인공위성을 이용한 백두산 화산 마그마 활동의 전조현상 인지 가능성 연구

이덕수¹ · 최승찬^{2*} · 오창환³ · 서민호¹ · 유인창⁴

¹주식회사지엔 기업부설 연구소, ²Kiel 대학교, ³전북대학교 지구환경과학과, ⁴경북대학교 지질학과

The Study on the Possibility of Using Satellite in Monitoring Precursor of Magma Activity in the Baegdusan Volcano

Deok-Su Lee¹, Sung-Chan Choi^{2*}, Chang-Whan Oh³, Min-Ho Seo¹, and In-Chang Ryu⁴

¹Research Institute of GN Corp, Seoul 153-714, Korea

²Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 24118, Germany

³Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

⁴Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

요 약: 1000 AD 경에 매우 강력한 화산 폭발을 하였던 백두산은 아직도 폭발 가능성을 가지고 있다. 따라서 백두산의 폭발 가능성을 사전에 확인할 수 있는 정기적인 감시가 필요하다. 하지만 지정학적인 이유로 백두산 지역에 정기적인 감시 시설을 설치하거나, 정기적인 관측 자료를 얻는 것이 매우 힘든 상황이다. 따라서 인공위성을 이용한 백두산 화산 폭발 가능성에 대한 정기적인 감시 기술 개발이 필요한 실정이다. GRACE 인공위성에서 획득한 백두산 지역의 중력 자료로부터 계산된 지오이드 자료의 지난 10년간의 변화를 보면, 백두산 지역에서 지진 발생을 포함한 마그마 활동 가능성이 인지된 2002년부터 2005년 사이에 매우 뚜렷한 지오이드 감소가 확인되었다. 그리고 동일한 시기에 백두산 지역의 강수량이 줄어들지 않음을 고려할 때 이러한 변화는 백두산 하부의 마그마 활동에 연관되어있을 가능성을 지시한다. 백두산 지역에서 CHAMP 인공위성을 이용하여 측정된 지난 2000년도부터 2010년까지의 자력 변화를 살펴보면, 마그마 활동이 활발했던 2000년에서 2005년도 사이에 자력이 감소하고 그 이후 다시 증가하는 현상을 보여준다. 이러한 자력의 감소는 백두산 하부 마그마 온도의 증가에 따른 주변 암석의 비자성화(demagnetization)에 의한 것일 가능성이 있다. 이러한 자료는 인공위성을 이용하여 관측한 지오이드와 자력의 변화가 백두산 하부 마그마 활동을 감시하는데 사용될 수 있는 가능성이 있음을 지시한다.

핵심어: 백두산, GRACE, CHAMP, 인공위성, 마그마 활동, 관측

Abstract: The Baegdusan Volcano which erupted violently at 1000 AD is still have possibility of eruption. Therefore, it is necessary to monitor regularly the possibility of eruption. However, it is very difficult to install regular monitoring system or to get regularly monitored data due to geopolitic problems. This is why we have to develop regular monitoring technique using satellite. The geoid in the Baegdusan Volcanic area calculated from gravity data obtained from GRACE satellite, decreased from 2002 to 2005. The period of decreasing is well matched with time when magma activities were recognized in the Baegdusan Volcanic area. The decrease in geoid is interpreted to be caused by the decrease of water storage. Considering that the amount of rainfall from 2002 and 2005 is almost constant, the decrease in geoid may be related to the magma activity under the Baegdusan Volcano. The geomagnetic total force in the Baegdusan Volcanic area measured by CHAMP satellite, decreased from 2000 to 2005 and increased after 2005. The period of decrease is well matched with the time with increased activity of magma chamber under the Baegdusan Volcano indicating that the decrease of geomagnetic total force is caused by demagnetization of surrounding rocks due to the increase of temperature of magma chamber. These data

*Corresponding author

Tel: +49-431-880-1518

E-mail: choi@geophysik.uni-kiel.de

indicate the possibility of using change of geoid and geomagnetic total force observed by GRACE and CHAMP satellites for the monitoring of magma activity under the Baegdusan Volcano.

Key words: Baegdusan Volcano, GRACE, CHAMP, Satellite, Magma activity, Monitoring

서 언

백두산은 가까운 장래에 재 폭발할 가능성이 있는 활화산 중 하나로 중국에서는 Changbaishan이나 Baitoushan으로 알려져 있으며 Paektusan으로 표기되기도 한다(Jwa *et al.*, 2003; Liu and Chu, 1996). 백두산에 대한 지구물리학적, 지화학적, 연대학적 연구는 대부분 비교적 백두산 접근이 용이한 중국이나 일본의 학자들을 중심으로 하는 국외학자들에 의해 수행되었다(Machida *et al.*, 1983, 1990; Horn and Schmincke, 2000; Zhang *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003; Hetland *et al.*, 2004; Lei *et al.*, 2005; Wei *et al.*, 2007; Song *et al.*, 2007; Kuritani *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2009; Zou *et al.*, 2010; Peter *et al.*, 2010; Zhao and Liu, 2010). 지정학적 이유로 국내 학자들이 백두산을 직접 연구하기 힘든 상황이며 현재 백두산에 대한 국내 연구는 일부를 제외하고는 대부분이 외국 학자들의 연구결과를 인용 정리하는 수준이다. 국내외적으로 백두산의 분화 가능성에 대한 연구는 2002년 백두산의 이상 징후가 관찰되면서 활발하게 연구되다가 그 이상 징후가 소멸되면서 그에 대한 연구 또한 줄어들어 현재 백두산의 실태를 정확히 알 수 없는 실정이다.

2002년~2005년까지 백두산 천지 일원에서 화산성 지진의 급증 및 비정상적인 지표 변형이 발생하였다(Liu *et al.*, 2011; Yun and Lee, 2012). 2002년 7월부터 지진발생 빈도가 한 달에 수십 회에서 수백회로 증가 하였으며, 2002~2003년도에는 하루에 백여회의 군발지진이 발생하는 등 이상 징후를 보이다가 2006년도부터는 감소하는 추세를 보여 현재에는 1999~2001년의 수준을 유지하고 있다고 보고되었다. 이들 지진은 모두가 지하 2~3 km에 위치한 마그마 챔버 상부의 균열과 마그마의 관입에 기인하는 것으로 해석하였다(Ozawa and Taniguchi, 2007). 또한 2002년 이후 천지 칼데라 정상부를 중심으로 백두산 화산체가 팽창 상승하였다(Yun and Lee, 2012). 2002년도와 2003년도 사이에 약 4 cm 이상 상승한 후 상승률이 감소하였고 2007년까지 총 10 cm 정도

