

다중시기 SAR 영상을 이용한 시계열 변위 관측기법 비교 분석

김 상 완[†]

세종대학교 지구정보공학과

A Comparison of InSAR Techniques for Deformation Monitoring using Multi-temporal SAR

Sang-Wan Kim[†]

Department of Geoinformation Engineering, Sejong University

Abstract : We carried out studies on InSAR techniques for time-series deformation monitoring using multi-temporal SAR. The PSInSAR method using permanent scatterer is much more complicated than the SBAS because it includes many non-linear equations due to the input of wrapped phase. It is confirmed that the PS algorithm is very sensitive to even PSC selection. On the other hand, the SBAS method using interferogram of small baseline subset is simple but sensitive to the accuracy of unwrapped phase. The SBAS is a better method for expecting not significant unwrapping error while PSInSAR is a more proper method for expecting local deformation within a very limited area. We used 51 ERS-1/2 SAR data during 1992-2000 over Las Vegas, USA for the comparison between PSInSAR and SBAS. Both PSInSAR and SBAS show similar ground deformation values although local deformation seems to be detected in the PSInSAR method only.

Key Words : SAR interferometry, deformation, time-series, SBAS, PSInSAR.

요약 : 다중시기에 획득된 SAR 영상을 이용하여 지표에서 발생하는 변위의 시계열 관측을 위한 기법에 대한 비교 분석을 수행하였다. 고정산란체를 이용한 PSInSAR 기법은 구속화된 위상을 이용하기 때문에 알고리즘의 많은 부분이 비선형 방정식을 포함하고 있어, 알고리즘 적용에 많은 주의를 필요로 한다. 특히 알고리즘 첫 단계인 고정산란체 후보의 적합한 선택 여부에 따라 알고리즘의 실행이 크게 영향을 받음을 확인하였다. 한편 짧은 기선거리를 갖는 간섭쌍을 사용하는 SBAS 기법은 입력 자료인 불구속화된 간섭도의 정확도에 따라 결과의 신뢰성이 크게 영향을 받는다. 따라서 시계열 분석에 사용되는 차분간섭도 위상의 unwrapping이 적절하게 수행될 수 있을 경우 SBAS 방법을 사용한 시계열 분석이 적절하며, unwrapping 오차가 발생할 가능성이 높은 좁은 지역에서 발생하는 국지적인 변위 관측에는 고정산란체를 이용하는 PSInSAR 기법이 적절하다. 미국 라스베이거스 지역에서 1992년부터 2000년 동안 획득된 51개의 ERS-1/2 SAR 영상을 PSInSAR 기법 및 SBAS 기법에 적용하여 지표변위도를 구하였으며, 이들 간의 비교 분석을 통해 두 방법의 결과는 매우 유사하나, 다소 국지적인 지표변위는 PSInSAR 기법의 관측이 유리한 것으로 판단되었다.

접수일(2010년 4월 22일), 게재확정일(2010년 4월 26일).

[†] 교신저자: 김상완(swkim@sejong.ac.kr)

1. 서론

마이크로웨이브를 사용하는 인공위성 영상레이더(SAR) 자료를 이용한 차분 레이더 간섭기법(Differential SAR Interferometry)은 수십 km 이상의 넓은 지역에 걸쳐서, 수십 m의 공간해상도로, 수 cm 내지 수 mm 정도의 측정민감도를 가지고 변위량을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 이 기술은 지난 20여 년 동안 지구정보 공학분야에서, 지표의 고도 정보 추출 및 지진, 화산, 산사태, 지반침하 등에 의한 지표면의 미세한 변위를 관측하는데 폭 넓게 사용되고 있다. 한편, 장기간에 걸쳐 발생하는 미세변위와 각 관측시기에서의 변위성분을 효과적으로 추출하기 위한 알고리즘들이 최근 해외에서 개발되고 있으며, 그에 관한 많은 연구 성과들이 학계 및 산업계에서 보고되고 있다(Massonnet and Feigl, 1998; Usai and Klees, 1999; Bürgmann *et al.*, 2000; Lanari *et al.*, 2007).

다중시기 SAR 영상을 이용한 시계열 분석 기법 중 지표의 고정산란체(Permanent scatterer)를 이용한 PS 간섭기법(Permanent Scatterer Interferometric SAR, PSInSAR)은 이태리 POLITECNICO DI MILANO에서 개발된 알고리즘으로 국제 특허로 등록되어 있다(Ferretti *et al.*, 2000 and 2001; Colesanti *et al.*, 2003). 또한 Small Baseline Subset을 이용한 SBAS 알고리즘 및 Least Square Database Approach 등이 개발되어 인공위성 SAR 자료를 이용한 지표변위의 효과적인 관측에 이용되고 있다(Usai, 2001 and 2003; Berardino *et al.*, 2002; Berardino and Casu, 2004; Lanari *et al.*, 2004). 이러한 기술

은 연구지역에서 획득된 거의 모든 SAR 영상을 활용할 수 있으며, 여러 가지 오차요인(대기 영향, 낮은 길밀도 등)을 효과적으로 제거할 수 있고 장기간에 걸쳐 발생하는 지표변위의 시계열 분석이 용이하다는 장점이 있다. 특히 국내 최초의 SAR 위성인 다목적 실용위성 5호의 개발에 따라 이러한 기술에 대한 개발 요구가 증대하고 있다. 본 연구에서는 다중 시기에 획득된 SAR를 활용한 시계열 분석 알고리즘의 장단점에 대한 소개와 더불어 개발된 PSInSAR 및 SBAS 알고리즘을 이용하여 지표 변위를 분석한 결과를 비교하였다.

