

대규모 발파자료 초동주시 역산을 통한 한반도 지각 속도구조 연구

김기영¹⁾, 홍명호, 이정모²⁾, 문우일³⁾, 박창업, 정희옥⁴⁾

¹⁾강원대학교 지구물리학과, kykim@kangwon.ac.kr

²⁾경북대학교 지질학과

³⁾서울대학교 지구환경과학부

⁴⁾군산대학교 해양시스템공학과

Crustal structure of the Korean peninsula by inverting the travel times of first-arrivals from large explosions

Ki Young Kim¹⁾, Myung Ho Hong, Jung Mo Lee²⁾, Woo Il Moon³⁾, Chang Eob
Baag, Hee Ok Jung⁴⁾

¹⁾Department of Geophysics, Kangwon National University

²⁾Department of Geology, Kyungpook National University

³⁾School of Earth & Environmental Sciences, Seoul National University

⁴⁾Department of Ocean System Engineering, Kunsan National University

요약 : 한반도 남부 지각 속도구조를 밝히기 위해서, 서북서-동남동 방향의 2002년도 측선 294 km와 북북서-남남동 방향의 2004년도 측선 335 km를 따라 인공적으로 발생시킨 지진파 자료를 각각 120초와 150초 기록하였다. 초동주시 역산과정을 통하여 속도단면을 작성하였으며, 역산 시 초기모델은 측선 주변의 고정관측소에서 기록한 원거리 지진자료의 수신함수역산으로 구한 1차원 속도구조자료를 활용하였다. 파선경로는 2.0 km와 7.1 km 깊이에 속도 6.0 km/s와 7.1 km/s를 갖는 굴절면이 존재하며, 굴절과 속도 7.8~8.1 km/s의 모호면은 30.8~36.1 km 깊이에 존재함을 보인다. 속도단면은 옥천계 하부 6~7 km 깊이에 상당한 규모의 저속도층이 15 km 깊이의 속도 불연속면 상부에 존재하며, 영동단층은 10 km 이상 깊이까지 연장되어 있고, 최대 4.2 km 정도두께를 갖는 경상분지 하부에 고속도층이 얇게 분포하는 것으로 분석된다.

주요어 : 지각 속도구조, 초동주시 역산, 모호면, 옥천계, 저속도층, 영동단층, 경상분지

Abstract : In order to investigate the velocity structure of the southern part of the Korean peninsula, exploded seismic signals were recorded for 120 s along a 294-km WNW-ESE line and 150 s along a 335-km NNW-SSE line in 2002 and 2004, respectively. Velocity tomograms were derived from inverting first arrival times. One-dimensional velocity models derived by joint analyses of teleseismic receiver functions and surface wave dispersion at several stations near the profiles were used to build initial models. The raypaths indicate several midcrust interfaces including ones at approximate depths of 2.0 and 14.9 km with refraction velocities of approximately 6.0 and 7.1 km/s, respectively. The deepest significant interface varies in depth from 30.8 km to

36.1 km. The critically refracting velocity varies from 7.8 to 8.1 km/s along this interface which may correspond to the Moho discontinuity. The velocity tomograms show (1) existence of a low-velocity zone centered at 6–7 km depth under the Okchon fold belt, (2) extension of the Yeongdon fault down to greater than 10 km, and (3) existence of high-velocity materials under the Gyeongsan basin whose thickness is less than 4.2 km.

