GPS를 이용한 미국 알래스카 어거스틴 화산의 지표변위 감시

– 2006년 분화를 중심으로 –

김수경 · 황의홍 · 김영화 · 이창욱[†]

국립기상연구소 지구환경시스템연구과

Surface deformation monitoring of Augustine volcano, Alaska using GPS measurement

- A case study of the 2006 eruption -

Su-Kyung Kim, Eui-Hong Hwang, Young-Hwa Kim and Chang-Wook Lee[†]

Global Environment System Research Lab., NIMR

Abstract : Augustine is an active stratovolcano located in southwest of Cook Inlet, about 290 kilometers southwest of Anchorage, Alaska. Between January 11 and 28, 2006, the volcano erupted explosively 14 times. We collected twelve permanent GPS stations operating by Plate Boundary Observatory (PBO) from 2005 to 2011. All data processing was carried out using Bernese GPS Software V5.0 with IGS precise orbit. Static baseline processing by fixing AC59 station was applied for the volcano activity monitoring. AC59 is the nearest (about 24.5 km) station to Augustine volcano, and located on North America Plate including Augustine Island. The test results show inflation (9.7 cm/yr) and deflation (-9.2 cm/yr) of volcano before and after eruption around crater clearly. After volcano activity has reached a plateau, some of the GPS stations installed north of the volcano show ground subsidence phenomenon caused by compaction of pyroclastic flows. These results indicate the possibility of using surface deformation observed by GPS for monitoring and prediction of volcano activity.

Key Words : Augustine volcano, baseline processing, GPS, surface deformation

요약 : 미국 알래스카의 알류산열도에 위치하는 어거스틴 화산은 인근 지역에 위치하는 많은 화산들 중 가장 움직임이 활발한 화산중 하나로, 가장 최근에 발생한 2006년 분화 당시 1월 11일부터 28일까지 총 14번의 분출을 하였으며, 최종적으로 화산폭발지수 3으로 기록되었다. 본 연구에서는 어거스틴에 설치되어 상시 운영 중인 12개 GPS 관측소의 2005년부터 2011년까지 관측데이터를 이용하여 2006년 분화 전·후 지표변위 양상을 확인하고 다각도의 분석을 시도하였다. 모든 자료처리는 Bernese GPS Software V5.0를 이용하여 진행하였으며, 어거스틴 화산 인근(약 24.5 km)에 위치한 AC59 관측소를 기지점으로 하는 정밀 기선해

접수일(2013년 10월 11일), 수정일(1차 : 2013년 10월 18일), 게재확정일(2013년 10월 21일).

[†] 교신저자: 이창욱(cwlee@korea.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

석이 수행되었다. 그 결과 분화가 발생하기 약 4개월 전부터 분화구 주변에서 평균 9.7 cm/yr 속도로 지표가 부풀어 오르는 양상이 뚜렷하게 나타났으며, 분화 발생 이후 -9.2 cm/yr의 급격한 침하현상이 확인되었다. 화산활동이 안정기에 접어든 이후에는 화산의 북쪽 사면에 설치된 일부 관측소에서 분화 당시 흘러내린 화산쇄설물의 다짐작용에 의한 침하 현상이 확인되었다. 이러한 결과는 GPS를 이용하여 관측한 지표의 변화가 화산활동을 감시하고 예측하는데 유용한 자료로 사용될 수 있음을 시사한다.

1. 서론

인간의 재산과 생명을 위협하는 많은 자연재해 중 지진, 지진해일 그리고 화산활동 등과 같이 지구 지각의 조산운동에 의해 발생하는 재해는 예측이 어려우며, 큰 규모의 피해를 초래한다. 특히 화산활동에 의한 자연재해는 폭발 당시 분출된 용암류와 화산쇄설물에 의한 도시, 농경지, 식생 등의 파괴와 더불어 지진과 산사태 및 쓰나미 등의 이차적인 문제를 발생하기도 한다. 뿐만 아니라 대기의 상태에 따라 장거리로 확산될 수 있는 화산재는 인근 지역 주민들의 호흡기 질병을 유발함은 물론이고, 항공기 운항에 차질을 주는 등의 추가적인 피해를 야기한다. 더욱이 2002년 백두산의 화산활동의 징후가 확인됨에 따라 지속적으로 백두산의 분화 가능성이 대두되면서 더 이상 한반도가 화산활동의 안전지대가 될 수 없다는 지적이 일고 있다(Yun and Lee, 2012). 그러나 백두산의 경우 직접 접근이 어렵고, 데이터의 공유가 잘 이뤄지고 있지 않는 등의 문제로 국내 연구자들에 의한 활발한 연구가 이뤄지지 않고 있으며, 대부분 직접 접근이 비교적 용이한 중국이나 일본의 학자들을 중심으로 연구가 진행되고 있다(Lee *et al.*, 2013). 이에 따라 화산 피해를 최소화하기 위한 전조현상 감시 및 화산활동 예측에 관한 국내 연구의 필요성이 증대되고 있다.

