

JERS-1 SAR를 이용한 가은 폐탄광 지역 지반침하 관측

정한철¹ · 김상완¹ · 김복철² · 민경덕¹ · 원중선^{1*}

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²한국지질자원연구원 지질기반정보부

Observation of the Ground Subsidence in the Abandoned Gaeun Coal Mining Area using JERS-1 SAR

Hahn Chul Jung, Sang-Wan Kim, Bok Chul Kim, Kyung Duck Min and Joong-Sun Won

¹Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²Geology and Geological information Division, Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

The ground subsidence that occurred in the abandoned coal mining area, Gaeun, Korea, was observed using 25 JERS-1 SAR interferograms from November 1992 to October 1998. We carried out measurements on a subset of image pixels corresponding to point-wise stable reflectors(PS: permanent scatterer) by exploiting a long temporal series of interferometric phases and compared it with the distribution map of *in situ* examined crack level. PSs could be identified by means of amplitude dispersion index and coherence of the interferograms and the density of PS was much higher in an urban area than in a mountainous region. The measured subsidence rate represented the average velocity in a period of image acquisition and excluded complex nonlinear displacements such as an abrupt collapse. The mean line-of-sight velocity in the study area is 0.19cm/yr and the estimation error is 0.18cm/yr. The center of the abandoned Gaeun coal mine(0.49cm/yr) and the area opposite Gaeun station(1.66cm/yr) were observed as the most highly subsiding areas.

Key words : Gaeun, JERS-1, mine, PSInSAR, subsidence

JERS-1 L밴드 SAR 위성에서 얻어진 25개의 레이더간섭도를 이용하여 1992년 11월 5일부터 1998년 10월 1일 사이 경상북도 문경시 가은읍 폐탄광 일대의 지반 침하량을 측정하였다. SAR 영상에서 긴밀도가 높은 고정 산란체(PS: permanent scatterer)를 이용한 시계열 분석을 통해서 지반침하를 계산하였고, 현장조사된 균열등급 분포도와 비교하였다. 고정된 산란체는 1차적으로 진폭값과 간섭쌍의 긴밀도 영상을 이용하여 계산하였는데, 산악지역에 비해 도심지역에서 우세하게 선정되었다. 계산된 변위량은 봉락과 같은 급격한 비선형의 변위는 제외되고, 영상 획득 기간 내의 평균 변위량이다. 연구지역 내 계산된 주시방향으로의 평균 지표면 변위속도는 0.19cm/yr이고, 추정오차는 0.18cm/yr이다. 그리고 옛 가은 본광의 중심부와 가은역 맞은편 일대에서 관측된 침하량은 0.49cm/yr, 1.66cm/yr로 연구지역에서 가장 뚜렷한 침하 양상을 보였다.

주요어 : 가은, 지반침하, 폐탄광, PSInSAR, JERS-1

1. 서 론

1.1. 연구 배경 및 목적

우리나라는 석탄수요의 감소로 1989년 이후 300여개 이상의 탄광이 폐광되기 시작하여 현재는 11개의 탄광

만이 남게 되었다. 이러한 과정에서 폐광 후 방치된 폐탄광으로 인한 안전사고 및 환경오염 등의 광해문제는 심각한 사회문제로 대두되었다. 특히 폐탄광의 지하갱도 및 채굴적으로 인한 지반침하는 지상 구조물에 커다란 피해를 미치고 안전사고를 불러올 수 있는 원인

*Corresponding author: jswon@yonsei.ac.kr

이 되고 있다. 1995년부터 지반침하 우려지역에 대한 조사 및 보강공사를 실시하고 있으나 전국에 산재해 있는 휴·폐탄광의 지하 채굴절에 대한 보다 종합적이고 체계적인 관리가 요구되는 실정이다(정문섭 등, 2002).

이에 따라 국내에서는 지반침하 현상이 나타나거나 침하의 우려성이 있는 광산 지역의 지반공학적 조사 및 지구물리 탐사가 시행되고 있다. 지반침하의 변위량을 측정하는 방법으로는 지표 또는 지중에 매설된 침하계에 의한 측량방법이 가장 정확하다. 하지만 침하계에 의한 측량은 고정밀도를 가지고 선택된 지역을 관측할 수는 있으나 넓은 지역에 적용할 경우에는 많은 시설비용과 침하량의 이차원적인 해석에 많은 제한이 따른다. 지하 공동의 추정에 있어서는 여러 가지 지구물리탐사 기법이 동원될 수 있다(석탄산업합리화사업단, 2001).

인공위성 영상레이더인 SAR(synthetic aperture radar)를 이용한 레이더간섭기술의 하나인 차분레이더간섭법(DInSAR: differential interferometric SAR)은 지표 변위량에 대한 정밀한 측정을 가능하게 한다. 지질학에서는 지진, 산사태, 화산 활동, 지반 침하 등의 지구조 작용에 의한 미세한 지각 변위를 인지할 수 있게 해준다. 하지만 장기간에 걸쳐 발생하는 지표변위의 시계열 분석을 하기 위해서는 고정산란체를 이용해서 긴밀도가 높지 않은 레이더간섭도도 병행할 수 있는 PSInSAR(permanent scatterer interferometric SAR) 기술이 적합하다. 따라서 본 연구는 JERS-1 L-밴드 SAR에서의 PSInSAR 기술을 폐탄광 지역인 가은 지역에 적용하여 정량적인 지표 변위 측정을 하는데 그 목적이 있다.

1.2. 기존의 연구

레이더간섭기술을 응용한 DInSAR는 SEASAT자료를 사용한 Gabriel(1989)에 의해 처음으로 발표되었으며, 이를 이용하여 지표의 미세한 변위량을 측정할 수 있게 되었다. DInSAR의 2-pass 방법은 CNES의 Massonnet(1993) 등에 의해 발전되었다. DInSAR 기술은 미국 서부에서 발생한 Landers 지진으로 인한 지표 변위 측정(Massonnet *et al.*, 1993; Zebker *et al.*, 1994), 이태리 시실리의 Etna 화산 분출 후의 변화 감시(Massonnet *et al.*, 1995), 일본 Izu 반도의 지각 변위(Fujiwara *et al.*, 1998), 아테네 지진의 변위 측정(Kontoes *et al.*, 2000) 등 1990년대에 들어서면서 많은 분야에 응용되기 시작했다. 최근에는 레도의 기하학적·시간적 조건의 제약 받는 전통적인 DInSAR 개념에서 벗어나 이탈리아

POLIMI SAR 연구소를 중심으로 스위스 Gamma 원격탐사 연구소, 영국 NPA group 등에서 긴밀도가 높은 고정 산란체인 PS(permanent scatterer)를 이용한 레이더간섭기술이 개발되어 단층대, 산사태 우려지역 및 도심지역에 적용되고 있다.

