

러브파 토모그래피를 이용한 동아시아의 3차원 SH파 속도구조와 이방성 연구

민경민 · 장성준*

강원대학교 지질 · 지구물리학과

3D SH-wave Velocity Structure of East Asia using Love-Wave Tomography and Implication on Radial Anisotropy

Kyungmin Min and Sung-Joon Chang*

Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

요약: 이 연구는 동아시아 지역의 지각과 상부맨틀의 3차원 SH파 속도구조 및 지진파 속도 방사 이방성을 알아보기 위하여 수행되었다. SH파 속도모델은 한국과 일본, 중국에 설치되어 있는 광대역 지진관측소에 기록된 지진자료로부터 러브파 군속도 분산 자료를 획득한 후 이를 역산하여 구하였다. 군속도 분산곡선은 총 3,369개의 파선경로에 대하여 다중필터기법을 사용하여, 접선 성분에 기록된 주기 3 ~ 150 초 범위의 러브파 군속도를 획득하였다. 획득한 군속도자료를 역산하여 깊이 100 km까지의 SH파 속도구조를 계산하였다. 10 ~ 40 km 깊이에서 동해지역은 일본지역보다 SH파 속도가 빠르게 나타난다. 고속도 이상이 나타나는 깊이로 판단할 때, 모호면의 깊이는 동해의 경우 10 ~ 20 km 사이, 한반도의 경우에는 35 km 부근에서 모호면이 존재한다고 생각된다. 50 km 깊이에서 동해지역은 강한 저속도 이상이 관측이 되고, 저속도 이상이 나타나는 깊이로 판단할 때, 50 km 부근에 암석권과 연약권의 경계가 존재한다고 생각된다. 연구지역 아래 50 ~ 100 km 깊이에서는 저속도 이상이 광범위하게 관측된다. 지진파 속도 이방성은 35 km 깊이까지는 평균적으로 SH파의 속도가 빠른 양의 이방성을 보이며, 그보다 더 깊은 깊이에서는 평균적으로 SV파의 속도가 빠른 음의 이방성이 관측된다.

주요어: 러브파, 분산곡선, 방사 이방성, 토모그래피

Abstract: We present a 3D SH-wave velocity model of the crust and uppermost mantle and seismic radial anisotropy beneath East Asia. The SH-wave velocity structure model was built using Love-wave group-velocity dispersion data from earthquake data recorded at broadband seismic networks of Korea, Japan, and China. Love-wave group-velocity dispersion curves were obtained by using the multiple filtering technique in the period range of 3 to 150 s for 3,369 event-station pairs. The inverted model using these data sets provides a crust and upper mantle SH-wave velocity structure down to 100 km depth. At 10 ~ 40 km depths SH-wave velocity beneath the East Sea is higher than beneath the Japanese island region. We estimated the Moho beneath the East Sea to be between 10 ~ 20 km depth, while Moho beneath the Korean Peninsula at around 35 km based on the depth where high-velocity anomalies are detected. We estimated the lithosphere-asthenosphere boundary beneath the East Sea to be at around 50 km based on the depth where strong low-velocity anomalies are observed. Widespread low-velocity anomalies are found between 50 ~ 100 km depth in the study region. Positive radial anisotropy ($V_{SV} > V_{SH}$) is observed down to 35 km depth, while negative radial anisotropy ($V_{SV} < V_{SH}$) is observed for deeper depth.

Keywords: Love wave, dispersion curve, radial anisotropy, tomography

Received: 29 November 2016; Revised: 24 January 2017;

Accepted: 31 January 2017

*Corresponding author

E-mail: sjchang@kangwon.ac.kr

Address: Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do 24341, South 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, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

한반도는 대륙판인 유라시아판 내에 위치하고 있기 때문에 지진 피해에 대하여 안전하다는 인식을 가지고 있지만, 한반도를 포함하고 있는 동아시아 지역은 유라시아판, 태평양판, 필리핀해판, 북아메리카판의 경계에 위치하고 있어 지진활동이 활발하게 일어나고, 이러한 판 운동에 의하여 한반도를 비롯한 동아시아 지역은 복잡한 지체구조를 가지고 있다. 한반도는 중국과 일본 사이에서 지체 구조적 연결고리 역할을 하고 있다(Chough *et al.*, 2000). 동해는 배호분지로도 잘 알려져 있는데, 배호분지는 대륙판과 해양판이 충돌하며 발생한 장력에 의하여 형성된다(Elsasser, 1971). 동해의 경우 성인을 규명하기 위한 많은 연구가 수행되었으며, 부채꼴 확장 모델(Otofujii *et al.*, 1985)이나 당겨열림설(pull-apart basin; Jolivet *et al.*, 1994)이 가장 대표적이다. 이와 같이 복잡한 판구조 운동이 발생하고 있는 동아시아 지역에 대하여 많은 속도구조 연구(Yoshizawa *et al.*, 2010, Zheng *et al.*, 2011, Witek *et al.*, 2014, Chen *et al.*, 2015)가 이루어지고 있는 반면, 연구지역에 대한 지진과 속도 이방성 연구는 상대적으로 부족한 편이다.

