

DInSAR에 의한 백두산 성층화산암체의 지표변위

김 상완*, 원 중선*, 김 정우**, 문 우일***, 민 경덕*

*연세대학교 지구시스템과학과

**세종대학교 지구정보과학과

***서울대학교 지구시스템과학과

E-mail: sangwan@geors.yonsei.ac.kr

Swelling of the BAEGDU Stratovolcanic Mountain Observed by DInSAR

S.W. KIM*, J.S. WON*, J.W. KIM**, W.M. Moon*** and K.D. MIN*

*Department of Earth System Sciences, Yonsei University

**Department of Earth Sciences, Sejong University

***Department of Geology, Seoul National University

요 약 — 본 연구의 수행을 위해 23개의 JERS-1 SAR 와 두 개의 ERS-2 SAR 자료를 이용하였다. 비록 ERS-2 pair로부터 생성된 인터페로그램(interferogram)은 70일의 짧은 간격 자료임에도 불구하고 수목, 구름, 눈 등에 의한 temporal decorrelation과 낮은 관측 각에 의한 layover 등에 의해 인터페로그램의 질이 좋지 않아 분석에 이용될 수 없었다. 반면에 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.

우리는 altitude of ambiguities가 매우 큰 3개의 인터페로그램과 2-pass, 3-pass DInSAR 방법을 사용하여 1992년 9월과 1998년 10월 까자 약 6년 동안의 지표변위를 관측하였다. 다양한 시간 간격(704, 1056, 1100, 1118, 1232, 2112 days) 별로의 차분 인터페로그램(differential interferogram)의 결과와 그들간의 상호관계성을 이용하여 연구지역의 지표변위를 분석하였다.

2-pass, 3-pass, 그리고 altitude of ambiguity가 큰 인터페로그램으로부터 관측된 결과 모두, 백두산 산체와 남서쪽에 위치하

고 있는 홍두산을 중심으로 수십 km에 걸쳐서 지표가 상승하고 있음을 지시한다. 계산된 지표상승률은 1년에 약 9 cm정도이다.

서 론

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 쏟고있다.

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. 장기간에 걸쳐 백두산을 관측하기 위해서는 지진계 자료, GPS 자료, 그리고 고정밀도의 DEM 등과 같은 자료가 필요하다. 하지만 지진관측소는 중국쪽에만 있으며, 고정 GPS는 아직까지 한국

도 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.

자 료

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. 이 자료는 DTED Level 1으로부터 단지 샘플링되었기 때문에 정밀도는 수 십 m이다. 일반적으로 DInSAR에 이용되기 위해서는 100 m 간격으로 10 m의 정밀도

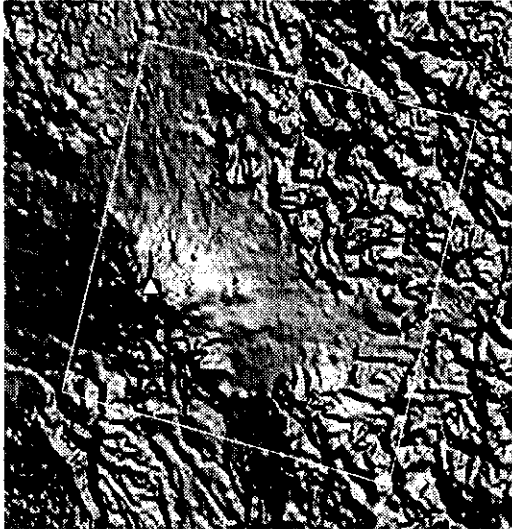


Fig. 1. Shaded relief map derived from interpolated DEM. The inset rectangle is the region of the study area. Triangle denote Mount Baegdu.

를 갖고 있는 DEM이 요구되지만 이것은 레이다의 궤도에 따라 유동적이다. 따라서 저해상도의 DEM 일지라도 비교적 큰 altitude of ambiguity를 가지고 있는 인터페로그래에서 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.