1.3. 연구 지역

연구지역은 행정구역상 경상북도 문경시 가은읍 일대이며 항공사진은 Fig. 1과 같다. 이 지역은 대한석탄공사 은성광업소, 가은탄광(구 왕릉탄광, 삼신탄광, 태양탄광), 태성탄광(구 유성탄광, 흥성탄광 등), 평성탄광, 천우탄광(구 옥산탄광) 등이 오래 전부터 최근까지 석탄을 생산해 왔다. 가은 지역의 석탄층은 지표 또는 근처에서부터 부존되어, 석탄 채굴 구역이 산지는 물론 농경지나 마을 바로 하위의 천부에 형성된 곳이 여러 군데 있다. 따라서 천부의 채탄작업과 관련되어 산지의 여러 곳에 균열이 생기고 침하가 일어났으며, 주거지와 시가지의 일부에서도 침하현상이 나타났다. 특히 가은읍 왕릉리의 시가지를 중심으로 일부 도로와 주거지 직하위에서의 채탄과 연관된 지반의 침하가 일어났으며, 또한 가은읍 일대에서는 석탄 채굴 외에도 석회암 지대의 공동 형성과 관련된 지반 침하 현상까지 보고 되었다(석탄산업합리화사업단, 1997).

2. 기초이론

PSInSAR에서는 지표 변위에 대한 위상과 고도 오차에 대한 위상을 동시에 계산한다. 따라서 DInSAR에서

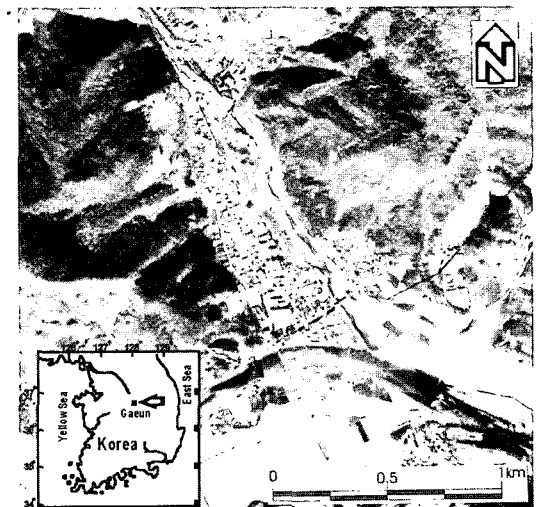


Fig. 1. Aerial photograph of the study area.

와 같이 높은 정밀도의 DEM을 필요로 하지 않고, PS 지점에서는 일반적으로 고도에 대한 오차를 cm 단 위까지 측정할 수 있다. 다만 정확한 DEM을 사용하면 계산 시간이 단축되는 이점은 있다.

DInSAR에서는 주영상과 부영상의 획득시기 사이의 변위에 대한 정보만을 가진다. 그러나 어느 지역에 대 한 장기간의 변위량을 계산하기 위한 경우, 레이더간 섭도의 temporal decorrelation이 문제가 된다. PSInSAR에서는 수십여 개의 레이더간섭도로부터의 고정산 란체에 대한 시계열 분석이 가능하기 때문에 긴밀도가 낮은 레이더간섭도도 이용할 수 있으며, 장기간의 변 위에 대한 경향을 분석할 수 있다. 대기와 고도 오차 에 대한 영향도 계산되기 때문에 PS 지점에서는 주시 방향으로 연간 mm 단위의 선형의 움직임을 감지할 수 있다. 그러나 PSInSAR의 경우는 DInSAR와는 달리 2 차원적인 분석이 어렵고, 단기간에 위상으로 2π 이상 의 변위를 갖는 급속한 변화는 관측이 불가능한 단점 이 있다. 또한 비선형의 복잡한 움직임을 보이는 지역 에서는 변위량 계산시 오차가 발생하기 쉽다. Table 1 은 차분레이더간섭도와 PSInSAR를 비교한 것이다.

2.1. 고정 산란체 선정

일반적으로 레이더 영상에서 안정된 신호의 고정 산 란체인 PS(permanent scatterer)를 찾기 위해서는 적 절한 소창문을 사용하여 주변 화소간의 긴밀도 (coherence)를 이용하여 찾는다. 소창문의 크기가 클 경 우에는 정확도가 높은 PS를 추출할 수 있으며, 소창문 의 크기가 작을 경우는 정밀도가 높은 PS를 추출할 수 있다. 하지만 주변 화소간의 긴밀도 계산 시 공간적인 평활화가 이루어지므로 단일 화소(pixel)의 PS를 선정 하는데 제약이 따르고, 궤도의 기하학적·시간적 decorrelation이 큰 레이더 영상들에서는 이 방법에 한 계가 있다. 그러므로 레이더간섭도에서 정확한 PS를 선 정하기 위해서는 신호 대 잡음의 비교를 위해서 먼저 위상에 관한 성분(대기 효과, 궤도 오차, 고도 오차, 지 형 변위 등)들의 분석이 선행되어야 한다. 그러나 SAR

영상 자료의 진폭(amplitude)값은 위상에 영향을 미치 는 현상들에 대해 민감하게 변하지 않기 때문에 PSInSAR에서는 일차적으로 단일 화소의 진폭값의 시 계열 분석을 통해서 PS를 1차적으로 선정한다(Ferretti *et al.*, 2001). 이로부터 각 레이더간섭도의 변위가 없 는 지점에서의 기본 위상값과 궤도 오차와 대기에 의 해 잔여하는 선형의 fringe 값을 계산하고, 각 지점에 서의 고도 오차와 주시방향으로의 속도를 계산해서 안 정된 신호의 PS를 최종적으로 선별한다.

Complex reflectivity를 g , complex circular gaussian noise를 n (실수부: n_R , 허수부: n_I)이라 할 때, 진폭값 은 Rice 분포를 보인다(Papoulis, 1984).

$$f_A(a) = \frac{a}{a_n} I_0\left(\frac{ag}{\sigma_n^2}\right) e^{-\frac{a^2+g^2}{2\sigma_n^2}}, a > 0 \tag{1}$$

여기서 σ_n 는 n 의 표준편차이고, I_0 는 Bessel 함수를 의미한다. Rice 분포의 모양은 신호대잡음비(g/σ_n)에 의 존한다. 신호대잡음비가 낮은 경우에는 Rice 확률밀도 함수가 Rayleigh 분포를 따르고, 반면에 높은 경우($g/\sigma_n > 4$)에는 Gauss 분포를 보인다. 그래서 신호대잡음 비가 높다면 다음의 식이 성립할 것이다.

$$\sigma_A \approx \sigma_{n_R} \approx \sigma_{n_I} \tag{2}$$

따라서 위상의 분산(σ_v)은 진폭값의 분산으로부터 추정 이 가능하다.

$$\sigma_v \approx \frac{\sigma_n}{g} \approx \frac{\sigma_A}{m_A} \triangleq D_A \tag{3}$$

여기서 m_A 와 σ_A 는 진폭값의 평균과 표준편차이다. 적어도 높은 신호대잡음비인 경우, 진폭값의 표준편차 를 평균으로 나눈 진폭분산지수(D_A)가 위상의 분산을 측정하는 수치가 될 수 있다. 최종적인 PS는 각 레이 더간섭도의 대기와 궤도에 관한 위상의 보정이 끝나고 단일 화소의 고도와 변위에 대한 추정을 마친 후에 선 별된다. 하지만 초기 단계에서 PS를 1차적으로 선정할 때에는 진폭값을 이용하는 방법이 쉽고 빠르게 해상도 의 손실이 없기 때문에 많이 활용된다.

