수신함수 역산 및 H- κ 중합법을 이용한 제주도 하부의 S파 지각 속도

전태현¹ · 김기영^{2*} · 우남철³

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부

²강원대학교 지구물리학과

³기상청 지진감시과

S-Wave Velocities Beneath Jeju Island, Korea, Using Inversion of Receiver Functions and the H- κ Stacking Method

Taehyeon Jeon¹, Ki Young Kim^{2*}, and Namchul Woo³

¹Geological Research Division, KIGAM

²Department of Geophysics, Kangwon National University

³Earthquake Detection Division, Korea Meteorological Administration

요약: 제주도 한라산 주위에 위치한 JJU와 JJB 관측소 하부의 S파 속도구조를 규명하기 위하여, 이 관측소에서 2007년 이후 기록한 M_w 5.5 이상인 원격 지진자료 중 150개 수신함수를 이용하여 역산 및 H- κ 중합법에 적용하였다. 모호면에서 변환된 P_s 파는 JJU 관측소의 북서쪽(후방위각 $207 \sim 409^\circ$, 평균 308°)과 JJB 관측소의 남동쪽(후방위각 $119 \sim 207^\circ$, 평균 163°) 방향으로 뚜렷하지 않게 나타났다. 이것은 아마도 모호면의 점이적인 속도변화나 지각 내의 속도 불균질층 때문일 수 있다. 수신함수 역산으로부터 계산된 S파 속도모델은 지각 내의 저속도층을 뚜렷이 보여주며, 30 ~ 40 km 깊이에서 점이적으로 증가하는 양상을 보인다. JJB 관측소 반경 18 km 이내에서 저속도층($v_s \leq 3.5$ km/s)은 14 ~ 26 km에 있고, $v_s \geq 4.3$ km/s로 정의한 '모호면'은 34 km 깊이에 있는 것으로 분석되었다. 서쪽으로 약 10 km 떨어진 곳에 위치한 JJU 관측소의 반경 16 km 이내에서는 저속도층과 '모호면'이 14 ~ 24 km와 30 km에 각각 존재하여 JJB 관측소에 비해 다소 얕은 깊이에서 나타난다. JJU와 JJB 관측소에 대한 H- κ 분석결과는 지각 두께가 29 km와 33 km이며, 종파/횡파 속도비(v_p/v_s)가 1.64와 1.75임을 각각 나타내어 화산 정상에 가까운 곳에서 상대적으로 낮은 v_p/v_s 가 관찰되었다.

주요어: S파 속도, 수신함수, H- κ 분석법, 저속도층, 모호

Abstract: Shear-wave velocity (v_s) structures beneath two seismic stations, JJU and JJB on the flanks of the volcano Halla on Jeju island, Korea, were estimated by receiver-function inversion and H- κ stacking applied to 150 teleseismic events ($M_w \geq 5.5$) recorded since 2007. P_s waves converted at the Moho discontinuity does not appear clearly for northwesterly back-azimuths ($207 \sim 409^\circ$, average 308°) at station JJU and southeasterly back-azimuths ($119 \sim 207^\circ$, average 163°) at station JJB. This may be due to a gradual velocity increase at Moho or heterogeneity within the crust. The v_s models derived by inversion of receiver functions indicate a distinct low velocity layer ($v_s \leq 3.5$ km/s; LVL) within the crust and a gradual increase in v_s in the depth interval of 30 to 40 km. Within the radius of 18 km beneath station JJB, the LVL occurs at depths of 14 ~ 26 km and the 'Moho' ($v_s \geq 4.3$ km/s) is at 34 km depth. Ten kilometers to the west, within the radius of 16 km beneath station JJU, both the LVL and the Moho are significantly shallower, at depths of 14 to 24 km and 30 km, respectively. H- κ analyses for stations JJU and JJB yield estimated crustal thickness of 29 and 33 km and v_p/v_s ratios of 1.64 and 1.75, respectively. The lesser v_p/v_s ratio was derived for rocks nearest to the peak of the volcano.

Keywords: S-wave velocity, receiver function, H- κ method, low velocity layer, Moho

2012년 12월 18일 접수; 2013년 2월 8일 수정; 2013년 2월 12일 채택

*Corresponding author

E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National Univ., Hyoja 2-dong, Chuncheon-si, Kangwon-do, 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.

서론

제주도는 대한민국 남단에 위치하며, 길이가 동서방향으로 74 km, 남북방향으로 32 km인 타원형의 화산섬이다(Fig. 1). 유네스코에 등록된 국내 유일의 화산섬으로 많은 연구가 수행되었지만, 일부 심부시추자료를 이용한 지질층서연구(Oh *et al.*, 2000)와 중자력 (Kwon *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 1983) 및 상시미동을 이용한 지구물리학적 연구(Kim and Hong, 2012; Hong and Kim, 2010)를 제외하면 대부분 한라산 중심의 지표지질조사에 한정되었다.

지각속도 구조를 얻는 방법으로는 여러 접근법이 있으며, 인공지진파를 이용한 굴절법 및 반사법 탐사가 널리 적용되고 있다. 하지만 굴절법 탐사의 경우 제주도는 파원-수신기 사이의 거리가 충분히 확보되지 않으며, 반사법 방법은 많은 비용이 소요된다. 또한 상시미동을 이용하는 경우에는 조사심도가 상부지각의 최상부에 머무르는 한계가 있다. 이에 비해 광대역 지진관측소에서 기록된 원격지진을 이용하는 수신합수 분석법은 별도의 파원을 필요로 하지 않고, 지각 뿐만 아니라 상부 맨틀을 포함한 암권까지의 S파 속도구조도 규명할 수 있는 장점이 있는 저비용의 고효율적인 방법으로 이 연구에 이용되었다.

