

레이리파 토모그래피를 사용한 동아시아의 3차원 SV 파 속도구조

유설한 · 장성준*

강원대학교 지질 · 지구물리학과

3D SV -wave Velocity Structure of East Asia using Rayleigh-Wave Tomography

Seol-Han You and Sung-Joon Chang*

Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

요약: 동아시아 지역에 대한 지각과 상부맨틀의 속도구조를 파악하기 위해서, 레이리파 분산곡선에서 측정된 군속도 값을 사용하여 SV 파 토모그래피 역산을 수행하였다. 한국, 일본, 그리고 중국에 설치된 253개의 광대역 관측소에 기록된 321개의 지진자료를 사용하였다. 다중필터기법(multiple filtering technique)을 사용하여, 3 ~ 150초 사이의 주기 범위에 대하여, 5,167개의 레이리파 분산 곡선을 획득한 후, 역산을 수행하여 깊이 10 ~ 100 km에 대한 SV 파 토모그래피 모델을 얻었다. 다른 지역과는 다르게 동해지역 하부의 깊이 10 km에서 고속도 이상이 관찰되며 깊이 15 ~ 20 km에서는 강한 고속도 이상이 관측되는데, 이는 맨틀물질의 존재를 나타내는 것으로 생각된다. 따라서 모호면의 깊이가 주변지역에 비해 얕다는 것으로 추정되며, 이를 바탕으로 동해지역의 지각 두께는 10 ~ 20 km 사이로 판단된다. 고속도 이상의 존재 여부로 판단할 때, 한반도 지역의 모호면은 35 km 깊이 부근에 존재하는 것으로 생각된다. 일본열도 북동쪽 지역에서 좁은 범위지만 태평양판의 섭입이 관찰된다. 강원도 연안 하부의 100 km 깊이에서 강한 저속도 이상이 보이며, 이는 울릉도와 울릉분지 형성에 영향을 끼친 용융체의 존재로 생각된다. 또한, 야마토 분지 하부의 100 km 깊이에서 강한 저속도 이상체가 관찰되며, 이는 유체탈수(dehydration) 작용으로 인해 태평양판으로부터 유체가 빠져 나온 후 상승하면서 생성된 저속도 이상체로 해석된다.

주요어: 레이리파, 분산 곡선, 군속도, 토모그래피, 3차원 속도모델

Abstract: We construct 3D SV -wave velocity structure of the crust and the upper mantle beneath East Asia from Rayleigh-wave group-velocity measurements. For the construction of the SV -wave velocity model at 10 ~ 100 km depth, we used seismic data recorded at 321 broadband stations in Korea, Japan, and China. Rayleigh-wave group-velocity dispersion curves were obtained by using the multiple filtering technique in the period range from 3 to 150 s. High SV -velocity anomalies are imaged beneath the East Sea from 10 km depth to deeper depth, implying that the Moho beneath the East Sea is between at 10 ~ 20 km depth. We estimated the Moho beneath the Korean peninsula to be around 35 km based on the depth where a high-velocity anomaly is observed. The SV -wave velocity model shows prominent fast S -velocity anomalies near northeastern Japan, associated with the subducting Pacific plate. Low-velocity anomalies are found beneath the east coast of the Korean peninsula at 100 km depth, which may play a role in the formation of the Ulleung-do and the Ulleung basin. We observed low-velocity anomalies beneath the Yamato basin at 100 km depth as well, which may indicate the upwelling of fluid from the Pacific plate via dehydration at deeper depth.

Keywords: Rayleigh wave, Dispersion curve, Group velocity, Tomography, 3D velocity model

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

한반도가 속해있는 동아시아 지역은 북미판, 필리핀해판, 유라시아판 및 태평양판의 상호작용과 다양한 지각변동운동으로 인해 지진 및 화산활동이 활발하게 일어나는, 지구구조적으로 복잡한 지역이다. 동아시아 지역은 지각에서 발생하는 화산활동, 다양한 유형의 분지 형성, 해양판의 섭입과 대륙판-대륙판 충돌을 포함하는, 지질학적으로 다양한 역사를 포함하고 있다. 한반도 하부의 지체구조는 일본열도와 중국 사이를 연결해주는 중요한 역할을 하고 있으며(Chough *et al.*, 2000), 이를 파악하기 위해서 일본열도까지 포함된 연구가 수행되는 것이 필요하다.

