GRACE 인공위성 지오이드 변화와 화산 마그마 활동 간의 상관관계에 대한 예비 연구

오창환¹ · 최승찬^{2,*} · 이덕수³ · 김명덕¹ · 박종현¹ · 서민호³

¹전북대학교 지구환경과학과, 561-756, 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567

²킬 대학교 지구과학연구소, 24118 Kiel, Otto Han Platz 1, Germany

³주식회사 GN 기업부설 연구소, 153-714, 서울특별시 금천구 가산디지털 2로 165

A Preliminary Study on the Correlation between GRACE Satellite Geoid Data Variation and Volcanic Magma Activity

Chang-Whan Oh¹, Sung-Chan Choi^{2,*}, Deok-Su Lee³, Myung-Deok Kim¹,
Jong-Hyun Park¹, and Min-Ho Seo³

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea

²Institute für Geowissenschaften, Abt. Geophysik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel, Germany

³Research Institute of GN Co. Seoul 153-714, Korea

Abstract: In this study, the variations of geoid measured by GRACE satellite are investigated in the 20 volcanic areas erupted since 2005, and it is recognized that a detailed geological study is necessary in using geoid data for a research of the magmatic activities under the volcano. Therefore, the relationship between the regional geoid variation obtained by GRACE satellite and the change of magma activity, is studied in Japan's Shinmoedake volcano in the Kirishima volcanic complex whose eruption in 2011 was studied in detail geologically. Throughout this study the increase of geoid from 2002 in the Shinmoedake volcanic area is confirmed to be caused by the increase of gravity under the volcano, which is well matched with geological interpretation of the continuous intrusion of basaltic magma into magma chamber during several years before the 2011 eruption. The result indicates that information of the geoid variation measured by GRACE satellite is useful for monitoring the possibility of volcanic eruption although there is a need to more study to be able to confirm the possibility.

Keywords: GRACE satellite, gravity, geoid, Kirishima, Shinmoedake volcano

요약: 본 연구에서는 2005년 이후 화산 폭발을 경험한 20개의 화산 지역에 대해 그레이스 위성에서 측정된 지오이드 변화를 조사하였고 지오이드를 이용한 화산 하부의 마그마 활동에 대한 연구를 위해서는 자세한 지질학적 조사가 함께 수반되어야 함을 인지하였다. 따라서 2011년에 화산 폭발이 있었고 그에 대한 지질학적 연구가 자세히 수행된 키리시마 화산복합체 내 신모에다케 화산 지역을 대상으로 그레이스 인공위성을 이용하여 측정된 화산지역의 광역적인 지오이드 변화와 화산하부 마그마 활동 변화 간의 상관성에 대해 연구하였다. 그 결과 신모에다케 화산 지역에서 2002년 이후 계속적으로 증가하는 지오이드 변화는 화산하부 물질의 중력이 증가함에 의해 발생하였음을 확인하였고, 이는

*Corresponding author: choi@geophysik.uni-kiel.de

Tel: +49-431-880-1518

Fax: +49-431-880-1387

기존 연구에서 밝혀진 2011년 화산 폭발 수년 전부터 염기성 마그마가 마그마 저장소로 계속 공급되었다는 사실과 잘 일치한다. 이는 앞으로 많은 연구가 필요하기는 하지만 그레이스 인공위성으로 측정된 지오이드의 변화가 화산 폭발 감시 및 예측에 사용될 수 있는 가능성이 높음을 지시한다.

주요어: 그레이스 인공위성, 중력, 지오이드, 키리시마, 신모에다케 화산

서론

최근 백두산이 분출할 가능성이 확인되면서 백두산 분출 가능성을 감시 예측할 필요성이 높아지고 있다. 하지만 백두산은 중국과 북한의 경계에 위치하고 있기 때문에 백두산 관련 자료를 북한은 물론 중국으로부터 확보하는 것이 매우 어렵다. 따라서 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법이 필요한 실정이다. 화산 하부 마그마 저장소 변화에 대한 모니터링 연구는 화산 분출 예측에 매우 중요하다. 과거에는 화산 분화 전후에 화산지역에서 국부적으로 지표에서 측정된 중력 자료를 이용한 화산 활동에 대한 연구가 많이 수행되어져 왔다(Rymer and Williams, 2000; Carbone et al., 2006; 2007; Williams and Rymer, 2002; Saibi et al., 2010; Tiede et al., 2005; Saepuloh et al., 2010; Carbone et al., 2013; Represas et al., 2012; Okubo et al., 2013). 이들 연구를 통하여 화산 분화 전후에 일어나는 화산 하부의 마그마 저장소의 변화와 마그마의 이동 그리고 그에 따른 화산체의 용기와 침강 및 열수 시스템의 변화에 의해 중력의 변화가 일어남이 확인되었다. 따라서 화산 지역의 중력의 변화는 화산 하부의 마그마 저장소의 활동을 모니터링 할 수 있는 중요한 방법이다.