상승하였다. 그리고 2009년도에는 약간 하강하는 현상을 보였다. 또한 2004년도 천지 주변 온천지하수의 온도가 69°C에서 83°C로 증가하였다(Gao, 2004; Yun and Lee, 2012). 이는 백두산이 분화가능성이 있음을 지시하며 그 가능성을 확인하기 위한 모니터링이 필요함을 지시한다. 하지만 백두산 분화 가능성 확인을 위한 모니터링은 지정학적 문제로 매우 힘든 상황이며 중국측의 도움을 받는 것도 어려운 상황이다. 따라서 인공위성을 이용한 백두산 분화 모니터링을 개발하여 이러한 정치적인 문제를 극복하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 백두산 하부 마그마 활동이 있었던 2002년부터 2005년 사이에 그레이스(GRACE) 인공위성을 통하여 인지된 백두산 주변의 지오이드 변화, 챔프(CHAMP) 인공위성을 통해 얻어진 자기장 변화, 그리고 지하수위의 변화를 제시하고 이를 바탕으로 그레이스와 챔프 인공위성 자료의 백두산 하부 마그마 활동 모니터링에 사용 가능성을 평가한다.

백두산 지역의 일반 지질 및 지체구조

백두산은 북한과 중국 국경에 위치하고 있으며 정상부에 천지(Tianchi라고 표기됨) 칼데라가 발달한 2,750 m 높이의 복합화산으로 현무암질 순상화산체와 용암 대지위에 형성되어 있다. 그리고 현무암질 순상화산체와 용암대지의 기저암은 시생대에서 원생대에 이르는 변성암과 고생대에서 중생대에 이르는 퇴적암과 화성암으로 구성되어 있다(Fig. 1; Yun *et al.*, 1993; Wang *et al.*, 2003). 백두산은 남포태산(Mt. Nampotae)과 망천아산(Mt. Wangtian)과 함께 화산지대를 형성하고 있다. 백두산은 올리고세부터 분화를 시작하였고, 2000년 이내에 일어난 화산 폭발 중 2번째로 큰 폭발을 일으켰으며 아직도 활동 중에 있다(Liu and Wei, 1996; Liu *et al.*, 1998; Yun *et al.*, 1993; Horn and Schmincke, 2000; Wu *et al.*, 2005; Stone, 2010; Xu *et al.*, 2012).

백두산 지역에는 북서 태평양 섭입대에 평행하게

Fig. 1. Geologic map of the the Baegdusan Volcanic area. Illustrated Faults are Mishan-Dunhua (MS-DH F), Tianchi-Guanping (TC-GP F), Baishan-Tianchi (BS-TC F), Yalujiang(Y.L.J F) and Fuerhe-Hongqihe (FH-HQ F) Fault [Modified after Kim *et al.* (1998), Yun *et al.* (1993), Wang *et al.* (2003), Geological Atlas of China(Ma *et al.*, 2002) and Tectonic map of Korea(KIGAM, 2001)].

발달된 북동 방향의 단층들과 [예 Fig. 1에 보여지는 Mishan-Dunhua(MS-DH)단층, Tianchi-Guanping(TC-GP) 단층] 북서 방향의 단층들이 [예 Fig. 1에 보여지는 Baishan-Tianchi(BS-TC) 단층, Fuerhe-Hongqihe (FH-HQ) 단층] 발달되어 있다. 그리고 이 단층이 만나는 지역에 백두산 화산을 형성한 마그마의 주 통로가 형성되어 있다(Wei *et al.*, 2007).

백두산의 화산 분출 역사는 분출 연령, 분출 형태 그리고 마그마 성분의 변화를 바탕으로 4개의 시기로 구분된다. 첫 번째 시기는 현무암 용암대지를 형성한 시기이며, 이는 현무암 순상암체를 형성한 두 번째 시기로 이어지며, 세 번째 시기에는 조면암질 복합 화산이 형성되고, 최종적으로 화산쇄설암을 형성한 격렬한 분출이 있었다(Wei *et al.*, 2007). 첫 번째 시기의 현무암 용암 대지를 형성시킨 화산 활동은 28-13 Ma 사이에 일어났으며, 이때에 중봉산기 현무암, 내두산기 현무암, 장백기 현무암 그리고 마안산 현무암을 형성시킨 열극 분출이 있었다(Liu, 1983, 1988; Yun *et al.*, 1993). 이 시기에 형성된 현무암은 북동 방향을 따라 분포하고 있으며, 이는 북동 방향으로

형성된 열극대가 존재하였을 가능성을 지시한다. 이 시기에 만들어진 현무암은 상부 맨틀암을 포획하고 있으며, 알카리 화산암 특징을 보여주며 이는 현무암들이 판내부 환경에서 일어난 화성작용에 의해 만들어진 것임을 지시한다(Chen *et al.*, 2003). 시간이 지나면서 용암 대지가 깊게 침식되어 계곡이 생기고 이들 계곡이 2번째 시기(4.21-1.70 Ma)에 분출된 순상암체를 형성한 현무암들에 의해 채워졌다(Liu, 1983; Wei *et al.*, 2007). 두 번째 시기에는 열극 분출과 중심 분출이 함께 일어났다. 평정촌기 현무암이 4.21-3.56 Ma 경 열극 분출 되었으며, 망천아 현무암과 조면안산암류가 열극과 중심 분출에 의해 4.43 Ma에 형성되었다. 그 후 3.11 Ma 경에 망천아산 주변 홍두산에서 알카리 유문암이 분출하였다. 2.90-1.70 Ma에는 군함산 현무암과 보천 현무암이 분출하여 백두산의 북쪽과 동쪽 지역에 그리고 백두산 남쪽에 위치한 보천 주변지역에 현무암 순상암체를 형성시켰다(Liu, 1983; Yun *et al.*, 1993; Wei *et al.*, 2007). 세 번째 시기의 화산 분출은 플라이스토세인 0.61-0.09 Ma에 일어났으며, 650 m의 높이와 20-30 km 반경을 갖

는 조면암질 성층화산체를 구성하였다(Liu, 1983; Liu *et al.*, 1989; Yun *et al.*, 1993). 이 시기에는 0.61-0.09 Ma, 0.442 Ma, 0.329 Ma, 0.281-0.219 Ma, 0.101 Ma 그리고 0.0978-0.0876 Ma의 여섯 차례에 걸친 분출이 있었으며, 마그마의 성격이 산성으로 바뀌면서 이로부터 알카리 조면암, 알카리 응회암, 각력 응회암, 알카리 유문암, 흑요석이 형성되었다. 최종 단계인 폭발성 분출이 홀로세(1690 BP - 1702 AD)에 일어났으며, 이때에 조면암질 부석, 화산재 응회암, 용결 응회암, 각력 응회암이 형성되었다(Yun *et al.*, 1993). 1000 AD 경에 화산 분화체가 35 km 상공까지 상승한 가장 강력한 화산 폭발이 있었으며, 이 시기에 형성된 화산재가 멀리 동해와 일본에까지 날아가 퇴적되었으며 천지 칼데라가 형성되었다(Yun *et al.*, 1993; Soh and Yun, 1999; Horn and Schmincke, 2000; Wu *et al.*, 2005; Stone, 2010; Xu *et al.*, 2012).

