모멘트 텐서를 이용한 White Island 화산분화 지진원 메커니즘 분석

한아림¹ · 김기훈² · 김기영^{1*}

¹강원대학교 지구물리학과

²Department of Geological Sciences, University of North Carolina

Source Mechanism of an Explosive Eruption at White Island Volcano, New Zealand, Determined from Waveform Inversions

Arim Han¹, Keehoon Kim², and Ki Young Kim^{1*}

¹Department of Geophysics, Kangwon National University

²Department of Geological Sciences, University of North Carolina

요약: 2012년 8월 4일 뉴질랜드 White Island 화산의 WIZ 관측소에서 기록된 화산성 장주기 지진파의 지진원 메커니즘에 대해 연구하였다. 하나의 관측소 자료만을 이용하였기 때문에 단순한 기하학적 모델(구, 균열, 파이프)들을 이용하여 모멘트 텐서 역산을 실시하였다. 각 모델의 합성자료를 계산하였으며, 이를 관측자료와 비교하였다. 가장 잘 일치하는 모델의 종류와 방향은 깊이 1600 m의 경사가 80°NE이고 주향이 N80°W인 균열 모델이었다. 깊은 곳에서의 폭발은 가스 분출을 위한 균열을 열었으며, 상승한 가스가 약 4시간 후에 감시카메라에 포착된 지표 분화를 야기하였을 것으로 해석된다. 모멘트 텐서방법에 기초한 이러한 분석 결과는 이 화산섬을 대상으로 수행한 기존의 지화학 연구 결과와 일치한다.

주요어: White Island, 화산성 장주기 지진파, 지진원 메커니즘, 모멘트 텐서, 균열 모델

Abstract: We studied the source mechanisms of very-long-period event recorded at seismic station WIZ near White Island Volcano, New Zealand on August 4, 2012. Since seismic data at only one station were available, we conducted moment tensor inversion using three simplified models (explosion, crack, and pipe models). To constrain the moment tensor solution of seismic event, we computed synthetic data for each model to compare with observed data. Type and orientation for the best model is a crack at a depth of 1600 m with a dip of 80°NE and a strike of N80°W. We interpret that a deep explosion may have opened a crack for gases to escape, and the upward gas flow triggered the surface explosions four hours later as confirmed by a webcam. The interpretation based on moment tensor inversion is consistent with previous studies of geochemical data of the volcanic island.

Keywords: White Island, very long period signal, source mechanism, moment tensor, crack model

서론

활화산에 관한 기준은 조금씩 다르지만, 일반적으로 10,000년 이내에 분화한 적이 있는 화산을 말한다(Szakács, 1994). 이 정의에 따르면 한반도에는 백두산(Wei *et al.*, 2013)과 제주도(Jeon, 2009) 및 울릉도(Kim and Sohn, 2012)가 활화산에 해

당한다. 그 동안 국내에 활화산이 존재함에도 불구하고 국민적인 관심은 그리 높지 않았으나, 최근 백두산의 분화 가능성이 매스컴에 보도되고(Han *et al.*, 2013) 일본 Sakurajima 화산 등 주변국 활화산의 분화로 관심이 커지고 있다. 또한 화산분화의 전조현상인 지진을 이용한 백두산 화산에 관한 연구가 중국을 비롯한 여러 국가에서 활발히 진행되고 있다(Zhao and Tian, 2013).

일반적으로 지진학의 중요한 연구 분야 중의 하나는 지진원의 물리적 성질을 규명하는 것으로(Jost and Herrmann, 1989), 지진 모멘트 텐서를 역산하는 방법이 지진원 메커니즘 분석(Yoshida *et al.*, 2011; Kim, 2011)과 규모 결정(Pondrelli *et al.*, 2012)에 널리 적용되고 있다. 또한 이 역산 방법은 화산지진 분야에도 적용되어 활화산 활동에 관한 지진원 메커니즘을 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Jousset *et al.*, 2013; Kim, 2013). 판 경계에서 일어나는 구조적 지진(tectonic earth-

2013년 12월 28일 접수; 2013년 12월 28일 수정; 2014년 4월 14일 채택
*Corresponding author

E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

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

©2014, 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.

