

중국 만주지역 S파 상대주시 토모그래피

김용우 · 김효지 · 임정아 · 장성준*

강원대학교 지질 · 지구물리학과

S-wave Relative Travel Time Tomography for Northeast China

Yong-Woo Kim, Hyo-Ji Kim, Jung-A Lim, and Sung-Joon Chang*

Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

요약: 중국 만주지역은 백두산이라는 거대한 화산이 존재하는 지질학적, 지구물리학적으로 중요한 곳이다. 백두산은 전 세계에서 규모가 가장 큰 화산 중 하나이며, 최근 분화 조짐이 보이면서 사람들의 관심이 집중되어 있다. 본 연구는 중국 만주지역의 하부 깊이 약 100 ~ 600 km 사이의 속도구조를 파악하기 위해 S파 상대주시 토모그래피를 수행하였다. 연구에는 IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology)에서 제공하는 Necess Array (North East China Extended SeiSmic Array)에 기록된 2009 ~ 2011년 기간 동안 진앙거리 30° 이상 90° 미만의 지진 자료를 사용하였다. 획득한 자료들에 다중채널 상호상관법(multi-channel cross-correlation method)을 적용함으로써 상대주시를 계산하였다. 그 결과 중국 만주 지역에 분포하는 화산지대와 토모그래피 이미지에서 나타나는 저속도 이상체의 위치가 동일함을 관측하였다. 백두산 하부 100 ~ 600 km 사이에 저속도 이상이 발견되었으며 이 저속도 이상체는 백두산의 마그마 공급과 연관이 있을 것으로 판단된다. 서쪽에 다동 화산지대 동쪽 하부 300 km 부근까지, 북쪽에 우달리안치 화산지대의 경우 하부 200 km 부근 까지 저속도 이상이 발견되었다. 이 저속도 이상체는 백두산의 형성과 생성원인이 다르며, 다동 화산지대 동쪽 저속도 이상의 경우 깊은 맨틀에서의 상승류에 의해 생성되었을 가능성이 있으며, 우달리안치 화산의 경우 연약권에 상승류에 의해 생성된 것으로 판단된다.

주요어: S파, 상대주시, 다중채널 상호상관법, 토모그래피, 백두산

Abstract: The Northeast China is an important site geologically and geophysically because of a huge volcano called Mt. Baekdu, which is one of the largest volcanoes in the world. Signs of eruption have been recently observed and people are keen to its behavior. We carried out relative travel time tomography to investigate the velocity structure between 100 ~ 600 km depth beneath Northeast China. We used teleseismic data during 2009 ~ 2011 recorded in NecessArray provided by IRIS (Incorporated Research Institute for Seismology). The relative observations were obtained by using the multi-channel cross-correlation method. Based on the tomographic results, we observed that the locations beneath which low-velocity zones are observed coincide with the locations of several volcanic regions in Northeast China. A low-velocity anomaly is revealed beneath Mt. Baekdu down to 600 km depth, which is thought to be the main origin of the magma supply for Mt. Baekdu. Another low velocity anomaly is observed beneath east of the Datong volcano down to around 300 km depth, which is inferred to be related to an upwelling from deep mantle. We observed a low velocity anomaly beneath the Wudalianchi volcano down to around 200 km depth, which may imply that this volcano has been formed by an upwelling from the asthenosphere.

Keywords: S-wave, relative travel time, multi-channel cross-correlation, tomography, Mt. Baekdu

서론

중국 만주 지역은 지질학적, 지구물리학적으로 굉장히 관심이 높은 지역이며, 활발한 연구가 진행되고 있다. 중국 북동부 지역에는 세계적인 관심을 끌고 있는 화산인 백두산과 북서쪽의 우달리안치 화산과 같이 여러 화산지대가 위치한다. 백두산의 경우 BC 1120, AD 1050, 1413, 1597, 1668, 1702년에 화산이 분출했었고(Simkin and Siebert, 1994), 2000년대 초반 백두산 부근에서 지진이 급증하면서 분화 가능성이 제기

Received: 20 December 2017; Revised: 26 February 2018;

Accepted: 27 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, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

되기도 하였다. 우달리안치 화산의 경우 AD 1719 ~ 1721년 경에 분출했던 기록이 남아 있다(Liu, 2001). 판의 경계가 아닌 만주 지역에 화산이 존재한다는 자체가 여러 학자에게 관심을 불러일으켰으며, 동아시아 지역의 연구가 활발하게 진행되면서 만주지역 하부에는 일본에서 섭입된 태평양 판이 맨틀 전이대를 따라 중국 북동부까지 이어진다는 것이 확인되었다(Fukao *et al.*, 2001; Li and van der Hilst, 2010). 중국 북동부 지역의 화산 활동에 대한 메커니즘에 대해서는 여러 연구가 제안되어 있지만, 일본 해구에서 섭입된 태평양판이 맨틀 전이대에 정체되어 있으며 이 정체된 태평양판에서 탈수작용(dehydration)에 의해 마그마가 공급된다는 이론이 지배적이다(Zhao *et al.*, 2004, 2007, 2009; Lei and Zhao 2005; Duan *et al.*, 2009; Richard and Iwamori, 2010; Kuritani *et al.*, 2011; Lei *et al.*, 2013; Zhao and Tian, 2013; Simute *et al.*, 2016; Tian *et al.*, 2016). Tang *et al.* (2014)는 탈수작용(dehydration)에 의한 메커니즘이 아니라 태평양판이 섭입되어 맨틀 전이대에서 정체된 상태에서 섭입판 사이에 있는 틈을 통한 감압 용융(decompression melting)에 의해 마그마가 백두산에 공급된다고 설명하기도 한다. 아직까지 백두산의 생성 원인에 대해서 정확하게 밝혀진 것이 없으며 후속 연구가 진행되고 있는 실정이다. 우리는 S파 상대주시 계산을 보다 정확히 계산하기 위하여 다중채널 상호상관법(multi-channel cross-correlation)을 적용 하였다(Vandecar and Crosson, 1990). 본 연구를 통해 중국 북동부 지역에 화산의 생성원인과 마그마 공급 메커니즘을 밝히고자 하였으며 기존 연구보다 좁은 범위의 연구 지역을 설정하여 보다 정확한 지하 속도 구조 모델을 얻고자 하였다.