Keywords : crustal velocity structure, travel time inversion of first arrivals, the Moho discontinuity, the Okchon fold belt, low-velocity zone, the Yeongdon fault, the Gyeongsan basin

1. 자료획득 및 처리

지각규모 굴절과실험은 2002년도에 294-km의 서북서-동남동 측선 2002와 2004년도에 335-km의 북북서-남남동 측선 2004를 따라 실시하였다 (Fig. 1). 지진파는 80~150 m 깊이의 시추공 내에서 500~1000 kg의 폭약으로 발생시켰으며, 한반도의 서해안과 동해안 사이의 측선 2002와 한반도의 중앙부와 남해안 사이의 측선 2004의 발파위치는 각각 서산과 영동, 연천, 중평, 영동, 고성 등이다 (Fig. 1). 각 발파당, 지진파 신호는 170개의 2-Hz 단성분 이동식 지진계 (PRS-1)을 사용하였으며, 3성분 이동식 지진계를 2002년도에는 28개와 2004년도에 26개를 추가로 사용하여 수신기 간격이 각각 1.5 km 와 1.7 km 정도 되도록 하였다. 발파위치와 고도는 측지용 정밀 GPS장비로 측정하였으며, 각 수신기 위치들은 이동식 GPS 수신기를 이용하여 측정하였고, 고도는 1:5000 수치지형도에서 구하였다.

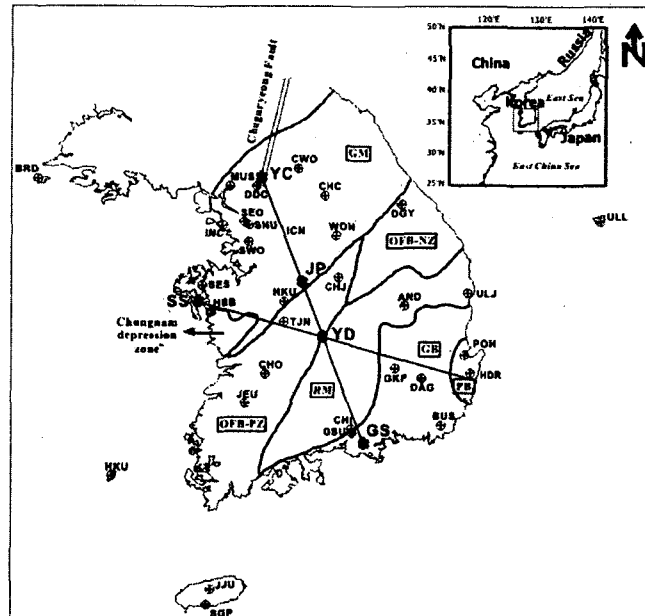


Fig. 1. The seismic profiles shot in 2002 and 2004 superimposed on a simplified tectonic map of the southern Korean peninsula. The profiles traverse the Gyeonggi massif (GM), Okchon fold belt (OFB-NZ and OFB-PZ), Ryeongnam massif (RM), the Gyeongsang basin (GB). Profile 2002 extends into the Pohang basin (PB). Six shot locations (asterisks) and some permanent recording stations (crosses in empty circles) are also indicated.

기록자료를 6 km/s의 환산주시로 변환한 후(Fig. 2), 초동주시를 결정하고 SIRT방식으로 역산하였다. 초기모델은 측선부근의 지진관측소에서 기록한 원거리 지진자료로부터 수신함수 역산와 표면파 분산곡선으로 구한 1차원 속도구조를 크리깅 방법으로 보간하였으며, 측선 2002는 HSB, HDB, TJN, GKP 4개 관측소, 측선 2004는 SNU, HKU, GSU의 3개 관측소 자료를 이용하였다. 셀의 폭은 수신점 간격, 두께는 0.4 km에서 1.8 km까지 증가하는 30개 층을 설정하였다. 20번 반복계산 후, 평균제곱근 오차는 측선 2002는 4.1 ms, 측선 2004는 13.9 ms까지 감소하였다.