Fig. 1. Elevation map showing locations of seismic stations WSRZ and WIZ (inverted triangles) and the main crater (star) on White Island, New Zealand. The inset map shows the location of White Island (arrow) to northeast of the North Island.

quake)의 지진원이 주로 이중 우력(double-couple force)으로 설명되는 것에 반해, 화산성 장주기 지진파(very-long-period signal)의 지진원은 부피 변화를 동반하는 것으로 알려져 있다. 부피 변화의 메커니즘은 마그마성 유체의 이동 및 주변 균열과의 공명으로 이해되고 있으며, 대표적으로 폭발, 균열, 파이프 형태의 간단한 기하학적 모델들이 제시되었다(Ohminato *et al.*, 1998; Chouet *et al.*, 2010; Aster *et al.*, 2008; Kumagai *et al.*, 2011; Haney *et al.*, 2013).

이러한 화산분화의 지진원 메커니즘을 연구하기 위해서는 활동하는 화산이 있어야 하는데, 백두산은 현실적으로 접근이 어렵고, 그 밖의 제주도과 울릉도에서는 최근 화산활동이 일어나지 않아서 국내 화산을 대상으로 한 연구는 실질적으로 불가능하다. 따라서 자료의 접근이 수월하며, 화산활동이 활발한 뉴질랜드를 연구지역으로 선택하였다. 뉴질랜드는 판 경계에 위치하여 지진 및 화산활동이 빈번하게 발생되며, 이로 인해 지진과 화산에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 대표적인 지역이다(Savage *et al.*, 2013; Mordret *et al.*, 2010). 이 나라에는 White Island, Tongariro, Ruapehu 등 총 11개의 활화산이 있으며, 이 중 최근까지도 활발하게 활동 중인 White Island를 연구 대상으로 선택하였다. 이 화산섬에는 2 곳의 지진관측소가 있으나, 분화 당시 자료가 기록된 WIZ 관측소 자료만을 이용하여 2012년 8월 4일 발생한 화산분화의 지진원 메커니즘을 모멘트 텐서 역산방법으로 연구하였다(Fig. 1).

연구 지역

White Island(위도 S37.52°, 경도 E177.18°)는 뉴질랜드 화산 중 현재 가장 활발한 안산암질 활화산으로, 뉴질랜드 북섬에서

북동쪽으로 약 50 km 떨어진 곳에 위치한다(Sherburn *et al.*, 1998). Taupo 화산 지대의 최북단 활화산이며(Cole and Lewis, 1981), 크기는 약 $2.5 \times 1.5 \text{ km}^2$ 이고 최대 고도는 321 m이다(Cole and Naim, 1975).

이 화산섬에서의 간헐적인 화산활동은 1826년에 처음으로 관측되었으며, 역사기록에 남아 있는 가장 크고 긴 분화는 1975년 12월에 발생하여 2000년 7월까지 이어졌다. 이 화산섬의 현재 화산활동은 열수 활동과 많은 분기공(fumarole)에서 가스와 증기가 방출되고, 온천과 호수에서의 열 흐름(heat flow) 등으로 관찰된다(Scott and Rosenberg, 2007). 2012년 8월 4일 폭발성 분화 이후 5일 뒤인 8월 9일에 분화와 관련된 화산활동이 다시 발생하였으며, 2013년 현재까지 증기, 가스, 진흙 및 화산재 분출에 관한 화산활동이 약 7번 정도 발생하였다.

분석 자료

현재 White Island에는 WSRZ와 WIZ의 2개 지진관측소가

Fig. 2. (a) Seismic records of 24-hour period at seismic station WIZ (a) before and (b) after application of band-pass filtering (10 ~ 100 s). A seismic event (down arrow), which was used in moment tensor inversion, preceded the signal of surface explosion (up arrow) by about four hours.