최근 들어 인공위성을 이용한 지표 및 지하에서 일어난 변화 측정이 활발하게 이루어지고 있으며 이러한 측정치를 이용한 지진, 화산 등의 지구조 운동 예측이 활발하게 시도되고 있다(Fea et al., 2013; Segall, 2013; Jin et al., 2013; Papoutsis et al., 2013). 인공위성을 이용한 지구조 운동 연구 방법은 지정학적 접근이 어려운 지역, 또는 주기적이고 장기적인 관측이 요구되는 모니터링 등에 매우 유용한 장점이 있다. 따라서 인공위성으로 측정된 자료는 백두산과 같이 지정학적으로 접근이 곤란한 지역에 대한 마그마 활동 및 화산 분화 감시 연구 수행에 효과적으로 활용될 수 있다. 하지만 인공위성을 이용한 예측은 SAR (Synthetic Aperture Radar)를 이용한 고도의 변화 측정이 주를 이루고 있으며(Saepuloh et al., 2010; Papoutsis et al., 2013) 인공위성에 의하여

측정된 중력 자료를 이용한 화산 하부의 마그마 저장소 변화 예측은 거의 시도되지 못하고 있다. 최근 들어 인공위성에 의한 중력 측정의 정확도가 계속 개선되고 있으며 본 연구팀은 최초로 인공위성에 의하여 측정된 중력 및 지오이드 자료를 이용하여 백두산 하부의 마그마 저장소에 대한 연구를 수행하여 백두산 하부 5 km 지하에 존재하는 새로운 마그마 저장소를 성공적으로 규명하였으며(Choi et al., 2013), 2002-2005년 사이 백두산 화산지역에 이상 현상이 발생하였을 때 중력과 지오이드의 변화가 일어났음을 인지하였다(Lee et al., 2013). 이는 인공위성에 의해 측정된 중력 및 지오이드를 이용한 화산하부의 마그마 저장소의 변화와 화산분출 예측이 가능할 수 있음을 지시한다.

본 연구에 활용된 그레이스(Grace: Gravity Recovery and Climate Experiment) 인공위성은 두 위성간의 속도변화를 측정하여 중력장 변화를 결정한다. 그레이스 위성의 주 임무는 지구 중력장 모델을 결정하고, 지구 중력장의 시·공간적 변화를 탐지하는 것이다. 독일 포츠담 지구과학 연구소에서 주기별(약 30일에 한번 정도)로 제공된 자료들로부터 계산된 그레이스 지오이드 자료와 중력자료, 수분량 자료 등을 사용자에게 제공하고 있다. 따라서 본 연구에서는 2011년 화산이 분출한 일본의 신모에다케 화산을 대상으로 그레이스 인공위성에서 측정된 지오이드의 변화와 지질조사를 통해 연구된 분출시점과 그 이전의 화산 하부 마그마 저장소의 변화간의 상관관계에 대한 연구를 통하여 인공위성의 지오이드 자료의 화산 분출 예측에 활용 가능성을 제시하고자한다.

그레이스 인공위성과 지오이드

그레이스 인공위성

그레이스 인공위성은 미국 항공우주국(NASA)과 독일 항공우주센터(DLR)가 공동으로 개발한 위성시스템으로 전 지구적인 지구 중력장의 중·장파장 성분 측정과 지구 중력장의 경년변화의 측정을 수행하

Fig. 1. GRACE satellite instruments and its functions.

며 전 세계적으로 이를 바탕으로 한 대기과 전리층 연구가 활발히 진행되고 있다. 그레이스 인공위성으로부터 얻어진 중력 데이터는 전 지구 중력장 모델의 정밀도 향상에 획기적으로 기여하였다. 그레이스 위성은 고도 450 km를 비행하는 두 개의 쌍둥이 위성(위성간 거리 약 220 km)으로 구성되며, 사다리꼴 모양의 각각의 위성(Tom, Jerry)에는 자세제어를 위한 2대의 STAR 카메라와 GPS 수신기가 장착되어 있다(Fig. 1). 그레이스 인공위성에 탑재된 가속도계(Accelerometer)가 두 위성이 지구 주위를 돌 때, 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 일어나게 될 때 발생하는 그 위성간 거리변화율(range rate) 즉, 두위성의 속도 변화를 H-L SST 방식으로 측정한다. 에너지 보존법칙에 의해 중력장에 의한 위치에너지와 운동에너지의 합이 일정하므로 측정된 속도의 변화에 의해 중력장 변화를 결정될 수 있다(Huang, 2010). 그레이스 인공위성은 에너지 보존 법칙을 바탕으로 두 위성간의 속도 변화율을 역산하여 지구 중력장을 계산해 내고 계산된 자료를 지상으로 송신한다. 그레이스 인공위성은 이미 설계 수명(5년)을 초과하여 운

행케도가 약 5 m day^{-1} 의 속도로 낮아지고 있지만, 현재까지 정상적으로 운용되고 있으며, 위성자세를 제어하는 추진체가 완전히 소모되는 2013년까지 운행될 예정이다.

그간 그레이스 인공위성에 의해 약 30일 마다 제공되는 월별 중력장 자료는 지진 후 중력변화나 토양 수분함량, 산악빙하, 대륙빙하 변화와 같은 지구 시스템의 질량재분배 과정에서 발생하는 미소한 중력변화를 검출할 수 있어 다양한 지구 물리학적 현상에 대한 연구와 전 지구적 물순환, 해수면변화, 빙하 지각균형 조정과 같은 지구 모니터링에도 활용되어 왔다(Huang, 2010). 대표적인 예로 그레이스 인공위성에서 얻어진 중력 자료는 남극과 그린란드섬의 총 얼음 용해율 연구, 빙하 후 지각융기연구, GPS 기술을 이용한 지각변동 연구, 육지 저수량 변화 연구, 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).

