

동아시아 지각과 최상부맨틀의 3차원 S파 속도구조 및 이방성 연구

임도윤 · 장성준*

강원대학교 지질·지구물리학과

Three-dimensional S-wave Velocity Structure and Radial Anisotropy of Crust and Uppermost Mantle Beneath East Asia

DoYoon Lim and Sung-Joon Chang*

Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

요약: 이 연구는 한국, 중국, 일본을 포함하는 동아시아 지역의 지각과 최상부맨틀의 SV파 및 SH파 속도구조와 지진파의 속도 방사 이방성(radial anisotropy)을 알아보기 위해 수행하였다. IRIS (Incorporate Research Institutions for Seismology)에서 동아시아에 설치한 광대역 지진관측소에 기록된 지진자료를 사용하여 레일리파와 러브파를 추출하였으며, MFT (Multiple Filter Technique)을 사용하여 각 성분에서 기록된 주기 3 ~ 200초 범위의 레일리파와 러브파의 군속도 분산자료를 획득하였다. 수직성분에서 62466개의 레일리파의 분산곡선 측정값을, 접선(transverse)성분에서 54141개의 러브파의 분산곡선 측정값을 얻을 수 있었다. 얻어진 분산자료를 역산하여 속도모형을 구하였고, 역산된 모형을 통해 깊이 100 km 까지의 SV파 및 SH파 속도 구조를 구하였다. SV파와 SH파 속도구조의 경우, 동일하게 깊이 30 km 까지 동해에서 강한 고속도 이상이 나타나며, 30 km 이상의 깊이에서는 중국 남서쪽의 티벳 고원에서 강한 저속도 이상이 나타난다. SH파 속도구조의 경우, 30 km 이상의 깊이에서 동해에서 상대적으로 더 강한 저속도 이상이 나타난다. 그 결과, 지진파 이방성은 평균적으로 동해지역에서 음의 이방성을, 중국 내륙지역에서 양의 이방성이 관측된다.

주요어: 표면파, 분산곡선, 방사이방성, 토모그래피, 동아시아

Abstract: We investigate the crustal and uppermost mantle SV- and SH-wave velocity structure and radial anisotropy beneath East Asia including Korea, China and Japan. Rayleigh waves and Love waves were extracted from the seismic data recorded at broadband seismic stations in East Asia. Using the MFT (Multiple Filter Technique), we obtained group velocity dispersion curves of Rayleigh and Love waves with a period range of 3 to 200 s. We obtained 62466 Rayleigh-waves dispersion-curve measurements in vertical components and 54141 Love-waves dispersion-curve measurements in transverse components, respectively. The inverted models using these data sets provide SV- and SH-wave velocity structure of crust and uppermost mantle down to 100 km depth. In both cases of the S-wave velocity structures, strong high-velocity anomalies are observed down to 30 km depth beneath the East Sea, and deeper than 30 km depth, strong low-velocity anomalies are found beneath the Tibetan plateau. In the case of the SH-wave velocity structure, strong low-velocity anomalies are observed beneath the East Sea deeper than 30 km depth, leading to negative anisotropy. On the other hand, positive anisotropy is usually observed beneath the Tibetan plateau.

Keywords: surface wave, dispersion curve, radial anisotropy, tomography, East Asia

서론

한반도와 중국, 일본을 포함하고 있는 동아시아 지역은 유

라시아판, 필리핀해판, 태평양판 등의 여러 판들이 상호작용하고 있으며, 인도-유라시아판 충돌 및 태평양판의 섭입으로 인해 지진이 빈번하게 발생하며 복잡한 지체구조를 가지고 있는 지역이다. 동아시아 지역의 이전의 연구들을 살펴보면 주로 중국 내륙지역의 속도구조 연구(Sun *et al.*, 2010; Feng and An, 2010; Obrebski *et al.*, 2011)와 이방성 연구(Chen *et al.*, 2010), 티벳 고원의 속도구조 연구(Zhang *et al.*, 2011)와 이방성 연구(Hirn *et al.*, 1995; Chen *et al.*, 2009), 한반도와 일본의 속도구조 연구(Witek *et al.*, 2014, Lee *et al.*, 2015, You and Chang, 2017)와 이방성 연구(Min and Chang, 2017) 등의 많은 연구가 수행되어 왔으나 주로 한반도와 일본열도 또는

Received: 26 December 2017; Revised: 22 February 2018;

Accepted: 23 February 2018

*Corresponding author

E-mail: sjchang@kangwon.ac.kr

Address: Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do 24341, Korea

©2017, 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,

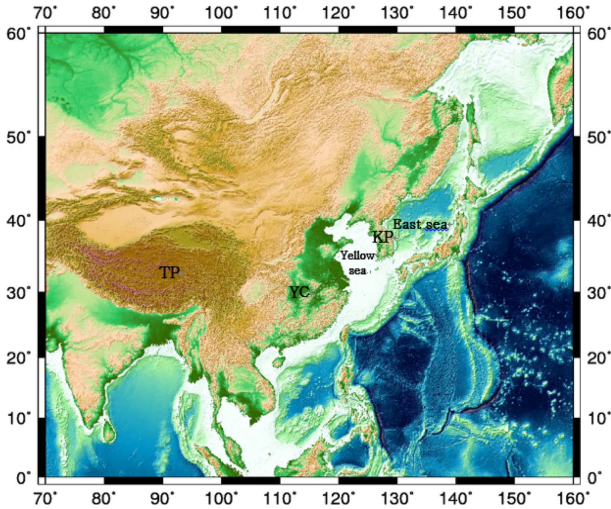


Fig. 1. Map of the study region. Abbreviations are as follows: KP: the Korea peninsula; TP: the Tibetan plateau; YC: the Yangtze craton.