Fig. 3. Three bandpass filtered (10 ~ 100 s) components of displacement at station WIZ showing the deep-sourced event that preceded surface explosions by approximately four hours. These filtered data were input to moment tensor inversion. The east, north, and downward components are labeled E, N, and Z, respectively.

있으며(Fig. 1), WSRZ에는 2013년 4월 8일 광대역 3성분 지진계(Guralp CMG-3ESPC)를 설치하여 현재까지 운영 중이다. WIZ는 1976년에 단주기 수직성분 지진계가 분화구에서 약 700 m 떨어진 곳에 최초로 설치되었으며(Sherburn *et al.*, 1998), 2007년에 광대역 3성분 지진계(Guralp CMG-3ESP)로 교체되어 현재까지 100 Hz 샘플률로 지진자료를 기록하고 있다(GeoNet, 2013).

White Island 분화 기록 중, 감시카메라에도 기록되어 가스 분출을 시각적으로도 확인할 수 있는 2012년 8월 4일 분화의 지진원 메커니즘을 분석하기 위해서, WIZ 관측소에서 기록한 24 시간 지진기록 중 장주기 지진파를 사용하였다(Fig. 2a). 일반적으로 2 ~ 100 s의 주기를 가지며, 화산분화를 전후하여 많이 관측되어 화산 내부의 마그마 시스템과 분화의 관련성을 규명하는데 중요한 역할을 하는 화산성 장주기 지진파를 선택하기 위해 10 ~ 100 s의 대역필터를 적용하였다(Fig. 2b). 16시 55분경 지표 분화가 일어나기 약 4시간 전인 12시 56분경에 장주기 지진파가 뚜렷하게 기록되어 있어서(Figs. 2a and 3), 이를 지진원 메커니즘 규명을 위한 모멘트 텐서 역산에 사용하였다.

연구방법

과장에 비해서 충분히 작은 크기의 점샘(point source)을 가정하였을 때, 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Scarpa and Tilling, 1996).

$$u_n(t) = F_p(t) * G_{np}(t) + M_{pq}(t) * G_{np,q}(t), \quad (1)$$

여기서, $u_n(t)$ 는 시간 t 에서의 관측소 변위의 n 방향 성분, $F_p(t)$ 는 p 방향으로 작용하는 힘의 시간이력, $G_{np}(t)$ 는 지진원의 p

방향 성분과 수신기의 n 방향 변위성분과 관련된 그린텐서, $M_{pq}(t)$ 는 모멘트 텐서의 pq 성분의 시간이력을 각각 뜻한다. 또한 우변 2번째 항의 그린함수 $G_{np,q}(t)$ 의 아래첨자 q 는 좌표축 q 방향으로의 공간적 미분을 나타내며, $*$ 는 곱말기(convolution)를 의미한다.

변위와 지진원 사이의 선형관계식을 행렬식으로 나타내면(Ohminato *et al.*, 1998),

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{m}, \quad (2)$$

으로, 여기서 $\mathbf{d}$ 는 관측된 변위 성분의 열벡터, $\mathbf{m}$ 은 모멘트 텐서와 단일 힘(single force)을 포함하는 열벡터를 의미한다. 이 연구에서는 식 (2)의 $\mathbf{m}$ 에 대하여 역산하는 과정에서, 최소제곱법(least-squares method)을 적용하였다.

제한이 없는 임의의 지진원은 6개의 모멘트 텐서 성분과 3개의 단일 힘 성분을 이용하여 표현할 수 있고, 이러한 지진원 역산을 위해서는 최소한 3곳의 3성분 관측자료가 필요하다. 그러나 관측자료가 한 곳의 3성분 자료만 가용한 상태이므로, 지진원 모델의 자유상수를 줄일 수 있는 제한된 역산을 실시하였다.