표면파는 주파수에 따라 군속도가 달라지는 분산특성을 가지고 있으며, 이는 파장에 따라 속도가 변화하는 것을 의미하기 때문에 분산특성을 이용한 표면파 분산곡선 역산을 통해 지구내부의 속도구조를 계산할 수 있다(Aki and Richard, 1980). 또한 러브파와 레일리파의 연구를 통해 이방성 매질을 통과한 SH 파와 SV 파의 속도를 비교하여 방사 이방성(radial anisotropy) 구조를 계산할 수 있다. 상부맨틀에서는 상당한 지진파 이방성이 관찰되며, 방사 이방성은 주로 상부 맨틀의 주구성 광물인 감람석과 휘석의 격자선호방향(lattice preferred orientation)에 의한 것으로 알려져 있다(Estey and Douglas, 1986). 광물의 격자선호방향은 지체응력 또는 연약권의 흐름과 관계가 있고, 맨틀의 흐름 방향에 대한 정보를 제공한다. 예를 들어 맨틀의 흐름이 수평적일 경우 수평 방향으로 편광되어 전파하는 SH 파 속도가 빠른 반면에, 수직적일 경우 수직 방향으로 편광되어 전파하는 SV 파의 속도가 빠르다(Karato *et al.*, 2008).

이 연구는 이러한 표면파 분산특성을 이용하여 표면파 군속도 분산곡선을 역산하여 연구지역(Fig. 1)의 3차원 SH 파 속도 구조를 계산하고, 타 연구에서 비롯된 SV 파 속도모델과의 비교를 통해 방사 이방성 구조를 분석하였다.

자료 처리 및 연구방법

자료획득

한국기상청(Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr>), 한국지질자원연구원(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, <http://quake.kigam.re.kr>)에서

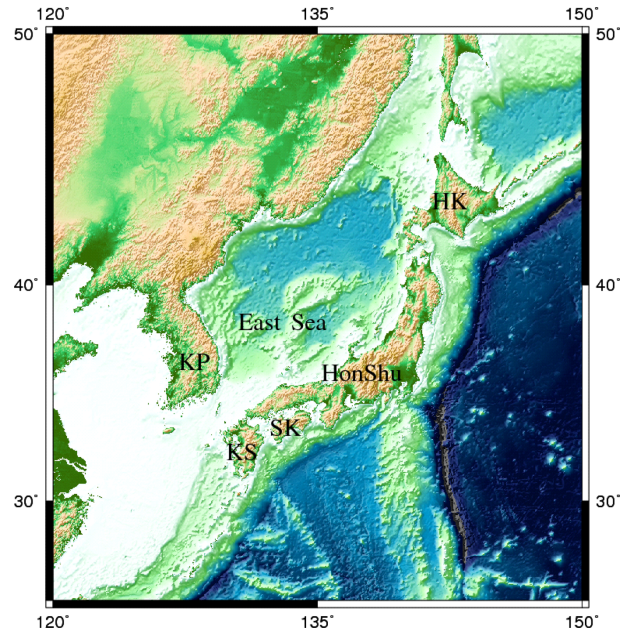


Fig. 1. Map of the study region. Abbreviations are as follows: KP: the Korea Peninsula; KS: the Kyusyu Island; SK: the Shikoku island; HK: the Hokkaido Island.

운영하는 광대역 속도 관측소에 기록된 지진 자료 중 2000 ~ 2015년 동안 국내에서 발생한 규모 3.0 이상의 지진자료와, 동일 기간 동안 국외에서 발생한 규모 5.5 이상의 지진자료를 사용하여 총 82개의 지진에 대한 865개의 진앙과 관측소간의 파선경로를 얻었으며, 일본의 국립방재연구소 NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <http://www.fnet.bosai.go.jp>)에서 운영하는 광대역 관측소에 기록된 지진 자료 중 2011 ~ 2015년에 발생한 규모 5.0 이상의 지진자료를 사용하여 총 116개의 지진에 대한 2,046개의 파선경로를 얻었다. 또한 미국지진연구협회 IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology, <http://www.iris.edu>)의 데

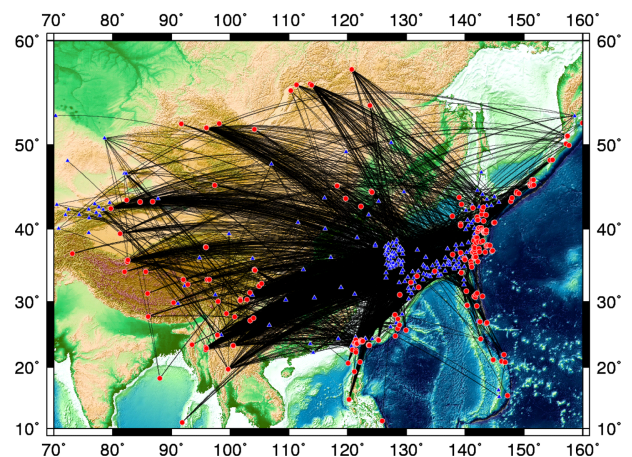


Fig. 2. Ray paths between epicenters and stations for Love-wave group-velocity measurements. Red circles and blue triangles indicate the locations of epicenters and stations, respectively.

Table 1. Magnitude distribution of earthquakes.

Magnitude	M < 5.0	5.0 ≤ M ≤ 5.9	6.0 ≤ M ≤ 6.9	7.0 ≤ M
Number	7	135	109	10

이터 센터로부터 중국 광대역 관측소에 기록된 지진 자료 중 2014 ~ 2015년에 발생한 규모 5.5 이상의 지진자료를 사용하여 총 54개의 지진에 대한 458개의 파선경로를 얻었다. 다음과 같은 과정을 거쳐서 총 3,369개의 진앙과 관측소간의 파선경로를 얻었으며(Fig. 2), 규모에 따른 지진의 분포는 Table 1에 나타내었다.

