화종합기술공사에 의해 1993년 11월 27일부터 1999년 9월 30일 까지 연약지반의 침하안정관리를 위해 지표침하계(Surface Settlement Measurement)와 층별침하계(Differential Settlement Gauge)를 이용한 측정이 실시되었다(한국토지공사, 1999). 침하판을 지표면에 설치하는 지표침하계에서는 지표면 이하에서 발생하는 침하가 측정되기 때문에 DInSAR로부터 관측된 결과와 직접 비교가 가능하나, 지표침하판의 설치위치 및 측정자료를 구할 수 없어 층별침하계 측정자료만을 이용하였다. 층별침하계는 심도별 침하량을 측정할 목적으로 사용되는 것으로, 본 연구에서 사용된 자료는 측정정밀도가 ± 1 mm인 Magnetic Probe Extensometer를 이용하여 측정된 것이다(한국토지공사, 1999). 측정심도는 각 측정하부의 압상을 고려하여 측정위치마다 다르게 매설되어 있다. 본 연구에서는 각 측정점의 최상위 측정심도에서 계측된 침하량을 이용하였다. 측정심도는 원지반 고도값(original ground level)을 기준 고도로 한 상대고도에 해당한다. 평균값이 -0.5 m로 거의 원지반 바로 아래 부분에 매설되어 있고 성토층 자체의 침하량을 무시할 수 있으므로 지표에서 측정된 침하량과 같은 값으로 볼 수 있다.

본 연구지역에 배치된 층별침하계는 총 42개소로 관측지점은 Fig. 1에 표시되어 있다. 연구지역 전체에 고루 분포되어 있으나 계측소 간의 간격이 약 500 m로 매우 넓은 간격으로 분포한다. 각 관측점 별로 계측시점과 종점은 다르나, 대부분의 관측점이 JERS-1 SAR 자료 획득기간(1996. 5. 2~1998. 9. 29)을 포함하고 있으며 약 9일 마다 측정되었다. 현장에서 계측된 침하량을 spline 보간하여 각 DInSAR pair의 자료 획득시기 동안 발생한 실측침하량을 계산하였다(Table 2). 최대 침하량은 53.5 cm이며, 1.5 cm 지반이 상승한 값도 있다. 이는 지반 안정화 마지막 단계에서 성토층 일부를 제거했을 때 발생하는 현상이다. 각 DInSAR pair 기간동안 구한 실측 침하량의 약 90% 정도가 -20 cm 이하의 침하량을 보이고 있다.

Table 2. In situ measured subsidence and DInSAR estimated during a time interval of each DInSAR pair. The field measured data were obtained by magnetic probe extensometer at 42 field measuring sites (Korea land corporation, 1999). The value in parentheses represents the coherence.