자료 획득과 자료 처리

이 연구에서 중국에 2009년부터 2011년까지 설치되어 있었던 NecessArray라 불리는 임시 지진관측망을 사용 하였다(Fig. 1). 본 연구에서는 중국 북동부 지역의 S파 맨틀 속도 구조를 얻기 위해서 진앙 거리 30° 이상 90° 이하의 원거리 지진을 사용하여 S파 상대주시 토모그래피를 수행하였다. 진앙거리 30° 이하의 지진의 경우 파선들의 대부분이 복잡한 상부맨틀을 지나기 때문에 자료로 사용하기에 부적합하며, 진앙거리 90° 이상의 지진의 경우 파선이 외핵을 통과하기 때문에 S파 추출이 불가능하다. 계기보정 등을 포함한 전처리 과정을 거친 후 S파 파형을 부각시키기 위해서 본 연구에서는 0.04 ~ 0.01 Hz 대역의 버터워스 주파수 대역 필터(Butterworth bandpass filter)를 사용 하였다.

다중채널 상호상관법(Multi-Channel Cross-Correlation Method)

다중채널 상호상관법은 동일한 지진에서 발생한 지진파가 여러 관측소에 도달했을 때 각 관측소에 기록된 동일한 지진의 파형의 상호상관을 통해서 원거리 지진에 대한 각 관측소의 상대 주시를 결정하는 반자동 방법이다(Vandecar and Crosson, 1990). 절대주시 측정은 각 사람의 주관에 따라 좌우되는 문제점을 가지고 있는 것에 반해 상대주시 측정의 경우 각 관측소의 평균주시를 기준으로 정해지고, 상호 상관을 통해 계산되기 때문에 절대 주시를 사용할 때 보다 훨씬 더 정밀하고 객관적인 측정이 가능하다. 다중채널 상호상관법은 파형의 유사성을 이용하여 상호상관을 통해 상관함수의 값이 최대가 되는 시간을 찾는다. 이것을 지연시간(lag time)이라고 하며 다

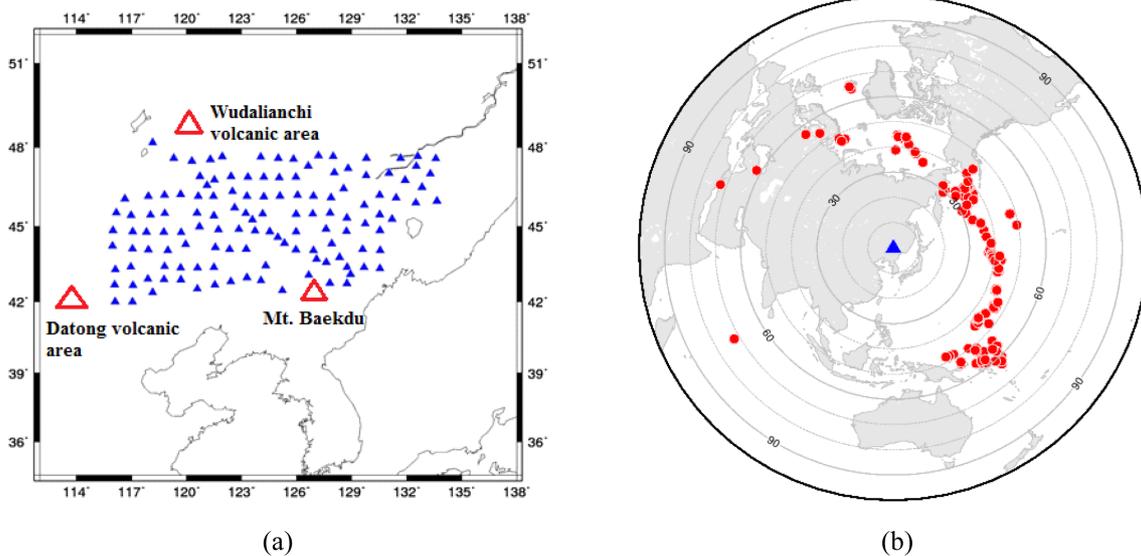


Fig. 1. Map of the study area. (a) The blue triangles indicate the distribution of temporary broadband seismic stations installed in Northeast China. The red triangles show the geographic locations of volcanic areas in Northeast China. (b) Distribution of teleseismic events for this study.