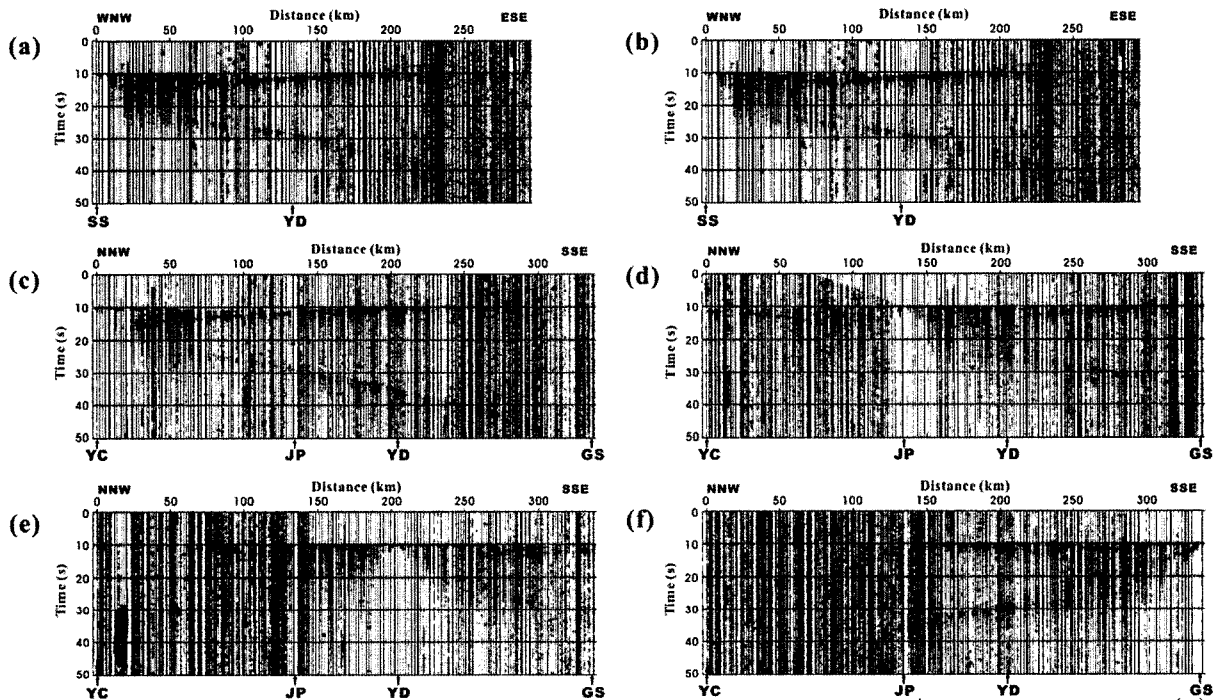


Fig. 2. Seismic records with a reduction velocity of 6 km/s for shots at: (a) Seosan (SS) and (b) Yeongdong (YD) in Profile 2002; (c) Yeonchon (YC), (d) Jeungpyeong (JP), (e) Yeongdong (YD), and (f) Gosung (GS) in Profile 2004.

2. 주요 경계면 및 속도구조

가장 뚜렷한 상부지각 내의 경계면은 측선 2004에서 150 km 이상의 연장성을 보이며 굴절과 속도 6.0 km/s 깊이 2.0 ± 0.2 km의 경계면이다(Fig. 3). 측선 2004 상의 또 다른 경계면은 15 ± 1 km 깊이에 있으며, 굴절과 속도는 7.1 km/s이다. 약 162 km 정도 연장되어 있는 이 경계면은 기존에 여러 차례 제시된 바 있는 10–15 km 깊이의 경계면과 일치한다(김상조·김소구, 1983; 김성균·정부흥, 1985; 김성균, 1995; Kim, 1999). 그러나 이 경계면은 측선 2002에서 잘 나타나지 않으며, 대신 서북서 지역에서는 11.4 km, 동남동 지역에서는 7.1 km 깊이에 연장이 약 37 km와 54 km에 달하는 속도 6.3 km/s와 6.1 km/s의 굴절면이 관찰된다. 가장 깊은 경계면은 굴절과 속도 7.8–8.1 km/s인 굴절면이 36 ± 1 km 깊이에 나타난다. 이 경계면은 측선 2002의 서북서와 측선 2004의 북북서쪽으로 알아지며, 측선 내에서의 최소 깊이는 30.8 km에 이른다. 이 경계면은 모호면으로 해석되며, 측선 2002와 2004에서 각각 102 km와 117 km 이상의 연장성을 보인다. 측선 2002의 동남동 지역과 측선 2004의 남남동 지역에서는

