수신함수 역산 및 H- κ 중합법을 이용한 뉴질랜드 White Island 화산 하부의 S파 속도구조

박이슬·김기영 *

강원대학교 지구물리학과

Shear Wave Velocity Structure Beneath White Island Volcano, New Zealand, from Receiver Function Inversion and H- κ Stacking Methods

Iseul Park and Ki Young Kim*

Department of Geophysics, Kangwon National University

요 약: 뉴질랜드 White Island에 설치된 WIZ 지진관측소 하부의 S파 속도구조(v_s)를 규명하기 위해, 2007년 4월 20일에서 2013년 9월 6일 동안 기록된 362개 원거리 지진자료($M_w > 5.5$)에 수신함수 역산과 H- κ 중합법을 적용하였다. 200회 반복 연산 후 오차 20% 이내인 수신함수 71개를 이용하여, 관측소 반경 15 km 이내에서 $v_s = 4.35$ km/s인 모호면의 깊이를 24 ± 1 km로 결정하였다. 수신함수 역산으로 구한 1차원 v_s 모델은 깊이 18~22 km인 하부지각 내에 4 km 두께의 저속도층 존재를 지시한다. 이 저속도층에서의 v_s 는 상하부층보다 0.15 km/s 작아 심부 마그마 저장소와 관련이 있을 것으로 해석된다. H- κ 중합법으로 구한 지각의 평균 두께는 24.5 km로 수신함수 역산 결과와 잘 일치하며, v_p/v_s 가 1.64로 작게 나타난 것은 가스로 채워진 암석이나 뜨거운 결정질 마그마의 영향일 가능성이 있다.

주요어: White Island, 수신함수, H- κ 중합, 저속도층, 모호, v_p/v_s

Abstract: To estimate the shear-velocity (v_s) structure beneath the WIZ station on White Island in New Zealand, we applied receiver function (RF) inversion and H- κ stacking methods to 362 teleseismic events ($M_w > 5.5$) recorded during April 20, 2007 to September 6, 2013. Using 71 RFs with errors less than 20% after 200 iterative computations, we determined that the depth to Moho of $v_s = 4.35$ km/s is 24 ± 1 km within a 15 km radius of the station. In an 1-d v_s model derived by RF inversions, a 4-km thick low-velocity layer (LVL) at depths of 18~22 km was identified in the lower crust. This LVL, which is 0.15 km/s slower than the rocks above and below it, may indicate the presence of a deep magma reservoir. The H- κ stacking method yielded an estimate of the depth to the Moho of 24.5 km, which agrees well with the depth determined by RF inversions. The low v_p/v_s ratio of 1.64 may be due to the presence of gas-filled rock or hot crystallizing magma.

Keywords: White Island, receiver function, H- κ stack, low velocity layer, Moho, v_p/v_s

서 론

뉴질랜드는 초대륙인 곤드와나 대륙에서 약 8천 5백만 년 전에 떨어져 나온 북섬과 남섬으로 이루어져 있으며, 면적이 268,021 km²에 달한다. 태평양판과 호주판이 만나는 판경계로,

남섬의 일부분을 제외하고는 모두 호주판 위에 위치하고 있다. 이 중 북섬의 동쪽 해저에는 태평양판이 호주판 밑으로 섭입하는 Hikurangi 해구가 있어서(Fig. 1), 음의 중력이상과 안산암질 화산활동 등 섭입대에서 흔히 발생하는 지질 및 지구물리학적 현상들이 관찰되며(Reyners, 1980), 따라서 판경계, 지진, 지질, 모호 등에 대한 전반적인 연구가 활발하게 진행되어 왔다(Hamilton and Gale, 1968; Reyners, 1980; Salmon *et al.*, 2013; Stern *et al.*, 1987).

뉴질랜드 북섬 Plenty만에 위치한 화산섬 White Island는 뉴질랜드에서 가장 활발한 활화산으로, 북섬 동해안으로부터 50 km 떨어진 지점에 위치하고 있다(Sherburn *et al.*, 1998; Fig. 1). 이 화산섬은 약 150,000년 전 화산활동에 의해 형성되었으며(GeoNet, 2013), 주요 분화구는 북서-남동 방향으로 배열된 3개의 작은 분화구로 구성되어 있다(Peltier *et al.*, 2009). 화산

2013년 12월 31일 접수; 2013년 12월 31일 수정; 2014년 5월 2일 채택

*Corresponding author

E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University, Hyoja-2-dong, Chuncheon, Gangwon-do

©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. Location map of the seismic stations WSRZ (inverted triangles) on White Island, New Zealand. The inset map shows the location of the White Island northeast of the North Island and Hikurangi trench.