화산분화는 마그마 저장소 내의 유체 유입과 유출을 동반하며, 저장소와 이동통로의 부피를 변화시킨다. 또한 마그마성 유체의 이동은 물리적 반작용인 반동 (reaction force)을 동반한다. 이러한 화산성 지진원의 부피변화와 단일 힘(single force)의 존재는 많은 화산에서 보고되어 왔으며, 화산분화와 관련된 유체의 이동을 표현하기 위해서 고려되어야 한다(Scarpa and Tilling, 1996). 하지만 모멘트 텐서와 단일힘을 포함한 역산 모델은 높은 자유도(degrees of freedom)로 인하여 지진파의 잡음과 속도구조의 오차에 상당히 민감해진다. 특히 관측자료의 수가 적고 지진파의 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)가 낮을 경우, 단일 힘의 역산결과는 불안정하여 신뢰도가 떨어질 수 있다. 이럴 경우 단일 힘을 무시한 모멘트 텐서 역산이 오히려 신뢰도 높은 지진원 메커니즘을 도출할 수 있다. 실제 지진원이 모멘트 텐서와 단일 힘 성분을 모두 포함하더라도, 단일 힘을 무시한 모멘트 텐서 역산결과는 실제 지진원의 모멘트 텐서 성분과 비교적 잘 일치하였다는 연구가 많이 있다(Lokmer *et al.*, 2007; Bean *et al.*, 2008; Davi *et al.*, 2010). 따라서 자료의 수가 많지 않은 이 연구에서는 역산 모델의 자유상수를 줄이기 위하여, 마그마 저장소의 형태를 단순한 구(sphere), 균열(crack), 파이프(pipe)로 가정하고, 지진원의 단일 힘을 역산에 포함시키지 않았다.

구형태의 저장소를 가정하였을 때 모멘트 텐서는

$$M_{xx} = M_{yy} = M_{zz} = M_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} + \frac{2}{3} \right), \quad (3)$$

$$M_{xy} = M_{yz} = M_{zx} = M_{yx} = M_{zy} = M_{xz} = 0,$$

으로 표현할 수 있으며(Scarpa and Tilling, 1996), 여기서 λ 와

Fig. 4. Source geometries for (a) crack and (b) pipe models. θ , ϕ , and $\vec{n}$ denote dip, strike, and normal vector, respectively.

μ 는 라메상수이다. M_0 는 $\mu\Delta V$ 이며, 여기서 ΔV 는 구의 부피 변화이다. 또한 균열(Fig. 4a)과 파이프(Fig. 4b)의 모멘트 텐서는 각각

$$\begin{aligned} M_{xx} &= M_0(\lambda/\mu + 2\sin^2\theta\cos^2\phi), \\ M_{yy} &= M_0(\lambda/\mu + 2\sin^2\theta\sin^2\phi), \\ M_{zz} &= M_0(\lambda/\mu + 2\cos^2\theta), \\ M_{xy} &= M_{yx} = M_0(2\sin^2\theta\sin\phi\cos\phi), \\ M_{xz} &= M_{zx} = M_0(2\sin\theta\cos\theta\sin\phi), \\ M_{yz} &= M_{zy} = M_0(2\sin\theta\cos\theta\cos\phi), \end{aligned} \quad (4)$$

와

$$\begin{aligned} M_{xx} &= M_0(\lambda/\mu + \cos^2\theta\cos^2\phi + \sin^2\phi), \\ M_{yy} &= M_0(\lambda/\mu + \cos^2\theta\sin^2\phi + \cos^2\phi), \\ M_{zz} &= M_0(\lambda/\mu + \cos^2\theta), \\ M_{xy} &= M_{yx} = -M_0(\sin^2\theta\sin\phi\cos\phi), \\ M_{xz} &= M_{zx} = -M_0(\sin\theta\cos\theta\sin\phi), \\ M_{yz} &= M_{zy} = -M_0(\sin\theta\cos\theta\cos\phi), \end{aligned} \quad (5)$$

으로 나타낼 수 있다(Nakano, 2005). 여기서 θ 는 경사이며, ϕ 는 주향을 나타낸다.