조금 얇은 깊이인 34 ± 1 km 깊이에 속도 7.5~8.0 km/s 인 굴절면이 존재하며, 이는 지각과 맨틀의 경계가 뚜렷한 모호 불연속면보다는 점이적인 층들로 이루어져 있을 가능성을 지시한다. 측선 2002의 경상분지 하부의 깊이 30.8 km 부근에 전형적인 Pn 속도보다 작은 7.4~7.6 km/s의 굴절면이 존재하는데, 이를 속도가 낮은 모호면으로 해석될 수도 있으나 (김성균, 1995; 김성균·정부홍, 1985), 이 굴절면과 36 km 깊이의 하부 굴절면 사이에 존재하는 5 km 두께의 고속도층이 동해 대륙연변부의 대륙융기가 일어나는 동안에 마그마성분이 지각하부에 녹아 붙어 형성되었을 가능성이 있다 (Kim et al., 2003; Cho et al., 2004; Chang and Baag, 2005).

측선 2004의 옥천계 지역은 심한 변성작용의 영향으로 해석되는 지표부근의 고속도층 하부에 속도 5.5 km/s 이하, 두께 8 km의 저속도층이 100 km 이상 연장되어 나타나며, 약 15 km 깊이에 7.1 km/s 속도를 갖는 고속도층 위에 놓여 있다. 이 경계면은 콘라드면으로 해석될 수 있으며, 경기육괴와 영남육괴의 충돌에 의한 압력으로 유동성 물질이 이탈되어 상부로 이동하면서 상부의 저속도층과 하부의 고속도층으로 분리된 것으로 생각된다. 또한 모호면이 옥천계 하부에서 오목하게 깊은 양상도 두 지구조가 충돌했을 가능성을 지시한다. 옥천계와 영남육괴 사이의 수직에 가까운 저속도구조가 지하 10 km 이상까지 나타나며, 이는 지표의 영동단층이 깊이 연장되어 있음을 시사한다. 백악기 경상분지는 최대 4.2 km 깊이까지 속도 5.8 km/s 이하의 물질로 채워져 있는데, 이 깊이는 기존에 해석된 깊이보다 다소 얇다. 이 분지 하부에는 속도 6.5 km/s 이상의 고속도층이 12.5 km 깊이까지 올라와 있으며, 이는 전술한 하부지각 하부의 고속도층 존재와 함께, 분지의 형성과정 해석에 중요한 단서를 제공한다.