2. 시계열 변위 관측기법

다중시기에 획득된 SAR 자료를 이용한 시계열 변위 관측기법은 지표에서 발생하는 변위의 시간에 따른 진행 양상을 관측 할 수 있다는 장점이 있지만, 하나의 간섭도로부터 계산된 위상에 포함되어 있는 여러 오차 성분을 효과적으로 제거할 수 있는 수단이라는 측면에서도 정밀 지표변위 관측에 있어서 매우 중요한 기술이다. 두 개의 SAR 영상을 이용하여 제작된 간섭도의 위상은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi_{x,i} = \phi_{defo,x,i} + \phi_{topo,x,i} + \phi_{atm,x,i} + \phi_{const,i} + \phi_{slope,x,i} + \phi_{noise,x,i} \quad (1)$$

i 번째 간섭도의 x 지점에서의 간섭도 위상 $\phi_{x,i}$ 은 지표 변위에 의해 발생하는 위상성분($\phi_{defo,x,i}$), 간섭도로부터 지형에 의한 위상을 제거하기 위하여 사용된 DEM의 오차에 의한 위상($\phi_{topo,x,i}$), 위성궤도 오차에 의한 위상($\phi_{const,i}$ 과 $\phi_{slope,x,i}$), 두 SAR 자료 관측시기의 대기성분

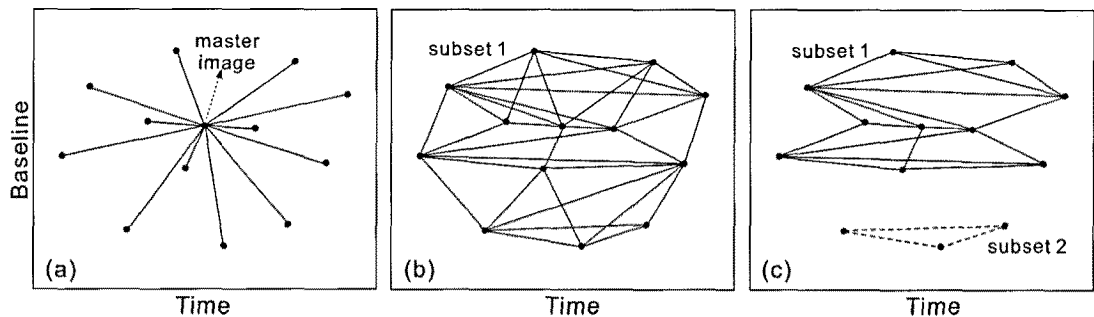


Fig. 1. Interferometric pair's network for time-series analysis using multi-temporal SAR data set: (a) PSInSAR method with one master image, (b) Least square method with one network, (c) SBAS method with multi-network.

차이에 의한 위상($\phi_{am,x,i}$)과 노이즈 성분($\phi_{noise,x,i}$)을 포함하고 있다. 따라서 정밀 지표변위 관측을 위해서는 $\phi_{defo,x,i}$ 성분 외의 위상성분을 제거하는 것이 필수적이다. 하나의 간섭쌍으로부터 DEM 오차, 위성궤도 오차, 대기성분에 의한 오차 등을 추출하는 것은 매우 제한적이다. 그러나, 다수의 관측자료를 이용한 시계열 분석을 통해 각 위상성분의 분해가 가능하다. 시계열 변위 관측 기법은 크게 하나의 영상을 주영상으로하여 간섭쌍을 생성(Fig. 1(a))하여 영상내에 분포하는 고정산란체를 이용한 방법과, 단 하나의 주영상을 선택하지 않고 긴밀도가 좋은 다수의 간섭쌍을 모두 생성(Fig. 1(b)와 1(c))하여 위상분석을 수행하는 방법으로 구분된다. 이때 생성된 간섭쌍 모두가 하나의 네트워크로 연결될 때와 두 개 이상의 네트워크로 분리될 때에 따라 적용되는 기법이 다르다. 각 시계열 변위 관측기법의 주요 알고리즘에 대한 설명은 다음과 같다.

1) 고정산란체를 활용한 PSInSAR 기법

PSInSAR 기법에서 사용되는 고정산란체란 레이더 영상에서 안정된 신호를 제공하는 산란체를 나타낸다. Fig. 2는 분포산란체와 고정산란체에서의 위상 분포를 묘사한 결과로, 한 화소 내에 같은 반사강도를 가지고 있는 다수의 산란체가 존재하는 분포산란체의 경우 100 번의 관측에서 계산된 위상이 $-\pi \sim \pi$ 사이에 매우 넓게 분포하고 있으며, 한 화소 내에서 하나의 산란체가 다른 산란체에 비해 3배의 반사강도를 가지고 있을 경우 묘사된 위상의 분포 범위는 매우 좁은 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 한 화소 내에서 우세한 반사 강도를 제공하는 산란체가 있을 경우 위상관측의 정밀도는 높아지

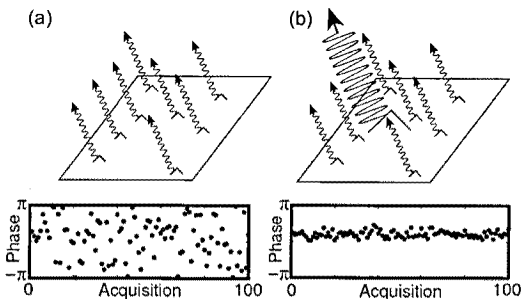


Fig. 2. Phase simulations for (a) a distributed scatterer pixel and (b) a persistent scatterer pixel (Hooper *et al.*, 2007).