지오이드 자료

그레이스 인공위성은 과거 수십 년간 관측한 중력 데이터 보다 더 많은 양의 중력데이터를 측정하였으

며 월별로 약 400 km의 공간 해상도에서 2-3 mm에 달하는 고정밀도의 중력장 시계열변화 분석이 가능하다(Tapley et al., 2004; Huang, 2010). 지구 중력장 모델은 지구 중력장을 수학적으로 형상화하기 위한 일반적인 표현 방법으로서 지구척도(global-scale)에서의 측지학적 경계치 문제(geodetic boundary value problems)를 구면조화 전개(球面調和展開)의 형식으로 해석한 결과이며, 구면조화 계수로 구성된다(Huang, 2010). 현재까지 개발된 전 지구 중력장 모델은 1965년의 SEI 모델을 시작으로 100여개에 달하며, 중력장 모델의 최고차수도 360차를 초과하여 초고차항으로 발전하고 있다. 고해상도, 고정밀도의 전 지구 중력장 모델은 현대측지학, 지구물리학, 지구동력학 및 해양학 등 다양한 과학 분야의 발전에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 그리고 지구시스템에서 발생하는 복잡한 질량 재분배와 질량 이동과정은 지구 중력장의 시공간적 분포의 변화로 표현되며, 지구 중력장의 변화로부터 지구 시스템 내부의 질량 이동과 변화 양상을 탐지 할 수 있다.

지오이드(geoid)는 지구중력장의 등포텐셜면 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. 따라서 그레이스 인공위성에 의해 측정되는 지오이드는 화산 하부의 마그마 저장소의 변화를 연구하는데 활용할 수 있다. 육지 저수량에는 육지상의 모든 수분형태인 지표수, 눈, 토양속의 수분, 지하수 등이 포함되며 이를 TWS (Terrestrial Water Storage)라고 하며 광역적인 육지 저수량에 대한 연구가 지오이드 관측결과와 수문학적 모델을 비교하여 수행되고 있다(Swenson and Wahr 2006; Frappart et al., 2006; Yeh et al., 2006). 예로 남극과 아마존 그리고 적도에 가까운 아시아 지역은 계절에 따라서 지표면이 함유하는 수분 혹은 얼음의 양이 뚜렷하게 변화하는 곳이기 때문에 지오이드변화가 계절에 따라 매우 뚜렷하게 나타난다. 이는 지오이드가 마그마 저장소의 변화와 같은 지질학적 변화 뿐 아니라 강우에 따른 육지 저수량에 의해 영향을 받음을 의미한다. 또한 지오이드는 화산 분출 전 화산지역 용기와 화산 분출 후 화산지역 침강에 의해서도 변화될 수 있다. 즉 지오이드는 화산 하부의 마그마

저장소의 변화 뿐 아니라 강우의 변화에 따른 지하수 혹은 적설량의 변화에 영향을 받으며 화산 분출 전 후의 지표의 상승과 침강에 의해서도 영향을 받는다. 그리고 마그마 분출 후 새로이 생성된 지각에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 육지저수량의 변화, 화산 고도의 변화 그리고 새로운 지각 형성 등에 의한 효과들을 제거해야만 지오이드 변화를 이용하여 마그마 저장소의 변화를 유추할 수 있다.

본 연구에서는 독일 포츠담 지구과학 연구소가 그레이스 인공위성에서 측정된 중력 자료로부터 WGS84 지구타원체 모델을 이용하여 계산하여 제공하는 주기별(약 30일에 한번 정도) 지오이드 값을 이용하였다. 그레이스 위성으로부터 얻어진 지오이드 데이터는 동일한 지역에서도 그 값이 계속적으로 변화하는 경우가 많다. 동일한 지역에서 시간에 따른 지오이드의 변화는 그 지역을 구성하는 물질의 양 혹은 밀도의 변화에 의해 생성된다. 본 연구에서는 그레이스 인공위성에 의해 제공된 연구 대상이 되는 화산 정상부 지역에 대한 2003년부터 2012년까지의 지오이드 데이터를 독일 포츠담연구소에서(<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>) 획득하여 사용하였다.