수신합수 분석법은 관측소에 거의 수직으로 입사하는 진앙 거리 30° 이상인 원거리지진을 이용하여 관측소 하부의 지각 및 암권의 속도구조 규명을 위해서 국외는 물론 국내에서도 지각구조 규명에 널리 사용되고 있다. 1964년 Transfer Method (Phinney, 1964)라는 명칭으로 처음 소개된 수신합수 분석법(receiver function method)은 Burdick and Langston (1977), Vinnik and Kosarev (1981) 등에 의해 수차례 발전되었고, 특히 시간영역에서 선형 역산과정을 광대역 자료에 적용시킨 바 있는 Owens *et al.* (1984)에 의하여 획기적으로 개선되었다(Mohsen, 2004).

Chang and Baag (2005)은 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 사용하여 수신합수와 레일리파 위상속도를 복합역산함으로써 한반도 관측소 18곳과 Chang *et al.* (2004)에서 분석된 4곳을 함께 사용하여 남한의 모호면 분포를 도출하였다. 그 결과 한반도에서의 모호면은 26~36 km 범위에 있고, 몇몇 관측소에서 8~10 km 깊이에 뚜렷한 속도 불연속면이 있음을 밝혔다. 또한 Yoo *et al.* (2007)은 한반도 남부의 80개 관측소에 기록된 수신합수, 레일리 위상속도 그리고 레일리파 및 러브파의 군속도(group velocity)를 복합역산함으로써 각 관측소의 모호면 깊이를 산출한 후 이들을 내삽(interpolation)하여 지각과 상부 맨틀을 3차원으로 영상화 하였다. Park *et al.* (2009)은 경상 분지 내 4곳의 관측소에서 기록된 원격지진을 이용하여 모호면이 28~35 km 내에 있음을 밝혔고, Han *et al.* (2010)은 옥천 습곡대 내 6곳의 관측소에 기록된 원격지진을 이용하여 모호면이 32~34 km 내에 있음을 밝힌 바 있다.

제주도는 약 180만 년 전부터 발생한 화산활동으로 형성되었으며 약 천 년 전에도 화산활동이 있었다는 문헌기록 있다(Jeon, 2009). 한라산의 주체가 하성 쇄설성 함력 퇴적물이라는 견해(Yoon *et al.*, 2005)도 있으나, 일반적으로 제주도는 초기 수성화산활동이 끝난 후, 용암분출이 우세하게 일어난 중기 플라이스토세 이후부터 형성되기 시작하여 수천 년 전까지 발생한 화산활동에 의해 형성된 것으로 알려져 있다(Koh *et al.*, 2003). 제주도의 화산암들은 열점 기원의 화산활동에 의해 생성된 것으로 오랫동안 추정되어 왔으나(Koh *et al.*, 2003; Lee, 1982), 최근의 연구는 후기 신생대 동안의 광역적인 응력장 변화에 기인한 천부 연약권에서의 감압용융(decompression melting)의 결과에 의해 생성된 것으로 해석되고 있다(Brenna *et al.*, 2012).

제주도 하부구조를 연구할 목적으로 중력, 자력, 지전기, 자기지전류(MT, magnetotelluric), 상시미동(microtremor)의 수직/수평(H/V) 스펙트럼비 및 공간자기상관함수 분석, 수신합수 역산 등의 여러 지구물리 조사가 실시된 바 있다. 중력자료를 해석하여 기반암이 최대 5 km (Kwon *et al.*, 1995)와 4 km (Lee *et al.*, 1983)에 분포한다고 보고된 바 있으며, 중력 및 자력탐사를 통하여 상부 화산암층과 하부 기반암 경계면의 깊이는 장축 하부에서는 1.5~3.0 km, 용암대지 하부에서는 1.0~1.5 km 인 것으로 평가(Kwon *et al.*, 1995)된 바 있다.

Hong and Kim (2010)에 의해 실시된 상시미동의 H/V 스펙트럼비 분석결과는 제주도의 기반암이 섬 중심부 아래로 원 구조임을 보여주며, 기반암 상부에 놓인 화산암의 평균 횡파속도를 1,800 m/s로 가정하고 구한 기반암 깊이는 약 640 m ~ 2,140 m 정도이다. 상시미동에 공간자기상관함수(spatial autocorrelation) 분석법을 적용시키고 주변 시추주상도와 비교한 결과(Kim and Hong, 2012), 화산 노두 아래에 미고결 해양 퇴적층인 U층(Oh *et al.*, 2000)과 서귀포층이 S파 속도 1.1 km/s 이내의 저속도층으로 해석되었고, H/V 스펙트럼비 분석법을 적용하여 한라산 산정아래에서는 기반암이 약 3.2 km에 있는

Fig. 1. Locations of the permanent seismic stations JJU and JJB on Jeju Island, Korea. The background contours of depth to the basement at intervals of 0.5 km were derived by gravity modeling (Kwon *et al.*, 1995). The dashed line indicates a structural boundary, "Bukchon-Pyoseon Line", proposed by Koh (1997).

것으로 평가된 바 있다. 또한 Park (2010)은 수신합수 역산을 통하여 한반도의 지각구조 경향을 분석하기 위하여 JJU 관측소 자료를 이용하였으며, 제주도 하부에서의 깊이 30 km 모호면, 410 km 불연속면과 660 km 불연속면의 존재를 제시한 바 있으나, 제주도 지각구조에 대한 분석은 수행되지 않았다.

