천리안 위성영상에 감지된 사쿠라지마 화산분화와 지자기 변동 분석 연구 - 2013년 8월 18일 분화를 중심으로 -

김기연* · 황의홍* · 이윤경** · 이창욱*†

*기상청 국립기상연구소, **한국해양과학기술원 해양위성센터

Sakurajima volcano eruption detected by GOCI and geomagnetic variation analysis - A case study of the 18 Aug, 2013 eruption -

Kiyeon Kim*, Eui-Hong Hwang*, Yoon-Kyung Lee** and Chang-Wook Lee*†

*National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration

**Korea Ocean Satellite Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Abstract : On Aug 18, 2013, Sakurajima volcano in Japan erupted on a relatively large-scale. Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) had used to detect volcanic ash in the surrounding area on the next day of this eruption. The geomagnetic variation has been analyzed using geomagnetic data from Cheongyang observatory in Korea and several geomagnetic observatories in Japan. First, we reconstruct geomagnetic data by principal component analysis and conduct semblance analysis by wavelet transform. Secondly, we minimize the error of solar effect by using wavelet based semblance filtering with Kp index. As a result of this study, we could confirm that the geomagnetic variation usually occur at the moment of Sakurajima volcano eruption. However, we cannot rule out the possibilities that it could have been impacted by other factors besides volcanic eruption in other variation's cases. This research is an exceptional study to analyze geomagnetic variation related with abroad volcanic eruption uncommonly in Korea. Moreover, we expect that it can help to develop further study of geomagnetic variation involved in earthquake and volcanic eruption.

Key Words : Sakurajima volcano, GOCI, geomagnetic variation, principal component analysis, wavelet based semblance, eigenvalue

요약 : 2013년 8월 18일 일본의 사쿠라지마 화산에서 비교적 큰 규모의 분화가 발생하였다. 이에 본 연구에서는 천리안 위성 자료를 이용하여 화산분화 다음날 주변 지역의 화산재를 감지하였으며, 기상청 청양 지자기 관측소 자료와 함께 일본 지자기 관측소 자료를 이용하여 지자기 변동에 대해 분석하였다. 먼저, 지자기 관측 자료를 이용하여 주성분 분석을 수행하고 관측 자료의 재구성 자료를 구축하였다. 재구성된 자료는

접수일(2014년 3월 5일), 수정일(1차 : 2014년 3월 27일), 게재확정일(2014년 4월 11일).

† 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.

웨이블릿 기반 샘플런스 분석을 수행하였다. 다음으로는 지자기 관측 자료의 고유값 분석을 수행하고 Kp 지수와의 웨이블릿 기반 샘플런스 필터링을 통해서 태양의 영향을 최소화하였다. 분석결과에서는 전체적으로 화산 발생 시점에서 이벤트가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 다만, 일부 지자기 관측소의 경우 화산이 아닌 다른 영향을 받았을 가능성을 배제 할 수 없다. 이 연구에서는 국내 연구로는 드물게 화산 분화에 의한 지자기 영향을 분석하였으며 향후 지진·화산 연구에 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

1. 서론

최근 국제적으로 지진과 관련한 전조현상의 하나로 지자기장에 대한 연구가 진행되고 있다(Hayakawa *et al.*, 1996, 2000, 2007; Hattori *et al.*, 2002, 2004; Kawate *et al.*, 1998). 국내에서는 최근에서야 Oh(2009, 2012), Ji *et al.*(2012) 등에 의해 지진과 관련한 지자기 변동성에 대한 연구가 진행되어져 왔으며 그 연관성에 대해서 확인한 바가 있다. 지자기장에서 지진과 관련하여 변동이 발생하는 곳은 여러 주파수 대역들 중에서도 Ultra Low Frequency (ULF) 대역으로서, 0.1kHz 이하의 극저주파 대역으로 칭하는 구간이다. 그간의 연구 결과에서는 공통적으로 대형 지진 발생 전, 짧게는 하루에서 길게는 한 달 이전에 지자기장의 변동이 나타난다는 결과를 보여 주었다. 한편으로는 지진과 마찬가지로 화산 분화 이전에도 지자기장의 변동이 발생한 사례가 수차례 확인되었다(Johnston *et al.*, 1981; Zlotnicki and Bof, 1998; Utada *et al.*, 2000; Sasai *et al.*, 2002; Del Negro *et al.*, 2004; Kotsarenko *et al.*, 2007). 국내에 위치한 화산은 백두산과 한라산으로, 백두산의 경우 최근 여러 징조들(백두산 하부 맨틀 구조의 변화, 화산성 지진활동의 급증, 화산체 내부의 사면붕괴, 화산 가스에 의한 수목의 고사, 지표면의 팽창, 용기 및 침강, 온천수의 수온 상승 등)로 인해 분화의 가능성이 있어 연구가 이루어지고 있으나, 백두산의 위치상 관측 장비의 설치를 통한 직접적인 자료 획득은 중국과의 공동 연구로만 가능한 실정이다(Yun *et al.*, 2007; Yun and Lee, 2011, 2012; Xu *et al.*, 2012; Yun, 2013). 반면, 한라산의 경우에는 백두산과 같이 휴화산임에도 불구하고 백두산에 비해 관심도가 적으며 아직까지 별다른 연구가 이루어지고 있지 않다. 다만, 화산 연구가 목적이 아닌 지열 탐사나 심부구조 확인을 위한 지구물리탐사가 수차례 이루어졌다(Lee *et al.*, 2006, 2008; Choi *et al.*, 2007). 과거 기록을 살펴보면 동국여지승람에서는 고려 목종 5년(1002년)과 고려 목종 10년(1007년)에 한

라산이 분화하였다는 기록이 있으며, 조선왕조실록에서는 조선 선조 30년(1596년), 현종 9년(1668년), 숙종 28년(1702년)에 백두산에서 분화가 있었다는 기록이 있다. 또한, 1898년과 1903년, 1925년에도 각기 소규모의 분화가 발생하였다(Yun, 2013). 이후에는 한라산과 백두산, 두 화산이 실제로 분화한 경우가 없었기 때문에 국내에서는 화산 분화와 관련한 지자기장의 변동에 대해 연구하는데 어려움이 있다. 이러한 가운데 2013년 8월 18일 16시 31분, 일본의 사쿠라지마 화산의 쇼와 분화구에서 2006년 이후로 가장 커다란 규모의 분화가 발생하였다. 이때의 분화로 인하여 상당한 양의 부석과 화산재가 발생하여 상공 5,000 m 까지 치솟아 화산재 기둥을 형성하였으며, 인근에 위치한 가고시마 시의 중심부까지 화산재가 날리어 많은 피해가 발생하였다. 또한, 이례적으로 커다란 분화가 발생하였기에 국내에서도 화산재의 영향권 문제로 인해 이슈화가 되었다.