세계 화산지역의 지오이드 변화

최근 폭발한 세계 화산 중 20여개 화산(Table 1)을 선정하여 그레이스 인공위성에 의하여 측정된 화산 정상부 주변의 지오이드 값의 변화를 분석하였다. 세계 20여개 화산 폭발 지역 중 2003년부터 2012년까지 8개 화산지역 정상부에서의 지오이드 변화는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 보이는 각 화산 지역의 지오이드 변화는 매우 다양하며 화산 폭발 시점 이전과 이후의 지오이드 변화는 각 화산마다 각기 다르다. 지오이드의 변화와 화산 폭발 시점을 비교해 볼 때 지오이드가 상승하는 시점에서 폭발하는 경우(Fig. 2의 e, f, g, h)와 지오이드가 하강하는 시점에서 폭발하는 경우(Fig. 2의 a, b, c, d)가 인지되며 때로는 동일 화산에서도 지오이드가 상승 또는 하강하는 시점 모두에서 폭발하는 경우도 나타난다. 그리고 지오이드가 상승하는 시점에서 폭발하는 경우 폭발 후에도 지오이드 값이 상승하는 경우(Fig. 2의 e, f)와 폭발 후 하강하는 경우(Fig. 2의 g, h)로 나눌 수 있다. 지오이드가 하강하는 시점에서 폭발하는 경우도 역시 폭발 후 상승하는 경우(Fig. 2의 a, b, d)와 계속해서 하강하는 경우(Fig. 2의 c)로 구분된다.

Table 1. The list of recently erupted volcanos in the world(2005~2012)

Year	Month	Day	Name	Location	Country	Latitude	Longitude	Elevation	Type
2005	11	24	Karthala	Indian_O-W	Comoros	-11.75	43.38	2361	Shield_volcano
2006	3	17	Raoul_Island	Kermadec_Is	New-Zealand	-29.27	-177.92	516	Stratovolcano
2006	5	20	Soufriere-Hills	W-Indies	Montserrat	16.72	-62.18	915	Stratovolcano
2006	6	7	Bulusan	Luzon-Philippines	Philippines	12.77	124.05	1565	Stratovolcano
2006	6	14	Merapi	Java	Indonesia	-7.542	110.442	2947	Stratovolcano
2006	7	13	Mayon	Luzon-Philippines	Philippines	13.257	123.685	2462	Stratovolcano
2006	7	18	Tungurahua	Ecuador	Ecuador	-1.467	-78.442	5023	Stratovolcano
2006	8	17	Tungurahua	Ecuador	Ecuador	-1.467	-78.442	5023	Stratovolcano
2007	4	18	Huila	Colombia	Colombia	2.92	-76.05	5365	Stratovolcano
2007	9	30	Tair	Jebel_Redsea	Yemen	15.7	41.742	244	Stratovolcano
2008	5	2	Chaiten	Chile-S	Chile	-42.833	-72.646	962	Caldera
2008	8	8	Kasatochi	Aleutian	USA	52.18	-175.5	314	Stratovolcano
2008	8	22	Tungurahua	Ecuador	Ecuador	-1.467	-78.442	5023	Stratovolcano
2008	11	20	Huila	Colombia	Colombia	2.92	-76.05	5365	Stratovolcano
2009	3	23	Redoubt	Alaska-SW	USA	60.48	-152.75	3108	Stratovolcano
2009	11	30	Kilauea	Hawaiian	USA	19.425	-155.292	1222	Shield
2010	3	31	Eyjafjallajokull	Iceland-S	Iceland	63.63	-19.62	1666	Stratovolcano
2010	5	27	Pacaya	Guatemala	Guatemala	14.381	-90.601	2552	Complex
2010	5	29	Sarigan	Mariana	USA	16.708	145.78	538	Stratovolcano
2010	8	6	Karangetang	Sangihe_Is	Indonesia	2.78	125.48	1784	Stratovolcano
2010	8	30	Sinabung	Sumatra	Indonesia	3.17	98.392	2460	Stratovolcano
2010	10	26	Merapi	Java	Indonesia	-7.542	110.442	2947	Stratovolcano
2010	12	28	Tengger_Caldera	Java	Indonesia	-7.942	112.95	2329	Stratovolcano
2011	1	3	Merapi	Java	Indonesia	-7.542	110.442	2947	Stratovolcano
2011	1	28	Kirishima	Kyushu-Japan	Japan	31.93	130.87	1700	Shield
2011	2	23	Bulusan	Luzon-Philippines	Philippines	12.77	124.05	1565	Stratovolcano
2011	3	18	Karangetang	Sangihe	Indonesia	2.78	125.48	1784	Stratovolcano
2011	6	4	Puyehue	Chile-C	Chile	-40.59	-72.117	2236	Stratovolcano
2011	6	22	Nabro	Africa-NE	Eritrea	13.37	41.7	2218	Stratovolcano
2011	7	9	Katla	Iceland-S	Iceland	63.63	-19.05	1512	Subglacial
2011	7	17	Lokon-Empung	Sulawesi-Indonesia	Indonesia	1.358	124.792	1580	Stratovolcano
2011	12	27	Gamalama	Halmaheira-Indonesia	Indonesia	0.8	127.325	1715	Stratovolcano
2012	2	10	Kilauea	Hawaiian	USA	19.425	-155.292	1222	Shield

이러한 화산 폭발 시점 전 후의 지오이드 변화의 다양성은 지오이드가 화산이 폭발한 시점의 마그마의 유입이나 유출, 휘발성 기체의 증가와 같은 마그마 성분과 밀도의 변화 등과 같은 지질학적 프로세스에 따라 변할 뿐 아니라 화산 폭발 이전과 이후의 고도의 증감 그리고 기상 변화에 따른 지하수나 적설량의 변화에 따라 변화하기 때문이다. 따라서 지오이드를 이용한 화산 하부 마그마 저장소의 변화를 명확하게 연구하기 위해서는 화산 고도의 증감과 기상의 변화 자료를 확보하여 이들의 지오이드의 변화에 대한 영향을 확인하여야 하며 또한 각 화산 지역에서 일어난 마그마 유입 및 유출, 마그마 성분 및 밀도 변화와 같은 지질학적 현상에 대한 연구가 자세히

