

동아시아 S파 상대 주시 토모그래피

조성흠 · 장성준*

강원대학교 지질 · 지구물리학과

S-wave Relative Travel Time Tomography for East Asia

Seongheum Cho and Sung-Joon Chang*

Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

요약: 동아시아 지역의 S파 맨틀속도구조를 파악하기 위해, 한반도와 일본 지역에 설치된 129개의 광대역 속도 관측소 상에 기록된 원거리 지진 자료를 이용하여 S파 상대 주시 토모그래피를 수행하였다. 보다 정확한 S파 상대 주시의 계산을 위해 다중 채널 상호 상관법을 적용하였으며 파선이론을 기초로 역산을 수행하였다. 역산 결과 주요 판의 경계를 따라 섭입하는 태평양판과 필리핀해판이 고속도 이상으로 나타났으며, 맨틀 전이대를 따라 수평으로 존재하는 태평양판이 확인되었다. 또한 한반도 동부의 하부에서 약 300 km 깊이까지 저속도 이상이 발견되었으며, 이 저속도 이상체는 울릉 분지와 울릉도 형성에 연관이 있을 것으로 판단된다. 제주도 하부 200 ~ 700 km 사이에 나타나는 저속도 이상은 제주도의 형성과 관련이 있을 것으로 생각되며, 이와 같은 저속도 이상체들은 한반도 주요 화산 활동의 근원이 깊은 맨틀에서부터 시작되었음을 알 수 있는 중요한 근거로 생각된다.

주요어: S파 속도, 상대 주시, 토모그래피, 다중 채널 상호 상관

Abstract: We performed seismic imaging based on relative S-wave travel times to examine S-wave velocity of upper mantle structure beneath East Asia. We used teleseismic events recorded at 129 broadband stations of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Korea Meteorological Administration (KMA), and National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED). Relative travel time residuals were obtained by a multi-channel cross-correlation method designed to automatically determine accurate relative phase arrival times. The resulting images show high-velocity anomalies along plate boundaries around the Japanese islands region. These anomalies may indicate subducting Pacific and Philippine Sea plates. On the other hand, a low-velocity anomaly is revealed beneath east of the Korean peninsula down to around 300 km depth, which is thought to be related to the formation of the Ulleung basin and the Ulleung island. Low-velocity anomalies revealed beneath the Jeju island may imply that the formation and volcanism of the Jeju island have been caused by magmatic sources from the deep mantle.

Keywords: S-wave velocity, relative travel time, tomography, Multi-Channel Cross-Correlation

서론

일본열도를 포함한 동아시아 지역은 유라시아판, 태평양판, 필리핀해판, 북아메리카판의 상호작용으로 인해 세계에서 지진활동이 가장 활발한 지역에 속한다. 지진에 대해 상대적으로

안전하다고 평가되던 한반도 역시 2016년 9월 경주 지역에서 규모 5.8의 강진이 발생함을 통해 더 이상 지진 안전지대가 아니라는 사실이 드러났으며, 이에 따라 지진발생 메커니즘을 파악하기 위한 지하속도구조모델 연구의 필요성이 강조되고 있다.

최근 동아시아 지역의 지진과 속도구조에 관한 연구가 활발하게 진행되어 오면서 섭입판의 위치와 연장성에 관한 많은 정보들이 확인되었다. 섭입된 태평양판이 맨틀 전이대를 따라 중국 동부지역까지 이어진다는 것은 이미 널리 알려진 사실 (Fukao *et al.*, 2001; Li and van der Hilst, 2010)이며, 이로 인한 지체구조의 물리적, 화학적 상호작용이 최근의 연구 (Abdelwahed and Zhao, 2007; Asamori and Zhao, 2015; Zhao and Ohtani, 2009)를 통해 밝혀지고 있다. 이러한 연구에서는 섭입되는 판이 고속도 이상으로 명확하게 나타나며, 맨틀 썩기

Received: 29 November 2016; Revised: 5 January 2017;

Accepted: 9 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.

(mantle wedge)나 주요 화산지역 하부는 저속도 이상으로 나타난다. 반면 한국의 경우 배경 잡음을 이용한 레일리와 분산 연구(Witek *et al.*, 2014)나 수신함수 역산을 통한 연구(Chang and Baag, 2005; Chang and Baag, 2007)가 주로 수행되어 왔으며, 이러한 연구들은 대부분 지각과 상부맨틀을 포함하는 약 200 km 깊이까지의 속도구조를 파악하는데 중점을 두어왔다. 지표를 따라 전파하는 표면파와 달리 실체파(body wave)는 지구 내부를 직접 통과하게 되며, 특히 진앙거리 30° 이상의 원거리 지진의 경우, 파선 경로가 관측소에 거의 수직으로 입사하기 때문에 관측소 하부의 심부 지하 구조를 규명하는데 유용하다.