백두산 지역에서 북동 방향의 열극을 따라 일어난 첫 번째 화산 활동시기(28-13 Ma)는 동해 형성 시기와 매우 유사하다. 동해의 형성을 설명하는 이론에는 여러 가지가 있다. 그 중 대표적인 2개의 이론은 다음과 같다. 첫 번째 이론은 50-30 Ma경에 일어난 인도와 아시아 대륙간의 충돌이 30 Ma 이후에 서태평양 지역과 동아시아에 동-서 방향의 인장력과 시계 방향의 회전력을 야기시켰고, 이로 인해 백두산을 포함한 동북아시아 지역의 북동 방향의 단층들이 재활성 되었으며, 동해가 벌어지기 시작하였다고 설명하고 있다(Jolivet and Fournier, 1994). 이에 반해 일본 섭입대의 후퇴(rollback)에 의하여 동해가 형성되었을 가능성 역시 제기되고 있다(Martin, 2011; Yamamoto and Hoang, 2009). 따라서 백두산 지역에서 첫 번째 화산 활동시기(28-13 Ma)에 일어난 북동 방향의 열극 분출은 동해와 마찬가지로 인도와 아시아 충돌 혹은 일본 섭입대의 후퇴에 의한 인장력에 의해 형성되었을 가능성이 높다. 동해의 확장은 15 Ma 경에 완료되고 이 시기 이후 서태평양 지역과 동아시아 지역에 광범위한 동-서 압축력이 작용하기 시작하였으며, 이는 서태평양 지역에서는 후방 배호 분지(Back-arc basin)의 붕괴와 아시아 대륙 동부 지역에 나타나는 습곡-충상단층대(fold and thrust belt)에 의해 확인 된다(Yin, 2010). 그 결과 플라이오세부터는 백두산 지역은 압축력에 의해 상승하였다(Wang *et al.*, 2003). 플라이오세의 현무암질 순산화

산체와 홀로세의 폭발성 화산은 대체적으로 북서 방향을 따라 분포한다(Wang *et al.*, 2003). Yun *et al.* (1993)은 플라이오세 이후 현재까지 화산 작용이 북서쪽으로 이동하고 있음을 언급하였다. 이는 신생대 후기부터 발생된 서태평양 지역과 동아시아 지역의 압축력에 의해 북서 방향의 단층이 활성화되고 이를 따라 화산 작용이 일어났을 가능성을 지시한다. 앞으로 이 가능성을 확인하기 위한 연구가 필요하다.

그레이스와 챔프 인공위성에서 관찰된 백두산 화산의 전조현상

지난 2002년부터 백두산 화산체 주변에서는 갑작스러운 화산성 지진 활동의 증가, 지진 규모의 증가, 이에 따른 산사태 및 붕괴 현상 등 여러 이상 징후가 관측되어 학자들 간에 관심이 집중되었고, 이에 따른 여러 연구가 수행되었다. 하지만 2005년 이후 화산 분화 징후가 약화되면서 백두산 화산체에 대한 꾸준한 연구가 미비하여 현재 그 상황을 정확히 알 수 없는 상태다. 백두산 화산체 주변에서 이상 징후가 관찰된 시기에 백두산 지역에 대한 그레이스, 챔프 인공위성 자료로부터 지오이드 이상, 저수량(Water Storage), 자기장의 변화가 인지되었고, 인공위성 사진으로부터 백두산 천지 주변 지역의 적설량의 감소가 인지되었으며, 지하수위의 급격한 하강 등의 이상 징후도 감지되었다. 이러한 이상 징후들은 백두산하부의 상태를 간접적으로 나타내 주며, 백두산 하부 마그마 챔버에서 어떤 일들이 일어나고 있음을 반증할 가능성이 높다. 각 이상 징후에 대한 연구 내용은 다음과 같다.

그레이스, 챔프 인공위성 개요

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 인공위성

그레이스 인공위성 프로젝트는 1997년 5월 NASA ESSP(Earth System Science Pathfinder)프로젝트의 하나로 시작되었고, 그레이스 인공위성은 Tom과 Jerry 두 개의 쌍둥이 위성으로 구성되며, 두 위성간의 속도변화를 측정하여 중력장변화를 결정하게 된다. 그레이스 위성의 주된 임무는 지구의 중력장 모델을 결정하고, 지구 중력장의 시·공간적 변화를 탐지하는 것이다. 그레이스 인공위성은 과거 수십 년간 관

측한 중력 데이터 보다 더 많은 양의 중력데이터를 월별로 약 400 km의 공간 해상도에서 2-3 mm에 달하는 고정밀도의 중력장 시계열변화 분석이 가능하다(Tapley *et al.*, 2004; Huang, 2010). 약 30일 마다 제공되는 월별 중력장 모델은 지진 후 중력변화나 토양 수분함량, 산악빙하, 대륙빙하 변화와 같은 지구 시스템의 질량 재분배 과정에서 발생하는 미소한 중력 변화를 검출할 수 있어 다양한 지구 물리학적 현상에 대한 연구와 전 지구적 물순환, 해수면변화, 빙하 지각균형 조정과 같은 지구 모니터링에도 활용되고 있다(Huang, 2010). 대표적인 예로 그레이스 위성 중력 자료는 남극과 그린란드섬의 총 얼음 용해율 연구, 빙하 후 지각용기연구, GPS 기술을 이용한 지각 변동 연구, 육지 저수량 변화, 계절적 해수면 변화 추정 등의 연구에 활발히 사용되고 있다(Chen *et al.*, 2006; Swenson and Wahr, 2006; Tapley *et al.*, 2004; Frappart *et al.*, 2006; Yeh *et al.*, 2006; Garcia *et al.*, 2006). 본 연구에서는 그레이스 위성에서 얻은 중력자료를 이용하여 백두산지역의 저수량 변화와 이에 따른 지오이드 변화를 관측하였다.

CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) 인공위성

독일의 GFZ(GeoForschungsZentrum Potsdam) 연구소가 관리했던 챔프 위성은 2000년 7월 15일 러시아 COSMOS 로켓에 의해 발사되어 근원·근극(경사각 87.3°)의 궤도를 운행하며, 궤도의 초기 운행 고도는 454 km이다. 챔프 위성은 전 지구 중력장모델과 지구 자기장을 동시에 결정할 수 있는 위성으로 탑재된 GPS 수신기에 의해 정밀궤도를 결정하며, 탑재체로서 중력측정 장치 및 자기장 측정 장치가 star camera와 더불어 실려 있다. 챔프는 고궤도의 GPS 위성(약 22,000 km)을 이용하여 수백 km 고도의 저궤도 위성(Leo: Low Earth Orbiter)을 추적하는 방식으로 H-L SST 방식에 속한다. H-L SST 방식에서 GPS는 기존의 지상 위성추적국의 역할을 수행하는 것과 마찬가지로, 챔프 위성에 탑재된 GPS 수신기를 이용하여 중력 위성과 GPS 위성간의 거리를 측정함으로써 정밀궤도를 결정하게 된다. 위성이 이론상의 궤도를 돌 때에 지구 내부의 물질의 차이에 따라서 이론적인 궤도를 이탈하여 지구 내부의 물질이 평균 밀도보다 높은 곳에서는 지구 쪽으로 끌리고 물질이 낮은 곳에서는 그 반대쪽으로 끌리는 현상이 일어

나게 될 때에, 그 힘을 측정하고 이를 역산하여서 지구 중력장을 계산해 내는 자료를 지상으로 송신하게 된다. 즉 H-L SST 방식은 위성을 자유낙하체로 간주하고, 위성의 위치를 GPS로 정확하게 결정함으로써 절대 중력 측정을 실시하는 방식이다. 이런 원리는 그레이스 내부에 탑재된 Accelerometer도 같은 원리로 되어있다.

차세대 위성인 GOCE(2009년 발사 됨)는 이런 Accelerometer와 더불어서 vector 중력장을 측정할 수 있는 Gradiometry라는 더 정밀한 중력측정 장치가 탑재되어 있고, 이로 인해서 GOCE 데이터는 그레이스 보다 더 정밀한 데이터를 송신 할 수가 있다. 챔프 위성은 2010년에 사용 종료되었으며, 2010년 이후 지구 자기장 관측 위성은 존재하지 않으나, 챔프의 차세대 위성인 SWARM 위성이 궤도에 진입하는 2014년 이후에는 더 정밀한 지구자기장 측정이 가능하다.

그레이스에 의해 관측된 2011년까지 지오이드 변화와 그 의의

지구시스템에서 발생하는 복잡한 질량 재분배와 질량 이동과정은 지구 중력장의 시공간적 분포의 변화로 표현되며, 지구 중력장의 변화로 부터 지구 시스템 내부의 질량 전송과 변화 양상을 탐지 할 수 있다. 지오이드(geoid)란 지구중력장의 등 포텐셜 면 중 그 고도가 평균 해수면과 일치하는 가상 면으로써 바다에서는 평균 해수면으로, 육지에서는 가상적인 수로를 만들었을 때의 해수면으로 정의한다. 지오이드의 형태(즉, 위치에 따른 중력의 작용선)의 변화를 측정하면, 지표 아래에 주변과 다른 밀도를 갖는 물질의 존재를 파악할 수 있다. 본 연구에서의 지오이드는 그레이스 인공위성에서 측정된 중력 자료를 역산하고 WGS84 지구타원체 모델을 이용하여 그레이스 인공위성의 지오이드 값을 계산하게 된다. 독일 포츠담 지구과학 연구소(GfZ Potsdam)는 주기별(약 30일에 한번 정도) 그레이스 위성으로부터 얻어진 지오이드 데이터를 사용자에게 제공하는데 동일한 지역에서도 그 값이 계속적으로 변화하는 경우가 많다. 동일한 지역에서 시간에 따른 지오이드의 변화는 그 지역을 구성하는 물질 양 혹은 밀도의 변화에 의해 생성될 수 있다. 이러한 구성 물질 밀도의 변화 중 대표적인 것이 지표면이 함유하고 있는 저수량의 변화이며

Fig. 2. Geoid variation and water storage fluctuation in the Baegdusan volcanic area(2002-2011).

Fig. 3. Seasonal water storage and rainfall fluctuation in the Baegdusan volcanic area.

그 이유는 지표면에 존재하는 물의 양이 다른 구성 물질에 의해 시간에 따라 쉽게 변화하기 때문이다. 지오이드의 변화는 역시 화산 하부의 마그마 챔버의

변화에 의해서도 발생될 수 있다.

육지에서 발생하는 중력의 변화는 전반적으로 해양에 비해 크게 나타난다. 이는 주로 육지 저수량의 변

화에 기인한다. 육지 저수량에는 육지상의 모든 수분 형태인 지표수, 눈, 토양속의 수분, 지하수 등이 포함되며 이를 TWS(Terrestrial Water Storage)라고 한다. 육지 저수량에 대한 연구는 토양수분·지하수·적설량 등 지상관측 데이터를 이용하거나, 지오이드 관측 결과와 수문학적 모델을 비교하여 수행되고 있다(Swenson and Wahr, 2006; Frappart *et al.*, 2006; Yeh *et al.*, 2006). 전 지구적으로 보았을 때, 남극과 아마존 그리고 적도에 가까운 아시아 지역은 계절에 따라서 지표면이 함유하는 수분 혹은 얼음의 양이 뚜렷하게 변화하는 곳이기 때문에 지오이드변화가 계절에 따라 매우 뚜렷함을 알 수가 있다.

연구 대상 지역인 백두산 지역에서 화산 활동이 인지되었던 2002년도 이후 2011년까지 Fig. 2에서와 같은 지오이드의 변화가 인지된다. 백두산 지역은 삼림이나 눈이 많아서 지표면 수분의 함유량이 많기 때문에 이러한 지오이드의 변화가 백두산 지역의 수분 함유량의 변화일 수 있다. 그리고 지오이드의 전체 변화량에 비해 2002년에서 2007년까지 백두산 고도의 변화에 따른 지오이드의 변화는 무시할 수 있을 정도로 작았다. 따라서 백두산 정상을 중심으로 반경 100 km 이내의 지오이드 변화를 근거로 하여, 백두산 인근 지역의 저수량의 변화를 계산하였다. 그 결과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 이 지역의 연평균 수분 함유량은 2002년부터 2005년까지 매우 뚜렷하게 그 양이 급격히 감소하였으며, 그 이후에는 수분량 변화가 천천히 진행되었다.

