

지진을 이용한 화산감시

한아림 · 박이슬 · 김기영*

강원대학교 지구물리학과

Volcano Monitoring Using Earthquakes

Arim Han, Iseul Park, and Ki Young Kim*

Department of Geophysics, Kangwon National University

요약: 마그마 또는 가스가 지하에서 이동함으로써 발생하는 화산지진의 연속적인 관측은 활화산 감시의 가장 중요한 방법 중 하나이다. 이 해설논문에서는 화산지진의 특징에 대해 살펴보았으며, 진원, 지진파형, 주파수, 암상 그리고 메커니즘에 따른 분류를 간단히 설명하였다. 또한 일본, 미국, 이탈리아, 뉴질랜드의 성공적인 분화 경보 사례와 화산지진 감시 실태를 소개하였다.

주요어: 화산지진, 화산감시, 특성, 분류

Abstract: Continuous seismic observation of volcanic earthquakes related to migration of magma or gas, is one of the most important methods used to monitor active volcanoes. In this review paper, we introduce the characteristics of volcanic earthquakes and their classification based on locations of foci, waveforms, frequencies, lithology, and source mechanisms. We also present some examples of successful warnings of volcanic eruptions and the present status of some observations of volcanic earthquakes in Japan, the United States, Italy, and New Zealand.

Keywords: volcanic earthquake, monitor, characteristics, classification

서론

매년 화산분화로 인해 상당한 인명 및 재산 피해가 전 세계적으로 발생하고 있다. 대표적으로 아이슬란드 Eyjafjallajokull 화산의 경우, 2010년 4월 14일 분화한 화산재의 영향으로 유럽지역 항공기 운항이 통제되었다. 이로 인해 30,000여 명의 승객과 총 4,060 톤의 화물 운송이 취소되었고, 경제적 피해만 도 약 17억 달러에 달했다(Ryoo *et al.*, 2012).

활화산은 학자나 기관에 따라 조금씩 달리 정의되고 있는데, 가장 널리 쓰이는 정의로는 최근 10,000년 이내에 분화한 적이 있는 화산을 말한다(Szakcs, 1994). 이 정의에 따르면 현재 지구상에 존재하는 활화산은 1,500여 개 정도로 주로 환태평

양화산대에 분포하고, 그 중 매년 50개 정도가 분화하고 있다. 국가적으로는 인도네시아, 미국, 일본, 이탈리아, 필리핀, 아이슬란드, 뉴질랜드, 칠레, 러시아, 멕시코 등에 많이 분포한다(SI, 2013). 한반도에는 백두산(Wei *et al.*, 2013)을 비롯하여, 제주도(Jeon, 2012)와 울릉도(Kim and Sohn, 2012)가 활화산의 범주에 포함된다.

최근 백두산의 분화 가능성이 여러 차례 매스컴에 보도되면서, 이 문제가 국민적 관심을 끌고 있다. 더욱이 2011년 일본 대지진에 의한 참사를 생생히 목격했던 우리는 이 지진의 여파로 백두산이 분화하지 않을까 하는 걱정이 가중된 바 있다. 이에 따라 백두산 관련 학술대회가 국내 학회, 국가출연연구원, 연구사업단 등의 주관으로 최근 수차례 개최된 바 있다. 또한 2013년에는 국제화산학회(International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior)가 일본 가고시마현에서 개최되어 백두산 화산의 특별 세션으로 다루었으며, 백두산 현지에서 한중일 동아시아 지진 심포지움이 개최되기도 하였다. 그러나 얼마 전까지만 해도 화산에 대한 국민적 관심은 그리 높지 않았으며, 화산분화의 핵심적 전조현상인 화산지진에 대해서는 국내에 별로 알려진 바가 없다.

이 해설에서는 화산지진의 일반적인 특성 및 분류를 간단히 소개하고, 화산감시 시스템이 잘 구축되어 있는 아시아의 일본,

2013년 9월 6일 접수; 2013년 11월 8일 수정; 2013년 11월 12일 채택

*Corresponding author

E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University, Hyojadong, Chuncheon, Kangwon-do 200-701, Korea

©2013, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

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.

북미 대륙의 미국, 유럽의 이탈리아, 오세아니아주의 뉴질랜드 등 대표적 국가들의 운영실태 및 사례를 살펴보고자 한다.

화산지진의 분류 및 특성

화산활동은 지진(McNutt, 1996), 지형변형(Dzurisin, 2003), 위성위치추적 시스템(Fernandez *et al.*, 2003), 경사계(Battaglia and Bachlery, 2003), 공중음파(Fee *et al.*, 2013), 지화학적(Carapezza *et al.*, 2008) 방법 등을 이용하여 감시할 수 있다. 이 중에서 마그마나 화산가스가 지하에서 지표면으로 이동하면서 발생하는 화산지진은 가장 핵심적이며 보편적으로 실행되고 있는 감시 방법 중의 하나이며, Omori (1911), Sassa (1936), Imbo (1954) 등의 선구적 연구에 의해 화산지진의 신호 특성이 많이 밝혀진 바 있다.