이 연구에서는 동아시아 지역의 S파 맨틀속도구조를 얻기 위해 진앙거리 30° 이상 90° 이하의 원거리 지진을 이용한 S파 상대 주시 토모그래피를 수행하였다. 기존 연구(Asamori and Zhao, 2015; Liu and Zhao, 2016)에서 일본 지역에 국한되어 있던 관측소 범위를 한반도 남부지역으로 확대하였으며, 보다 정확한 S파 상대 주시 계산을 위해 다중 채널 상호 상관법(Multi-Channel Cross-Correlation)을 적용하였다(VanDecar and Crosson, 1990).

자료 획득 및 분석 방법

이 연구에서는 한반도와 일본 지역에 설치된 129개의 광대역 속도 관측소를 이용하였다. 한반도 지역은 한국지질자원연구원과 기상청 네트워크에서 제공하는 55개 관측소를 포함하며, 일본 지역은 일본지구과학방재연구소(NIED)에서 제공하는 74개의 F-net 네트워크 관측소를 포함한다. 기록 자료는 2006년 1월부터 2016년 4월 사이 해당 관측소에 기록된 규모

6.0 이상의 지진으로, 연구에 사용된 관측소와 지진의 분포는 Fig. 1에 나타난 것과 같다. 진앙거리 30° 이하의 지진의 경우 실체파가 주로 물성이 불균질한 상부맨틀을 지나 이동하게 되며, 진앙거리가 90° 이상인 경우 외핵을 통과하기 때문에, 30° 이상 90° 이하 범위에서 발생한 지진만을 선정하였다. 지진 발생 시간과 위치, 규모에 대한 정보는 미국의 국립 지진정보센터(National Earthquake Information Center)를 통해 획득하였다. 관측소에 기록된 신호로부터 S파 파형을 부각시키기 위해 0.04 ~ 0.1 Hz의 버터워스 주파수 대역 필터(Butterworth bandpass filter)를 적용하였으며, 정확한 S파 상대 주시 계산을 위해 다중 채널 상호 상관법(Multi-Channel Cross-Correlation)을 적용하였다.

다중 채널 상호 상관법(Multi-Channel Cross-Correlation)

다중 채널 상호 상관법은 전처리된 자료로부터 정확한 상대 주시를 계산하기 위해 관측소에 도달한 실체파 파형의 유사성을 이용한다(Fig. 2). 각 관측소에 기록된 동일 지진 파형의 상호 상관을 통해 상관함수의 값이 최대가 되는 지연시간(lag time)을 계산하여 다음의 관계식으로 나타낸다.

$$t_i - t_j = dt_{ij} \tag{1}$$

여기서 t_i 와 t_j 는 각각 i, j 번째 관측소 신호의 상대 주시이고 dt_{ij} 는 상호 상관 함수가 가장 클 때의 지연시간으로 두 신호 사이의 시간차에 해당한다. 관측소의 수가 n 개일 경우 $n(n - 1)/2$ 개의 관계식을 구성할 수 있고, 이 관계식들을 풀어 각 관측소에 대한 상대 주시를 계산한다. 그러나 같은 지진이라고 하더라도 각 관측소 상에 기록된 파형들이 완벽하게 일치하지는 않으며, 대부분 비상관적인 주변 잡음을 포함하고 있기 때