사쿠라지마 화산은 백두산과 한라산을 제외하고는 상대적으로 한반도에 가장 가까이 위치한 활화산 중의 하나라고 할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 2013년 8월 18일 사쿠라지마 분화 당시의 국내의 지자기 관측 자료와 함께 일본의 지자기 관측 자료를 이용하여 화산 분화와 지자기장 변동성의 관계를 확인해보고자 한다.

2. 사쿠라지마 화산의 지질학적 특성

현재 세계에서 가장 활발한 움직임을 보이고 있는 활화산 중의 하나인 사쿠라지마 화산은 일본 규슈 남단 아이라 칼데라호와 가고시마만 사이에 위치하고 있다(Fig. 1). 사쿠라지마 화산은 남쪽 최고봉 미나미다케(1,040 m)와 중앙의 나카다케(1,069 m), 북쪽 최고봉 키타다케(1,117 m), 그리고 몇몇의 용암돔으로 이루어져 있는 안산암질의 성층화산으로서, 29,000년 전 아이라 칼데라호가 생성되기 시작하여 3,000년 동안 발달된 것을 기원

Fig. 1. The satellite image was acquired on April 13, 2013 aboard the Landsat-8 on the Sakurajima area.

으로 하며, 아이라 칼데라호의 발달이 종료된 이후 11,500년 전부터 약 4,900년 전까지의 기간에 걸쳐 키타다케가 생성되었다. 키타다케의 활동이 시작된 이후 미나미다케 역시 생성이 시작되었다(Ayako *et al.*, 2009). 사쿠라지마 화산은 선사시대부터 총 13층의 화산재 층으로 구성되어 있다(Kobayashi, 1986). 거대한 규모의 역사적 분출에는 텐표(Tenpyo, 764-766), 부메이(Bummei, 1471-1476), 안네이(An'ei, 1779), 타이쇼(Taisho, 1914-1915) 시대의 분출을 들 수 있다. 이 중 1914년 분화의 경우에는 화산분화지수(Volcanic Explosivity Index; VEI)가 4를 기록할 정도로 대규모의 분화가 발생하였다. 가장 최근에 용암 분출을 동반한 분화는 1946년 미나미다케 중앙분화구에서 동쪽으로 200 m 지역에 위치한 쇼와 분화구에서 발생하였으며, 그 이후로도 쇼와 분화구에서는 7년간 분화활동이 지속되었다(Ayako *et al.*, 2009). 1955년 이후로는 미나미다케 정상 분화구에서 폭발적 분화가 발생하였으며, 2006년 이후에는 주로 쇼와 분화구에서 분화가 발생하고 있다. 또한, 화산 분화 빈도 및 규모가 점점 증가하여 2011년도에만 2,400회 이상의 폭발이 발생하는 등 최근 50년간 8천회 이상의 분출이 발생하였다(Ayako *et al.*, 2009; Iguchi *et al.*, 2013). 사쿠라지마 화산은 1955년 분화한 이래로 현재에도 거의 매일갈

이 분화가 발생하여 약 60년간 분화가 지속되고 있는 것으로 기록중이며, 화산분화지수는 3을 유지하고 있다(Smithsonian Institution National Museum of Natural History Global Volcanism Program, available at <http://www.volcano.si.edu/>).

Fig. 2는 천리안 해양관측위성(COMS-GOCI)을 이용하여 사쿠라지마 화산 분화 이전부터 분화 이후의 모습을 촬영한 영상으로서, (a)부터 (f)까지 시간 순서대로 나타낸 것이다. 각 영상에 나타난 노란색 원은 사쿠라지마 화산의 위치를 나타낸 것이며, 빨간색 박스는 화산재 분포 범위를 나타낸 것이다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 각각 분화 이전과 분화 직후의 모습으로써, 주변의 구름 및 에어로졸로 인하여 화산 분화 모습을 확인하는 것에는 어려움이 있다. 천리안 위성의 운용상의 이유(일 8회 촬영, 09:15 ~ 16:45)로 Fig. 2의 (c)~(f)는 하루 지난 19일 오전부터 촬영을 시작하였으며, 영상에서 알 수 있듯이 (a)와 (b)에 비해 구름의 영향이 적어 화산재가 분포되는 것을 확인할 수 있다. 다만, (f)의 경우에는 다시 구름 및 에어로졸로 인하여 그 분포 범위를 정확히 판별하는 것에 어려움이 있다.

Fig. 2. The time series of Sakurajima volcano eruption was captured by COMS-GOCI. The yellow circles indicate the Sakurajima volcano. The red boxes estimate volcanic ash distribution ranges. The time axis is UTC.

3. 지자기 관측소의 위치 및 소개

이 연구에서는 2013년 8월 18일 분화한 사쿠라지마 화산 분화 시점의 지자기 변동성을 확인하기 위해서 기상청에서 운영하고 있는 청양 지자기 관측소 자료와 함께 일본 카노야 지자기 관측소, 카키오카 지자기 관측소, 메맘베쯔 지자기 관측소의 자료를 이용하였다(Fig. 3). 이들 관측소는 모두 국제 지자기 관측소 그룹인 INTERMAGNET에 가입되어져 있는 상태로서 신뢰할 수 있는 고품질의 관측 자료를 생산하고 있다. 청양 지자기 관측소의 자료가 한반도 대표 관측값이라고 한다면, 카노야 지자기 관측소, 카키오카 지자기 관측소, 메맘베쯔 지자기 관측소는 각각 규슈, 혼슈, 홋카이도에 위치하

여 이들 섬의 대표 지자기값이라고 할 수 있으며 위치상으로는 일본 남단, 중단, 북단의 지자기값을 나타낸다.