파형별 분류 및 특성

화산지진은 화산별로 고유한 특성에 따라 다양하게 나뉘며, Minakami (1974)와 McNutt (1996)의 분류법이 가장 널리 쓰인다. Minakami (1974)는 진원 위치, 지진동의 성격, 분화와 지진동의 관계 등을 기준으로 화산지진을 A형, B형, 폭발성 화산지진(explosion earthquake), 화산미소진동(volcanic tremor)으로 분류하였다(Fig. 1). A형은 전단 파쇄나 단층운동에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으며, 화산의 기저부 혹은 깊이 1 ~ 20 km 정도에서 발생한다. 우세주파수가 5 ~ 15 Hz로 높아서 McNutt (1996)의 분류로는 조구조 화산지진에 속하고, 주로 규모 6 이하의 군발 형태로 나타난다(Fig. 1a). 기록된 파형에서 P파 및 S파 위상이 명확하게 구분되는 특징이 있다(Zobin, 2003).

B형은 유체의 압력변화, 전단 및 인장 파쇄, 아주 얇은 곳의 비선형 유체 유동 등의 원인에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 진원이 분화구 주변에서 반경 1 km로 제한되고, A형보다 얇은 곳에서 발생한다. 우세주파수가 1 ~ 5 Hz로 낮아서

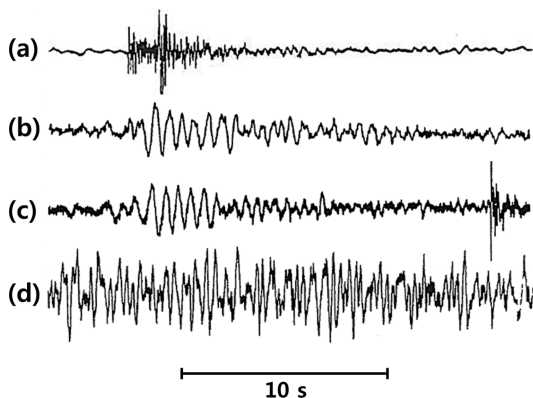


Fig. 1. Four typical waveforms of volcanic earthquakes classified by Minakami (1974): (a) A type, (b) B type, (c) explosion earthquake, and (d) volcanic tremor (modified from McNutt, 1996).

혼합형 내지 저주파수형(McNutt, 1996)에 속하고, 규모는 A형에 비해 작다. 표면파 성분이 우세하여 S파 위상이 명확하게 구분되지 않는 특징이 있다(Fig. 1b).

폭발성 화산지진은 마그마가 화구로 이동하면서 분리된 기포덩어리로 변하는 과정(fragmentation)과 용암흐름에 의해 발생한다(McNutt, 1996). 이 지진은 폭발성 분화를 동반하며, 공기파가 기록되는 특징이 있다(Fig. 1c). 진원은 분화구 하부에 위치하며, A형 지진보다 장파장이 우세하다(Zobin, 2003).

화산미소진동은 화산에서 기록되는 가장 일반적인 지진신호이며, 주로 표면파로 구성되어 있다(Fig. 1d). 주파수 성분은 B형과 같이 1 ~ 5 Hz 성분이 우세하며, 주로 분화구 아래 얇은 깊이에서 발생한다. 화산미소진동은 비슷한 규모의 지진에 비하여 수 분에서 수 일 동안 지속되는 규칙적인 파형을 갖으며, 화산미소진동의 진폭은 용암의 분출 높이가 증가할수록 증가한다(McNutt, 1992).

메커니즘별 분류 및 특성

화산지진의 발생 메커니즘별로는 조구조 화산지진(volcanic-tectonic earthquake)과 분화성 지진(eruption earthquake)으로 나눌 수 있다(Zobin, 2003). 조구조 화산지진은 지표로 올라오는 마그마 운동과 그에 따른 암석의 구조적 파쇄에 기인한다. 현무암질 마그마처럼 용암의 점성이 낮은 경우에는, 기존 파쇄대를 따라 마그마가 유입되고 암맥 방향으로 미끄러져서 발생하는 암맥 유발성(dike-induced) 지진으로 설명될 수 있다(Rubin and Gillard, 1998). 그러나 안산암이나 영안암 화산의 경우에는 주 응력방향으로 늘어진 마그마로 채워진 암맥들 사이에 비스듬한 단층면을 따라 전단파괴가 발생할 수도 있다(Hill, 1977).

분화성 지진은 분화 물질이 지표로 분출되는 동안 일어나는 과정과 파괴 현상을 반영한다. 용융상태의 마그마가 화구로 올라오면서 분리된 기포덩어리로 변하는 과정을 거치는데, 이 때 화산미소진동과 저주파의 폭발성 지진신호를 발생시킨다. 또한 통로를 빠져나온 마그마는 용암돔이나 용암흐름을 형성하여 암석하나나 화산쇄설류를 동반하며, 이는 1 ~ 10 Hz 성분의 지진 신호를 발생시킨다.