는데, 이러한 화소를 고정산란체라 한다.

영상내에 분포하는 고정산란체를 이용한 PSInSAR 기법은 $(-\pi, \pi)$ 로 구속화된 차분간섭도의 위상을 이용하기 때문에 지표변위를 구하기 위한 전체 시스템의 많은 부분들이 비선형화된 방정식들을 사용한다. 따라서 변위 관측의 정밀도는 기본적으로 다음 요소들에 의존한다.

- 1) 획득된 SAR 자료의 시간적·공간적(위성의 기선거리) 분포: 주기적인 자료 획득과 짧은 기선거리일 경우 정밀도가 좋다.
- 2) 연구 대상 지역의 면적: 대기위상 및 궤도오차가 선형의 위상성분에 가까워야 하므로, 좁은 지역에서의 관측 정밀도가 더 좋다.
- 3) 변위 속도: 지상 목표물의 변위 속도는 느리고 선형의 변위에 가까워야 관측 정밀도가 좋다.

PS를 이용한 InSAR 기법은 지표 변위의 시계열 분석을 위해 연구 대상 지역에서 미리 알려진 지표 변위 모델이 있을 경우, 이러한 모델을 사용함으로써 보다 정밀도를 높일 수 있다. PSInSAR 기술 개발 초기에는 일반적으로 지표변위가 시간에 따라 일정하게 발생하는 것으로 간주하는 선형 모델을 사용하였다(Ferretti *et al.*, 2001). 그러나 지하수위 변화에 의한 지표 변위와 같은 몇몇 현상들은 계절 변화와 관련하여 연중변화를 보이거나, 반년주기의 변화를 보이는 성분이 관측되므로, 이를 반영하기 위해 선형 모델과 사인곡선 모델을 결합하여 변위속도와 연중변화량, 위상을 고려하는 연구가 수행되었다(Colesanti *et al.*, 2003). 최근 Kim *et al.*(2010)은 토양 압밀에 의한 지반침하 현상을 연구하는 지반공학 분야에서 지반침하량을 예측하기 위해 널리 사용되고 있는 모델 중 쌍곡선기법을 시계열 분석에 접목하여 지반침하 관측의 정밀도를 높였을 뿐만 아니

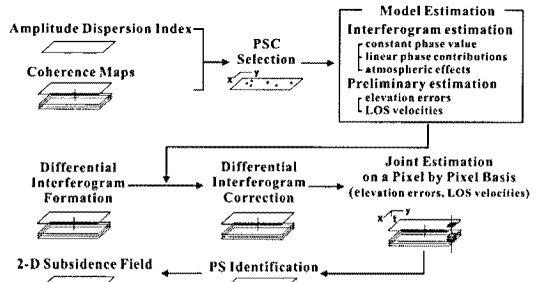


Fig. 3. PSInSAR flowchart for time-series deformation monitoring (Jung *et al.*, 2007).

라 지반침하 예측의 정확도를 높일 수 있다는 연구 결과를 발표하였다.

본 연구에서 사용한 PSInSAR 알고리즘에 대한 자료 처리 흐름도는 Fig. 3과 같다. 다수의 SAR 자료로부터 고정산란체 후보인 PSC (Permanent Scatterer Candidate)를 선택하고, PSC에서 DEM 오차($\phi_{topo,x,i}$), 선형의 변위속도($\phi_{defo,x,i}$), 궤도오차에 의한 위상($\phi_{const,x,i}$ 과 $\phi_{slope,x,i}$)을 구한 후, 이들 성분 모두를 차분 간섭도의 위상으로부터 제거하고 남은 위상($\phi_{atm,x,i} + \phi_{noise,x,i}$)으로부터 시·공간 필터링을 통해 대기성분($\phi_{atm,x,i}$)을 구한다. 대기성분은 일반적으로 공간적으로 변화가 급격하지 않으며, 시간적으로 불규칙하다는 특성에 기초하여 공간적 저주파통과와 필터링, 시간적 고주파통과와 필터링을 통해 구할 수 있다. 차분간섭도로부터 대기성분과 궤도 오차 성분을 제거하고 나면, 간섭도의 모든 화소에서 DEM 오차와 변위속도를 계산하여 높은 긴밀도를 보이는 모든 PS를 구한다.