Site no.	Depth of laying ¹⁾ (m)	9605/9606 (cm)		9610/9701 (cm)		9701/9706 (cm)		9711/9801 (cm)		9801/9802 (cm)	
		In-situ	DInSAR	In-situ	DInSAR	In-situ	DInSAR	In-situ	DInSAR	In-situ	DInSAR
1	-0.8	-2.3	-1.37(0.57)	-1	-0.73(0.57)	-	0.74(0.39)	-	1.11(0.37)	-	-0.46(0.34)
2	-1.4	-1	-2.43(0.57)	-0.3	0.12(0.47)	-	1.09(0.35)	-	2.47(0.47)	-	-1.41(0.47)
3	-1.4	-8.2	-	-5.3	-6.30(0.54)	-6.2	-6.71(0.40)	-6.3	-	-3.7	-6.40(0.40)
4	-0.7	-4.6	-7.74(0.43)	-6.3	-7.73(0.52)	-7.4	-6.76(0.38)	-7.3	-1.11(0.43)	-7.9	-4.65(0.34)
5	-0.4	-6.6	-10.03(0.35)	-5.7	-	-6.5	-7.55(0.39)	-6.4	-3.10(0.38)	-6.5	-2.66(0.42)
6	-3.5	-7.2	-6.99(0.41)	-6.6	-6.19(0.45)	-9.1	-8.27(0.39)	-1.8	-	-0.3	-
7	-1.1	-3.2	-3.68(0.37)	-	-7.45(0.39)	-	-	-	-2.35(0.38)	-5.1	-4.94(0.55)
8	-0.6	-5.9	-5.54(0.43)	-26.9	-	-16.4	-	-0.8	-2.99(0.34)	-0.4	-1.15(0.40)
9	-2.7	-3.4	-	-4.2	-4.48(0.30)	-5	-8.27(0.36)	-11.1	-8.01(0.36)	-4.6	-3.23(0.32)
10	0.2	-4.1	-3.18(0.34)	-4.8	0.57(0.49)	-6.1	-10.97(0.40)	-4.7	-	-3.5	-3.26(0.45)
11	0.6	-2.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-4.53(0.39)
12	-1.3	-4.8	-	-8.2	-	-14.5	-4.19(0.39)	-5	-2.72(0.55)	1.5	-1.43(0.39)
13	0.8	-5.7	-3.86(0.36)	-4.6	-	-6.6	-4.57(0.39)	-3.4	-2.15(0.33)	-5.2	-
14	-1.0	-2.9	-3.47(0.50)	-4.2	-1.10(0.40)	-4	-7.67(0.45)	-1	-1.81(0.40)	-1.5	-2.38(0.65)
15	-1.1	-2.5	-	-2.3	-4.02(0.55)	-4.6	-1.60(0.45)	-3.5	-2.95(0.68)	-2.3	-4.71(0.39)
16	-1.4	-1.6	-0.99(0.60)	-10.4	-4.90(0.36)	-9.3	-	-	-1.63(0.60)	-	-3.47(0.37)
17	0.4	-3.7	-	-5.2	-4.28(0.44)	-9.7	-6.45(0.37)	-5.6	-4.83(0.32)	-0.6	-
18	0.7	-26.5	-	-11.1	-7.51(0.52)	-13.6	-12.33(0.44)	-4.4	-	-1.3	-1.70(0.37)
19	-1.2	-17.1	-	-36.1	-	-17.1	-16.99(0.34)	-0.8	0.15(0.38)	-0.5	-
20	-	-	-	-	-10.06(0.31)	-	-	-	1.12(0.58)	-	-1.60(0.67)
21	-0.4	-9.5	-	-6.2	-5.79(0.55)	-5.5	-	-0.6	-0.38(0.58)	-1	-
22	-0.5	-12.4	-7.01(0.34)	-7	-5.84(0.59)	-9.5	-	-6	-4.90(0.56)	-4.8	-2.60(0.38)
23	-1.4	-8.3	-	-10.4	-	-12	-10.51(0.34)	-7.8	-5.01(0.52)	-6	-6.17(0.68)
24	1.0	-12.1	-11.76(0.47)	-18.1	-12.58(0.45)	-42.8	-	-7.6	-7.23(0.38)	-6.5	-8.14(0.38)
25	1.5	-23.8	-3.76(0.43)	-16.5	-11.07(0.39)	-27.6	-18.67(0.37)	-5.9	-4.74(0.50)	-5.1	-3.56(0.55)
26	-0.2	-12.8	-	-9.6	-9.67(0.41)	-17.2	-	-6.3	-7.33(0.42)	-4.6	-4.63(0.36)
27	-1.1	-16.4	-	-	-7.96(0.42)	-	-8.84(0.39)	-1.1	-1.56(0.60)	-1.8	-2.86(0.35)
28	0.1	-0.8	-2.38(0.77)	-3.8	-3.93(0.55)	-	-	-	-6.31(0.35)	-	-3.70(0.44)
29	-0.7	-4.2	-5.60(0.66)	-21.9	-5.33(0.44)	-22.7	-6.30(0.32)	-3.8	-2.57(0.37)	-2.8	-
30	-1.6	-17.5	-7.46(0.32)	-13.5	-9.46(0.43)	-29.8	-	-5.8	-4.87(0.40)	-4.8	-6.33(0.38)
31	-1.3	-23.6	-	-53.5	-	-35.8	-	-5	-4.59(0.50)	-4.4	-4.35(0.68)
32	-5.1	-19.1	-14.70(0.47)	-51.9	-	-30.7	-	-4.8	-4.48(0.49)	-4.1	-2.24(0.46)
33	1.6	-21.7	-	-40.5	-	-26	-	-	-4.20(0.33)	-5.8	-
34	0.9	-11.1	-11.49(0.48)	-	-	-	-	-	-	-	-2.81(0.41)
35	?	-7.3	-10.38(0.40)	-8	-7.68(0.80)	-7.6	-9.57(0.68)	-3	-1.51(0.67)	-2.8	-1.89(0.37)
36	3.6	-11.2	-11.68(0.76)	-3.3	-4.61(0.36)	-3.6	-4.21(0.45)	-	-0.18(0.33)	-	-
37	0.2	-7.6	-6.08(0.64)	-11.5	-4.91(0.36)	-10.5	-7.60(0.35)	-2.8	-	-29.7	-
38	0.2	-9.6	-6.80(0.45)	-12.9	-14.26(0.48)	-15.6	-	-4.1	-3.74(0.72)	-3.7	-4.44(0.48)
39	-1.0	-6.7	-5.86(0.36)	-6.7	-6.28(0.70)	-	-6.95(0.33)	-7.8	-5.23(0.51)	-6.5	-7.07(0.41)
40	-0.6	-	-9.04(0.34)	-	-4.40(0.51)	-	-6.63(0.46)	-	-6.73(0.36)	-4.8	-2.35(0.46)
41	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-3.28(0.67)	-4.6	-4.91(0.55)
42	-1.4	-3.9	-0.72(0.58)	-7.1	-2.07(0.49)	-6.6	-2.77(0.45)	-1.6	0.89(0.54)	-1.5	-1.72(0.67)