암상별 분류 및 특성

화산은 규산염 함량에 따라 52% 미만인 현무암질 화산, 66% 이상인 안산암-영안암질 화산, 그 중간 성질을 갖는 안산암-현무암질 화산으로 분류할 수 있다(Zobin, 2003). 현무암질 화산은 낮은 점성($10 \sim 10^3$ P), 높은 온도($1100 \sim 1600^\circ\text{C}$), 적은 양(0.2 ~ 2.0%)의 휘발성 물질, 높은 유동성 특징을 갖는 용암으로 구성된다. 따라서 분화는 유출성(effusive)이며, 많은 양의 용암흐름을 만든다. 조구조 화산지진은 주된 분화 이전에 기록될 수 있으나, 전조현상 없이 분화가 발생한 경우도 있다(McNutt, 1996). 또한 분화 후에도 활동적인 군발지진을 일으

키는 경우가 일반적이다. 중앙 분출구 및 측방의 틈새를 따라 유출되는 용암은 화산미소진동과 폭발성 지진을 동반하기도 한다.

안산암질 화산은 1000 ~ 1300°C에서 $10^3 \sim 10^5$ P의 동점성도(dynamic viscosity)를 가지며, 폭발성 및 유출성 화산활동과 조구조적 지진활동을 동반한다. 중앙 분출구 및 측방의 틈새에서 용암 유출에 의한 화산미소진동을 동반하기도 한다. 영안암질 화산은 높은 점성과 많은 양의 휘발성 물질을 가진 마그마의 낮은 온도로 인하여 낮은 유동성과 높은 폭발성을 갖는다. 따라서 용암돔이 형성되며, 크고 작은 폭발이 발생한다. 또한 용암 유출로 인해 화산미소진동을 동반하기도 한다. 안산암-영안암질 화산분화의 전조지진은 $10^{10} \sim 10^{11}$ J 이상의 에너지를 방출하는 군발 형태로 발생한다(Yamaoka *et al.*, 1988). 안산암질이나 영면암질 화산의 경우는 화산지진 발생빈도가 가장 높을 때 대부분의 분화가 일어난다.

외국의 관측 현황

화산지진은 화산활동을 감시하고 분화를 예측하기 위한 가장 효과적인 현상으로, 규모가 0 이상인 모든 화산지진을 감지하기 위해서 일반적으로 화산 주변 1 ~ 15 km 내에 6개 이상의 지진계를 설치한다(McNutt, 1996). 감지된 지진은 수치 신호로 변환되어 기록되며, 화산지진 관측소로 실시간 전송된다. 전송된 자료는 지진자료 분석용 소프트웨어를 이용하여 진폭과 주파수 및 진원 위치 등을 분석하고, 통계적 분석과 경험을 바탕으로 분화를 예측하고 경보를 발령한다. 여기서는 화산지진 감시 시스템이 잘 구축되어 있는 일본, 미국, 이탈리아, 뉴질랜드의 화산지진 관측소 운영 실태 및 사례를 간단히 소개하고자 한다.

일본

- 관측 현황

일본은 Meakan, Asama, Sakurajima, Aso 화산 등 총 110개의 활화산이 존재하며, 이 중 분화 가능성이 높은 화산은 홋카이도 지역에 9개, 도호쿠 지역에 10개, 간토·중부 지방에 12개, 이즈·오가사와라 제도에 7개, 규슈 지역에 9개가 있다(Fig. 2a). 1956년에 설립한 일본 기상청(Japan Meteorological Agency; JMA)은 지진·화산부의 화산과에서 화산의 정보수집과 자료분석을 통해 분화를 예측하고 경보하는 업무를 담당하고 있다(JMA, 2013).

JMA에서는 화산활동을 감시하고 화산에 대한 정보를 제공하기 위해 1974년 화산관측 및 정보센터(Volcanic Observations and Information Center; VOIC)를 도쿄, 삿포로, 센다이, 후쿠오카에 설립하였다. 이 VOIC에서는 주요 감시대상 화산 주변에 단주기 3성분, 광대역 3성분, 장주기 지진계 및 음파 관측