각 관측소에서 사쿠라지마 화산까지의 거리는 청양 지자기 관측소 약 640 km, 카노야 지자기 관측소 약 30 km, 카키오카 지자기 관측소 약 1,020 km, 메맘베쯔 지자기 관측소는 약 1,810 km의 거리차를 가지고 있다. 여기서 중요하게 고려해야 할 부분은 카노야 지자기 관측소를 제외한 청양, 카키오카, 메맘베쯔 지자기 관측소와 사쿠라지마 화산과의 거리이다. 일반적으로 지자기는 지역적 특성을 가지고 있어 경험식 $0.025R \leq M \leq 4.5$ (R :진앙과의 거리, M :규모)에 의하여 규모 6 정도의 지진 발생시 관측소가 60 km 이내에 있어야 그 변화를 탐지 가능하며, 규모 7 정도의 지진 발생시에는 100 km 이

Fig. 3. The location map of Sakurajima volcano, Cheongyang(CYG) geomagnetic observatory by Korea Meteorological Administration (KMA), and Kanoya(KNY), Kakioka(KAK), and Memambetsu(MMB) geomagnetic observatories by Japan Meteorological Agency(JMA).

내에 위치하여야 한다고 알려져 있다(Hattori *et al.*, 2004; Hayakawa *et al.*, 2007). 다만, 국내의 경우 한반도 지각의 전기비저항이 다른 나라의 지각에 비해서 매우 높은 편이기 때문에 압전효과에 의거하여 다소 규모가 작은 지진이나 원거리의 지진을 포착할 수 있는 것으로 생각할 수 있다(Oh, 2009, 2012; Yang *et al.*, 2009). 이 연구에서는 지진과 지자기의 연관성에 대해 분석하고자 하는 것은 아니지만, 지진과 마찬가지로 화산 분화 역시 지질활동의 일환으로 화산 분화시 발생할 수 있는 지하구조의 응력 변화를 통해 지전기적 변화가 발생, 지자기에 영향을 미칠 것이라는 판단하에 연구를 진행하였다.

4. 연구 방법

이 연구에서 사용된 지자기 자료의 분석 기법으로는 다음과 같이 크게 3가지로 나눌 수 있다.

가장 먼저 사용된 방법은 주성분 분석(Principal Component Analysis; PCA) 기법이다. 주성분 분석 기법은 Nordemann *et al.*(2008)이 제안한 시계열 자료의 주성분을 최적화하고 반영할 수 있는 사인 함수의 계수를 결

정하는 방법을 기본으로 하고 있다. 이 방법은 시계열 자료를 자기상관을 통하여 고유값과 고유벡터를 결정하고, 푸리에 변환에 기반하여 주성분의 사인함수가 내재된 주파수들을 결정하게 된다. 이 주파수들은 다시 최소자승 반복회귀법을 통하여 가장 오차가 적은 계수 및 주파수를 결정하며, 주성분의 크기순으로 분류된다. 이 때, 주성분의 크기가 큰 값만을 사용하면 실제 지자기 관측 자료에서 잡음을 배제한 자료를 재구성하게 된다. 자연 상태에서 존재하는 시계열 자료는 비정상 신호와 함께 잡음, 계절적 특징을 포함하고 있다. 하지만 재구성 자료는 실제 자료와는 완벽히 일치하지 않지만, 본래 시계열 자료가 가지고 있는 일관된 주파수 성분을 내재하고 있기 때문에 특정 이벤트가 발생한 시점의 지자기 관측 자료와 재구성 자료를 비교할 경우 주파수 이상을 확인할 수 있다.

두 번째로 적용된 방법으로는 웨이블릿 기반 샘플런스 분석 방법이다. 샘플런스 기법은 다중 채널 코히런스를 계산하여 도시하는 방법으로써 탄성과 트레이스 속도 분석이나 시계열 자료 등의 지구물리 자료를 처리할 때, 서로 다른 신호로부터 상관성 분석을 하기 위해서 사용하고 있다. 이 연구에서는 일반적인 샘플런스 기법이

아닌 Cooper and Cowan(2008)이 제시한 웨이블릿 기반의 샘플런스 기법을 적용함으로써, 두 시계열 자료의 상관성 분석을 통해 지자기 변동성에 대해 파악하고자 하였다. 샘플런스 필터링 비교는 두 시계열 자료의 위상, 주파수의 함수를 기반으로 하여 상관성 분석을 하는 것이다. 두 시계열 자료의 푸리에 변환을 계산할 때, 각 주파수 위상의 차이를 간단히 계산하면 다음과 같다(von Frese *et al.*, 1997; Christensen, 2003):

$$S = \cos\theta(f) = \frac{R_1(f) R_2(f) + I_1(f) I_2(f)}{R_1^2(f) + I_1^2(f) \times R_2^2(f) + I_2^2(f)} \quad (1)$$

$R_1(f)$ 와 $I_2(f)$ 는 자료군 1을 푸리에 변환한 이후의 실수와 허수 성분을 각각 주파수 f 의 함수로써 나타낸 것이다(자료군 2에 대해서도 R_1 과 I_2 가 동일하게 적용). 샘플런스 S 는 +1과 -1 사이의 값을 가지게 되는데, +1은 두 자료의 상관성이 완벽히 일치함을 뜻하며 0은 상관성 없음, -1은 상관성과는 정반대의 성질을 가지는 역상관성을 가지고 있음을 말해준다(Cooper and Cowan, 2008). 두 시계열 자료에 사용할 수 있는 웨이블릿 기법으로 교차 웨이블릿 변환(Torrence and Compo, 1998)을 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CWT_{1,2} = CWT_1 \times CWT_2^* \quad (2)$$

여기서, CWT는 연속 웨이블릿 변환(Continuous wavelet transform)의 약자이며, CWT_1 과 CWT_2 는 각각 자료군 1과 자료군 2의 연속 웨이블릿 변환을 뜻한다.

이어서, 위상을 나타내는 θ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\theta = \tan^{-1}(\Im(CWT_{1,2})/\Re(CWT_{1,2})) \quad (3)$$

이 과정을 통해서 웨이블릿 기반의 샘플런스는 식 4로 표현할 수 있다.

$$S = \cos^w(\theta) \quad (4)$$

일반적으로 기존의 푸리에 기반 샘플런스 분석이 주파수 영역에 대한 정보만을 제공하는 것과는 달리, 웨이블릿 기반 샘플런스 분석은 시간 영역과 주파수 영역 모두를 나타낸다는 장점을 가지고 있다.