음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$t_i - t_j = d_{ij} \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 t_i 는 i 번째 관측소의 시계열 함수를 나타내며 t_j 는 j 번째 관측소의 시계열 함수를 나타낸다. d_{ij} 는 두 측정값의 시간 차이를 나타내며, 상호상관 함수가 제일 큰 경우의 지연시간을 의미한다. 동일한 지진도 관측소마다 파형이 다르게 나타날 수 있다. 이것은 지진은 비상관적인 잡음을 가지고 있고, 관측소의 상태도 일정하지 않기 때문이다. 그렇기 때문에 상호상관을 통하여 구해진 지연시간이 정확하다고 말하기 어렵다. 그래서 지연시간으로부터 가장 정확한 상대주시를 구하기 위해 본 연구에서는 최소 자승법(least squares method)을 이용하였다. 그리고 식 (1)에서 관측소의 개수가 n 개라면 식 (1)은 다음과 같은 조건을 갖게 된다.

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

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

식 (3)은 t_i 의 합을 0으로 제한하여 각각의 관측소가 평균주시를 기준으로 상대적인 값을 가지게 한다. 또한 위의 식들을 행렬식으로 표현하게 되면

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

위의 식으로 나타낸다. 여기서 \mathbf{A} 는 $[n(n-1)/2 + 1] \times n$ 형태를 가지는 계수 행렬(coefficient matrix)을 나타내며 \mathbf{t} 는 식 (4)에서 해 벡터(solution vector)로써 각각의 관측소에서의 최종적인 상대주시를 나타내고 $n \times 1$ 크기를 가진다. $\mathbf{d}\mathbf{t}$ 는 각 관측소 쌍에서 관측된 상대주시에서 기준모델로부터 예측된 상대주시를 뺀 데이터 벡터(data vector)를 의미하며 $[n(n-1)/2 + 1] \times 1$ 의 크기를 가진다. 식 (3)을 통해서 $\mathbf{A}'\mathbf{A}$ 의 값을 nI 로 만들고 식 (4)를 \mathbf{t} 에 대해서 정리할 수 있다.

$$\mathbf{t} = (\mathbf{A}'\mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}'\mathbf{d}\mathbf{t} \quad (5)$$

식 (5)를 정리 하게 되면

$$\mathbf{t} = (1/n)\mathbf{A}'\mathbf{d}\mathbf{t} \quad (6)$$

식 (6)과 같이 정리 될 수 있다. 위에 나타난 과정에 가중치를 반영하는 대각행렬(diagonal weighting matrix), \mathbf{W} 를 적용할 수 있지만 가중치에 의한 효과가 최종 결과에 영향을 거의 끼치지 않기 때문에 본 연구에서는 사용하지 않았다.

반복 상호상관 중합(Iterative Cross-Correlation Stack)

다중채널 상호상관법을 통하여 상대주시를 계산하는 데에 있어서 제기된 문제점은 주기 놓침(cycle skipping)의 위험성이 있다. 이러한 위험성을 줄이기 위해 반복 상호상관 중합 알고리

즘(Lou *et al.*, 2013)이 제시되었다. 반복 상호상관 중합 알고리즘은 지진 파형의 대략적인 도달시간을 기준으로 관측소의 모든 신호를 중합한다. 그 후에 각 관측소의 신호를 각각 상호상관하게 되는데 이때 상관 함수의 값이 최대가 되는 지연시간을 계산하게 되고, 이를 대략적인 도달시간에 보정해 줌으로써 주기 놓침을 피할 수 있다. 그 후에 이 자료들에게 다중채널 상호상관법을 적용하여 최종적인 도달 시간을 계산하게 된다. 위의 방법을 통해 총 147개의 지진 자료에서 최종적으로 11,658개의 S파 상대 주시를 계산하였으며 다중채널 상호상관 편차(variance)의 평균값은 0.18이며 상관계수(coefficient)의 평균값은 0.96 이다.

역산

본 연구에서 역산은 IASP91 모델(Kennett and Engdahl, 1991)을 기준모델로 사용하였다. 파선 이론에 기초한 파선 추적법을 통해 파선의 경로를 제공하였다. 이후 토모그래피에서 사용되는 모델 격자의 셀이 주시에 끼치는 영향을 나타내는 민감도 행렬(sensitivity kernel), \mathbf{G} 를 계산하였다. 앞서 언급한 바와 같이 다중채널 상호상관법을 통해 획득된 상대주시에서 기준모델을 통해 예측된 상대주시를 빼주고, 각 파선의 경로에 대한 상대주시 잔차(residual)을 계산하여 데이터 벡터(data vector), \mathbf{d} 를 구성하였다. 또한 위에서 계산한 \mathbf{G} 와 \mathbf{d} 를 통해 각 격자에서의 느림도(slowness)에 해당하는 모델 벡터(model vector), \mathbf{m} 를 계산하였으며 이때 최소자승법을 사용하였다. 역산을 수행할 시에 $|\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d}|^2$ 의 값이 충분히 수렴할 때까지 역산을 수행하였다. 모델의 각 셀의 수평적인 거리는 50 km이며, 수직적으로는 깊어질수록 층의 두께가 5 km에서 200 km로 두꺼워지는 식으로 하여 1400 km 깊이까지 설정하였다. 본 연구에서 사용된 역산 문제는 모든 기준망점이 파선경로에 의해 추출되지 않기 때문에 역산 결과가 비슷한 오차를 나타낼 수 있다는 것이다. 따라서 이러한 역산문제를 안정화 시키기위해 알맞은 제동값(damping), 수평평활화(flattening), 수직평활화(vertical flattening) 행렬을 적용하였으며 각각의 값들은 0.1, 1.0, 1.0으로 적용하였다.

