

## 표면파 토모그래피를 이용한 사우디아라비아의 S파 속도구조 및 이방성 연구

김린희<sup>1</sup> · 장성준<sup>1\*</sup> · Martin Mai<sup>2</sup> · Hani Zahran<sup>3</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질·지구물리학과

<sup>2</sup>King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Thuwal, Saudi Arabia

<sup>3</sup>Saudi Geological Survey (SGS), Jeddah, Saudi Arabia

### S-wave Velocity Structure and Radial Anisotropy of Saudi Arabia from Surface Wave Tomography

Rinhui Kim<sup>1</sup>, Sung-Joon Chang<sup>1\*</sup>, Martin Mai<sup>2</sup>, and Hani Zahran<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

<sup>2</sup>King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Thuwal, Saudi Arabia

<sup>3</sup>Saudi Geological Survey (SGS), Jeddah, Saudi Arabia

**요약:** 이 연구에서는 사우디 아라비아 지역의 S파 속도구조와 이방성을 알아보기 위해 표면파 분산 곡선을 사용하여 3차원 토모그래피를 수행하였다. 아라비아 반도는 지질학적 및 지형적으로 순상지(shield)와 플랫폼(platform)의 지형으로 나뉜다. 본 연구에서는 사우디 지질조사소(Saudi Geological Survey)에서 받은 2008 ~ 2014년 기간의 규모 5.5 이상, 진앙거리 40° 이내인 지진 자료들을 사용하였다. 획득한 자료들은 전처리를 거쳐 다중 필터 기법(multiple filter technique)을 적용하여 분산 곡선을 구하였다. 주기 5 ~ 140초에 해당하는 러브파와 레일리파의 군속도 분산 곡선을 역산하여 10 ~ 60 km에서의 SH파와 SV파 속도모델 그리고 이방성을 계산하였다. 그 결과 SV파의 속도모델에서는 순상지 하부 10 ~ 30 km 깊이에서 고속도 이상대를 보이며, 플랫폼 하부에서는 10 km 깊이에서 저속도 이상대를 보인다. 이는 순상지가 원생누대 기원의 오래되고 차가운 육괴로 되어있으며, 플랫폼이 고생대, 중생대, 신생대의 퇴적물로 덮여 있기 때문에 이와 같은 결과가 나왔다고 판단된다. SV파와 SH파의 속도 차이를 이용하여 구한 이방성의 결과는 전반적으로 양의 이방성이 나타나며, 이는 자그로스 조산대에서의 섭입으로 인한 아라비아 판의 당김에 의해 인장력이 수평 방향으로 발생하여 SH파의 속도가 빠르게 나타난다고 판단된다.

**주요어:** 표면파, 분산 곡선, 아라비아, 토모그래피, 이방성

**Abstract:** We perform a 3D tomographic inversion using surface wave dispersion curves to obtain S-velocity model and radial anisotropy beneath Saudi Arabia. The Arabian Peninsula is geologically and topographically divided into a shield and a platform. We used event data with magnitudes larger than 5.5 and epicentral distances shorter than 40° during 2008 ~ 2014 from the Saudi Geological Survey. We obtained dispersion curves by using the multiple filtering technique after preprocessing the event data. We constructed SH- and SV-velocity models and consequently radial anisotropy model at 10 ~ 60 km depths by inverting Love and Rayleigh group velocity dispersion curves with period ranges of 5 ~ 140 s, respectively. We observe high-velocity anomalies beneath the Arabian shield at 10 ~ 30 km depths and low-velocity anomalies beneath the Arabian platform at 10 km depth in the SV-velocity model. This discrepancy may be caused by the difference between the Arabian shield and the Arabian platform, that is, the Arabian shield was formed in Proterozoic thereby old and cold, while the Arabian platform is covered by predominant Paleozoic, Mesozoic, and Cenozoic sedimentary layers. Also we obtained radial anisotropy by estimating the differences between SH- and SV-velocity models.

Positive anisotropy is observed, which may be generated by lateral tension due to the slab pull of subducting slabs along the Zagros belt.

**Keywords:** surface wave, dispersion curve, Arabia, tomography, anisotropy

## 서론

아라비아 판은 약 3천만 년 전 홍해와 아덴만의 생성으로 인해 아프리카 판으로부터 분리되었다(e.g., Camp and Roobol,

Received: 11 January 2019; Revised: 26 February 2019;

Accepted: 27 February 2019

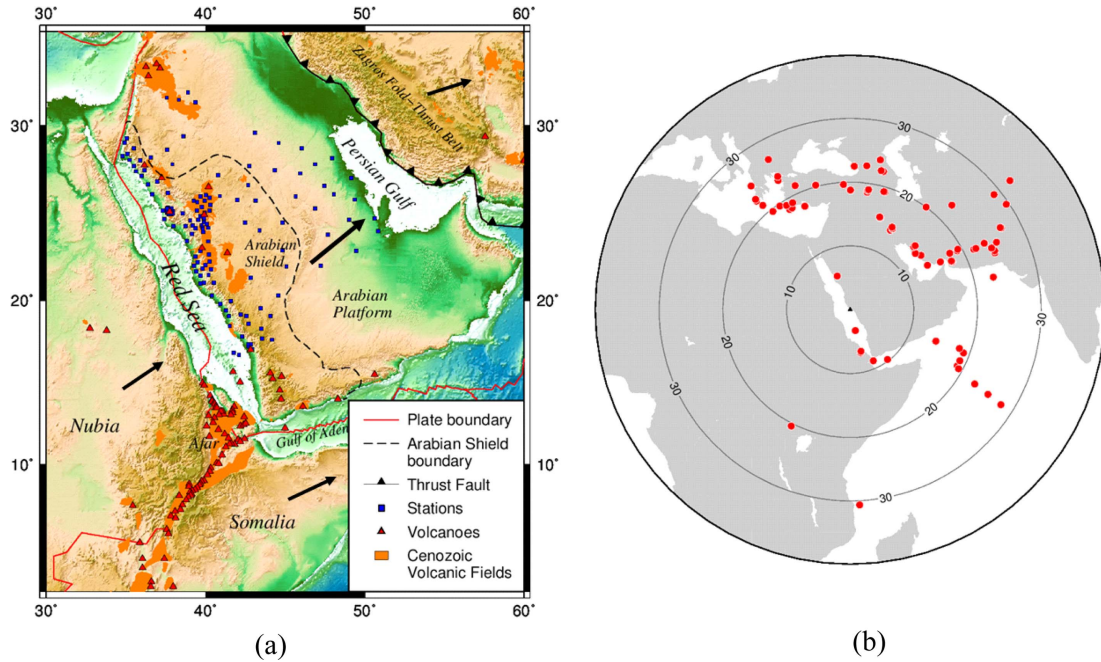
\*Corresponding author

E-mail: sjchang@kangwon.ac.kr

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

©2018, 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.