PSInSAR 자료처리 단계 중 첫 번째 단계인 PSC선택은 각 위성영상 획득 당시의 대기 성분에 의한 위상 지연 현상을 구하는데 크게 영향을 끼친다. 따라서 영상 내에 분포하는 PSC를 적절하게 선택하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 초창기에 개발된 PSInSAR 알고리즘은 영상의 밝기값의 시계열 분석을 통해 밝기값이 안정되어 있는 화소를 선택하는 방법이 제안되었다. 밝기값의 산란정도를 나타내는 값으로는 다음 지수가 사용된다(Ferretti *et al*, 2000; 2001).

$$D_a = \frac{\sigma_a}{m_a} \quad (2)$$

여기서 m_a 와 σ_a 는 한 화소에서의 진폭값의 평균과 표준편차이다. 하지만 이러한 진폭분산지수(D_a)는 화소의 SNR이 높은 경우에는 효과적이지만 화소의 SNR이 낮은 경우에는 효과적이지 않다. 본 연구에서는 진폭분산지수 뿐만 아니라 간섭쌍으로부터 계산되는 긴밀도 영상으로부터 계산된 평균 긴밀도 영상과 일정 값 이상의 높은 긴밀도를 가지고 있는 간섭쌍의 수를 활용하여 추가적으로 PSC를 선택하는 방법을 개발 적용하였다. 개발된 PSC 선출 알고리즘에 사용되는 자료는 다음과 같다.

- 방사보정된 진폭영상으로부터 계산된 진폭분산지수

- 평균 긴밀도

- 일정값 보다 높은 긴밀도를 가지고 있는 간섭쌍의 개수

초기 PSC의 선택 목적은 보다 신뢰성 있는 화소를 먼저 선택하여 변위성분과 DEM 오차성분을 구하고, 이로부터 대기성분에 의한 위상지연을 구하여 연구지역 전지역에 걸쳐 시계열 대기성분을 구해 제거하고자 하는 것이다. 따라서, 연구지역 전체에 걸쳐 고루 PSC가 분포하는 것이 필요하다. 기존의 진폭분산지수만을 사용하여 PSC 선택 방법하는 방법은, 일정 지역에 PSC가 전혀 존재하지 않는 지역이 발생할 수 있고 이러한 지역에서는 정확한 대기성분 추정이 불가능하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 일정한 크기의 격자를 구성하고 각 격자내에서 최소한 한점 이상의 PSC를 선택하는 방법을 사용하였다.

- 1) 각 격자내에서 진폭분산지수가 최소값을 갖는 점을 선택한다.
- 2) 최소 진폭분산지수가 일정값 이하이면 선택된점을 PSC로 등록한다.
- 3) 최소 진폭분산지수가 일정값 이상이면 긴밀도 영상을 이용한다.
- 4) 일정값 이상의 높은 긴밀도를 갖는 간섭쌍의 수가 높은 점들은 먼저 선택한다.
- 5) 선택된 화소 중 최소 진폭분산지수를 갖는 점을 PSC로 등록하거나 최대 평균 긴밀도를 갖는 점을 PSC로 등록한다.

2) 다수의 주영상을 사용하는 기법

고정산란체를 이용한 PSInSAR 기법은 하나의 주영상을 사용하여 간섭쌍을 제작하므로 기선거리가 매우 긴 간섭쌍들이 존재하게 된다. 매우 긴 기선거리의 간섭쌍에서도 높은 긴밀도를 보이는 PS는 도심지역과 같은 지역에서는 충분히 분포하고 있지만, 산악지역에서는 드물게 나타나므로 산악지역 적용에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 기본적으로 기선거리에 의한 decorrelation의 영향이 적은 기선거리가 짧은 간섭쌍들만을 사용하는 방법이 개발되었다.

다수의 주영상을 사용하여 작성된 간섭쌍을 이용한 시계열 분석 기법은 least square 방법과 SBAS 기법이

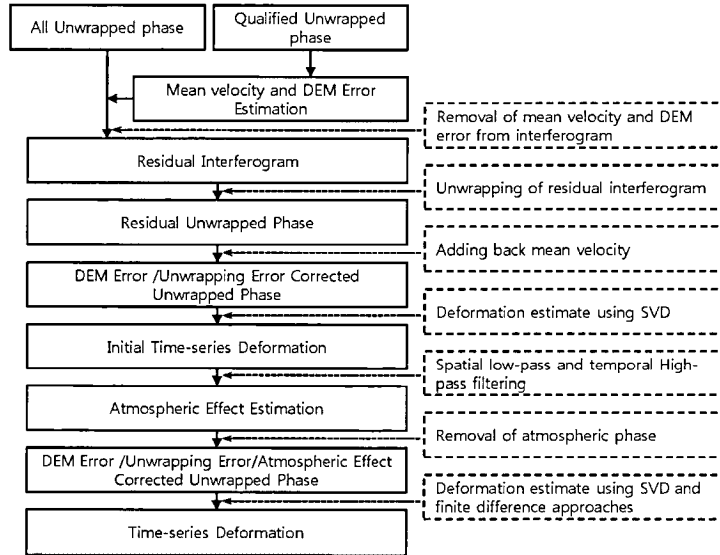


Fig. 4. The refined SBAS flowchart for time-series deformation monitoring (Jung *et al.*, 2008).

있다. Usai(2003)에 의해 제안된 least square 기법은 Fig. 1(b)와 같이 간섭쌍을 연결한 네트워크가 하나로 연결되어 있을 때 적용 가능한 방법이다. Fig. 1(c)와 같이 간섭쌍 생성 시 기선거리 또는 시간 간격의 제한에 의해 간섭쌍의 네트워크가 두 개 이상으로 분리되어 있을 경우에는 least square 기법 적용이 불가능하다.