수행되어야 한다. 즉 그레이스 인공위성에 의해 측정된 지오이드 자료만으로는 화산 지역 하부의 마그마 저장소의 변화 예측이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 2011년 화산 폭발 이전과 이후의 마그마 저장소의 변화에 대한 지질학적 연구가 자세하게 수행된 키리시마 화산복합체내의 신모에다케 화산 지역을 대상으로 마그마 저장소의 변화와 그레이스 인공위성에 의하여 측정된 지오이드 변화 간의 연관성을 해석하였고 이를 바탕으로 그레이스 인공위성에 의해 측정된 지오이드 값의 변화가 화산 하부의 마그마 저장소의 변화와 화산 폭발 감시에 활용할 가능성이 있는가를 연구하였다.

Fig. 2. The geoid variation obtained by GRACE satellite on the recently (2005-2012) erupted volcanos in the world. Black circle represents the time of eruption.

Fig. 3. Location of the Kirishima Volcanic Complex, and aerial view of the central part of it showing the pyroclastic cone of Shinmoedake Volcano with a crater of diameter approximately 800 m (after Miyabuchi et al., 2013).

키리시마 화산복합체 지역의 지오이드 변화와 마그마 저장소 변화와의 연관성

키리시마 화산복합체내 신모에다케 화산 분출에 대한 지질조사 결과

일본 서남부 큐슈 지역에는 필리핀 해양판이 일본 밑으로 섭입을 하고 있으며 이로 인해 화산호가 형성되어있다. 키리시마 화산복합체(Kirishima volcanic complex)는 이러한 화산호의 일부로서 동서로 약 30 km, 남북으로 약 25 km 범위에 걸쳐 있으며, 25 개 이상의 성층화산체와 2개의 칼데라로 구성되어있다(Imura, 1994; Imura and Kobayashi, 2001) (Fig. 3). 키리시마 화산복합체는 60만년 전(600 ka) 이후로 계속해서 활동하고 있으며, 주요 화산으로는 Kurinodake (200-100 ka), Ebinodake (100-50 ka), Onamiike (45 ka), Ohatayama (45-38 ka), Hinamoriidake (38 ka), Futagoishi (38-30 ka), Iimoriyama (29-22 ka), Karakunidake (the highest peak of Kirishima Volcano; 22-15 ka), Koshikidake, Shinmoedake (10.4 ka-현재) 등이 있다(Nagaoka and Okuno, 2011). 이 중 신모에다케(Shinmoedake) 화산은 안산암질 성층 화산으로 키리시마 화산 복합체의 중앙부에 위치하고 있으며 화구는 직경이 800 m 그리고 깊이가 180 m이다. 신모에다케 화산은 10.3 ka에 활동을 시작하여 1716-1717년에 가장 크게 폭발하였으며 최근까지 분출이 계속되

고 있다(Miyabuchi et al., 2013). 최근 분출이 일어난 2011년에는 1월부터 일련의 분출이 시작되었고 분출 13개월 이전부터 마그마 공급에 의하여 화산이 용기를 시작하였다. 화산 분출에 의해 형성된 테프라는 5 개의 단위층(unit)으로 나뉜다. 단위층 1은 암편이 많은 세립질 화산재로 구성되어 있으며 2011년 1월 19일에 소규모 증기마그마(phreatomagmatic) 분출에 의해 형성되었다. 단위층 2는 분급이 아주 잘된 부석층으로 1월 26일 저녁과 1월 27일 아침 사이에 플리니안식(plinian) 분출에 의해 퇴적되었고 2011년 분출 과정에서 이 시기의 분출이 가장 규모가 컸다. 단위층 3은 1월 27일 오후에 분출한 테프라에 의해 형성되었다. 단위층 4는 세립질 화산재층으로 1월 28일과 29일 사이에 형성되었다. 단위층 5는 암편이 많은 중립질 내지 조립질 화산재층이며 3월 15일에 큰 규모의 불칸식(vulcanian) 폭발에 의해 형성되었다. 그리고 8월 31일에는 세립질이며 많은 용암 조각과 변질 암편을 포함하는 화산재층이 형성되었다. 이들 화산 암층에 의해 예상되는 폭발 과정은 Fig. 4와 같다(Miyabuchi et al., 2013). 단위층 2에 나타나는 황회색의 부석은 Fig. 4a에서와 같이 신모에다케 화산 하부의 마그마 저장소에서 화산 폭발 전 최소 2개 이상의 마그마가 혼합되었음을 지시한다(Hoshida et al., 2011; Tomiya et al., 2011; Suzuki et al., 2013). 염기성 마그마가 산성 마그마로 구성된 기존의 마그

Fig. 4. Schematic illustration showing the sequence of the 2011 eruption at Shinmoedake volcano within the Kirishima volcanic complex (after Miyabuchi et al., 2013).