화산활동에 의한 분화는 예보하여 피해를 최소화 하는 것이 중요하지만 현재까지의 기술로 화산의 분화를 정확히 예측하는 것은 쉽지 않다(Pieri and Abrams, 2005). 지금까지 알려진 화산 분화의 전조현상들로는 화산성 지진의 발생빈도 증가, 화산 가스 발생량의 변화, 지각 변형, 지열변화 및 지하수위의 변화 등이 있다. 이러한 전조현상 중 지표의 변위, 특히 급속한 지각의 융기 및 침하 현상은 화산 분화의 임박을 알리는 결정적인 전조현상 중 하나이다(KRISS, 2012). Fig. 1은 화산활동에 의한 지각변형 현상을 설명하는 그림이다. 일반적으로 분화가 발생하기 전 마그마가 지표부근으로 상승하며, 이

Fig. 1. Simplified inflation-deflation cycle of magma reservoirs at Hawaiian volcanoes (modified from http://hvo.wr.usgs.gov/howwork/subsidence/inflate_deflate.html).

로 인한 내부 압력의 증가는 화산체의 팽창을 가져오게 된다(Yazdanparast and Vosoghi, 2013).

화산의 움직임을 감시하기 위해서 지진계, 경사계, 중력계 등의 다양한 센서들이 활용되고 있으며, 1980년대 이후부터는 Global Positioning System(GPS), Interferometric Synthetic Aperture Radar(InSAR)와 같은 현대적 측지기술이 화산활동의 모니터링과 연구에 많은 기여를 하고 있다(Cho *et al.*, 2013; Lu, 2005). 여러 관측 기법 중 GPS는 수 밀리미터의 정밀도로 지각 및 단층 등의 위치 및 변위 측정이 가능한 것으로 알려져 있어 지구물리 연구 분야에서 유용하게 사용되고 있다. 특히 화산분야에서 GPS의 활용은 지속적인 지각이동의 모니터링을 가능하게 하므로 분화의 임박을 예측하기에 유용하게 사용된다. 이미 미국 및 일본을 포함한 세계 각지의 화산 관

측소에서 상시 관측 망의 형태로 GPS 관측소를 운영하고 있으며, GPS 데이터 분석을 통해 확인된 지각 변동량을 화산활동 감시에 사용하고 있다.

본 논문에서는 GPS를 활용한 화산활동 감시의 선행 연구로서 2006년 분화한 이력이 있는 미국 알래스카의 어거스틴 화산을 연구지역으로 선정하고 GPS에 의한 지표변위의 정밀 분석을 통하여 분화 전·후 화산거동을 관측하였다. 어거스틴 화산에 설치되어 상시 운영 중인 12개 GPS 관측소의 2005년부터 2011년까지 관측 데이터를 수집하여 상대측위 방법에 의한 정밀 기선해석을 수행하고 다양한 분석을 시도하였다.

2. 연구지역

본 연구의 관심지역인 어거스틴 섬은 미국 알래스카의 앵커리지에서 남서쪽으로 약 290 km 가량 떨어진 고도 1,260 m, 면적 90 km²의 성층화산섬이다(Fig. 2)(Waythomas and Waite, 1988). 어거스틴 화산이 위치하는 알류산 열도는 태평양판과 북아메리카 판이 만나는 섭입대로 57개 가량의 화산이 활동하고 있으며(Michel *et al.*, 2009), 어거스틴 화산은 인근의 여러 화산들 중 가장 왕성한 활동을 보이는 화산 중 하나이다(Begét and Kowalik, 2006; Miller *et al.*, 1998). 1812년부터 2006년까지 총 7회(1812, 1883, 1935, 1964-65, 1976, 1986, 2006)의 폭발적인 분출 이력이 있으며(Power *et al.*, 2006), 주로 안산암질의 용암의 분출과 함께 산사면을 따라 화산쇄설류와 화산재 이류가 흐르는 분화 양상을 보인다(Waythomas and Waite, 1998). 이러한 왕성한 활동으로 인해 야기되는 피해를 최소화하기 위하여 지진계, 삼각측량, GPS 상시 관측, 인공위성 등의 기술을 이용한 지속적인 모니터링이 수행되고 있다.