해상도 테스트

최종적인 토모그래피 결과가 어느 정도의 신뢰도를 가지는지에 대해 평가할 필요가 있다. 그래서 본 연구에서는 수평, 수직 격자 테스트를 통하여 최종적인 토모그래피 결과에 해상도를 평가하였다. 수평, 수직 격자 테스트는 격자 기준 모델을 통과하는 파선에 대한 합성 데이터 벡터를 얻은 후에 실제 역산 과정과 동일한 역산 과정을 통하여 수행했다. 수평, 수직 격자 기준 모델은 격자의 배열이 수평인지 수직인지에 따라 나뉘게 되며 두 가지 기준 모델 모두 격자 크기는 400×400 km로 동일하고 ± 300 m/s의 속도이상을 가진다. Fig. 2의 (a)는 수

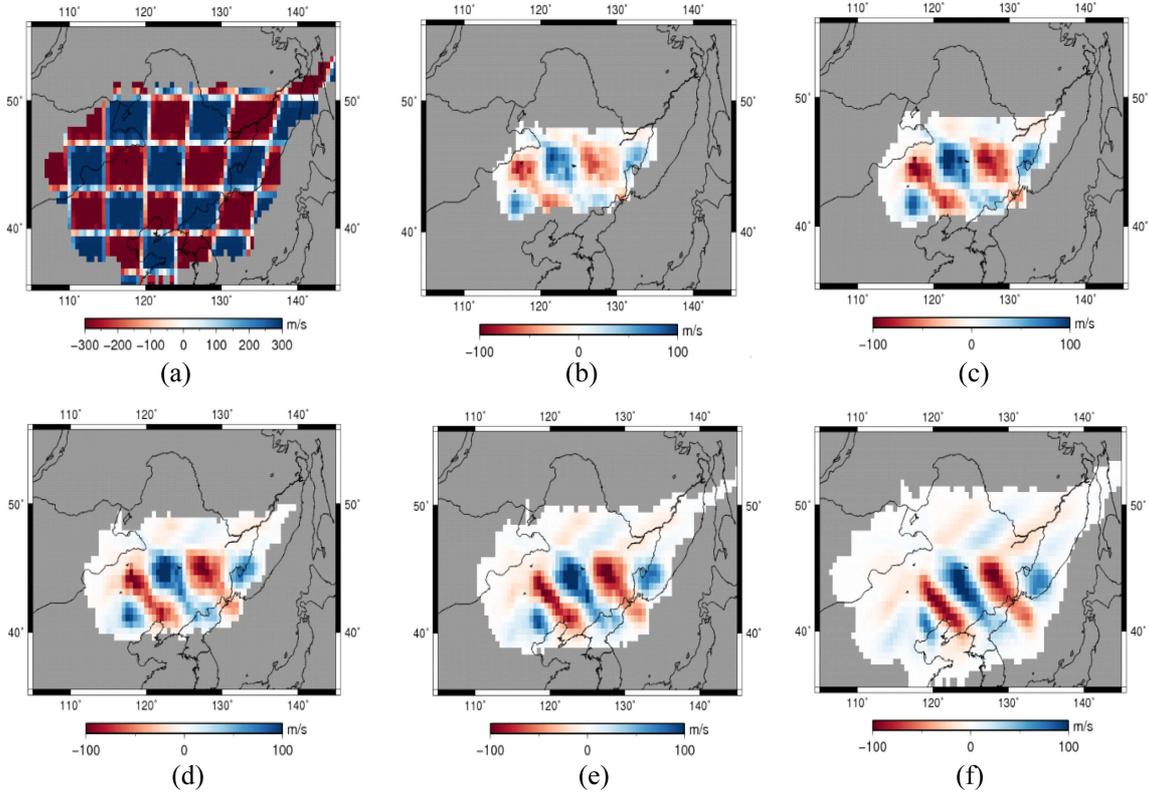


Fig. 2. Checkerboard resolution tests at depths of 100, 200, 300, 400, and 500 km. The checkerboards consist of 400 km size squares with anomalies of ± 300 m/s as shown in (a). Retrieved models for anomalies of $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ are shown at (b) 100, (c) 200, (d) 300, (e) 400, and (f) 500 km, respectively. We marked part without ray in gray color.

평 격자 테스트 모델을 나타내며 Fig. 2의 (b), (c), (d), (e), (f)는 수평 격자 테스트 모델에 대한 테스트 결과를 깊이 별로 나타낸 것이다. Fig. 3의 (a)는 수직 격자 테스트를 수행한 지역을 나타내며 수직 단면을 자른 부분이 어디인지 보여준다.

