

JERS-1 SAR에 의한 백두산 지역의 침하 관측

김상완¹⁾, 원중선¹⁾, 김정우²⁾, 민경덕¹⁾

1. 서론

백두산은 중국과 북한의 국경지대에 위치하고 있는 신생대 성층화산이다. 백두산 화산체는 홀로세(Holocene)에서만 4차례의 큰 폭발이 있었으며, 1200 A.D.에 발생한 폭발은 홀로세에 일어난 화산활동 중 세계적으로 가장 규모가 큰 것으로 기록되고 있다. 최근에는 이 지역에서 미소지진이 빈번하게 발생하고 있어, 중국학자들은 그러한 지진과 마그마 재활동의 관련성 여부에 대해 깊은 관심을 쏟고 있다.

영상레이더인 SAR 자료를 이용한 레이더 인터페로메트리(radar interferometry) 기술은 지난 1990년대 급속하게 발달한 마이크로파 원격탐사의 핵심 기술로 지진, 지반침하, 화산활동 등에 의한 지표의 미세 변위를 관측하는데 매우 유용하게 이용되고 있다[1][2]. 장기간에 걸쳐 백두산을 관측하기 위해서는 지진계 자료, GPS 자료, 그리고 고정밀도의 DEM 등과 같은 자료가 필요하다. 하지만 지진관측소는 중국쪽에만 있으며, 고정 GPS는 아직까지 한곳도 설치되어 있지 않다. 또한 정밀한 DEM도 이용가능하지 않으며, 군사적 요충지라는 점 때문에 접근도 용이하지 않다. 이러한 현장조사 자료의 절대적인 부족과 달리 지난 수년간 다수의 ERS-1/2 and JERS-1 SAR 영상자료가 수집되었으며, 특히 JERS-1 SAR 자료는 총 25개의 영상이 획득되었다. 따라서 본 연구에서는 이들 SAR 자료를 이용하여 지난 수년간의 지표변위를 관측하고자 한다.

2. 자료

DEM : 연구지역이 중국과 북한의 국경에 위치하고 있고 두 국가 모두 군사적으로 민감하기 때문에 고정밀도의 DEM이 이용가능하지 않다. 우리는 미국의 National Imagery and Mapping Agency(NIMA)에서 제공하는 30 초(약 1 km) 간격의 DTED Level 0의 DEM을 이용하였다. 일반적으로 DInSAR에 이용되기 위해서는 100 m 간격으로 10 m의 정밀도를 갖고 있는 DEM이 요구되지만 이것은 레이더의 궤도에 따라 유동적이다. 따라서 저해상도의 DEM 일지라도 비교적 큰 altitude of ambiguity를 가지고 있는 인터페로그램에서 지형효과를 제거하는데 이용될 수 있다. 본 연구에서는 DEM으로부터 모사된 SAR 영상과의 coregistration을 좀 더 용이하게 하기 위해 30 초 DEM을 Kriging 방법을 이용하여 3 초 간격으로 재배열하였다. DEM으로부터 작성된 연구지역의 음영기복도는 Fig. 1과 같다.

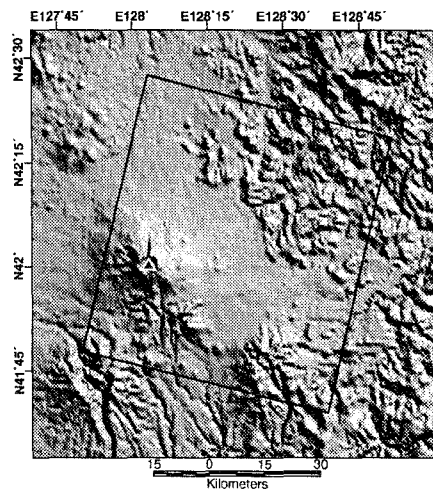


Fig. 1. Shaded relief map derived from interpolated DEM. The inset rectangle is the region of the study area. Triangle denotes Mt. Baegdu.