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 산림에 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 인터페로그래의 질이 좋지 않다. 또한 화산추, 우측의 북포태산 그리고 북동쪽에 발달한 급경사지역에서 layover 현상이 발생하고 있다. layover란 지형의 경사가 레이다의 관측각 이상일 때 발생하는 현상으로 ERS-2와 같이 낮은 관측각(23°)을 가지고 있는 위성에서 더욱 잘 나타난다. 그러므로 temporal decorrelation의 영향이 거의 없는 ERS-1/2 SAR pair를 우리가 구한다 할지라도 layover 현상 때문에 우리는 phase unwrapping에 많은 어려움을 겪을 것이다.

반면에 JERS-1 L 밴드 SAR는 시간간격이 수년인 경우에도 비교적 양호한 인터페로그래를 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 영상로부터 적절한 InSAR pair를 찾기 위해 먼저 leader 파일에 있는 궤도 정보를 이용하여 baseline을 계산하였다. 긴밀도를 유지하는 것이 불가능하다고 판단되는 2 km 이상의 baseline을 가지고 있는 pair를 제외한 다음, 초기분석을 통해 최종적으로 12개의 JERS-1 SAR를 선택하였다.

DInSAR 자료처리

DInSAR란 두 SAR 영상으로부터 작성된 인터페로그램 안에 포함되어 있는 지형, 지표 변화, 대기효과 등에 의한 잡음을 분리함으로써 지형의 변화를 관측하는 기술이다. 이 기술은 지표의 절대적인 변위가 아니라 레이다의 range 방향으로의 상대적인 변위를 감지한다. 인터페로그램으로부터 지형에 의한 위상을 제거하기 위해 3 가지 방법이 널리 쓰이고 있다. 두 개의 SAR 영상과 정밀한 DEM을 이용하는 방법이 2-pass 이며, 세 개의 SAR 영상을 이용하여 하나의 영상을 공유하는 방법이 3-pass, 네 개의 SAR 영상을 이용하는 방법이 4-pass 이다. 2-pass 방법은 phase unwrapping, fringe 변화율의 조정이 필요없다는 장점이 있으나, 정밀한 DEM이 있어야 하며 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 수직거리 이다. B_{\perp} 이 0에 가까워 지는 경우에 h_a 는 무한대의 값을 가지게 된다. 이러한 인터페로그램은 DEM의 정밀도, co-registration, phase unwrapping등 애러를 발생시킬 수 있는 여러 가지 과정이 요구되지 않으므로 보다 신뢰할 수 있는 정보를 우리에게 제공한다.

SAR로부터 관찰된 지표변위

h_a 가 큰 인터페로그램

연구지역의 InSAR pair 중 우리는 매우 높은 altitude of ambiguity를 가지고 있는 3개의 인터페로그램을 구할 수 있었다(Fig. 2). 이들의 h_a 는 거의 수천~수만 m에 달하기 때문에 이 지역의 최대 고도차(약 2000 m)를 고려할 때 지형에 의한 위상변화는 거의 무시할 수 있다. 따라서 topographic 영향은 제거되지 않았지만 이들 인터페로그램에서 보여주는 위상변화는 곧바로 지표변위의 결과를 반영한다. 비록 fringe가 영상 안에서 동심원 모양을 보여주지 않기 때문에 좀 더 정확한 판단을 어렵게 하지만, 3 개의 인터페로그램 모두 백두산 산체와 남서쪽에 위치하고 있는 홍두산을 중심으로 수십 km에 걸쳐서 상승이 일어나고 있음을 지시한다. 만약 서쪽, 남쪽,

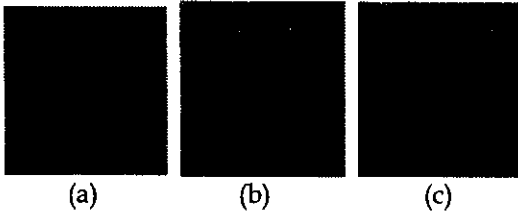


Fig. 2. Interferogram with very high altitude of ambiguity: (a) 9401/9612 pair, (b) 9306/9601 pair, and (c) 9209/9807 pair.