가장 폭발적인 분화로 기록된 1883년 분화는 화산의 북쪽 사면에서 발생한 암석 애버린치(debris avalanche)가 갑자기 바다로 유입되면서 7.5 - 9.0 m 높이의 쓰나미를 유발하였으며, 이로 인한 영향이 어거스틴 섬에서 동쪽으로 80 km 가량 떨어진 키나이 반도(Kenai Peninsula)의 잉글리시 만(English Bay)에서까지 확인되었다(Miller *et al.*, 1998; Waythomas and Waite, 1998). 본 연구의 관심 분화인 2006년 분화와 가장 유사한 양상을 보이는 1976

Fig. 2. Location of Augustine volcano, surrounding volcanoes, and surrounding communities (<http://www.avo.alaska.edu/images/image.php?id=4830>).

년 분화는 본격적인 분화가 발생하기 약 9개월 전부터 지진 활동도가 증가하는 전조현상이 나타났으며, 1월 22일부터 3일간 14번의 분출이 있었다. 당시의 화산활동으로 인해 북쪽 방향으로의 암편질 화산쇄설류와 용암원정구(lava dome)가 생성되었으며, 화산재의 구름기둥이 북미 동부일대에까지 피해를 입혔다(Kienle and Shaw, 1979). 1976년의 분화와 더불어 2006년 분화와 유사한 활동을 보이는 1986년 분화는 분화 초기에 분출된 많은 양의 화산쇄설류가 북쪽 사면으로 흘러내려 북쪽 해안의 5 km 부근까지 도달하였다(Miller *et al.*, 1998).

본 연구의 관심 분화인 2006년 분화는 약간 대규모(severe) 수준의 화산폭발지수(Volcanic Explosivity Index: VEI) 3을 기록하였으며, 이로 인한 전조현상은 2005년 5월 화산 분화구를 중심으로 하는 미소지진의 꾸준한 증가로 시작되었다(Cervelli *et al.*, 2006). Fig. 3은 분화가 압박해 오면서 지진 발생횟수가 급격히 증가하고, 분출이 발생한 2006년 1월에 최고점에 도달하였음을 보여준다. 분화의 또 다른 전조현상으로 12월 2일 지진계에서 증기폭발(phreatic explosions)에 의한 신호를 감지하기 시작하였고, 12월 12일이 지나면서 화산의 남쪽과 동남쪽 부근에서 풍화된 유리질 입자(glassy particles)가 혼합된 화산재가 확인되었으며(Power *et al.*, 2006), 화산의 정상부의 증기와 가스 폭발이 활발해졌다(Mattia *et al.*, 2008). 2006년 1월 11일 본격적인 분화가 시작되면서 28일까지 17일간 총 14번의 폭발이 발생하였으며(Michelle

Fig. 3. Histogram of seismicity before 2006 eruption.

et al., 2010), 이전의 분화와 같이 분출된 대부분의 용암 류 및 화산쇄설류가 북쪽 사면을 타고 흘러내렸다(Wessels *et al.*, 2010).

3. 연구 방법

1) 자료수집

본 연구에서는 알래스카 어거스틴 화산의 2006년 분화 전·후의 지표변위 모니터링을 통해 화산 분화에 의한 지표변위 양상을 다각도로 분석하였다. 이를 위해서 어거스틴에 설치된 Plate Boundary Observatory(PBO)의 13개 GPS 상시관측소의 2005년부터 2011년 12월까지

수집된 데이터를 사용하였다. 수집된 모든 데이터는 RINEX 포맷으로 30초 간격의 24시간 관측 자료이며, UNAVCO의 FTP 서버로부터 제공받았다.