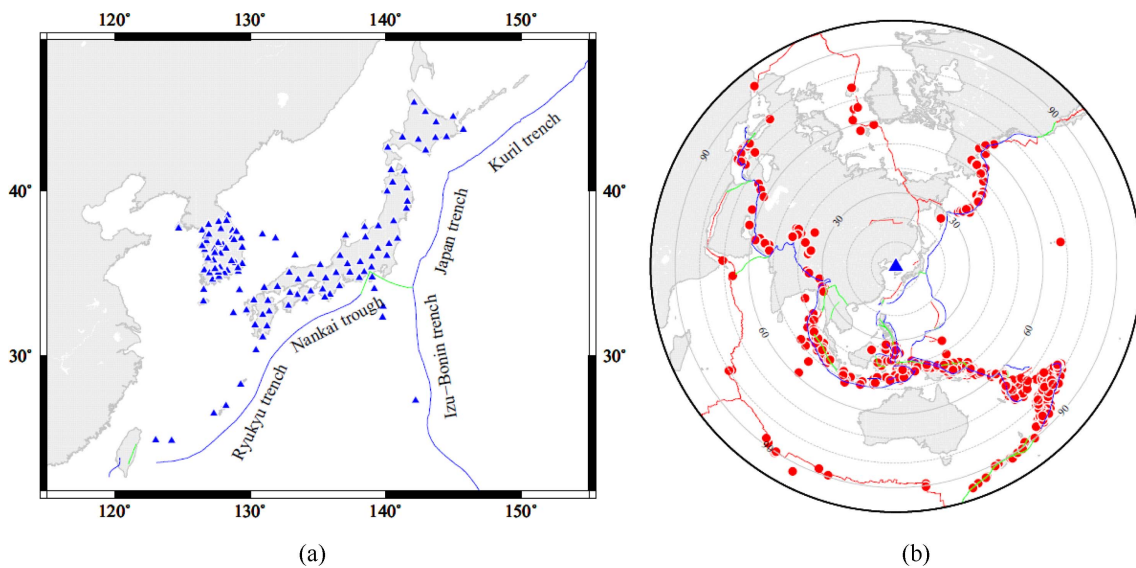


Fig. 1. Map of the study area. (a) Distribution of the broadband seismic stations installed in the Korean and Japan regions. (b) Distribution of teleseismic events for S-wave phases. The blue and red, green solid lines indicate convergent, divergent, and transform fault boundaries, respectively (Bird, 2003).

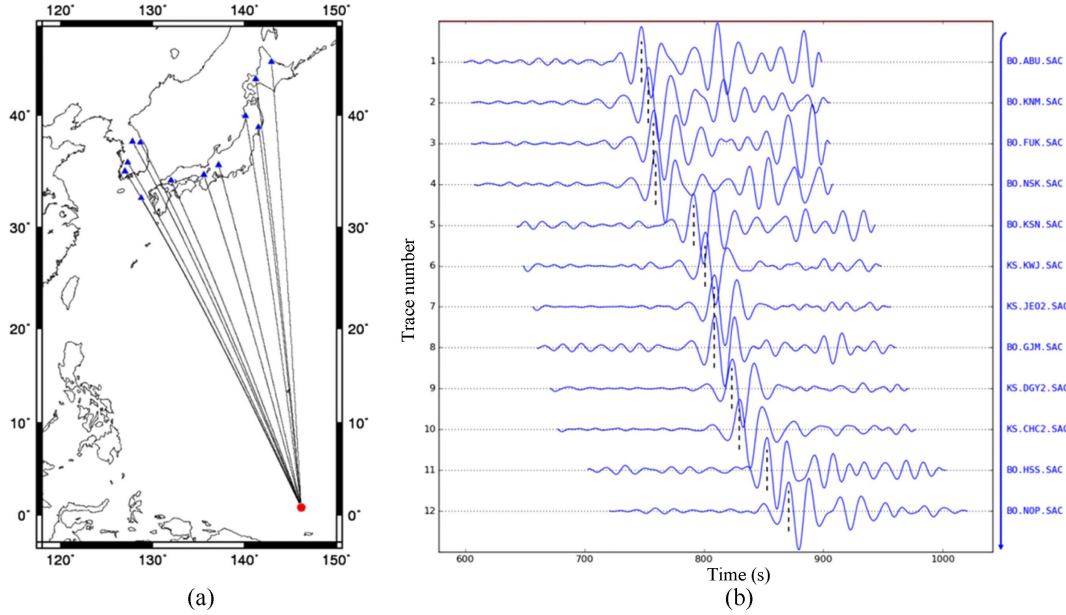


Fig. 2. Phase picking example. (a) The event occurred beneath the Micronesia Caroline islands on August 3, 2014. The ray paths from the epicenter to seismic stations in Korea and Japan are represented as black lines. The epicenter and seismic stations are indicated by a red circle and blue triangles, respectively. (b) Waveforms of the teleseismic event recorded at broadband seismic stations in Korea and Japan. The waveforms were bandpass-filtered between 0.04 to 0.1 Hz for S-wave phases. Traces were ordered by epicentral distances with vertical dotted lines which denote preliminary arrival times.