한반도와 그 주변 지역들에 관한 지각구조의 연구는 중력자료와 지진파 주시자료의 분석 연구(Kim, 1995), 굴절법 탐사를 통한 지각구조 연구(Cho *et al.*, 2006), 수신함수를 사용한 속도구조 연구(Chang and Baag, 2007), 탄성과 자료 해석을 통한 지각구조 연구(Kim *et al.*, 1994) 등이 수행되었다. 또한, 상부맨틀에 관한 연구는 유라시아판 전 지역에 대한 표면파 토모그래피 연구(Huang and Zhao, 2009), 유라시아판과 태평양판의 섭입구조와 상부맨틀의 불연속면의 구조를 조사하는 연구(Tonegawa *et al.*, 2008; Igarashi, 2009) 등이 수행되었다. 일본열도 지역에 대한 연구는 *P*파와 *S*파를 이용한 토모그래피 연구(Zhao *et al.*, 2007; Matsubara *et al.*, 2008), 수신함수 연구(Shiomi *et al.*, 2008), 전단파 분리를 사용한 연구(Nakajima and Hasehawa, 2004), *P*파의 이방성 연구(Ishise and Oda, 2005)가 이루어 졌으며 최근에는 미소지진을 이용한 연구(Nishida *et al.* 2008) 등이 수행되었다. 하지만 이전의 연구들은 연구 범위가 대체로 한반도와 일본열도에 한정적이었

기 때문에 한반도와 일본열도에 대한 포괄적인 지각 및 상부맨틀구조를 파악하기가 어려운 점이 있었다. 따라서 이번 연구에서는 포괄적인 동아시아 지역 하부의 지각 및 상부맨틀 구조를 파악하기 위해서 표면파 분산을 이용한 토모그래피 연구를 수행하였다(Fig. 1).

자료 및 연구방법

표면파 분산특성을 이용하여 동아시아의 지각과 상부맨틀의 속도구조를 구하기 위해서 지진자료 획득, 자료전처리, 레이리파 분산 곡선 획득, 모델 구성, 역산을 수행하는 과정을 거친다. 각각의 과정은 아래에서 설명한다.

자료획득

동아시아 지역의 북위 15° ~ 60°, 동경 70° ~ 160° 범위 안에서 한국의 기상청, 한국지질자원연구원, 일본의 F-Net, 미국의 IRIS에서 획득할 수 있는 253개의 관측소에 기록된 321개의 규모 3이상의 지진자료를 사용하였다.

레이리파의 특성을 반영한 수직 성분만을 연구에 이용하였으며, 자료전처리 과정을 통하여 신호 대 잡음 비가 좋지 못한 자료들은 자료전처리 과정에서 제외하였다. 또한, 파선경로가 100 km 미만인 자료의 경우, 분산특성이 충분히 반영되지 못했다고 판단하여 연구 자료에서 제외하였다. Fig. 2는 이번 연구에 사용된 관측소의 위치, 진앙위치, 그리고 321개의 지진파 253개의 관측소 사이의 5,167개의 파선경로를 보여준다.

자료전처리

각 지진자료들은 다음과 같은 전처리 과정을 거친다. (1) 시계열 분석에서 평균값과 선형 경향성 제거; (2) 푸리에 변환 시 발생할 수 있는 오류를 제거해 주기 위해 지진자료의 시작