중국 내륙지역으로 한정되어 있다. 본 연구에서는 이전의 연구들을 확장하여 한반도와 중국 지역까지 포함한 동아시아 전체의 속도구조와 이방성 연구를 수행하였다.

표면파는 군속도가 주파수에 따라 달라지는 분산의 특성을 가진다. 이것이 의미하는 것은 속도가 파장에 따라 달라지는 것을 의미하므로 분산곡선 역산을 통하여 지구내부의 속도구조를 계산 하는 것이 가능하다(Aki and Richard, 1980). 표면파에는 레일리파와 러브파가 존재하는데, 레일리파는 SV파에 민감하고, 러브파는 SH파에 민감하다. 이를 통해 이방성 매질을 통과한 표면파의 레일리, 러브파의 속도를 역산한 후 SV파와 SH파의 모델들을 계산하고 이들을 비교하여 방사 이방성(radial anisotropy)구조의 계산이 가능하다. 방사 이방성은 상부 맨틀의 주요 구성 광물인 감람석과 휘석의 격자선호방향(lattice preferred orientation)에 따라서 달라지는 것으로 알려져 있다(Estey and Douglas, 1986). 격자배열방향은 맨틀의 흐

름방향에 대한 정보를 제공하며, 지체응력과 연약권의 흐름과 관계가 있다. 일반적으로, 격자의 배열방향이 수직적이라면 SV파에 민감한 레일리파의 속도가 빠르고, 격자의 배열방향이 수평적이라면 SH파에 민감한 러브파의 속도가 빠르다(Karato et al., 2008).

본 연구에서는 이런 표면파의 분산 특성을 이용해 동아시아에 설치된 지진계에 기록된 지진자료로부터 표면파 분산곡선을 구하고, 얻어진 분산곡선을 역산하여 연구지역(Fig. 1)에 대한 3차원 SV파와 SH파 속도구조를 계산하고 SV파와 SH파의 비교를 통해 방사 이방성 구조를 구하였다.

자료처리 및 연구 방법

자료획득

미국지진연구협회 IRIS (Incorporated Research Institution for Seismology, <http://www.iris.edu>)의 데이터 센터로부터 동아시아 지역의 임시, 상시 관측소에 기록된 1990 ~ 2015년까지의 지진자료 중 규모 5.5 이상의 자료를 사용하여 레일리파 추출의 경우 602개의 지진에서 6940개의 파선경로(Fig. 2a)를, 러브파 추출의 경우는 510개의 지진에서 2685개의 파선경로(Fig. 2b)를 획득하였다.

자료전처리

표면파의 주파수 영역만을 사용하기 위해 버터워스 대역필터를 0.005 ~ 2.0 Hz구간에 적용하였고, SAC 형식의 지진파 자료에 계기응답 함수제거, 지진발생시간 및 지진위치를 입력하는 과정을 수행하였다.

회전

표면파는 입자의 운동방향에 따라서, 레일리파는 수직성분과 법선성분(radial component)에 기록되고, 러브파는 접선성분(transverse component)에 기록된다. 지진계에 기록되는 성

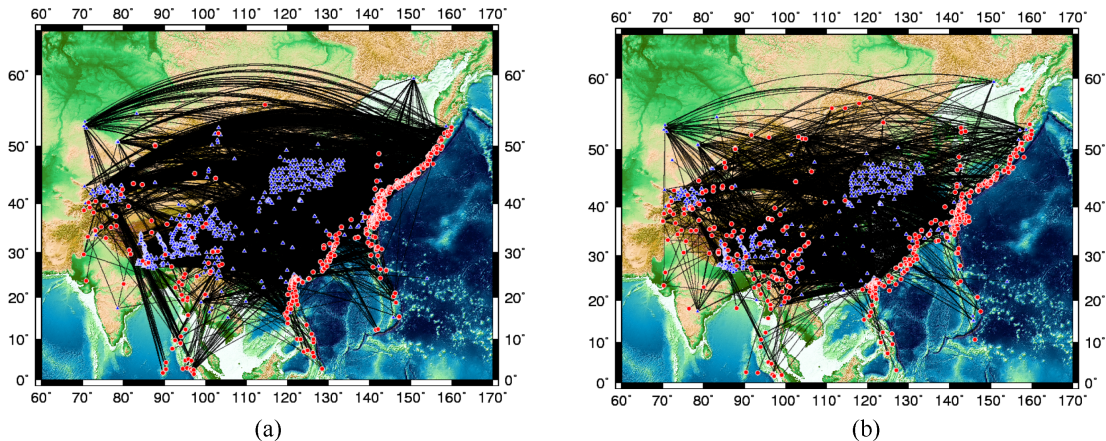


Fig. 2. Ray paths between stations and epicenters for (a) Rayleigh and (b) Love-waves, respectively. Blue triangles and red circles indicate locations of station and epicenters, respectively.