- not available, ? an omission in the report.

¹⁾ Depth of laying is denoted a relative height of the upper tester with respect to the original ground level.

또한 DInSAR 침하도로부터 각 층별침하계 측정위치에서의 지반침하 값을 추출하였다(Table 2). 대부분의 계측위치가 임시 도로부 상에 있고, 이 도로를 따라 차량의 빈번한 이동에 의한 것으로 판단되는 temporal decorrelation이 발생해 긴밀도가 대부분 낮아 침하값을 구할 수 없는 곳이 많았다. 또한 레이더 자료를 geocoding하는 과정에서 정확하게 계측소의 위치를 찾는데 오차가 있기 때문에 3×3 소창문의 평균값을 취하였다. 현장관측값과 DInSAR에 의해 계산된 값이 대체로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 특히 긴밀도가 높은 점들 일수록 현장측정값과 잘 일치하고 있다.

두 관측값이 선형의 관계를 갖는가를 분석하기 위해 DInSAR에 의해 추정된 침하량을 x축으로 하고 현장 관측자료를 y축으로 하여 도시한 결과는 Fig. 8과 같다. 양쪽 모두에서 관측 가능한 점들만이 도시되었으며, 원의 크기는 DInSAR pair에서 각 측정점에 대응하는 긴밀도 값을 나타낸다. 원의 반경이 클수록 긴밀도

가 높으며 신뢰도도 높다. 현장 관측자료에서 20 cm 이상의 침하량을 갖는 점들 대부분은 DInSAR에서 구할 수 없는 부분에 속해, 단지 4점만이 Fig. 8에 도시되었다. 그러나 이들 4점 모두 phase unwrapping과정에서 발생한 에러 때문에 7.65 cm(위상차에 해당하는 값) 이상의 큰 오차를 가지고 있다. 이와 같이 침하량이 많은 곳에서 발생하는 오차는 과도한 침하에 따른 추가적인 decorrelation 보다는 계속되는 성토작업 때문에 긴밀도가 저하되어 주변과 고립되는 블록이 형성되기 때문으로 판단된다. 실제로 20 cm 이상의 침하량을 보이는 Fig. 7(a), (b), (c)의 오른쪽 중앙 부분을 살펴보면 대부분 값이 존재하지 않으며, 남아있는 부분도 주변의 블록들과 연결되어 있지 않음을 알 수 있다.

π 이상 손실된 6개 지점(Fig. 8에서 ←로 표시된 점)을 제외하고 원점을 통과하는 1차 직선을 이용하여 최적화된 선을 구하였다. 이들 상관계수는 0.86, 0.81, 0.76, 0.79, 0.64로 비교적 높은 값을 보여주고 있으며,