체의 70%는 바다에 잠겨 있으며, 최고 고도는 321 m에 이른다. Taupo 화산 지역의 최북단인 이 화산섬은 주로 해양 안산암질로 구성되어 있어서(Peltier *et al.*, 2009) strombolian 형태의 분화가 발생한다(Cole *et al.*, 2000). 이 화산섬의 구조 및 분화를 연구하기 위해 지질(Black, 1970), 지화학(Cole *et al.*, 2000), 지진(Reyners, 1980; Sherburn *et al.*, 1998) 등에 많은 연구가 진행되었으나 지각 속도구조에 관한 연구는 아직 보고된 바 없다.

수신함수 분석법은 지각의 S파 속도구조(v_s)를 규명할 수 있는 저비용의 고효율적인 방법으로(Jeon *et al.*, 2013), 관측 지점에서 1,000 km 이상 떨어진 지점에 발생하는 원거리 지진(USGS, 2013)을 주로 이용한다. 이를 위해 광대역 지진계에 기록된 3성분 자료가 필요하며, 주로 관측소에 거의 수직하게 도달하는 진앙거리 30° 이상부터 외핵에 대한 영향을 받지 않는 90° 이내에서 발생하는 지진을 사용한다. 이러한 수신함수를 이용한 지각 속도구조 연구는 국내의 여러 연구자들에 의해서도 이미 여러 차례 보고된 바 있다(Chang and Baag, 2005; Yoo *et al.*, 2007; Jeon *et al.*, 2013; Kim and Lee, 2001).

이 연구에서 우리는 2007년 4월 20일부터 2013년 9월 6일 사이에 발생한 원거리 지진을 이용하여 뉴질랜드 White Island의 WIZ 관측소 하부의 v_s 구조를 구하고자 한다. 또한 H- κ 중합법으로 지각의 평균 두께(H) 및 P파속도(v_p)와 S파속도의 비(v_p/v_s)인 κ 를 구하여 이 화산섬 하부의 지각 특성을 규명코자 한다.

배경이론

수신함수

원거리 지진의 파형은 진원의 동역학적 및 기하학적 영향, 진원 주변의 구조 및 전파에 의한 영향, 관측소 하부의 속도구조 영향 등을 포함한다. 원거리 지진은 후방위각(back

Fig. 2. (a) Ray paths of the major P-to-S converted phase and multiples, for a horizontal layer over a half-space ($v_2 > v_1$) and (b) the corresponding canonical receiver function (modified from Ammon *et al.*, 1990).

azimuth)에 따라 수직(vertical; V)성분과 법선(radial; R) 및 접선(tangential; T)성분으로 나뉘며, 각 성분별로 P파, S_V 파, S_H 파가 주로 기록된다고 생각할 수 있다(Ammon, 1991). Langston (1979)이 제안한 진원 균일화는 관측된 지진파에서 진원 및 전파에 의한 영향을 제거하는 과정으로, 이를 통해 관측소 하부의 속도구조에 대한 정보를 갖고 있는 수신함수를 구할 수 있다.

지구 내부에는 저속도층(Low Velocity Layer; LVL) 및 모호면과 같은 불연속면으로 인하여 속도가 일정하지 않으며, 수신함수는 이러한 속도 불연속면과 관련된 위상으로 나타나게 된다(Owens and Zandt, 1985; Fig. 2). 수신함수는 법선 및 접선 성분으로 구성되며, 법선성분은 지각이나 상부 맨틀의 v_s 변화에 대한 정보를 포함하고, 이방성 및 경사구조 등에 관한 정보는 접선성분으로부터 얻어진다(Bannister *et al.*, 2004). 원거리 지진의 수직성분과 수평성분을 곱풀기(deconvolution)하여 수신함수를 계산하는 과정은 다음과 같다.

이론적으로 평면파인 P파의 시간영역 변위응답함수(displacement response function) $D(t)$ 는 성분별로

$$D_V(t) = I(t) * S(t) * E_V(t), \quad (1)$$

$$D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t), \quad (2)$$

$$D_T(t) = I(t) * S(t) * E_T(t), \quad (3)$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서 $I(t)$ 는 계기반응함수(instrument response function), $S(t)$ 는 진원함수(seismic source function), $E(t)$ 는 구조응답함수(structure response function)이다. 이 중 $E_V(t)$ 는 P파가 기록되는 수직성분에 거의 기록되지 않는다. 따라서 $D_V(t)$ 는 계기반응함수와 진원함수의 곱말기(convolution) 형태인

$$D_V(t) \cong I(t) * S(t), \quad (4)$$

의 근사식으로 표시할 수 있다. 식 (1)~(4)의 관계식을 이용하면, 구조응답함수의 법선성분, 즉 수신함수의 법선성분 $E_R(t)$ 는

$$E_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)}{I(\omega)S(\omega)} \cong \frac{D_R(\omega)}{D_V(\omega)}, \quad (5)$$

으로, 변위응답함수의 법선성분과 수직성분의 비로 구해진다.