**Fig. 1.** (a) Map of the study area. The red lines indicate plate boundaries and the dashed line represents the boundary between the Arabian shield and the Arabian platform. The black arrows indicate the direction of absolute plate motions (ArRajehi *et al.*, 2010). Stations, volcanoes and volcanic field are indicated by blue squares, red triangles and orange areas, respectively. (b) Distribution of events. The blue triangle is the center point of our model and red circles indicate events.

1992; Bosworth *et al.*, 2005; Garfunkel and Beyth, 2006). 아라비아 판은 선캄브리아 기저암으로 이루어졌으며, 현생대 퇴적작용의 덮개(cover)와 신생대 범람 현무암(flood basalt)으로 구성되어 있다. 아라비아 반도는 지질학적 및 지형적으로 순상지와 플랫폼 두 개의 지형으로 나뉜다(Fig. 1a). 아라비아 순상지는 선캄브리아 원생누대 기저암이 노출되어있으며, 홍해 형성의 초기 단계와 관련된 광범위한 3기, 4기의 화산암은 서부 아라비아의 순상지에 우세하다(Brown, 1972; Coleman, 1977). 아라비아 플랫폼은 고생대, 중생대, 신생대 퇴적물로 덮여 있다. 이 퇴적물의 두께는 서쪽에서 동쪽으로 증가하며, 아라비아만(페르시아만)의 근처에서 8 ~ 10 km 두께에 도달한다(Brown, 1972; Stoesser and Camp, 1985). 홍해 남쪽에는 해저 확장이 관측되며, 주로 아라비아 반도의 서쪽과 Afar 지역에 화산활동이 나타난다. Chang and Van der Lee (2011)는 현저한 신생대 화산활동은 Afar와 Jordan hotspot으로부터의 맨틀 흐름으로 유래되었다고 제안한다. 다른 연구는 아라비아 판 아래에 있는 지역의 맨틀 플룸(Camp and Roobol, 1992)과 뜨거운 맨틀 용승(Koulakov *et al.*, 2016)이 신생대 용암원의 형성에 중요한 역할을 할 수 있다고 주장한다. Tang *et al.* (2018)은 Afar에서 온 소량의 플룸 물질만이 신생대 화산지역의 남쪽 끝(i.e., Harrat Rahat)에 도달했을 것으로 추측한다. 아라비아 순상지 아래에서의 국지적 암석권 맨틀 용융의 생성은 홍해 확장 중 암석권이 얇아짐과 관련된 감압 부분 용융(decompression partial melting)에 의해 발생할 수 있다. 이 경

우, 연약권의 물질과 혼합된 암석권의 용융은 서부 아라비아의 후기 신생대 화산활동의 주요 마그마 근원을 제공할 수 있다(Tang *et al.*, 2018). 자그로스 조산대(Zagros belt)는 제3기 동안 아라비아 판과 유라시아 판 사이의 네오-테티스 대양이 섭입된 후 대륙 간의 충돌의 결과이다(Stoecklin, 1968; Falcon, 1974). 습곡과 역단층이 NW-SE 방향으로 우세하며(Sephehr and Cosgrve, 2004), 오늘날 아라비아 판과 유라시아 판 사이의 수렴은 자그로스 조산대를 따라 연간 19 ~ 23 mm의 속도로 이루어지고 있다(McClusky *et al.*, 2003).

이전 연구들은 대부분 적은 수의 관측소 자료를 사용하여 그 결과의 해상도에 있어서 제약이 있었다. 따라서 지각과 아라비아 순상지 아래의 상부 맨틀 구조, 신생대 화산활동 지역, 아라비아 플랫폼 측면의 변화에 대해서는 상당한 모호성이 존재한다. Tang *et al.* (2018)에서는 사우디 지질조사소(Saudi Geological Survey)로부터 얻은 새로운 지진 자료를 바탕으로 기본모드(fundamental-mode) 레일리파 군속도 토모그래피를 수행하여 사우디아라비아 하부의 3차원 S파 속도모델을 구하여 이전 모델들보다 개선된 모델을 구하고자 하였다.

본 연구에서는 Tang *et al.* (2018)과 마찬가지로 사우디 지질조사소에서 얻은 지진 자료를 사용하였지만, S파 속도모델 뿐 아니라 레일리파와 러브파 분산 곡선을 토대로 각각 SV파와 SH파 속도모델을 구하고 이방성도 계산하여 아라비아 반도 하부에서의 맨틀의 흐름과 그에 따른 변형에 대해서도 알아보하고자 한다.

### 자료 처리와 연구방법

#### 자료획득

사우디 지질조사소에서 획득한 지진 자료 중 규모 5.5 이상, 진앙거리 40°이내인 80개의 지진 자료들(Fig. 1b)을 사용하였고, 총 관측소 개수는 142개이다. 그림과 같이 관측소와 지진 사이에서 얻은 파선의 개수는 레일리파의 경우 2820개, 러브파의 경우 1783개이다(Fig. 2).

얻은 지진 자료들은 전처리를 수행한다. 지진계의 영향을 제거하는 계기보정을 수행하였으며, 표면파의 주파수 영역만 보기 위하여 0.005 ~ 2.0 Hz의 버터워스 대역필터를 적용하였다.