지오이드와 저수량의 감소 원인을 해석하기 위하여 백두산 지역의 강수량과 비교하였다. 백두산 지역의 2002년부터 2011년까지의 강수량의 변화는 Fig. 3에서와 같이 뚜렷한 경향을 보여주지 않으며 특히, 겨울 기간 동안에는 큰 변화를 보여주지 않는다. 연 평균 강수량도 큰 변화를 보여주지 않는다. 이는 백두산 지역의 저수량의 변화가 강수량의 변화와 큰 관련이 없음을 지시한다. 겨울 기간 동안의 지오이드로부터 계산된 저수량의 변화와 강수량을 비교해보면 백두산 활동이 감지되었던 2002년부터 2005년 사이에는 저수량이 강수량과 상관없이 크게 감소하다가 2005년 이후에는 저수량이 강수량과 유사한 변화 경향을 보여준다. 이에 반해 여름 기간에는 저수량과 강수량 사이에 특별한 연관성이 나타나지 않는다. 이를 근거로 해서 우리는 백두산 화산 활동이 인지되었던 2002년부터 2005년 사이에는 기상 조건에 상관없이

이 매우 빠른 속도로 지표면의 저수량이 감소했다는 것을 추측할 수가 있다. 특히 이는 겨울 시기에 뚜렷하게 나타났으며 이는 다음 부분에서 설명되는 백두산 지역의 지표면에 쌓인 적설량의 매우 빠른 감소 현상과 잘 일치한다.

MODIS 위성영상과 LANDSAT 이미지 분석을 통한 백두산 지역의 적설 지역 변화

백두산 정상 지역은 8월 중순 이후 눈이 덮이기 시작하며 9월 초에는 벌써 매우 많은 양의 눈이 내린다는 것이 기상 관측을 통해서 알려져 있다. 따라서 백두산 지역에 대한 모디스(MODIS) 위성영상 분석을 통해 2000년과 2010년 까지 8월의 눈으로 덮인 지역의 범위를 비교하였다(Fig. 4). 2000년부터 2004년까지 눈으로 덮인 지역은 계속 줄어들다가 2005년에 약간 늘어나기는 하나 2000년에 비해서는 역시 눈 덮인 지역이 줄어들어 있다. Fig. 5는 2008년과 2005년 8월의 적설 지역을 자세히 비교한 결과를 보여주고 있다. 2005년 이후 적설 지역이 대체적으로 2007년을 제외하고는 2010년까지 계속 적설 지역이 늘어났다. 하지만 역시 2000년도 초반 수준으로 회복되지는 않았다.

랜셋 이미지(Landsat image) 분석 결과도 지표면의 적설량 혹은 만년설 넓이를 결정하는데 매우 유용하게 이용될 수 있다(Xu *et al.*, 1993). 백두산 지역에 대한 1999년과 2006년도의 랜셋 이미지 분석 결과 Fig. 6에 나타나는 것과 같이 2006년도에는 1999년 대비 약 20% 정도 적설 지역이 줄어들었다는 것을 확인하였다. 이는 앞에서 언급된 MODIS 위성영상 분석 결과와 일치한다. 기상 조건 특히 이 지역의 온도 변화가 이러한 눈의 양에 영향을 미쳤는지를 알아내기 위해서 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration: 미국 해양 대기국)에서 제공한 백두산 지역의 대기 온도 변화와 비교하였다. Fig. 7에서와 같이 1999년에는 2006년보다 대기 온도가 1.1°C 높은 것을 볼 수가 있는데, 이는 결론적으로 적설 지역이 줄어든 것은 대기 온도의 변화가 아닌 지각 내부 온도 상승에 의한 것이라는 추측이 가능하게 한다. 지각 내부의 온도변화의 원인은 마그마의 활동에 의해 마그마 챔버에 새로운 마그마가 유입되거나, 일부 마그마가 상승에 기인할 수 있다.

Fig. 4. MODIS images showing the variation of snow covered area around the Baegdusan volcanic area from 2000(August) to 2010(August).

Fig. 5. Comparison the snow covered area at 2000(August) with that at 2005(August) around the Baegdusan volcanic area using MODIS image.

Fig. 6. Comparison the snow covered area at 1999(September) with that at 2006(September) around the Baegdusan volcanic area using LANDSAT image.

(a) Baegdu volcanic area

(b) Korean Peninsula

Fig. 7. The the temperature variation of the Baegdusan volcanic area from 1997 to 2010. : (a) and GISS summer season temperature distribution around Korea peninsula in 1999 and 2006 (b)

Yun and Lee(2012)가 보고한 백두산 천지하부 지하 3-5 km 깊이의 마그마 챔버 팽창에 의해 백두산 천지 일원이 상승된 점과, 이 때 마그마 챔버 상부에 균열이 발생하면서 지진이 발생한 사실은 마그마 활동의 활성화에 의해 백두산 천지 일원의 온도가 증가하였을 가능성을 지지한다. 따라서 2002년과 2005년

사이에 관찰된 백두산 지역의 지표면 적설 지역의 감소는 백두산 하부 마그마 활동의 활성화에 기인한 지열 상승에 의해 생성된 고온의 수증기와 열수가 열극을 통해 빠르게 상승하여 지표면에 열을 전달함으로써 일어났을 것으로 추측되어진다. 이는 2004년도 천지 주변 온천지하수의 온도가 69°C에서 83°C로 증가

한 사실(Gao, 2004; Yun and Lee, 2012)과도 잘 부합된다. 하지만 이를 확인하기 위해서는 앞으로 많은 연구가 필요하다.

급격한 지하수위의 변화

장백산 관측점 수관경사 자료에 의하면(Cui *et al.*, 2007) Fig. 8에서와 같이 백두산 지역에 설치된 지하수위 관측치가 2002년 이후 2004년까지 급격히 감소하였다. 이러한 지하수위의 급격한 상승 또는 하강은 화산분화의 전조 현상으로 밝혀졌다(Newhall *et al.*, 2001; Shibata and Akita, 2001). 필리핀의 마운 화산의 경우 화산 분화 전에 지하수위가 수 미터 상승하였으며(Newhall *et al.*, 2001), 2000년도에 분화한 일본의 우수(Usu)산의 두 개의 관측공에서는 분화 이전에 지하수위가 하강하였다가 상승하였고, 분화 당시에는 분화구와 지하수공에서 지하수가 뿜어져 나왔다(Shibata and Akita, 2001). 이는 상승하는 마그마가 절리계를 발달시키고, 발달된 절리계를 따라 지하수위를 교란시키기 때문이다(Shibata and Akita, 2001). 백두산 지하에서 2002년과 2005년 사이에 일어난 지진과 연관 지어 생각해 볼 때 백두산 지하의 마그마 챔버의 팽창시 상부 암석에 많은 절리들이 형성되고 이 절리계를 따라 지하수가 깊은 곳으로 이동하거나 균열을 따라 빠져나감으로서 백두산 천지 주변의 지하수위가 감소한 것으로 추측된다. 2002년과 2005년 사이에 백두산 지역에서 인지된 저수량의 감소가 지하수의 감소와도 관련성이 있을 수 있음을 지

Fig. 8. Rapid change of groundwater level in the Baegdusan volcanic area between 2002 and 2004(Cui *et al.*, 2007).