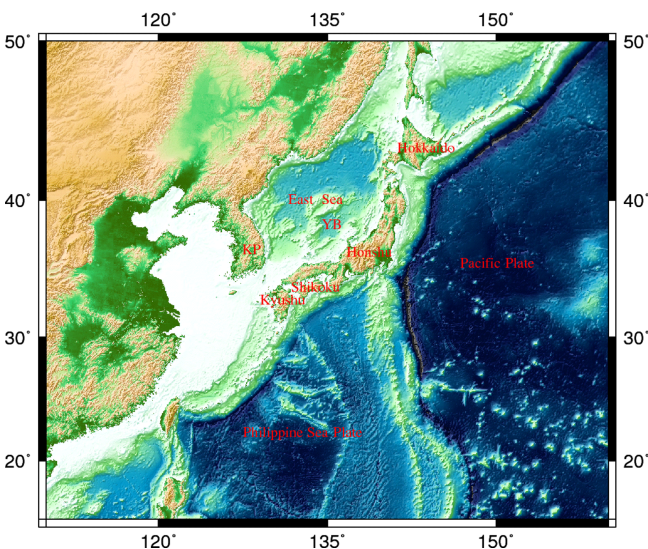


Fig. 1. The study region including the Korea peninsula, the Japanese islands, and surrounding regions. KP: the Korea peninsula. YB: the Yamato basin.

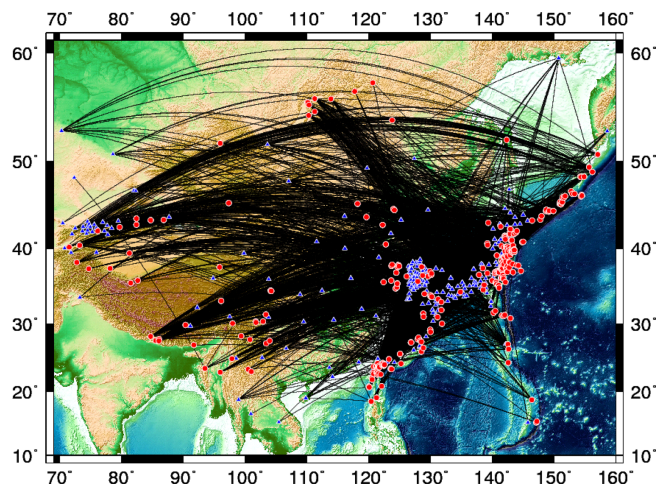


Fig. 2. Distribution of seismic stations (triangles) and earthquakes (circles). Black lines indicate ray paths used in the inversion.

과 끝부분을 0으로 수렴하게 하는 테이퍼링; (3) 계기의 응답 함수를 제거해주기 위한 계기보정 적용; (4) 대역필터 적용 (0.005 ~ 2 Hz); (5) 지진 및 관측소 위치 입력 등으로 자료전처리를 수행하였다.

레이리파 분산곡선 획득

본 연구에서는 레이리파의 군속도를 얻기 위해 다중필터기법(multiple filter technique; Dziewonski *et al.*, 1969) 기술이 적용된, Herrmann (2013)의 CPS330 (Computer Programs in Seismology)을 사용하였다. 다중필터기법은 지진파 신호를 주파수 영역의 자료로 전환하고, 식 (1)과 같은 가우시안 필터(Gaussian filter)를 적용하여 원하는 주파수에서의 군속도를 계산하는 방법이다.

$$H(\omega) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\alpha(\omega-\omega_0)^2}{\omega^2}\right), & \omega_0-\omega_c \leq |\omega| \leq \omega_0+\omega_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega_c = \omega_0 \left(\frac{\pi}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}$$

식 (1)에서 ω_0 는 구하고자 하는 중심 주파수를 나타내며, α 는 가우시안 필터의 함수의 대역폭 변수로 분산 곡선의 해상도를 결정한다. α 값이 커질수록 주파수 영역에서의 대역폭은 좁아져 분해능은 좋아지지만, 구하고자 하는 성분이 제외될 가능성도 있다. 이와 같은 필터링 과정을 거친 후 역푸리에 변환, 힐버트 변환을 통해 각 주파수 범위에서 포락선(envelope)을 구한다. 획득된 포락선을 사용하여 레이리파의 에너지 분포를 주기와 군속도 좌표계에 등고선으로 나타낼 수 있는데, 각 주파수에 대한 최대값을 선택하는 수동적인 방법을 통해 파선경로별 레이리파 분산 곡선을 얻는다(Fig. 3).