#### 회전

입자의 운동 방향에 따라 레일리파는 법선(radial) 성분과 수직(vertical) 성분에 기록되며, 러브파는 접선(transverse) 성분에 기록된다. 지진계에서는 수직 성분과 수평 성분인 남-북, 동-서 성분으로 기록이 되므로 러브파의 기록을 얻기 위해서는 수평 성분을 회전시켜 법선 성분과 접선 성분으로 전환해야 한다. 법선 성분과 접선 성분은 다음과 같은 식 (1)로 구할 수 있다.

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

$X_R$ 은 법선 성분의 진폭,  $X_T$ 는 접선 성분의 진폭,  $X_{EW}$ 는 동-서 성분의 진폭,  $X_{NS}$ 는 남-북 성분의 진폭을 의미하며,  $\alpha$ 는 방위각을 의미한다.

#### 다중 필터 기법

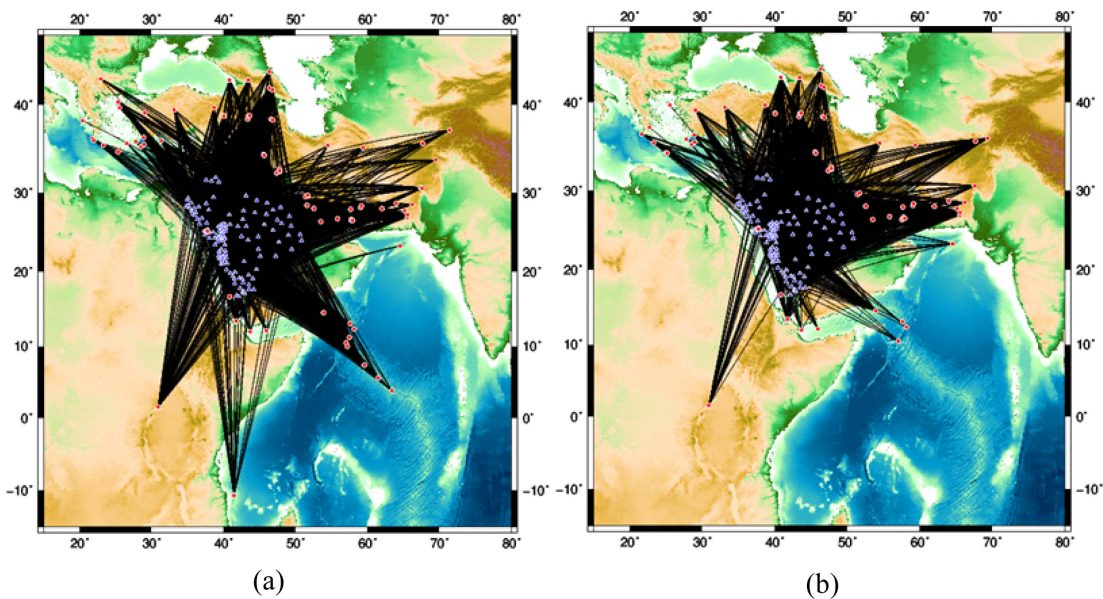


Fig. 2. Ray paths between epicenters and stations for (a) Rayleigh waves and (b) Love waves. Red circles and blue triangles indicate the locations of epicenters and stations, respectively.

전처리된 지진 신호로부터 표면파 분산 곡선을 얻기 위해 다중 필터 기법(multiple filter technique; Dziewonski *et al.*, 1969)을 적용하였다. 다중 필터 기법은 관심 있는 주파수에서의 군속도를 측정하기 위해 가우스 필터를 적용하여 속도 및 주기의 함수로 신호 진폭을 분석한다. 다중 필터 기법을 이용하여 지진 신호를 필터링하면 다음과 같은 식으로 주어진다.

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

식 (2)에서  $F(\omega)$ 는 스펙트럼 함수이며,  $e^{-\alpha\left(\frac{\omega-\omega_n}{\omega_n}\right)^2}$ 은 가우스 필터이다. 가우스 필터의 중심으로부터 군시간에 대한 주파수  $\omega_n$ 을 선택하고, 군속도는 진앙거리를 포락선을 통해 얻은 군시간으로 나누어 구한다. 필터링된 지진 신호의 포락선(envelope)은 분석한 신호의 진폭으로부터 계산된다. 포락선  $g_n(t)$ 는 다음 식 (3)으로 정의된다(Bath, 1974).

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

식 (3)에서  $\bar{h}_n(\omega_n, t)$ 은  $h_n(\omega_n, t)$ 의 힐버트 변환된 함수이며, 힐버트 변환은 푸리에 변환으로부터 계산할 수 있다. 관계식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며(Brigham, 1988), 식 (4)에서 Re는 실수 부분을 의미하며 Im는 허수 부분을 의미한다.

$$\begin{aligned} h_n(\omega_n, t) \text{ Fourier} &\rightarrow H_n(\omega) \\ \bar{h}_n(\omega_n, t) \text{ Transform} &\rightarrow Q_n(\omega) \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} \text{Re}(Q_n(\omega)) &= -\text{Im}(H_n(\omega)) \\ \text{Im}(Q_n(\omega)) &= \text{Re}(H_n(\omega)) \end{aligned} \quad (4)$$

이 연구에서는 Herrmann and Ammon (2002)의 CPS330

(Computer Programs Seismology)에 포함된 sacmft96을 사용하여 분산 곡선을 얻었다. 이 프로그램에서 주기, 필터링 상수, 표면파 종류와 같은 파라미터들에 알맞은 값들을 입력해주면, 필터링된 표면파 군속도는 주기와 군속도 좌표계에 에너지 다이어그램으로 나타난다. 에너지 다이어그램에서 최댓값을 나타내는 지점을 수동적으로 선택하여 군속도의 분산 곡선을 얻는다. Fig. 3에서는 획득한 레일리파와 러브파의 분산 곡선들을 나타내었다.