분은 수직성분과 수평성분(남-북, 동-서)으로 나뉘며, 러브파의 추출을 위해서는 수평성분인 남-북, 동-서 성분을 회전시켜 법선성분과 접선성분으로 전환시켜야 한다. 법선성분과 접선성분은 아래와 같은 식 (1)과 같이 구할 수 있으며,

$$\begin{aligned} X_R &= X_{NS} \cos \theta + X_{EW} \sin \theta \\ X_T &= -X_{NS} \sin \theta + X_{EW} \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

이 식에서 X_R 은 법선성분(radial component)의, X_T 는 접선성분(transverse component)의 진폭을 의미하며, X_{NS} 는 남북성분, X_{EW} 는 동서성분의 진폭을 의미하며, θ 는 후방위각을 의미한다.

다중필터법

다중필터법(Multiple Filter Technique)은 전처리가 완료된 지진 신호를 통해 표면파의 군속도를 계산하기 위해 사용하는 필터링 기법이다(Dziewonski *et al.*, 1969). 군속도 계산을 위해 표면파를 주파수별로 분리하는 필터링 작업을 수행해야 한다. 다중필터법을 이용해 지진신호를 필터링 하면 아래 식 (2)과 같이 주어지게 된다.

$$h_n(\omega_n, t) = \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| e^{-\alpha \left(\frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}\right)^2} \cos[k(\omega)r - \omega t] d\omega \quad (2)$$

여기서 $F(\omega)$ 는 스펙트럼 신호, $e^{-\alpha \left(\frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}\right)^2}$ 는 가우시안 필터이며, 가우시안 필터의 중심 주파수 ω_n 을 선택하고 진앙거리를 군시간으로 나누어 군속도를 구한다. 필터링된 신호의 포락선은 분석한 신호의 진폭으로 계산한다. 포락선 $g_n(t)$ 는 아래의 식과 같이 정의된다(Bath, 1974).

$$g_n(t) = \sqrt{h_n^2(\omega_n, t) + \overline{h_n^2}(\omega_n, t)} \quad (3)$$

여기서 $\overline{h_n}(\omega_n, t)$ 는 $h_n(\omega_n, t)$ 의 힐버트 변환이며, 본 연구에서는 Herrmann and Ammon (2013)의 CPS330 (Computer Programs in Seismology)에 포함된 sacmft96을 사용해 군속도

분산곡선을 계산하였다. 이를 통해 3초에서 200초까지의 주기 범위에서 수직성분에서 62466개의 레일리파, 접선성분에서 54141개의 러브파의 분산곡선 측정값을 각각 획득하였다.

역산

다중필터링법으로부터 계산된 레일리파와 러브파의 군속도 분산곡선(Fig. 3)에 최소자승 역산(least-square inversion)을 사용하여 지각과 최상부맨틀에서의 SV파와 SH파의 속도구조를 계산하였으며 다음과 같은 관계식을 이용하였다.

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{d} \quad (4)$$

이 식에서, \mathbf{G} 는 민감도 행렬(sensitivity kernel matrix)을, \mathbf{m} 은 모델 벡터, \mathbf{d} 는 관측값과 예측값의 차이인 데이터 벡터를 의미하며, 관측 값과 계산 값의 차이인 $(\mathbf{Gm} - \mathbf{d})^2$ 이 최소로 수렴할 때까지 역산 과정을 반복 수행하였다.

또한 역산문제를 안정화시키기 위하여 제동(damping)과 평활화(flattening)를 사용하였으며, 평활화의 경우, 수평적 평활화와 수직적 평활화를 모두 고려하였고, 사용된 제동, 수평적 평활화, 수직적 평활화의 가중치는 각각 0.1, 0.3, 0.3이다. 사용된 모델의 격자는 수평적으로 50 km 간격이며 수직으로는 5 km 간격부터 시작하여 깊어질수록 점점 더 간격이 넓어지도록 600 km 깊이까지 설정하였다.

해상도 분석

SV파와 SH파의 속도모델의 공간해상도 평가를 위해 ± 500 m/s의 이상값을 갖는 900×900 km의 셀 크기를 가지는 격자 모델 분석(checkerboard test)를 수행하였다. 해상도 분석은 기준이 되는 시험모델과 민감도 행렬의 곱으로 합성자료를 계산하고, 역산을 수행하여 구하였다. 연구지역의 깊이 100 km 까지 해상도 분석을 수행하였으며(Fig. 4), 대체적으로 SV파 해상도 모델(Fig. 4a-f)보다 SH파 해상도 모델(Fig. 4g-l)의 해상도가 더 격자모양에 가깝기 때문에 해상도가 더 양호하다고 판단되며, SV파 해상도 모델과 SH파 해상도 모델 모두 동해