문에 상호 상관을 통해 구해낸 지연시간 역시 항상 정확한 값을 갖는 것은 아니다(i.e., $dt_{12} + dt_{23} \neq dt_{13}$). 따라서 지연시간 으로부터 가장 최적화된 상대 주시를 계산하기 위해 최소자승법(least squares method)을 이용한다. 관측소의 수가 n 개일 때 각 관측소의 상호 상관으로 얻을 수 있는 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$t_i - t_j = dt_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n-1; \quad j = i+1, i+2, \dots, n \quad (2)$$

여기에 하나의 제한식이 더해진다.

$$\sum_{i=1}^n t_i = 0 \quad (3)$$

위의 식은 t_i 의 평균값을 0으로 제한하여 각 관측소의 주시가 평균주시를 기준으로 상대적인 값을 갖도록 한다. 위의 관계식들을 행렬식으로 표현하면

$$\mathbf{A}\mathbf{t} = \mathbf{d}\mathbf{t} \quad (4)$$

으로 나타나며, 여기서 \mathbf{A} 는 $[n(n-1)/2 + 1] \times n$ 형태의 계수행렬(coefficient matrix), \mathbf{t} 는 $n \times 1$ 의 해 벡터(solution vector), $\mathbf{d}\mathbf{t}$ 는 $[n(n-1)/2 + 1] \times 1$ 의 데이터 벡터(data vector)가 된다. 식 (3)은 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 값을 $n\mathbf{I}$ 으로 만들어 식 (4)를 \mathbf{t} 에 대해 계산하기 쉽도록 해준다. 식 (4)를 \mathbf{t} 에 대해 정리하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{t} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{d}\mathbf{t} \quad (5)$$

여기서 행렬의 연산을 통해 계산된 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 값은 $n\mathbf{I}$ 이므로

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A} = n\mathbf{I} \quad (6)$$

$$(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1} = (1/n)\mathbf{I} \quad (7)$$

이며, 따라서 식 (5)는 식 (7)에 의해 다음과 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$\mathbf{t} = (1/n)\mathbf{A}^T\mathbf{d}\mathbf{t} \quad (8)$$

위의 과정에는 가중치(weighting)를 반영하는 $[n(n-1)/2 + 1] \times [n(n-1)/2 + 1]$ 의 대각행렬(diagonal weighting matrix), \mathbf{W} 를 적용할 수 있다. \mathbf{W} 의 구성에는 상호 상관 계수(cross-correlation coefficient) 혹은 실측값과 이론값의 잔차(residual)를 반영하는 방법이 있지만, 실험적인 측정에 따르면 가중치에 의한 효과가 최종 해(solution)에 큰 영향을 끼치지 않으므로, 이 연구에서는 해당 과정을 생략했다. 또한 상호 상관 연산 시 발생할 수 있는 주기 놓침(cycle skipping) 현상을 줄이기 위해 반복적 상호 상관 및 중합 알고리즘(Iterative Cross-Correlation and Stack algorithm)을 적용(Lou *et al.*, 2013)하여 좁은 범위의 시간 영역(time window)을 설정하였다.