**모델 구성**

속도모델은 삼각형 형태의 격자로 구성되었으며(Baumgardner and Frederickson, 1985) 수평 간격은 50 km로 설정하였다. 중심점은 북위 20°, 동경 40°이고 이로부터 반지름 35°에 해당하는 영역을 속도모델에 포함시켰다. 수직적으로 깊이에 따라 다른 간격으로 층을 나누었으며, 한 층당 18,621개의 격자점이 필요하였고 총 17개의 층상구조로 구성하였다. 각 깊이는 0, 5, 10, 20, 35, 45, 60, 80, 100, 130, 160, 200, 240, 280, 320, 360, 600 km으로 깊이에 따라 층간 간격을 더 크게 하여 해상도가 깊이에 따라 약해지는 현상을 반영하였다. 따라서 역산에 사용된 총 격자점의 수는 335,178개이다.

**역산**

다중 필터 기법으로부터 얻은 표면파의 분산 곡선을 가지고 S파 속도모델을 구하기 위해 역산을 수행하였다. Kennett and Engdahl (1991)의 IASP91 1차원 속도모델을 기본모델로 설정하였다. 역산 식은 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$Gm = d \tag{5}$$

식 (5)에서  $G$ 는 민감도 행렬이며,  $m$ 은 모델 벡터,  $d$ 는 데이터 벡터이다. 역산은 계산 값과 관측 값의 차이인  $(Gm - d)^2$ 의 값이 최소로 수렴할 때까지 반복 수행하여 역산 해를 결정한다. 이 연구에서는 역산을 100회 반복 수행하여 최종 해를 구하였다.

역산 문제를 안정화하기 위해서는 다양한 규제가 필요하다.

주로 제동(damping)과 평활화(flattening)에 대한 규제를 사용하며, 본 연구에서는 제동과 수직적 평활화, 수평적 평활화를 사용하여 역산을 안정화했다. 규제에 대한 값들은 여러 번의 수행을 통하여 구하였으며, 제동 값과 수평, 수직 평활화 값은 각각 0.1, 0.3, 0.3으로 적용하였다.

**해상도 테스트**

앞에서 구한 속도구조 역산 결과의 해상도를 평가하기 위해서 해상도 테스트를 수행하였다. 400 × 400 km 크기의 격자가 반복 배열된 형태의 격자 모델을 사용하여 격자 테스트(checkerboard test)를 수행하였다. 이상체의 크기는 ±300 m/s이다. 속도모델의 역산 과정과 동일한 자료의 분포를 갖도록 민감도 행렬과 시험모델의 곱으로 합성자료를 계산하여 역산을 수행하였다. 격자 테스트는 연구지역 아래 60 km 깊이까지 수행하였으며, Fig. 4와 Fig. 5는 각각 SV와 SH파 속도모델의 해상도 테스트 결과이다. SV파 속도모델의 격자 테스트는 사우디 아라비아를 중심으로 약 40 km 깊이까지 양호한 해상도를 보이지만 그에 비해 SH파 속도모델의 격자 테스트는 좀더 선형적으로 퍼지는 현상이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그럼에도 불구하고 사우디 아라비아를 중심으로 40 km 깊이까지는 격자의 패턴을 어느 정도 복구하고 있기 때문에 비교적 양호한 해상도를 보인다고 생각된다. 이상체가 선형적으로 나타나는 지역은 파선경로가 주로 선형적으로 우세하게 나타나서 발생하는 현상으로 보인다.

**결 과**

**SH 및 SV파 속도모델**

주기 5 ~ 140초에 해당하는 러브파와 레일리파의 군속도 분산 곡선을 사용하여 역산을 수행하여 10 ~ 60 km에서의 SH파와 SV파 속도모델을 각각 구하였다. Fig. 6은 SV파의 속도모델 결과이며 전반적으로 아라비아 순상지-플랫폼 경계선을 경계로 뚜렷한 속도 차이를 보인다. 아라비아 서부의 순상지 부분에서는 10 ~ 30 km 깊이에서 강한 고속도 이상대를 보이