Fig. 3의 (b)는 수직 격자 테스트에 사용한 모델을 나타내며 (c)는 수평 격자 테스트에 사용한 모델을 나타낸다. Fig. 3의 (d), (e), (f)는 A-A', B-B', C-C' 단면에 대한 수직 격자 테스트 결과를 나타낸다. 수평 격자 테스트의 경우 깊이 100 ~ 300

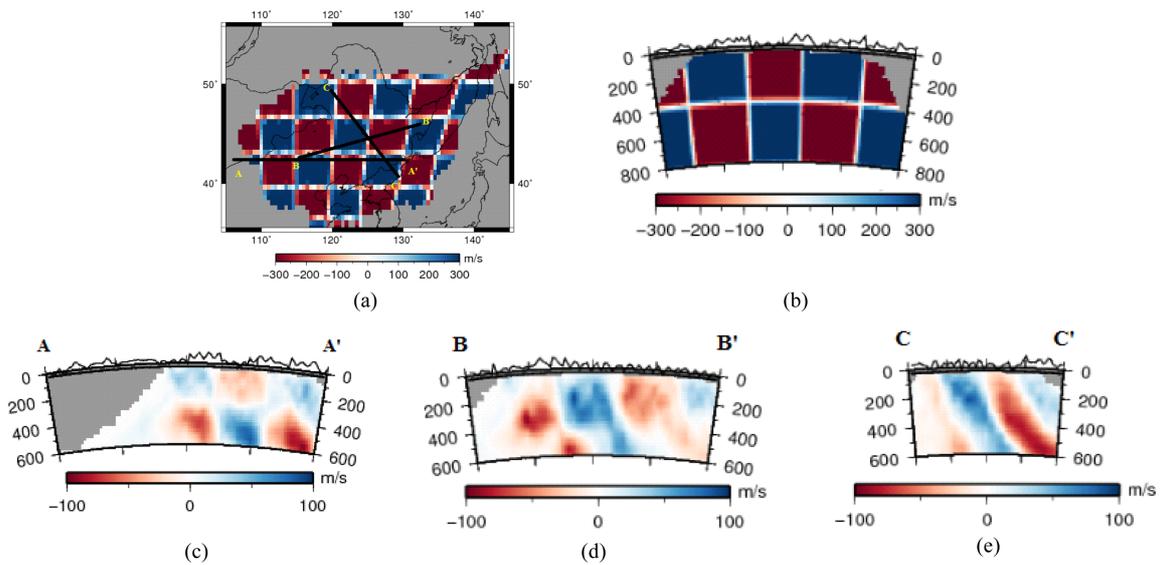


Fig. 3. The checkerboards consist of 400 km size squares with amplitudes of ± 300 m/s as shown in (a) and (b). Retrieved models for anomalies of $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ are shown for sections (c) A-A', (d) B-B', and (e) C-C' respectively. We marked the regions poorly covered by rays in gray color.

km에서는 남동쪽으로의 신장이 어느 정도 발생하긴 하지만 격자를 유지하면서 탁월한 해상도를 가지고 있는 것을 보여준다. 그러나 400 ~ 500 km 깊이에서는 남동쪽으로 신장되는 모습이 더 강하게 나타나서 격자의 복원이 제대로 되지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 속도 구조의 극성은 올바르게 복원함을 알 수 있다. 격자 테스트 상에서 격자가 일정 방향으로 신장되는 모습은 사용된 지진의 위치와 관련이 있다. 본 연구에서 사용된 지진은 모멘트 규모 6.0 이상 진앙거리 30° 이상 90° 이하인 지진을 사용하였기 때문에 이러한 지진들은 거의 대부분 판의 경계에서 일어나게 된다. 상대적으로 다른 방향의 지진보다 남동쪽의 판의 경계부, 즉 파푸아 뉴기니 부근에서 발생한 지진을 많이 사용하게 되었다. 해상도가 좋기 위해서는 연구지역을 중심으로 다양한 방향에서의 파선 입사가 이루어져야 하지만 본 연구에서는 남동쪽 방향의 지진이 많은 양을 차지하여 격자 테스트 결과에서 격자가 남동쪽으로 신장되는 모습을 보였다. 수직 격자 테스트에서도 A-A', B-B'의 결과에서는 격자들의 형태가 잘 복원되는 좋은 해상도를 가지지만 C-C'의 결과에서는 격자가 잘 복원되지 못하고 신장되는 현상이 발견된다. C-C'의 수직 단면의 방향이 지진이 몰려있는 높은 남동쪽 방향으로 일치하기 때문에 발생한 것으로 보인다.

결과 및 토의

Fig. 4는 본 연구의 최종 토모그래피 결과를 깊이 별로 보여준다. 역산을 수행하여 관측값과 예측값의 차이인 잔차의 값이 초기모델에서 계산된 것과 비교하여 66% 감소하는 것을 확인하였다. 지하 100 ~ 500 km까지 관찰되는 저속도 이상과 고속도 이상은 깊어질수록 속도 이상의 크기는 약해지고, 범위는 넓어지는 모습을 볼 수 있다. 이런 현상은 해상도 테스트를 고려해 볼 때 깊이가 깊어질수록 해상도가 떨어지는 것에 기인한 것으로 생각된다. 중국 북동부 지역에 위치하는 화산지대의 위치와 토모그래피 결과에서 나타나는 저속도 이상의 위치가 상당 부분 일치하는 것을 볼 수 있다. 중국 북동부에 위치하는 큰 화산지대인 북쪽의 우달리안치 화산지대, 서쪽의 다통 화산지대 부근, 그리고 남동쪽에 위치하는 백두산 지역 하부에 저속도 이상이 분포한다. Fig. 4를 보면 지하 100 ~ 200 km에서 연구지역의 남서쪽에 강한 저속도 이상이 분포하는 것을 확인할 수 있으며 이 저속도 이상은 지하 300 km 부근에서 크게 속도 이상이 약화된다. 이것은 저속도 이상체가 300 km 깊이 부근까지 연장되어 있다고 생각할 수 있다. 이는 다통 화산지대 부근과 관련이 있는 것으로 생각된다. Fig. 5의 A-A' 단면

