

지진 토모그래피를 이용한 한반도의 과거진원지역의 특성 연구

김소구^{1*} · 배형섭¹

¹한양대학교 지구해양학과, 한국 지진 연구소

Investigation of Post-seismic Sites Using Local Seismic Tomography in the Korean Peninsula.

So Gu Kim^{1*} and Hyung-Sub Bae¹

¹Department of Earth and Marine Sciences, Hanyang University The Korea Seismological Institute, Ansan 426-791, Korea

Three dimensional crustal structure and source features of earthquake hypocenters on the Korean peninsula were investigated using P and S-wave travel time tomography. The main goal of this research was to find Vp/Vs anomalies at earthquake hypocenters as well as those of crustal structure of basins and deep tectonic settings. This allowed for the extrapolation of more detailed seismotectonic force from the Korean peninsula. The earthquake hypocenters were found to have high Vp/Vs ratio discrepancies (VRD) at the vertical sections. High Vp/Vs ratios were also found in the sedimentary basins and beneath the Chugaryong Rift Zone (CRZ), which was due to mantle plume that subsequently solidified with many fractures and faults which were saturated with connate water. The hypocenters of most earthquakes were found in the upper crust for Youngwol (YE), Kyongju (KE), Hongsung (HE), Kaesong (KSE), Daekwan (DKE), and Daehung (DHE) earthquakes, but near the subcrust or the Moho Discontinuity for Mt. Songni (SE), Sariwon (SRE) and Mt. Jiri (JE) earthquakes. Especially, we found hot springs of the Daekwan, Daehung and Unsan regions coincide with high VRD. Also, this cannot rule out the possibility that there are some partial meltings in the subcrust of this region. High VRD might indicate that many faults and fractures with connate water were dehydrated when earthquakes took place, reducing shear modulus in the hypocenter areas. This is can be explained by due to the fact that a point source which is represented by the moment tensor that may involve changes in volume, shear fracture, and rigidity. High Vp/Vs ratio discrepancies (VRD) were also found beneath Mt. Backdu beneath 40 km, indicating that magma chamber existed beneath Mt. Backdu is reducing shear modulus of S-wave velocity.

Key words : Vp/Vs, VRD, dehydration, connate water, shear modulus, poisson's ratio, magma chamber, resolvability

한반도의 3차원적인 지구구조와 진원의 특성을 P파와 S파의 주행시간 토모그래피 기법을 이용하여 연구하였다. 이 연구의 주요 목적은 진원, 분지 및 심부 구조지역에서의 Vp/Vs 비율의 이상 대를 찾기 위함이다. 이것은 한반도의 보다 세부적인 지진 구조력 데이터의 예측을 고려했다. 지진 토모그래피를 이용한 본 연구의 결과에서 진원에서의 높은 Vp/Vs 비율의 차이를 수직성분에서 찾을 수 있었다. 퇴적 분지와 추가령 구조곡 아래에서 높은 Vp/Vs 비율이 나타났다. 이는 마그마 분출 후 마그마가 고체화되고, 원생수(connate water)로 포획된 여러 파쇄대와 단층에 의한 것으로 추정되어진다. 대부분의 진원에서 높은 Vp/Vs 비율 차이(VRD)를 찾을 수 있었으며, 영월, 경주, 홍성, 대흥, 대관, 랑남 지진의 경우 상부지각에서 속리산, 사리원, 지리산 지진 등은 하부지각 또는, 모호 불연속면 근처에서 나타났다. 특히 대관, 대흥 및 운산에 있는 온천 지역과 높은 VRD가 일치함을 볼 수 있었다. 이것은 또한, 이 지역 하부지각에 용융체(partial melting)의 존재 가능성을 시사한다. 높은 Vp/Vs 비율 차이(VRD)는 단층과 파쇄대에 존재하던 액체(connate water)가 지진발생 후 탈수화 작용(dehydration)이 발생하여, 강성률이 감소함을 나타낸다. 이러한 것은 진원이 부피의 변화, 전단 파쇄대(shear fracture), 강성률(rigidity)의 변화를 포함하는 모멘트 텐서(moment tensor)에 의해 표현된다는 사실에 기인 한다는 것이다. 높은 Vp/Vs 비율의 차이(VRD)는 또한, 백두산의 40 km 깊이 아래에서 찾을 수 있는데 이는 강성률을 감소시키는 마그마 방(magma chamber)가 존재함을 암시해준다.