마지막으로 적용한 방법은 시계열 자료의 고유값 분석이다. Hattori *et al.*(2002)은 지자기장과 지진전조현상에 관한 연구를 통해서 지자기의 고유값(Eigenvalues) 분석을 실시하였다. 지자기 고유값은 3가지 성분으로 나

눌 수 있으며, 1성분(λ_1)의 경우 태양 활동에 의한 영향에 기인한 것으로 나타난다. 2성분(λ_2)은 24시간의 주기를 가지고 있으며 낮에 최고값, 밤에 최소값을 나타내는 것으로 보아 인간 활동에 의한 잡음이 포함된 것으로 판단할 수 있다. 마지막으로 3성분(λ_3)의 경우 지진 발생 몇 일 전에 값이 급격히 증가하는 것으로 보아 지진 활동과 관련이 있는 것으로 파악하였다. 따라서 화산 분화 발생 시에도 지자기 고유값 3성분에 영향이 나타날 것으로 기대해 볼 수 있다. 또한, 화산 분화시점 자료의 잡음을 제거하기 위하여 Kp 지수(지자기 배경값)와 고유값 3성분에 대해 샘플런스 필터링(Cooper, 2009)을 수행함으로써 Kp 지수와 상관성이 높은 신호는 분리하고, 그 외의 신호들로 재구성을 실시하여 보다 정밀한 분석이 가능하게끔 하였다(Oh *et al.*, 2009).

5. 자료 처리

이 연구에서는 청양, 카노야, 카키오카, 메맘베즈 지자기 관측소의 자료를 이용하였으며, 자료의 획득은 각각 기상청 및 INTERMAGNET 홈페이지(www.intermagnet.org)를 통해서 이루어졌다. 사용한 자료의 기간은 2013년 8월 13일부터 2013년 8월 24일까지 12일간의 자료를 이용하였다. Fig. 4는 청양 지자기 관측소의 자료를 주성분 분석을 수행한 후에 웨이블릿 기반 샘플런스 분석에 적용한 결과이다. 앞서 Fig. 2의 영상이 UTC를 기준으로 촬영된 것과는 달리 지자기 관측 자료는 KST와 JST를 기준으로 측정되었다. 즉, 국내 시간을 기준으로 하는 UTC+9에 맞추어 측정된 것으로 이후의 분석 결과는 모두 UTC+9를 기준으로 하고 있다. Fig. 4(a)는 실제 지자기 관측자료, Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 연속 웨이블릿 변환 결과, Fig. 4(c)는 Fig. 4(a)의 재구성 자료, Fig. 4(d)는 Fig. 4(c)의 연속 웨이블릿 변환 결과, Fig. 4(e)는 Fig. 4(b)와 Fig. 4(d)의 샘플런스 결과이다. 가운데 위치한 검은 점선은 화산 분화가 발생한 시점인 8월 18일 16시 31분경을 나타낸 것이다. 샘플런스 결과를 살펴보면 분화 시점을 기준으로 17일과 19일에 스케일 1000 부근에서 역상관성 이벤트가 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한, 스케일 2000 이상의 저주파수 대역에서도 사쿠라지마 화산 분화시점에 맞물려 이벤트가 발생하였다. 이와 더불어

Table 1. Earthquakes around Sakurajima volcano eruption in Korea

Origin Time(KST)	Latitude	Longitude	KMA Magnitude	Region
2013/08/29 08:35:23	38.19	129.3	2.5	the sea NE 60 km, Gangneung city, Gangwon-do, Korea
2013/08/13 00:36:47	36.91	129.44	3.0	the sea SSE 10 km, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea
2013/08/13 00:01:30	36.92	129.44	2.1	the sea SSE 8 km, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea
2013/08/12 04:33:48	35.66	129.77	2.3	the sea ENE 36 km, Dong-gu, Ulsan city, Korea
2013/08/12 04:19:36	35.66	129.75	3.1	the sea ENE 35 km, Dong-gu, Ulsan city, Korea

Fig. 4. Results of wavelet based semblance using Cheongyang geomagnetic observatory data. (a) observed geomagnetic data, (b) real part of continuous wavelet transform in (a), (c) reconstructed data from principal component analysis, (d) real part of continuous wavelet transform in (c), and (e) analysis of semblance between (b) and (d). The dotted line indicates the event time of Sakurajima volcano eruption.

Table 1에 의하면 8월 14일부터 8월 28일까지 국내에서 단 한 건의 지진도 발생하지 않았음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 4의 결과는 전지구적인 요인에 의한 변동이 아니라면 화산에 의한 영향이라고 추정해 볼 수 있다.

Fig. 5는 일본 카노야 지자기 관측소에서 관측한 자료를 이용하여 주성분 분석 및 웨이블릿 기반 셴블런스 분석을 수행한 결과이다. 카노야 지자기 관측소는 사쿠라지마 화산과의 거리가 불과 30 km 정도이기 때문에 연구에서 사용한 다른 관측소의 자료보다 더욱 많은 화산 분화의 영향을 받았을 것으로 판단된다. Fig. 5의 구성은 Fig. 4와 동일하게 실제 관측 자료, 관측 자료의 웨이블릿 변환 결과, 주성분 분석 후 재구성한 자료, 주성분 분석 후 재구성한 자료의 웨이블릿 변환 결과, 두 웨이블릿 변

환 결과의 셴블런스 분석 결과 순으로 나열되어져 있으며, 점선은 화산 분화시점을 나타낸다. 셴블런스 분석을 살펴보면 화산 분화전인 17일과 분화후인 19일 스케일 1000 부근에서 이벤트가 나타나며, 18일에는 스케일 2000 부근에서 이벤트가 발생하였다. Table 2를 살펴보면 일본 규슈지역 인근에서는 8월 15일부터 8월 19일 까지 지진이 발생하지 않았다. 따라서 Fig. 5의 결과 역시 전지구적인 요소를 제외한다면 화산 분화의 영향을 받은 것이라 여겨진다.

Fig. 6은 카키오카 지자기 관측소의 자료를 이용하여 주성분 분석 및 웨이블릿 기반 셴블런스 분석을 수행한 결과로써 Fig. 4나 Fig. 5와 같은 구성을 가지고 있다. 셴블런스 분석을 살펴보면 화산 분화시점 하루 이전에 커

Fig. 5. Results of wavelet based semblance using Kanoya geomagnetic observatory data. (a) observed geomagnetic data, (b) real part of continuous wavelet transform in (a), (c) reconstructed data from principal component analysis, (d) real part of continuous wavelet transform in (c), and (e) analysis of semblance between (b) and (d). The dotted line indicates the event time of Sakurajima volcano eruption.