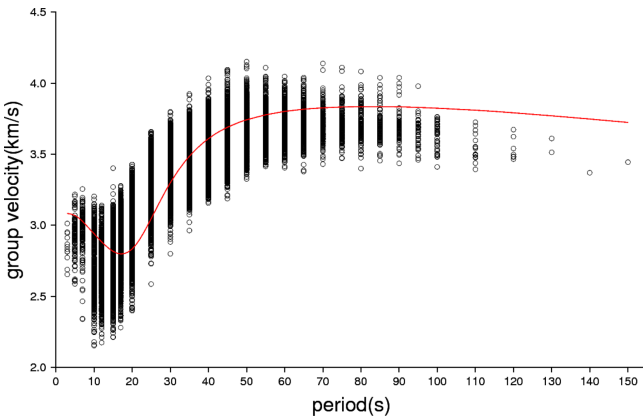


Fig. 3. Rayleigh-wave group-velocity dispersion curves with a period range from 3 to 150 s. Red line indicates the Rayleigh-wave group-velocity dispersion curve from IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991).

모델 구성

SV파 속도모델은 다음과 같이 구성하였다. 수평적으로는 50 km 간격으로 삼각형 형태의 기준망으로 구성(Baumgardner and Frederickson, 1985)하였고, 동아시아 전체를 포함하기 위해서 18621개의 기준망점이 필요하였다. 수직적으로는 총 17개의 층상구조로 구성하였고, 각 깊이는 0, 5, 10, 20, 35, 50, 70, 90, 120, 150, 180, 220, 260, 300, 350, 410, 660 km이다. 모호면의 변이까지 포함하면 총 335,178개의 기준망점을 사용하였다.

역산

동아시아에 대한 속도구조를 해석하기 위해 레이리파 분산 곡선을 역산하였다. 분산 곡선의 역산은 다음의 식 (2)으로 표시할 수 있다.

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{d} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{G} 는 SV파 속도와 분산 곡선을 연관시키는 민감도 행렬(sensitivity kernel matrix), \mathbf{d} 는 데이터 벡터, \mathbf{m} 은 모델파라미터 벡터를 의미한다. 민감도 행렬은 각각의 지진-관측소 쌍에 대해서 파선경로와 그에 따른 깊이에 대한 민감도를 모두 포함한다. 따라서 군속도를 사용한 토모그래피에서 일반적으로 수행되는 2단계, 즉, 주기별 군속도 지도를 만들고, 각 지점에서 1차원 역산을 통해 3차원 모델을 구하는 형식을 따르지 않고, 식 (2)를 사용하여 역산을 수행함으로써 3차원 모델을 바로 구할 수 있다. \mathbf{m} 은 모델 파라미터들의 벡터 $m_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 이며 여기서 N 은 모델 파라미터들의 총수다. 역산을 수행하기 위한 알고리즘으로는 LSQR (Paige and Saunders, 1982a, 1982b)를 사용하였다.

역산을 안정화시키기 위해 다양한 규제를 필요로 한다. 이 연구에서는 제동(damping)과 평활화(flattening)를 사용하였다. 평활화는 수평적 평활화와 수직적 평활화를 모두 고려하였다. 이러한 규제에 대한 적절한 값은 여러 시행착오를 거쳐서 구하였으며, 제동, 수평적 평활화, 수직적 평활화에 각각 0.3, 0.3, 0.2을 입력하였다.

이와 같은 규제와 식 (2)를 함께 나타내면 다음과 같은 행렬식이 된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{A}_m \\ w_1 \mathbf{I} & w_1 \mathbf{I} \\ w_2 \mathbf{F}_h & w_2 \mathbf{F}_h \\ w_3 \mathbf{F}_v & w_3 \mathbf{F}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\beta \\ \Delta h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{A} 와 \mathbf{A}_m 는 SV파 속도 변이, $\Delta\beta$ 와 모호면의 변이, Δh 에 대한 민감도 행렬이고, \mathbf{I} , \mathbf{F}_h , \mathbf{F}_v 는 각각 단위행렬, 수평적 평활화 행렬, 수직적 평활화 행렬이다. w_1 , w_2 , w_3 는 각각에 대한 가중치를 의미한다.

역산을 수행하기 위해서 1차원적인 지구속도모델인 IASP91

모델(Kennett and Engdahl, 1991)을 초기모델로 설정하여 RMS 오차가 수렴할 때까지 역산을 반복 수행하여 깊이 10 ~ 100 km까지의 3차원 SV파 토모그래피 모델을 획득하였다.