시한다.

CHAMP에 의해 관측된 백두산 지역 자기장 변화

이탈리아의 Etna 화산과 일본의 Kusatsu-Shirane 화산 분출 전과 후에 자기장의 변화가 인지되었다(Yamazaki *et al.*, 1992; Currenti *et al.*, 2005). Etna 화산의 경우 2002년 10월 27일에 일어난 화산분출 이전에 약 4 nT의 자기장 감소를 보여주었고 분출시 10 nT 정도의 자기장의 증가가 인지되었다. 일본의 Kusatsu-Shirane 화산의 경우 1990년 2월부터 화산의 활동이 활발해 짐이 지진 발생 빈도 증가와 화산 가스내 황화가스의 감소에 의해 인지되었다. 그리고 1990년 9월의 자기장이 지진이 일어나기 전인 1989년 9월에 비해 2.5-11.1 nT가 감소하였다. 그리고 이러한 자기장의 변화는 마그마 활동 활성화에 의해 생성된 고온의 수증기와 열수가 지진에 의해 생성된 열극을 따라 주변 지역에 빠르게 공급되어 광역적인 온도 상승을 일으켜 주변 암석을 비자성화(demagnetization) 함으로서 생성된 자기력 감소에 의해 발생하였다고 밝혀졌다(Yamazaki *et al.*, 1992). Yamazaki *et al.* (1992)은 Kusatsu-Shirane 화산에서 채취된 휘석을 함유한 안산암을 대상으로 온도의 변화에 따른 자기장의 변화를 실험하였다. 실험을 통하여 온도가 300-400°C에 도달했을 때 암석의 비자성화에 의해 자기장의 감소가 크게 일어남을 확인하였다. 이는 이탈리아의 Etna 화산과 일본의 Kusatsu-Shirane 화산에서 화산 분출 이전에 나타난 자기장의 감소가 마그마 활동의 강화와 연관되어 있다는 예측을 잘 뒷받침해 준다. 하지만 이와 같은 화산 분출 전 자기장의 변화가 인공 위성에 의해 관측된 사례는 아직 보고되지 않고 있다.

챔프 인공위성에 의해 백두산 천지 주변 반경 200에서 측정된 자기장의 변화를 살펴보면 Fig. 9에서와 같이 2000년도부터 2005년까지 자기장이 감소하였고 2005년 이후 2011년까지 자기장이 증가하였다. 자기장의 감소 시기는 대략 백두산 화산 활동이 활발하던 2002-2005년 시기와 대략적으로 일치한다. 따라서 백두산 지역의 자기장의 변화도 일본의 Kusatsu-Shirane 화산의 경우처럼 마그마 활동 활성화 시기에 열극을 따라 공급된 고온의 수증기와 열수에 의한 백두산 주변 지역의 광역적인 온도 상승에 기인한 암석의 비자성화에 의한 자기력 감소 결과일 가능성이 높

Fig. 9. Annual variation of CHAMP satellite geomagnetic value in the Baegdusan volcanic area from 2000 to 2010.

다. 이는 앞에서 지표면의 적설 지역 감소가 마그마 챔버 활동의 활성화에 의해 열극을 따라 지표로 공급된 수증기와 열수에 의한 지표부 온도 상승에 기인할 가능성이 있다는 예측과 잘 일치한다. 이러한 연구 결과는 인공위성에 의해 측정된 자기장의 변화가 화산 분출 감시에 사용될 수 있을 가능성이 있음을 시사한다.

토의 및 결론

기존 연구에서 밝혀졌듯이 백두산 지역에서 2002년과 2005년 사이에 많은 지진이 발생하였고 지형이 상승하였으며 온천수의 온도가 증가하였다. 이러한 현상은 백두산 하부의 마그마 챔버의 활성화에 의한 것이라고 예상되고 있다. 즉 1000 AD 경에 매우 강력한 화산 폭발을 하였던 백두산은 아직도 폭발 가능성을 가지고 있다. 따라서 백두산의 폭발 가능성을 사전에 확인할 수 있는 정기적인 관측이 필요하다. 하지만 백두산이 북한과 중국 영토에 포함되어 있으며 이들 국가와의 정치적인 문제가 복잡하여 백두산 지역에 정기적인 관측 시설을 설치하거나 정기적인 관측 자료를 얻는 것이 매우 힘든 상황이다. 따라서 인공위성을 이용한 백두산 화산 폭발 가능성에 대한 정기적인 관측 기술 개발이 필요하다.

그레이트 인공위성으로부터 얻어진 백두산 지역의 중력 자료로부터 얻어진 지오이드 자료의 지난 10년간의 변화를 보면 백두산 지역에 지진 발생을 포함한 마그마 활동 가능성이 인지된 2002년부터 2005년 사

이에 매우 뚜렷한 감소가 확인되었다. 이러한 지오이드 감소는 백두산 지역의 저수량의 감소에 의해 발생한 것으로 확인되었다. 하지만 동일한 시기에 평균 강우량이 크게 변화하지 않음은 백두산 지역의 저수량의 변화가 강우량의 변화와 관련이 크지 않음을 시사한다. 또한 인공위성 사진 해석 결과 2000년에서 2005년 사이에 백두산 지역의 적설 지역이 축소되면서 적설량이 감소함이 인지되었다. 하지만 백두산 지역의 온도 변화를 보면 2000년도의 대기 온도가 2005년도 보다 약 1.2°C 가 높다. 따라서 적설 지역의 변화가 대기 온도의 변화와 관련성이 적은 것을 알 수 있다. 백두산 지역의 저수량과 적설 면적의 감소는 여러 가지 다른 정황증거(지진 진도와 강도 증가, 온천수의 온도 증가, 백두산 지형 상승 등)를 고려해 볼 때, 마그마 활동 활성화에 의한 지각 내부의 온도 상승시 생성된 고온의 수증기와 열수가 열극을 통해 지표면에 공급되어 발생하였을 것이라고 예측할 수 있다. 즉 인공위성을 이용하여 관측한 지오이드의 변화가 백두산 하부의 마그마 활동을 관측하는데 사용될 수 있는 가능성이 확인되었다.