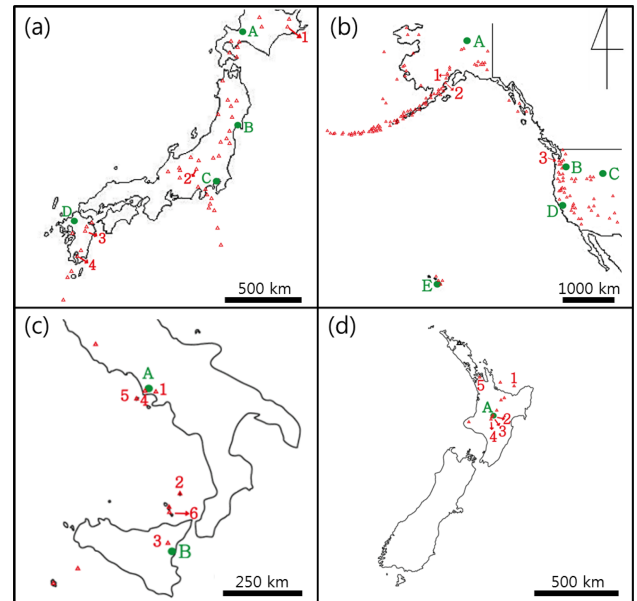


Fig. 2. Maps showing locations of active volcanoes (red triangles) and monitoring observatories (green circles) in (a) Japan, (b) United States of America, (c) Italy, and (d) New Zealand. Numbers indicate locations of volcanoes; (a) 1 = Meakan, 2 = Asama, 3 = Aso, and 4 = Sakurajima in Japan, (b) 1 = Redoubt, 2 = Augustine, and 3 = St. Helens in USA, (c) 1 = Stromboli, 2 = Etna, 3 = Campi Flegrei, 4 = Ischia, and 5 = Vulcano in Italy, and (d) 1 = White Island, 2 = Tongariro, 3 = Ngauruhoe, 4 = Ruapehu, and 5 = Auckland Volcanic Field in New Zealand. Alphabet symbols indicate locations of observatory; (a) A = Sapporo VOIC, B = Sendai VOIC, C = Tokyo VOIC, and D = Fukuoka VOIC in Japan, (b) A = AVO, B = CVO, C = YVO, D = CalVO and E = HVO in USA, (c) A = OV and B = OE in Italy, and (d) A = Wairakei Research Centre in New Zealand.

기기를 설치하여 운영 중이다. 관측기기로 감지된 자료는 실시간으로 VOIC로 전송되며, 이를 분석하여 화산활동을 평가하고, 대학 등 여러 연구기관에 지진자료를 공개하여 일본 화산 연구에 기여하고 있다.

- 주요 사례

일본 홋카이도 지역 활화산 중 하나인 Meakan 화산은 2008년 11월 18일과 28일 각각 증기분화가 발생하였다. 2008년 9월 29일부터 시작된 이 화산분화의 전조지진 활동은 5대의 지진계로 감지하였으며, Battaglia and Aki (2003)와 Kumagai *et al.* (2010)이 제안한 주파수 영역 감쇄식을 이용하여 Ogiso and Yomogida (2012)는 화산미소진동의 진원 위치를 추정하였다. 관측된 화산미소진동 파형은 매질의 강한 분산 특성으로 인해 5 ~ 10 Hz 범위의 주파수 대역 필터를 사용하였으며, 길이가 20, 60, 100 s인 시간창에서 평균제곱근 진폭을 계산하였다. 이 연구 결과로 시간영역에서 P파 및 S파 위상이 명확히 구분되지 않는 화산미소진동의 진원 위치를 결정하였고, 진원의 이동 및 증기분화로 야기된 화산유체의 역학적 이동의 관

련성을 규명하였다.

미국

- 관측 현황

미국에는 총 169개의 활화산이 있으며, 이 중 St. Helens, Redoubt, Augustine 등 54개는 분화 가능성이 매우 높은 화산으로 분류되고 있다(Fig. 2b). 미국의 화산은 1879년 설립한 미국지질조사소(United States Geological Survey; USGS)의 화산재난 프로그램(USGS, 2013)에서 주도적으로 연구하고 있다. 화산재난 프로그램은 화산을 감시하고 분화 가능성을 예측하기 위해 Alaska (AVO), California (CalVO), Cascades (CVO), Hawaii (HVO), Yellowstone (YVO) 등 5개 화산관측소를 운영하고 있다. 화산관측소 별로 AVO 232대, CVO 193대, HVO 93대, CalVO 90대, YVO 71대의 화산지진 관측기기를 운영하고 있으며(Guffanti *et al.*, 2010), 기록되는 모든 지진자료는 SAC 포맷으로 저장된다(Dixon *et al.*, 2013). 관측장비는 단주기 지진계가 70%로 가장 많고, 이어서 가속도계(17%), 광대역 지진계(12%), 미소기압계(1%) 순으로 구성되어 있다.

지진자료 수집 및 처리는 EARTHWORM, 위상 도달 및 최대 파형 진폭과 주기 결정에는 XPICK, 진원 위치와 지역적 규모 결정에는 HYPOELLIPSE 소프트웨어를 사용하고 있다(Power *et al.*, 2013). 대표적 자료분석 기법은 실시간 지진진폭 측정(Real-time Seismic Amplitude Measurement; RSAM)과 지진 스펙트럼 진폭 측정(Seismic Spectral Amplitude Measurement; SSAM)이 사용되고 있다(Fig. 3). RSAM은 실시간 화산 변화활동을 특징화하기 위한 시스템으로, RSAM의 증가는 화산미소진동의 진폭이나 지진 발생률 및 규모의 증가를 의미한다(Ewert *et al.*, 1993). SSAM은 지진신호의 스펙트럼을 연속적으로 기록하고 준실시간으로 분석하기 위한 시스템으로, 스펙트럼 진폭은 약 5 s마다 계산된다(Rogers and

Stephens, 1995).

화산관측소 HVO에서는 Hawaii의 지구조적 움직임과 화산 감시 및 분화예측을 위해 60개 관측점에서 지진을 관측하고, CalVO에서는 California와 Nevada 주변 14개의 화산과 칼데라 호수를 감시 중이다. CVO는 14개 관측점에서 단주기 및 광대역 지진계와 강진동 가속도계를 이용하여 25개의 화산을 감시하고 있다(Moran, 2005). YVO의 지진 네트워크는 화산위협 프로그램과 Yellowstone 국립공원이 협력하여 운영하고 있으며, 지진 관측기기로는 단주기 및 광대역의 수직성분 및 3성분 지진계를 운영 중이다. AVO에서는 단주기 및 광대역 속도센서와 강진동 지진계를 이용하여 화산지진 자료를 수집하고 있다.