SV파 토모그래피

모델 해상도 분석

SV파 토모그래피 모델의 공간 해상도를 평가하기 위해서 격자(checkerboard) 해상도 분석을 하였다. 본 연구에서는 400 × 400 km의 셀 사이즈로 구성된 격자모델을 사용했다. Fig. 4는 400 × 400 km 크기의 격자로 구성되어 있는 깊이 10, 30, 50, 90

90 km에 대한 격자모델과 격자해상도 분석 결과를 보여준다. 격자해상도 분석 결과, 깊이 10, 30, 50, 90 km에 대한 이미지 모두 일본열도 북동쪽 지역과 일본열도 남쪽 지역에서는 적은 파선경로에 의해서 낮은 해상도를 보인다. 그에 비해 한반도 남부, 동해 남부, 일본열도에서는 비록 이상체가 늘어지는 현상이 발견되기는 하지만, 다른 지역과 달리 파선경로가 비교적 밀집되어 있어 격자모델과 어느 정도 유사한 경향을 보였다. 따라서 비교적 해상도가 있다고 판단되는 한반도 남부, 동해 남부, 일본열도에 대해서 한정하여 토모그래피 결과를 해석하도록 하겠다.

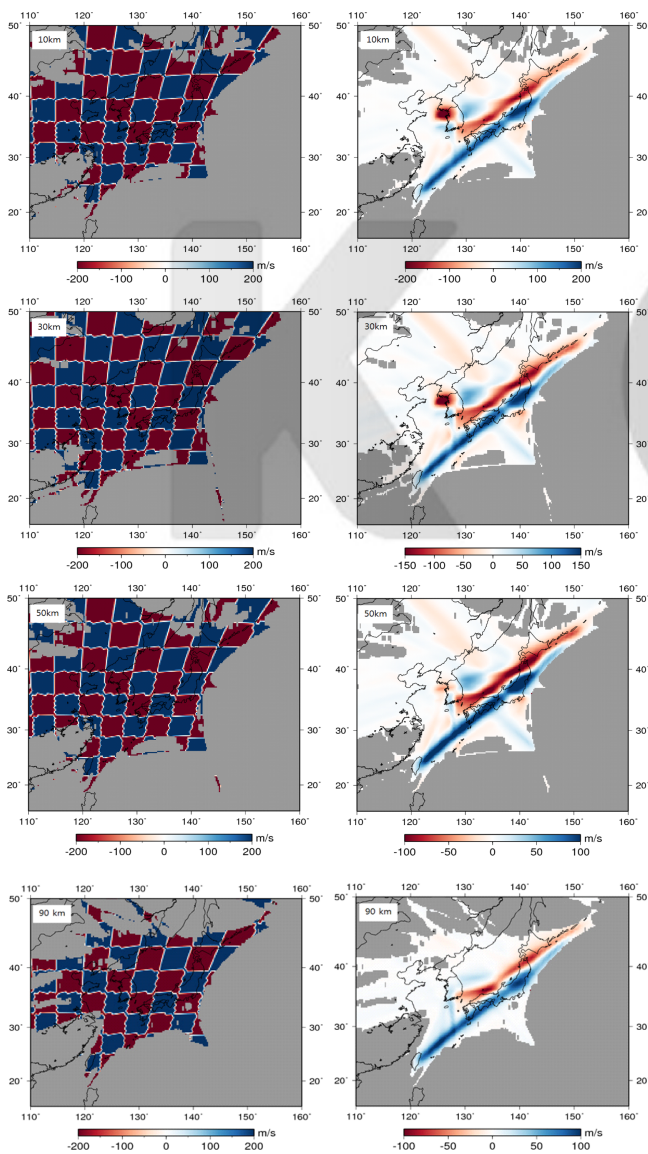


Fig. 4. Depth slices of SV-velocity perturbations from checkerboard tests. The input model with anomalies of 400 × 400 km size (left) and the retrieved model (right) are shown as depth slices at 10, 30, 50 and 90 km depths. Regions not well covered by data sets are illustrated in gray.