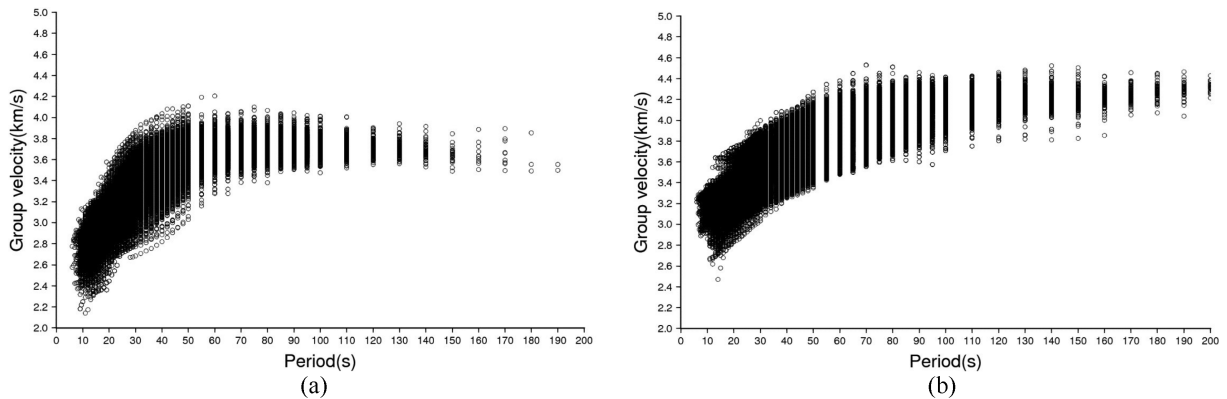


Fig. 3. (a) Rayleigh and (b) Love-wave group-velocity dispersion curves, respectively.

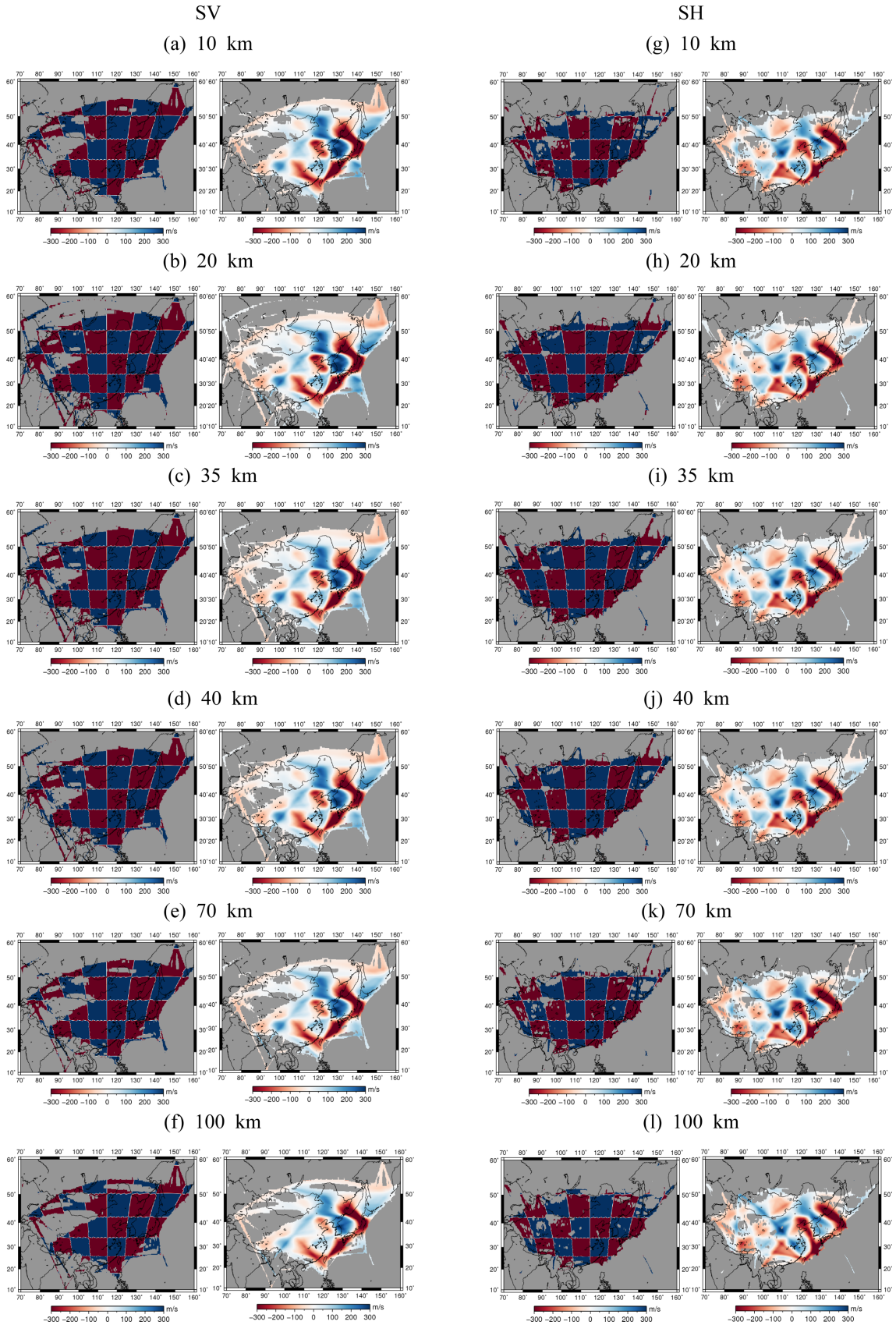


Fig. 4. The depth slices from 900×900 km checkerboard tests for SV-wave (a~f) and SH-wave (g~l) perturbations at 10 km, 20 km, 35 km, 40 km, 70 km, 100 km, respectively.