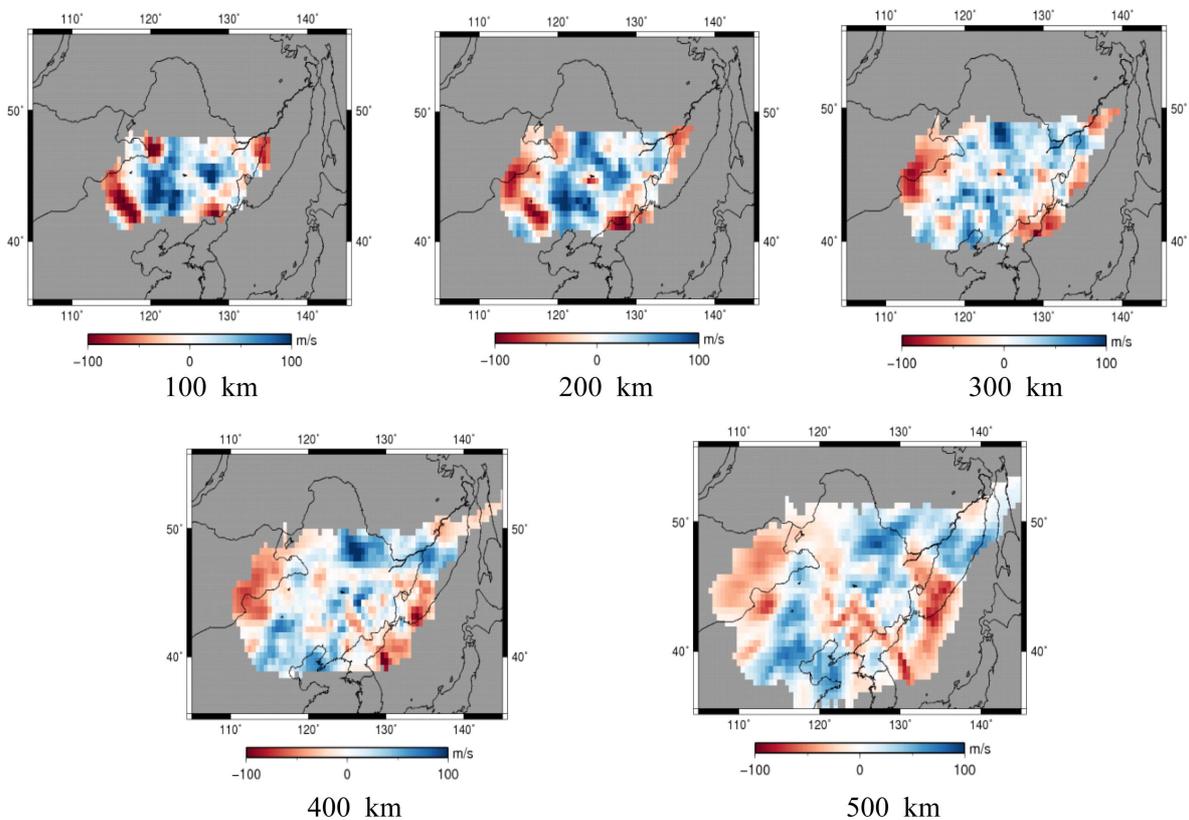


Fig. 4. Depth slices of S-wave velocity perturbations obtained by inverting S-wave relative travel times using IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991) as a reference model. Blue and red colors indicate high- and low-velocity perturbations, respectively. The locations of the volcanic areas in Northeast China are consistent with the positions above the low-velocity zone. We marked the regions poorly covered by rays in gray color.