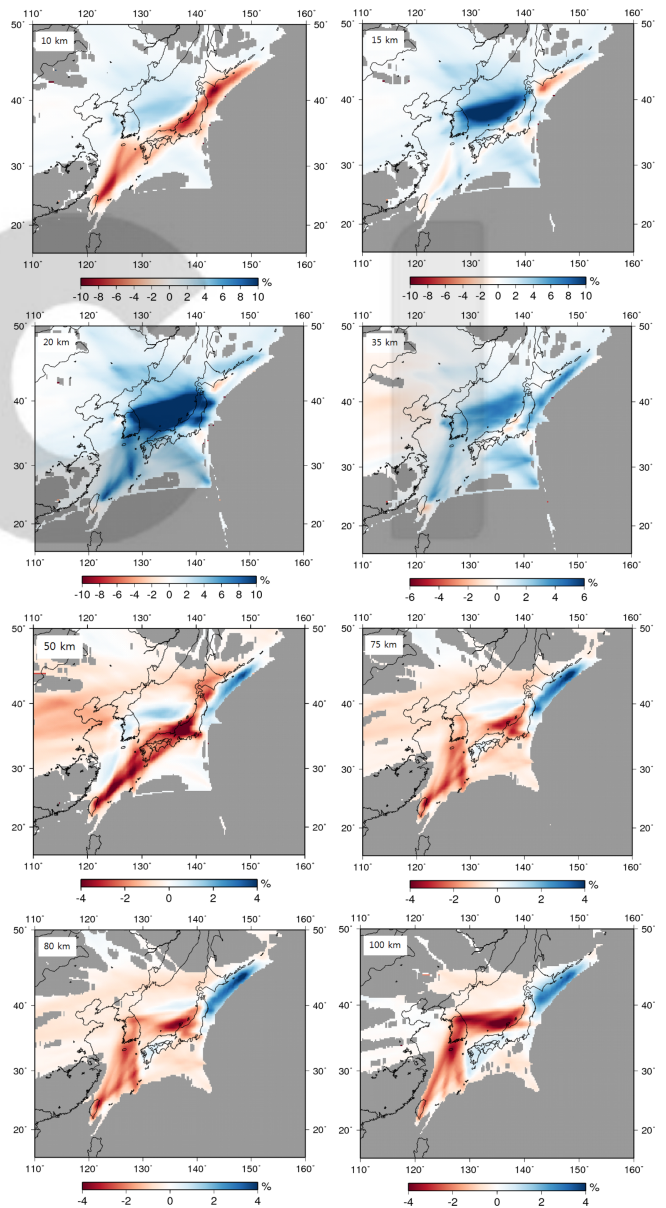


Fig. 5. Depth slices from the SV-velocity model at various depths down to 100 km. Regions not well covered by data sets are illustrated in gray.