이 연구에서는 기상청의 JJU 관측소와 한국지질자원연구원의 JJB 관측소에서 기록된 원격지진자료의 수신합수를 역산하여 제주도 지각의 S파 속도구조를 구하고자 하였다. 또한 H- κ 중합법으로 지각 두께와 종파/횡파 속도비(v_p/v_s)를 산출하였으며, 그 결과를 종합하여 지질학적 해석을 시도하였다.

연구방법 및 이론

수신합수 분석법

수신합수 분석법은 이미 잘 알려진 방법으로 많은 논문에서 발표된 바 있으므로, 여기서는 간략히 설명토록 한다. 수신합수를 계산하는 방법에는 계산영역에 따라 주파수영역 분석법(Clayton and Wiggins, 1976)과 시간영역 분석법(Gurrola *et al.*, 1990; Ammon, 1992; Ligorria and Ammon, 1999)이 있다. 이 연구에서는 반복적 시간영역 디컨볼루션 접근법(Kikuchi and Kanamori, 1982)을 수신합수 계산에 적용한 반복적 시간영역 수신합수 계산법을 사용하였다(Ligorria and Ammon, 1999).

기록계에 기록된 지진동 D는 시간영역에서 기록계 임펄스 반응(I), 파원시간함수(S), 수신합수(E)의 컨볼루션으로

$$D(t) = I(t) \times S(t) \times E(t) \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

진앙거리 30° 이상의 원거리에서 발생한 P파는 관측소에 거의 수직으로 입사하며, 지하에 속도차이가 많이 나는 경계면에서 파의 변환이 일어난다(Langston, 1979). 따라서 모호면에 입사한 지진파는 P파 뿐만 아니라 변환된 S파와 이들의 다중반사파 위상(multiply reflected phase)들로 구성되어 있다. 관

측소 하부에서 수직으로 입사하는 원거리지진의 경우 P파와 S파는 대부분 수직과 수평성분에 각각 기록된다(Ammon, 1991). 따라서 관측소 하부 불연속면에서 변환된 P-S 변환파는 수신합수의 수직성분에 거의 기록되지 않으므로, 관측된 지진동의 수평성분 D_h 은 관측된 지진동의 수직성분 D_v 와 수신합수의 수평성분 E_h 의 컨볼루션 형태로 근사하게 나타낼 수 있다. 반복적 디컨볼루션 접근법은 E_h 과 D_h 을 컨볼루션한 값과 D_h 의 차이가 최소가 되는 수신합수를 반복적 역산과정을 통하여 구하는 방법이다.

H- κ 분석법

H- κ 분석법은 P파로부터 변환된 S파(P_S 변환파)와 다중반사파들의 주시차이 및 선형적으로 결정된 지각의 평균 P파 속도($\bar{V}_p$)를 이용하여 모호면까지의 깊이(H)와 P파와 S파의 속도비(v_p/v_s)인 κ 를 산출하는 방법이다(Zhu and Kanamori, 2000). 지각의 속도가 일정하다면 모호면에서 발생하는 P_S 변환파와 다중반사파들은 예측된 시간차를 두고 선형적으로 나타나므로 (Fig. 2), 이 방법에서는 여러 이벤트로부터 구한 P_S 변환파와 다중반사파들의 수신합수 진폭을 H- κ 영역에서 중합한다. 즉,

$$P(H, \kappa) = W_{P_S} R(t_{P_S}) + W_{P_P P_{mS}} R(t_{P_P P_{mS}}) - W_{P_P S_{mS}} R(t_{P_P S_{mS}}) \quad (2)$$

으로, 여기서 W 는 선형적 가중치, $R(t)$ 는 각 위상의 예상 도달 시간에서의 수신합수 진폭을 각각 의미한다. 이 때 진폭이 최대가 되는 값을 그 관측소 하부의 지각 두께와 κ 로 결정한다.

불연속면이 경사져 있거나 속도가 수평방향으로 점이적으로 변하는 모호면이 있는 곳에서는 H- κ 분석법이 부정확한 결과를 얻게 되므로(Zandt and Ammon, 1995; Julia and Mejia, 2004), 이러한 한계를 극복하기 위해서 방위각에 따라 많은 자료를 분석해보는 것이 필요하다. 이 연구는 각 지진 이벤트를 분석하여 수신합수를 얻은 후 지각의 두께인 H와 κ 를 산출하기 위해 Zhu and Kanamori (2000)의 중첩 절차를 수행하는 알고리즘을 사용하였다.

Fig. 2. (a) Ray paths for the labeled phases arriving at a seismic station. The S- and P-wave velocities of the surface layer are less than those of the underlying layer; $v_{s1} < v_{s2}$ and $v_{p1} < v_{p2}$. (b) A schematic of the corresponding canonical receiver function (modified from Ammon *et al.*, 1990).

분석 및 결과

지진자료

속도구조를 규명하기 위한 이 연구에서는 제주도 내에 설치되어 있는 기상청 관측망인 JJU 관측소의 STS-2 속도계와 한국지질자원연구원에서 설치 운영 중인 JJB 관측소의 CMG-3TB 속도계에서 기록한 광대역 3성분 자료를 사용하여 수신함수를 계산하였다. 이 자료는 진앙거리 $30 \sim 90^\circ$ 사이에서 발생한 원격지진으로, JJU 관측소에서 2008~2010년 사이에 기록된 규모(M_w) 5.5 이상인 90개와 JJB 관측소에서 2007~2012년 사이에 기록된 규모(M_w) 6.0 이상인 147개이다. 분석에 사용된 지진자료는 진앙지가 한정되어 있어서, 분석가능한 원격지진의 후방위각이 고르게 분포하지 않으며, 북쪽과 동쪽 방향의 자료가 충분하지 않음을 보인다(Fig. 3).