Berardino *et al.*(2002)에 의해 제안된 SBAS 방법은 기선거리에 의한 decorrelation을 줄이기 위해 기선거리가 짧은 간섭쌍들만을 사용하였으며, 변위량이 아니라 변위 속도의 minimum-norm 기준에 근거한 해를 구한 후 속도를 적분해 변위량을 구하는 방법을 사용하였다. 이때 minimum-norm을 구하기 위해 SVD 방법을 사용하였다. 이 방법은 최대한 많은 자료를 시계열 분석에 이용할 수 있으며 공간적으로 많은 관측점에서 변위도를 구할 수 있다는 장점이 있다. 또한 PS 기법에 비해 매우 넓은 지역의 자료처리에 효과적이며, 이 기종간의 위성결과의 결합(예 ERS와 ENVISAT) 분석이 쉽다(Pepe *et al.* 2005).

PSInSAR 기법과의 가장 큰 차이점 중 하나는 불구속화된 위상을 사용한다는 것이다. PS와 마찬가지로 대기 보정은 관측된 시·공간 변위 관측값에 근거한 필터링을 통해 수행된다. 비록 간섭도 위상을 unwrapping 할 때 발생하는 위상 오차는 SBAS 과정중에 보정되는 단계가 있지만, SBAS 분석에 사용되는 간섭도 중 많은

간섭도가 phase unwrapping 오차를 가지고 있을 경우 SBAS 분석이 제대로 수행되지 않는다는 단점이 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 정형섭 외(2008)에 의해 수정된 SBAS 알고리즘이 제안되었으며, 알고리즘의 주요 과정은 Fig. 4와 같다. 제작된 간섭도 중 긴밀도가 높은 간섭도만을 선택하여 초기 선형 지표변위와 사용된 DEM의 오차를 관측한다. 관측된 선형 지표변위와 DEM 오차를 불구속화된 위상으로부터 제거한 후 잔여 위상을 다시 unwrapping함으로써 긴밀도가 높지 않은 간섭쌍에 의한 오류를 줄였다.

3. 적용 결과

개발된 알고리즘의 적용 결과를 확인하기 위하여 미국 라스베가스 지역의 ERS-1/2 SAR 영상을 이용하였다. 사용된 영상은 1992년 4월 - 2000년 9월 동안 획득된 51개의 영상으로 Track 356, Frame 2878에 해당한다. 연구에 사용된 영상의 목록은 Table 1과 같다. PSInSAR 기법 적용을 위해 1997년 2월 28일 자료를 주영상으로 사용하였으며, SRTM 1-arc DEM을 사용하여 총 50개의 차분 간섭도를 제작하였다.

연구대상지역의 크기는 약 40km×20km에 달한다. 방사보정된 51개의 ERS-1/2 SAR 진폭영상으로부터

Table 1. List of ERS-1/2 SAR data over Las Vegas, USA

Sat.	Date	dt	Bp	Sat.	Date	dt	Bp
ERS1	1992-04-21	-1774	659.9	ERS2*	1997-02-28	0	0.0
ERS1	1992-05-26	-1739	-522.9	ERS2	1997-04-04	35	343.3
ERS1	1992-09-08	-1634	523.6	ERS2	1997-05-09	70	-120.4
ERS1	1992-11-17	-1564	-446.8	ERS2	1997-06-13	105	-110.8
ERS1	1992-12-22	-1529	-1032.1	ERS2	1997-07-18	140	-112.7
ERS1	1993-03-02	-1459	107.7	ERS2	1997-08-22	175	283.2
ERS1	1993-04-06	-1424	559.1	ERS2	1997-09-26	210	-2.1
ERS1	1993-08-24	-1284	-601.3	ERS2	1997-10-31	245	-944.9
ERS1	1993-11-02	-1214	480.1	ERS2	1997-12-05	280	123.3
ERS1	1995-03-30	-701	-771.8	ERS2	1998-01-09	315	-157.7
ERS1	1995-08-17	-561	127.9	ERS2	1998-02-13	350	-226.6
ERS1	1995-09-21	-526	-240.7	ERS2	1998-03-20	385	62.9
ERS1	1995-10-26	-491	829.9	ERS2	1998-04-24	420	189.6
ERS2	1995-10-27	-490	888.4	ERS2	1998-05-29	455	-58.4
ERS1	1995-11-30	-456	-231.7	ERS2	1999-01-29	700	-38.9
ERS2	1995-12-01	-455	-261.0	ERS2	1999-06-18	840	-308.9
ERS1	1996-01-04	-421	208.2	ERS2	1999-07-23	875	577.9
ERS1	1996-02-08	-386	503.3	ERS2	1999-08-27	910	-1209.1
ERS1	1996-04-18	-316	602.1	ERS2	1999-10-01	945	389.2
ERS1	1996-05-23	-281	-69.8	ERS2	1999-11-05	980	-365.9
ERS2	1996-05-24	-280	-176.6	ERS2	1999-12-10	1015	-178.0
ERS2	1996-08-02	-210	58.4	ERS2	2000-02-18	1085	-451.2
ERS2	1996-10-11	-140	-323.1	ERS2	2000-04-28	1155	366.3
ERS2	1996-11-15	-105	1247.6	ERS2	2000-08-11	1260	555.6
ERS2	1996-12-20	-70	-362.5	ERS2	2000-09-15	1295	23.3
ERS2	1997-01-24	-35	73.2				