연구결과 및 해석

Fig. 5은 깊이 10 ~ 100 km에 대한 SV 파 토모그래피 결과를 보여준다. 깊이 10 km 구간에서 다른 지역과 달리 동해지역에서 고속도 이상이 보이기 시작하며, 15 ~ 20 km 깊이에서는 강한 고속도 이상이 관찰된다. 이는 동해지역의 모호면의 깊이가 주변 지역에 비해 얇기 때문에 상승된 맨틀의 존재로 인한 것으로 생각된다. 따라서, 동해지역의 지각 두께는 10 ~ 20 km 사이인 것으로 생각된다. 우리의 연구결과는 이전의 연구들의 지각 두께 범위와 비교적 일치한다. 심부 탄성과 탐사에 의하면 일본 분지는 전형적인 해양 지각으로 두께는 약 8.5 km (Tamaki, 1988)이며, 야마토 분지와 울릉 분지는 일본 분지보다 두꺼운 지각으로 이루어져 있다. 야마토 분지의 지각 두께는 약 12 ~ 14 km (Ludwig *et al.*, 1975), 그리고 울릉 분지의 지각두께는 약 10 ~ 15 km (Kim *et al.*, 1994)로, 본 연구의 결과 범위와 비교적 일치한다. 깊이 35 km에서 한반도 지역은 고속도 이상을 보이고 있으며, 광대역 수신합수 분석을 통해 모호면을 26 ~ 33 km로 평가한 Chang and Baag (2007)의 연구 결과에 비추어 볼 때, 한반도 지역에서의 고속도 이상은 맨틀에서의 속도로 판단된다. 깊이 50 km에서 동해, 일본열도 북동쪽에서 고속도 이상을 보이고 시코쿠, 규슈, 혼슈우 지역에서 저속도 이상을 보인다. 일본열도 북동쪽 지역에서의 고속도 이상은 유라시아판 아래로 섭입하는 태평양판의 영향으로 속도가 증가한 것으로 판단되지만, 해상도가 높은 지역이 아니기 때문에 확정할 수는 없다. 깊이 75 km에서 규슈, 동해, 시코쿠, 일본열도 북동쪽 지역에서 약하지만 고속도 이상이 보이고 혼슈우 중앙부 지역에서 저속도 이상이 보인다. 동해지역의 깊이 50 km 구간은 고속도 이상이 보이지만 깊이 80 km 구간에서 두드러지게 저속도 이상을 보인다. 이는 연약권의 영향으로 속도가 감소한 것으로 해석되며, 이러한 동해지역의 저속도 이상은 이전에 연구된 표면파 분산 속도 모델(Yoshizawa *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2011)에서 평가한 깊이 75 ~ 150 km에서의 저속도 이상 패턴과 일치한다. 깊이 100 km에서 강원도 주변 동해지역과 야마토 분지에서 강한 저속도 이상이 보이고 규슈, 시코쿠, 혼슈우 남부 지역에서 약하지만 고속도 이상이 보인다. 강원도 연안 100 km 깊이에서의 강한 저속도 이상체는 Simute *et al.* (2016)이 보고한 울릉 이상체와 동일한 것으로 판단되며, 울릉분지의 형성과 울릉도의 화산활동에 관련된 구조로 추정된다. 야마토 분지 하부 75 ~ 100 km 깊이에서의 저속도 이상체는 이전의 연구(Yoshizawa *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2015; Nakahigashi *et al.*, 2015)에서도 보고된 바 있으며, 일반적인 호상 화산작용과 비교하면 해구로부터의 거리가 상대적으로 멀리 떨어져 있다. Nakahigashi *et al.* (2015)은 이 구조를 300 km 깊이에서 섭입된 태평양판으로부터 유체 탈수 현상으로 빠져나온 유체가 상승하면서 생성된 저속도 이상체로 해석하였다.

결론

동아시아의 지각과 상부맨틀을 파악하기 위하여 표면파 분산특성을 이용하여 SV 파 토모그래피 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동해지역의 깊이 10 km 부근에서 고속도 이상이 관찰되며, 이는 동해의 지각이 해양지각의 성질과 비슷한 특성을 가지고 있기 때문으로 판단된다.
2. 동해지역의 깊이 15 ~ 20 km에서 눈에 띄는 속도증가를 보이기 때문에 지각과 맨틀의 경계인 모호면이 10 ~ 20 km 사이로 판단된다.
3. 한반도 지역의 지각과 맨틀의 경계인 모호면은 35 km 부근으로 판단된다.
4. 일본열도 북동쪽 지역에서 고속도 이상이 관찰되며, 이는 유라시아판 아래로 섭입하는 태평양판의 영향으로 판단된다.
5. 강원도 연안 하부와 야마토 분지 하부 100 km 깊이 부근에서 강한 저속도 이상체가 관찰된다. 강원도 연안 하부의 이상체는 울릉 이상체(Simute *et al.*, 2016)로 울릉도의 화산활동과 울릉분지의 형성과 관련된 구조로 추정된다. 야마토 분지 하부의 저속도 이상체는 섭입된 태평양판으로부터 약 300 km 깊이에서 유체 탈수 현상으로 빠져나온 유체가 상승하면서 생성된 것으로 해석된다(Nakahigashi *et al.*, 2015).

감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(KMIPA2015-7030)의 지원으로 수행되었음. 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-120141511).