위의 방법을 이용하여 580개 지진에 대한 45,868개의 S파 상대 주시를 계산하였으며 자료처리 과정에서 신호 대 잡음비

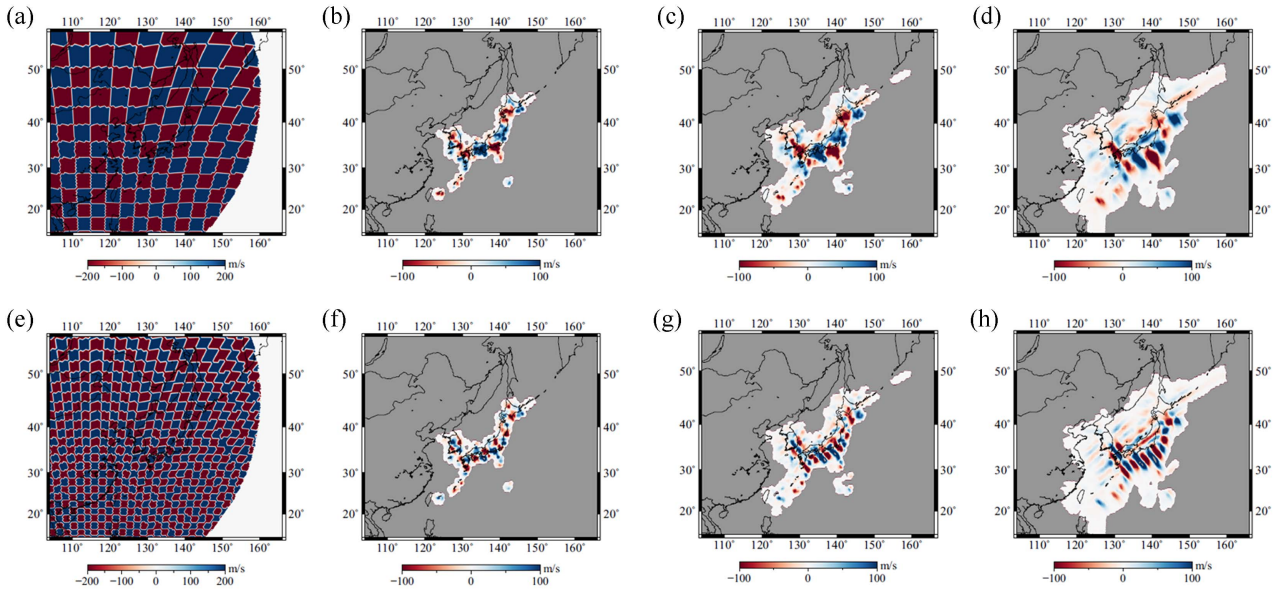


Fig. 3. Checkerboard resolution tests at depths of 100, 300, and 500 km. The checkerboards consist of 400 and 200 km size squares with anomalies of ± 300 m/s as shown in (a) and (e), respectively. (b), (c) and (d) show retrieved models for anomalies of $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ at 100, 300, and 500 km, respectively. (f), (g), and (h) show retrieved models anomalies of $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ at 100, 300, and 500 km, respectively.

가 낮거나 파형의 일관성이 떨어지는 자료는 제거하였다.

역산

다중 채널 상호 상관을 통해 획득된 45,868개의 S파 상대 주시를 이용하여 토모그래피를 수행하였다. IASP91 모델 (Kennett and Engdahl, 1991)이 기준 모델로 사용되었으며 파선이론에 기초하여 파선경로와 민감도(sensitivity kernel)를 계산(VanDecar, 1991)하였다. 수평적으로 50 km 간격을 갖는 삼각형 형태의 격자를 구형 스플라인(spherical spline)으로 구성하였으며, 수직적으로는 0, 5, 10, 20, 35, 50, 70, 90, 120, 150, 180, 220, 260, 300, 350, 410, 470, 550, 660, 780, 900, 1050, 1200, 1400 km 깊이를 기준으로 24개의 층상 구조를 구성하였다. 역산의 안정성을 위해 제동(damping)과 수평 평활화(flattening), 수직 평활화 행렬을 사용하였으며 각각의 가중치는 3.0, 1.0, 1.0으로 적용하였다. 이는 해상도 테스트를 수차례 반복하여 얻은 최적의 수치이다. 이후 최소자승법을 통해 $\|Gm-d\|^2$ 값이 수렴할 때까지 역산을 50회 반복 수행하였다. 여기서 G 는 민감도 행렬(sensitivity kernel matrix), d 는 데이터 벡터(data vector), m 은 모델 벡터(model vector)를 나타낸다.

해상도 테스트

토모그래피 결과에 대한 공간적 해상도를 평가하기 위해 격자(checkerboard) 테스트를 수행하였다. 테스트에 사용된 모델은 ± 300 m/s의 속도 이상을 갖는 격자가 반복되어 배열되는

형태이며 Fig. 3의 (a)와 (e)는 각각 $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$, $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ 크기의 격자로 구성되어 있는 격자 모델을 나타낸다. 이후 격자 속도모델을 통과하는 파선에 대한 이론적 주시를 계산하여 합성 데이터 벡터(synthetic data vector)를 구성하고, 실제 자료를 사용할 때와 동일한 역산 과정을 수행하여 테스트 결과를 얻었다.

Fig. 3의 (b), (c), (d)는 $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ 격자 모델에 대한 테스트 결과를 깊이 별로 나타내며, (f), (g), (h)는 $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ 모델에 대한 결과를 나타낸다. 파선이 관측소 하부에 거의 수직으로 입사하는 원거리 지진의 특성으로 인해 관측소가 분포하는 한반도와 일본지역을 중심으로 높은 해상도가 형성되었으며, 특히, 관측소 밀도가 높은 일본지역에서 가장 높은 해상도를 보였다. Fig. 3(f), (g), (h)에서 나타나는 바와 같이 $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ 테스트에서는 깊이가 증가함에 따라 이상 분포의 형태가 왜곡되는 모습을 나타내는데, 이는 지진 분포가 가장 많은 남동쪽 지역으로 파선 밀도가 높게 형성되어 발생한 현상이다.