자료전처리

지진자료의 평균적인 값과 선형적인 경향성을 제거하여 주고, 푸리에 변환 시 발생할 수 있는 오류를 방지하기 위하여 파형의 시작과 끝의 일정부분을 0으로 수렴하도록 지정해 주는 테이퍼링을 시행하였다. 원하는 주파수 영역을 사용하기 위하여 대역필터(0.005 ~ 2.0 Hz)를 적용한 후 관측 계기의 응답 함수를 제거해 주고, 지진과 관측소의 위치 및 진원시간 정보를 입력해주는 전처리 과정을 수행하였다.

회전

표면파의 경우, 입자 운동 방향에 따라 레일리파는 수직 성분과 법선(radial: R) 성분에 기록이 되고, 러브파의 경우 접선(transverse: T) 성분에 기록된다. 따라서 러브파의 기록을 얻기 위해서는 지진계에 기록된 남-북 성분과 동-서 성분의 회전을 통하여 R 성분과 T 성분으로 전환시켜야 한다. R 성분과 T 성분은 식 (1)과 같이 두 수평성분의 회전으로 구할 수 있으며,

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

여기서, X_R 은 법선(radial) 성분의 진폭, X_T 는 접선(transverse) 성분의 진폭을 나타내며, X_{NS} 는 남-북 성분의 진폭, X_{EW} 는 동-서 성분의 진폭을 나타내고 ϕ 는 관측소에서의 후방위각을 의미한다. 지진계의 수평성분이 동-서와 남-북 방향으로 정렬되어 있지 않은 시추공 관측소의 경우 Lee and Sheen (2015)가 보고한 보정값을 사용하여 회전을 수행하였다.

다중필터기법

다중필터기법(multiple filter technique)은 전처리된 지진 신호로부터 표면파의 군속도 분산을 계산하기 위해 사용되는 필터링 기법이다(Dziewonski *et al.*, 1969). 표면파의 군속도를 계산하기 위해서는 필터링을 통해 표면파를 주파수별로 분리하여야 한다. 다중필터기법을 사용하여 지진 신호에 대하여 필터링해주면 다음 식 (2)와 같이 주어진다.

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

여기서, 스펙트럼신호 $F(\omega)$ 는 진폭과 위상 함수로 표현 될 수 있으며, $\exp\left[-\alpha\left(\frac{\omega-\omega_n}{\omega_n}\right)^2\right]$ 는 가우시안 필터이다. 가우시안 필터의 중앙에서 주파수 ω_n 를 선택하고, 군속도는 진앙거리를 군시간으로 나누어 얻어지며, 필터링된 지진신호의 포락선(envelope)은 분석된 신호의 진폭으로 계산된다. 여기서 진폭 또는 포락선 $g_n(t)$ 는 식 (3)과 같이 정의 된다(Bath, 1974).

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

여기서, $\bar{h}_n(\omega_n, t)$ 는 $h_n(\omega_n, t)$ 의 힐버트 변환이다. 위와 같은 과정을 통해 가우시안 필터를 적용하면 군속도의 도달시간에 대하여 최대진폭을 나타내는 시계열 신호로 필터링되게 된다.

이 연구에서는 다중필터기법을 적용하여 표면파의 군속도를 계산해주는 Herrmann (2013)의 CPS330 (Computer Programs in Seismology)을 사용하여 군속도 분산곡선을 계산하였다. 필터링된 표면파 군속도는 군속도 좌표계에 등고선을 형성하는 에너지 다이어그램으로 나타나며, 에너지 다이어그램의 등고선에서 최대값을 형성하는 지점을 선택하여 군속도 분산 곡선을 구할 수 있다. 이와 같은 방법을 통하여 3 ~ 150 s의 주기 범위에 대한 러브파 자료처리를 수행한 결과 Fig. 3과 같이 주기에 따른 군속도 분산곡선이 도출되었다.

모델 구성

SH파 속도모델을 구하기 위한 역산에서 모델의 설정은 다음과 같다. 역산모델은 삼각형 형태의 기준망으로 구성(Baumgardner and Frederickson, 1985)되어 있으며 이웃한 기준망점 사이의 수평간격은 50 km이고, 중심점(북위 36°, 동경 115°)으로부터 반지름 35°에 해당하는 영역을 포함한다. 수직

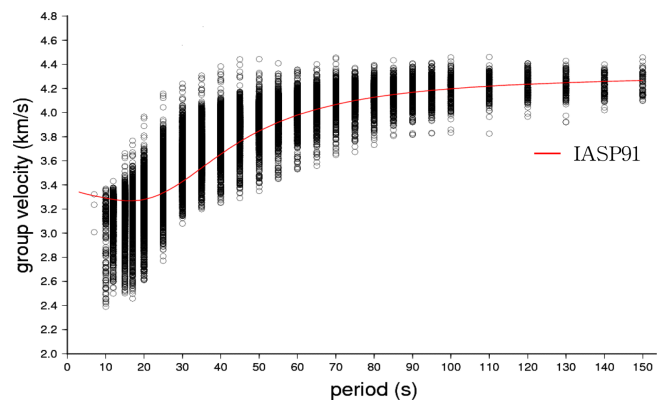


Fig. 3. Love-wave group-velocity dispersion data. The red line shows the Love-wave group-velocity dispersion curve calculated for IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991).

적으로는 깊이에 따라 다른 간격으로 층을 나누었는데, 깊어짐에 따라 간격이 더 크게 하였다. 총 17개의 층상구조로 구성되었으며, 각 깊이는 0, 5, 10, 20, 35, 50, 70, 90, 120, 150, 180, 220, 260, 300, 350, 410, 660 km이다. 동아시아 전체를 포함하기 위해서 한 층당 18,621개의 기준망점이 필요하였고, 역산에 사용된 총 기준망점의 수는 335,178개이다.