References

- 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., 2007, Moho depth and crustal vp/vs variation in southern Korea from teleseismic receiver functions: Implication for tectonic affinity between the Korean Peninsula and China, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 1621-1631.
- 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 Korean Peninsula from seismic refraction survey, *Geophysical Research Letters*, **33**, L06307, doi:10.1029/2005/GL025145.
- 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., Landisman, M., and Bloch S., 1969, A technique for the analysis of transient seismic signals, *Bulletin of the*

- Seismological Society of America*, **59**, 427-444.
- Herrmann, R. B., 2013, Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research, *Seismological Research Letters*, **84**, 1081-1088, doi:10.1785/0220110096.
- Huang, J., and Zhao, D., 2009, Seismic imaging of the crust and upper mantle under Beijing and surrounding regions, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **173**, 330-348.
- Igarashi, T., Iidaka, T., Iwasaki, T., Shibutani, T., Ueno, T., and University group of the joint seismic observation at the Niigata-Kobe tectonic zone, 2009, Crust and uppermost mantle structure beneath central Japan inferred from receiver function analysis, *Earth Planets Space*, **61**, 1215-1221.
- Ishise, M., and Oda, H., 2005, Three-dimensional structure of P-wave anisotropy beneath the Tohoku district, northeast Japan, *Journal of Geophysical Research*, **110**, B07304.
- Kennett, B. L. N., and Engdahl, E. R., 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification, *Geophysical Journal International*, **105**, 429-465, doi:10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x
- Kim, H. J., Park, C. H., Hong, J. K., Jou, H. T., Chung, T. W., Zhigulev, 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, S. K., 1995, A study on the crustal structure of the Korean Peninsula, *Journal of the Geological Society of Korea*, **31**, 393-403. (In Korean with English abstract)
- Ludwig, W. J., Murauchi, S., and Houtz, R. E., 1975, Sediments and structure of the Japan Sea, *Geological Society of America Bulletin*, **86**, 651-664.
- Matsubara, M., Obara, K., and Kasahara, K., 2008, Three-dimensional P and S wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, **454**, 86-103.
- Nakahigashi, K., Shinohara, M., Yamada, T., Uehira, K., Sakai, S., and Kanazawa, T., 2015, Deep slab dehydration and large-scale upwelling flow in the upper mantle beneath the Japan Sea, *Journal of Geophysical Research*, **120**, 3278-3292.
- Nakajima, J., and Hasegawa, A., 2004, Shear-wave polarization anisotropy and subduction-induced flow in the mantle wedge of northeastern Japan, *Earth Planetary Science Letters*, **225**, 365-377.
- Nishida, K., Kawakatsu, H., and Obara, K., 2008, Three-dimensional crustal S wave velocity structure in Japan using microseismic data recorded by Hi-net tiltmeters, *Journal of Geophysical Research*, **113**, B10302.
- 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.
- Shiomi, K., Matsubara, M., Ito, Y., and Obara, K., 2008, Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan, *Geophysical Journal International*, **173**, 1018-1029.
- Simute, S., Steptoe, H., Cobden, L., Gokhberg, A., and Fichtner, A., 2016, Full-waveform inversion of the Japanese Islands region, *Journal of Geophysical Research*, **121**, doi:10.1002/2016JB012802.
- Tamaki, K., 1988, Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **39**, 269-365.
- Tonegawa, T., Hirahara, K., Shibutani, T., Iwamori, H., Kanamori, H., and Shiomi, K., 2008, Water flow to the mantle transition zone inferred from a receiver function image of the Pacific slab, *Earth and Planetary Science Letters*, **274**, 346-354.
- Wei, W., Zhao, D., Xu, J., Wei, F., and Liu, G., 2015, P and S wave tomography and anisotropy in Northwest Pacific and East Asia: Constraints on stagnant slab and intraplate volcanism, *Journal of Geophysical Research*, **120**, 1642-1666.
- Yoshizawa, K., Miyake, K., and Yomogida, K., 2010, 3D upper mantle structure beneath Japan and its surrounding region from inter-station measurements of surface waves, *Physics Earth Planetary Interiors*, **183**, 4-19, doi:10.1016/j.pepi.2010.02.012.
- Zhao, D., Wang, Z., Umino, N., and Hasegawa, A., 2007, Tomographic imaging outside a seismic network: Application to the northeast Japan arc, *Bulletin Seismological Society of America*, **97**, 1121-1132.
- 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, doi:10.1029/2011JB008637.