SAR 영상 : 1992년 9월 24일부터 1998년 10월 3일에 걸쳐서 총 23개의 JERS-1 SAR와 두 개의 ERS-2 SAR 자료가 수집되었다. 연구지역은 백두산 천지 주변을 제외한 대부분의 지역이 식생과 산림

에 의해 덮혀 있기 때문에 C 밴드 SAR에서 긴밀도를 유지하기는 어렵다. 특히 장기간의 관측을 위해서는 매우 긴 시간간격의 자료가 이용되어야 하는데 더욱 어려움이 있다. 본 연구에 사용된 ERS-2도 70일의 짧은 간격을 가지고 있음에도 불구하고 인터페로그램의 질이 좋지 않다. 반면에 JERS-1 L 밴드 SAR는 시간간격이 수년인 경우에도 비교적 양호한 인터페로그램을 제공한다. JERS-1은 낮은 신호대 잡음비와 궤도가 정확하지 않다는 단점을 가지고 있음에도 불구하고 연구지역과 같이 temporal decorrelation 요인이 많은 지역에서 장기간 변화를 관찰하기 위해서는 유용하다. 우리는 JERS-1 SAR 영상의 초기분석을 통해 최종적으로 12개의 JERS-1 SAR를 선택하였다.

3. DInSAR 자료처리

DInSAR란 두 SAR 영상으로부터 작성된 인터페로그램 안에 포함되어 있는 지형, 지표변화, 대기효과 등에 의한 잡음을 분리함으로써 지형의 변화를 관측하는 기술이다. 인터페로그램으로부터 지형에 의한 위상을 제거하기 위해 3 가지 방법이 널리 쓰이고 있다. 2-pass 방법은 phase unwrapping, fringe 변화율의 조정이 필요 없다는 장점이 있으나, 정밀한 DEM이 있어야 되며 이 DEM으로부터 모사된 SAR 영상과 실제 SAR 영상간의 coregistration이 어렵다는 단점이 있다. 3-pass는 coregistration의 문제는 없으나 연구에 적합한 영상을 취득하는데 어려움이 있으며 아직까지 기술적인 문제가 많은 phase unwrapping 단계가 요구된다는 단점이 있다. 4-pass는 3-pass와 유사하나 적합한 영상을 취득하는데 보다 유리하다는 장점이 있으나 두 인터페로그램간의 coregistration이 필요하고, 완전히 독립된 4개의 궤도를 이용하므로 궤도기하보정에 추가적인 어려움이 있다.

2-pass, 3-pass, 그리고 4-pass 외에 만일 altitude of ambiguity가 매우 큰 영상을 이용하는 방법이 있다. 이러한 인터페로그램에서 지형의 영향은 무시될 수 있다. altitude of ambiguity란 인터페로그램에서 한 fringe를 변화시키는데 필요한 고도의 변화로 정의되며 다음 식과 같이 주어진다.

$$h_a = \frac{\lambda r_0 \sin \theta_0}{2 B_{\perp}}$$

여기서 λ 는 위성의 파장, r_0 는 위성으로부터 지상 목표물까지의 거리, θ_0 는 위성의 관측각, 그리고 B_{\perp} 는 위성간의 거리(baseline)의 수직거리이다. B_{\perp} 이 0에 가까워지는 경우에 h_a 는 무한대의 값을 가지게 된다.

4. DInSAR로부터 관찰된 지표변위

연구지역의 InSAR pair 중 우리는 매우 높은 altitude of ambiguity를 가지고 있는 3개의 인터페로그램을 구할 수 있었다(Fig. 2). 이들의 h_a 는 거의 수 천~수 만 m에 달하기 때문에 이 지역의 최대 고도차(약 2000 m)를 고려할 때 지형에 의한 위상변화는 거의 무시할 수 있다. 따라서 지형 영향은 제거되지 않았지만 이들 인터페로그램에서 보여주는 위상변화는 곧바로 지표변위의 결과를 반영한다. 3개의 인터페로그램 모두 백두산 산체와 남서쪽에 위치하고 있는 홍두산을 중심으로 수 십 km에 걸쳐서 지표 하강이 일어나고 있음을 지시한다. 만약 서쪽, 남쪽, 그리고 남서쪽의 4개의 영상을 이용하여 분석한다면 더 정확한 판단을 우리에게 가능하게 할 것이다. 여기서 관찰된 지표변위는 레이더의 관측방향에 평행한 성분으로 한 fringe는 레이더의 관측파장의 반으로 11.8 cm에 해당한다. Fig. 2(a)에서는 2 fringe, 2(b)에서는 2.5 fringe, 그리고 2(c)에서는 3.5 fringe가 관찰된다. 만일 수직적인 변화만 발생했다고 가정하면 각각