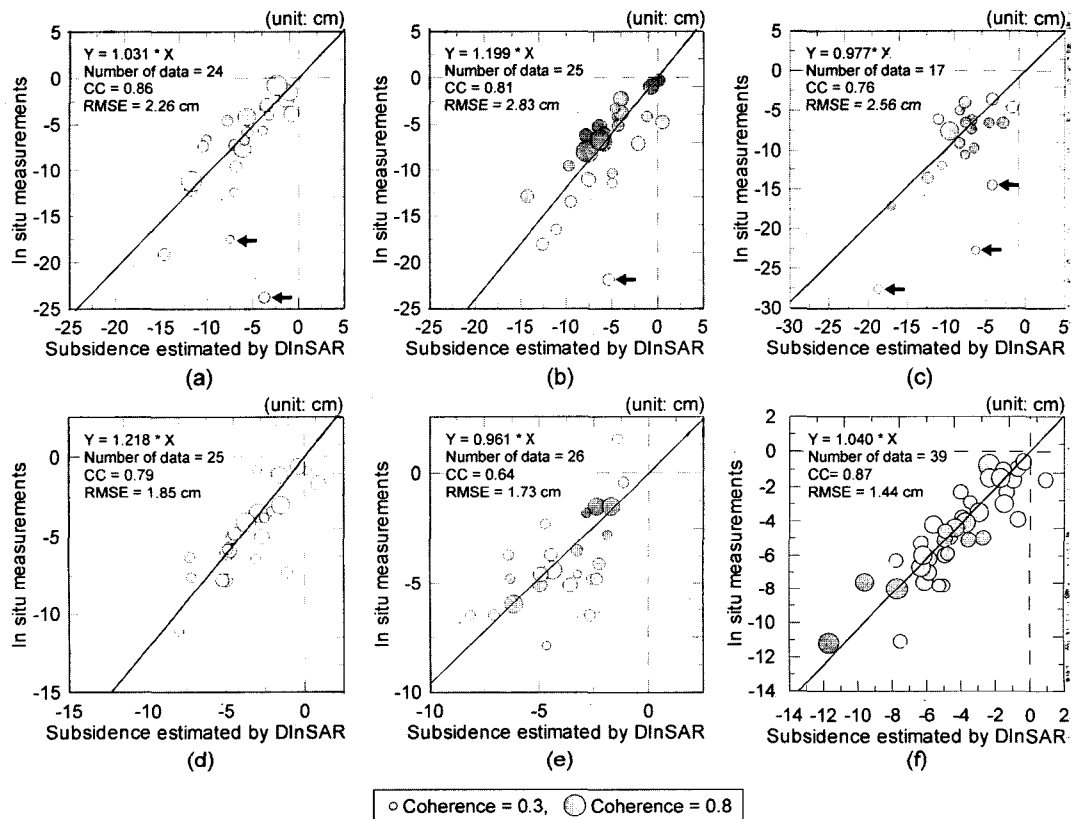


Fig. 8. Scatter plot of the subsidences estimated by DInSAR and field measurements. The radius of circle is proportional to coherence. (a) 9605/9606 pair, (b) 9610/9701 pair, (c) 9701/9706 pair, (d) 9711/9801 pair, (e) 9801/9802 pair, (f) All points having high coherence (>0.5) in (a), (b), (c), (d) and (e).

특히 이 일차 직선의 기울기가 1.03, 1.20, 0.98, 1.22, 0.96으로 거의 1:1의 관계를 잘 만족한다. 또한 긴밀도가 높은 점들 대부분이 이들 회귀선 부근에 분포하고 있다. 특히 Fig. 8(f)는 5개 쌍에서 0.5 이상의 긴밀도를 가지고 있는 모든 점을 도시한 것으로 상관 계수는 0.87이며, 회귀선의 기울기는 1.04로 거의 1에 가까운 값이다. 물론 이 도표에서도 더 높은 긴밀도를 갖는 점들은 회귀선에 더 가깝게 분포한다. 연구지역에 설치된 계측소 대부분이 도로부에 설치되어 있지만 20, 21, 27, 34, 35, 그리고 36번 계측소는 블록 내부에 설치되어 있어 비교적 항상 높은 긴밀도를 제공한다. 이들 중 35번 계측소만이 13개 DInSAR pair (Table 1)에 해당하는 기간 모두에서 실측침하량을 구할 수 있어 Fig. 9에 도시하였다. 13개 DInSAR pair의 긴밀도는 약 0.1~0.8의 값을 가지고 있으며, 상관 계수 0.85이고, 회귀선의 기울기는 1.07이다. Fig. 8과 마찬가지로 높은 긴밀도를 갖는 점들은 거의 회귀선 근처에 놓여있다. 따라서 DInSAR에 의해 추정된 침하량과 실측값은 높은 상관관계를 가지고 있는 일차 직선의 선형관계로 설명될 수 있으며, 기울기가 거의 1로 실측값과 DInSAR 추정값이 1:1의 관계를 갖는다. 0.5 이상의 긴밀도를 갖는 점들의 RMSE는 1.44 cm로 DInSAR에 의해 관측된 값의 95%가 3 cm 이내

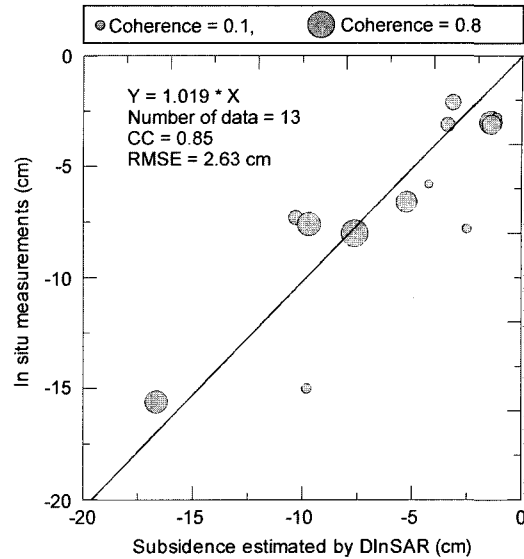


Fig. 9. Scatter plot of in situ measurements at 35th field site, and displacements estimated from 13 interferometric pairs.