Fig. 2는 complex reflectivity g 를 1로 고정하고 잡

Table 1. Comparison between the PS technique and conventional differential SAR interferometry(Ferretti *et al.*, 2000).

	Type	PS Technique	Conventional DInSAR
1	Baseline	no limits in the ERS database	very small (<200 meters)
2	Atmospheric artifacts	strongly reduced	no reduction
3	Coherence	> 0.7 on a single pixel	> 0.3 on several adjacent pixels
4	DEM accuracy	100 meters	baseline dependent
5	Number of required SAR images	> 25	≥2

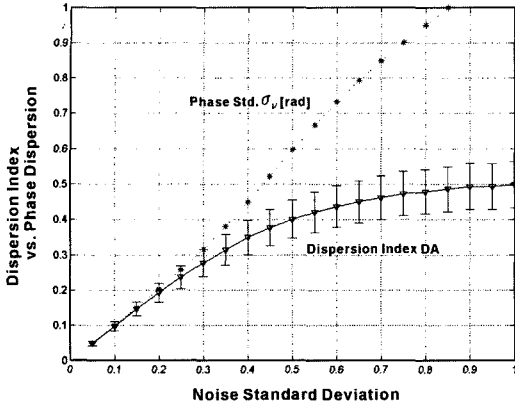


Fig. 2. Numerical simulation results derived from signal model ($Z_i = g+n_i$, $i = 2, 2, \dots, K+1$). The value of g was fixed to 1, while the noise standard deviation (σ_n) was gradually incremented from 0.05 to 0.8.

음의 표준편차를 0에서 1까지 증가할 때 위상의 표준편차와 진폭분산지수의 추이를 모사한 결과이다. 각 σ_n 에 대해서 5,000개의 진폭분산지수 값이 계산됐다. 여기서 신호대잡음비가 높은 경우에 진폭분산지수가 위상의 표준편차에 매우 근접하는 것을 볼 수 있는데, 0.3 이내 일 때 오차 범위 내에서 위상의 표준편차와 일치한다. 그러므로 모사결과 $D_A \leq 0.3$ 인 경우, 식(3)의 근사식을 만족하며 진폭분산지수로 위상이 안정된 PS를 선정할 수 있다.

2.2. 위상의 대기성분 계산 및 PS 분석

진폭분산지수에 의해 1차적으로 PS를 선정하면, 이를 토대로 각 레이더간섭도에서는 변위가 없는 지점에서의 기본 위상값과 궤도와 대기로 인해 잔여하는 선형의 위상값을 계산하고 일차 PS에서는 고도 오차와 주시방향으로의 속도 성분을 계산한다. 그리고 이의 나머지 잔여 성분으로부터 각 레이더간섭도에서의 대기에 대한 성분을 구한다. Atmospheric phase screen (APS)은 각 레이더간섭도에서의 변위가 없는 지점에서의 기본 위상값, 궤도와 대기로 인해 잔여하는 선형의 위상값, 그리고 대기에 대한 성분들의 합이다. 따라서 최종 PS는 각 레이더간섭도에서 APS 값을 제거한 후 모든 회소들에 대해서 고도 오차와 주시방향으로의 속도 성분을 구한 연후에 선별되어진다.

SAR 영상에서 일차적으로 진폭값의 시계열 분석을 통해 PS를 H개 선정하면 K개 레이더간섭도에 대해 다음 식과 같은 행렬식을 정립할 수 있다.

$$\Delta\Phi = a\mathbf{1}^T + P_\xi \xi^T + P_\eta \eta^T + B\Delta q^T + T\mathbf{u}^T + E \tag{4}$$

- $\Delta\Phi[K \times H]$: 차분레이더간섭도에서의 위상값
- $a[K \times 1]$: 레이더간섭도의 상수값
- $P_\xi, P_\eta[K \times 1]$: 비행방향 $\xi[K \times 1]$ 과 주시방향 $\eta[K \times 1]$ 방향으로의 궤도오차와 대기에 의한 선형의 위상값
- $B[K \times 1]$: 레이더간섭도의 baseline에 관한 성분으로, $2\pi/ha$ (altitude of ambiguity) 또는 $4\pi B \perp (r_0 \sin \theta_0)$
- $\Delta q[H \times 1]$: PS의 고도 오차
- $T[K \times 1]$: 주영상과 부영상간의 시간 간격에 $4\pi/\lambda$ 을 곱한 값
- $\mathbf{u}[K \times 1]$: 주시방향으로의 PS의 속도
- $E[K \times H]$: 비선형 움직임의 속도와 대기 성분 및 decorrelation

행 방향으로의 동일한 차분레이더간섭도에서 H개 PS들의 차분 위상(differential phase)의 양상을 보여주고, 열 방향으로의 동일한 PS의 K개 차분레이더간섭도에 따른 차분 위상의 추이를 보여준다. $\Delta\Phi$ 의 unwrap-ping이 유용하다면 식(4)의 미지수는 $3K+2H$ ($a, P_\xi, P_\eta, \Delta q, \mathbf{u}$)개이고, 알고 있는 자료는 $\Delta\Phi, \xi, \eta, B, T$ 인 $K \times H$ 개의 일차 선형의 관계식이다. 그러나 SAR 영상의 위상은 2π 을 주기로 wrapping된 값이기 때문에, 반복 알고리즘을 통해서 식(4)의 비선형 관계식을 구한다. 긴밀도가 좋은 차분레이더간섭도에서의 위상값에 가중치를 더해 가면서 각 일차 PS의 고도 오차와 레이더 방향으로의 속도를 주기도(periodogram)를 이용해서 계산한다. 주기도는 원래 시계열의 주기적인 특성을 진동수 영역에서 분석하기 위하여 주로 사용되는 방법으로, 와 같이 2주기로 wrapping된 자료에서 시간 간격에 따른 레이더방향으로의 속도와 baseline에 따른 고도 오차와 같은 일차 관계식을 규명하는데 적용될 수 있다.