Fig. 6. Results of wavelet based semblance using Kakioka geomagnetic observatory data. (a) observed geomagnetic data, (b) real part of continuous wavelet transform in (a), (c) reconstructed data from principal component analysis, (d) real part of continuous wavelet transform in (c), and (e) semblance between (b) and (d). The dotted line indicates the event time of Sakurajima volcano eruption.

Table 2. Earthquakes around Sakurajima volcano eruption in Japan(Kyushu island, lat 28.8N to 35N, long 126.2E to 135E)

Origin Time(JST)	Latitude	Longitude	JMA Magnitude	Region
2013/08/22, 01:57:35.47	32.6988	132.2762	3.5	hyunganada region
2013/08/20, 02:45:54.21	31.6087	132.0210	3.9	hyunganada region
2013/08/14, 05:59:15.84	31.3870	129.4082	3.6	sw off kyushu
2013/08/11, 11:20:37.86	29.2197	130.4667	4.2	near amami-oshima island

Table 3. Earthquakes around Sakurajima volcano eruption in Japan(Honshu island and hokkaido island, lot 32.1N to 42N, long 131.8E to 144.8E)

Origin Time(JST)	Latitude	Longitude	JMA Magnitude	Region
2013/08/20 23:19:48	38.6437	143.8778	4.2	far E off Miyagi pref
2013/08/20 23:12:13	35.7020	140.8508	3.8	near Choshi city
2013/08/20 15:25:56	40.1410	142.4458	3.6	NE off Iwate pref
2013/08/20 14:02:49	39.7737	142.3730	3.8	E off Iwate pref
2013/08/19 18:35:19	36.6002	141.0570	3.6	E off Ibaraki pref
2013/08/19 11:22:40	36.6310	140.6115	3.8	northern Ibaraki pref
2013/08/19 08:28:02	39.1362	142.8875	3.8	far E off Sanriku
2013/08/19 04:02:20	37.0405	140.6490	3.5	eastern Fukushima pref
2013/08/19 01:36:34	37.6762	141.7492	3.8	E off Fukushima pref
2013/08/18 14:35:24	38.1448	144.4567	4.7	far E off north Honshu
2013/08/18 10:06:00	33.3343	139.3857	3.5	near Hachijojima island
2013/08/18 08:00:59	33.3235	139.3153	4.8	near Hachijojima island
2013/08/17 22:42:23	36.8437	141.3598	3.5	E off Ibaraki pref
2013/08/17 19:20:53	36.5457	141.7212	4.4	far E off Ibaraki pref
2013/08/17 17:50:23	37.8910	144.0660	4.0	far E off north Honshu
2013/08/17 07:20:11	37.8862	144.0258	4.3	far E off north Honshu
2013/08/17 06:14:34	35.6350	140.8717	3.6	near Choshi city
2013/08/17 01:41:31	41.9110	142.3993	4.1	S off Urakawa
2013/08/17 01:28:06	39.5810	142.6817	4.1	E off Iwate pref
2013/08/16 04:03:08	36.4958	141.0735	4.1	E off Ibaraki pref

다란 이벤트가 나타난 것을 확인 할 수 있다. 하지만 청양, 카노야 관측소의 결과와는 다소 다른 양상을 띄고 있으며, 스케일 2,000 부근에서 나타나던 이벤트가 매우 희미한 형태를 보이고 있다. 이와함께 카키오카 관측소 부근에서는 화산 분화 이전부터 화산분화 이후에도 혼슈 동쪽 외곽 바다, 후쿠시마 앞바다 등지에서 하루에도 수차례씩 규모 3.5 이상 5.0 미만의 지진이 계속해서 발생하였다(Table 3). 따라서 Fig. 6의 결과는 전지구적인 요소의 영향일수도 있지만 카키오카 지자기 관측소 인근에서 발생한 다수의 지진의 영향에 대해서도 고려해 볼 수 있다.

Fig. 7은 메맘베쯔 지자기 관측소의 자료를 이용하여 주성분분석 및 웨이블릿 기반 샘플런스 분석을 수행한

결과이다. 샘플런스 분석을 살펴보면 이전의 결과와는 달리 스케일 1,000 부근에서는 화산 분화 시점에 별다른 이벤트가 발생하지는 않았다. 하지만 스케일 2,000 이상의 저주파수 대역에서는 8월 17일부터 8월 19일까지의 기간동안 흐릿하지만 이벤트가 나타난 것을 확인 할 수 있다. Table 3에 의하면 혼슈 상단, 홋카이도 하단 해역에서 17일 한 차례의 지진 발생이후 메맘베쯔 지자기 관측소 인근에서는 지진이 발생하지 않았다.

각 지자기 관측소의 웨이블릿 기반 샘플런스 분석 결과를 종합해 보면 사쿠라지마 화산 분화 시점에서 하루 전후하여, 스케일 1,000 부근에 이벤트가 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 사쿠라지마 화산과의 거리가 상대적으로 멀어지는 카키오카 관측소의 자료와 메맘베쯔 관

Fig. 7. Results of wavelet based semblance using Memambetsu geomagnetic observatory data. (a) observed geomagnetic data, (b) real part of continuous wavelet transform in (a), (c) reconstructed data from principal component analysis, (d) real part of continuous wavelet transform in (c), and (e) analysis of semblance between (b) and (d). The dotted line indicates the event time of Sakurajima volcano eruption.

Fig. 8. Results of wavelet based semblance filtering between Kp index and eigenvalues of third components(λ_3) from Cheongyang geomagnetic observatory data, Apr 1 ~ Aug 31, 2013. (a) Kp index, (b) volcanic event, (c) third components(λ_3) of eigenvalue after filtering, and (d) third components(λ_3) of eigenvalue.

측소의 자료는 이벤트의 형태가 달라지거나 나타나지 않았다. 또한, 대부분의 관측소에서는 스케일 2,000 부근의 저주파수 대역에서 분화 시점을 중심으로 하여 이벤트가 나타나는 양상을 보여주었지만 카키오카 관측소의 자료에서는 다른 관측소의 자료에 비해서 매우 약한 이상만을 보여주었다. 이러한 결과들은 비단 사쿠라지마 화산의 영향뿐만 아니라 관측소 인근에서 발생할 수 있는 국지적 원인이나 전지구적인 원인에 의해서도 영향을 받을 수 있기 때문에 추가적으로 고유값 분석을 수행하고, 웨이블릿 기반 샘플런스 필터링을 통해 Kp 지수의 영향을 최소화하여 사쿠라지마 화산의 영향을 알아보도록 하였다.