사용된 전체 관측소 중 AC59 관측소는 상대측위 기지점으로 사용하기 위하여 추가로 수집된 관측소로, 어거스틴 섬 외부에 위치하여 화산 활동에 의한 영향이 없을 것으로 예상되는 관측소이다. 기지점 선정 시에는 기선의 길이가 길어질수록 정확도가 떨어지는 상대측위의 특성을 고려하여 어거스틴 섬과 인접한 관측소 중 오랜 기간 안정적으로 운영되어온 관측소를 기준으로 선정하였다. 최종 선정된 AC59 관측소는 어거스틴 섬으로부터 약 24.5 km 가량 떨어진 북아메리카 판에 위치하고 있으며, 2004년 9월부터 안정적으로 운영되어온 관측소이다. 어거스틴 화산에 설치된 GPS 상시관측소들은 화산 분화 감시를 목적으로 PBO에서 설치, 운영하고 있는 관측소로, 2000년 9월 AUGL 관측소 설치를 시작으로 2006년 9월까지 총 12개의 관측소를 상시 운영하고 있다. 그러나 전체 관측소 중 7개(AV11, AV16, AV17, AV18, AV19, AV20) 관측소는 2006년 분화 이후 추가로 설치된 관측소이므로 본 연구의 관심 분화인 2006년 분화의 전조현상의 확인은 불가능하다. 또한 분화구와 근접한 AV03, AV04, AV05 관측소의 경우는 2006년 분화 당시 파손, 또는 소실되어 데이터 수집이 중단

Fig. 4. GPS permanent stations used in this research.

되었으며, 이후 AV04 관측소만이 수리되어 현재까지 운영되고 있다. Fig. 4는 본 연구에서 사용된 전체 GPS 상시관측소의 위치를 도시한 그림이다.

한편, GPS 관측데이터 내에 존재하는 다양한 오차를 최소화하기 위해서 International GNSS Service(IGS) 분석 센터 중 하나인 Center for Orbit Determination in Europe (CODE)와 데이터 센터인 Crustal Dynamics Data Information System(CDDIS)에서 GPS 위성의 정밀궤도력 및 위성의 시계정보, 지구 자전축의 움직임, 전 지구 전리층 모델 등의 파일을 제공받았으며, 해양조석모델의 경우는 Onsala 천문대의 FES2004 모델을 제공받아 사용하였다.

2) 자료처리 방법

기본적으로 GPS 관측데이터 처리는 상대측위와 절대측위 방법을 적용할 수 있다. 이 중 상대측위는 좌표가 정확히 알려진 관측점을 기준으로 다른 관측점의 좌표를 상대적으로 결정하는 방법으로 밀리미터 수준의 정확도 확보가 가능한 것으로 알려져 있다. 반면 절대측

위는 관측점의 수신기에서 수신한 GPS 위성들의 신호를 이용하여 독립적으로 관측점의 위치를 결정하는 방법으로 수 센티미터 정확도의 위치 결정이 가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 밀리미터 수준의 고정밀 지표변위 계산을 위해서 구속조정(constraints)에 의한 상대측위 방식을 사용하였다. 상대측위를 위해 앞서 언급된 AC59 관측소를 기지점으로 사용하였으며, 관측소의 좌표는 IGS08을 사용하였다.

상대측위 방식에 정밀 기선해석을 위해서 스위스 베른 대학교의 천문연구소에서 개발한 Bernese GPS Software V5.0(이하 Bernese로 칭함)을 사용하였다. Bernese는 GPS 망조정계산은 물론 전리층 및 대류권 모델링, 위성궤도 추정 등의 다양한 과학기술 연구를 목적으로 전 세계적으로 광범위하게 사용되고 있는 소프트웨어로, 2,000 km 내외의 초장기선장에 대해서도 정확한 미지정수 결정이 가능한 것으로 알려져 있다(Dach *et al.*, 2007). Bernese를 이용한 자료처리는 Fig. 5의 순서로 진행되며, 다음의 주요 과정을 포함한다.

Fig. 5. Diagram of data processing using Bernese.

Fig. 6. Example of heavy winter rime on P697 GPS station antenna and tower mount installed at mount St. Helens (Lisowski *et al.*, 2008).

- (1) 가능한 모든 조합으로부터 최대 공통 관측치를 포함하는 기선 집합을 선택하는 OBS-MAX 방법에 의한 최적의 기선 형성
- (2) 대류권 지연오차 추정 시, 10 km 내외의 비교적 짧은 기선거리에 의한 높은 상관관계로 인해 추정값의 안정성이 급격히 저하되는 것을 방지하기 위하여 관측소 중 한 점을 Niell 모델값에 고정하여 상대적인 대류권 지연오차 추정
- (3) L1, L2 반송파를 사용하는 Quasi Ionosphere-free (QIF) 방법에 의한 모호정수 결정