지역과 한반도, 동중국 지역의 해상도가 양호하고 티벳 고원지역은 비교적 약한 해상도를 보이는 것으로 판단된다. 또한 SV, SH파 해상도 모델 모두 동해지역에서는 격자 형태가 아닌 선형적인 해상도를 가지는데, 이는 파선경로의 방향이 북서방향으로 우세하여 나타나는 현상이라 생각된다.

3차원 SV파와 SH파 속도구조

연구지역을 통과하는 파선경로에 대한 표면과 균속도 분산 곡선 역산을 수행하여 연구지역의 깊이에 따른 3차원 SV파와 SH파 속도구조를 계산하였다(Fig. 5). 동해지역의 20 km 깊이

에서 나타나는 강한 고속도이상(Fig. 5b)은 맨틀에서의 속도를 반영하는 결과라고 생각되며, 이를 바탕으로 동해지역의 모호면의 깊이가 10 ~ 20 km 내외에 존재할 것이라고 판단하였다. 이전의 한국과 일본을 포함한 속도구조의 연구(You and Chang, 2017; Min and Chang, 2017)의 결과와 비교하였을 때 유사한 결과이다. 동해지역 하부 40 ~ 50 km 깊이(Fig. 5d,e)에서 SV파 속도구조는 고속도이상을, SH파 속도구조는 저속도 이상을 보이고 있다. SH파 속도구조에서 나타나는 저속도 이상과 SV파 속도구조에서 나타는 고속도 이상의 감소 현상은 연약면에서의 속도 감소로 판단된다. 이전 연구인 Min and