역산

연구지역에서 계산된 러브파 군속도 분산곡선에 대한 최소자승 역산(least square inversion)을 수행하여 지각과 상부맨틀에서의 SH 파 속도구조를 계산하였다. 역산을 위한 알고리즘으로는 LSQR 알고리즘(Paige and Saunders, 1982a, 1982b)이 사용되었다. 역산 해석을 수행하기 위해 기준이 되는 초기모델 설정이 필요하며, Kennett and Engdahl (1991)의 지구표준모델인 IASP91 1차원 속도 모델을 초기모델로 설정해 준 후, 다음의 관계로 계산하였다.

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

여기서, \mathbf{G} 는 파선이론에 따른 모델 변수에 관한 민감도 행렬(sensitivity kernel matrix)이며, \mathbf{m} 은 역산을 수행하여 최종적으로 구하고자 하는 연구지역의 S 파 속도모델, \mathbf{d} 는 관측된 러브파 군속도 분산자료와 초기모델에서의 예상값의 차이를 나타낸다. 여기서 계산 값과 관측 값의 차이인 $(\mathbf{Gm} - \mathbf{d})^2$ 가 최소로 수렴 할 때까지 역산 과정을 반복 수행하여 역산 해의 최종 값을 결정한다. 민감도 행렬은 각각의 파선경로에 대한 민감도와 경로 상에서 깊이에 따른 민감도를 모두 포함한다. 따라서 식 (4)을 사용하면, 역산을 통해 3차원 모델을 바로 계산할 수 있게 된다 (Chang *et al.*, 2010).

토모그래피 역산 문제는 모든 기준망점이 파선경로에 의해 추출되지 않기 때문에 다양한 해가 비슷한 오차를 나타내는 불안정성을 나타낼 수 있다. 따라서, 역산문제를 안정화시키는 전략이 필요한데, 주로 제동(damping)과 평활화(flattening)를 통한 규제(regularization)가 사용되어 왔다. 이 연구에서도 제동과 평활화를 사용하여 역산문제를 안정화시켰다. 평활화에는 수평적, 수직적 평활화를 모두 고려하였으며, 최종 역산에서 제동, 수평적 평활화, 수직적 평활화에 대해서 사용한 가중치는 각각 0.3, 0.3, 0.2이다.

이와 같은 규제와 식 (4)를 함께 포함하여 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{A}_m \\ w_1 \mathbf{I} & w_1 \mathbf{I} \\ w_2 \mathbf{F}_h & w_2 \mathbf{F}_h \\ w_3 \mathbf{F}_v & w_3 \mathbf{F}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\beta \\ \Delta h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{A} 와 \mathbf{A}_m 는 SH 파 속도 변이($\Delta\beta$)와 모호면의 변이(Δh)에 대한 민감도 행렬을 의미하고, \mathbf{I} , \mathbf{F}_h , \mathbf{F}_v 는 각각 단위

행렬, 수평적 평활화 행렬, 수직적 평활화 행렬을 나타낸다. w_1 , w_2 , w_3 는 각각의 규제에 대한 가중치이다.

해상도 분석

계산된 3차원 SH 파 속도구조 역산 결과에 대한 해상도를 평가하기 위하여, ± 300 m/s의 이상값을 갖는, 400×400 km

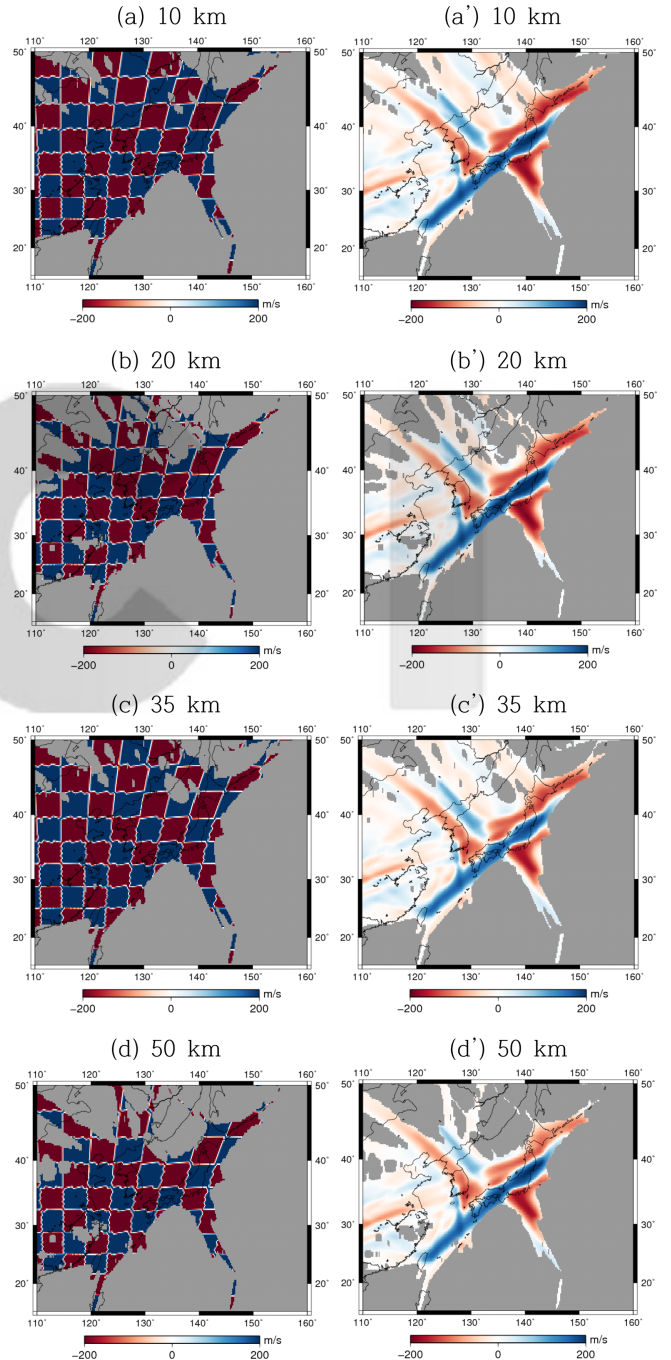


Fig. 4. Depth slices from checkerboard tests. The true model contains SH velocity perturbations of 400×400 km sizes as in the left column. Inversion results are shown in the right column. Regions not covered by data sets are indicated in gray.