수신함수는 시간 및 주파수 영역에서 계산이 가능하며, 이 연구에서는 Kikuchi and Kanamori (1982)가 제안한 반복적 시간영역 곱풀기 접근법을 이용하였다. 이 방법은 변위응답함수의 수평성분에서 수신함수의 수평성분과 변위응답함수의 수직성분을 곱할기한 값을 빼어준 값의 절대치, 즉

$$Error = |D_R(t) - D_I(t) * E_R(t)| \quad (6)$$

가 최소가 될 때까지 반복하여 역산하며(Ligorria and Ammon, 1999), 이 결과로 시간영역의 수신함수를 얻는다.

수신함수 역산 역시 초기모델에 의존하므로, 국소 최소해(local solution)가 아닌 전역적 최소해(global solution)를 구하여야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하거나(Shibutani *et al.*, 1996; Chang *et al.*, 2004), 연구지역의 지구물리 및 지질학 정보를 추가로 이용하여 더 신뢰할 수 있는 초기모델을 구하기도 한다. 또한 깊이와 속도 사이에 상관성이 존재하여 역산 시 속도구조가 하나의 해로 정해지지 않는 문제가 있다. 이러한 비유일해 문제는 v_s 에 민감한 표면파를 수신함수 역산에 함께 이용하는 복합역산(joint inversion) 방법으로 접근하기도 한다(Julià *et al.*, 2000; Jeon *et al.*, 2012).

이 연구의 대상지인 White Island에는 분석할 수 있는 표면파 자료가 없어서 표면파 분석곡선을 이용한 복합역산을 실시하지 못하였다. 그러나 뉴질랜드 북섬에서 굴절법 탄성파탐사로부터 측정된 v_p 모델(Stern *et al.*, 1987)을 이용하여 초기모델의 신뢰성을 높이려고 하였다. 수신함수 역산결과 구한 v_s 와 초기모델과의 오차가 최소가 되도록 반복적 최소제곱법(iterative least-squares method)을 적용하여 수신함수를 역산하였다.

H- κ 중합법

H- κ 중합법은 평탄한 모호면과 지각이 측방으로 균질하다는 가정에 기초하므로 지각의 깊이와 속도를 알고 있다면 수신함수에 나타나는 P_s 파 및 여러 변환파 위상의 도달시간을 예상할 수 있다(Fig. 2). Zhu and Kanamori (2000)는 이를 이용하여 H- κ 영역에서 여러 변환파 위상의 예상되는 도달시간에서의 수신함수 진폭을 중합하였다.

H- κ 중합은

$$s(H, \kappa) = w_1 E_R(t_1) + w_2 E_R(t_2) - w_3 E_R(t_3) \quad (7)$$

으로 표현된다. 여기서 w_1, w_2, w_3 은 각각 $P_s, PpPs, PpSs + PsPs$ 파에 대한 가중치이며, $E_R(t)$ 는 시간영역에서 법선성분의 수신함수, t_1, t_2, t_3 는 각 변환파의 예상되는 도달시간이다. 이 결과로 H- κ 영역에서 진폭이 최대가 되는 값이 관측소 하부의 평균 지각 두께인 H와 κ 의 적정치를 나타낸다고 볼 수 있다.

이 방법은 시간영역 수신함수에서 여러 위상의 도달시간을

확인할 필요가 없어서 많은 양의 자료를 빠르게 처리할 수 있는 장점이 있다. 그러나 모호면이 경사져 있거나 측방으로 속도가 변한다면 부정확한 결과를 초래할 수 있으며, 이러한 한계점은 방위각에 따른 자료를 분석하여 해결할 수 있다(Jeon *et al.*, 2012).

지진자료

White Island에는 뉴질랜드의 국영회사인 GNS Science에서 설치한 연구 지진관측소 WIZ와 WSRZ가 있어서 화산활동을 상시 관측하고 있다(Fig. 1). 이 중 2013년 4월부터 관측을 시작한 WSRZ 관측소에서 기록된 자료의 경우는 그 양이 적어서 이 연구에서 제외하였다. WIZ 관측소는 위도 $37^{\circ}31'35.46''S$, 경도 $177^{\circ}11'21.87''E$, 고도 40 m에 위치하며, 1976년부터 지진을 상시 관측하여 현재는 3성분 광대역 지진계(CMG-3ESP) 1개와 미기압계 1개가 설치되어 있다.

IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology)에서 제공하는 JWEED (Java version of WEED) 프로그램을 이용하여, 광대역 지진계가 있는 WIZ 관측소로부터 진앙거리 $30 \sim 90^{\circ}$ 에서 발생한 Mw 5.5 이상의 원거리 지진에 대한 목록을 작성하였다. 작성된 목록을 바탕으로 GeoNet에서 제공하는 연속파형 임시저장소에 저장된 지진파형 자료를 Java client인 GeoNetCWBQuery 소프트웨어를 이용하여 수집하였다. 이 때 WIZ 관측소에 기록된 3성분 지진자료 중에서 2007년 4월 20일부터 2013년 9월 6일 사이에 발생한 1,557개의 지진자료를 내려 받았고, 이 중 P파 위상이 명확하게 구분되는 362개를 선택하여 연구에 이용하였다.

자료처리 및 분석

수신함수

선택한 362개 원거리 지진파형에서 P파 초동이 도달하기 이전 10 s와 이후 40 s 자료를 대상으로, 적절한 가우스필터 대역폭 변수(α)를 결정하기 위해서 α 가 2.0, 2.5, 3.0인 가우스 필터를 적용하였다. 200회 반복 연산으로 수신함수를 계산하였으며, 총 362개의 자료 중에서 관측값과 계산값의 오차(ϵ)가 10% 이내인 자료는 α 값에 따라 각각 31, 27, 27개, 오차 20% 이내인 자료는 각각 78, 72, 72개로 나타났다. 이 중 수신함수의 위상들이 가장 명확하게 나타나는, $\alpha = 2.5$ 이고 $\epsilon < 20\%$ 인 조건을 선택하였다. 72개 수신함수의 진앙지는 환태평양 조산대인 섭입대에 위치하며, 대부분이 WIZ 관측소의 북서방향에 놓여 있다(Fig. 3). 비정상적인 수신함수 1개를 제외한 후 후방위각에 따라 도시한 결과, 69개 수신함수의 후방위각은 $275.14 \sim 345.10^{\circ}$ 범위에 놓이며, 나머지 2개 수신함수는 128.96° 와 131.27° 에 위치한다(Fig. 4). 해석의 용이함을 위해 단순히 중합하여 도시한 결과, Pp파 도달 이후 여러 음(-)의

Fig. 3. The epicenters of 72 teleseismic earthquakes (open circles) used for the study. The concentric circles centered at seismic station WIZ (triangle) are at 30-degree intervals of angular distance.

Fig. 4. Receiver functions of 71 teleseismic data recorded at WIZ station. The back-azimuths are in two groups; 275.14° ~ 345.10° and 128.96° ~ 131.27°.

위상 및 양(+)의 위상이 관찰된다(Fig. 5).

$\epsilon < 20\%$ 인 수신함수의 진앙지는 관측소의 관경계가 존재하는 동쪽과 남쪽 및 남서쪽 방향에서 나타나지 않았다. 이러한 방향적으로 제한된 분포는 복잡하고 불규칙한 화산하부의 구조와 북동방향의 주향을 갖는 Hikurangi 해구(Fig. 1)와 Rurima 및 White Island 단층(Han *et al.*, 2014) 등 주변의 대규모 지질구조와 상관있는 모호면의 경사나 굴곡에 의한 영향으로 생각된다. 모호면이 주변 해구와 단층에 의해 북동방향의 주향을 갖는다면 관측소의 북동 및 남서방향에서 도달하는 수

Fig. 5. Radial component of receiver functions (gray curves) and their stacked trace (black curve) derived from 71 teleseismic events recorded at the WIZ station.

신함수의 법선성분 에너지가 작아서(Savage, 1998; Xu *et al.*, 2006) 오차가 커지며, $\epsilon < 20\%$ 의 조건을 만족시키지 못했을 것이다. 따라서 향후 접선성분의 수신함수를 분석하여 관측소 하부의 이방성 및 경사구조에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

S파 속도 역산

초기모델은 Stern *et al.* (1987)이 제안한 뉴질랜드 북섬 Taupo 지역의 v_p 모델을 이용하여 2 km 두께로 30개의 층을 설정하였다. α 는 수신함수와 같이 2.5를 적용하였고, 평활도는 0.8로 설정하여 6회 반복역산을 수행하였다.