의 오차한계 안에 존재하게 된다.

DInSAR에 의해 구한 5개의 침하도(Fig. 7)를 kriging 방법을 이용하여 격자화한 후 모두 더해, 96년 5월 2일부터 98년 2월 21일 까지(96년 6월 15일~96년 10

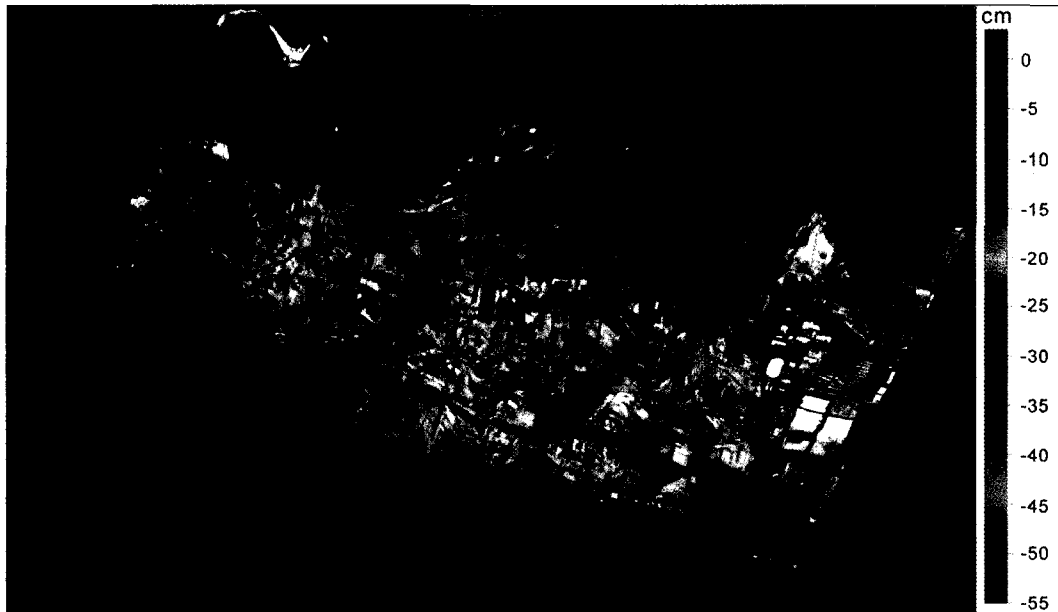


Fig. 10. Perspective view of the accumulated subsidence estimated by DInSAR. Z-scale in the study area was modulated by accumulated subsidence, and the outer part of the study area was modulated by elevation (The IKONOS image acquired on February 9, 2001 is the courtesy of e-HD.com).

월 12일과 97년 6월 2일~97년 11월 25일 제외) 약 1년간 녹산 국가산업단지에서 발생한 누적침하량을 구하였다. Fig. 10은 누적침하량을 3차원으로 표현한 것으로 연구지역 외곽의 Z축 스케일은 지형 고도값에 조절되었으며, 연구지역 내부는 침하량을 나타낸다. 3차원 영상의 표면은 2001년 2월 9일 획득된 IKONOS 영상(e-HD.com에 의해 제공)으로 공단조성이 완료된 녹산 국가산업단지를 볼 수 있다. 최대 침하량은 60 cm 정도이며, 연구지역의 북쪽과 남서쪽에서 침하량이 낮다. 연구지역의 북쪽은 육지부와 연결되는 부분이므로 연약지반이 얇아 침하량이 작을 것으로 기대되는 곳이다.