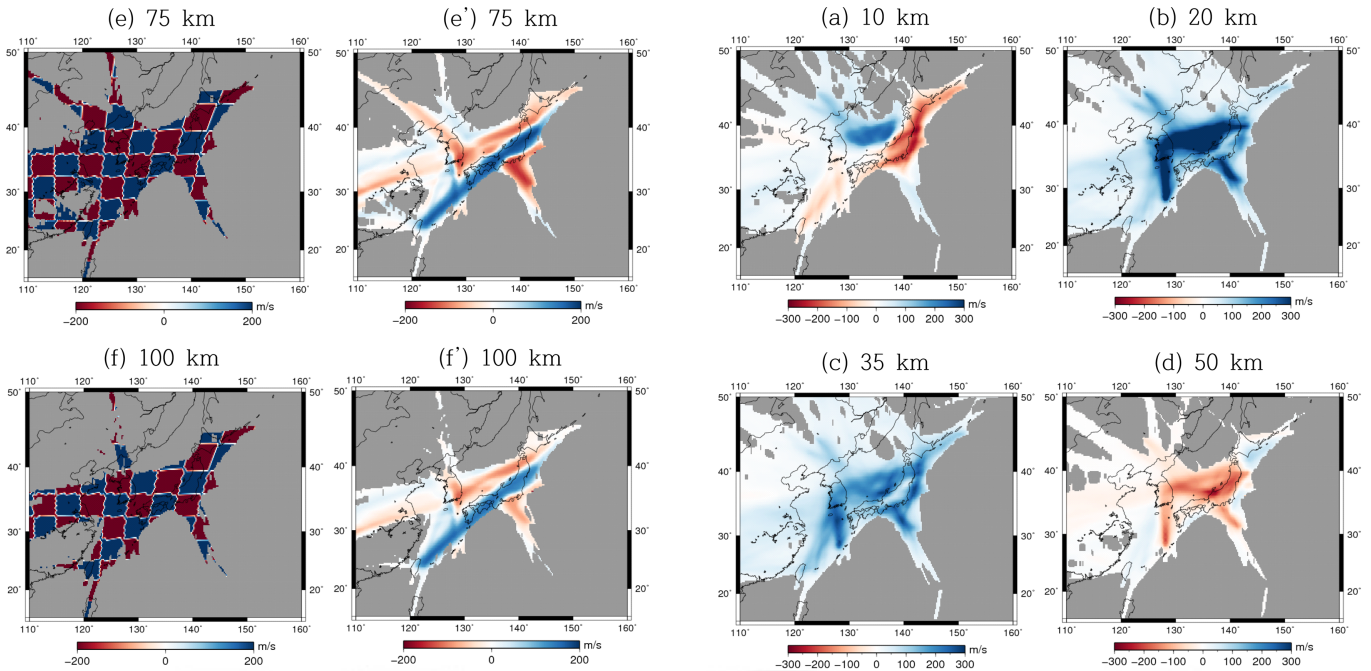


Fig. 4. Continued.

의 셀 크기의 격자(checkerboard)모델 분석을 수행하였다. 기준이 되는 시험 모델과 민감도 행렬들의 곱으로 합성 자료를 계산하여 역산을 수행하였다. 연구지역 아래 100 km 깊이까지 격자모델 분석을 수행하였으며(Fig. 4), 10 ~ 50 km의 깊이에서는 한반도 남부와 동해 남부, 일본열도에서 시험 모델과 비교하여 비교적 양호한 해상도를 보인다(Fig. 4a ~ d). 75 km와 100 km의 깊이에서는 북북동-남남서 방향으로 선형적인 해상도를 보인다(Fig. 4e, f). 이는 장주기 자료의 부족과 파선 경로의 교차가 북북동-남남서 방향으로 우세하기 때문에 발생한 문제로 판단된다. 따라서, 이 연구에서 해석은 해상도가 비교적 양호한 한반도 남부와 동해 남부, 일본열도 지역에 국한하여 하도록 하겠다.

3차원 SH파 속도구조

러브파 군속도 분산곡선 역산을 수행하여 연구지역의 깊이에 따른 3차원 SH파 속도구조를 계산하였다. 동해지역에서는 10 km 깊이에서 고속도 이상이 관측되며(Fig. 5a), 이는 동해의 지각 특성이 일반적인 대륙지각보다 지진파 속도가 높고, 따라서 해양지각의 성질에 더 가까운 특성을 가지기 때문이라고 판단된다. 동해의 성인과 관련하여 부채꼴 확장설(Otofuji *et al.*, 1985, 1986)과 2단계 확장설(김인수, 1992), 또는 당겨열림설(Jolivet *et al.*, 1994) 등이 제안되었는데, 이 모든 이론들은 동해를 구성하는 지각이 기존의 대륙지각에 적용된 인장응력을 통해 얇아진다는 것에 이견을 제시하지 않는다. 따라서, 토모그래피의 결과는 동해의 지각이 지역적으로 해양지각의 성질을 가지는 것을 재확인한 것이라고 할