미지수 성분들($a, P_\xi, P_\eta, \Delta q, \mathbf{u}$)을 구하고 차분 위상에서 제거하면 식(7)과 같이 대기에 의한 효과와 비선형 움직임의 속도 및 decorrelation 잡음으로 이루어진 LPR(linear phase residues)이 남게 된다.

$$\Delta E'(LPR) = \Delta\Phi - \hat{\Delta\Phi} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} &= \Delta\Phi - (\hat{\mathbf{a}}\mathbf{1}^T + \hat{P}_\xi \xi^T + \hat{P}_\eta \eta^T + B\hat{\Delta q}^T + T\hat{\mathbf{u}}^T) \\ &= E'_{atmo} + E'_{nonVel.} + E'_{noise} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $\hat{\Delta\Phi}$ 는 주기도를 이용해 계산한 차분위상값의 추정치이다. $E'_{atmo} + E'_{nonVel.} + E'_{noise}$ 은 서로 독립적인 변수이므로 LPR의 분산은 식(8)과 같이 각 성분들의 분산의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\Delta E'}^2 = \sigma_{E'_{atmo}}^2 + \sigma_{E'_{nonVel.}}^2 + \sigma_{E'_{noise}}^2 \tag{8}$$

일차 선형 모델이 잘 맞고 decorrelation이 적은 일차 PS에서의 LPR 분산은 매우 낮은 값을 보인다. 일차 PS가 많으면 많을수록 좀더 정확한 대기 성분에 관한 위상을 계산할 수 있지만, 근거리 내의 대기에 대한 성분들은 상관관계가 매우 높기 때문에 일차 PS가 3-4개/km² 이상이 주어진다면 대기에 대한 성분들을 공간적으로 평활화시켜 전체 연구지역 내의 대기에 의한 효과를 구할 수 있다. 일반적으로 1 km 이내의 지역에서 대기에 의한 위상의 분산($\sigma_{E_{atomo}}^2$)은 0.1 rad² 이내이다(Williams, 1998). LPR에서 대기에 의한 성분을 구하기 위해서는 LPR[K×H]에서 열 방향으로의 저주파 성분을 분리해 비선형 움직임의 속도 성분을 제거하고, 나머지 위상값들을 공간적으로 평활화(smoothing)시켜 모든 화소에서의 대기에 의한 효과를 계산한다.

APS는 LPR에서 구한 대기에 의한 효과와 각 레이더 간섭도의 a, P_ξ, p_η의 합으로 표현된다. 주영상의 APS는 무작위 분포를 보이는 모든 레이더간섭도의 APS에 공통으로 내재하기 때문에 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$APS_{master}^T = \frac{1}{K} \{1^T \cdot \hat{E}_{atomo} + (\hat{a}^T + p_{\xi} \hat{\xi}^T + p_{\eta} \hat{\eta}^T)\} \quad (9)$$

부영상들의 APS는 레이더간섭도의 APS에서 주영상의 APS를 빼면 된다.

SAR 영상의 진폭값을 이용해 일차 PS를 구하고 이로부터 전 레이더간섭도의 APS를 구하면, 최종적으로 화소 단위의 DEM 오차와 레이더 방향으로의 속도 성분을 다시 주기도를 이용하여 구한다.

$$\arg \max_{\Delta q, v} \left\{ |\gamma| = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j\phi_k} \cdot e^{-j(B\Delta q^T + Tv)} \right\} \quad (10)$$

e^{jϕ_k}는 APS를 제거하고 k 번째 차분레이더간섭도에서의 위상값이다.

위상에 대한 성분들의 분석이 정확히 이루어지고, 주기도를 이용한 unwrapping 추정이 올바르게 수행되었으면 각 화소의 단일 긴밀도는 decorrelation이 적은 PS에 대해서 1에 가까운 값을 보인다. 단일 긴밀도란 단일 화소의 차분 위상에서 모든 성분들(APS, 고도 오차, 변위)을 분석하고 남은 잔여 위상(e^{jΔw})의 시기가

Table 2. Summary of the JERS-1 SAR interferometric data pairs.

No.	SAR image		Perpendicular baseline (Ambiguity height)[m]	Time interval [days]	Coherence mean
	Master	Slave			
1		92/11/05	982.3 (-51.0)	-1452	0.27
2		92/12/19	462.2 (-108.4)	-1408	0.30
3		93/03/17	554.5 (-90.4)	-1320	0.29
4		93/06/13	-635.8 (78.8)	-1232	0.28
5		93/07/27	1002.5 (-50.0)	-1188	0.27
6		93/09/09	1285.6 (-39.0)	-1144	0.27
7		93/10/23	1034.8 (-48.4)	-1100	0.29
8		93/12/06	2117.1 (-23.7)	-1056	0.24
9		94/01/19	1464.7 (-34.2)	-1012	0.27
10		95/02/19	-2399.9 (20.9)	-616	0.24
11		96/03/21	-1309.4 (38.3)	-220	0.30
12		96/07/31	270.1 (-185.5)	-88	0.39
13	96/10/27	96/12/10	1271.0 (-39.4)	44	0.33
14		97/01/23	800.6 (-62.6)	88	0.33
15		97/03/08	546.3 (-91.7)	132	0.38
16		97/06/04	488.9 (-102.5)	220	0.35
17		97/10/14	-3366.1 (14.9)	352	0.21
18		97/11/27	-2210.7 (22.7)	396	0.25
19		98/01/10	-1912.0 (26.2)	440	0.26
20		98/02/23	-2389.2 (21.0)	484	0.25
21		98/04/08	-3181.7 (15.7)	528	0.21
22		98/05/22	571.9 (-87.6)	572	0.31
23		98/07/05	-3042.4 (16.5)	616	0.21
24		98/08/18	-1895.3 (26.4)	660	0.26
25		98/10/01	-1557.8 (32.2)	704	0.28

다른 N개의 레이더간섭도들에서의 상관도를 의미하고 다음과 같이 계산한다.

$$\gamma_{\text{single}} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N e^{j\Delta w_i} \right|}{N} \quad (11)$$

γ_{single} 는 0에서 1의 값을 가지며, 1에 가까울수록 긴밀도는 높고 decorrelation이 낮다는 것을 의미한다. 즉 식(11)은 시계열 분석에 의한 독립된 화소의 위상에 대한 구성 성분들을 분류하고 decorrelation의 정도를 계산하기 때문에 해상력이 좋은 정확한 PS를 선정할 수 있다.

3. 자료 및 자료처리

PSInSAR 기술을 적용하기 위해서는 긴밀도의 높고 낮음에 상관없이 25~30개 이상의 많은 레이더간섭도들이 필요하다. 일본 NASDA(National Space Development Agency of Japan)로부터 1992년 9월 22일부터 1998년 10월 1일까지 총 30개의 JERS-1 SAR 자료를 수집하였으며 1996년 10월 27일 영상을 주영상으로 선정하여 29개의 부영상중에서 25개의 레이더간섭도를 이용하였다. 연구지역에서 획득된 JERS-1 자료의 특성 및 모든 간섭쌍의 특성은 Table 2와 같다. 나머지 4개의 간섭쌍은 주영상과의 baseline이 3,500 m 이상으로 매우 길고, 평균 긴밀도가 0.2 이하로 매우 낮아 잡음으로 인한 오차의 발생과 위상값의 복원이 어렵기 때문에 제외되었다. 차분레이더간섭도 작성시 필요한 DEM은 국립지리원에서 발간한 1:25,000 수치지도를 삼각망(tin) 기법을 이용하여 10 m 간격으로 제작하였다. 본 연구에 적용된 PSInSAR의 자료처리 흐름은 다음과 같고, Fig. 3은 본 연구에 수행된 전체적인 수행과정을 간략하게 도표화한 것이고, 다음 절차는 이를 구체적으로 서술한 것이다.