뉴질랜드 북섬에 관한 기존연구로 제시된 북섬의 평균 모호면 깊이 25 ± 2 km (Stern *et al.*, 1987)와 북섬 Taupo 화산지역의 모호면 깊이 25 ~ 30 km (Bannister *et al.*, 2004)를 참고하여 초기모델의 모호면 깊이를 23 ~ 30 km로 예상하였다. $\epsilon < 20\%$ 인 71개의 수신함수 역산결과를 중합하여 White Island 하부의 1차원 평균 v_s 모델을 구하였으며(Fig. 6), 이 때 평균 제공된 오차는 평균 0.09로 나타났다. 역산결과, v_s 가 4.16 km/s에서 4.35 km/s로 급격히 변하는 깊이인 24 km에 모호면이 존재하는 것으로 역산결과가 나타나서 기존자료를 바탕으로 예상한 깊이 범위에 놓이며, 지각의 평균 v_s 는 3.69 km/s 정도로 해석된다. 또한 깊이 18 ~ 22 km 구간에서는 상하부층의 v_s 보다 평균 0.15 km/s 정도 작은 4.08 ~ 4.23 km/s의 값을 갖는 저속도층(LVL)의 존재를 지시한다.

지각 내에 LVL이 존재할 경우, 통상적으로 수신함수 분석에 사용하는 P파와 Ps(파선 1), PpPs(파선 4), PpSs+PsPs(파선 5), PsSs(파선 6) 등의 위상뿐만 아니라 LVL의 내부반사(파선 2) 및 하부 경계면에서 다중 반사된 파(파선 3)들까지도 기록될 수 있다(Fig. 7a). 수신함수에 나타난 LVL의 영향을 관찰하기 위해서, 2 km 두께로 구한 모호면까지의 속도정보(Fig. 6)로부터 LVL이 포함된 모델의 구간별 평균 P파속도($\bar{v}_p$) 및

Fig. 6. The stacked result (thick solid) of independent results for the inversion of radial receiver functions. The dashed line indicates the initial velocity model. The initial velocity model is indicated with a dashed line. A low velocity layer (LVL) at depths of 18 to 22 km is evident in the lower crust. The Moho of $v_s = 4.35$ km/s is at a 24 ± 1 km depth.

Fig. 7. (a) Ray paths for converted and multiple phases in the model having a low velocity layer and (b) the stacked receiver function as previously shown in figure 5. Six different paths in (a) may correspond to the phases in (b).

S파속도($\bar{v}_s$)를 계산하였고(Table 1), 이 구간별 평균속도를 이용하여 변환파 및 다중 반사파들의 주시를 계산하였다(Table 2). $\bar{v}_p$ 와 $\bar{v}_s$ 는 구간에 따라 6.11 ~ 7.29 km/s 및 3.53 ~ 4.21 km/s의 범위로 구해지며, 수신함수에서 관측된 각 위상들의 주시(t_o)와 모델로부터 계산한 주시(t_c)의 차이(Δt)는 0.01 ~ 0.83 s의 범위에 놓인다.

LVL의 내부반사에 의해 발생하는 파선 2의 위상은 Pp파보

Table 1. Average P-wave ($\bar{v}_p$) and S-wave velocities ($\bar{v}_s$) using the result of receiver function inversion.

Depth range	$\bar{v}_p$	$\bar{v}_s$
0 ~ 18 km	6.11 km/s	3.53 km/s
0 ~ 22 km	6.29 km/s	3.63 km/s
0 ~ 24 km	6.40 km/s	3.69 km/s
18 ~ 22 km	7.21 km/s	4.16 km/s
18 ~ 24 km	7.29 km/s	4.21 km/s

Table 2. Comparison of observed arrival times (t_o) for each phase on the stacked receiver function in figure 7b and computed arrival times (t_c) using $\bar{v}_p$ and $\bar{v}_s$ in Table 1.

Raypath	Polarity	t_o	t_c	$\Delta t = t_o - t_c $
①	+	2.83 s	2.75 s	0.08 s
②	-	4.08 s	4.09 s	0.01 s
③	+	6.66 s	6.99 s	0.33 s
④	+	10.41 s	10.25 s	0.16 s
⑤	-	12.16 s	12.99 s	0.83 s
⑥	-	16.12 s	15.74 s	0.38 s

다 4.09 s 후에 음의 극성을 갖고 나타날 것으로 계산되며, 이는 수신함수에서 Pp파 도달 이후 4.08 s에 나타나는 강한 음의 위상에 잘 대비된다. 또한 LVL의 하부 경계면에서 다중 반사된 양의 극성을 갖는 파선 3 위상의 t_o 는 6.99 s로, 수신함수에서 6.66 s에 관측되는 양의 위상과 비교적 잘 일치한다(Fig. 7b). 파선 1부터 6까지의 경로로 도달한 모든 위상들의 평균 Δt 는 0.3 s 이내로 비교적 잘 일치하여(Table 2), 수신함수 역산결과 제시된 속도모델이 타당함을 보인다.