결 과

Fig. 4는 토모그래피의 결과를 깊이 단면으로 보여준다. 쿠릴 해구(Kuril trench), 일본 해구(Japan trench), 이즈-보닌 해구(Izu-Bonin trench), 난카이 해구(Nankai trough), 류큐 해구(Ryukyu trench)와 같은 판의 경계를 따라 고속도 이상이 나타나며 깊이가 증가함에 따라 판의 이동 방향으로 고속도 이상이 이동하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5의 A-A' 수직 단면

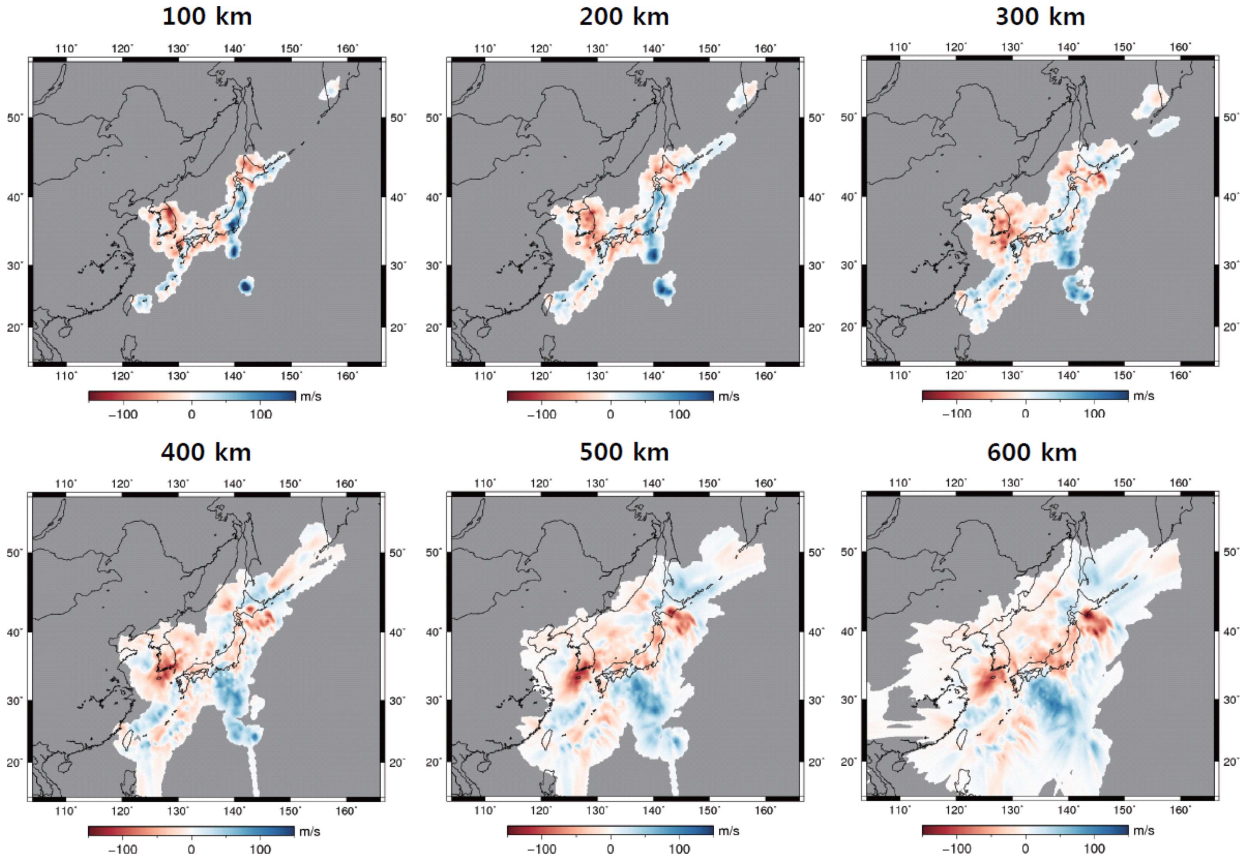


Fig. 4. Depth slices of S-wave velocity (V_s) obtained by inverting S-wave relative travel times using IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991) as a reference model. The red and blue colors denote low- and high-velocity perturbations, respectively. Substructure of the Korean peninsula is substantially shown as low velocities, while high-velocity anomalies are revealed along the Kuril trench, the Japan trench, the Izu-Bonin trench, the Nankai trough, and the Ryukyu trench.