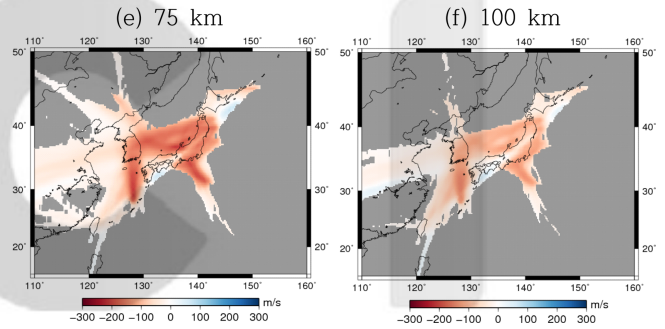


Fig. 5. Depth slices from the 3-D V_{SH} models at various depths. Velocity perturbations are relative to the reference model IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991). Regions not covered by data sets are indicated in gray.

수 있다. 동해지역 아래 20 km 깊이에서 강한 고속도 이상이 관측되고(Fig. 5b), 이는 동해지역에서 기준모델에 비하여 속도가 급격하게 증가했음을 의미하며, 이 깊이에서 이미 맨틀에서의 속도를 반영한다고 판단된다. 따라서 지진파의 속도가 급격하게 증가하는, 지각과 맨틀의 경계인 모호면의 깊이가 10 ~ 20 km 사이에서 존재할 것으로 판단된다. 동해의 모호면 깊이에 대한 이전 연구 결과를 살펴보면 Shinohara *et al.* (1992), Nishizawa *et al.* (1999)의 연구에서는 모호면의 깊이를 19 km, Kim *et al.* (1994)은 울릉분지에서 모호면의 깊이를 15 km로 제시하여, 이번 연구결과인 10 ~ 20 km 사이의 범위와 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 동해를 형성하고 있는 지각이 해양지각의 성질을 가지고 있지만, 평균적인 순수 해양지각의 두께보다 두껍기 때문에 동해지역이 처음부터 바다가 아니었음을 시사한다.

35 km의 깊이에서 기준모델인 IASP91의 S파 속도가 맨틀

의 속도인 4.47 km/s로 설정되어 있기 때문에 한반도 지역에서 나타나는 고속도 이상은 맨틀에서의 속도로 판단되며(Fig. 5c), 35 km 깊이 부근에서 한반도의 모호면이 존재한다고 추정된다. 한반도 지역의 모호면 깊이에 대한 이전 연구결과들을 살펴보면 Chang and Baag (2005)의 연구에서 26 ~ 36 km, Kim *et al.* (2005)의 30.8 ~ 36.1 km로 모호면 깊이를 제시하였으며, 이번 연구 결과와 유사한 모호면 깊이를 갖는다.

동해지역에서는 50 km 깊이에서 저속도 이상이 관측되며(Fig. 5d), 이는 암석권을 지나 연약권에서 나타나는 속도감소로 판단이 된다. 따라서 암석권과 연약권의 경계가 50 km 깊이 부근에 존재한다고 판단된다. 이는 Kim *et al.* (2016)의 연구에서 제시한 동해지역에서의 암석권 깊이와 유사하다. 또한 50 km 와 75 km 깊이에서 일본열도의 경우 태평양판이 유라시아판 아래로 섭입하는 홋카이도 남쪽의 일본 해구(Japan trench)에서 고속도 이상이 관측되지만(Fig. 5d, e), 이 지역에 대한 약한 해상도로 인해 확정지을 수는 없다. 혼슈 지역 일본 열도 아래에서는 저속도 이상이 관측된다. 일본 해구에서 관측되는 고속도 이상은 섭입판에 의한 영향으로 판단이 되며, Abdelwashed and Zhao (2007), Wang *et al.* (2008)의 연구들에서 제시된 태평양판의 섭입에 의하여 속도가 증가한다는 해석이 가능하다. 또한 일본열도에서 나타나는 저속도는 Abdelwashed and Zhao (2007)의 연구에서 제시한 대로, 일본 열도의 규슈와 혼슈 지역하부 40 ~ 80 km에 존재하는 유체탈수현상(dehydration)의 영향으로 인한 저속도 구간으로 판단할 수 있다.

방사 이방성

연구지역 내에서 각 깊이에 따른 SH 파 속도와 SV 파 속도의 상대적인 속도 차이를 계산($\zeta = \frac{V_{SH} - V_{SV}}{V_s} \times 100\%$)하여 Fig. 6에서와 같이 이방성 구조를 구하였다(Kustowski *et al.*, 2008). 이 연구에서 얻은 SH 파 속도모델과의 속도 차이를 비교한 SV 파 속도모델은 동일한 연구지역에 대하여 레일리파 분산곡선 역산을 통해 구한 모델이다(You and Chang, 2016). 방사 이방성은 연구지역 전체에서 25 km와 35 km에서 SH 파가 빠른 양의 이방성을 확인 할 수 있으며(Fig. 6a, b), 평균적으로 45 km 보다 깊은 깊이에서는 SV 파의 속도가 SH 파의 속도보다 빠르게 관측된다. 동해지역에서는 45 km의 깊이에서 약 -2 %의 음의 이방성을 보이며(Fig. 6c), 60 km의 깊이에서는 $\zeta < -6$ %의 강한 음의 이방성이 관측된다(Fig. 6d). 동해지역은 평균적으로 45 ~ 100 km 구간에서 음의 이방성이 관측된다. 동해지역은 판의 충돌로 형성된 배호분지로, 태평양판 섭입에 의한 상승류가 발달하여 생성된 것으로 여겨진다(Tatsumi *et al.*, 1989). 이러한 상승류의 영향으로 맨틀의 흐름 방향에 따라 맨틀의 주 구성광물인 감람석의 격자 방향이 수직적으로 배열되기 때문에 매질에서 수직 방향으로 편광되어 전파하는 SV 파의 속도가 수평으로 편광되어 전파하는 SH 파의 속도보다 더