(1 단계) 활용 가능한 모든 SAR 영상들을 주영상에 재등록(coregistration)시키고 이에 대한 multi-look 진폭 영상, 긴밀도 영상, 그리고 차분레이더간섭도를 제작한다.

(2 단계) 각각의 진폭영상으로부터 진폭분산지수(amplitude dispersion index)를 계산하고 긴밀도(coherence) 수치와 관련하여 1차적으로 PS를 추출한다.

(3 단계) 선정된 일차 PS를 이용해서 각 레이더간섭도에서의 변위가 없는 지점들의 기본 위상값과 케도오

차와 대기로 인한 선형의 위상값, 그리고 각 일차 PS에서의 고도 오차와 주시방향으로의 지표면 변위속도를 계산한다.

(4 단계) 3 단계에서 구한 모든 성분들을 일차 PS의 차분 위상에서 제거하고 나머지 잔여 위상으로부터 대기에 의한 효과를 모든 지역에 대해서 계산한다.

(5 단계) 보정된 레이더간섭도에서 대기에 대한 성분을 제거하고, 최종적으로 화소 단위로 고도 오차와 주시방향으로의 지표면 변위속도를 계산한다.

3.1. 일차 PS 선정

각 레이더간섭도에서의 변위가 없는 지점들의 기본 위상값과 케도오차와 대기로 인한 선형의 위상값을 구하기 위해서는 PS를 1차적으로 선정하여야 한다. 본 연구에서는 JERS-1의 신호대잡음비가 매우 낮기 때문에 진폭분산지수를 이용한 방법과 더불어 적절한 소창문을 이용하여 주변 화소간의 긴밀도를 계산해서 PS를 1차 선정하였다.

진폭분산지수를 계산할 경우 신호 강도의 절대 비교를 위해서 획득시기가 다른 여러 SAR 영상간의 방사 보정(radiometric calibration)이 필요하다. PSInSAR에서는 후방산란계수(sigma naught)를 이용하여 보정하

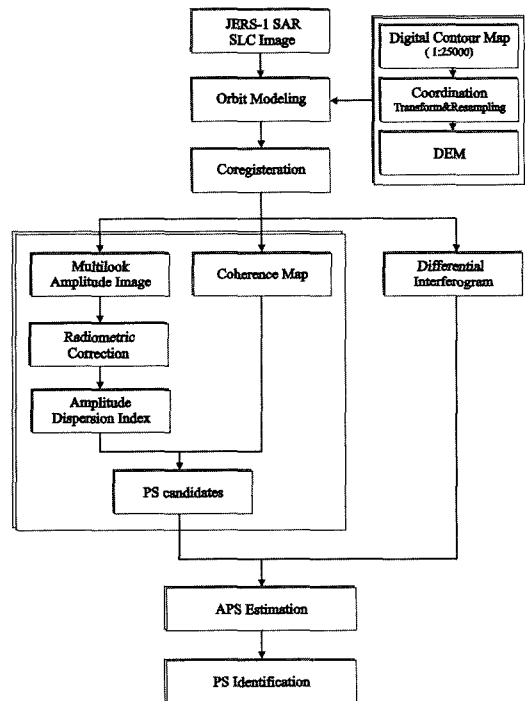


Fig. 3. Schematic diagram of data processing.

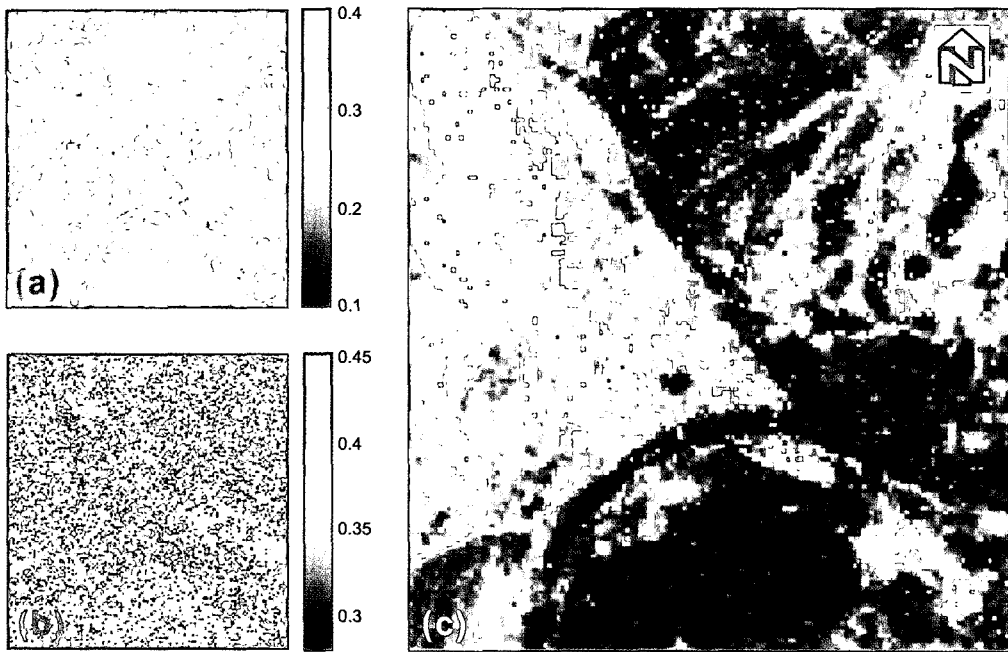


Fig. 4. PSC Selection. (a) coherence map, (b) amplitude dispersion index, and (c) PSC: blue dots satisfy the condition (coherence >0.3); red dots satisfy the condition (amplitude dispersion index <0.3); and green dots(PSC) satisfy both conditions.

지는 않고, 대신 긴밀도가 높은 일정 크기의 도심지역을 선정하여 그 곳에서의 평균 세기값이 주영상과 같도록 각 부영상들의 보정 상수를 구한 후 이를 전 지역에 적용하여 진폭값을 수정한다. 방사보정이 끝나면 각 영상의 진폭값을 이용하여 진폭분산지수를 계산하였다.