이 연구에서는 반복적 시간영역 수신함수 계산법(Ligorria and Ammon, 1999)을 사용하였으며, 우선 시추공 관측소인 JJB의 센서는 설치 시 회전에 의한 보정치인 -124.2° (Shin *et al.*, 2009)를 사용하여 E-W 및 N-S 방향으로 수평성분을 보정하였다. 또한 기기효과와 진원 및 경로효과를 제거하고 관측소 하부의 반응만을 계산하기 위하여 Langston (1979)이 제안한 진원 균일화과정(source equalization procedure)을 수행하였다.

후방위각(back azimuth)에 따른 수신함수

이 연구에서는 가우스 필터 대역폭 변수(Gaussian filter bandwidth parameter)값 2.5(약 1.2 Hz 이하)를 사용하여 P파 도달 이전 10 s와 이후 30 s의 자료에 반복해서 적용함으로써, 가장 긴 주기에서 평탄한 스펙트럼을 만들어주는 가우스 펄스(Gaussian pulse)의 합으로 구성되도록 하였고, 곁가지(side-lobe)를 줄임으로써 해석을 용이하게 하였다. 100번의 수신함수 연산 후 관측된 값과 계산된 값의 오차가 20% 이하인 수신함수는 JJU 관측소와 JJB 관측소에서 각각 54개와 115개이

다. JJU 관측소에서 기록된 자료 중에서 후방위각이 $119 \sim 191^\circ$ (평균 155°) 사이에 해당하는 수신함수에서는 모호면으로부터 발생한 P_s 파가 3 s 내외에서 정점이 뚜렷하게 나타난다(Fig. 4a). 그러나 후방위각이 $207 \sim 409^\circ$ (평균 308°) 사이인 수신함수에서는 P_s 파의 정점이 뭉그러져 불분명하게 나타나는 대조적인 특징을 보이며, JJB 관측소에서 기록된 자료 중에서도 후방위각이 $119 \sim 207^\circ$ (평균 163°) 사이에 해당하는 수신함수에서도 4 s 내외에서 이와 같은 특징을 보인다. 두 관측소에서 각각 계산된 수신함수와 이들의 중첩된 수신함수는 Fig. 5와 같다.

Fig. 4. Receiver functions for back-azimuths (BAZ) of teleseismic data recorded at (a) JJU and (b) JJB stations. Arrivals for the P_s phase, generated by wave conversion at the Moho, occur around 3 s and 5 s after the direct P wave at stations JJU and JJB, respectively. This phase is indistinct, however, for some back azimuths (dashed boxes), which may indicate that gradual changes in v_s near the Moho were encountered by arrivals from those directions.

Fig. 3. Locations of epicenters for seismic events recorded at (a) JJU and (b) JJB stations (solid triangles). The concentric circles, at 30-degree intervals of angular distance, are centered on the Jeju stations.

Fig. 5. Receiver functions (gray curves) for teleseismic events recorded at the (a) JJU and (b) JJB stations. Stacked receiver functions are shown as thick and black curve.

수신함수 역산결과

오차가 20% 이내인 수신함수 중 역산된 속도가 비현실적인 수신함수를 분석과정에서 제외하였다. 이에 따라 JJU 관측소에서는 수신함수 54개 중 43개만을 선택하였고, JJB 관측소에서는 수신함수 115개 중 107개만을 분석에 사용하였다. 역산에 사용된 초기모델은 PREM (Preliminary Reference Earth Model) 모델(Dziewonski and Anderson, 1981)을 내삽하여 구한 두께 2 km의 균질한 층 50개로 구성하였다. 수신함수 역산 과정에서 가우스 필터 대역폭 변수(Gaussian filter bandwidth parameter)로 2.5(약 1.2 Hz 이하)를 적용하였으며, 평활도(smoothness)는 0.5로 택하였다. 6회에 걸쳐 반복 역산을 수행한 결과 JJU 관측소에 기록된 각 이벤트 역산에 대한 평균제곱근(root-mean-squared: RMS) 오차는 0.0786이며, JJB 관측소에 기록된 각 이벤트에 대한 평균 RMS 오차는 0.0968이다.

깊이에 따라 변하는 S파 속도역산 결과는 두 관측소 모두 상부지각과 하부지각 사이에서 뚜렷한 저속도층을 보이며, 모호면이 존재할 것으로 예상되는 깊이인 30~40 km 구간에서 속도불연속면이 존재하지 않고 점이적으로 증가하는 특성을 보인다(Fig. 6). 뚜렷한 속도 불연속면이 나타나지 않으므로, 지진학적 모호의 기준인 P파 속도 7.6 km/s (Lowrie, 1997)의 약 $1/\sqrt{3}$ 인 4.3 km/s를 기준으로 ‘모호면’을 정의하였다(Kgaswane *et al.*, 2009; Ozalaybey *et al.*, 1997).