자료처리 및 분석

기록된 원시자료(Fig. 2a)에 10 ~ 100 s 대역필터를 적용하고 (Fig. 2b), 기록센서의 반응곡선을 이용하여 계기보정을 실시한 후, 초동 도착 13.5 s 전부터 장주기 지진파가 지속된 26.5 s 까지 총 40 s 자료를 역산에 이용하였다. 신뢰할 수 있는 지진원 모델을 얻기 위해서는 정확한 그린함수가 필수적이며, 이를 계산하기 위해 White Island의 지형을 고려한 3차원 유한차분법(finite difference method)을 사용하였다. 균일한 매질을 가정하였으며 종파속도는 4200 m/s, 횡파속도는 2300 m/s, 밀도는 2500 kg/m³으로 설정하였다(Jolly *et al.*, 2010).

적은 수의 관측소를 이용하여 광범위한 지역에 대해 격자탐색법을 사용하여 진원 위치를 결정할 경우 여러 개의 국지적

최적해(local minimum)를 가질 수 있으며, 이중에서 실제 해를 구분하기가 어려워진다. 따라서 한정된 자료를 이용한 역산의 경우, 격자탐색 영역을 지진원이 존재할 가능성이 가장 높은 지역으로 제한할 필요가 있다. White Island 하부 마그마방의 위치는 과거에 연구된 바 없으나, 화산분화와 함께 관측된 장주기 지진파의 진원 위치에 대한 연구 결과들에 따르면 장주기 지진파 진원의 위치가 화구 아래 1 km 이내의 깊이에 분포하는 경우가 많다. 대표적 예로는 미국 하와이의 Kilauea 화산(Ohminato *et al.*, 1998; Chouet *et al.*, 2010; Chouet and Dawson, 2012), 및 미국의 Augustine 화산(Dawson *et al.*, 2011), 이탈리아의 Stromboli 화산(Chouet *et al.*, 2003; Auger *et al.*, 2006), 일본의 Asama 화산(Ohminato *et al.*, 2006), 남극의 Erebus 화산(Aster *et al.*, 2008) 등이 있다. 이는 장주기 지진파의 진원이 천부 마그마 저장소의 형성과 마그마성 유체의 이동과 관련되어 있다는 기존의 정설(Chouet, 1996)과 일치하는 결과이다. 이번 연구지역인 White Island 화산의 경우에도 장주기 지진파와 함께 지표 분화가 관측되었으며, 천부에 마그마성 유체의 저장 및 이동과 연관된 구조가 형성되어 있음을 예상할 수 있다.

따라서 진원의 깊이를 분화구의 수직하부 400 ~ 2000 m로 제한하고 400 m 깊이 간격으로 식 (2)의 해를 구하기 위해, 각 진원에서 구(식 (3)), 균열(식 (4)), 파이프(식 (5)) 모델의 역산해의 제곱오차(squared error)를 비교하였다. 균열과 파이프 모델을 위한 라메 상수의 비율 (λ/μ)은 화산암에 적합한 2로 가정하였다(Murase and McBirney, 1973). 균열과 파이프 모델의 방향은 주향 0 ~ 360°, 경사 0 ~ 90°의 범위에서 각각 30°와 15°씩 변화시키며 해를 계산하였다.

가장 작은 오차($\epsilon=0.15$)를 갖는 경우는 깊이 1600 m에서 주향 270°, 경사 75°일 때의 균열 모델이었으며, 파이프 모델은 1600 m에서 주향 90°, 경사 15°일 때 $\epsilon=0.33$ 으로 균열 모

Fig. 5. Waveform fits obtained by the waveform inversion using bandpass-filtered three-component seismograms. Observed (solid) and synthetic (dashed) waveforms of the best-fit solutions are compared for (a) sphere, (b) crack, and (c) pipe models. The crack model provides the best fit. From top to bottom, the east-, north- and vertical displacement components are shown. The indicated θ and ϕ , are defined in figure 4.

진의 단층면해 분석결과인 동서방향의 정단층 운동(Nishi *et al.*, 1996)과는 대략 일치한다. 또한 White Island의 동남동쪽 약 20 km 떨어진 곳에서 White Island 협곡의 방향이 남북 내지 북북동-남남서에서 거의 동서방향으로 꺾여 있는 것을 보아(Wright, 1990; Fig. 7), 환경계부의 화산활동과 연관하여 지질구조가 복잡함을 지시한다.