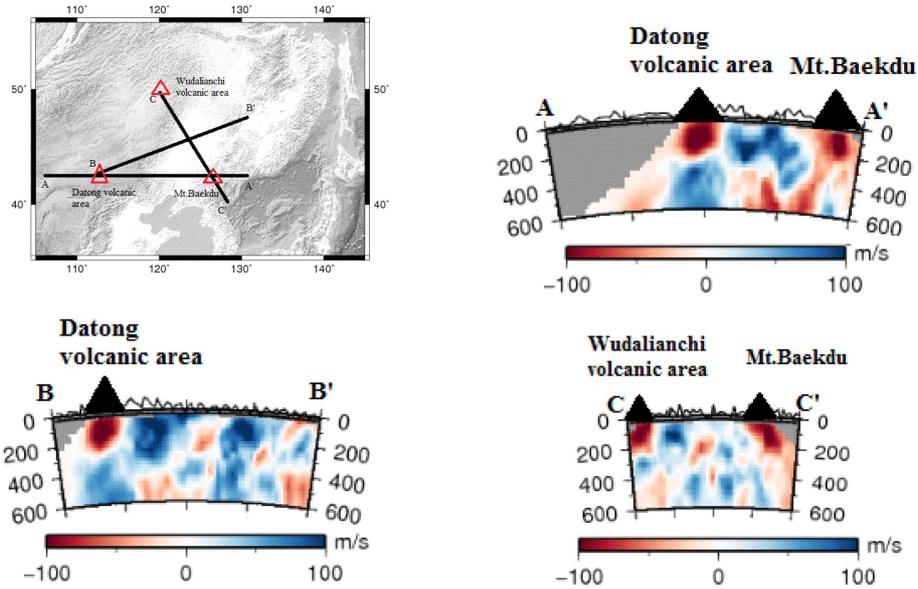


Fig. 5. Vertical cross sections of S-wave velocity perturbations from 0 to 600 km depth and the locations of the cross lines and volcanoes in Northeast China. The section A-A' shows the relationship between Mt. Baekdu and the Datong volcano in the west, and the section B-B' shows that a low-velocity anomaly is distributed to about 300 km depth beneath east of the Datong volcano. In the section C-C', low-velocity anomalies are observed beneath Mt. Baekdu and the Wudalianchi volcanic region. We marked the regions poorly covered by rays in gray color.

도를 보면 백두산 하부에 뚜렷한 저속도 이상이 확인되며 다른 만주지역에 존재하는 화산지대와는 달리 지하 600 km 부근까지 연결되어 있는 것으로 판단된다. 맨틀 전이대에서의 상승작용이 백두산 화산의 마그마 공급에 영향을 주고 있다고 판단할 수 있다. 해상도 테스트의 결과를 생각해보면 본 연구의 결과로 백두산의 마그마 공급 메커니즘에 대해 설명하기에는 무리가 있으나 맨틀 전이대까지 저속도 이상이 존재하는 것으로 볼 때 중국 북동부 지역에 존재하는 다른 화산들에 비해 다른 생성요인이 있음을 추론 할 수 있었다. 다통 화산지대 동쪽부근의 경우 백두산의 마그마 근원과 이어져 있는 것처럼 볼 수 있으나 해상도의 제약으로 인해 단정 지을 수는 없다. 오히려 Lei *et al.* (2012)는 다통 화산지대의 근원은 맨틀에 정체되어 있는 태평양판의 작용보다는 보다 깊은 맨틀에서의 마그마 상승작용이 더 큰 영향을 끼친 것으로 보인다고 설명했다. 이번 연구에서도 다통 화산지대의 하부 600 km 부근에서 약한 저속도 이상이 확인되었고 이것이 얇은 깊이의 강한 저속도 이상과 연결되어 있는 것으로 추측될 수 있다(Fig. 5의 A-A' 단면도). 또한 다통 화산지대는 일본 해구에서 약 2400 km 떨어져 있기 때문에 낮은 저속도 이상체의 근원이 태평양판의 탈수작용(dehydration)에 영향을 받는다고 말하기 어려우며 선행 연구에서도 같은 결과를 보인다(Huang and Zhao 2006; Chen *et al.*, 2017; Li and van der Hilst, 2010). 이것은 다통 화산지대 동쪽부근이 깊은 맨틀에서 상승하는 마그마에 의해 생성되었을 수도 있다고 판단할 수 있는 근거가 된다. Fig. 5의 C-C' 단면도에서 다시 한번 백두산 하부에 저속도 이상이 존재하는 것을 볼 수 있으며 북쪽에 우달리안치 화산지

대에도 저속도 이상이 분포하는 것을 확인할 수 있다. 우달리안치 화산지대의 경우 저속도 이상체가 200 km 깊이에까지만 연장되어 있는 것으로 판단해 볼 때 연약권에서의 상승류에 의해 생성되었다고 생각된다. Zhao and Liu. (2010)는 우달리안치 화산지대의 경우 맨틀 췌기(mantle wedge)에서 상승하는 마그마에 의해 생성되었다고 설명하였다. 우달리안치 화산지대의 경우 관측소가 매우 적고, 지역적인 고해상도 속도모델이 존재하지 않는다(Duan *et al.*, 2009). 하지만 우리는 우달리안치 화산에 대한 속도 구조를 얻을 수 있었다. 우달리안치 화산지대의 경우 백두산의 마그마 공급 메커니즘과는 관련이 없는 것으로 보이며, 연약권 부근의 상승류로 인해 마그마 공급이 이루어지고 있다고 판단된다.

결론

본 연구에서는 중국 만주지역에 지하의 속도구조를 알아내기 위해 NecessArray에 기록된 자료들을 이용하였다. 다중채널 상호상관법을 통해서 획득된 S파 상대주시를 이용하였으며 역산을 통하여 중국 북동부 지역의 맨틀 속도구조 모델을 계산하였다. 해상도 테스트를 통하여 토모그래피 결과에 대한 해상도를 평가했다. 토모그래피 결과에서 중국 북동부 지역에 위치한 화산지대와 일치하는 지역 하부에 저속도 이상이 나타났다. 백두산 하부의 지하 600 km 부근까지 저속도 이상이 존재하는 것을 확인했다. 해상도 테스트의 결과를 생각해보면 본 연구의 결과로 백두산의 마그마 공급 메커니즘에 대한 명확한 설명을 하기에는 부족함이 있으나 맨틀 전이대까지 저속도 이