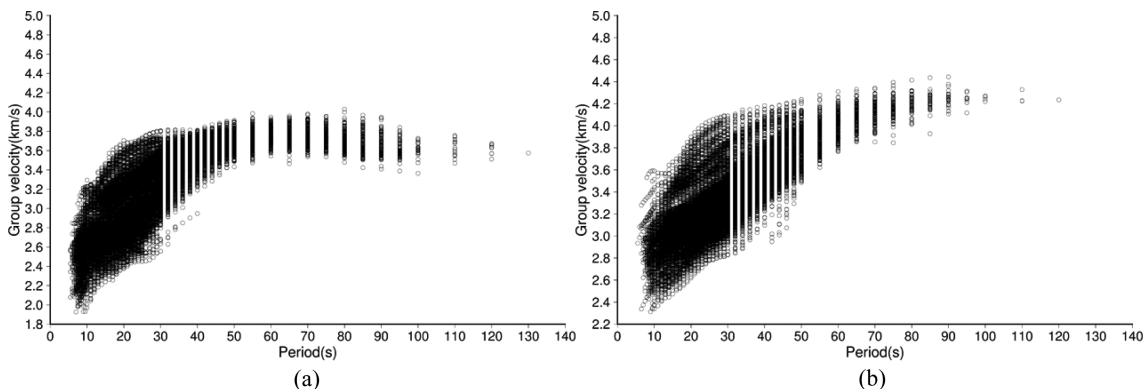
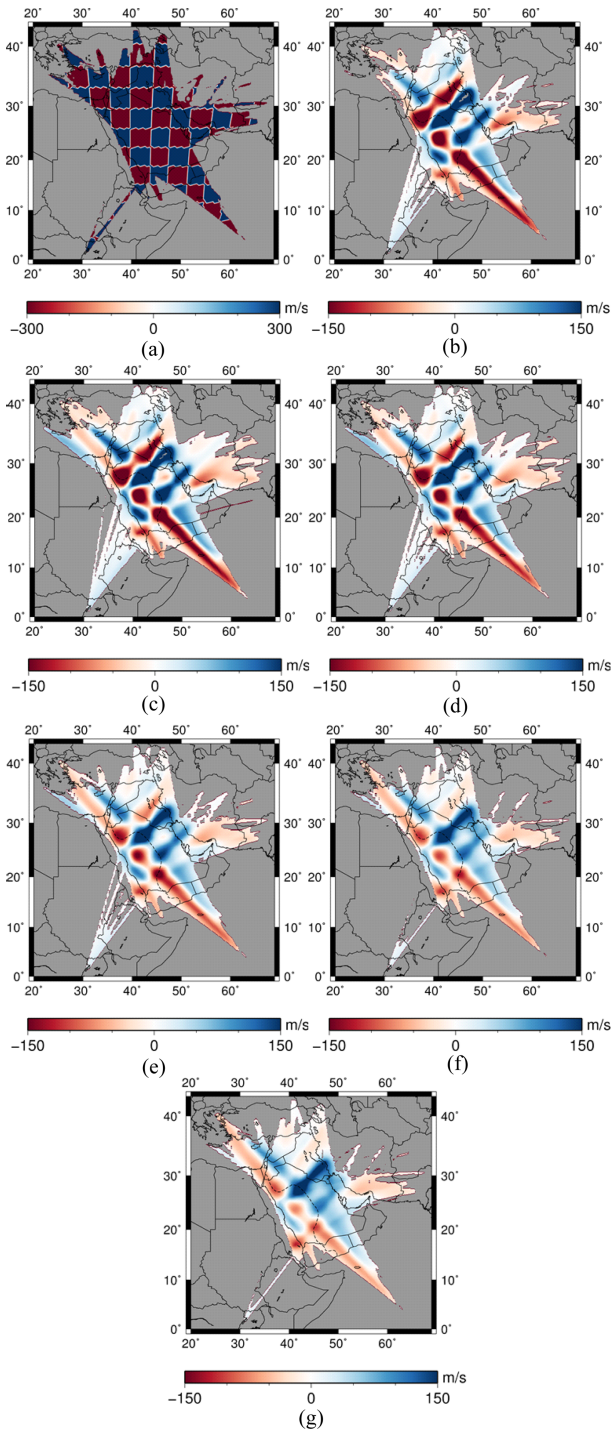
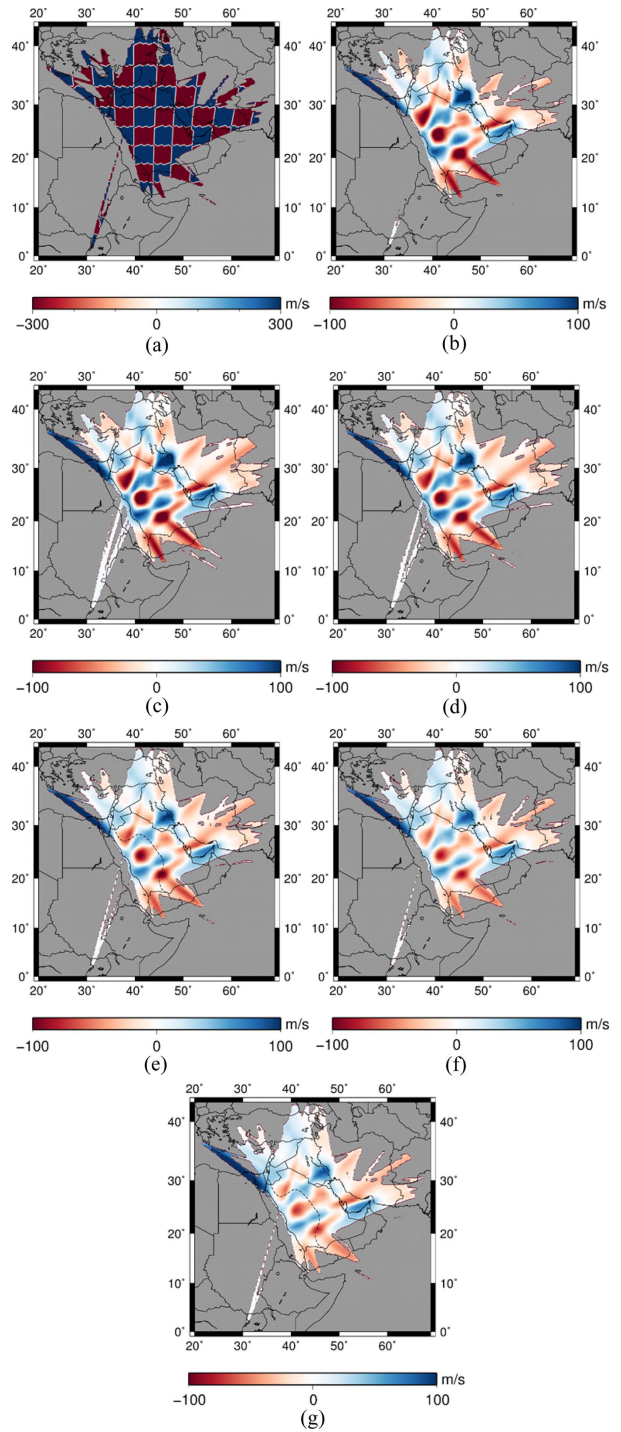


Fig. 3. Group velocity dispersion curves for (a) Rayleigh waves and (b) Love waves with a period range from 5 to 140 s.