많은 화산지역에서 마그마 저장소에 의한 LVL은 대략 20 km 정도의 깊이에서 4 km/s 이하의 v_s 를 갖는다(Bannister *et al.*, 2004; Duan *et al.*, 2005; Jeon *et al.*, 2013; Agostinetti and Chiarabba, 2008; Martinez-Arevalo *et al.*, 2009; de Zeeuw-van Dalfsen *et al.*, 2004). White Island의 LVL은 평균 4.16 km/s으로 이보다는 다소 높은 v_s 를 갖지만, 이 화산섬이 활화산이고 LVL의 깊이 18 ~ 22 km인 점을 감안할 때, 역산결과 구해진 모델의 LVL은 심부 마그마의 영향일 가능성을 배제할 수 없다.

H- κ 종합법

H- κ 종합을 위해 α 가 2.0, 2.5, 3.0인 가우스 필터를 적용한 $\varepsilon < 10\%$ 와 $\varepsilon < 20\%$ 의 수신함수를 이용하였으며, 지각의 평균 v_p 는 뉴질랜드 북섬의 평균인 6.04 km/s (Stern *et al.*, 1987)를 적용하였다. Ps, PpPs, PpSs+PsPs파에 대한 가중치를 각각 0.7, 0.2, 0.1로 설정하여 격자탐색 방법(grid search method)으로 H- κ 종합을 실시하였다(Zhu and Kanomori, 2000).

종합 결과, H- κ 스펙트럼에 나타나는 폐곡선의 면적은 $\alpha = 2.5$ 이고 $\varepsilon < 20\%$ 일 때 가장 작게 나타났다. 관측소 하부의 모호면 깊이 $H = 24.5$ km이고 v_p/v_s 값인 $\kappa = 1.64$ 일 때, 신뢰도

Fig. 8. H- κ stack of the radial receiver functions. The maximum coherence (cross) at the WIZ station indicates a Moho depth of 24.5 km and the v_p/v_s ratio of 1.64.

가 최대치를 갖는다(Fig. 8). H- κ 중합법을 이용하여 구한 모호면 깊이 24.5 km는 수신함수를 역산하여 구한 24 ± 1 km와 비교적 잘 일치한다. κ 값은 비교적 작은 값을 보이는데, 이는 v_s 감소로 κ 가 증가하는 유체나 용융된 마그마에 의한 영향(Koulakov *et al.*, 2009)이라고 보기 어렵고, 화산지역의 특성상 체적탄성계수의 감소로 v_p 가 크게 감소하는 가스 및 증기(Londoño, 2010; Chatterjee *et al.*, 1985), 혹은 뜨거운 결정질 마그마(Husen *et al.*, 2004)에 의한 영향일 가능성이 있다.

Fig. 9. Pierce points (solid circles) at the Moho for P_s raypaths arriving at the WIZ station (solid triangle).

모호투과점

지각의 두께는 수신함수 역산으로 구한 24 km와 H- κ 중합의 결과인 24.5 km의 평균 두께 24.25 km를 적용하여 역산에 사용한 71개 자료의 모호투과점(pierce point)을 계산하였다(Fig. 9). 71개 지진자료의 접근각(approaching angle)은 PREM (Preliminary Reference Earth Model) 모델에서 $13.9 \sim 27.3^\circ$ 로 계산되며, 모호투과점은 진앙지 분포와 같이 주로 WIZ 관측소에서 북서방향으로 6.29 ~ 14.21 km 떨어진 지점에 위치하고 있다. White Island 화산체의 크기가 16×8 km에 달하여(Cole and Graham, 1989), WIZ 관측소에서 기록된 지진파에 White Island 화산의 심부 마그마 저장소에 대한 정보가 포함되어 있을 가능성이 높다. 따라서 수신함수 역산결과인 1차원 v_s 구조에서 하부지각의 저속도층이 나타난 것으로 분석된다.

결론

이 연구는 뉴질랜드 북섬 북동쪽에 위치한 White Island 화산섬에 있는 WIZ 관측소의 광대역 지진계로 기록한 원거리 지진을 분석하여 관측소 하부의 지각속도를 다음과 같이 규명하였다.