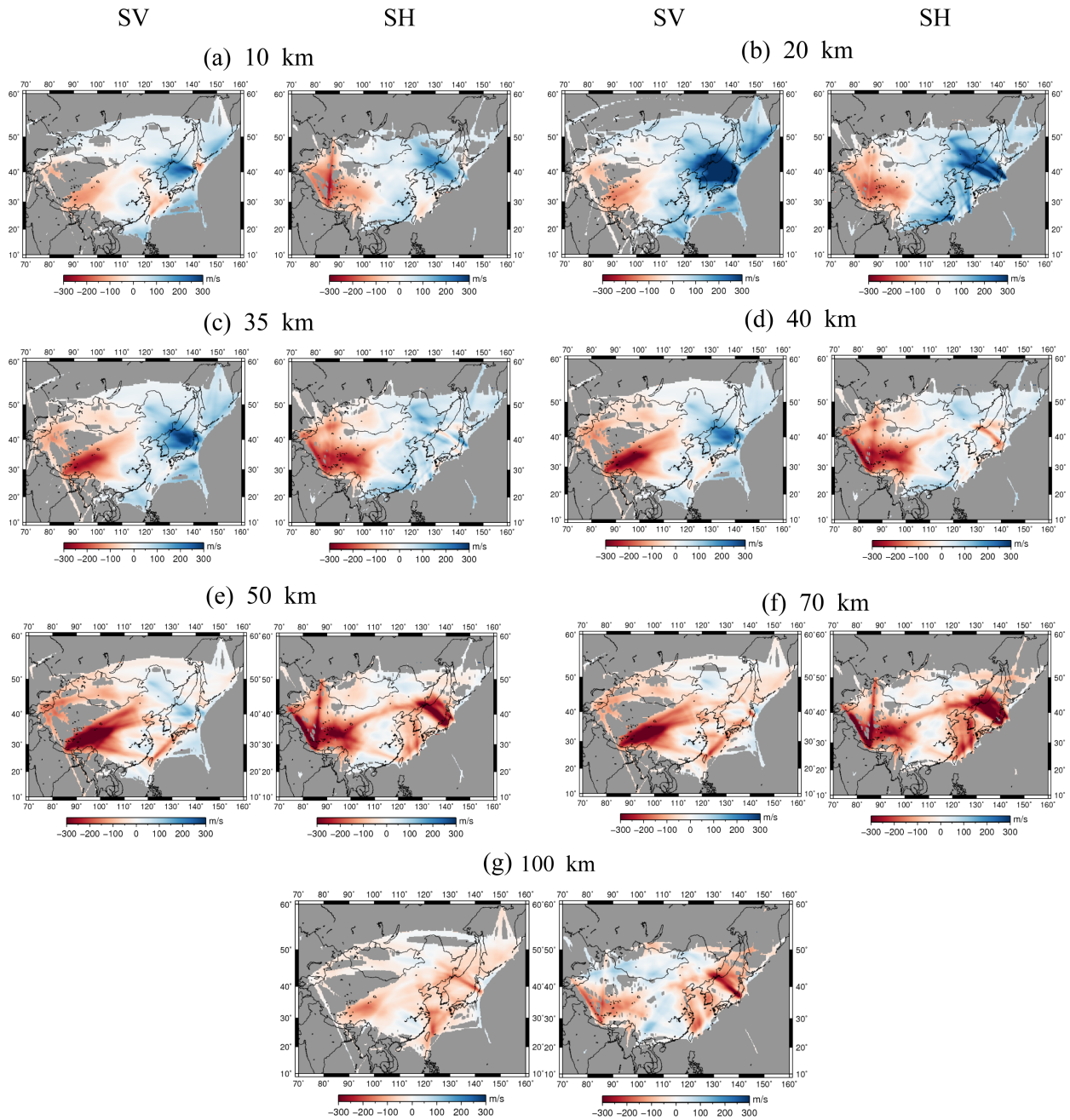


Fig. 5. Depth slices of 3D SV and SH-wave velocity models at (a) 10, (b) 20, (c) 35, (d) 40, (e) 50 (f) 70 and (g) 100 km, respectively.

Chang (2017)에서 제시한 연약권의 깊이인 50 km 부근과 비교적 일치한다. 따라서, 암석권과 연약권의 경계가 이 깊이에 존재한다고 판단된다.

티벳 고원지역은 SV파와 SH파 속도구조 모두 10 ~ 80 km 깊이에서 저속도 이상을 보이며, 이는, 인도판과 유라시아판의 충돌로 인해 두꺼워진 지각의 영향으로 저속도 이상이 관측된 것으로 판단된다. 이전의 연구들을 살펴보면(He *et al.*, 2001, 2002, Feng and An, 2010; Sun *et al.*, 2010) 티벳 고원의 저속도 이상이 대략 70 ~ 75 km로 제시되어 있고, Chen *et al.* (2010)의 수산함수를 통한 연구, Li *et al.* (2013)의 레일리파 토모그래피를 통한 상부맨틀 연구에서도 티벳 고원의 모호면의 깊이를 70 ~ 75 km 부근으로 제시하고 있다. 티벳 고원의 40 ~ 50 km 깊이(Fig. 5d, e)에서 강한 저속도 이상이 나타나며, 이는 티벳 고원의 중간 지각에서 부분용융의 존재에 대한 연구(Nelson *et al.*, 1996; Wei *et al.*, 2001)들을 비추어 볼 때, 부분용융으로 인한 속도 감소로 판단된다.

또한 깊이 35 km의 속도구조모델(Fig. 5c)에서, 경도 108°를 기준으로 동서방향으로의 뚜렷한 속도의 대비를 보이며, Li *et al.* (2014)의 암석권 밀도 분포 연구에서 중국 내륙의 중력이상 분포와 비교하였을 때, 속도구조에서의 속도이상의 분포와 중력이상도에서의 밀도이상의 분포가 거의 일치한다. 티벳 고원지역과 동해지역의 모호면 깊이를 고려하였을 때, 동아시아 지역의 모호면의 깊이는 티벳 고원지역에서 70 ~ 80 km 사이로 가장 깊고, 동쪽으로 갈수록 모호면의 깊이가 얕아져 동해에서 가장 얇은 15 ~ 20 km 사이일 것으로 생각되며, Shen *et al.* (2016)의 연구에서 모호면의 깊이가 이와 비슷하게 제시되어 있다. 중력이상과의 비교를 통해 속도구조 모델을 통해서 대략적인 모호면의 분포도 확인할 수 있음을 알 수 있다.

방사 이방성

연구지역 내에서 얻어진 SV파와 SH파의 속도구조로부터 상대적인 속도차이를 계산 $\zeta = \frac{V_{SH} - V_{SV}}{V_s} \times 100\%$ 하여 Fig. 6과 같은 이방성 구조를 구하였다. 연구지역에서 관측된 지진 방사 이방성은 대체적으로 동해지역에서는 평균적으로 강한 음의 이방성, 즉, SV파가 SH파보다 더 빠른 것이 관측되며 중국내륙지역과 티벳 고원지역은 평균적으로 약한 양의 이방성, 즉, SH파가 SV파보다 더 빠른 것이 관측된다.

동해지역에서 SV파가 더 빠른 이유는 동해지역은 배호 분지로써 태평양판의 섭입으로 인해 상승류가 발달하였고, 상승류의 영향으로 맨틀흐름의 방향이 수직적으로 형성되어, 맨틀의 주 구성광물인 감람석의 수직배열로 인해 SV파의 속도가 더 빠른 것으로 생각된다.