주변 화소간의 긴밀도를 계산할 때, 소창문의 크기는 9×3이고 총 25개의 레이더간섭도 중에서 수직 baseline의 절대값이 1,500 m 이하인 15개 레이더간섭도 영상의 긴밀도만을 이용하였다. 왜냐하면 수직 baseline의 길이가 너무 길면 DEM 오차에 대한 위상값의 변화에 너무 민감하기 때문에, 높은 각면편 반사기 역할을 하는 일차 PS의 선정에 있어서는 이를 제외하였다.

일차 PS는 진폭분산지수가 0.3 이하이고, 수직 baseline이 짧은 15개의 모든 영상에서 긴밀도가 0.3 이상의 조건을 만족하는 점들로 선정하였다. Fig. 4(a)는 긴밀도 영상, Fig. 4(b)는 진폭분산지수 영상이고, Fig. 4(c)는 연구지역 내에서 긴밀도 조건을 만족하는 지점은 파란색, 진폭분산지수의 조건을 만족하는 지점은 빨간색, 그리고 일차 PS로 두 조건을 모두 충족하는 지점은 녹색으로 나타났다. 대부분의 일차 PS가 긴밀도 조건을 만족하는 지점들의 중심부로 도심 지역에 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 point target

을 추출할 수 있다는 진폭분산지수 방법과 신뢰성을 제공(특히 JERS-1에서)할 수 있는 긴밀도 방법의 장단점을 잘 보여주고 있다.

3.2. 레이더간섭도 보정

진폭분산지수와 주변 화소간의 긴밀도를 이용하여 일차 PS를 선정하면, 이를 토대로 APS를 구해 각 레이더간섭도를 보정한다. 선정된 PS에서의 LPR에 대해 시간 축으로 352일 기간의 삼각 필터를 이용해서 평활화시킨 후 저주파 성분을 제거시켰고, 공간적으로는 남은 위상값을 가지고 크리깅 내삽(kriging interpolation)을 이용해서 대기에 대한 성분들을 계산하였다. 각 영상에 내재된 대기에 대한 성분들의 분산은 평균 0.044 rad²이다. 모든 차분레이더간섭도에서 APS를 제거하고 보정한 간섭쌍들의 결과에서, 수직 baseline이 길고, 주영상과 부영상간의 시간적 간격이 길수록 긴밀도가 감소하는 것을 볼 수 있었다.

3.3. 최종 PS 선정

각 레이더간섭도에서 APS 값을 제거하고 모든 화소들에 대해서 최종적으로 고도 오차와 주시방향으로의 속도 성분을 계산한다. Fig. 5(a)와 같이 레이더간섭도들에서 baseline의 시간과 공간적 배치에 대해 격자망

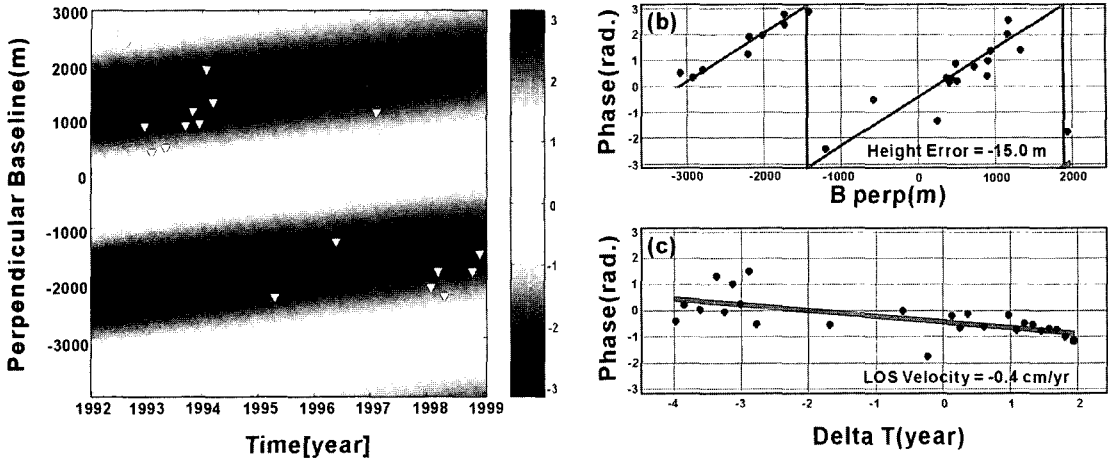


Fig. 5. (a) Space-time distribution of the available data. The bidimensional complex sinusoid represents the phase contribution for a LOS velocity of -0.4 cm/yr and a height error of -15 m. (b), (c) Regression of interferometric phase differences between pair of point targets with respect to baseline and time.

을 구성하여, 식(10)에서 단일 긴밀도가 최대가 되는 값을 구한다. 고도 오차는 차분위상과 수직 baseline 간의 관계식으로 계산하고, 속도는 차분위상과 주영상 부영상 시간간격간의 관계식으로 계산한다. 이 중에서, 단일 긴밀도가 0.7 이상이고, 수직 baseline의 길이가 1,500 m 이하인 15개 레이더간섭도의 평균 주변 긴밀도가 0.4 이상인 점들을 최종 PS로 선정하였다. Fig. 5(b)는 APS를 제거한 차분위상으로부터 고도 오차를 추정한 그림이고, Fig. 5(c)는 고도 오차를 보정한 후의 위상으로 시간에 따른 PS의 위상변화 즉 지표변위를 추정할 것을 도시했다. 단일 긴밀도가 0.86이고, 추정된 고도 오차는 -15.0 m, 주시방향으로의 지표면 변위속도 -0.4 cm/yr이다. 선형의 변위 성분(최적화된 직선)으로부터 분리된 잔여 성분은 위상 잡음과 비선형 지표변위를 포함한다.

4. 적용결과

최종 PS의 밀도는 일차 PS 선정 결과와 동일하게 산악 지역에 비해 도심 지역이 현저하게 높았다. 이는 산악 지역에서 수목의 변화에 의한 temporal decorrelation이 크고, 평지에 비해 고도 오차와 변위의 움직임 또한 복잡하기 때문이다. Fig. 6(a)은 최종 선별된 PS의 위치와 주시방향으로의 지표면 변위속도를 나타낸 것이다. Fig. 6(b)은 영국의 NCB(1975)와 Bruhn *et al.*(1983) 등에 의해 제시된 지상구조물의 균열/손상정도 분류와 등급 기준을 근간으로 폐광된 가은 본갱과 사갱

의 영향범위 내에 위치한 연구지역 일부의 균열등급 분포도를 도시한 것이다(석탄산업합리화사업단, 1997). G1은 균열폭이 15 mm 이상이 발달된 지역, G2는 균열폭이 5~15 mm이거나 3 mm 이상의 균열이 다수 발생한 지역, 그리고 G3은 균열폭이 5 mm 이하이고 건물 내부에 여러 개의 실균열이 발생한 지역이다. 특히, 석탄 채굴에 따른 지반침하가 지상구조물에 미치는 영향 범위와 정도는 지질 조건, 탄층의 발달 상태, 채탄 방법, 채굴 범위 등에 따라 다르게 나타난다. Fig. 6(c)은 균열등급 정도에 따라 나눈 지역에서 추출된 PS들의 지표면 변위속도의 평균(0.49, 0.30, 0.19 cm/yr)과 표준편차(0.44, 0.20, 0.24 cm/yr)를 도시한 것이다. 평균에 비해 표준편차의 값이 크긴 하지만, 지역에 따른 PS에서 계산된 지표면 변위속도의 평균값과 균열등급에 따른 경도의 순서가 잘 일치하는 것을 보여주고 있다. Fig. 6(b)의 G4는 균열등급에 따른 조사 이외의 지역으로 이 연구에서 추출된 PS의 지표면 변위속도 분포도에서 최대 침하 우려 지역으로 예상된다. 이 곳은 가은 역 맞은 편 일대로 연구기간 내 1.66 cm/yr의 평균 지표면위 침하율을 보인다.