1. 가우스필터 대역폭 변수 2.5를 적용한 오차 20% 이내의 수신함수 자료는 총 71개이다. 그 중 69개는 후방위각 $275.14 \sim 345.10^\circ$ 에 위치하며, 2개는 128.96° 와 131.27° 에 위치하여 방향적으로 제한된 진앙지 분포를 보인다.
2. 수신함수 역산 결과, WIZ 관측소 하부에 v_s 가 4 km/s 이상($v_s = 4.35$ km/s)이며 상부층과 0.19 km/s의 뚜렷한 차이를 보이는 깊이 24 km를 모호면의 깊이로 해석하였다.
3. 수신함수 역산으로 구한 지각의 $\bar{v}_s$ 는 3.69 km/s 정도이며, 18 ~ 22 km 구간에 4.08 ~ 4.23 km/s의 v_s 를 갖는 저속도층이 존재하는 것으로 해석된다. 이 저속도층은 심부 마그마 저장소의 영향일 가능성이 있다.
4. H- κ 중합 결과, White Island 평균 지각 두께는 24.5 km로 나타났으며, v_p/v_s 는 1.64로 비교적 작은 값을 갖는 것으로 분석되었다. 낮은 κ 값은 화산지역에서 나타나는 암석의 탈가스 작용으로 인한 가스와 증기 영향이거나 심부의 뜨거운 결정질 마그마에 의한 것으로 해석된다.
5. 모호투과점은 WIZ 관측소에서 북서방향으로 6.29 ~ 14.21 km 떨어진 지점에 위치하여, 기록된 지진파가 White Island 화산 하부에 위치한 심부 마그마 저장소에 대한 영향을 받았을 것으로 해석된다.
6. 이 연구는 한 개의 광대역 지진계에 기록된 지진자료만을 이용하였고, 양호한 S/N를 갖는 수신함수의 진앙지가 북서-남동 방향으로 한정되어 WIZ 관측소 하부의 정확한 v_s 구조를 결정하는 데에 한계가 있었다. 따라서 추후 중자력 및 표면파 탐사자료를 포함한 각종 지구물리측정 자료와 지질 및 지화학 자료를 종합하고 접선성분의 수신함수를 분석하여 White

Island의 지각특성을 구하기 위한 노력이 있어야 할 것이다.

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

- Agostinetti, N. P. and Chiarabba, C., 2008, Seismic structure beneath Mt Vesuvius from receiver function analysis and local earthquakes tomography: evidences for location and geometry of the magma chamber, *Geophysical Journal International*, **175**, 1298-1308.
- Ammon, C. J., 1991, The isolation of receiver effects from teleseismic *P* waveforms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**, 2504-2510.
- Ammon, C. J., Randall, G. E., and Zandt, G., 1990, On the Nonuniqueness of Receiver Function Inversions, *Journal of Geophysical Research*, **95**, 15303-15318.
- Bannister, S., Bryan, C. J., and Bibby, H. M., 2004, Shear wave velocity variation across the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, from receiver function inversion, *Geophysical Journal International*, **159**, 291-310.
- Black, P. M., 1970, Observations on White Island Volcano, New Zealand, *Bulletin Volcanologique*, **34**, 158-167.
- Chang, S.-J. and Baag, C.-E., 2005, Crustal structure in Southern Korea from joint analysis of teleseismic receiver functions and surface-wave dispersion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 1516-1534.
- Chang, S.-J., Baag, C.-E., and Langston, C. A., 2004, Joint analysis of teleseismic receiver function and surface wave dispersion using the genetic algorithm, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 691-704.
- Chatterjee, S. N., Pitt, A. M., and Iyer, H. M., 1985, V_p/V_s ratios in the Yellowstone National Park region, Wyoming, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **26**, 213-230.
- Cole, J. W. and Graham, I. J., 1989, Petrology of strombolian and phreatomagmatic ejecta from the 1976-82 White Island eruption sequence, *New Zealand Geological survey Bulletin*, **103**, 61-68.
- 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.
- de Zeeuw-van Dalfsen, E., Pedersen, R., Sigmundsson, F., and Pagli, C., 2004, Satellite radar interferometry 1993-1999 suggests deep accumulation of magma near the crust-mantle boundary at the Krafla volcanic system, Iceland, *Geophysical Research Letters*, **31**, doi: 10.1029/2004GL020059.
- Duan, Y.-H., Xhang, X.-K., Kiu, Z., Yuan, Q.-X., Xu, Z.-F., Wang, F.-Y., Fang, S.-M., and Yang, Z.-X., 2005, Study on crustal structures of Changbaishan-Jingpohu volcanic area using receiver functions, *Chinese Journal of Geophysics*, **48**, 389-396.
- GeoNet, 2013, <http://geonet.org.nz/>, (November 20, 2013 Accessed).
- Hamilton, R. M. and Gale, A. W., 1968, Seismicity and structure of North Island, New Zealand, *Journal of Geophysical Research*, **73**, 3859-3876.
- Han, A., Kim, K., and Kim, K. Y., 2014, Source mechanism of an explosive eruption at White Island Volcano, New Zealand, determined from waveform inversions, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **17**, 58-65.
- Husen, S., Smith, R. B., and Waite, G. P., 2004, Evidence for gas and magmatic sources beneath the Yellowstone volcanic field from seismic tomographic imaging, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **131**, 397-410.
- Jeon, T., Kim, K. Y., Park, Y., and Kang, I.-B., 2012, S-wave velocity structure beneath the KS31 seismic station in Wonju, Korea using the joint inversion of receiver functions and surface-wave dispersion curves and the H- κ stacking method, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **15**, 8-15.
- Jeon, T., Kim, K. Y., and Woo, N., 2013, S-wave velocities beneath Jeju Island, Korea, using inversion of receiver functions and the H- κ stacking method, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **16**, 18-26.
- Julià, J., Ammon, C. J., Herrmann, R. B., and Correig, A. M., 2000, Joint inversion of receiver function and surface wave dispersion observations, *Geophysical Journal International*, **143**, 99-112.
- Kikuchi, M. and Kanamori, H., 1982, Inversion of complex body waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 491-506.
- Kim, S. G. and Lee, S. K., 2001, Moho discontinuity studies beneath the broadband stations using receiver function in South Korea, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **1**, 139-155.
- Koulakov, I., Yulistira, T., Luehr, B.-G., and Wandono, 2009, P , S velocity and V_p/V_s ratio beneath the Toba caldera complex (Northern Sumatra) from local earthquake tomography, *Geophysical Journal International*, **177**, 1121-1139.
- Langston, C. A., 1979, Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, *Journal of Geophysical Research*, **84**, 4749-4762.
- Ligorria, J. P. and Ammon, C. J., 1999, Iterative deconvolution and receiver-function estimation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**, 1395-1400.
- Londoño, J. M., 2010, Activity and V_p/V_s ratio of volcanotectonic seismic swarm zones at Nevado del Ruiz volcano, Colombia, *Earth Sciences Research Journal*, **14**, 111-124.
- Martinez-Arevalo, C., Musumeci, C., and Patanè, D., 2009, Evidence of a partial melt zone beneath Stromboli volcano (Italy) from inversion of teleseismic receiver functions, *Terra Nova*, **21**, 386-392.
- Owens, T. J. and Zandt, G., 1985, The response of the