- 성공 사례

대표적 활화산인 Redoubt 화산은 1971년부터 지진 감시를 시작하였으며, 1989년부터 AVO에서 화산 주변 22 km 내에 5 ~ 10개의 영구적인 지진계를 설치하여 지진활동을 감시하고 있다. Redoubt의 분화주기는 약 25년이며, 최근 발생한 2009년 3월 22일 분화는 여러 연구자들에 의해 연구되었다. 이 중 Power *et al.* (2013)는 단주기 수직성분 및 광대역 3성분 지진계로 분화 전에 발생하는 지진자료를 분석하여 Redoubt 화산의 마그마 시스템을 규명하고 분화를 성공적으로 예측하였다. 2009년 분화와 관련된 전조현상은 2008년 7월 중순에 처음 관측되었으며, 장주기 지진은 2008년 8월과 11월에 관측되었다. 그 후 화산미소진동과 커다란 진폭을 갖는 군발지진 등 여러 화산분화와 관련된 지진활동이 빈번하게 관측되어 경보를 발령하였다. 장기 경보는 2009년 3월 23일 화산폭발 136일 전인 2008년 11월 5일에 녹색에서 노랑으로 변경되면서 발령되었고, 단기 경보는 폭발 하루 전인 22일에 항공색상코드가 노랑에서 오렌지로 단계가 증가되면서 발령되어 조기경보에 성공한 사례이다.

이탈리아

- 관측 현황

이탈리아에는 Vesuvius, Stromboli, Etna 등 10개의 활화산이 있으며(Fig. 2c), 현재 국립지구물리와 화산연구소(Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; INGV)에서 화산활동을 감시하고 있다(INGV, 2013). INGV에서는 Vesuvius 관측소(OV)와 Etna 관측소(OE)를 운영 중이다.

OV는 Vesuvius 화산뿐만 아니라 Campi Flegrei, Ischia, Stromboli 화산도 감시하고 있다(OV, 2013). Vesuvius 화산에는 디지털 광대역 3성분, 아날로그 단성분 지진계 등 총 21대의 지진계, Campi Flegrei에는 15대, Ischia에는 3대의 지진계가 설치되어 감시되고 있다. Stromboli 화산에는 13개의 관측점이 있으며, 지진계는 디지털 광대역 3성분 센서로 구성되어

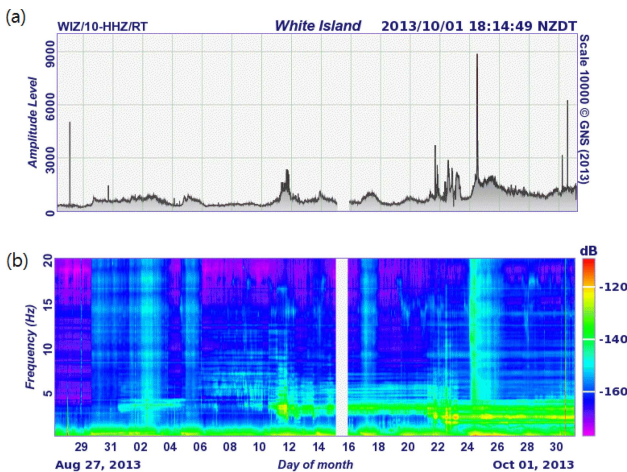


Fig. 3. An example of (a) RSAM and (b) SSAM records from the station WIZ, located near White Island in New Zealand.

있다. 기록되는 아날로그 신호는 24 비트 아날로그-수치변환기를 이용하여 50 Hz 샘플률로 수치화되어 수치기록계에 기록된 후에 OV로 전송된다.

Etna, Aeolian Island 등 여러 화산은 OE에서 감시하고 있다(OE, 2013). 동부 Sicily의 영구 지진망(Rete Sismica Permanente della Sicilia Orientale)은 총 90개의 관측점으로 이루어져 있으며, 아날로그 단주기 3성분 센서와 디지털 광대역 3성분 센서로 구성되어 있다. 모든 신호는 Etna 관측소로 실시간 전송되며, 수치화된 자료를 연속적으로 기록된다.

- 성공 사례

이탈리아에 대표적인 활화산인 Etna 화산은 2011년에 18회 분화하여 많은 연구가 진행되었다. 그 중 2011년 7월 30일 분화는 INGV에서의 관측 결과를 분석하여 화산분화를 예측하고 성공적으로 경보를 발령한 바 있다(Agostino *et al.*, 2013). 화산지진 감시는 12개 주요 관측점을 기반으로 화산미소진동의 시간에 따른 평균제곱근 진폭 분석에 초점을 맞추었고, EARTHWORM을 이용하여 처리하였다. Etna 화산의 경우, 화산미소진동의 짧은 시간창 평균진폭(Short Term Average; STA)과 긴 시간창 평균진폭(Long Term Average; LTA)의 비(STA/LTA)가 4개의 관측점에서 2.0 이상이 되면 INGV-OE의 운영기관 연구원에게 첫 경보가 발령되도록 되어 있다. 7월 30일 용암이 실제로 세계 흐르기 한 시간 전인 7시 35분에 STA/LTA가 한계값 2.0을 넘어서 이를 근거로 경보 시스템이 성공적으로 작동한 적이 있다.