Fig. 7은 각 구역에서 대표되는 PS 지점에서 주시방향으로의 변위를 시계열로 도시한 것이다. 평균 변위속도의 절대값이 클수록 일차 회귀곡선의 기울기 값이 크다는 것이고, 단일 긴밀도가 클수록 선형의 속도 모델을 잘 설명하고 있는 것이다. 긴밀도가 낮은 P1의 변위 추이를 보면 1994~1997년간의 침하율이 다른 기간에 비해 상대적으로 높은 것을 볼 수 있다.

Table 3은 각 구역별 지표면 변위속도와 균열등급을 비교한 것이다. G1~G4 구역 이외의 지역에서 측정된 평균 변위속도는 0.19 ± 0.21 cm/yr로, 이 값은 G3의 침하속도(0.19 ± 0.24 cm/yr)와 동일하게 나왔다. 따라서 G1, G2 구역을 벗어나 G3 구역에서부터는 폐탄광에 의한 침하의 영향을 연구기간 내에는 크게 받지 않은 것으로 판단된다.

최종적으로 계산된 주시방향으로의 지표면 변위속도에 대한 정확도는 레이다간섭도의 주영상과 부영상 시간간격의 분포와 위상의 신호대잡음비에 의존하고, 계산은 다음과 같다(Ferretti *et al.*, 2001).

$$\sigma_v \approx \frac{\sigma^2}{\sum (T_k - \bar{T})^2} \quad (12)$$

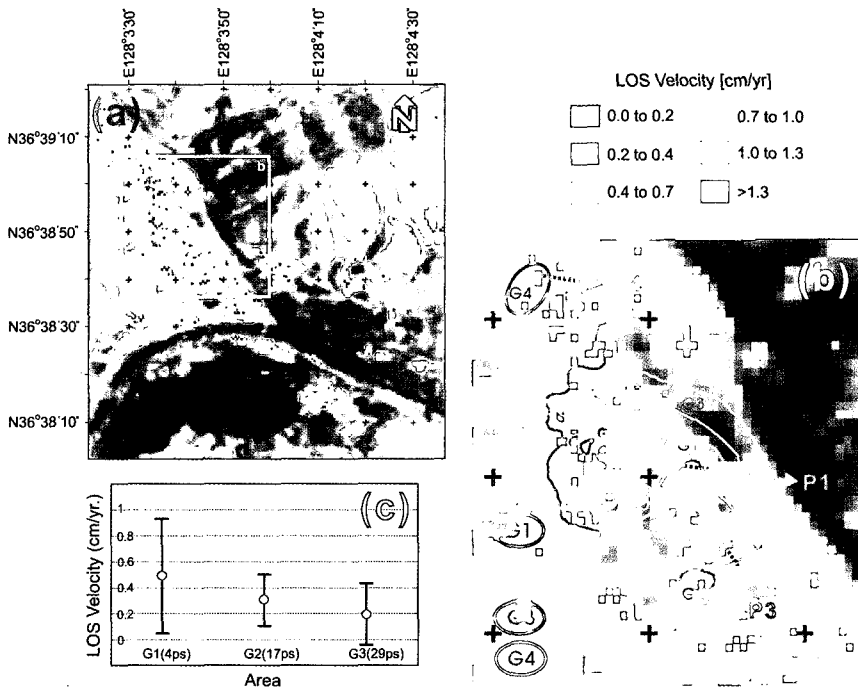


Fig. 6. Estimated LOS velocity and location of the PSs.

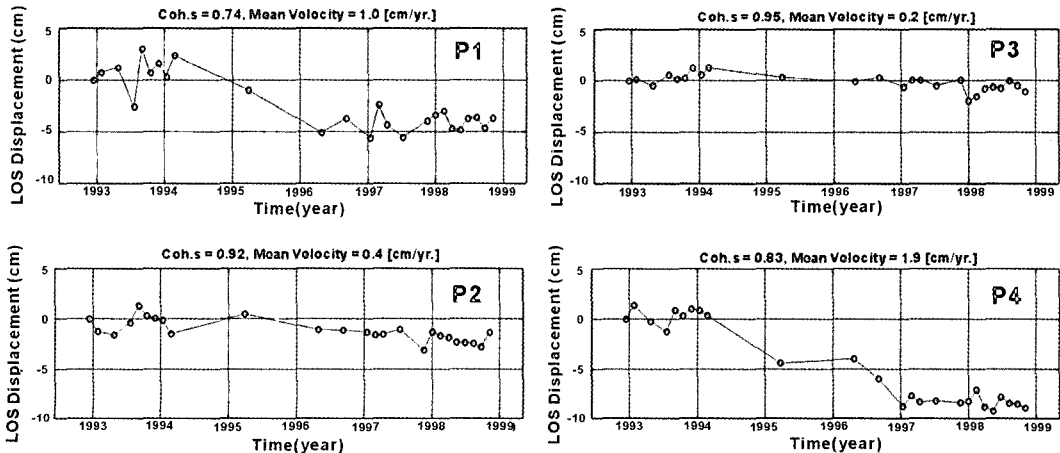


Fig. 7. These plots show the temporal series evolution (from 1992 to 1998) of the displacement of four selected Permanent Scatterers.

Table 3. Comprehensive study of the subsidence rates of five groups located in the center of the Wangreunglee area.

Group	No. of detected PS	Subsidence rate [cm/yr, LOS]		Crack level [width, mm]	Remarks
		Mean	Std. Dev.		
G1	4	0.49	0.44	Severe (>15)	- Areas influenced by the Gaeun coal mine abandoned in 1976.
G2	17	0.30	0.20	Moderate (5~15)	
G3	29	0.19	0.24	Slight (<5)	
G4	5	1.66	0.55	No field data	- the area across from Gaeun station and observed to be the most highly subsiding.
G _R	80	0.19	0.21	No field data	- the area except G1, G2, G3, and G4.