이렇게 정의된 ‘모호면’의 깊이는 수신함수 역산결과, JJU 관측소 하부에서 30 km이며, 지각의 S파 평균속도($\bar{v}_s$)는 3.6 ± 0.6 km/s이고, 깊이 14~24 km 사이에 $\bar{v}_s = 3.1 \pm 0.6$ km/s인 저속도층($\bar{v}_s \leq 3.5$ km/s)이 10 km 두께로 존재함을 지시한다(Table 1). 또한 JJB 관측소 하부에서는 $\bar{v}_s = 3.6 \pm 0.6$ km/s인 지각이 34 km 두께로 존재하며, 이 중 14~26 km 깊이 구간에는 $\bar{v}_s = 3.3 \pm 0.6$ km/s인 저속도층이 12 km 두께로 놓여 있는 것으로 분석된다. 따라서 JJU 관측소보다는 저속도층과 ‘모호면’의 깊이가 모두 2~4 km 정도 깊게 존재하는 것

으로 해석된다(Fig. 6). JJB 관측소가 JJU 관측소보다 제주도의 중심부에서 먼 점을 감안할 때(Fig. 1), 저속도층 및 모호면이 제주도의 중심부 쪽으로 알아지는 구조를 갖고 있을 가능성을 제시한다.

또한 상부지각과 하부지각 사이의 14~26 km 깊이에 있는 저속도층은 일반적인 취성-연성 변환대(brittle-ductile transition zone)일 가능성(Fossen, 2010)도 있으나, 화산지역에서 부분 용융된 마그마로 추정되는 저속도층의 S파 속도가 3.1~3.5 km/s 정도인 점(Duan *et al.*, 2005; Tuluka, 2010)과 제주도가 역사 시대에도 화산활동이 있었다는 점을 고려해 볼 때 용융된 마그마에 의한 가능성(Bannister *et al.*, 2004; Wilson *et al.*, 2003; Duan *et al.*, 2005; Tuluka, 2010)을 배제할 수 없다.

6~8 km 깊이에 v_s 가 높게 나타나며, 깊이 20 km를 중심으로 저속도층이 존재하고, 하부로 속도가 점이적으로 증가하는 양상은 해양 열점(Wolfe *et al.*, 2009)과 매우 흡사하다. 그러나 해양열점으로 보기에는 제주도가 해양지각 위에 놓여 있지는 않고, 점이적 속도증가가 410 km와 660 km 깊이의 맨틀 접이대까지 계속되지 않으며, 약 40 km 깊이에서 속도증가율이 급격히 감소하는 부정적 증거가 존재한다.

그러나 단 2개 지진관측소에서 30~62 개월간 기록된 원격 자료의 수신함수 역산만으로 제주도 하부의 모호면의 기하학적 형태를 포함한 S파 속도구조를 정확히 밝히는 데는 한계가 있다. 차후 3성분 광대역 이동식 관측소를 운영하여 추가적으로 지진자료를 보완하여 종합적인 해석이 이루어져야 할 것이다.

JJU 관측소와 JJB 관측소가 서로 10 km 정도 밖에 떨어져 있지 않고, 역산의 신뢰도를 높이기 위하여 두 관측소 역산모델에 대한 평균분석을 실시한 결과는 14~24 km 깊이구간에 $\bar{v}_s = 3.2 \pm 0.1$ km/s인 저속도층이 10 km 두께로 존재하는 것으로 분석되며(Fig. 6c), $\bar{v}_s$ 가 3.6 ± 0.1 km/s인 지각의 두께는 32 km로 두 관측소에서 구한 값의 중간값으로 계산된다(Table 1).

Table 1. Results of receiver function (RF) inversion and H- κ stacking analyses. Overall thicknesses (H) and average shear-wave velocities ($\bar{v}_s$) of the crust were derived by the RF inversion and H- κ stacking analyses. Depth ranges and $\bar{v}_s$ of the low-velocity layer were derived by the RF inversion. v_p/v_s ratios of the crust were determined by H- κ stacking analyses.

			JJU	JJB	JJU and JJB
			RF Inversion	H- κ Analysis	
Crust Overall	Thickness (km)		30	34	32
			29	33	33
	$\bar{v}_s$ (km/s)	RF Inversion	3.6 ± 0.6	3.6 ± 0.6	3.6 ± 0.1
		H- κ Analysis (assumed)	3.6 ($\bar{v}_p = 6.3$)	3.6 ($\bar{v}_p = 6.3$)	3.6 ($\bar{v}_p = 6.3$)
Low-velocity Layer	v_p/v_s	H- κ Analysis	1.64	1.75	1.73
	Depth Range (km)	RF Inversion	14 ~ 24	14 ~ 26	14 ~ 24
	$\bar{v}_s$ (km/s)	RF Inversion	3.0 ± 0.5	3.2 ± 0.6	3.2 ± 0.1

Fig. 6. Shear-wave velocity profiles derived from radial receiver functions for teleseismic events recorded at stations (a) JJU, (b) JJB, and (c) mean values of v_s for JJU (dotted gray), JJB (solid gray), and combined events after normalization (solid black). The dotted lines indicate the initial velocity model.

H- κ 분석결과

식 (2)에 $W_1=0.7$, $W_2=0.2$, $W_3=0.1$ 의 가중치를 각각 적용(Agostinetti and Amato, 2009; Chang and Baag, 2007; Zhu and Kanomori, 2000)하고, 격자탐색 방법(grid search method)으로 모호면의 깊이(H)와 v_p/v_s 비(κ)를 구하였다. 이 때 지각의 평균 P파 속도는 Chang and Baag (2007)과 Lee (2010)가 제시한 6.3 km/s를 적용하였다.