그리고 남서쪽의 4개의 scene를 이용하여 분석한다면 더 정확한 판단을 우리에게 가능하게 할 것이다. 여기서 관측된 지표변위는 레이더의 관측방향에 평행한 성분으로 한 fringe는 레이더의 관측과장의 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.

2-pass 방법

본 연구에서 우리는 단지 약 1 km 간격을 가지고 있는 저해상도의 DEM 만이 이용 가

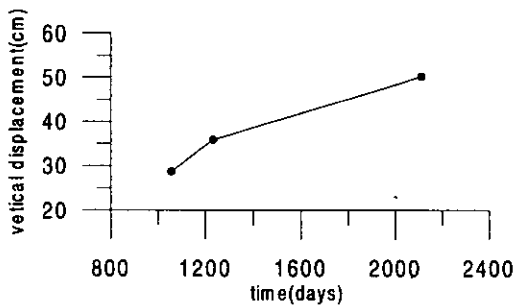


Fig. 3. Cross-plot of vertical displacement versus time.

능하였기 때문에 일반적으로 2-pass 적용이 불가능하다. 하지만 비록 DEM의 해상도가 낮아도 정밀도는 좋기 때문에 적절하게 h_a 가 높은 인터페로그램에 우리는 2-pass를 적용할 수 있다. Fig. 4(a)는 3년의 시간 간격을 가지고 있는 1992년 12월 21일과 1996년 3월 23일의 SAR 영상으로부터 작성된 인터페로그램으로 약 1000 m의 h_a 를 가지고 있다. 이 그림에서 지형에 의한 fringe 변화 외에 중앙부의 화산고원 부근에 약 한 fringe 정도를 가지고 있는 삼각형 모양의 fringe가 관찰된다. 이 fringe가 만일 지표변화에 의한 것이라면 11.8 cm의 침하에 해당된다. 하지만 이러한 특징은 앞서 언급된 결과와 앞으로 보여질 결과에서 나타나지 않기 때문에 두 영상 중 하나(또는 둘다)가 대기에 의해 영향을 받은 것으로 판단되며, 아울러 영상 좌하부에서 관찰되는 상대적으로 매우 낮은 긴밀도도 대기에 의한 영향으로 판단된다. 이 인터페로그램으로부터 지형에 의한 fringe를 제거하기 위해 우리는 DEM을 이용하여 SAR 영상을 합성하고, 실제 SAR 영상과 상관계수 분석을 통해 coregistration을 수행하였다. coregistration 정밀도는 range 방향으로 약 9 pixel(약 1km), azimuth 방향으로 약 19 pixel(약 2km)의 RMS 오차를 보인다. 이러한 오차는 큰 값이지만 h_a 가 큰 지역에서는 고도변화에 따라 위상변화가 심하지 않으므로, 결국 부정



Fig. 4. (a) Interferogram of 9212/9603 pair, (b) Differential interferogram of same pair.

확한 coregistration에 의한 에러는 거의 무시할 수 있다. DEM으로부터 계산된 fringe를 제거한 영상은 Fig. 4(b)와 같다. 비록 image 중앙부와 서측의 심한 잡음 때문에 정확하지는 않지만 최소 한 fringe 이상의 지표상승이 앞 절의 결과와 같은 위치에서 나타난다.