* master image for PSInSAR analysis, dt : time interval with respect to master image, Bp : perpendicular baseline with respect to master image

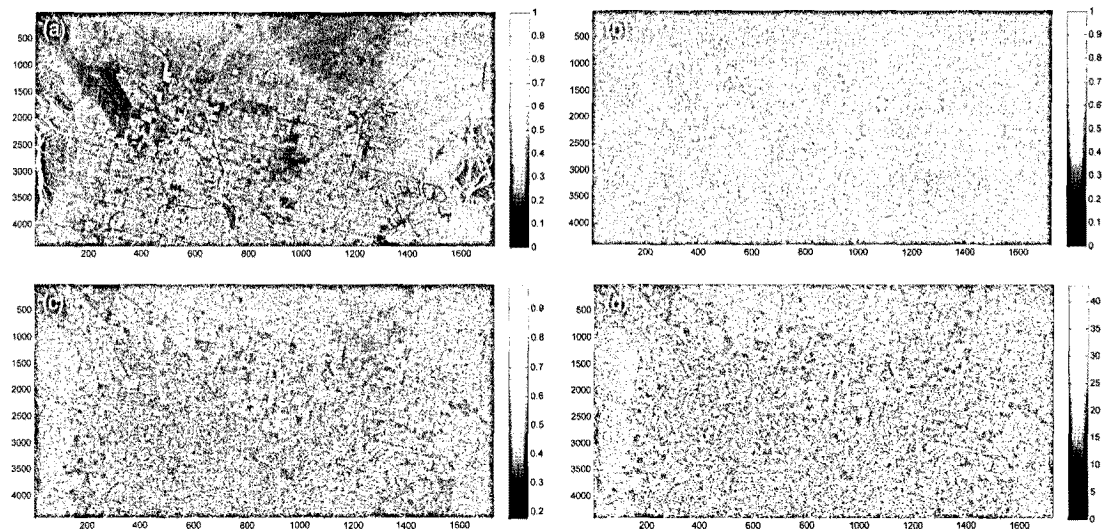


Fig. 5. (a) Multi-reflectivity image from 51 ERS-1/2 SAR data, (b) amplitude dispersion index (D_a), (c) mean coherence image from 50 interferometric pairs, (d) count of interferometric pairs with high coherence (>0.4).

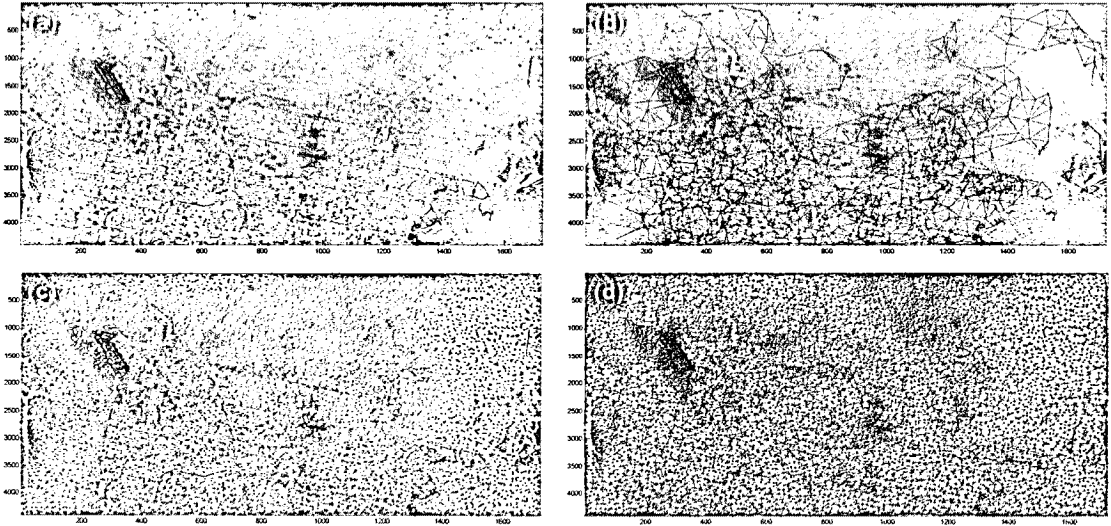


Fig. 6. (a) PSCs (=3401) selected by using only amplitude dispersion index, (b) PSC Network (=9766) for relative estimation, (c) PSCs (=6781) selected by using amplitude dispersion index and coherence value, (d) PSC Network (=20242) for relative estimation.