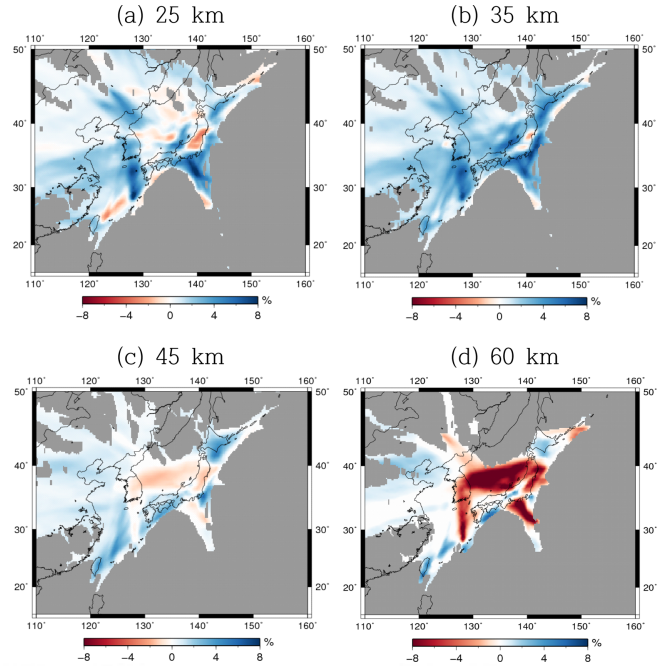


Fig. 6. Radial anisotropy $\zeta = \frac{V_{SH} - V_{SV}}{V_s} \times 100\%$ at various depths. The model is dominated by positive radial anisotropy down to 35 km depth, while negative radial anisotropy below 35 km depth. Regions not covered by data sets are indicated in gray.

빠른 것으로 판단된다.

결론

이번 연구에서는 동아시아 지역에 대한 지각과 상부맨틀에서의 SH 파 속도구조 및 방사 이방성구조를 알아보기 위하여 러브와 분산곡선 역산을 수행하였다. 역산결과에 대한 토모그래피를 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 동해지역 아래 10 km 깊이에서 고속도 이상이 관측되며, 이는 동해를 구성하는 지각이 일반적인 대륙지각보다 해양지각의 성질에 더 가깝기 때문인 것으로 판단된다.
2. 동해지역 아래 20 km 깊이에서 급격한 속도증가를 보이기 때문에 지각과 맨틀의 경계인 모호면이 10 ~ 20 km 사이에서 존재 할 것으로 판단된다. 동해지역은 해양지각의 특성을 가지고는 있으나 일반적인 해양지각의 두께보다는 두껍기 때문에 이를 통해 동해의 성인에 대하여 추론해 볼 수 있다.
3. 동해지역에서는 50 km 깊이에서 저속도 이상이 관측되며, 이는 연약권에서의 속도 감소로 판단된다. 따라서 동해지역에서 암석권과 연약권의 경계가 50 km 부근에서 존재한다고 추정된다.
4. 홋카이도 남쪽에 위치한 일본 해구 아래 50 km 깊이에서 관측되는 고속도 이상은 낮은 해상도로 인해 확정지을 수는 없지만 태평양판이 유라시아판 아래로 섭입하는 섭입판에 의한 영향으로 판단된다. 또한 40 ~ 80 km 깊이의 일본열도에

서 관찰되는 저속도 이상은 혼슈지역의 화산에 마그마를 제공하는 유체탈수현상(dehydration)의 영향으로 판단된다.

5. 연구지역 아래 35 km 깊이 까지 평균적으로 $V_{SH} > V_{SV}$ 인, 양의 방사 이방성이 관찰되었다.

6. 동해지역의 경우 45 km보다 깊은 깊이에서 $V_{SH} < V_{SV}$ 인 음의 방사 이방성이 나타났으며, 이는 연약권에서 태평양판의 섭입에 의해 형성된 배호분지에서 발생하는 상승류의 영향으로 맨틀의 주 구성 광물인 감람석의 격자 배열 방향이 수직 방향으로 배열되어 SV파의 속도가 더 빨라졌기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(KMIPA2015-7030)의 지원으로 수행되었음. 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구구조성비로 연구하였음(관리번호-520150425).