Fig. 8은 2013년 4월 1일부터 8월 31일까지의 청양 지자기 관측소의 자료를 이용하여 고유값 분석을 수행한 결과이다. 고유값 분석에서는 단기간보다는 장기간의 자료에서 더 좋은 결과를 보여주기 때문에 샘플런스 분석보다 많은 자료를 이용하여 분석을 실시하였다. Fig. 8(a)는 Kp지수, Fig. 8(b)는 화산 폭발 지수(Volcanic Explosivity Index, VEI), Fig. 8(d)는 지진 활동과 관련이 있는 것으로 알려진 고유값 3성분, Fig. 8(c)는 Fig. 8(d) 고유

값 3성분과 Fig. 8(a) Kp 지수를 샘플런스 필터링을 수행한 결과이다. 본래 지자기장은 태양 활동에 의한 영향에 매우 취약하여, 실제 관측되는 지자기 자료에도 태양 활동에 의한 잡음이 상당수 반영이 되어져 있다. 웨이블릿 필터링은 지자기 관측 자료에서 태양 활동에 의한 잡음을 제거하기 위하여 실시하였다. 따라서 필터링 된 결과(Fig. 8(c))를 살펴보면 필터링 이전의 고유값 3성분(Fig. 8(d))보다 값이 작아지거나 이벤트 자체가 없어진 것을 확인할 수 있다. 다만, Kp 지수의 경우, 각 지역의 관측소에서 측정된 K 지수가 아닌 위도 44~60도 사이의 sub-auroral zone에 위치한 13개의 관측소에서 측정된 K 지수를 통합하여 산출한 전지구적인 K 지수라 할 수 있다. 따라서 연구지역의 국지적인 특성에 대한 고려가 다소 부족하다고 할 수 있으며, 이로 인하여 태양 활동으로 인한 잡음이 완벽하게 제거되었다고는 할 수 없다. Fig. 8(b)의 화산 분화시점을 참조하여 필터링 된 고유값 3성분을 살펴보면 비교적 잠잠하던 고유값이 분화 직후에 급작스럽게 상승한 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 카노야 지자기 관측소에서 측정한 자료를 이용하여 고유값 분석을 수행한 결과이다. Fig. 9(c)를 통해

Fig. 9. Results of wavelet based semblance filtering between Kp index and eigenvalues of third components(λ_3) from Kanoya geomagnetic observatory data, Apr 1 ~ Aug 31, 2013. (a) Kp index, (b) volcanic event, (c) third components(λ_3) of eigenvalue after filtering, and (d) third components(λ_3) of eigenvalue.

Fig. 10. Results of wavelet based semblance filtering between Kp index and eigenvalues of third components(λ_3) from Kakioka geomagnetic observatory data, Apr 1 ~ Aug 31, 2013. (a) Kp index, (b) volcanic event, (c) third components(λ_3) of eigenvalue after filtering, and (d) third components(λ_3) of eigenvalue.

Fig. 11. Results of wavelet based semblance filtering between Kp index and eigenvalues of third components(λ_3) from Memambetsu geomagnetic observatory data, Apr 1 ~ Aug 31, 2013. (a) Kp index, (b) volcanic event, (c) third components(λ_3) of eigenvalue after filtering, and (d) third components(λ_3) of eigenvalue.

서 고유값 3성분과 Kp 지수와의 필터링이 이루어진 것을 확인 할 수 있다. 사쿠라지마 화산 분화 이전까지는 안정된 모습을 보여주던 고유값이 화산 분화 직후에 급격한 변동이 발생한 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 10은 카키오카 지자기 관측소에서 측정한 자료를 이용하여 고유값 분석을 수행한 결과이다. 청양 지자기 관측소와 카노야 지자기 관측소에 비해서 상대적으로 먼 거리에 위치하고 있지만, 화산 분화 이후에 고유값에 변동이 발생하였다.

Fig. 11은 메맘베즈 지자기 관측소의 자료를 이용한 고유값 분석 결과이다. 이전의 결과들에서는 화산 분화 이후에 고유값의 변동이 확연히 나타난 것에 비해, 메맘베즈 자료에서는 아주 작은 변동만이 감지되었다. 이는 다른 관측소들보다 사쿠라지마 화산과의 거리가 확연히 멀기 때문에 매우 적은 영향을 받았을 것으로 생각해 볼 수 있다.

6. 결 과

지자기 관측 자료의 분석을 위해서 주성분 분석 기법 및 웨이블릿 기반 샘플런스 분석 기법, 고유값 분석 기법을 사용하였다. 먼저, 각 관측소의 자료들을 각각 주성분 분석을 통하여 재구성하여 지자기 관측 자료가 가지고 있는 잡음들에 대해 1차적으로 필터링을 수행하였다. 이후 재구성된 자료들을 실제 관측 자료와 함께 웨이블릿 변환하여 샘플런스 분석을 실시하였다(Table 4). 그 결과, 스케일 1,000 부근에서는 메맘베즈 지자기 관측소를 제외한 나머지 관측소의 결과에서 변동이 발생하였으며, 스케일 2,000 부근의 저주파수 영역에서는 카키오카 지자기 관측소를 제외한 나머지 관측소의 결과에서 변동이 발생하였으나, 메맘베즈 관측소의 경우, 청양이나

카노야 관측소의 결과보다 희미한 변동이 나타남으로써 그 영향이 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 하지만 이러한 결과만으로는 화산 분화 시점에서 발생하는 변동이 화산에 의한 영향인지 단순히 추정할 수 없다. 또한, 샘플런스 분석 결과들을 살펴보면 8월 13일과 22일, 24일 경에 형태나 크기에는 다소 차이가 있지만 공통적으로 변동이 발생한 것을 알 수 있다. 이와 같은 신호는 청양 지자기 관측소를 제외하고는 변동 발생 시점에 관측소 주변에서 크고 작은 지진들이 발생하였으며, 자기 폭풍의 정도를 나타내는 Dst 지수가 해당 날짜 부근에서 급격히 증가하거나 감소하는 형태를 나타내었다. 따라서 언급된 변동들은 화산 분화에 의한 영향이라기보다는 다른 요인들에 의한 영향으로 판단될 수 있다.