WISE92 자료를 분석하여 구한 결과는 대부분의 White Island 조구조 화산지진의 진앙지가 주요 분화구 내에 위치하며(Nishi *et al.*, 1996), 지반 증기(steaming ground), 온천, 분기공의 활성 열수 시스템도 주요 분화구 아래에 있음이 조사 시추로 밝혀져서(Giggenbach *et al.*, 1989), 모멘트 텐서 역산 과정에서 가정된 진앙지는 타당한 것으로 판단된다. 또한 모멘트 텐서 역산으로 구한 진원 깊이 1600 m는 WISE92 자료를 분석하여 구한 결과인 70~2740 m의 범위(Nishi *et al.*, 1996)에 놓이며, 이 화산섬의 마그마 저장소가 지표면 하부 0.5, 1~2, 2~7 km에 위치함을 밝힌 지화학 연구 결과(Houghton and Nairn, 1989; Cole *et al.*, 2000)와도 일치한다.

결론

모멘트 텐서 역산 방법으로 화산활동이 활발히 진행되는 뉴질랜드 White Island에서 2012년에 분화한 화산의 지진원 메커니즘을 연구하였다. 하나의 관측소(WIZ) 자료만을 이용하여 이미 알려진 대표적 기하학적 모델인 폭발 모델, 균열 모델, 파이프 모델에 관해 역산하고 최적모델을 결정하였다.

역산 결과는 분화구 하부 약 1600 m 깊이의 주향 N80°W, 경사 80°NE인 균열모델에서 0.11의 가장 작은 오차를 보였으며, 지진원의 모멘트 텐서에 대응하는 기하학적 구조는 급경사의 화도로 해석하였다. 또한 역산된 지진원 시간이력함수 M_0 는 17.6 s까지 급속히 팽창하다가, 이후 다시 31.5 s까지 급속히 수축하는 등 팽창과 수축을 반복하는 모습을 보여준다. 관측된 지진동은 지표 분화 약 4시간 전에 1600 m 깊이에서 발생하였으며, 화산분화를 야기한 마그마성 유체가 화도를 통해서 평균 수직속도 400 m/h로 지표를 향해 상승하였고, 단층이나 균열을 통해 가스가 분출된 것으로 해석된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2013-8060)의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다. 또한 자료분석 과정에 여러모로 도움을 주신 Réne Geophysics사의 Raymond Réne 박사님께도 고마움을 표합니다.