뉴질랜드

- 관측 현황

뉴질랜드의 활화산으로는 White Island, Tongariro, Ngauruhoe, Ruapehu 등 총 11개가 있으며(Fig. 2d), 이 중 White Island와 Tongariro 화산이 현재도 활동 중에 있다. 정부 소유의 유한책임회사인 GNS Science (Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited)는 뉴질랜드의 화산감시와 모델링에 관한 연구를 담당하고 있다(GNS Sciences, 2013). 또한 화산감시 자료를 지속적으로 평가하고 해석하며, 정기적으로 화산을 방문하여 정보를 취득한다.

현재 뉴질랜드 화산에 설치되어 있는 지진계는 총 62대이며, 이 중 5개의 화산에는 미소기압계도 설치되어 있다. 중심 관측점의 관측기기로는 CMG3-ESP 또는 STS-2 광대역 센서, Kinemetric사의 Episensor 강진동 가속도계, 24 비트 Q330 기록계가 있다. 화산지진 감시망은 총 7개로 주요 화산을 포함하고 있으며(Kumaran, 2004), 감지된 지진자료는 자연재해 감시망인 GeoNet (2013)를 통하여 Wairakei 연구센터와 Wellington GNS Science 본부 등으로 실시간 전송된다. GNS Science의 Wairakei 연구센터에서는 지진, 화산미소진동, 지진

파 탐사자료, RSAM과 SSAM, 배경잡음 등을 이용하여 화산 활동을 감시하며, 실시간으로 수집된 자료를 분석하여 화산분화와 관련된 현상을 일으키는 원인 및 과정을 연구하고 있다(Fig. 2d).

- 연구 사례

Sherburn *et al.* (2007)은 1995 ~ 2005년 사이에 Auckland Volcanic Field (AVF) 인근에서 발생한 24개 화산지진을 연구하여 화산분화의 전조지진 발생 시기를 제안하였다. 진원 위치와 규모는 단주기 수직성분 지진계 5대로 구성되어 있는 AVF 화산지진망 기록자료와 비선형 진원위치 결정 소프트웨어인 NonLinLoc 프로그램을 사용하여 결정하였다. 나아가 깊이별 지진발생 메커니즘과 마그마 운동과의 관계, 과거 지진기록, 마그마 상승속도에 관한 평가자료 등을 바탕으로 AVF 전조지진이 화산분화 수 일 내지 수 주전에 발생할 것을 규명함으로써 AVF 화산분화 예측의 기초를 마련하였다.

결 론

이 해설논문에서는 화산지진의 파형별, 메커니즘별, 암상별 특성 및 이에 근거한 분류를 살펴보고, 대표적 활화산 감시 국가인 일본, 미국, 이탈리아, 뉴질랜드의 화산지진 감시 실태 및 사례를 소개하였다. 간략히 요약하면 다음과 같다.

1. 최근 10,000년 이내에 분화 여부로 정의되는 활화산은 전 세계적으로 1,500여 개 정도이며, 그 중 매년 50개 정도가 분화하여 상당한 인명 및 재산 피해가 전 세계적으로 발생하고 있다. 가장 핵심적이며 보편적으로 실행되고 있는 활화산 감시 방법 중의 하나인 화산지진은 마그마나 화산가스가 지하에서 지표면으로 이동하면서 발생된다.

2. 가장 널리 쓰이는 Minakami (1974)의 화산지진 분류는 전단 파쇄나 단층운동에 의해 발생하는 고주파수형인 A형, 유체의 유동에 의한 혼합 내지 저주파수형인 B형, 마그마가 화구로 이동하면서 분리된 기포덩어리로 변하는 과정과 용암흐름으로 발생하는 폭발성 화산지진, 규칙적 파형이 여러 날까지도 지속되는 화산미소진동으로 구성된다.

3. 발생 메커니즘별로는, 지표로 올라오는 마그마 운동과 그에 따른 암석의 구조적 파쇄를 반영하는 조구조 화산지진과 분화 물질이 지표로 분출되는 동안 일어나는 과정과 파괴 현상을 반영하는 분화성 지진으로 나뉜다.

4. 암상별로는 규산염 함량에 따라 현무암질, 안산암질, 영안암질 화산 등으로 나뉜다. 유출성 분화가 흔히 일어나는 현무암질의 조구조 화산지진은 주된 분화 이전에 기록될 수 있으나, 분화 후에도 활동적인 군발지진을 일으키는 경우가 일반적이다. 안산암질 화산은 폭발성 및 유출성 화산활동과 조구조적 지진활동을 동반하며, 용암 유출에 의한 화산미소진동이 발생하기도 한다. 영안암질 화산은 낮은 유동성과 높은 폭발성을

갖으며, 용암돔을 형성한다. 크고 작은 폭발이 발생하며, 용암 유출로 인해 화산미소진동을 동반하기도 한다.