5. 토 의

본 연구에서 SAR 자료를 이용하여 매립지에서 발생하는 지반침하 현상을 관측하였다. 연구지역에서 작성된 레이더간섭도(Fig. 6)에서 볼 수 있듯이 대부분의 매립지는 연약지반처리를 위해 블록별로 성토작업이 수행되기 때문에 블록별로 차별침하가 발생한다. 따라서 블록의 경계부에서 높은 위상변화율을 갖는다. 실제로 연구지역의 실측침하량을 kriging 방법으로 격자화한 후 구한 침하량의 변화율이 7~8 cm/pixel에 이르는 부분들이 존재한다. 성토 직후의 침하 변화율은 블록 경계부를 따라 집중되므로 실제 변화율은 더욱 클 수 있다. 이러한 변화율은 한 화소당 π 이상의 위상변화를 야기 시키기 때문에 JERS-1 L-band에서도 엘리어싱이 발생한다. 따라서 wrapped 위상을 unwrapping하는 과정에서(n은 정수)의 위상을 손실할 가능성이 크다. 위와 같은 문제점을 극복하기 위해서는 가능한 한 짧은 시간간격을 가지고 연속적으로 획득된 자료를 이용함으로써 temporal decorrelation을 줄일 수 있고 침하량을 가급적 2 π 안에 제한시킬 수 있다. 또한 블록 내부에서의 관측된 현장자료는 phase unwrapping을 수행하는데 있어서 좋은 제한조건(constraint) 역할을 할 수 있다. 본 연구에서는 블록의 경계에 해당하는 도로부를 따라 주로 phase가 손상되어있으며, 대부분의 침하계가 도로부를 따라 설치되어 있기 때문에 phase unwrapping에 어려움이 따랐다. 비록 수십 cm 이상의 침하를 보이는 점에서 이러한 $\pm 2n\pi$ 위상손실이 주로 발생했지만, 각 계측소에서 측정된 실측침하량과 DInSAR에 의해 추정된 침하량을 비교한 결과 radar interferometry에 의해 비교적 높은 신뢰도를 갖는 침하량을 구할 수 있었다.

5.1. 성토작업에 의한 decorrelation

본 연구지역에서는 성토작업과 관련된 decorrelation이 발생하는 것이 특징적이다. 성토작업 후 지표면은 십여 cm 이내로 평탄하게 정비되지 않으므로 interferometric phase가 형성되지 않는다. 따라서 DInSAR pair의 자료 획득기간 동안 발생한 성토작업에 의한 지표상승은 differential interferogram에서 관찰되지 않는다. 실제로 성토에 의한 decorrelation은 DInSAR pair의 긴밀도와 밀접하게 관련되어있다. Fig. 11은 Table 1에 있는 DInSAR pair 13개에 해당하는 기간동안 성토작업 정도를 도표화한 것이다. 성토작업이 수행된 면적을 정확하게 구할 수 없어, 단지 42개 계측소에서 각 DInSAR pair의 자료 획득기간동안 관측이 수행되었던 계측소 수에 대한 성토작업이 수행된 계측소 수의 비율로 대신하였다. 9606/9610과 9802/9807 pair는 큰 ambiguity height에도 불구하고 Fig. 11에서 보는바와 같이 연구지역의 약 50% 정도가 성토작업이 수행되어 낮은 긴밀도를 보여준다. 9807/9808과 9807/9809 pair는 약 30% 정도이지만 총 관측점의 개수가 각각 23개, 15개에 불과해 많은 오차가 있을 것으로 판단된다. 비교적 높은 긴밀도를 보여 분석에 사용된 5개의 pair중 9701/9706 pair를 제외하면 대부분 20% 이하의 면적에서 성토작업이 수행되었다. 9710/9711과 9805/9807 pair 역시 20% 이하의 낮은 값을 가지고 있지만 이들의 매우 긴 baseline은 심각한 기하학적 decorrelation을 야기해 낮은 긴밀도를 보인다.

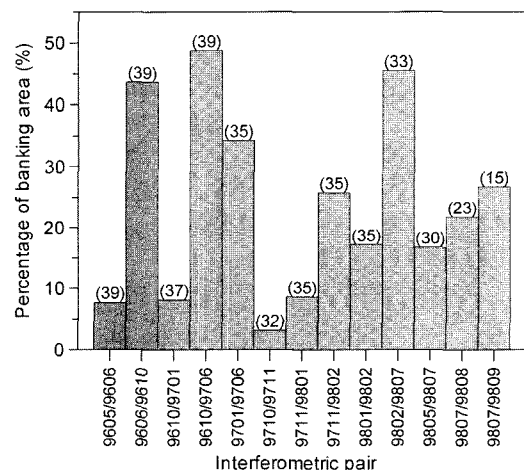


Fig. 11. Percentage of banking area between the acquisition of SAR data pairs. Values on the top of bars is the number of total available observatory.

Table 3. Error range of vertical movement caused by phase and DEM error due to loading height (LH).