도는 일본 해구(Japan trench)를 따라 섭입하는 태평양판이 깊이 600 km 부근까지 도달하는 것을 보여주며 Fig. 5의 B-B' 수직 단면도에서는 동해 방향으로 섭입하는 필리핀해판이 깊이 400 km 부근까지 약하게 나타난다. 이 결과들은 실제파를 이용한 이전의 연구(Liu and Zhao, 2016)와 일치한다. Fukao *et al.* (2001)은 섭입하는 태평양판이 맨틀 전이대의 물성변화로 인해 더 이상 하부로 내려가지 못하고 정체되어 맨틀 전이대를 따라 이동한다는 사실을 밝혀냈다. 일본 남서지역의 수직 단면은 깊이 700 km 부근에서 정체된 태평양판을 고속도 이상으로 나타내고 있다(Fig. 5의 B-B', D-D' 수직 단면도). 반면 Fig. 5의 C-C' 수직 단면도에서는 제주도 하부에 나타나는 저속도 이상을 확인할 수 있다. 200 ~ 700 km 사이에서 확인되는 저속도 이상은 관측소 하부로 갈수록 점차 약해지며, 이와 같은 결과는 실제파를 이용한 이전의 연구(Wei *et al.*, 2015)와 유사한 모습을 보인다. 파선이 관측소 하부에 거의 수직으로 입사하는 원거리 지진의 특성과 해상도 테스트 결과를 고려해봤을 때 얕은 깊이(~ 100 km)에서의 수직 해상도가 다소 떨어질 것으로 판단되지만, 제주도 형성이 깊은 맨틀 물질로부터 시작되었다는 근거로 충분히 해석될 수 있다.

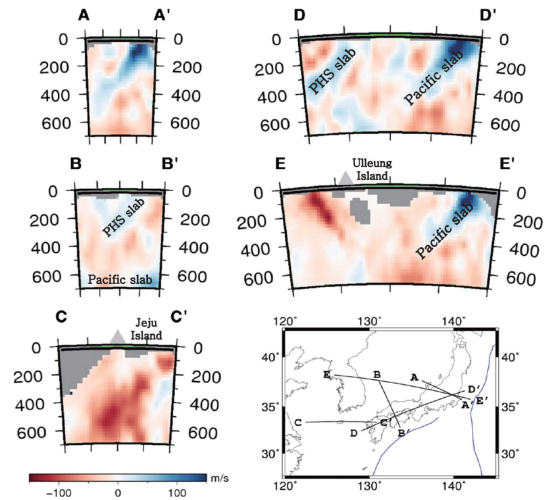


Fig. 5. Vertical cross-sections of S-wave velocity (V_s) perturbations from 0 to 700 km depth. High-velocity anomalies of Section A-A' and B-B' indicate subducting Pacific and Philippine Sea (PHS) slabs, respectively. On the other hand, low-velocity anomalies of Section C-C' are revealed beneath the Jeju island. Section D-D' shows that the Pacific slab extends to 600 km beneath SW Japan, but PHS slab beneath the Shikoku region down to 400 km depth. A low-velocity anomaly in Section E-E' beneath the Korean peninsula may indicate the presence of the Ulleung anomaly (Simuté *et al.*, 2016).

또한 한반도 동쪽 하부에 약 300 km 깊이까지 큰 저속도 이상이 관측되는데, 이는 울릉분지 하부에 존재하는 저속도 이상체에 의한 영향으로 판단된다(Fig. 5의 E-E' 수직 단면도). 최근 동해 지역에 대한 완전파형역산(full waveform inversion)이나 배경잡음(ambient noise) 연구가 수행되면서 울릉분지 하부에 존재하는 저속도 이상이 확인되었다. 한반도와 일본 관측소를 이용한 완전파형역산 연구(Simutè *et al.*, 2016)는 울릉분지 하부 200 ~ 300 km 깊이에서 현저한 저속도 이상을 발견하였으며, 이를 울릉 이상체(Ulleung anomaly)로 이름지었다. 배경잡음을 통한 레일리파 분산연구(Witek *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2016)에서는 주기 40 s 이상에서 이와 비슷한 결과를 나타내고 있다. 한반도 동부에 설치된 간성(KSA), 정선(JSB), 상동(SND) 관측소의 경우 파선경로가 울릉분지를 지나는 후방위각(back azimuth) 120° 부근의 지진에 대해 상대적으로 큰 양(positive)의 상대 주시 잔차(residual)를 나타내며, 이를 통해 울릉분지 하부를 통과하는 파선의 영향으로, 울릉 이상체가 한반도 동쪽으로 길게 늘어지는 현상(smearing effect)이 발생하였다고 판단할 수 있다. 이는 지형적 한계로 인한 동해 지역 관측소의 부재가 원인이며, 동해 지역 하부의 해상도 역시 이와 같은 이유로 감소한다.