마 저장소에 새로이 공급되면서 두 마그마의 일부가 혼합되어 중성질 마그마가 형성되고 이들이 마그마 저장소 상부로 이동되었을 것으로 생각되고 있다. 그리고 Tomiya et al. (2011)은 자철석 반정내에 나타나는 누대 구조로부터 염기성 마그마가 분출 수년 전부터 지속적으로 마그마 저장소에 공급되었을 것이라는 것을 확인하였다. 최종적으로 마그마 상부로 이동된 중성질 마그마가 1월 26일 오후와 27일 오전에 분출하여 황회색의 부석층인 단위층 2를 형성하였다. 그 이후 혼합되지 않은 저온의 산성 마그마가 Fig. 4d에서와 같이 27일 오후에 분출 및 퇴적되어 회백색의 부석층으로 구성된 단위층 3을 형성하였다. 그 이후 혼합되지 않은 고온의 염기성 마그마가 1월 27일과 2월 2일 사이에 분출하여 화구 주변에 염기성

용암이 형성되었다. 1월 28일과 29일 사이에는 염기성 마그마와 함께 세립질 화산재가 분출 및 퇴적되어 화구의 남동부에 국부적으로 단위층 4를 형성하였다. 단위층 4에는 부석의 양이 3% 정도로 크게 줄어들고 용암 파편과 광물 입자가 각각 59%와 39%로 늘어난다. 단위층 4 내에 나타나는 신선한 용암 파편은 화구 내부에 고화되어 있던 용암으로부터 공급된 것으로 생각된다. 2월 14일부터 볼칸식 폭발이 일어나기 시작했으며 3월 13일에 가장 큰 볼칸식 폭발이 일어나 단위층 5를 형성하였다. 단위층 5는 용암 파편이 80% 이상이며 용암 파편들의 일부는 화구 내부에서 고화된 용암으로부터 공급되었을 것으로 판단된다. 3월 13일 폭발시 화구내의 용암 뿐 아니라 마그마 저장소내의 마그마가 동시에 분출되었다. 8월

31일에서 9월 7일 사이에 최후 폭발이 일어났으며 이때 분출된 화산재층은 많은 압편을 포함하고 있으며 이들 중 많은 것이 유리질 용암 파편이지만 일부는 변질된 압편이다. 이는 4월부터 감소된 분출에 의해 1월부터 3월 사이에 분출된 마그마가 화구내에서 고화되었고 그 후 변질을 받은 후 이중 일부가 신선한 용암 파편 및 화산재와 함께 8월 31일 폭발시에 분출하였음을 지시한다.

위에 언급된 지질학적인 조사 결과는 신모에다케 화산 하부에서 다음과 같은 마그마 활동이 있었음을 지시한다. 신모에다케 화산 하부의 마그마 저장소에는 저온의 산성 마그마가 존재하고 있었고 이 마그마 저장소 하부로 염기성 마그마가 계속적으로 공급되어 왔다. 이들 염기성 마그마는 일본 열도 앞에서 일어나고 있는 해양지각의 섭입작용에 의해 공급된 물에 의해 용융점이 감소한 맨틀이 부분 용융되면서 형성되었을 것으로 판단된다. 따라서 계속적인 섭입작용은 염기성 마그마를 계속적으로 신모에다케 화산 하부의 마그마 저장소로 공급하는데 중요한 역할을 하였다. 2013년 8월에 일어난 사쿠라지마(Sakurajima) 화산 폭발을 볼 때 이러한 계속적인 염기성 마그마 공급은 신모에다케 화산을 포함한 큐수 지방의 화산호 지역의 마그마 저장소에서 전반적으로 일어나고 있을 것으로 예측된다. 이렇게 공급된 염기성 마그마는 산성 마그마와 접하게 되고 이들 두 마그마의 일부는 섞여서 중성질의 마그마가 되었고 이 과정에서 기포가 많이 만들어짐에 따라 중성질 마그마가 가벼워져 마그마 저장소 상부로 이동하였을 것이다. 이 과정이 계속되면서 마그마 저장소 내의 마그마 양은 계속 증가하고, 기포 발생에 의한 부피 증가에 의해 밀도가 감소하면서 마그마 저장소에 큰 압력이 가해져 마침내 2011년 신모에다케 화산이 폭발하게 된 것으로 판단된다. 따라서 최초 폭발 시에는 마그마 저장소 상부의 중성암질 마그마가 분출하고 그 이후 상대적으로 가벼운 산성 마그마가 그리고 그에 이어 상대적으로 무거운 염기성 마그마가 분출하면서 최종적으로 화구 내에 염기성 화산암 돔을 형성하였다. 이러한 분출 마그마 성분의 변화에 따라 분출 형태가 플리니안식에서 불칸식으로 변화하였다.

신모에다케 화산 주변의 지오이드 변화와 그 의미

Fig. 5는 그레이스 인공위성에 의해 2002년 중반부터 2013년 초까지 신모에다케 화산을 포함한 키리시

Fig. 5. Geoid and Rainfall variations in the Shimoedake volcano area within the Kirishima volcano complex during 2002-2014. The black boxes with a and b represent, respectively, the time of Shimoedake volcano eruption and that of Sakurajima volcano eruption.