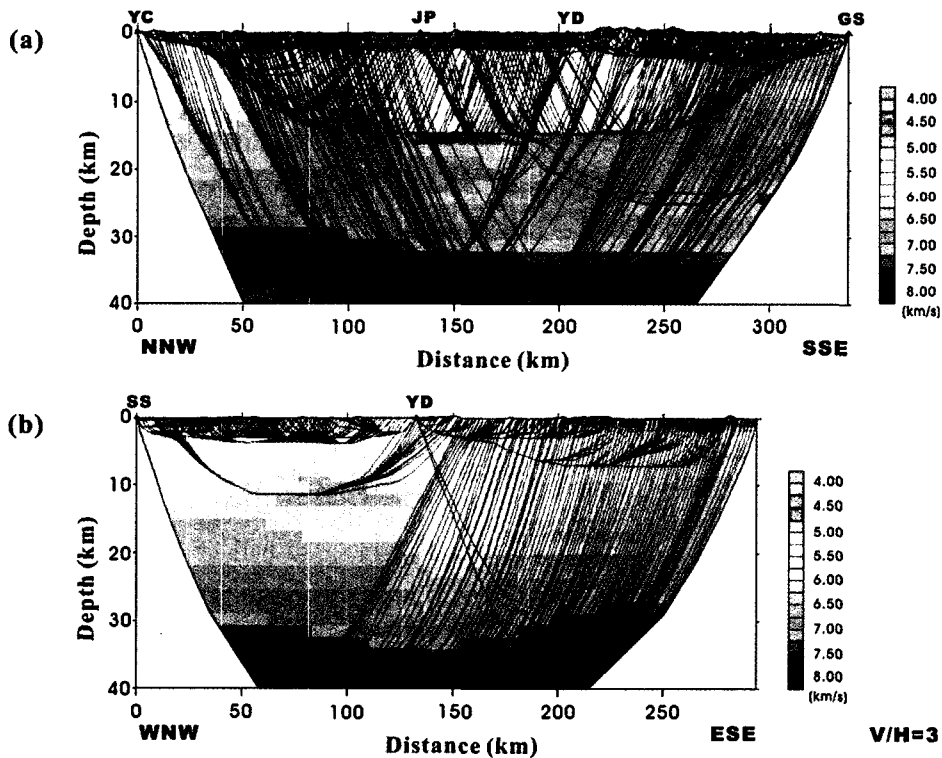


Fig. 3. Tomograms with superimposed raypaths for (a) Profile 2004 from four shots and (b) Profile 2002 from two shots. The lack of raypath coverage at depths of 10 to 30 km near the WNW end of the model indicates the absence of a shot on the ESE end of the profile.

3. 결론

한반도 남부에서 실시한 대규모 굴절과 시험연구 결과 얻어진 자료의 초동주시를 역산하여 구한 속도단면은, 지각 내에 여러 경계면이 존재하며 속도 7.8~8.1 km/s의 모호면의 깊이가 30.8~36.1 km 범위에서 변하는 사실을 밝혔다. 또한 옥천계 하부의 저속도층의 존재와 깊은 모호면은 경기육괴와 영남육괴의 충돌 가능성을 제시하는 것으로 해석된다. 아울러 경상분지 하부에 고속도층이 얇게 분포하고, 하부지각 하부에 고속도층이 존재하는 사실은 분지형성과정 해석에 중요한 단서를 제공한다.

참고문헌

- 김상조, 김성균, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 광산지질, 16, 5-61.
- 김성균, 정부홍, 1985, 한국 남부지역의 지각구조, 광산지질, 18, 151-157.
- 김성균, 1995, 한반도의 지각구조에 관한 연구, 지질학회지, 31, 393-403.
- Chang, S.J. and Baag, C.E., 2005, Crustal structure on southern Korea from joint analysis of teleseismic receiver functions and surface wave dispersion: submitted to *Bull. Seis. Soc. Amer.*
- Chang, S.J. Baag, C.E., and Charles A.L., 2004, Joint analysis of teleseismic receiver functions and surface wave dispersion using the genetic algorithm: *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 94, 691-704.
- Cho, H.M., Kim, H.J., Jou, H.T., Hong, J.K., and Baag, C.E., 2004, Transition from rifted continental to oceanic crust at the southeastern Korean margin in the East Sea (Japan Sea): *Geophysical Research Letter*, 5, L07606.
- Kim, H.J., Jou, H.T., Cho, H.M., Bijwaard, H., Sato, T., Hong, J.K., Yoo, H.S., and Baag, C.E., 2003, Crustal structure of the continental margin of Korea in the East Sea (Japan Sea) from deep seismic sounding: evidence for rifting affected by the hotter than normal mantle: *Tectonophysics*, 364, 25-42.
- Kim, W.H., 1999, P-wave velocity structure of upper crust in the vicinity of the Yangsan fault region: *Geoscience Journal*, 3, 17-22.