상이 존재하는 것으로 볼 때 만주에 존재하는 다른 화산들에 비해 다른 생성 요인이 있음을 추론할 수 있었다. 다통 화산시대 부근의 경우 백두산의 마그마 근원과 이어져 있는 것으로 볼 수 있지만 해상도의 제약으로 인해 단정 지을 수 없으며, 오히려 그 서쪽의 깊은 맨틀에 존재하는, 약하지만 넓은 범위의 저속도 이상과 연결되어 있는 것으로 추측된다. 이것은 이전의 연구를 통해 다통 화산시대는 깊은 맨틀에서 상승하는 마그마에 의해 생성되었다는 설명에 근거가 될 수 있다. 우달리안치 화산시대의 경우 저속도 이상이 200 km 깊이에까지만 연결되어 있는 것으로 볼 때 연약권에서 기원한 마그마에 의해 형성되었다고 생각된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(KMIPA2015-7030)의 지원으로 수행되었고, 또한 행정안전부장관의 지진방재분야 전문인력 양성사업으로 지원되었음. 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-520160481).

References

- Chen, C., Zhao, D., and Tian, Y., 2017, Mantle transition zone, stagnant slab and intraplate volcanism in Northeast Asia, *Geophys. J. Int.*, **209**, 65-85.
- Duan, Y., Zhao, D., Zhang, X., Xia, S., Liu, Z., Wang, F., and Li, L., 2009, Seismic structure and origin of active intraplate volcanoes in Northeast Asia, *Tectonophysics*, **470**, 257-266.
- Fukao, Y., S. Widiyantoro, and M. Obayashi, 2001, Stagnant slabs in the upper and lower mantle transition region, *Rev. Geophys.*, **39**, 291-323.
- Huang, J., and Zhao, D., 2006, High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions, *J. Geophys. Res.*, **111**, B09305, doi:10.1029/2005JB004066.
- Kennett, B. L. N., and Engdahl, E. R., 1991, Travel times for global earthquake location and phase association, *Geophys. J. Int.*, **105**, 429-465.
- Kuritani, T., Ohtani, E., and Kimura, J., 2011, Intensive hydration of the mantle transition zone beneath China caused by ancient slab stagnation, *Nature Geoscience*, **4**, 713-716.
- Lei, J., and Zhao, D., 2005, P-wave tomography and origin of the Changbai intraplate volcano in Northeast Asia, *Tectonophysics*, **397**, 281-295.
- Lei, J., Xie, F., Mishra, O.P., Lu, Y., Zhang, G., and Li, Y., 2012, The 2011 Yingjiang, China, Earthquake: a volcano-related fluid-driven earthquake?, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **102**, 417-425.
- Lei, J., Xie, F., Fan, Q., and Santosh, M., 2013, Seismic imaging of the deep structure under the Chinese volcanoes: and overview, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **224**, 104-123.
- Li, C., and R. D. van der Hilst., 2010, Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltimes tomography, *J. Geophys. Res.*, **115**, B07308, doi:10.1029/2009JB006882.
- Liu, J., Han, J., and Fyfe, W., 2001, Cenozoic episodic volcanism and continental rifting in northeast China and possible link to Japan Sea development as revealed from K-Ar geochronology, *Tectonophysics*, **339**, 385-401.
- Lou, X., van der Lee, S., and Lloyd, S., 2013, AIMBAT: a Python/Matplotlib tool for measuring teleseismic arrival times, *Seismol. Res. Lett.*, **84**, 85-93.
- Richard, G., and Iwamori, H., 2010, Stagnant slab, wet plumes and Cenozoic volcanism in East Asia, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **183**, 280-287.
- Simkin, T., and Sibert, L., 1994, *Volcanoes of the World, 2nd Ed.*, Geoscience Press, 1-368.
- Simnuté, S., Steptoe, H., Cobden, L., Gokhberg, A., and Fichtner, A., 2016, Full-waveform inversion of the Japanese Islands region, *J. Geophys. Res.*, **121**, doi:10.1002/2016JB012802.
- Tang, Y., and Obayashi, M., 2014, Changbaishan volcanism in northeast China linked to subduction-induced mantle, *Nature Geoscience*, **6**, 470-475.
- Tian, Y., Zhu, H., Zhao, D., Liu, C., Feng, X., Liu, T., and Ma, J., 2016, Mantle transition zone structure beneath the Changbai volcano: insight into deep slab dehydration and hot upwelling near the 410 km discontinuity, *J. Geophys. Res.*, **121**, 5794-5808.
- VanDecar, J. C., and Crosson, R. S., 1990, Determination of teleseismic relative phase arrival times using multi-channel cross-correlation and least-squares, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **80**, 150-169.
- Zhao, D., Lei, J., and Tang, R., 2004, Origin of the Changbai intraplate volcanism in Northeast China: evidence from seismic tomography, *Chinese Science Bulletin*, **49**, 1401-1409.
- Zhao, D., Maruyama, S., and Omori, S., 2007, Mantle dynamics of western Pacific to East Asia: new insight from seismic tomography and mineral physics, *Gondwana Research*, **11**, 120-131.
- Zhao, D., Tian, Y., Lei, L., and Zheng, S., 2009, Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia: role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **173**, 197-206.
- Zhao, D., and Liu, L., 2010, Deep structure and origin of active volcanoes in China, *Geoscience Frontiers*, **1**, 31-44.
- Zhao, D., and Tian, You., 2013, Changbai intraplate volcanism and deep earthquakes in East Asia: a possible link?, *Geophys. J. Int.*, **195**, 706-724.