5. 국외기관에서는 활화산 주변에 화산관측소를 운영하고 있으며, 화산 주변 20 km 이내에 통상 6개 이상의 단주기나 광대역 3성분 지진계를 이용하여 실시간으로 화산활동을 감시하고 있다. STA/LTA, RSAM, SSAM 등의 시간 및 주파수영역 지진신호의 변화를 감시하고, 진원 위치의 이동을 분석하여 분화를 예측하고 경보를 발령하고 있다.

6. 일본에는 110개의 활화산이 존재하며, 47개가 분화 가능성이 높은 것으로 분류되어 있다. 이들 화산들을 감시하고, 정보수집과 자료분석을 통해 분화를 예측하며, 경보를 발령하는 업무를 일본 기상청 화산과에서 담당하고 있다.

7. 미국에는 모두 169개의 활화산이 있으며, 이 중 54개는 분화 가능성이 매우 높은 화산으로 분류되고 있다. 미국지질조사소의 화산재난 프로그램에서 주도적으로 연구하고 있으며, 5개 화산관측소(AVO, CalVO, CVO, HVO, YVO)를 운영하고 있다.

8. 이탈리아에는 10개의 활화산이 있으며, 현재 국립지구물리와 화산연구소(INGV)에서 화산활동을 감시하고 있다. INGV에서는 Vesuvius 관측소와 Etna 관측소를 운영 중이다.

9. 뉴질랜드에는 총 11개의 활화산이 있으며, 이 중 White Island와 Tongariro 화산은 현재도 활동 중에 있다. 국영회사인 GNS Science에서 뉴질랜드의 화산감시와 모델링에 관한 연구를 담당하고 있다.

10. 분화 중인 화산이 없는 우리나라는 화산감시 시스템이 극히 미비하여 화산지진 연구는 거의 진행되지 않고 있다. 최근 백두산을 포함한 한반도 주변 화산의 분화 가능성이 우려되는 상황에서, 여러 국외기관의 운영 실태를 참고하여 화산지진 감시 시스템을 구축해야 할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2013-8060)의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다. 또한 기꺼이 저자들의 방문을 허락하고 친절히 연구시설을 안내해 준 뉴질랜드 GNS Science의 Tony Hurst 박사님과 Gill Jolly, Steven Sherburn, Art Jolly 박사님들께 감사를 표합니다.

참고문헌

- Agostino, M. D., Grazia, G. D., Ferrari, F., Langer, H., Messina, A., Retiano, D., and Spampinato, S., 2013, *Complex Monitoring of Volcanic Activity: Methods and Results*, Zobin, V. M., NOVA Science Publishers Inc, 253p.
- Battaglia, J., and Aki, K., 2003, Location of seismic event and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes, *Journal of Geophysical Research*, **108**, doi:10.1029/2002JB002193.
- Battaglia, J., and Bachlery, P., 2003, Dynamic dyke propagation deduced from tilt variations preceding the March 9, 1998, eruption of the Piton de la Fournaise volcano, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **120**, 289-310.
- Carapezza, M. L., Lelli, M., and Tarchini, L., 2008, Geochemistry of the Albano and Nemi crater lakes in the volcanic district of Alban Hills (Rome, Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **178**, 297-304.
- Dixon, J. P., Stihler, S. D., Power, J. A., Haney, Matt, Parker, Tom, Searcy, C. K., and Prejean, Stephanie, 2013, Catalog of earthquake hypocenters at Alaskan volcanoes: January 1 through December 31, 2012: U.S. Geological Survey Data Series 789, 84 p., <http://pubs.usgs.gov/ds/789/>.
- Dzurisin, D., 2003, A comprehensive approach to monitoring volcano deformation as a window on the eruption cycle, *Reviews of Geophysics*, **41**, doi:10.1029/2001RG000107.
- Ewert, J. W., Murray, T. L., Lockhart, A. B., and Miler, C. D., 1993, Preventing Volcanic Vatastrophe: The U.S. International Volcano Disaster Assistance Program, *Earthquakes and Volcanoes*, **24**, 270-291.
- Fee, D., McNutt, S. R., Lopez, T. M., Arnoult, K. M., Szuberla, C. A. L., and Olson, J. V., 2013, Combining local and remote infrasound recordings from the 2009 Redoubt Volcano eruption, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **259**, 100-114.
- Fernndez, J., Yu, T.-T., Rodrguez-Velasco, G., Gonzlez-Matesanz, J., Romero, R., Rodrguez, G., Quirs, R., Dalda, A., Aparicio, A., and Blanco, M. J., 2003, New geodetic monitoring system in the volcanic island of Tenerife, Canaries, Spain. Combination of InSAR and GPS techniques, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **124**, 241-253.
- GeoNet, 2013, <http://geonet.org.nz/> (October 1, 2013 Accessed).
- GNS Science, 2013, <http://www.gns.cri.nz/>, Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited (October 1, 2013 Accessed).
- Guffanti, M., Diefenbach, A. K., Ewert, J. W., Ramsey, D. W., Cervilli, P. F., and Schilling, S. P., 2010, Volcano-Monitoring Instrumentation in the United States, 2008: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1165, 32-p. text plus Volcano-Monitoring Instrumentation Database, available only online.
- Hill, D. P., 1977, A model for earthquake swarms, *Journal of Geophysical Research*, **82**, 1347-1352.
- Imb, G., 1954. *Sismicitdel parossismo vesuviano del marzo 1944*, Napoli : Stabilimento tipografico G. Genovese, 211p.
- INGV, 2013, <http://www.ingv.it/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (October 1, 2013 Accessed).
- Jeon, Y.-M., 2012, *Geoscientific Filed Excursion of Jeju Island*, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists.
- JMA, 2013, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, Japan Meteorological Agency (October 1, 2013 Accessed).
- Kim, G. B., and Sohn, Y. K., 2012, Holocene explosive eruptions of Ulleung Island, a potentially active volcano and a source of marine tephra in the East Sea, *4th International Maar Conference, IAVCEI, Abstract Volume*, 119-120.
- Kumagai, H., Nakano, M., Maeda, T., Yepes, H., Palacios, P.,