H- κ 분석 결과, JJU 관측소 반경 18.0 km 이내에서는 모호면의 깊이가 29 km, v_p/v_s 가 1.64, JJB 관측소의 경우는 반경 15.9 km 이내 하부에서 모호면의 깊이가 33 km, v_p/v_s 가 1.75 일 가능성이 가장 높은 것으로 구해진다(Fig. 7). 이 방법으로 구한 지각의 두께는 수신함수를 역산하여 구한 두께와 1 km 정도의 오차범위 이내에서 일치한다. 또한 이 v_p/v_s 값을 이용하여 계산한 동포아송비는 JJB 관측소에서 0.26으로 굴절법 탐사로부터 구해진 남한 지역의 동포아송비 범위 0.25 ~ 0.27 (Cho *et al.*, 2006)와 유사하며 이는 이 지역의 지각 물질이 포아송 고체에 가깝다는 것을 나타낸다. JJU 관측소에서 기록된 자료를 이용하여 구한 동포아송비는 0.20으로 JJB 관측소에서

Fig. 7. H- κ stacks of the teleseismic data recorded at stations (a) JJU and (b) JJB. Best-estimate Moho depth and κ are 33 km and 1.75, respectively, for station JJU and 29 km and 1.64, respectively, for station JJB.

구한 값보다 작게 나타나서, 지하의 물질이 측방으로 불균질하게 분포할 가능성을 지시한다. 이는 1998 ~ 1999년 사이에 백두산에 임시로 설치한 지진 관측망에서 기록된 자료로 구한 동포아송비가 0.20 ~ 0.30인 결과와 일치하며(Hetland *et al.*, 2004), 특히 분화구 중심으로 갈수록 동포아송비가 감소하는 현상 역시 두 화산지역에서 유사한 결과를 보인다.

모호면 투과점 분석

JJU 관측소와 JJB 관측소에서 계산된 수신함수는 모호면으로부터 발생한 P_s 파의 형태가 후방위각에 따라 정곡점이 하나인 뚜렷한 부류와 다소 뭉그러진 모습을 가진 두 종류로 구분됨을 앞서 관찰한 바 있다(Fig. 4). 이는 모호와 관측소 사이에서 발생한 문제로 판단되나, 지질도(KIGAM, 2000)에 의하면 여러 차례 분출로 인하여 성분이 다소 다른 현무암질 암석들로 지표 암석이 구성되어 있으나 뚜렷한 암상 차이나 구조선은 발견되지는 않는다. 또한 상시미동을 이용한 약 2 km 깊이

Fig. 8. Pierce points at the Moho for P_s raypaths arriving at the JJU and JJB stations (stars). Circles and squares indicate pierce points for the JJU and JJB arrivals, respectively. Solid black symbols indicate distinct P_s waves while open circles and squares indicate ambiguous P_s waves.

까지의 횡파속도 연구도 최상부 지각의 v_s 가 방위각에 따라 변하는 특징을 보이지 않는다(Kim and Hong, 2012). 따라서 후방위각에 따른 P_s 파의 형태는 모호면 굴곡의 변화나 수많은 기생화산에 의한 지각 불균질성에 기인한다고 판단되며, 이를 규명하기 위하여 모호투과점(pierce point)을 구하였다.

H- κ 중합법으로 분석하여 구한 모호면 깊이를 각각 적용하여 구한 모호투과점들은 진앙거리에 따라 변하며, JJU 관측소로부터 반경 8.2~15.9 km(평균 12.9 km), JJB 관측소로부터는 반경 8.5~18.0 km(평균 14.7 km)의 거리에 있다(Fig. 8). P_s 파 형태에 따른 종류로 나누어 표시한 모호투과점 분포도(Fig. 8)는 제주도 성인과 관련이 깊은 동서방향성이 아니라 경도에 평행한 양상을 보인다. 한라산이 위치한 경도 126°29.4'와 126°38.4' 사이의 폭 13.9 km 사이와 북촌-표선 구조선(Fig. 1) 동쪽에서 대체로 P_s 변환파의 수신합수 신호가 비교적 뚜렷한 것으로 분석된다. 그러나 경도 126°28.8'의 서쪽 및 126°34.8'와 126°46.2' 사이의 제주 남동부 폭 17.6 km 구간에서는 P_s 파에 의한 수신합수가 뚜렷한 형태로 잘 나타나지 않는다.

이 부근에서 P_s 파가 잘 나타나지 않은 원인은 모호면에서 뚜렷한 속도불연속면 없이 점이적으로 변하거나(Ligorria and Ammon, 1999), 천부지각 내에 속도가 불균질한 층이 존재할 가능성을 지시한다(Jeon *et al.*, 2012). 제주도 전체에 무려 360여개의 단성화산체가 분포하고, 천부 지각 내에 S파속도가 0.6~1.1 km/s 범위(Kim and Hong, 2012)인 매우 느린 U층 및 서귀포층이 존재하며(Oh *et al.*, 2000), 최근까지도 화산활동이 계속된 점을 감안할 때, 지역별로 P_s 파가 잘 나타나지 않은 원인이 점이적 모호보다는 상부지각 내의 속도 불균질층에 의한 것일 가능성이 높다. 또한 상부지각과 하부지각 사이의 저속도층의 존재는 용융된 마그마에 의해 모호면 P_s 파가 교란되었을

가능성을 배제하기 어렵다.

결론

제주도의 광대역 관측소 JJU와 JJB에서 기록된 규모 5.5 M_w 이상의 원거리지진기록을 수신합수 역산과 H- κ 중합법으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제주도 중심부의 폭 14 km 지역과 북촌-표선 구조선의 동쪽을 제외한 지역의 모호투과점을 지나는 파선의 수신합수는 P_s 파 위상이 뚜렷하지 않게 나타나는데, 그 원인으로는 점이적 모호 외에도 상부지각 내의 속도 불균질층에 의한 다중 반사파나 용융된 마그마에 의한 교란 등이 포함될 수 있다.