티벳 고원지역의 40 ~ 50 km에서 나타나는 강한 양의 이방성(Fig. 6c,d)은 인도-유라시아 판의 충돌로 인해 티벳 고원지역의 중간~하부 지각의 응력/변형률 상태에 의한 지각물질 유동(Chen *et al.*, 2009; Bai *et al.*, 2010; Pan and Shen, 2017)

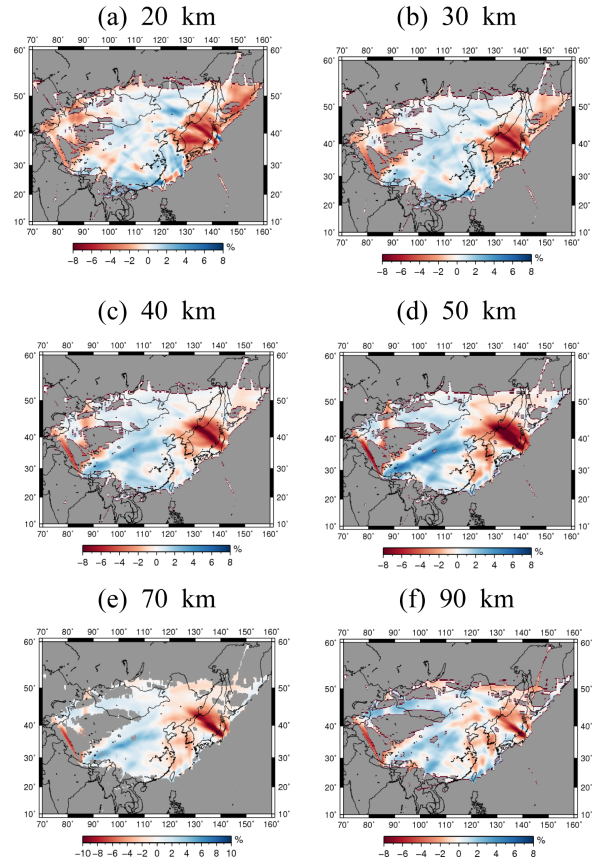


Fig. 6. Radial anisotropy at (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50, (e) 70, and (f) 90 km depth.

으로 인해 형태선호방향(shape preferred orientation)이 생성되어 생긴 현상으로 생각된다. 지각 내에 유체가 수평으로 층을 이루어 존재함으로써 SV파의 진행을 방해하여 SH파가 더 빠르게 전달되고, 이로 인해 양의 이방성이 관측되는 것으로 생각된다.

이전에도 동일한 지역에 대한 방사 이방성 연구가 진행되어 왔다(e.g., Chen *et al.*, 2015). 그러나 이 연구에서는 이전의 연구에 비해 단주기 자료(3 ~ 200초)를 사용하였기 때문에 상대적으로 깊이가 얇은 지각과 최상부 맨틀에 대한 방사 이방성 구조를 획득할 수 있었다. 따라서 분해능이 좋은 깊이가 서로 다르기 때문에 이전의 연구와의 직접적인 비교는 어렵지만 이전에 보고되지 않았던 얇은 깊이에서의 방사 이방성 구조를 제시한다는 점에서 의의가 있을 것으로 생각된다.

결론

본 연구에서는 동아시아의 지각과 상부맨틀에서의 SV파와 SH파의 속도구조와 이방성구조를 알아보기 위하여 수행 되었으며, 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

1. 동해지역의 깊이 20 km 부터 급격한 속도의 증가를 관찰할 수 있고, 이는 맨틀에서의 속도를 반영하는 것으로 판단되

며, 이를 통해 동해지역의 모호면의 깊이가 10 ~ 20 km 사이로 추정된다.

2. 동해지역의 깊이 40 ~ 50 km의 속도구조에서 SV파의 고속도 이상의 감소, SH파의 저속도 이상의 증가가 관측되며, 이는 연약권의 존재가 깊이 40 ~ 50 km에 존재하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

3. 티벳 고원지역의 깊이 80 km까지 연속되는 강한 저속도 이상이 관측되며, 이는 티벳 고원의 형성과 관련이 있는 것으로 생각된다. 인도판과 유라시아판의 충돌로 인해 지각이 두꺼워져 모호면의 깊이가 기준모델인 IASP91보다 깊게 형성되어 나타나는 현상으로 판단된다.

4. 35 km 깊이에서의 SV, SH파의 속도구조에서 경도 108°를 기준으로 동서방향으로의 뚜렷한 속도의 대비가 관측되며, 이는 중력이상의 분포와도 일치한다. 이 현상은 밀도의 이상을 나타내며, 모호면의 깊이가 티벳 고원에서의 70 ~ 80 km에서 동쪽으로 갈수록 모호면의 깊이가 얕아져 동해에서 가장 얇은 10 ~ 20 km 사이인 것과 연관이 있는 것으로 추정된다.

5. 동해에서 나타나는 음의 이방성은 태평양판의 섭입으로 인한 배호분지의 특성으로 인해 맨틀의 상승류를 통한 맨틀의 주 구성광물인 감람석의 수직배열로 인한 것으로 판단된다.

6. 티벳 고원의 깊이 40 ~ 50 km에서 나타나는 양의 이방성은 응력/변형률 상태로 인해 약해진 중간지각에서의 지각물질 유동으로 인해 형태선호방향이 수평으로 생성되었기 때문으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(KMIPA2015-7030)의 지원으로 수행되었고, 또한 행정안전부장관의 지진방재분야 전문인력 양성사업으로 지원되었음. 2017년도 강원대학교 대학 회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-520170512).