Fig. 6은 미국 세인트 헬렌 화산에 설치된 P697 GPS 관측소의 겨울철 사진이다. 해당 사진은 관측소의 안테나와 마운트가 눈과 얼음으로 뒤덮인 모습을 보여준다. 이러한 현상은 본 연구의 대상관측소에서 확인되는데, 특히 화산 정상부근의 높은 지역에 설치된 AV04(고도 915.95 m), AV05(고도 1036.61 m) 관측소에서 이러한 계절적 문제가 뚜렷하게 확인된다(Cervelli *et al.*, 2006). 겨울철 안테나를 뒤덮는 눈과 얼음은 위성으로부터 안테나까지의 GPS 신호의 지연을 야기하게 되며, 이로 인해 AV04 관측소에서는 수직방향으로 약 15 cm에 이르는 오차가 발생하기도 한다. 따라서 본 연구의 목적인 지표변화의 모니터링을 위해서는 겨울철에 확인되는 급격한 좌표의 변동을 제외할 필요가 있으며, 이

를 위해 과대오차 판별과정을 진행하였다. 이때, 화산 분화가 임박한 시점에서는 화산체의 온도가 상승하여 눈과 얼음으로 인한 문제가 발생하지 않을 것으로 예상되므로 분화 이후의 데이터에 대해서만 과대오차 판별과정을 진행하고, 과대오차로 확인된 값은 이후 분석과정에 모두 제외하였다.

4. 결과 및 분석

2005년 1월 1일부터 2011년 12월 31까지 총 2,556일의 일간해를 고정밀 기선해석을 통해 추정하였으며, 그 결과로 본 연구의 대상지역인 어거스틴 화산에 설치된 12개 상시관측소의 해당 관측일 정오(12:00) 시점의 3차원 좌표 시계열을 확보하였다. 기선해석의 결과로 얻어진 일별 3차원 직각좌표는 지역 평면직각좌표로 변환하여 수평성분(North, East)과 수직성분(Up)으로 나누어 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7의 AV01는 분화 전·후의 전체 연구기간 동안 데이터 확보가 가능했던 관측소들 중 분화구와 가장 근접한 곳에 설치된 관측소로, 화산활동에 의한 지표변위를 비교적 뚜렷하게 확인할 수 있다. 그림에서 확인되는 바와 같이 분화발생 이전부터 분화의 전조현상으로 생각되는 좌표의 변화가 뚜렷하게 확인된다. 특히, 분화발생 약 4개월 전부터는 남쪽 방향으로 약 3 cm 좌표이동과 함께 3 cm 가량의 지표상승이 뚜렷하게 나타난다. 2006년 1월 11일 어거스틴 화산의 분화가 시작되면서 AV01 관측소의 시계열에서 급격한 침하 현상이 확인되며, 2006년 하반기 부터는 수평방향의 뚜렷한 좌표변동 없이 -0.14 cm/yr 속도의 매우 느린 침하 현상만이 관측되므로 이때부터 화산활동이 안정기에 접어든 것으로 보인다. Fig. 8은 어거스틴 화산의 분화구와 가장 인접하게 위치한 두 개 관측소 AV04, AV05 관측소의 시계열을 보여준다. AV04, AV05 관측소는 2006년 분화 당시 각각 1월 17일과 13일에 파손되어 분화 이후의 지표변위 양상을 확인하는 것이 불가능하지만 분화구와 근접하게 위치하고 있으므로 다른 관측소와 비교하여 화산활동에 의한 전조현상이 보다 뚜렷하게 확인된다. 시계열 그래프에서 회색 선으로 도시된 2005년 11월 17일을 전후로 시계열의 양상이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 해당 관측일 전, 매우 느린 선형의

Fig. 7. Time series analysis of surface deformation at AV01 station. The pink bar means eruption period and light gray dots mean outlier of time series.

좌표 변화를 보이던 시계열은 이후 굉장히 다이내믹한 좌표의 변화를 보여준다. 특히 AV05 관측소의 시계열에서는 2005년 11월 17일 약간의 오프셋(offset)이 확인되

는데, 이러한 현상은 분화가 임박해 오면서 지진 등에 의해 관측소 인근 지각이 갈라져 발생된 물리적 현상으로 해석된다. 실제로 Fig. 3의 지진활동 히스토그램에서 11월 중순 지진발생횟수가 눈에 띄게 증가하였음을 확인할 수 있다. 이후 활발한 좌표의 변화를 보이는 구간에서 AV04 관측소는 최대 약 15 cm에 이르는 지표상승과 함께 남서쪽으로의 수평변위를 보이며, AV05 관측소의 경우는 10 cm 가량의 지표상승과 북동쪽으로의 수평변위를 갖는다.