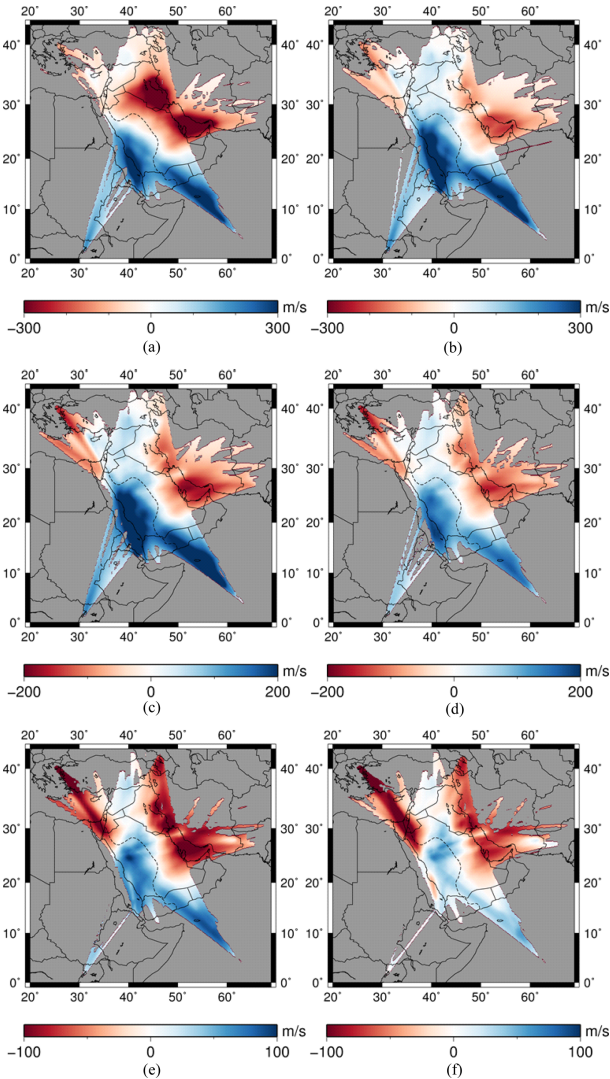
**Fig. 4.** The depth slices of SV-wave velocity perturbations from checkerboard tests. The input checkerboard models consist of  $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$  squared anomalies with amplitudes of  $\pm 300 \text{ m/s}$  as shown in (a). The other panels show inversion results at (b) 10, (c) 20, (d) 30, (e) 40, (f) 50 and (g) 60 km. Regions not covered by data sets are indicated in gray.

며, 이는 순상지 지역이 원생누대 기원의 오래되고 차가운 육괴로 되어있어 밀도가 높아 고속도 이상대를 보임을 알 수 있다. 플랫폼 지역에서는 10 km 깊이에서 강한 저속도 이상대가



**Fig. 5.** The depth slices of SH-wave velocity perturbations from checkerboard tests. The input checkerboard models consist of  $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$  squared anomalies with amplitudes of  $\pm 300 \text{ m/s}$  as shown in (a). The other panels show inversion results at (b) 10, (c) 20, (d) 30, (e) 40, (f) 50 and (g) 60 km. Regions not covered by data sets are indicated in gray.

나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 플랫폼 상부에 고생대, 중생대, 신생대의 퇴적물이 약 10 km 두께(Brown, 1972; Stoesser and Camp, 1985)로 두껍게 쌓여 있기 때문인 것으로 생각된다.



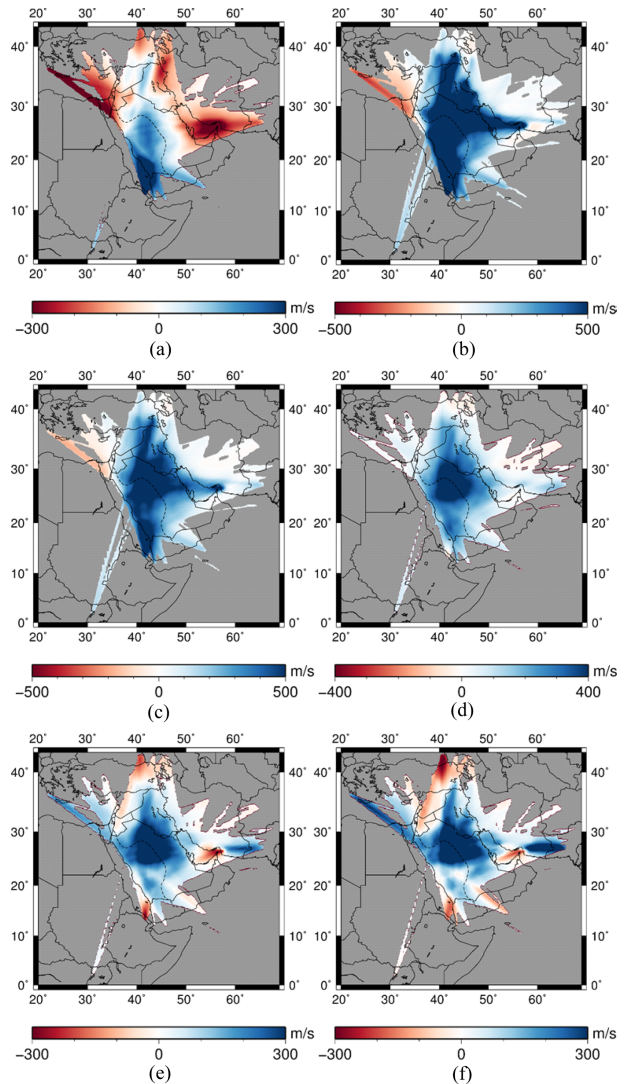
**Fig. 6.** The depth slices of SV-wave velocity model at (a) 10, (b) 20, (c) 30, (d) 40, (e) 50 and (f) 60 km. Regions not covered by data sets are indicated in gray.

다. Tang *et al.* (2018)에서는 35 ~ 45 km 깊이에서 아라비아 순상지가 모호 불연속면에 도달했음이 보고되었다. 아라비아 순상지와 대조적으로 아라비아 플랫폼은 여전히 저속도 이상대를 보여 플랫폼이 순상지의 서부지역(약 35 ~ 40 km)보다 두꺼운 지각( $\geq 45$  km)을 가지고 있다는 것을 나타냄으로 이전 결과를 입증한다(Tang *et al.*, 2016).

Fig. 7은 SH파의 속도모델이며 전반적으로 20 km 깊이 이하에서 강한 고속도 이상대가 나타남을 볼 수 있다. 이는 20 km 깊이 이하에서 거의 전 지역이 기준모델인 IASP91의 기준 속도보다 더 빠름을 알 수 있다.