화산 분화시점에 발생한 이벤트가 화산의 영향으로 인한 것인지 확인하기 위하여 추가적으로 고유값 분석을 실시하여 지자기 변동에 대해 확인하고자 하였다(Table 4). 고유값 분석에서는 일반적으로 3성분이 지진 활동과 연관이 있다고 알려져 있으며, 이 연구에서는 고유값 3성분과 Kp 지수에 대해 샘플런스 필터링을 수행함으로써 태양 활동에 기인한 잡음, 즉 전지구적인 요소를 제거하고자 하였다. 고유값 분석 결과, 사쿠라지마 화산 분화 이후 모든 관측소의 자료에서 변동이 발생하였다. 다만, 메맘베즈 관측소의 경우 매우 작은 형태의 변동만이 발생하여 샘플런스 분석의 결과와 마찬가지로 그 영향을 적게 받은 것을 확인하였다. 이러한 결과들을 종합해보면 카노야 관측소의 경우, 사쿠라지마 화산 바로 인근에 위치해 있기 때문에 화산 분화 이전부터 영향이 나타난다고 할 수 있다. 청양 지자기 관측소는 사쿠라지마 화산과의 거리차가 있음에도 불구하고, 한반도 지각이 일본 열도 지각에 비해서 비저항이 높은 지질적 특징으로 인하여 화산의 영향이 나타난 것으로 판단된다. 카키오카 지자기 관측소는 웨이블릿 기반 샘플런스 분

Table 4. Results of geomagnetic data analysis

Observatory(Obs)	Distance (Sakurajima-Obs)	Related to volcano eruption		Result
		Wavelet based semblance	Eigenvalue	
Kanoya(KNY)	30 km	○	○	○
Cheongyang(CYG)	640 km	○	○	○
Kakioka(KAK)	1020 km	×	○	△
Memambetsu(MMB)	1810 km	×	×	×

석과 고유값 분석에서 변동이 확인되어 화산의 영향이 미세하게 나타났다고 할 수 있으며, 메맘베즈 지자기 관측소는 분석 결과에서 모두 변동이 약하게 나타났으므로 화산의 영향이 매우 적은 것으로 판단 할 수 있다. 하지만 카키오카 지자기 관측소와 메맘베즈 지자기 관측소의 경우, 사쿠라지마 화산과의 거리가 상대적으로 멀고 분석 양상이 청양과 카노야와는 다소 다른 형태를 가지고 있다. 따라서 화산의 영향뿐만이 아니라 두 관측소 인근에서 발생한 지진 등의 국지적인 이벤트의 영향에 대해서도 고려해 볼 수 있다.

7. 결 론

이 연구에서는 일본 규슈 사쿠라지마 화산의 분화(2013년 8월 18일)에 맞추어 2013년 8월 13일부터 2013년 8월 24일까지의 지자기 관측 자료를 이용하여 화산 분화에 의한 지자기 변동에 대해 알아보고자 하였다. 사용된 자료는 기상청에서 운영하고 있는 청양 지자기 관측소의 자료와 일본 기상청에서 운영하고 있는 카노야 지자기 관측소, 카키오카 지자기 관측소, 메맘베즈 지자기 관측소의 자료를 이용하였으며 분석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 사쿠라지마 화산 분화 전후의 지자기 관측 자료들을 주성분 분석 기법을 통해 웨이블릿 기반 샘플링스 분석기법에 적용한 결과, 화산의 영향으로 추정되는 이상을 발견하였다. 또한, Kp지수를 필터링한 고유값 분석 결과에서도 변동이 발생한 것을 확인하였다.
2. 일본에서 화산이 분화하였음에도 불구하고 국내의 청양 지자기 관측 자료에도 그 영향이 미치는 것이 확인되었다. 청양 지자기 관측소의 경우에는 다소 거리가 있음에도 불구하고 한반도 지각의 고비저항적인 특성으로 인해 화산의 영향이 나타난 것으로 추정된다. 더불어, 이 연구에서 목표로한 사쿠라지마 화산의 2013년 8월 18일 분화는 최근에 발생하고 있는 분화중에서도 비교적 커다란 분화였기 때문으로 생각해 볼 수 있다.
3. 모든 관측 자료의 분석 결과에서 화산 분화 시점에 이상이 발견되었지만 카키오카와 메맘베즈 관측

자료에서는 다른 양상 또는 다소 약한 변동을 보여 주었다. 이는 사쿠라지마 화산과 이들 관측소의 거리가 멀기 때문에 그 영향을 상대적으로 적게 받았을 것으로 추정할 수 있다. 또한, 이러한 변동이 관측소 주변에서 발생한 국지적 이벤트의 영향일 가능성도 고려해 주어야 한다.

해외에서는 화산과 관련된 지자기 변동 연구가 수차례 수행되었음에도 불구하고, 국내에서는 활화산이 존재하고 있지 않기 때문에 화산과 관련한 지자기 연구가 수행되는데 어려움이 따랐다. 하지만 이번 연구를 통해 일본 지자기 관측소의 자료와 함께 기상청 청양 지자기 관측소의 자료를 분석함으로써, 화산 분화로 인한 지자기 변동에 대해서 확인 할 수 있었다. 또한, 일본에서 대규모 화산 분화가 발생할 경우, 일본뿐만이 아니라 국내의 지자기에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 거리에 따른 화산의 영향 정도에 대해서는 지속적인 사례 연구의 축적이 이루어져야만 보다 정확한 결론을 이끌어 낼 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 연구 결과는 향후 지진 · 화산 연구를 수행함에 있어 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

This study was supported by 'Research for the Meteorological and Earthquake Observation Technology and Its Application(II)' of National Institute of Meteorological Research and 'Application of Geostationary Ocean Color Imager(GOCI)', funded by the Ministry of Ocean and Fisheries, Korea.

The results presented in this paper rely on the data collected at magnetic observatories. We thanks the national institutes that support them and INTERMAGNET for promoting high standards of magnetic observatory practice (www.terramagnet.org).