평균 진폭영상을 구하였다(Fig. 5(a)). 평균 진폭영상과 밝기값의 분산을 이용하여 구한 진폭분산지수 영상은 Fig. 5(b)와 같다. 낮은 진폭분산지수는 밝기값이 안정되어 있다는 것을 의미하므로 좋은 PSC로 간주될 수 있다. 50개의 간섭쌍으로부터 구한 평균 긴밀도 영상은 Fig. 5(c)와 같다. 진폭분산지수와 반대로 높은 긴밀도를 갖는 화소가 좋은 PSC가 될 수 있다. 50개의 간섭쌍 중에서 긴밀도가 0.4 이상인 간섭쌍의 수를 계산한 영상은 Fig. 5(d)와 같다. 높은 긴밀도를 꾸준히 보여주는 것은 곧 안정된 화소라는 것을 의미한다. 50개의 간섭쌍을 사용하였으므로 최대값은 50가 될 수 있으나 사용된 자료의 최대값은 43이다. 이러한 원인은 간섭쌍의 기준거리가 매우 큰 영상에서는 긴밀도가 매우 낮게 되기 때문이다.

기존 PSC 선정 방법과 개발된 알고리즘과의 비교를 위해, 먼저 진폭 분산지수 값을 이용하여 PSC를 구하였다. 영상 내에서 진폭분산지수가 0.25 이하인 화소를 선택한 결과 총 3,401개의 PSC가 선정되었다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 선정된 대부분의 화소는 도심 밀집지역에만 분포하고 있어 비 도심지역의 적용에 문제가 있다. 선정된 3401개의 PSC를 이용하여 상대적인 변위속도와 DEM 오차를 구하기 위하여 Delaunay 삼각형을 이용하여 네트워크를 구성하였다. 초기 삼각망을 구성한 후 대기영향 성분 분석 시 위상 알리아싱에

의한 오류를 줄이기 위해 연결 거리가 2km 이상인 선들을 제거하였으며, 이에 따라 완전히 고립된 PSC는 다시 제거되었다. 최종적으로 구성된 네트워크 구성망은 Fig. 6(b)와 같다. 구성된 네트워크는 모두 하나로 연결되어 있지 않고 독립된 두 개로 구성되어 있으며, 또한 상부와 우측지역에는 PSC 부재에 의해 네트워크가 전혀 구성되지 못하였다. 독립된 두 개의 네트워크란 최종 관측값의 절대 변환을 위해 두 개의 기준점이 필요함을

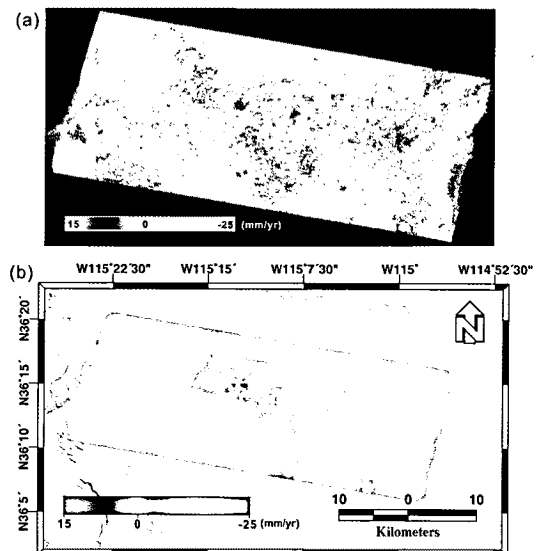


Fig. 7. LOS (Line-Of-Sight) deformation derived from (a) PSInSAR method, (b) SBAS method.

의미하며, 네트워크가 결여된 지역에서의 대기위상성분 추정치는 매우 부정확함을 의미한다. 300m×300m 격자망을 구성하여 본 연구에서 제안된 알고리즘을 적용하여 PSC를 선택한 결과는 Fig. 6(c)와 같다. 총 6781개의 PSC가 선택되었으며, 이로부터 구성된 네트워크는 단일 네트워크로 총 20242의 연결고리를 가지고 있다 (Fig. 6(d)).

추출된 PSC의 분석을 통해 각 SAR 영상의 대기 영향을 구하고 이를 초기차분간섭도에서 제거한 후 최종 PS 분석을 수행한 결과는 Fig. 7(a)과 같다. 본 연구에서 구한 PSInSAR 결과를 SBAS 결과와 비교해 보기 위하여 동일 SAR 자료를 이용하여 Fig. 4의 SBAS 알고리즘에 적용하여 지표변위 분석을 수행하였다. SBAS 분석은 31개의 간섭쌍을 사용하여 수행하였으며, SBAS 분석에 의해 계산된 LOS 방향의 지표변위도는 Fig. 7(b)와 같다. 31개의 간섭쌍으로부터 계산된 지표변위도와 PSInSAR 기법으로부터 계산된 지표변위도는 거의 일치함을 알 수 있다. 두 방법에 의한 관측결과를 정량적으로 비교하기 위하여 PSInSAR로부터 구한 LOS 변위값과 SBAS로부터 구한 LOS 변위값의 산포도를 작성한 결과는 Fig. 8과 같다. 전반적으로 비슷한 정도의 지표변위 값을 보여주고 있으나, SBAS 결과는 변위가 거의 없는 것으로 나타난 몇몇 점들이 PSInSAR에서는 약 -10mm/yr ~ -30mm/yr 정도의 변위값을 보여주는 점들이 존재한다. 이러한 원인은 SBAS 알고리즘은 기본적으로 영상 내 위상 잡음을 줄이기 위해 많은 multilook과 필터링을 수행한 후 분석되기 때문에 국소적인 지표변위가 관측되기 힘들다는 특징 때문으로 해

석될 수 있지만, 정확한 결론을 위해서는 현장 관측자료와 비교를 통한 정밀 분석이 요구된다.