마 화산복합체 주변에서 약 30일 단위로 측정된 지오이드의 변화를 도시하였다. 또한 동일한 시기에 NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov>) 연구소에 의해 신모에다케 화산을 포함한 키리시마 화산복합체 주변에서 측정된 강우량의 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 지오이드는 최대 0.45 mm에서 최소 -0.45 mm를 값을 보여주며 각 년도마다 계절에 따른 월 별 변화를 보여준다. 한편 강우량은 최대 12 mm day^{-1} 에서 최소 0.5 mm day^{-1} 의 변화를 보여주며 지오이드와 마찬가지로 각 년도별 월 별 변화를 보여준다. 그리고 전반적으로 강우량이 많은 달에 지오이드가 높아지는 현상을 보여주며 이는 강우량에 의한 수자원 증가가 중력을 증가시켜 지오이드를 증가시키고 있음을 지시한다. 하지만 강우량의 연 평균은 2002년부터 2012년까지 큰 변화가 없는데 반해 지오이드의 연 평균은 2002년부터 2011년 화산 폭발이 있을 때까지 0.05 mm에서 0.2 mm로 계속적으로 증가한다. 이는 2002년부터 2011년까지 강우량에 의한 지오이드 증가는 변화가 없으나 신모에다케 지하의 마그마 활동에 의한 지오이드 증가는 계속 증가함을 의미한다. 그리고 분명하지는 않지만 2011년 화산 폭발 이후에는 지오이드 증가율이 감소하는 경향을 보여주는 듯하다. 즉 신모에다케 화산 지역에서 그레이스 인공위성에 의해 관측된 지오이드 변화는 강우량에 의한 수자원 양의 변화에 따른 중력의 변화와 지하의 마그마 활동의 변화에 따른 중력의 변화에 의해 영향을 받고 있는데 강우량의 변화에 의한 영향은 2002

년부터 2012년까지 대체로 일정한 반면 지하 물질의 변화와 이동에 의한 중력 변화가 2002년 이후 2011년 화산 폭발 시점까지 점차적으로 증가하고 있음을 지시한다. 그리고 이러한 지오이드의 증가는 신모에다케 하부 마그마 저장소에 새로운 마그마의 유입에 의한 중력 증가에 의해 발생하였을 것으로 예측된다. 그레이스 인공위성에 의하여 측정된 지오이드의 변화로부터 예측된 2002년부터 2011년 폭발시 까지의 지속적인 마그마의 유입은 지질학적 조사를 바탕으로 Tomiya et al. (2011)에 의하여 제시된 2011년 폭발 수년전부터 계속적으로 염기성 마그마가 유입되었다는 해석과 잘 일치한다. 화산 폭발 이전 수년 동안 산성 마그마와 염기성 마그마의 혼합이 일어날 때 기포 형성에 의해 마그마 저장소 내 마그마의 밀도가 감소하고 기포가 화산 외부로 빠져나가면서 중력이 감소하였을 가능성이 있다. 하지만 2002년 이후 2011년까지 지오이드 값의 지속적인 증가는 기포 형성과 외부로의 유출에 의한 중력의 감소보다 새로운 염기성 마그마의 유입에 의한 중력의 증가가 더 컸음을 의미한다. 이러한 연구 결과는 그레이스 인공위성에 의해 측정된 지오이드 변화를 화산 하부의 마그마 저장소의 변화 연구와, 더 나아가 화산 폭발 감시에 사용할 수 있는 가능성이 있음을 지시한다. 향후 지오이드에 변화에 대한 강우량에 의한 영향을 정확히 측정하고 또한 마그마 저장소 팽창에 따른 화산체의 상승 높이에 의한 지오이드 영향을 평가할 수 있다면, 지오이드 변화를 마그마 유입에 의한 마그마 저장소의 정량적 변화를 추정하는데 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