주요어 : Vp/Vs, VRD, 탈수 작용, 원생수, 강성률, 포아송 비율, 마그마 방, 해상력

*Corresponding author: sogukim@hanyang.ac.kr

1. 서 론

한반도는 중국이나 일본과 같은 주변 국가들에 비해 상대적으로 지진 발생빈도가 적은 지역이다. 그러나 한반도는 태평양 판(Pacific Plate)과 유라시아 판(Eurasian Plate)의 큰 충돌대에 근접해 있어 지진위험은 항상 존재하며, 그에 대한 연구가 필요하다. 한반도는 유라시아 판의 가장자리 바이칼-코리아(아무르 판)과 태평양 판, 그리고 필리핀 판과 서로 만나는 바이칼-코리아 판 동남 끝에 자리 잡고 있다(Kim *et al.*, 2004). 따라서 두 개의 강력한 지진대, 환태평양 지진대와 중국 대륙성 지진대 사이에 있기 때문에 지진 위험에서 제외될 수 없다(Fig. 1). 지진 토모그래피 연구는 지구 내부의 구조 특성이나 지진 위험을 알아내기에 매우 유용한 방법으로 현재까지 우리나라에선 충분한 연구가 이루어지지 않았다. 이번 연구는 1998년 이후 디지털 관측망이 처음 설치된 이후 아날로그와 디지털 데이터를 같이 사용한 첫 번째 연구이다. 한반도의 경우에 일본이나 중국에 비해 데이터가 매우 적다. 특히 북한지역은 데이터 획득

등의 어려움으로 남한 지역보다 더욱 부족하다(Kim and Shin, 2003). 남한의 데이터는 주변 국가들에 비해 적은 편이나 전체적으로 잘 분포(파선 밀도와 노드 분포가 좋음)되어 있어 좋은 해상도를 보여 준다. 이번 연구에서는 남한의 KMA(기상청), KIGAM(한국 지질

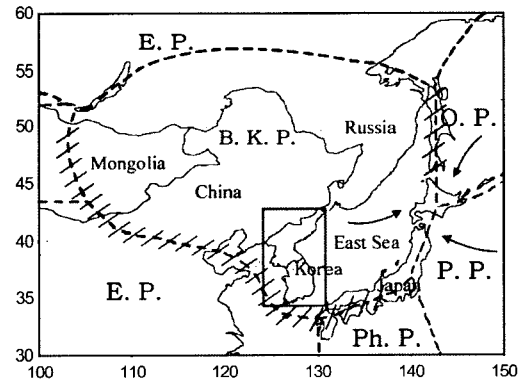


Fig. 1. Tectonic map of Far East Asia (Kim *et al.*, 2004). The rectangular is a target area in this study. E. P., O. P., P. P., Ph. P. and B. K. P. are Eurasian, Okhotsk, Pacific, Philippine and Baikal Korea plates. Slashed zones are high seismic zones.

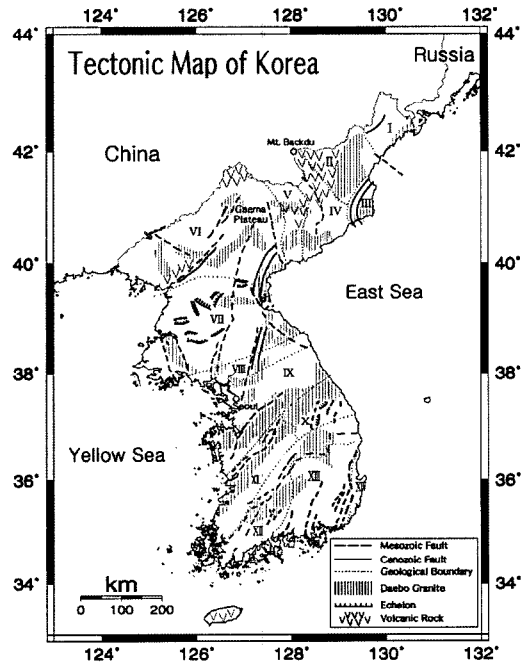


Fig. 2. Geological and tectonic map in the Korean Peninsula. Reproduced from several workers (Masaitisa, 1964; Lee, 1987; Pak, 1993).