Fig. 8. Time series analysis of surface deformation at AV04 and AV05 stations.

Fig. 9는 어거스틴 화산의 분화구를 남북으로 가로지르는 AV02, AV03 관측소의 기선길이 변화를 보여준다. 2005년 9월을 기준으로 기선길이의 변화가 뚜렷하게 확인되며, 이를 2005년부터 어거스틴 화산에서 발생한 지진의 누적그래프(Fig. 3)와 비교하였을 때 지진활동의 증가와 두 관측소의 기선길이 변화 시기가 상당히 일치함을 알 수 있다. 기선길이의 증가는 마그마가 지표면 가까이 상승하면서 야기하는 화산체의 팽창이 원인으로 해석된다. 따라서 분화구를 가로지르는 기선 길이의 변화는 지진활동의 증가와 더불어 화산활동 정도를 알리는 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 보다 정확한 분석을 위해 분화구를 가로지르는 4개의 기선(AV01-AV02, AV04-AV05, AV18-AV19, AV01-AV21) 길이의 변화를 분석하였다. 그 결과, 각 기선들이 유사한 양상으로 변화하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이에 따라 전체 연구기간을 동일한 양상을 갖는 5개의 구간으로 나누고 각 구간별 분석을 시도하였다. 그 결과는 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Fig. 9. Change of baseline length between AV02 and AV03.

Table 1. Step of surface deformation of the 2006 Augustine Volcano eruption

Step	Period		Deformation type	Velocity [Up]
	Start	End		
Step1	2005/01/01	2005/08/14	No deformation	-0.2 cm/yr
Step2	2005/08/15	2006/01/10	Inflation	+9.7 cm/yr
Step3	2006/01/11	2006/03/16	Rapid deflation	-9.2 cm/yr
Step4	2006/03/17	2006/10/15	Slightly inflation	+0.3 cm/yr
Step5	2006/10/16	2011/12/31	Very slow deflation	-0.2 cm/yr

stage 1은 화산활동에 의한 기선길이의 변화가 확인되지 않는 구간으로, 해당 시기의 시계열 분석 결과 역시 2006년 분화를 예견하는 화산활동의 뚜렷한 징후를 보이지 않는다.

약 5개월에 걸쳐 기선의 길이가 점차 증가하는 경향을 보이는 stage 2는 지표상승과 함께 수평요소에서 분화구를 중심으로 하는 방사형 지표변동이 공통적으로 나타난다. 평균 9.7 cm/yr의 속도로 상당히 빠른 지표 상승이 계산되며, 특히 분화구와 가까운 AV04, AV05 관측소에서는 각각 8 cm, 11 cm에 이르는 큰 지표의 상승이 확인된다. 분화구와 근접한 관측소에서 상대적으로 큰 변위를 보이는 것은 분화구에 근접한 두 관측소가 지표 변위를 야기하는 주요 원인인 마그마 소스의 영향을 상대적으로 많이 받기 때문에 발생한 것으로 해석된다.

stage 3은 약 2개월가량 되는 비교적 짧은 기간이지만 본격적인 분화가 발생한 구간으로, 앞선 stage 2와 비교하여 수평, 수직의 모든 요소에서 반대의 양상을 보이고 있다. 갑작스러운 기선길이의 감소와 더불어 수직방향으로 평균 -9.2 cm/yr의 빠른 침하현상과 분화구를 중심으로 모이는 형태의 수평변위가 확인된다(Table 1). 이

구간에서 확인되는 빠른 침하현상과 수평요소의 지표 변위는 분화이후 감소되는 화산체 내부 압력에 의한 화산체의 수축을 의미한다.

stage 4는 stage 3 이후 약간의 기선길이 증가가 확인되는 구간으로 stage 2와 유사한 분화구 중심의 방사형 변위와 약간의 지표상승이 확인된다. 그러나 이전의 stage 2와 stage 3과 비교하였을 때, 지표변위의 양상이 매우 느린 속도로 나타난다.