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

References

- Carbone, D., Zuccarello, L., Saccorotti, G., and Greco, F., 2006, Analysis of simultaneous gravity and tremor anomalies observed during the 2002-2003 Etna eruption. *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 616-629.
- Carbone, D., Budetta, G., Greco, F., and Zuccarello, L., 2007, A data sequence acquired at Mt. Etna during the 2002-2003 eruption highlights the potential of continuous gravity observations as a tool to monitor and study active volcanoes. *Journal of Geodynamics*, 43, 320-329.
- Carbone, D., Poland, M.P., Patrick, M.R., and Orr, T.R., 2013, Continuous gravity measurements reveal a low-density lava lake at Kilauea Volcano, Hawaii. *Earth and Planetary Science Letters*, 176, 178-185.
- Chen, J.L., Wilson, C.R. and Tapley, B.D., 2006, Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet. *Science*, 313, 1958-1960.
- Choi, S.H., Oh, C.H., and Goetz, H.J., 2013, Three-dimensional density modeling of the EGM2008 gravity field over the Mount Paekdu volcanic area. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1-17.
- Fea, M., Giacomelli, M., Pesaresi, C., and Scandone, R., 2013, Remote sensing and interdisciplinary approach for studying volcano environment and activity. *Journal of Research and Didactics in Geography*. doi: 10.4458/0900-14.
- 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.
- Hoshida, T., Toramaru, A., Ikehata, K., and Iriyama, Y., 2011, Magma mixing and ascent process of Shinmoedake 2011 eruption from phenocrysts, microlite, vesicle textures. *Japan Geoscience Union Meeting 2011 Abstracts*, SVC070-P12.
- Huang, H., 2010, Evaluation of GRACE Satellite gravity field model and detection of Earth's Gravity field variations. Ph. D. dissertation, Sungkyunkwan University, 154 p.
- Imura, R., 1994, Geology of Kirishima Volcano. *Bulletin of Earthquake Research Institute of the University of Tokyo* 69, 189-209 (in Japanese with English abstract).
- Imura, R. and Kobayashi, T., 2001, Geological map of Kirishima Volcano (1:50,000). *Geological Map of Volcanoes 11*, Geological Survey of Japan (in Japanese with English abstract).
- Jin, S., Dam, V., and Wdowinski, S., 2013, Observing and understanding the Earth system variations from space geodesy. *Journal of Geodynamics*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2013.08.001>.
- Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A., and Suzuki, Y., 2013, Magma discharge variation during the 2011 eruptions of shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations. *Bulletin of Volcanology*, doi: 10.1007/s00445-013-0695-4.
- Lee, D.S., Choi, S.C., Oh, C.H., Seo, M.H., Ryu, I.C., 2013, The Study on the Possibility of Using Satellite in Monitoring Precursor of Magma Activity in the

- Baegdusan Volcano. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 35-47.
- Miyabuchi, Y., Hanada, D., Niimi, H., and Kobayashi, T., 2013, Stratigraphy, grain-size and component characteristics of the 2011 Shinmoedake eruption deposits, Kirishima Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 258, 31-46.
- Nagaoka, S. and Okuno, M., 2011, Tephrochronology and eruptive history of Kirishima volcano in southern Japan. *Quaternary International*, 246, 260-269.
- Okubo, S., Tanaka, Y., Ueki, S., Oshima, H., Maekawa, T., and Imanishi, Y., 2013, Gravity variation around Shinmoe-dake volcano from February 2011 through March 2012-Results of continuous absolute gravity observation and repeated hybrid gravity measurements. *Earth Planets and Space*, 65, 563-571.
- Papoutsis, I., Papanikolaou, X., Floyd, M., Ji, K.H., Kontoes, C., Paradissis D., and Zacharis, V., 2013, Mapping inflation at Santorini volcano, Greece, using GPS and InSAR. *Geophysical Research Letters*, 40, 267-272.
- Represas, P., Catalão, J., Montesinos, F.G., Madeira, J., Mata, J., Antunes, C., and Moreira, M., 2012, Constraints on the structure of Maio Island (Cape Verde) by a three-dimensional gravity model: imaging partially exhumed magma chambers. *Geophysical Journal International*, 190, 931-940.
- Rymer, H. and Williams, J.G., 2000, Volcanic eruption prediction: Magma chamber physics from gravity and deformation measurements. *Geophysical Research Letters*, 27, 2389-2392.
- Saepuloh, A., Koike, K., Omura, M., Iguchi, M., and Setiawan, A., 2010, SAR- and gravity change-based characterization of the distribution pattern of pyroclastic flow deposits at Mt. Merapi during the past 10 years. *Bulletin of Volcanology*, 72, 221-232.
- Saibi, H., Gottsmann, J., and Ehara, S., 2010, Post-eruptive gravity changes from 1999 to 2004 at Unzen volcano (Japan): A window into shallow aquifer and hydrothermal dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 191, 137-147.
- Segall, P., 2013, Volcano deformation and eruption forecasting. The Geological Society of London, doi:10.1144/SP380.4.
- Suzuki, Y., Yasuda, A., Hokanishi, N., Kaneko, T., Nakada, S., and Fujii, T., 2013, Syneruptive deep magma transfer and shallow magma remobilization during the 2011 eruption of Shinmoe-dake. Japan-Constraints from melt inclusions and phase equilibria experiments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257, 184-204.
- Swenson, S. and Wahr, J., 2006, Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophysical Research Letters*, 33, L08402, doi:10.1029/2005GL025285.
- 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.
- Tiede, C., Camacho, A.G., Gerstenecker, C., Fernández, J., and Suyanto, I., 2005, Modeling the density at Merapi volcano area, Indonesia, via the inverse gravimetric problem. *An Electronic Journal of the Earth Sciences*, doi:10.1029/2005GC000986.
- Tomiya, A., Saito, G., Geshi, N., and Miyagi, I., 2011, Injection of hot mafic magma prior to the 2011 eruption of Shinmoedake, Kirishima volcano, Japan. *Japan Geoscience Union Meeting*, SVC070-P09.
- Williams, J.G. and Rymer, H., 2002, Detecting volcanic eruption precursors: a new method using gravity and deformation measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 379-389.
- Yeh, P.J.F., Swenson, S.C., Famiglietti, J.S., and Rodell, M., 2006, Remote sensing of groundwater storage changes in Illinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research*, 42, W12203, doi:10.1029/2006WR005374.

2013년 9월 23일 접수
2013년 10월 1일 수정원고 접수
2013년 10월 7일 채택