3-pass 방법

앞서 언급된 결과를 고려할 때 지표상승이 수십 km에 걸쳐 광범위하게 일어나고 있으므로 정밀 궤도수정을 위해서는 가능한 전체 영상(특히 연구지역의 북부를 포함하는)을 처리하여야 한다. 따라서 기준 인터페로그램으로 사용되기 위해서는 전 지역에 걸쳐 phase unwrapping을 수행할 수 있을 정도로 충분히 긴 밀도를 유지하여야 하며 가능한 짧은 시간간격을 가지고 있어야 한다. 이러한 pair로써 1994년 8월 29일 과 1995년 8월 16일에 획득된 자료가 가능하다. 9408/9508 pair와 같이 3-pass 방법에서 만일 지형효과를 제거하기 위해 사용되는 기준 인터페로그램이 다소 큰 변화를 포함하고 있다면 그러한 영향을 제거해야만 한다(Kim et al., 2000). 이 경우 차분 인터페로그램에서 한 fringe는 $11.8 \text{ cm} \cdot \text{S}$ 에 해당하며 계산된 scale factor(S)는 각각 2.2, 1.2 이다. 따라서 9408/9209 인터페로그램(Fig. 5(a))에서 한 fringe는 $2.2 \cdot 11.8 \text{ cm}$, 9508/9808 인터페로그램(Fig. 5(b))에서 한 fringe는 $1.2 \cdot 11.8 \text{ cm}$ 에 해당한다.

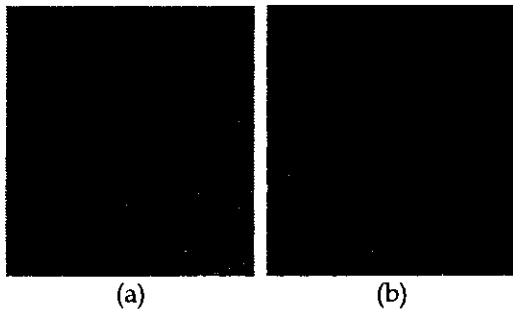


Fig. 5. Differential interferograms derived by 3-pass method: (a) 9408/9209 pair, (b) 9508/9808 pair.

토론 및 결론

장기간의 관측을 위해서는 대상지역의 정밀 DEM을 구축하고 나서 2-pass 방법을 적용하는 것이 주어진 영상의 활용성을 극대화하고 자료처리시간의 절약을 위해서도 절대적으로 유리하다. 하지만 본 연구에서 우리는 단지 약 1 km 간격의 DEM 만이 이용 가능하였기 때문에 2-pass 적용이 어려웠다.

3-pass에 의해 관측된 지표의 변화는 비록 altitude of ambiguity가 큰 인터페로그램과 변화정도에 있어서는 다소 차이가 있지만 지표가 상승한다는 점은 잘 일치한다. 이러한 지표 변화들의 차이는 지형효과를 제거하기 위해 사용된 9408/9508 pair의 궤도 보정에 일차적으로 문제가 있는 것으로 판단된다. 기본적으로 JERS-1 의 궤도가 매우 부정확하고, DEM과의 위상 비교를 통해 궤도수정을 수행하였는데 9408/9508 pair 자체가 지표변화를 포함하고 있기 때문에 에러가 야기된다. 만일 우리가 정확한 몇 십 개의 GCPs 가 이용가능하고 이것을 이용해서 궤도 수정을 한다면 이러한 에러를 줄일 수 있다.

2-pass, 3-pass, 그리고 altitude of ambiguity가 큰 인터페로그램으로부터 관측된 결과 모두, 백두산 산체와 남서쪽에 위치하고 있는 홍두산을 중심으로 수십 km에 걸쳐서 지표가 상승하고 있음을 지시한다. 계산된 지표상승률은 1년에 약 9 cm정도이다.

참고문헌

- S.W. Kim, J.S. Won, G.W. Yoon, J.W. Kim, and W.M. Moon, "Application Of Differential SAR Interferometry over the BAEGDU Stratovolcanic Mountain: Preliminary Results", Proc. Int'l Symp. Remote Sensing, pp.119-126, Kyongju, Korea, Nov. 1-3 (2000).