결 론

본 연구에서는 다중 채널 상호 상관법을 통해 획득한 S파 상대 주시를 이용하여 동아시아 지역의 맨틀속도구조모형을 계산하였다. 역산 결과 태평양판과 필리핀해판을 지시하는 고속도 이상이 일본 지역 하부에 나타났으며, 제주도 형성과 관련된 것으로 판단되는 저속도 이상이 제주도 하부 200 ~ 700 km 깊이까지 나타났다. 또한 울릉분지 하부에 존재하는 저속도 이상체가 한반도 동부 200 ~ 300 km 깊이까지 나타났다. Brenna *et al.* (2015)는 류큐 해구를 따라 섭입하는 필리핀해판이 제주도 하부의 맨틀 흐름을 상승시키고 부분 용융을 일으켜 화산 활동을 일으켰다고 설명하고 있으며, Simutè *et al.* (2016)는 유라시아판을 빠른 속도로 파고드는 태평양판의 영향으로 유체 탈수 현상에 의한 상승류가 생성되며 울릉분지 하부의 저속도 이상을 형성한 것이라고 해석했다. 이는 한반도의 주요 화산활동이 깊은 맨틀에서 기원한 마그마의 작용으로 이루어졌음을 증명하는 근거로 생각할 수 있다. 기존의 연구에서 밝혀진 바와 같이 맨틀 전이대를 따라 존재하는 태평양판이 일본 지역 하부에서 확인되었지만, 낮은 관측소 밀도로 인한 해상도 감소로 동해 지역 하부에서는 이를 확인하기 어려웠다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하고 모델의 정확성을 높이기 위해서는, 지각 범위에서 높은 해상도를 갖고 관측소가 제한된 지역에서도 해상도를 갖는 표면파 분산 연구가 병행되어야 한다.

감사의 글

이 연구는 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2014R1A1A2056925).

References

- Abdelwahed, M., and Zhao, D., 2007, Deep structure of the Japan subduction zone, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **162**, 32-52.
- Asamori, K., and Zhao, D., 2015, Teleseismic shear wave tomography of the Japan subduction zone, *Geophysical Journal International*, **203**, 1752-1772.
- Bird, P., 2003, An updated digital model of plate boundaries, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- Brenna, M., Cronin, S., Kereszturi, G., Sohn, Y., Smith, I. M., and Wijbrans, J., 2015, Intraplate volcanism influenced by distal subduction tectonics at Jeju Island, Republic of Korea, *Bulletin of Volcanology*, **77**, 1-16.
- 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., 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 Seismological Society of America*, **97**, 1621-1631.
- Fukao, Y., Widiyantoro, S., and Obayashi, M., 2001, Stagnant slabs in the upper and lower mantle transition region, *Reviews of Geophysics*, **39**, 291-323.
- Kennett, B. L. N., and Engdahl, E. R., 1991, Travel times for global earthquake location and phase association, *Geophysical Journal International*, **105**, 429-465.
- Kim, S., Tkalčić, H., Rhie, J., and Y. Chen, 2016, Intraplate volcanism controlled by back-arc and continental structures in NE Asia inferred from transdimensional Bayesian ambient noise tomography, *Geophysical Research Letters*, **43**, 8390-8398, doi:10.1002/2016GL069483.
- Li, C., and van der Hilst, R. D., 2010, Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltimes tomography, *Journal of Geophysical Research*, **115**, B07308, doi:10.1029/2009JB006882.
- Liu, X., and Zhao, D., 2016, P and S wave tomography of Japan subduction zone from joint inversions of local and teleseismic travel times and surface-wave data, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **252**, 1-22.
- Lou, X., van der Lee, S., and Lloyd, S., 2013, AIMBAT: A Python/Matplotlib tool for measuring teleseismic arrival times, *Seismological Research Letters*, **84**, 85-93.

- Simutè, S., Steptoe, H., Cobden, L., Gokhberg, A., and Fichtner, A., 2016, Full-waveform inversion of the Japanese Islands region, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, doi:10.1002/2016JB012802.
- VanDecar, J. C., and Crosson, R. S., 1990, Determination of teleseismic relative phase arrival times using multi-channel cross-correlation and least-squares, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80**, 150-169.
- VanDecar, J. C., 1991, *Upper-mantle structure of the Cascadia subduction zone from non-linear teleseismic travel-time inversion*, Ph.D. thesis, University of Washington, Seattle.
- 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: Solid Earth*, **120**, 1642-1666, doi:10.1002/2014JB011254.
- 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, doi:10.1002/2014GL062016.
- Zhao, D., and Ohtani, E., 2009, Deep slab subduction and dehydration and their geodynamic consequences: evidence from seismology and mineral physics, *Gondwana Research*, **16**, 401-413.