챔프 인공위성을 이용하여 측정된 지난 2000년부터 2010년까지의 자력 변화를 살펴보면 2000년에서 2005년도 사이에 자력이 감소하고 그 이후 다시 증가하는 현상을 보여준다. 자력이 감소하는 시기가 백두산 지역의 마그마 활동이 활발했던 것으로 예상되는 시기와 유사하다. 이러한 자력의 감소는 이탈리아의 Etna 화산과 일본의 Kusatsu-Shirane 화산의 분출 전에도 인지되었고, 그 원인은 마그마 활동의 활성화시 생성된 고온의 수증기와 열수가 열극을 따라 광역적으로 주변 지역에 빠르게 열을 공급함으로써 주변 암석에 비자성화가 일어나 발생한 것으로 해석하였다. 백두산 지역에서도 자력이 감소하는 기간인 2000년도에서 2005년도 사이 마그마 활동이 활성화되었던 점을 고려할 때, 이 시기의 백두산 지역의 자력 감소도 백두산 하부의 마그마 활동 활성화시에 생성된 고온의 수증기와 열수가 열극을 따라 빠르게 주변 지역에 공급됨으로써 주변 암석에 광역적인 온도 상승을 유발시켜 발생한 주변 암석의 비자성화에 의한 것으로 예측할 수 있다. 즉 인공위성으로부터 얻어진 자력의 변화 역시 인공위성으로부터 얻어진 지오이드 자료와 함께 백두산 폭발 가능성을 관측하는데 사용될 수 있는 가능성이 확인되었다.

따라서 본 연구팀은 그 가능성을 확인하기 위하여

지난 10년간 전 세계에서 폭발한 중요 화산 지역에서 화산 폭발 이전에 측정된 그레이트스 인공위성 자료와 챔프 인공위성 자료를 검토할 계획이다. 검토 결과 이들 화산지역에서 폭발 이전에 백두산에서 관찰되었던 지오이드의 감소와 자기장의 감소가 인지되면, 그 원인을 규명하는 한편 이들 인공위성 자료를 백두산 지역 마그마 활동 모니터링에 활용할 방안을 연구하고자 한다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발 사업단 (CATER-2012-5062)의 지원으로 수행되었다. 본 논문을 읽고 건설적인 비평과 조언을 준 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- Chen, J.C., Hsu, C.N. and Ho, K.S., 2003, Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks and related ultramafic xenoliths from the Jilin and Heilongjiang provinces, northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 1069-1084.
- Chen, J.L., Wilson, C.R. and Tapley, B.D., 2006, Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet. *Science*, doi:10.1126/science.1129007.
- Cui, D.X., Wang, Q.L., Li, Ke, Wang, W.P. and Hu, Y.X., 2007, Analysis of recent Deformation of Changbaishan Tianchi Volcano. *Chinese Journal of Geophysics*, 50, 6.
- Currenti, G., del Negro, C., Lapenna, V. and Telesca, L., 2005, Multifractality in local geomagnetic field at Etna volcano, Sicily(southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 555-559.
- Frappart, F., Ramillien, G., Biancamaria, S., Mognard, N.m. and Cazenave, A., 2006, Evolution of high-latitude snow mass derived from the GRACE gravimetry mission(2002-2004). *Geophysical Research Letters*, 33, L02501.
- Gao, Q.W., 2004, Volcanic hydrothermal activities and gas-releasing characteristics of the Tianchi lake region, Changbai mountain. *Acta Geoscientica Sinica*, 25, 3, 345-350.
- Garcia, D., Chao, B.F., Rio, J.D., Vigo, I. and Garcia-Lafuente, J., 2006, On the steric and mass-induced contributions to the annual sea level variations in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 111, C09030, Doi:10.1029/2005JC002956.
- Hetland, E., Wu, F. and Song, J., 2004, Crustal structure in the Changbaishan volcanic area, China, determined by modeling receiver functions. *Tectonophysics*, 386, 157-175.
- Horn, S. and Schmincke, H.U., 2000, Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano(China/North Korea) ca. 960. *Bulletin of Volcanology*, 61, 537-555.
- Huang, H., 2010, Evaluation of GRACE Satellite gravity field model and detection of Earth's Gravity field variations. Ph. D. dissertation, Sungkyunkwan University, 154p.
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M., 1994, Japan Sea, opening history and mechanism : A synthesis. *Journal of Geophysical Research*, 99, B11, 22237-22259.
- Jwa, Y.-J., Lee, J.-I. and Zheng, X.S., 2003, A study on the eruption ages of Baekdusan: 1. Radiocarbon (^{14}C) age for charcoal and wood samples. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 347-357.
- Kim, J.R., Kang, J.C., Lee, D., Kim, H.S., Kang, S.H., Choi, S.W., Eoh, H.D., Kim, D.S., Lee, M.C., Hong, W.K. and Lee, K.P., 1998, The series of Baegdusan geology. Science and Technology Press, 367p.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2001, Tectonic map of Korea (1: 1,000,000): Seoul, South Korea, Sungji Atlas Co. Ltd.
- Kuritani, T., Kimura, J.-I., Miyamoto, T., Wei, H., Shimano, T., Maeno, F., Jin, X. and Taniguchi, H., 2009, Intraplate magmatism related to deceleration of upwelling asthenospheric mantle: Implications from the Changbaishan shield basalts, northeast China. *Lithos*, 112, 247-258.
- Lei, J. and Zhao, D., 2005, P-wave tomography and origin of the Changbai intraplate volcano in Northeast Asia. *Tectonophysics*, 397, 281-295.
- Liu, J.Q., 1983, Study on Cenozoic Volcanic Activity in Changbaishan Area. Beijing Science and Technology Press, 343.
- Liu, J. and Chu, G., 1996, Volcanic activities and potential dangers in China. Proceeding of the 30th International Geological Congress (IGC), Beijing, China, Abstract with Programs, 18, 5.
- Liu, J.Q., 1988, Volcanic episodes of the Cenozoic in northeast China region. *Acta Petrologica Sinica*, 2, 1-9.
- Liu, J.Q., Han, J.T. and William, S.F., 2011, Cenozoic episodic volcanism and continental rifting in northeast China and possible link to Japan Sea development as revealed from K-Ar geochronology. *Tectonophysics*, 339, 385-401.
- Liu, R. and Wei, H., 1996, The large eruption of Tianchi Volcano, Changbaishan during 750-960 AD. Proceeding of the 30th International Geological Congress(IGC), Beijing, China, Abstract with Programs, 18, 4.
- Liu, R.X., Wei, H.Q. and Lee, J.T., 1998, The Recent Eruptions of the Tianchi Volcano in the Changbaishan. Science Publishers, Beijing, China.
- Liu, Y.Z., Liang, H.Q. and Liu, J.Z., 1989, Stress field change in time and space and seismological activity in northeastern China. *Northeastern Seismological Research*, 5, 17-24.
- Ma, L., Qiao, X., Min, L., Fan, B., Ding, X. and Liu, N.,