No.	Interferometric pair	Error of vertical movement (cm)		
		phase error	DEM error due to LH	Total
1	9605/9606	±0.94	0.01	-0.93~0.95
2	9606/9610	±0.80	0.20	-0.60~1.00
3	9610/9701	±0.65	-0.54	-1.19~0.11
4	9610/9706	±0.55	-0.24	-0.79~0.31
5	9701/9706	±0.68	0.48	-0.20~1.16
6	9710/9711	±1.41	-1.50	-2.91~-0.09
7	9711/9801	±0.75	-0.65	-1.40~0.10
8	9711/9802	±0.47	-0.20	-0.67~0.27
9	9801/9802	±0.87	0.48	-0.39~1.35
10	9802/9807	±0.36	0.28	-0.08~0.64
11	9805/9807	±2.45	2.41	-0.04~4.86
12	9807/9808	±0.78	-0.74	-1.52~0.04
13	9807/9809	±0.46	0.26	-0.20~0.72
mean	-	±0.86	0.02	-0.84~0.88

5.2. DInSAR에 의해 추정된 수직변위의 오차분석

Fig. 5에서 연구지역 주변부에 분포하고 있는 PS에서 추출된 위상의 표준편차는 연구지역의 대기의 영향에 의한 오차, 잡음, DEM 오차, 및 baseline 오차 등에 의한 영향을 포괄적으로 포함하고 있다. 그러나 연구지역 내의 DEM은 하나의 ERS tandem pair를 이용하여 생성되었으므로 이를 고려하여야한다. 연구지역이 약 2×4 km의 좁은 지역이며 최대고도차는 11 m, 표준편차는 단지 2.1 m이다. 따라서 연구지역 외곽의 DEM 추출을 위해 사용된 1:25,000 수치지도의 일 반적인 허용오차의 표준편차(평면위치 5 m, 등고선 3 m, [국립지리원, 1995])와 크게 다르지 않으므로 무시할 수 있다. PS에서의 위상동요에 의한 수직변위 오차는 Table 3과 같다. Baseline이 매우 긴 9710/9711과 9805/9807 pair를 제외하면 모두 ±1 cm 이내의 오차를 보이며 평균은 ±0.86 cm 이다. 연구지역 내에서의 지표고도값은 성토작업에 의해 영향을 받기 때문에 추가적인 에러가 야기된다. 성토작업이 완료된 이후 자료들 간의 pair에서 성토량에 의한 고도변화는 DEM의 오차형태로 나타난다. SAR 자료 획득기간동안 계측소에서 측정된 성토량은 최소 0, 최대 9.8, 그리고 평균 3.6 m이다. 평균 성토량에 의한 수직 오차는 ambiguity height에 따라 달라지므로 Table 3에서와 같이 + 또는 - 값 모두 나타날 수 있다. 위상오차와 마찬가지로 9710/9711과 9805/9807 pair 외에는 거의 ±0.5 cm 이하의 값을 갖는다. 앞서 언급한 두 오차에

의한 값을 더한 총 오차는 대부분 ±1.5 cm 이내의 값이며, 평균은 ±1 cm 이내의 오차를 보인다. 이러한 값은 PS에서 추출된 위상과 평균 성토량에 의해 계산된 값으로 실제로는 더 많은 여러 가지 decorrelation 요인에 의한 오차가 추가적으로 발생할 것이다. 이와 같은 오차분석 결과는 연구지역에서 0.5 이상의 긴밀도를 갖는 점들의 RMSE가 1.44 cm인 것과 매우 잘 일치한다.

6. 결 론

본 연구에서는 JERS-1 L-밴드 SAR 위성을 이용하여 연안매립지인 녹산 국가산업단지의 공간조성과정에서 발생한 지반침하량을 계산하였다. 9711/9801, 9801/9802 pair의 결과에서 볼 수 있듯이 2-pass DInSAR 기법을 이용하여 추정된 지반침하도는 수십 m의 공간 해상도를 가지고 있기 때문에 전체지역에서의 2차원적 침하 양상을 잘 반영하고 있다. DInSAR로 구한 침하량은 총 42개소에서 Magnetic Probe Extensometer(측정정밀도: ±1 mm)를 사용하여 측정된 현장 관측자료와 비교하였다. 비록 현장에서 20 cm 이상의 침하가 발생한 점들 대부분이 낮은 긴밀도로 인해 DInSAR 결과에서 제거되었으며, 남아있는 몇 점들도 phase unwrapping 에러 때문에 ±2π가 손실되었으나, 이러한 몇몇 관측점을 제외하면 5개의 interferometric pair로부터 추정된 DInSAR 침하량과 실측침하량의 평균 상관계수는 0.77이다. 특히 0.5 이상의 긴밀도를 가지고 있는 모든 점의 상관계수는 0.87이고, RMSE는 단지 1.44 cm이다. 또한 추정된 회귀선의 기울기는 1.04로 실측값과 DInSAR 추정값이 1:1의 선형관계 잘 만족하고 있음을 보여준다. 따라서 연안 매립지에서의 침하량 관측을 위해서는 긴밀도 0.5 이상의 점들을 이용하면 효과적이다.