여기서 σ_0^2 는 차분위상에서 모든 위상의 성분을 제거하고 남은 decorrelation에 관한 위상의 분산, T는 시간적 baseline에 $4\pi/\lambda$ 을 곱한 값, 그리고 \bar{T} 는 T 값들의 평균이다. PS에서의 σ_0 을 1로 가정할 때, 본 연구의 지표면 변위속도의 추정 오차는 대략 0.18cm/yr이다. 따라서 G1, G2, G4를 제외한 나머지 왕릉리 지역의 지표변위는 오차 범위 내로 비교적 안정된 지반인 것으로 추정된다.

5. 토의 및 결론

PSInSAR는 이론적으로 baseline의 특성에 따른 영향이 매우 작지만, JERS-1의 신호대잡음비(SNR)가 낮기 때문에 적용에 한계가 있다. ERS 위성의 신호대잡음비가 15 dB인데 반해 JERS-1은 육상에서는 6dB, 해양과 빙하지에서는 3.5 dB이다(ASF/JPL, 1994). 그러나 JERS-1의 관측 파장(23.53cm)은 ERS 위성(5.6 cm)보다 길어 temporal decorrelation의 영향을 적게 받기 때문에 장기간의 지표 변위 관측에 있어 장점을 가진다.

폐탄광과 석회암 용식에 의한 지반침하가 예상되는 가운읍 왕릉리 시가지와 주거지를 중심으로 PS를 추출하였다. 최종 PS 분석에 따르면, 가운역 맞은 편 일대(1.66 cm/yr)와 폐광된 가운 본궤의 중심부(0.49 cm/yr)를 제외한 왕릉리 지역은 추정오차 범위(0.18 cm/yr) 내에서 안정된 지반인 것으로 추정된다. 하지만 PSInSAR에서는 비선형의 움직임을 보이는 변위에 대해서는 관측이 제한적이기 때문에, 안정된 지역으로 판단되는 지역 가운데 석회암 용식에 의한 급격한 붕락이 예상될 수도 있다. 그리고 PS가 추출되지 않는 지역에서는 분석이 불가능하고, PS 밀도가 낮은 곳에서는 계산된 침하량이 구역을 대표하기에 신뢰도가 매우 낮다는 한계점이 있기 때문에 2차원적인 분석에 제한이 따른다.

PSInSAR에 의한 지표변위 연구의 정밀도 및 신뢰도

를 증가시키기 위해서는 측량, DInSAR, GPS 및 기타 측정 장비와의 공동 수행이 필수적이다. 특별히 각개 레이더간섭도에서 대기 위상 성분의 정확한 분리(기상 자료, GPS 관측자료 등을 이용)는 지표 변위 위상성분 분석에 정확성을 기해, 복잡한 비선형의 움직임을 추정하는데 큰 도움이 될 것이다. 그리고 PS에서의 DEM 오차 분석은 기존 수치지도의 고도 오차에 의한 영향을 제거할 수 있다.

향후 현장조사와 공간해상도가 좋은 광학 영상에 의해서 PS로 선정된 위치의 기하학적 특성을 확인할 필요가 있다. 관측 위성의 특성(입사각, 파장, 주기 등)에 따라 인지되는 PS의 특성을 알게 되면, 건물 붕괴나 산사태 우려 지역에 대해 인위적인 PS를 설치하여 저렴하고 효과적인 감시 체제를 구축하고 재해 방지에 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

권광수, 이준용, 박형동 (2001) 지표면의 조건을 고려한 지반침하 분석용 GIS. 자원환경지질, v. 34, p. 595-600.
 김병찬 (1999) 광산침하 메커니즘 및 침하 예측에 관한 연구. 한양대학교 대학원 자원공학과, 석사학위 논문.
 김상완, 이창욱, 원중선 (2002) JERS-1 L-band SAR Interferometry를 이용한 연안매립지 지반침하 관측. 자원환경지질, v. 35, p. 465-478.
 석탄산업합리화사업단 (1997) 문경지역 지반안정성 기본조사.
 석탄산업합리화사업단 (2000) 문경지역 지반 안정성 정밀조사.
 석탄산업합리화사업단 (2000) 문경지역 지반 안정성 정밀조사(부록).
 석탄산업합리화사업단 (2001) 문경 가운지역 철도 및 시가지 지반보강공사-지반조사보고서.
 석탄산업합리화사업단 (2001) 문경 가운지역 철도 및 시가지 지반보강공사-실시설계보고서.
 정문섭, 김윤상, 최용복 (2002) 폐탄광 GIS 구축방안에 관한 연구. 한국 GIS 학회지, v. 10, p. 123-138.
 윤근원, 김상완, 민경덕, 원중선 (2001) DEM 정밀도 향상을 위한 2-pass DInSAR 방법의 적용. 대한원격탐사

- 학회지, v. 17, p. 231-242.
- ASF/JPL (1994) JERS-1 SAR Data Quality Assessment, <http://www.asf.alaska.edu>.
- Bruhn, W. R., Speck, R. C. and Thill, R. E. (1983) The Appalachian Field: Damage to structures above active underground mines. Surface Mining Environmental Monitoring and Reclamation Handbook, Elsevier, New York, p. 656-669.
- Buckley, S. (2000) Radar Interferometry Measurement of Land Subsidence. The University of Texas at Austin, Ph. D. Dissertation.
- Colesanti, C., Ferretti A., Ferrucci, F., 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. (1999) Non-Uniform Motion Monitoring Using the Permanent Scatterers Technique. Fringes '99.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2000) Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, v. 38, p. 2202-2212.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, v. 39, p. 8-20.
- Fujiwara, S., and Rosen, A. (1998) Crustal deformation measurements and using repeat-pass JERS-1 synthetic aperture radar interferometry near the Izu Peninsula. Journal of Geophysical Research, v. 103, p. 2411-2426.
- Gabriel A. K., Goldstein R. M., and Zebker H. A. (1989) Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research, v. 94, p. 9183-9191.
- Kontoes, C., Elias, P., Sykioti, O., Briole, P. et al (2000) Displacement field and fault model for the September 7, 1999 Athens earthquake inferred from ERS2 satellite radar interferometry. Geophysical Research Letters, v. 27, p. 3989-3992.
- Marple, S. L. (1987) Digital Spectral Analysis with Applications. Englewood Cliffs. Prentice-Hall.
- Massonnet, D. and Rabaute T. (1993) Radar interferometry: Limits and potential, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, v. 31, p. 455-464
- Massonnet, D., Briole, P. and Arnaud A. (1993) Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. Nature, v. 375, p. 441-500.
- Williams, S., Bock, Y. and Pang, P. (1998) Integrated satellite interferometry : Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. Journal of Geophysical Research, v. 103, p. 27051-27067.
- Zebker, H. A. and Goldstein, M. (1986) Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. Journal of Geophysical Research, v. 91, p. 4993-4999.
- 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. Journal of Geophysical Research, v. 99, p. 19617-19634.