- 2002, Geological Atlas of China, Geological Publishing House, Beijing, 348p.
- Machida, H. and Arai, F., 1983, Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large, late Quaternary eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 151-164.
- Machida, H., Morwaki, H. and Zhao, D.C., 1990, The recent major eruption of Changbai Volcano and its environmental effects. *Geographical reports of Tokyo Metropolitan University*, 25, 1-20.
- Martin, A.K., 2011, Double saloon door tectonics in the Japan Sea, Fossa Magna, and the Japanese Island Arc. *Tectonophysics*, 498, 45-65.
- Newhall, C.G., Albano, S.E., Matsumoto, N. and Sandoval, T., 2001, Roles of ground water in volcanic unrest. *Journal of Geological Society of Philippines*, 56, 69-84.
- Ozawa, T. and Taniguchi, H., 2007, Detection of Crustal Deformation Associated with Volcanic Activity of Baitoushan Volcano Using SAR Interferometry. *Report NIED*, 71, 1-10.
- Peter, W.J., Trudy, D., Chen, C.J., Zhao, H.L., Lin, S., Robin T. and Michael D. G., 2010, Moving sources: A preliminary study of volcanic glass artifact distributions in northeast China using PXRF. *Journal of Archaeological Science*, 37, 1670-1677.
- Soh, W.-J. and Yun, S.-H., 1999, A review of the Holocene major eruption of Mt. Paektu volcano. *Journal of Korean Earth Science Society*, 20, 534-543.
- Song, J.L., Hetland, E.A., Wu, F.T., Zhang, X.K., Liu, G.D. and Yang Z.X., 2007, P-wave velocity structure under the Changbaishan volcanic region, NE China, from wide-angle reflection and refraction data. *Tectonophysics*, 433, 127-139.
- Stone, R., 2010, Is China's riskiest volcano stirring or merely biding its time?: *Science*, 329, 498-499.
- Swenson, S. and Wahr, J., 2006, Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophysical Research Letters*, 33, L08402, doi:10.1029/2005GL025285
- Shibata, T. and Akita, F., 2001, Precursor changes in well-water level prior to the March 2000 eruption of Mount Usu, Japan. *Geophysical Research Letters*, 28, 1799-1802.
- Tapley, B., Bettadpur, S., Ries, J.C., Thompson, P.F. and Watkins, M.M., 2004, Grace measurements of Mass Variability in the Earth System. *Science*, 35, 503-505.
- Wang, Y., Li, C.F., Wei, H.Q. and Shan, X.J., 2003, Late Pliocene-recent tectonic setting for the Tianchi volcanic zone, Changbai Mountains, northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 1159-1170.
- Wei, H., Wang, Y., Jin, J., Gao, L., Yun, S.H. and Jin, B., 2007, Timescale and evolution of the intracontinental Tianchi volcanic shield and ignimbrite-forming eruption, Changbaishan, Northeast China. *Lithos*, 96, 315-324.
- Wu, J., Ming, Y. and Zhang, H., 2005, Seismic activity at the Changbaishan Tianchi volcano in the summer of 2002. *Chinese Journal of Geophysics*, 48, 621-628.
- Xu, H., Bailey, J.O., Barrett, E.C. and Kelly, R.E.J., 1993, Monitoring snow area and depth with integration of remote sensing and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 3259-3268.
- Xu, J., Liu, G., Wu, J., Ming, Y., Wang, Q., Cui, D., Shang-guan, Z., Oan, B., Lin, X. and Liu, J., 2012, Recent unrest of Changbaishan volcano, Northeast China: A precursor of a future eruption. *Geophysical Research Letters*, 39, L16305, doi:10.1029/2012GL052600.
- Yeh, P.J.F., Swenson, S.C., Famiglietti, J.S. and Rodell, M., 2006, Remote sensing of groundwater storage changes in Liliinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research*, 42, W12203, doi:10.1029/2006WR005374
- Yamamoto, T. and Hoang, N., 2009, Synchronous Japan Sea opening Miocene fore-arc volcanism in the Abukuma Mountains, NE Japan: An advancing hot asthenosphere flow versus Pacific slab melting. *Lithos*, 112, 575-590.
- Yamazaki, A., Churei M., Tsunomura, S. and Nakajima, S., 1992, Analysis of the Variation of Geomagnetic Total Force at the Kusatsu-Shirane Volcano. *Memoirs of the Kakioka magnetic Observatory*, 24, 53-66.
- Yin A., 2010, Cenozoic tectonic evolution of Asia : A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488, 293-325.
- Yun, S.-H., Won, C.-K. and Lee, M.-W., 1993, Cenozoic volcanic activity and petrochemistry of volcanic rocks in the Mt. Paektu area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 29, 291-307.
- Yun, S.-H. and Lee, J.-H., 2012, Analysis of Unrest Signs of Activity at the Baegdusan Volcano. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 1, 1-12.
- Zhang, X.K., Zhang, C.K., Zhao, J.R., Yang, Z.X., LI, S.L., Zhang, J.S., Liu, B.F., Cheng, S.X., Sun, G.W. and Pan, S.Z., 2002, Deep seismic sounding investigation into the deep structure of the magma system in Changbaishan-Tianchi volcanic region. *Acta Seismologica Sinica*, 15, 143-151.
- Zhao, D.P., 2009, Multiscale seismic tomography and mantle dynamics. *Gondwana Research*, 15, 297-323.
- Zhao, D.P. and Liu, L.C., 2010, Deep structure and origin of active volcanoes in China. *Geoscience Frontiers*, 1, 31-44.
- Zou, H.B., Fan, Q.C. and Zhang, H.F., 2010, Rapid development of the great Millennium eruption of Changbaishan (Tianchi) Volcano, China/North Korea: Evidence from U-Th zircon dating. *Lithos*, 119, 289-296.

2013년 1월 29일 접수

2013년 1월 31일 심사개시

2013년 2월 12일 채택