DInSAR를 이용하여 본 연구지역에서 추정된 96년 5월 2일부터 98년 2월 21일 까지(96년 6월 15일~96년 10월 12일과 97년 6월 2일~97년 11월 25일 제외) 약 1년간 녹산 국가산업단지에서 발생한 누적침하량의 최대값은 60 cm 정도이며, 연구지역의 북쪽과 남서쪽에서는 약 20 cm 이하의 침하가 관측되었다. 이러한 결과는 자연적인 지표면위 관측 외에도 매립지 조성공사에서와 같이 인위적인 원인에 의해 발생하는 압밀 등에 의한 지표면위를 관측하기위한 지반공학 적용분야에서도 DInSAR 기술이 중요한 역할을 맡을 수 있음을 보여준다.

사 사

현장 측정자료를 제공하여 준 (주)도화종합기술공사와, 현장자료 해석에 관해 많은 조언을 해준 Geoscan의 기정석 박사님에게 감사드립니다.

참고문헌

- 국립지리원 (1995) 수지도작성 작업내규, 국립지리원 내규 제 71호.
- 한국토지공사 (1999) 녹산국가공단 개발사업 부지조성공사 연약지반 침하안정관리용역 종합보고서.
- 한국토지공사 (1998) 연약지반의 처리공법과 침하계측에 관한 연구.
- 이창욱 (2002) L-밴드 JERS-1 SAR를 이용한 매립지 지반침하 관측·녹산·신호공단을 중심으로. 연세대학교 석사학위논문
- Amelung F, Jonnson S., Zebker H.A., and Segall P. (2000) Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galapagos observed with radar interferometry. *Nature*, v. 407, p. 993-996.
- Colesanti C., Locatelli R., and Novali F. (2002) Ground Deformation Monitoring Exploiting SAR Permanent Scatterers. *Proc. IGARSS 2002*, Toronto, Canada, p. 1219-1221.
- Carrasco D., Sanz S., Sousa R., and Broquetas A. (1996) The Developing of a Wide Area Interferometric Processor. *Proc. FRINGE 96 Workshop*, Zurich, Switzerland, p. 193-201.
- Ferretti A., Prati C. and Rocca F. (2000) Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, v. 38(5), p. 2202-2211.
- Ferretti A., Prati C., and Rocca F. (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, v. 39(1), p. 8-20.
- 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(24), p. 3981-3984.
- Flynn T.J. (1997) Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity. *J. Opt. Soc. Am. A*, v. 14(10), p. 2692-2701.
- 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.
- Goldstein R.M., Zebker H.A., and Werner C.L. (1988) Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.*, v. 23, p. 713-720.
- Hanssen, R.F., Weckwerth H.A., Zebker H.A., and Klees R. (1999) High-resolution water vapor mapping from interferometric radar measurements. *Science*, v. 283, p. 1297-1297.
- Joughin I., Tulaczyk S., Fahnestock M., and Kwok R. (1996) A mini-surge on the Ryder Glacier, Greenland, observed via satellite radar interferometry. *Science*, v. 274, p. 228-230.
- Massonnet D. and Rabaute T. (1993) Radar interferometry: Limits and potential. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, v. 31, p. 455-464.
- 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.
- Massonnet D., Briole P., and Arnaud A. (1995) Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, v. 375, p. 567-570.
- Massonnet D. and Feigl K.L. (1998) Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.*, v. 36, p. 441-500.
- 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.
- Strozzi T., Wegmüller U., Gitelli G., and Spreckels V. (2001) Land subsidence Monitoring with Differential SAR Interferometry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 67(11), p. 1261-1270.
- Tarayre H. and D. Massonnet (1996) Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1 interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, v. 23, p. 989-992.
- Zebker H.A. and Villasenor J. (1992) Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE trans. Geosci. Remote Sensing*, v. 30, p. 950-959.
- Zebker H.A., Werner C.L., Rosen P.A., and Hensley S. (1994a) Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, v. 32, p. 823-836.
- Zebker H.A., Rosen P.A., Goldstein R.M., Gabriel A., and Werner C.L. (1994b) On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *J. Geophys. Res.*, v. 99(B10), p. 19617-19634.

2002년 8월 6일 원고접수, 2002년 10월 24일 게재승인.