References

- Abdelwahed, M. F., and Zhao, D., 2007, Deep structure of the Japan subduction zone, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **162**, 32-52.
- Aki, K., and Richard, P. G., 1980, *Quantitative Seismology Theory and Methods*, Freeman, 641-718.
- Bath, M., 1974, *Spectral Analysis in Geophysics*, Elsevier.
- Baumgardner, R. B., and Frederickson, P. O., 1985, Icosahedral discretization of the two-sphere, *SIAM Journal of Numerical Analysis*, **22**, 1107-1115, doi:10.1137/0722066.
- 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., van der Lee, S., Flanagan, M. P., Bedle, H., Marone, F., Matzel, E. M., Pasyanos, M. E., Rodgers, A. J., Romanowicz, B., and Schmid, C., 2010, Joint inversion for three-dimensional S velocity mantle structure along the Tethyan margin, *Journal of Geophysical Research*, **115**, B08309, doi:10.1029/2009JB007204.
- Chen, M., Niu, F., Liu, Q., Tromp, J., and Zheng, X., 2015, Multiparameter adjoint tomography of the crust and upper mantle beneath East Asia: 1. Model construction and comparisons, *Journal of Geophysical Research*, **120**, doi:10.1002/2014JB011638.
- Chough, S. K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H., and Choi, D. K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: a review and new view, *Earth-Science Reviews*, **52**, 175-235.
- Dziewonski, A. M., Bloch, J., and Landisman, M., 1969, A new technique for the analysis of transient seismic signals, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **59**, 427-444.
- Elsasser, W. M., 1971, Sea-floor spreading as thermal convection, *Journal of Geophysical Research*, **76**(1), 101-112.
- Estey, L. H., and Douglas, B. J., 1986, Upper mantle anisotropy: A preliminary model, *Journal of Geophysical Research*, **91**, 393-406.
- Guo, Z., Gao, X., Shi, H., and Wang, W., 2013, Crustal and uppermost mantle S-wave velocity structure beneath the Japanese islands from seismic ambient noise tomography, *Geophysical Journal International*, **193**, 394-406.
- Herrmann, R. B., 2013, Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research, *Seism. Res. Lett.*, **84**, 1081-1088, doi:10.1785/0220110096.
- Jolivet, L., Tamaki, K., and Fournier, M., 1994, Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 22237-22259.
- Karato, S., Jung, H., Katayama, I., and Skemer, P., 2008, Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: new insights from laboratory studies, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **36**, 59-95.
- Kennett, B. L. N., and Engdahl, E. R., 1991, Travel times for global earthquake location and phase identification, *Geophysical Journal International*, **105**, 429-465.
- Kim, H. J., Park, C. H., Hong, J. K., Jou, H. T., Chung, T. W., Zhigulef, V., and Anosov, G. I., 1994, A seismic experiment in the Ulleung basin (Tsushima basin), Southwestern Japan sea (East sea of Korea), *Geophysical Research Letters*, **21**, 1975-1978.
- Kim, I. S., 1992, Origin and Tectonic Evolution of the East Sea (Sea of Japan) and the Yangsan Fault System: A New Synthetic Interpretation, *Journal of the Geological Society of Korea*, **28**, 84-109. (In Korean with English abstract)
- Kim, K. Y., Hong, M. H., Lee, J. M., Moon, W. L., Baag, C. E., and Jung, H. O., 2005, Crustal Structure of the Korean Peninsula by Inverting the travel Times of First-arrivals from Large Explosions, *Journal of the Korean Geophysical Society*, **8-1**, 45-48. (In Korean with English abstract)
- Kim, S., Tkalčić, H., Rhie, J., and Chen, Y., 2016, Intraplate volcanism controlled by back-arc and continental structures in NE Asia inferred from trans-dimensional Bayesian ambient noise tomography, *Geophysical Research Letters*, **43**, 8390-8398.
- Kim, S. K., 1995, A Study on the Crustal Structure of the Korean Peninsular, *Journal of the Geological Society of Korea*, **31**, 393-403. (In Korean with English abstract)
- Kustowski, B., Ekström, G., and Dziewonski, A. M., 2008, Anisotropic shear-wave velocity structure of the Earth's mantle: A global model, *Journal of Geophysical Research*, **113**, B06306, doi:10.1029/2007JB005169.
- Lee, H., and Sheen, D.-H., 2015, A study on determination of orientation of borehole seismometer, *Journal of the Geological Society of Korea*, **51**, 93-103.
- Nishizawa, A., and Asada, A., 1999, Deep crustal structure off Akita, eastern margin of the Japan Sea, deduced from ocean bottom seismographic measurements, *Tectonophysics*, **306**, 199-216.
- Otofuji, Y., Matsuda, T., and Nohda, S., 1985, Paleomagnetic evidence for the Miocene counter-clockwise rotation of

- Northeast Japan-rifting process of the Japan arc, *Earth and Planetary Science Letters*, **75**, 265-277.
- Paige, C. C., and Saunders, M. A., 1982a, LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares, *Transactions on Mathematical Software*, **8**, 43-71, doi:10.1145/355984.355989.
- Paige, C. C., and Saunders, M. A., 1982b, LSQR: Sparse linear equations and least squares problems, *Transactions on Mathematical Software*, **8**, 195-209, doi:10.1145/355993.356000.
- Shinohara, M., Hirata, N., Nanbu, H., Suyehiro, K., Kanazawa, T., and Kinoshita, H., 1992, Detailed crustal structure of northern Yamato Basin, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, 1075-1106.
- Tatsumi, Y., Otofuji, Y., Matsuda, T., and Nohda, S., 1989, Opening of the Sea of Japan back-arc basin by asthenospheric injection, *Tectonophysics*, **166**, 317-329.
- Wang, Z., Huang, R., Huang, J., and He, Z., 2008, P-wave velocity and gradient images beneath the Okinawa Trough, *Tectonophysics*, **455**, 1-13.
- Witek, M., van der Lee, S., and Kang, T.-S., 2014, Rayleigh wave group velocity distributions for East Asia using ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, **41**, 8045-8052.
- Yoshizawa, K., Miyake, K., and Yomogida, K., 2010, 3D upper mantle structure beneath Japan and its surrounding region from inter-station dispersion measurements of surface waves, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **183**, 4-19.
- You, S. H., and Chang, S.-J., 2016, 3D *SV*-wave velocity structure of East Asia using Rayleigh-wave tomography, Submitted to *Geophysics and Geophysical Exploration*. (In Korean with English abstract)
- Zheng, Y., Shen, W., Zhou, L., Yang, Y., Xie, Z., and Ritzwoller, M. H., 2011, Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, northeastern China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography, *Journal of Geophysical Research*, **116**, B12312.

K C I