References

Aster, R., Zandomenighi, D., Mah, S., McNamara, S., Henderson,

- D., Knox, H., and Jones, K., 2008, Moment tensor inversion of very long period seismic signals from Strombolian eruptions of Erebus Volcano, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **177**, 635-647.
- Auger, E., D'Auria, L., Martini, N., Chouet, B., and Dawson, P., 2006, Real-time monitoring and massive inversion of source parameters of very long period seismic signals: An application to Stromboli Volcano, Italy, *Geophysical Research Letters*, **33**, doi: 10.1029/2005GL024703.
- Bean, C., Lokmer I., and O'Brien, G., 2008, Influence of near-surface volcanic structure on long-period seismic signals and on moment tensor inversions: Simulated examples from Mount Etna, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **113**, doi:10.1029/2007JB005468.
- Chouet, B., 1996, Long-period volcano seismicity: its sources and use in eruption forecasting, *Nature*, **380**, 309-316.
- Chouet, B., and Dawson, P., 2012, Shallow conduit system at Kilauea Volcano, Hawaii, revealed by seismic signals associated with degassing bursts, *Journal of Geophysical Research*, **116**, doi:10.1029/2011JB008677.
- Chouet, B., Dawson, P. B., James, M. R., and Lane, S. J., 2010, Seismic source mechanism of degassing bursts at Kilauea Volcano, Hawaii: Results from waveform inversion in the 10-50 s band, *Journal of Geophysical Research*, **115**, B09311.
- Chouet, B., Dawson, P., Ohminato, T., Martini, M., Saccorotti, G., Giudicepietro, F., De Luca, G., Milana, G., and Scarpa, R., 2003, Source mechanisms of explosions at Stromboli volcano, Italy, determined from moment-tensor inversion of very-long-period data, *Journal of Geophysical Research*, **115**, doi: 10.1029/2002JB001919.
- Cole, J. W., and Lewis, K. B., 1981, Evolution of the Taupo-Hikurangi subduction system, *Tectonophysics*, **72**, 1-21.
- Cole, J. W., and Nairn, I. A., 1975, *Catalogue of the active volcanoes of the world including Solfatara fields. Part 22: New Zealand*, International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior.
- Cole, J. W., Thordarson, T., and Burt, R. M., 2000, Magma origin and evolution of White Island (Whakaari) volcano, Bay of plenty, New Zealand, *Journal of Petrology*, **41**, 867-895.
- Cunningham, W. D., and Mann, P., 2007, Tectonics of Strike-Slip Restraining and Releasing Bends, in Mouslopoulou V., Nicol, A., Little, T. A., and Walsh, J. J., Terminations of large strike-slip faults: an alternative model from New Zealand, Geological Society, London, 387-415.
- Davi, R., O'Brien, G. S., Lokmer, I., Bean, C. J., Lesage, P., and Mora, M. M., 2010, Moment tensor inversion of explosive long period events recorded on Arenal volcano, Costa Rica, constrained by synthetic tests, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **194**, 189-200.
- Dawson, P. B., Chouet, B. A., and Power, J., 2011, Determining the seismic source mechanism and location for an explosive eruption with limited observational data: Augustine Volcano, Alaska, *Geophysical Research Letters*, **38**, doi: 10.1029/2010GL045977.