### 이방성

이방성 매질이란 방향에 따라 지진파 전파 속도가 다르게 나타나는 매질을 말한다. 방사성 이방성(radial anisotropy)은



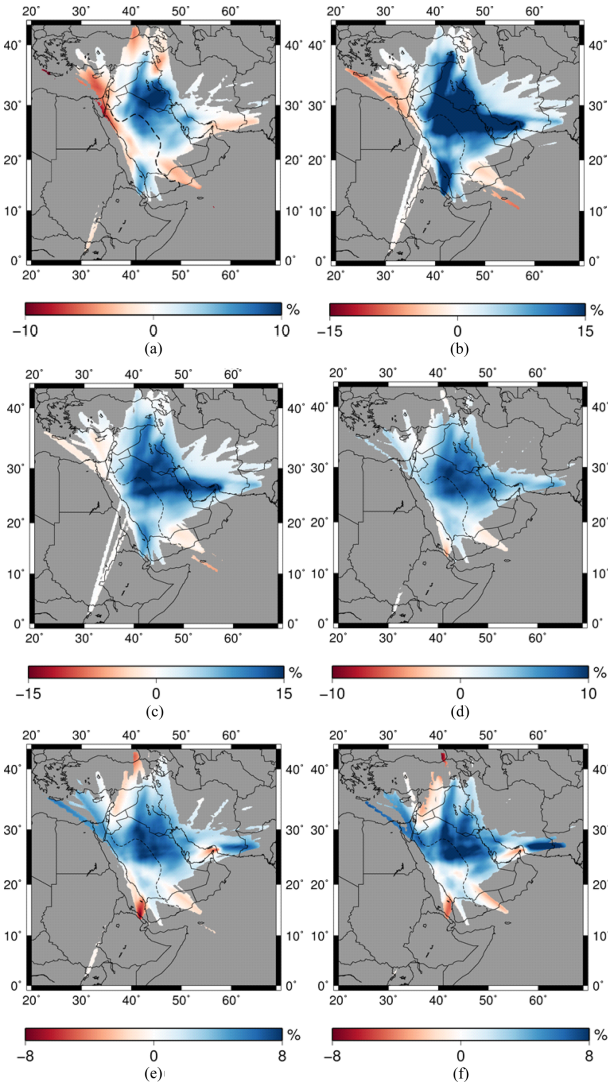
**Fig. 7.** The depth slices of SH-wave velocity model at (a) 10, (b) 20, (c) 30, (d) 40, (e) 50 and (f) 60 km. Regions not covered by data sets are indicated in gray.

식 (6)과 같이 SH와 SV파의 속도 차이를 계산하여 구한다. 따라서 수직 방향과 수평 방향에서의 지진파 속도의 차이를 나타낸다.

$$\zeta = \frac{V_{SH} - V_{SV}}{V_S} \times 100\% \quad (6)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{(V_{SH})^2 + (V_{SV})^2}{2}} \quad (7)$$

접선 방향으로 운동을 하는 SH파는 수평 방향으로 배열된 매질에서 일반적으로 더 빠르게 전파되며, 수직 방향으로 운동을 하는 SV파는 수직 방향으로 배열된 매질에서 더 빠르게 전파된다. 따라서 이방성을 통하여 지각과 맨틀이 어떠한 지구적 힘에 의한 변형을 받았는지 등 매질의 특성을 추론할 수 있다.



**Fig. 8.** Radial anisotropy at (a) 10, (b) 20, (c) 30, (d) 40, (e) 50 and (f) 60 km. Most of the Arabian Peninsula is dominated by positive anisotropy. Regions not covered by data sets are indicated in gray.

본 연구에서 사용하는 주파수에 따른 민감도 깊이는 주로 암석권에 해당하므로 본 연구는 해상도가 좋은 아라비아 반도 지역을 중심으로 연구지역의 암석권에 대한 해석에만 집중하기로 한다.

Fig. 8에 나타난 이방성의 결과를 보면 전반적으로 양의 이방성이 나타나며 40 km 이상의 깊이에서는 남쪽 부분에 음의 이방성이 나타나는 것을 볼 수 있다. 양의 이방성이 나타나는 지역은 아라비아 판과 유라시아 판 사이에 있는 자그로스 조산대를 따라 아라비아 판이 섭입하면서 발생하는 판의 당김에 의해 지각과 맨틀의 격자 방향이 수평 성분으로 우세하게 되어 접선 방향으로 운동을 하는 SH파의 속도가 SV파의 속도보다 더 빨라서 나타나는 현상으로 보인다. 아라비아 플랫폼에 쌓인 두꺼운 퇴적층으로 인한 수평 방향의 배열로 인해 SH파

가 우세하게 되는 효과도 천부 깊이(10 km)에서 있을 것으로 생각된다. 40 km 이상의 깊이에서 보이는 음의 이방성은 Afar 플룸의 위치와 일치하는데(Chang *et al.*, 2011), 이는 Afar 플룸의 상승으로 인해 맨틀 흐름의 방향이 수직 성분으로 우세하게 되어 SV파의 속도가 SH파의 속도보다 더 빠르게 나타나 생긴 결과로 보이나 해당지역의 해상도가 낮은 관계로 단정지을 수는 없다.

## 결론

본 연구는 사우디아라비아 지하의 속도구조 및 이방성을 알아보기 위하여 수행하였다. 사우디 지질조사소에서 자료를 획득하였으며 획득한 자료는 다중 필터 기법을 이용하여 균속도 곡선을 구하였다. 주기 5 ~ 140초에 해당하는 리브파와 레일리파의 균속도 분산 곡선을 역산하여 연구지역 아래 10 ~ 60 km 깊이에서의 SH, SV파 속도모델과 이방성을 계산하였다. 계산한 속도모델 결과의 해상도를 평가하기 위해 격자 테스트를 수행하였다. SV파의 속도모델 결과에서 아라비아 순상지에서는 10 ~ 30 km 깊이에서 고속도 이상대가 나타났으며, 아라비아 플랫폼에서는 10 km 깊이에서 저속도 이상대가 나타났다. 순상지는 원생누대 기원의 육괴로 차갑고 오래되어 밀도가 높아 고속도 이상대가 나타남을 알 수 있다. 또한, 저속도 이상대가 나타나는 것은 플랫폼이 퇴적물 기반으로 되어있음과 관련이 있다. SH파의 속도구조 결과에서는 전반적으로 고속도 이상대가 나타난다.