- Ruiz, M., Arrais, S., Vaca, M., Molina, I., and Yamashina, T., 2010, Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches, *Journal of Geophysical Research*, **115**, doi:10.1029/2009JB006889.
- Kumaran, C., 2004, *Living with Volcanoes*, Ministry of Civil Defence & Emergency Management, 64p.
- McNutt, S. R., 1992, Volcanic Tremor, *Encyclopedia of Earth System Science*, **4**, 417-425.
- McNutt, S. R., 1996, Seismic Monitoring and Eruption Forecasting of Volcanoes: A Review of the State-of-the-Art and Case Histories, in Scarpa, R., and Tilling, R. I., Ed., *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, Springer, 99-146.
- Minakami, T., 1974, Seismology of volcanoes in Japan, in Civetta, L., Gasparini, P., Luongo, G., and Rapolla, A., Ed., *Physical Volcanology Developments in Solid Earth Geophysics*, Elsevier, 1-27.
- Moran, S. C., 2005, *Seismic Monitoring at Cascade Volcanic Centers 2004-Status and Recommendations*, available only online: <http://pubs.usgs.gov/sir/2004/5211/>, 28p.
- OE, 2013, <http://www.ct.ingv.it/>, Osservatorio Etno (October 1, 2013 Accessed).
- Ogiso, M., and Yomogida, K., 2012, Migration of tremor locations before the 2008 eruption of Meakandake Volcano, Hokkaido, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **217-218**, 8-20.
- Omori, F., 1911, The Usu-san eruption, earthquake and elevation, phenomena, *Bulletin of the Imperial Earthquake Investigation Committee*, **5**, 1-38.
- OV, 2013, <http://www.ov.ingv.it/>, Osservatorio Vesuviano (October 1, 2013 Accessed).
- Power, J. A., Stihler, S. D., Chouet, B. A., Haney, M. M., and Ketner, D. M., 2013, Seismic observations of Redoubt Volcano, Alaska - 1989-2010 and a conceptual model of the Redoubt magmatic system, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **259**, 31-44.
- Rogers, J. A., and Stephens, C. D., 1995, SSAM: Real-Time Seismic Spectral Amplitude Measurement on a PC and Its Application to Volcano Monitoring, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**, 632-635.
- Rubin, A. M., and Gillard, D., 1998, Dike-induced earthquakes: Theoretical considerations, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 10017-10030.
- Ryoo, S.-B., Jeon, Y.-S., Hwang, E.-H., Park, S.-C., Lee, C.-W., Lee, J.-M., Lee, J. H., Lee, Y. G., Kong, M.-K., Yun, W. Y., and Park, E. H., 2012, *Want to know that volcano*, National Institute of Meteorological Research, 41p.
- Sassa, K., 1936, *Micro-seismometric study on eruptions of the volcano Aso*, Memorises of the College of Science, Kyoto Imperial University, 11-56.
- Sherburn, S., Scott, B. J., Olsen, J., and Miller, C., 2007, Monitoring seismic precursors to an eruption from the Auckland Volcanic Field, New Zealand, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **50**, 1-11.
- SI, 2013, <http://www.volcano.si.edu/index.cfm>, Smithsonian Institution (October 1, 2013 Accessed).
- Szakcs, A., 1994, Redefining active volcanoes: a discussion, *Bulletin of Volcanology*, **56**, 321-325.
- USGS, 2013, <http://www.usgs.gov/>, United States Geological Survey (October 1, 2013 Accessed).
- Wei, H., Liu G., and Gill, J., 2013, Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: implications for possible future eruptions, *Bulletin of Volcanology*, **75**, doi 10.1007/s00445-013-0706-5
- Yamaoka, K., Watanabe, H., and Sakashita, S., 1988, Seismicity during the 1986 eruption of Izu-Oshima volcano, *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **33**, 91-101.
- Zobin, V. M., 2003, *Introduction to Volcanic Seismology*, Elsevier, 308p.