(2) 수신합수 역산 결과, 제주도 내 두 관측소(JJU, JJB) 하부의 모호면에서는 속도 불연속면이 뚜렷이 나타나지 않고 점이적으로 속도가 변하는 특징을 보인다. $\bar{v}_s = 3.6 \pm 0.6$ km/s 인 지각의 두께는 JJU 관측소 하부에서 30 km로, 이보다 10 km 가량 동쪽에 위치한 JJB 관측소보다 4 km 정도 얇게 구해진다. 이러한 모호 깊이의 변화는 지각물질의 측방 변화가 심한 편임을 지시한다.

(3) 또한 지각 내에 두께가 10 km 정도인 저속도층($v_s \leq 3.5$ km/s)이 JJU와 JJB 관측소 하부 14~24 km와 14~26 km 깊이 구간에 각각 존재하는 것으로 분석된다. 이 저속도층은 용융된 마그마나 부분 용융된 지각물질에 의한 것일 가능성이 높다.

(4) H- κ 중합법으로 분석한 지각 두께는 수신합수 역산으로 구한 결과와 1 km 정도의 오차범위 안에서 일치하며, JJU와 JJB 관측소 부근에서의 v_p/v_s 가 각각 1.64와 1.75로 구해져서 화산분출구 쪽으로 감소하는 특징을 보인다.

(5) 단 2개 지진관측소에서 30~62 개월간 기록된 제한된 수의 원거리지진 수신합수만을 역산하여 제주도 전체를 대표하는 S파 속도구조를 정확히 밝히는 데는 한계가 있다. 차후 3 성분 광대역 이동식 관측소 운영 등을 포함한 추가적으로 지진자료 축적을 통하여 좀 더 신뢰성 있는 제주도 지각구조에 대한 3차원적인 해석이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-8040)의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 지진자료 사용을 허락하여 주신 기상청과 한국지질자원연구원에 감사를 표합니다. 또한 자료분석 과정에 여러모로 도움을 주신 Réne Geophysics 사의 Raymond Réne 박사님께도 고마움을 표합니다.

참고문헌

Agostinetti, N. P., and Amato, A., 2009, Moho depth and V_p/V_s

- ratio in peninsular Italy from teleseismic receiver functions, *Journal of Geophysical Research*, **114**, B06303.
- 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., 1992, A comparison of deconvolution techniques, *Technical Representative*, Lawrence Livermore National laboratory.
- 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, *Geophys. J. Int.*, **159**, 291-310.
- Brenna, M., Cronin, S. J., Smith, I. E. M., Maas, R., and Sohn, Y.K., 2012, How small-volume basaltic magmatic systems develop: a case study from the Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Journal of Petrology*, **53**, 985-1018.
- Burdick, L. J., and Langston, C. A., 1977, Modeling crust-structure through the use of converted phases in teleseismic body-waveforms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **67**, 677-691.
- 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**(4), 1516-1534.
- Chang, S. J., and Baag, C. E., 2007, Moho depth and crustal V_P/V_S variation in Southern Korea from teleseismic receiver functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 1621-1631.
- 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.
- Cho, H. M., Baag, C. E., Lee, J. M., Moon, W. M., Jung, H., Kim, K. Y., and Asudeh, I., 2006, Crustal velocity structure across the southern Korea Peninsula from seismic refraction survey, *Geophysical Research Letters*, **33**, L06307, doi:10.1029/2005GL025145.
- Clayton, R. W., and Wiggins, R. A., 1976, Source shape estimation and deconvolution of teleseismic body waves, *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, **47**, 151-177.
- Duan, Y. H., Zhang, X. K., Kiu, Z., Yuan, Q. X., Xu, Z. F., Wang, F. Y., Fang, S. M., and Yang, Z. X., 2005, Study on structures of Changbaishan-Jingpohu volcanic area using receiver functions, *Chinese Journal of Geophysics*, **48**(2), 389-396.
- Dziewonski, A. M., and Anderson, D. L., 1981, Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **25**, 297-356.
- Fossen, H., 2010, Structural Geology. Cambridge University Press. Cambridge. 463.
- Gurrola, H., Minster, J. B., Given, H., Vernon, F., Berger, J., and Aster, R., 1990, Analysis of high-frequency seismic noise in the western united-states and eastern kazakhstan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80**, 951-970.
- Han, S. I., Lee, J. M., and Kang, T. S., 2010, 1D crustal velocity structure beneath broadband seismic stations in the Okcheon Fold Belt of Korea by receiver function analysis, *Geosciences Journal*, **14**(1), 57-66.
- Hetland, E. A., Wu, F. T., and Song, J. L., 2004, Crustal structure in the Changbaishan volcanic area, China, determined by modeling receiver functions, *Tectonophysics*, **386**, 157-175.
- Hong, M., and Kim, K. Y., 2010, H/V Spectral-ratio Analysis of Microtremors in Jeju Island, Geophysics and Geophysical Exploration, **13**(2), 144-152.
- 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**(1), 8-15.
- 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.
- Julia, J., and Mejia, J., 2004, Thickness and V_P/V_S ratio variation in the Iberian crust, *Geophysical Journal International*, **156**, 59-72.
- Kgaswane, E., Nyblade, A. A., Julia, J., Dirks, P. H. G. M., Durrheim, R. J., and Pasyanos, M. E., 2009, Shear wave velocity structure of the lower crust in southern Africa: Evidence for compositional heterogeneity within Archean and Proterozoic terrains, *Journal of Geophysical Research*, **114**, B12304, doi:10.1029/2008JB006217.
- KIGAM, 2000, Geological map (1:250,000) of the Jeju-Baekado-Jinnampo sheet, Korea Institute of Geology, Mining, and Materials.
- Kikuchi, M., and Kanamori, H., 1982, Inversion of complex body waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 491-506.
- Kim, K. Y., and Hong, M. H., 2012, Shear-wave velocity structure of Jeju Island, Korea, *Geosciences Journal*, **16**(1), 35-45.
- Koh, G., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implementations of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Ph. D. Thesis, Pusan National University, Busan, 325p. (in Korean with English abstract)
- Koh, J. S., Yun, S. H., and Kang, S. S., 2003, Petrology of the Volcanic Rocks in the Paekrogdam Crater area, Mt. Halla, Jeju Island, Jour. Petrol. Soc. Korea, **12**(1), 1-15.
- Kwon, B. D., Lee, H. S., Jung, G. G., and Chung, S. W., 1995, Investigation of Subsurface Structure of Cheju Island by Gravity and Magnetic Methods, *Econ. Environ. Geol.*, **28**(4), 395-404.
- Langston, C. A., 1979, Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, *Journal of Geophysical Research*, **84**, B9.