SH파와 SV파의 속도 차이를 계산하여 아라비아 반도의 이방성을 계산하였다. 이방성의 결과에서는 양의 이방성이 주로 플랫폼의 위치하며 주변으로 광범위하게 나타난다. 이는 자그로스 조산대를 따라 아라비아 판이 섭입하면서 당김에 따라 수평 방향으로 인장력이 생기는데, 이로 인해 지각과 맨틀의 격자 방향이 수평 방향으로 우세하여 SH파의 속도가 더 빠르게 나타난다고 판단된다. 천부 깊이에서는 두꺼운 퇴적층으로 인한 수평 방향으로의 배열로 인해 SH파가 우세하게 되는 효과도 있을 것으로 생각된다. 40 km 이하의 깊이에서 아라비아 남쪽 부분에서 보이는 음의 이방성은 Afar 플룸의 위치와 일치하는데, 이를 통하여 Afar 플룸의 상승으로 맨틀 흐름의 방향이 수직 성분으로 우세하여 SV파의 속도가 더 빠르게 나타났으며, 이로 인해 음의 이방성이 나타난 것으로 해석될 수 있으나 해당지역의 낮은 해상도로 인해 결론을 내리기는 어렵다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(KMI2018-09312)의 지원으로 수행되었고, 또한 행정안전부장관의 지진방재분야 전문인력 양성사업으로 지원되었음.

## References

- ArRajehi, A., McClusky, S., Reilinger, R., Daoud, M., Alchalbi, A., Ergintav, S., Gomez, F., Sholan, J., Bou-Rabee, F., Ogubazghi, G., Haileab, B., Fisseha, S., Asfaw, L., Mahmoud, S., Rayan, A., Bendik, R., and Kogan, L., 2010, Geodetic constraints on present-day motion of the Arabian plate: Implications for Red Sea and Gulf of Aden rifting, *Tectonics*, **29**, TC3011, doi:10.1029/2009TC002482.
- Bath, M., 1974, Spectral Analysis in Geophysics, *Elsevier*, 580.
- Baumgardner, J. R., and Frederickson, P. O., 1985, Icosahedral Discretization of the Two-Sphere, *SIAM J. Numer. Anal.*, **22(6)**, 1107-1115.
- Bosworth, W., Huchon, P., and McClay, K., 2005, The Red Sea and Gulf of Aden Basins, *J. Afr. Earth Sci.*, **43**, 334-378.
- Brigham, E. O., 1988, The fast Fourier Transform and its applications, *Prentice Hall*, 448.
- Brown, G. F., 1972, Tectonic Map of the Arabian Peninsula, *US Geological Survey*.
- Camp, V. E., and Roobol, M. J., 1992, Upwelling asthenosphere beneath western Arabia and its regional implications, *J. Geophys. Res.*, **97**, 15255-15271.
- Chang, S. J., Merino, M., Van der Lee, S., Stein, S., and Stein, C. A., 2011, Mantle flow beneath Arabia offset from the opening Red Sea, *Geophys. Res. Lett.*, **38(4)**, L04301, doi:10.1029/2010GL045852.
- Chang, S. J., and Van der Lee, S., 2011, Mantle plumes and associated flow beneath Arabia and East Africa, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **302**, 448-454.
- Coleman, R. G., 1977, Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere? *Springer-Verlag*, 229.
- Dziewonski, A., Bloch, S., and Landisman, M., 1969, Technique for the analysis of transient seismic signals, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **59(1)**, 427-444.
- Falcon N., 1974. Southern Iran: Zagros Mountains. In: Spencer, A., Ed., Mesozoic-Cenozoic Orogenic Belts, **4**, *Geol. Soc. Spec. Publ.* 199-211.
- Garfunkel, Z., and Beyth, M., 2006, Constraints on the structural development of Afar imposed by kinematics of the major surrounding plates, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, **259**, 23-42.
- Herrmann, R. B., and Ammon, C. J., 2002, Computer Programs in Seismology, Version 3.30, Saint Louis University, St. Louis, Missouri.
- Kennett, B. L. N., Sambridge, M. S., and Williamson, P. R., 1988, Subspace methods for large inverse problems with multiple parameter classes, *Geophys. J. Int.*, **94(2)**, 237-247.
- Koulakov, I., Burov, E., Cloetingh, S., El Khrepy, S., Al-Arifi, N., and Bushenkova, N., 2016, Evidence for anomalous mantle upwelling beneath the Arabian Platform from travel time tomography inversion, *Tectonophysics*, **667**, 176-188.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., and Tealeb, A., 2003, GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions, *Geophys. J. Int.*, **155**, 126-138.
- Sepehr, M., and Cosgrove, J. W., 2004, Structural framework of the Zagros fold-thrust belt, Iran, *Mar. Pet. Geol.*, **21(7)**, 829-843.
- Stocklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran: a review, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, **52(7)**, 1229-1258.
- Stoeser, D. B., and Camp, V. E., 1985, Pan-African Microplate Accretion of the Arabian Shield, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **96(7)**, 817-826.
- Tang, Z., Julià, J., Zahran, H., and Mai, P. M., 2016, The lithospheric shear-wave velocity structure of Saudi Arabia: young volcanism in an old shield, *Tectonophysics*, **680**, 8-27.
- Tang, Z., Mai, P. M., Chang, S. J., and Zahran, H., 2018, Evidence for crustal low shear-wave speed in western Saudi Arabia from multi-scale fundamental-mode Rayleigh-wave group-velocity tomography, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **495**, 24-37.