약 19.3 cm, 24.1 cm, 그리고 33.7 cm에 해당한다. Fig. 3은 각 인터페로그램의 시간간격 별로 수직변위를 나타낸 것으로, fringe 또는 수직변위가 시간과 밀접한 상관 관계가 있음을 보여준다. 또한 3개의 인터페로그램을 작성하기 위해 사용한 SAR 영상이 서로 다른 6개의 독립적인 영상이므로 대기에 의한 영향이 아닌 것이 확실하다.

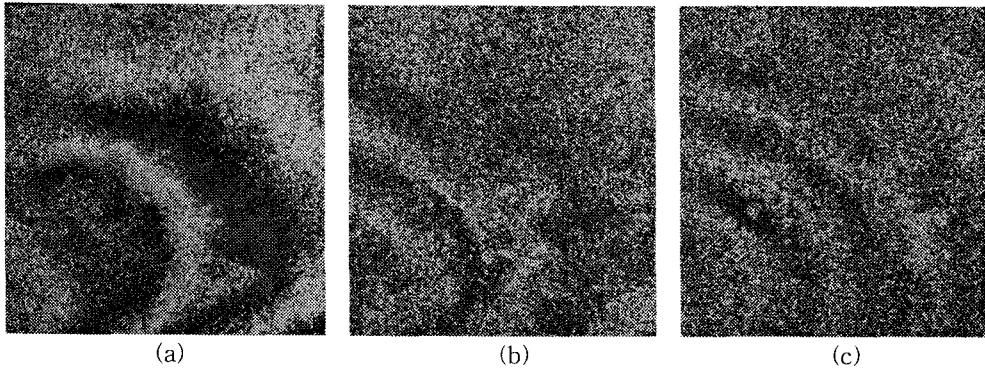


Fig. 2. Interferogram with very high altitude of ambiguity: (a) 9401/9612 pair, (b) 9306/9601 pair, and (c) 9209/9807 pair.

5. 토론 및 결론

ERS-2 pair는 수목, 구름, 눈 등에 의한 temporal decorrelation 영향을 많이 받는 반면, JERS-1 SAR(L 밴드) 자료간의 pair는 매우 긴 시간 간격에도 불구하고 비교적 높은 긴밀도를 가지고 있어, 본 연구지역과 같이 지표 변화율이 매우 느릴 것으로 예상되는 지역에서 장기간의 변화를 관측하기에는 적합하다. altitude of ambiguities가 매우 큰 인터페로그램과 2-pass, 3-pass DInSAR 방법을 사용하여 관측된 결과 모두, 백두산 산체와 남서쪽에 위치하고 있는 홍두산을 중심으로 수 십 km에 걸쳐서 지표가 하강하고 있음을 지시한다. 계산된 지표하강률은 1년에 약 9 cm정도이다.

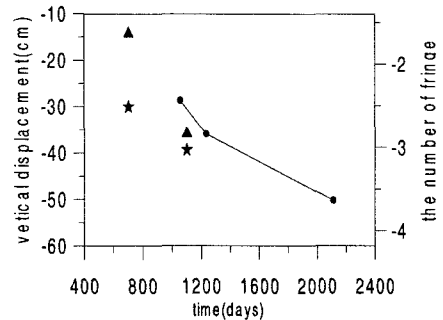


Fig. 3. Vertical displacement with respect to time variation.

6. 참고문헌

- [1] Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Fiegl, and T. Rabaute, 1993, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364:138-142.
- [2] Massonnet, D., P. Briole, and A. Arnaud, 1995, Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375:567-570.

주요어 : 백두산, 지표변위, SAR, DInSAR, 침하

- 1) 연세대학교 지구시스템과학과
- 2) 세종대학교 지구정보과학과