마지막으로 2006년 10월 16일부터 2011년 말까지의 지표변위 구간인 stage 5에서는 전체적으로 매우 느린 지표의 침하현상이 확인되며, 일부 관측소에서 상대적으로 큰 지반침하가 확인되고 있다. 특히 분화구와 근접한 AV04 관측소와 AV18, AV19 관측소에서 해당기간 동안 각각 2.1 cm, 4.0 cm, 3.3 cm의 비교적 많은 침하가 관측되었다. Wessels *et al.*(2010)이 열적외선 항공영상과 ASTER 위성의 열밴드 영상을 이용하여 2006년 분화 분출물의 양상을 분석한 연구에 따르면 AV18 관측소가 위치하는 북쪽 사면은 2006년 분화에 의한 대부분의 분출물이 분포하는 지역이며, 또한 1986년 분화에서도 대부분의 화산쇄설물이 흘러내린 지역이다 (Miller *et al.*,

1998). 또한 Coombs and Michelle(2006)이 제작한 “Deposits from the 2006 eruption of Augustine Volcano”에 따르면 AV19관측소 역시 화성쇄설류가 퇴적된 지역에 위치하는 것으로 보인다. 이러한 결과를 미루어 볼 때 해당 지역의 침하는 마그마의 상승 또는 이동과 같은 화산 활동에 의해 발생하는 현상이라기보다는 이전의 분화과정에서 퇴적된 화산쇄설물의 다짐작용이 원인인 것으로 생각된다. 따라서 stage 5에서 관측된 지표변위 양상은 2006년 분화 이후 추가적인 분화를 암시하는 화산활동 징후를 보이지 않는다고 할 수 있다.

5. 결론

화산 분화의 전조현상 및 분화 이후 지각변동의 양상을 파악하고, 분화를 예측하기 위하여 미국 알래스카 어거스틴 화산에 있었던 2006년 분화 전 · 후의 지표변위를 분석하였다. 지표변위 모니터링을 위해 어거스틴 및 인근에 설치된 GPS 상시관측소의 2005년부터 2011년까지의 관측 자료를 수집하였으며, Bernese GPS Software V5.0에 의한 정밀 기선해석을 진행하였다. 자료처리의 결과는 다음과 같다.

- (1) 2006년 분화의 전조현상으로서 분화 4개월 전부터 평균적으로 9.7 cm/yr에 달하는 지표의 상승이 분명히 확인되었으며, 특히 분화구 부근에 설치된 AV04, AV05 관측소에서 최대 10-15 cm의 큰 지표상승이 관측되었다.
- (2) 분화구를 가로지르는 AV02-AV03 관측소 사이의 기선길이 분석 결과는 2005년 9월부터 기선길이의 갑작스러운 증가를 보여준다. 추가로 분석된 3개 기선에서도 분화 전 기선의 길이가 증가하고, 분화이후 기선의 길이가 감소하는 양상이 뚜렷하게 확인되었다. 이러한 현상은 지하 마그마의 거동을 반영하는 화산체의 팽창과 수축으로 야기되는 지표변위라고 해석된다.
- (3) 2006년 분화 이후 관측된 지표변위 양상은 대체적으로 화산활동이 안정화되었음을 보여주고 있으나, 일부 지역에서 지속적인 침하가 확인된다. 침하가 확인되는 지역은 주로 분화 당시 분출된 화산쇄설물이 퇴적된 지역이므로 해당 침하현상은 화산활동에 의한 현상이라기보다는 퇴적된 화산쇄설물의 다짐작용에 의한 것으로 해석된다. 또한 아직까지는 2006년 이후 추가 분화를 암시하는 징후가 확인되지 않는다.

이러한 결과를 미루어 볼 때 GPS 관측 기술이 화산 분화의 전조현상 관측 및 지표변위의 상시 모니터링을 위해 사용하기에 충분하며, 비용과 시간적인 측면에서 매우 유용한 기술임을 확인하였다. 또한 향후 화산 분화의 전조현상을 보다 빠르고 효과적으로 감지할 수 있도록 GPS를 이용한 실시간 지표변위 감시 연구와 함께 공간적 지표변위 양상을 관측하는 위성 영상 등의 기술과의 융합을 통한 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 기상청 국립기상연구소의 주요사업인 “관측 · 지진기술 지원 및 활용연구(NIMR-2013-B-3)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