- Lee, K., 2010, Comments on seismicity and crustal structure of the Korean peninsula, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **13**(3), 256-267.
- Lee, K., Jeong, B. I., Choi, K. S., and Lee, S. K., 1983, A study of gravity and geomagnetism of Jeju Island, *Journal of the Geological Society of Korea*, **19**, 1-10.
- Lee, M. W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic Island, Korea. Sci. Rep. Tohoku Univ., Series **3**(15), 177-256.
- Ligorria, J. P., and Ammon, C. J., 1999, Iterative deconvolution and receiver-function estimation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**, 1395-1400.
- Lowrie, W., 1997, Fundamentals of Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge.
- Mohsen, A., 2004, A receiver function study of the crust and upper mantle across the Dead Sea transform, Ph. D. thesis, The Free University of Berlin, Berlin, 119p.
- Oh, J., Yi, S., Yoon, S., Koh, G. W., Yun, H., and Lee, J., D., 2000, Subsurface stratigraphy of Jeju Island, *Journal of Geol. Soc. Korea*, **36**(3), 181-194.
- Owens, T. J., Zandt, G., and Taylor, S. R., 1984, Seismic Evidence for an ancient rift beneath the Cumberland plateau, Tennessee, *Journal of Geophysical Research*, **89**, 7783-7795.
- Ozalaybey, S., Savage, M. K., Sheehan, A. F., Louie, J. N., and Brune, J. N., 1997, Shear-wave velocity structure in the northern Basin and Range Province from the combined analysis of receiver functions and surface waves, *Bull. Seis. Soc. Amer.*, **87**(1), 183-199.
- Park, S. J., Lee, J. M., Ryu, I.-C., and Ryu, I. C., 2009, 1D velocity structure beneath broadband seismic stations in the Cretaceous Gyeongsang Basin of Korea by receiver function analysis, *Tectonophysics*, **472**, 158-168.
- Park, Y. K., 2010, Crustal and upper mantle structure in and around the Korean Peninsula by teleseismic receiver functions and surface wave analyses, Ph. D. Thesis, Chonnam National University, Gwangju, 88p. (in Korean with English abstract)
- Phinney, R. A., 1964, Structure of the Earth's crust from spectral behaviour of long period body waves, *Journal of Geophysical Research*, **69**, 2997-3107.
- Shin, J. S., Sheen, D.-H., and Shin, I. C., 2009, Orientation correction for borehole seismic stations in South Korea, *Journal of Geol. Soc. Korea*, **45**(1), 47-54.
- Tuluka, G. M., 2010, Crustal structure beneath two seismic broadband stations revealed from teleseismic P-wave receiver function analysis in the Virunga volcanic area, Wesr Rift Valley of Africa, *Journal of African Earth Sciences*, **58**, 820-828.
- Vinnik, L. P., and Kosarev, G. L., 1981, Determination of crustal parameters from observations of teleseismic body waves, *Proceedings Academy of Sciences of the USSR*, **261**, 1091-1095.
- Wilson, C. K., Jones, C. H., and Gilbert, H. J., 2003, Single-chamber silicic magma system inferred from shear wave discontinuities of the crust and uppermost mantle, Coso geothermal area, California, *Journal of Geophysical Research*, **108**(B5), 2226, doi: 10.1029/2002JB001798.
- Wolfe, C. J., Solomon, S. C., Laske, G., Collins, J. A., Detrick, R. S., Orcutt, J. A., Bercovici, D., and Hauri, E. H., 2009, Mantle shear-wave velocity structure beneath the Hawaiian hot spot. *Science*, **326**(5958), 388-1390.
- 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.
- Yoon, S., Hyun, W. H., and Jung, C. Y., 2005, Geology of Hallasan (Mt. Halla), Jeju Island, *Journal of Geol. Soc. Korea*, **41**(4), 481-497.
- Zandt, G., and Ammon, C. J., 1995, Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio, *Letters to Nature*, 152-154.
- Zhu, L., and Kanamori, H., 2000, Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions, *Journal of Geophysical Research*, **105**, 2969-2980.