- continental crust-mantle boundary observed on broadband teleseismic receiver functions, *Geophysical Research Letters*, **12**, 705-708.
- Peltier, A., Scott, B., and Hurst, T., 2009, Ground deformation patterns at White Island volcano (New Zealand) between 1967 and 2008 deduced from levelling data, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **181**, 207-218.
- Reyners, M., 1980, A microearthquake study of the plate boundary, North Island, New Zealand, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **63**, 1-22.
- Salmon, M., Kennett, B. L. N., Stern, T., and Aitken, A. R. A., 2013, The Moho in Australia and New Zealand, *Tectonophysics*, **609**, 288-298.
- Savage, M. K., 1998, Lower crustal anisotropy or dipping boundaries? Effects on receiver functions and a case study in New Zealand, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 15069-15087.
- Sherburn, S., Scott, B. J., Nishi, Y., and Sugihara, M., 1998, Seismicity at White Island volcano, New Zealand: a revised classification and inferences about source mechanism, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **83**, 287-312.
- Shibutani, T., Sambridge, M., and Kennett, B., 1996, Genetic algorithm inversion for receiver functions with application to crust and uppermost mantle structure beneath Eastern Australia, *Geophysical Research Letters*, **23**, 1829-1832.
- Stern, T., Smith, E. G. C., Davey, F. J., and Muirhead, K. J., 1987, Crustal and upper mantle structure of the northwestern North Island, New Zealand, from seismic refraction data, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **91**, 913-936.
- USGS, 2013, <http://www.usgs.gov/>, United States Geological Survey (November 20, 2013 Accessed).
- Xu, Z., Xu, M.-J., Wang, L.-S., Liu, J.-H., Zhong, K., and Tong, W.-W., 2006, A study on crustal anisotropy using P to S converted phases of receiver functions: Application to Ailaoshan-Red River fault zone, *Chinese Journal of Geophysics*, **49**, 383-393.
- Yoo, H. J., Herrmann, R. B., Cho, K. H., and Lee, K., 2007, Imaging the three-dimensional crust of the Korean Peninsula by joint inversion of surface-wave dispersion and teleseismic receiver functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 1002-1011.
- Zhu, L. and Kanamori, H., 2000, Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions, *Journal of Geophysical Research*, **105**, 2969-2980.