- GeoNet, 2013, New Zealand hazard monitoring network, New Zealand, <http://geonet.org.nz/> (December, 21, 2013 Accessed).
- Giggenbach, W. F., Hedenquist, J. W., Houghton, B. F., Otway, P. M., and Allis, R. G., 1989, Research drilling into the volcanic hydrothermal system on White Island, New Zealand, *EOS*, **70**, 98-108.
- Han A., Park, I., and Kim, K. Y., 2013, Volcano monitoring using earthquakes, *Korean society of earth and exploration geophysicists*, **16**, 268-274.
- Haney, M. M., Chouet, B., Daswon, P. B., and Power, J. A., 2013, Sorce characterization for an explosion during the 2009 eruption of Redoubt Volcano from very-long period seismic waves, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **259**, 77-88.
- Houghton, B. F., and Nairn, I. A., 1989, A model for the 1976-82 phreatomagmatic and Strombolian eruption sequence at White Island volcano, New Zealand, *New Zealand Geological Survey Bulletin*, **103**, 127-136.
- Jeon, Y. M., 2009, *Lithofacies and emplacement processes of the volcanic rocks in the Cretaceous Gyeongsang basin and Quaternary Jeju Island, Korea*, Ph.D. Thesis, Gyeongsang National University, 165p.
- Jolly, A. D., Sherburn, S., Jousset, P., and Kilgour, G., 2010, Eruption source processes derived from seismic and acoustic observations of the 25 september 2007 Ruapehu eruption-North Island, New Zealand, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **191**, 33-45.
- Jost, M. L., and Herrmann, R. B., 1989, A Student's Guide to and Review of Moment Tensors, *Seismological Research Letters*, **60**, 37-57.
- Jousset, P., Budi-Santoso, A., Jolly, A. D., Boichu, M., Surono, D. S., Sumarti, S., Hidayati, S., and Thierry, P., 2013, Signs of magma ascent in lp and vlp seismic events and link to degassing: An example from the 2010 explosive eruption at Merapi volcano, Indonesia, 2013, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **261**, 171-192.
- 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*, 119-120.
- Kim, J.-K., 2011, Analysis of Characteristics of Seismic Source and Response Spectrum of Ground Motion from Recent Earthquake near the Backyoung Island, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **14**, 274-281.
- Kim, K., 2013, *Source Mechanism of Volcanic Explosions Investigated by Seismo-Acoustic Observations*, Ph. D. thesis, North Carolina University, Chapel Hill, 101p.
- Kumagai, H., Placios, P., Ruiz, M., Yepes, H., and Kozono, T., 2011, Ascending seismic source during an explosive eruption at Tungurahua Volcano, Ecuador, *Geophysical Research Letters*, **38**, L01306.
- Lamarche, G., Barnes, P. M., and Bull, M. J., 2006, Faulting and extension rate over the last 20,000 years in the offshore Whakatane Graben, New Zealand continental shelf, *Tectonics*, **25**, doi:10.1029/2005TC001886.
- Lokmer I., Bean, C. J., Saccorotti, G., and Patané D., 2007, Moment-tensor inversion of LP events recorded on Etna in 2004 using constraints obtained from wave simulation tests, *Geophysical Research Letters*, **34**, doi: 10.1029/2007GL031902.
- Mordret, A., Jolly, A. D., Duputel, Z., and Fournier, N., 2010, Monitoring of phreatic eruption using Interferometry on Retrieved Cross-Correlation Function from Ambient Seismic Noise: Results from Mt. Ruapehu, New Zealand, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **191**, 46-59.
- Murase, T., and McBirney, A., 1973, Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures, *Geological Society of America Bulletin*, **84**, 3563-3592.
- Nakano, M., 2005, Waveform inversion of volcano-seismic signals assuming possible source geometries, *Geophysical Research Letters*, **32**, L12302.
- Nishi, Y., Sherburn, S., Scott, B. J., and Sugihara, M., 1996, High-frequency earthquakes at White Island volcano, New Zealand: insights into the shallow structure of a volcano-hydrothermal system, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **72**, 183-197.
- Ohminato, T., 2006, Characteristics and source modeling of broadband seismic signals associated with the hydrothermal system at Satsuma-Iwojima Volcano, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **158**, 467-490.
- Ohminato, T., Chouet, B., Dawon, P., and Kedar, S., 1998, Waveform inversion of very long period impulsive signals associated with magmatic injection beneath Kilauea Volcano, Hawaii, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 23,839-23,862.
- Pondrelli, S., Salimbeni, S., Perfetti, P., and Danecsek, P., 2012, Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence, *Annals of Geophysics*, **55**, 615-621.
- Savage, M. K., Lin, F.-C., and Townend, J., 2013, Ambient noise cross-correlation observations of fundamental and higher-mode Rayleigh wave propagation governed by basement resonance, *Geophysical Research Letters*, **40**, 1-6.
- Scarpa, R., and Tilling, R., 1996, *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, in Chouet, B. (ed.), *New methods and future trends in seismological volcano monitoring*, Springer-Verlag, New York, 23-97.
- Scott, B., and Rosenberg, M., 2007, *Geological Society of New Zealand & New Zealand Geophysical Society Joint Annual Conference Tauranga 2007*, GNS Science, Wairakei Research Centre.
- Sherburn, S., Scott, B. J., Nishi, Y., and Sugihara, M., 1998, Seismicity at White Island volcano, New Zealand: a revised classification and inference about source mechanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **83**, 278-312.
- Szakács, A., 1994, Redefining active volcanoes: a discussion. *Bulletin of Volcanology*, **56**, 321-325.
- Wei, H., Liu, G., and Gill, J., 2013, Reveiw of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: implication for possible future eruptions, *Bulletin of volcanology*, **75**, doi:10.1007/s00445-013-0706-5.

- Wright, I. C., 1990, Late Quaternary faulting of the offshore Whakatane Graben, Taupo Volcanic Zone, New Zealand, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **33**, 245-256.
- Yoshida, Y., Ueno, H., Muto, D., and Aoki, S., 2011, Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the combination of teleseismic and strong motion data, *Earth Planets Space*, **63**, 565-569.
- Zhao, D., and Tian, Y., 2013, Changbai intraplate volcanism and deep earthquakes in East Asia: a possible link?, *Geophysical Journal International*, **195**, 706-724.