References

Choi, G.H., H.J. Kim, M.J. Nam, T.J. Lee, N.R. Han,

- S.K. Lee, Y.H. Song, and J.H. Suh, 2007. A study on geoelectrical structure of Jeju island using 3d mt inversion of 2d profile data, *Muli-Tamsa*, 10(4): 268-274 (in Korean with English abstract).
- Del Negro, C., G. Currenti, R. Napoli, and A. Vicari, 2004. Volcanomagnetic changes accompanying the onset of the 2002-2003 eruption of Mt. Etna (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 229: 1-14.
- Nordemann, D.J.R., N.R. Rigozo, M.P. de Souza Echer, and E. Echer., 2008. Principal components and iterative regression analysis of geophysical series: Application to sunspot number(1750 ~2004). *Computers & Geosciences*, 34: 1443-1453.
- Christensen, A.N., 2003. Semblance filtering of airborne potential field data. In: Extended Abstracts, *Proc. of 16th ASEG Conference and Exhibition*, Adelaide.
- Cooper, G.R.J and D.R. Cowan, 2008. Comparing time series using wavelet-based semblance analysis, *Computer & Geosciences*, 34: 95-102.
- Cooper, G.R.J., 2009. Wavelet-based semblance filtering, *Computer & Geosciences*, 35: 1988-1991.
- Hattori, K., I. Takahashi, C. Yoshino, T. Nagao, J.Y. Liu, and C.F. Shieh, 2002. ULF Geomagnetic and Geopotential data, *Physics and Chemistry of the Earth*, 29: 409-417.
- Hattori, K., I. Takahashi, C. Yoshino, N. Isezaki, H. Iwasaki, M. Harada, K. Kawabata, E. Kopytenko, P. Maltsev, V. Korepanov, O. Molchanov, M. Hayakawa, Y. Noda, T. Nagao, and S. Uyeda, 2004. ULF geomagnetic field measurements in Japan and some recent results associated with Iwateken Nairiku Hokubu Earthquake in 1998. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29: 481-494.
- Hayakawa, M., R. Kawate, O.A. Molchanov, and K. Yumoto, 1996. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during Guam earthquake of 8 August 1993, *Geophysical Research Letters*, 23: 241-244.
- Hayakawa, M., T. Itoh, K. Hattori, and K. Yunmoto, 2000. ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on February 17, 1996, *Geophysical Research Letters*, 27: 1531-1534.
- Hayakawa, M., K. Hattori, and K. Ohta, 2007. Monitoring of ULF(ultra-low-frequency) geomagnetic variation associated with earthquakes, *Sensors*, 7(7): 1108-1122.
- Ji, Y.S., S.H. Oh, and K.Y. Kim, 2012. Wavelet based semblance and eigenvalue analysis for geomagnetic variation related to micro-earthquakes in the Korean peninsula. *Journal of Korean Earth Science Society*, 33(5): 408-421.
- Johnston, M.J.S., R.J. Mueller, and J. Dvorak, 1981. *Volcano-magnetic observations during eruptions May-August 1980*, US Geol. Surv. Prof. Pap. 1250: 183-189.
- Lee, T.J., S.K. Lee, Y.H. Song, and T. Uchida, 2006. Use of audio-band on the interpretation of magnetotelluric data, *Muli-Tamsa*, 9(4): 261-270.
- Lee, T.J., S.K. Lee, C.K. Lee, I.H. Park, Y.H. Song, and T. Uchida, 2008. Three-dimensional magnetotelluric surveys for investigating possible deep geothermal regime in the mid-mountain area of Jeju island. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, 45(4): 315-325.
- Hayakawa, M., K. Hattori and K. Ohta, 2007. Monitoring of ULF(ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes, *Sensors*, 7(7): 1108-1122.
- Oh, S.H., 2009. Variation analysis of geomagnetic data observed around the event of Andong earthquake (May 2, 2009), *Journal of Korean Earth Science Society*, 30(6): 683-691.
- Oh, S.H., B.S. Suh, and E.S. Im, 2009. Wavelet-based

- semblance filtering of geophysical data and its application, *Journal of Korean Earth Science Society*, 30(6): 692-698.
- Oh, S.H., 2012. Geomagnetic variation and its relation to microearthquakes in the seismically inactive Korean peninsula. *Geoscience Journal*, 16(1): 47-58.
- Kawate, R., O.A. Molchanov, and M. Hayakawa, 1998. Ultra-low-frequency magnetic fields during the Guam earthquake of 8 August 1993 and their interpretation, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 105(3): 229-238.
- Sasai, Y., M. Uyeshima, J. Zlotnicki, H. Utada, T. Kagiya, T. Hasimoto, and Y. Takahashi, 2002. Magnetic and electric field observations during the 2000 activity of Miyake-jima volcano, Central Japan, *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 769-777.
- Yang, J.M., H.S. Lee, and S.H. Oh, 2009. A study on temporal variations of geomagnetic transfer functions and polarization values obtained at cheongyang geomagnetic observatory, *Journal of Korean Earth Science Society*, 30(7): 824-833 (in Korean with English abstract).
- Torrence, C., and G.P. Compo, 1998. A practical guide to wavelet analysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 61-78.
- Utada, H., M. Neki, and T. Kagiya, 2000. A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals, *Earth Planets Space*, 52: 91-103.
- van Frese, R.R.B., M.B. Jones, J.W. Kim, and J.H. Kim, 1997. Analysis of anomaly correlations. *Geophysics*, 62(1): 342-351.
- Xu, J., G. Liu, J. Wu, Y. Ming, Q. Wang, D. Cui, Z. Shanguan, B. Pan, X. Lin, and J. Liu, 2012. Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: a precursor of a future eruption, *Geophysical Research Letters*, 39, L16305: 1-7. doi:10.1029/2012GL052600.
- Yun, S.H., H. Taniguchi, H. Wei, and J. Liu, 2007. Volcanic crisis of the Baegdusan. *Proc. of 2007 Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea*, 130-132.
- Yun, S.H., 2013. Volcanological interpretation of historical eruptions of Mt. Baegdusan volcano, *Journal of Korean Earth Science Society*, 6: 456-459 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H., and J.H. Lee, 2011. Volcanological interpretation of historic record of 1702 fallout-ash from the Mt. Baegdusan, *Journal of Petrological Society of Korea*, 20(4): 243-25
- 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: 1-12.
- Zlotnicki, J., and M. Bof, 1998. Volcanomagnetic signals associated with the quasi-continuous activity of the andesitic Merapi volcano, Indonesia: 1990-1995, *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 105: 119-130.