4. 결론

다중시기 SAR 영상의 시계열 분석 방법 중 고정산란체를 이용한 PSInSAR 기법은 $-\pi \sim \pi$ 사이의 구속화된 위상을 이용하기 때문에 알고리즘의 많은 부분이 비선형 방정식을 포함하고 있어, 알고리즘 적용에 많은 주의를 필요로 한다. 특히 알고리즘 첫 단계인 고정산란체 후보의 적합한 선택 여부에 따라 알고리즘의 실행이 크게 영향을 받음을 확인하였다. 한편 짧은 기선거리를 갖는 간섭쌍을 사용하는 SBAS 기법은 불구속화된 위상을 이용하므로 알고리즘이 단순하여 항상 시계열 분석에 대한 해를 구할 수는 있지만, 입력 자료인 불구속화된 간섭도의 정확도에 따라 결과의 신뢰성이 크게 영향을 받는다. 따라서 시계열 분석에 사용되는 차분간섭도 위상의 unwrapping이 적절하게 수행될 수 있을 경우 SBAS와 같은 다중 주영상을 사용하는 시계열 분석이 적절하며, unwrapping 오차가 발생할 가능성이 높은 좁은 지역에서 발생하는 빠른 속도의 변위 관측에는 PSInSAR 기법이 적절하다.

미국 라스베가스 지역에서 1992년부터 2000년 동안 획득된 51개의 ERS-1/2 SAR 영상을 PSInSAR 기법 및 SBAS 기법에 적용하여 지표변위도를 구하였으며, 이들 간의 비교 분석을 통해 두 방법의 결과는 매우 유사하나 다소 국지적인 지표변위는 PSInSAR 기법의 관측이 유리한 것으로 판단되었다.

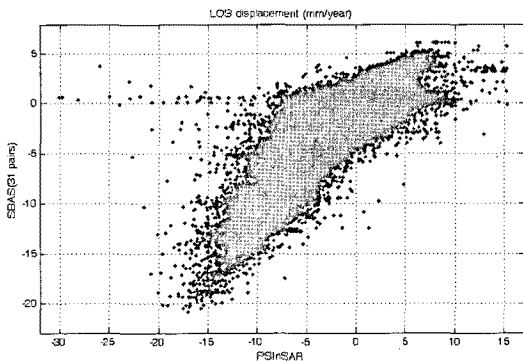


Fig. 8. Scatter plot of LOS deformation between PSInSAR and SBAS result.

사사

이 논문은 2007년도 세종대학교 교내연구비 지원에 의한 논문임.

참고문헌

정형섭, 이창욱, 박정원, 김기동, 원중선, 2008. 차분 간

- 섭도로부터 지표변위의 시계열 관측을 위한 개선된 Small Baseline Subset (SBAS) 알고리즘, 대한원격탐사학회지, 24(2): 165-177.
- Berardino, P., R. Lanari, and E. Sansosti, 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 2375-2383.
- Berardino, P. and F. Casu, 2004. A quantitative analysis of the SBAS algorithm performance, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 5: 3321-3324.
- Bürgmann, R., P.A. Rosen, and E.J. Fielding, 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and its Deformation, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 169-209.
- Colesanti, C., A. Fattetti, C. Prati, and F. Rocca, 2003. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique, *Engineering Geology*, 68: 3-14.
- Ferretti, A., C. Prati and F. Rocca, 2001, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 8-20.
- Ferretti A., C. Prati, and F. Rocca, 2000, Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2211.
- Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker, 2007, Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, *J. Geophys. Res.*, 112: B07407.
- Jung H.C., S.W. Kim, H.S. Jung, H.D. Min, and J.S. Won, 2007, Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis, *Engineering Geology*, 92: 1-13.
- Kim, S. W., S. Wdowinski, T. H. Dixon, F. Amelung, J. W. Kim, and J. S. Won, 2010, Measurements and predictions of subsidence induced by soil consolidation using persistent scatterer InSAR and a hyperbolic model, *Geophysical Research Letters*, 37(5), L05304, doi:10.1029/2009GL041644.
- Lanari, R., O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorquí, P. Berardino, and E. Sansosti, 2004, A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 1377-1386.
- Lanari, R., F. Casu, M. Manzo, and P. Lundgren, 2007, Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep; a case study of the Hayward fault, California, *Remote Sensing of Environment*, 109: 20-28.
- Massonnet, D. and K. L. Feigl, 1998, Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Review of Geophysics*, 36: 441-500.
- Pepe, A., E. Sansosti, P. Berardino, and R. Lanari, 2005, On the Generation of ERS/ENVISAT DInSAR Time-Series via the SBAS technique, *IEEE Geosci. and Remote Sensing Letters*, 2(3): 265-269.
- Usai S. and R. Klees, 1999, SAR interferometry on a very long time scale: A Study of the interferometric characteristics of man-made features, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37: 2118-2123.
- Usai S., 2001, A new approach for long term monitoring of deformations by differential SAR interferometry, Ph.D. thesis, Delft Univ. Press, Delft. The Netherlands.
- Usai S., 2003, A least squares database approach for SAR interferometric data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 753-760.