References

- Aki, K., and Richard, P. G., 1980, *Quantitative Seismology Theory and Methods*, Freeman, 641-718.
- Bai, D., Unsworth, M. J., Meju, M. A., Ma, X., Teng, J., Kong, X., and Zhao, C., 2010, Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging, *Nature Geoscience*, **3**, 358-362.
- Bath, M., 1974, *Spectral Analysis in Geophysics*, Elsevier.
- Chen, Y., Badal, J., and Zhang, Z., 2009, Radial anisotropy in the crust and upper mantle beneath the Qinghai-Tibet Plateau and surrounding regions, *Journal of Asian Earth Sciences*, **36**, 289-302.
- Chen, Y., Niu, F., Liu, R., Huang, Z., Tkalčić, H., Sun, L., and Chan, W., 2010, Crustal structure beneath China from receiver function analysis, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **115**, B03307.
- Dziewonski, A., Bloch, S., and Landisman, M., 1969, A technique for the analysis of transient seismic signals, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **59**, 427-444.
- Estey, L. H., and Douglas, B. J., 1986, Upper mantle anisotropy: A preliminary model, *J. Geophys. Res.*, **91**, 11393-11406.
- Feng, M., and An, M., 2010, Lithospheric structure of the Chinese mainland determined from joint inversion of regional and teleseismic Rayleigh-wave group velocities, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **115**, B06317.
- He, Z. Q., Ding, Z. F., Ye, T. L., Sun, W. G., and Zhang, N. L., 2001, Surface wave tomography of the crust and upper mantle of Chinese mainland and its neighboring region, *Acta Seismol. Sin.*, **14**, 634-641.
- He, Z. Q., Ding, Z. F., Ye, T. L., Sun, W. G., and Zhang, N. L., 2002, Group velocity distribution of Rayleigh waves and crustal and upper mantle velocity structure of the Chinese mainland and its vicinity, *Acta Seismol. Sin.*, **15**, 269-275.
- Hirn, A., Jiang, M., Sapin, M., Diaz, J., Nercessian, A., Lu, Q. T., and Ma, K., 1995, Seismic anisotropy as an indicator of mantle flow beneath the Himalayas and Tibet, *Nature*, **375**, 571-574.
- Karato, S., Jung, H., Katayama, I., and Skemer, P., 2008, Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: new insights from laboratory studies, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **36**, 59-95.
- Lee, S.-J., J. Rhie, S. Kim, T. S. Kang, and G. B. Kim, 2015, Ambient seismic noise tomography of the southern East Sea (Japan Sea) and the Korea Strait, *Geosci. J.*, **19**, 709-720.
- Li, C., Zhang, G., Wang, X., Wang, Z., and Fang, J., 2014, Three-dimensional lithospheric density distribution of China and surrounding regions, *Geoscience Frontiers*, **5**, 95-102.
- Li, Y., Wu, Q., Pan, J., Zhang, F., and Yu, D., 2013, An upper-mantle S-wave velocity model for East Asia from Rayleigh wave tomography, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **377**, 367-377.
- Min, K. M., and Chang, S.-J., 2017, 3D SH-wave velocity structure and radial anisotropy of East Asia using surface wave tomography, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **20**, 25-32 (in Korean with English abstract).
- Nelson, K. D., Zhao, W., Brown, L. D., Kuo, J., Che, J., Liu, X., and Kind, R., 1996, Partially molten middle crust beneath southern Tibet: synthesis of project INDEPTH results. *Science*, **274**, 1684-1688.
- Obrebski, M., Allen, R. M., Zhang, F., Pan, J., Wu, Q., and Hung, S. H., 2012, Shear wave tomography of China using joint inversion of body and surface wave constraints, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **117**, B01311.
- Pan, Y., and Shen, W. B., 2017, Contemporary crustal movement of southeastern Tibet: Constraints from dense GPS measurements, *Scientific Reports*, **7**, 45348.
- Shen, W., M. H. Ritzwoller, D. Kang, Y. H. Kim, F.-C. Lin, J. Ning, W. Wang, Y. Zheng, and L. Zhou, 2016, A seismic reference model for the crust and uppermost mantle beneath China from surface wave dispersion, *Geophys. J. Int.*, **206**, 954-979.

- Sun, X., Song, X., Zheng, S., Yang, Y., and Ritzwoller, M. H., 2010, Three dimensional shear wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath China from ambient noise surface wave tomography, *Earthquake Science*, **23**, 449-463.
- Wei, W., Unsworth, M., Jones, A., Booker, J., Tan, H., Nelson, D., and Jin, S., 2001, Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies, *Science*, **292**, 716-719.
- Witek, M., S. van der Lee, and T. S. Kang, 2014, Rayleigh wave group velocity distributions for East Asia using ambient seismic noise, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 8045-8052.
- You, S. H., and Chang, S.-J., 2017, 3D SV-wave velocity structure of East Asia using surface wave tomography, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **20**, 12-17 (in Korean with English abstract).
- Zhang, Z., Deng, Y., Teng, J., Wang, C., Gao, R., Chen, Y., and Fan, W., 2011, An overview of the crustal structure of the Tibetan plateau after 35 years of deep seismic soundings, *Journal of Asian Earth Sciences*, **40**, 977-989.