Reference

- Beget, J.E., and Z. Kowalik, 2006. Confirmation and Calibration of Computer Modeling of Tsunamis Produced by Augustine Volcano, Alaska, *Science of Tsunami Hazards*, 24(4): 257-266.
- Cervelli, P.F., T. Fournier, J. Freymueller, and J.A. Power, 2006. Ground deformation associated with the precursory unrest and early phases of the January 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska, *Geophysical Research Letters*, 33(18): 304-308.
- Cho, M., L. Zhang, and C.W. Lee, 2013. Monitoring of Volcanic Activity of Augustine Volcano, Alaska Using TCPInSAR and SBAS Time-series Techniques for Measuring Surface Deformation, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(1): 21-34 (in Korean with English abstract).
- Coombs, M.L. and L.C. Michelle, 2006. *Deposits from the 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska Volcano Observatory*, U.S. Geological Survey.
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, and M. Meindl, 2007. Bernese GPS software version 5.0,

- Astronomical institute, University of Bern, Switzerland .
- Korea Research Institute of Standard and Science (KRISS), 2012. Preliminary investigation on use of GNSS to monitor volcanoes and earthquakes.
- Kienle, J., and G.E. Shaw, 1979. Plume dynamics, thermal energy and long-distance transport of vulcanian eruption clouds from Augustine volcano, Alaska, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 6(1-2): 139-164.
- Lee, D.S., S.C. Choi, C.W. Oh, M.H. Seo, and I.C. Ryu, 2013. The Study on the Possibility of Using Satellite in Monitoring Precursor of Magma Activity in the Baegdusan Volcano, *Journal of Petrological Society of Korea*, 22(1): 35-47.
- Lisowski, M., D. Dzurisin, R.P. Denlinger, and E. Y.lwatsubo, 2008. Analysis of GPS-Measured Deformation Associated with the 2004-2006 Dome-Building Eruption of Mount St. Helens, Washington, *USGS Professional Paper*, 1750: 301-333.
- Lu, Z., 2005. Comparison of GPS and InSAR deformation measurements at Okmok volcano, Alaska, *Alaska Satellite Facility News and Notes*, 2(3): 1-4.
- Mattia, M., M. Palano, M. Aloisi, V. Bruno, and Y. Bock, 2008. High rate GPS data on active volcanoes: an application to the 2005-2006 Mt. Augustine (Alaska, USA) eruption, *Terra Nova*, 20(2): 134-140.
- Michel, R.K., D.C. Bley, T.M. Leschine, H.S. Marcus, A. Mosleh, R.C. North, and M. Williams, 2009. Risk of Vessel Accidents and Spills in the Aleutian Islands: Designing a Comprehensive Risk Assessment, *Transportation Research Board (TRB) of the National academies*, 293: 59-62.
- Michelle, L.C., F.B. Katharine, W.V. James, J.S. David, E.T. Evan, L.W. Rick, and G.M. Robert, 2010. Timing, Distribution, and Volume of Proximal Products of the 2006 Eruption of Augustine Volcano, *USGS Professional Paper*, 1769: 145-185.
- Miller, T.M., R.G. McGimsey, D.h. Richter, J.R. Riehle, C.J. Nye, M. E. Yount, and J.A. Dumoulin, 1998. Catalog of the historically active volcanoes of Alaska, *U.S. Geological Survey Open-File Report 98-582*, pp. 104.
- Pieri, D., and M. Abrams, 2005. ASTER observations of thermal anomalies preceding the April 2003 eruption of Chikurachki volcano, Kurile Islands, Russia, *Remote Sensing of Environment*, 99: 84-94.
- Power, J.A., C.J. Nye, M.L. Coombs, R.L. Wessels, P.F. Cervelli, J. Dehn, K.L. Wallace, J.T. Freymueller, and M.P. Doukas, 2006. The reawakening of Alaska's Augustine Volcano, *American Geophysical Union Transactions*, 87(37): 373-377.
- Waythomas, C.F., and R.B. Waitt, 1998. Preliminary volcano-hazard assessment for Augustine volcano, Alaska, *U.S. Geological Survey Open-File Report 98-106*, pp. 39.
- Wessels, R.L., M.L. Coombs, D.J. Schneider, J. Dehn, and M.S. Ramsey, 2010. High-Resolution Satellite and Airborne Thermal Infrared Imaging of the 2006 Eruption of Augustine volcano, *USGS Professional Paper*, 1769: 527-552.
- Yazdanparast, M., and B. Vosooghi, 2013. A research on Damavand magma source using GPS data, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, pp. 1-15.
- Yun, S.H., and J.H. Lee, 2012. Analysis of Unrest Signs of Activity at the Baegdusan Volcano, *Journal of Petrological Society of Korea*, 21(1): 1-12.