I) Tumangang Fold Belt (Upper Paleozoic). II) Kwanmo Massif (Archean-early Proterozoic). III) Kilju-Myongchon Basin (Cenozoic) IV) Machollyong Massif (Late Lower Proterozoic). V) Heysan-Riwon Basin. VI) Rangnim Massif (Archean-early Lower Proterozoic). VII) Pyongyang Basin. VIII) Rimjingang Fold Belt (Middle Paleozoic). IX) Kyonggi Massif (Archean-early Lower Proterozoic). X) Okchon Neogeosynclinal Zone. XI) Okchon Paleosynclinal Zone. XII) Yongnam Massif (Archean-early Lower Proterozoic). XIII) Kyongsang Basin (Mesozoic). XIV) Yongil Basin (Cenozoic).

Table 1. Initial Reference Model.

h(km)	Vp(km/sec)	Vs(km/sec)	h(km)	Vp(km/sec)	Vs(km/sec)
-2.0	4.0	2.5	32.0(35.0)	7.95	4.6
4.0	5.1	2.84	55.0	8.09	4.67
8.0	6.2	3.45	80.0	8.07	4.46
12.0	6.35	3.53	115.0	8.05	4.45
16.0	6.5	3.65	150.0	8.03	4.44
20.0	6.7	3.8	265.0	8.64	4.67
24.0	6.96	4.0	300.0	8.73	4.7
28.0	7.45	4.3			

자원 연구원) 관측소와 북한 지진 관측소, 중국-북한 임시 관측소, 러시아(Vladivostok), 중국, IRIS의 PASSCAL ARRAY에서 관측된 P파와 S파를 이용하였다. 그리고 남한은 40 km, 북한은 60 km 깊이까지 내부 지각 구조모형을 Table 1과 같이 사용했다.

한반도는 아시아 대륙의 동부지역에 위치하고, 북으로는 중국의 북동부 및 시베리아와 서쪽으로는 황해를 건너 중국의 동북 지역과, 남동으로는 동해를 사이에 두고 일본과 인접하고 있다. 한반도의 지각은 대부분 고대 지각 구조로 구성되어 있다. 주요 구조들은 남서에서 북동으로 대각선 방향으로 위치해 있다. Fig. 2는 여러 연구자(Masaitisa, 1964; Lee, 1987; Pak, 1993)로부터 재구성한 것이다. 모든 남한 지역에서 화강암의 자성화 흔적이 있으며, 대부분이 주라기 시대의 것이다. 대부분 남동쪽의 화강암만이 백악기 시대의 것이다. 남한의 지각 구조는 주라기 시대에 대부분 형성되어졌으며, 그 이후에는 강한 구조 운동이나 화산 활동이 발생하지 않았다. 한반도의 중앙 지역에서 추가령 구조곡(Chugar-yong Rift Zone)의 움직임 과정이 보이며, 서해, 동해는 물론 한반도 내에서도 자주 지진 활동이 발생하는 것으로 보아, 지진으로부터 안전하다고 말할 수 없다.

지진파 토모그래피는 지구 내부를 조사하기 위한 가장 중요한 방법 중 하나이다. 지구의 많은 지역에서 지진파 토모그래피를 통해 지진활동과 단층의 관계를 논하였다.

국지 토모그래피를 이용한 남한 지각 구조의 지진파 속도 이상에 대한 연구는 최근에서야 이루어졌다(Kim and Li, 1998a, Kim and Li, 1998b, Kim *et al.*, 2000). 하지만, 본 연구는 이전의 연구들과 비교해 더욱 중요한 이점이 있다. 이번 연구는 토모그래피 역산에 있어 진보된 알고리즘을 이용하였다(Roecker, 1993; Pulliam *et al.*, 1993; Bijwaard *et al.*, 1998). 또한, 토모그래피 연구에서 가장 중요한 부분인 데이터도 더 많이 획득하여 이용하였다. 그리고 이전 연구들은 오직 P파만을 이용하였지만, 본 연구에서는 P파와 S파에 대한 독립적인 모델을 통해 각각을 분리하여 연구하였다. 이용된 모든 지진에 대해서 ‘국지화 알고리즘’을 이용하여 진원 위치를 재결정하고 파선 밀도(ray density)에 따라 노드를 분배한 후에 사면체를 구성하고, LSQR (최소자승법)-알고리즘으로 역산하여 지각 내부 속도 구조를 결정 하였다(Paige Saunders, 1982; van der Sluis and van der Vorst, 1987). 본 연구에서는 획득한 결과의 안정성 및 신뢰성을 해석하기 위해 오차 및 해상도 분석을 하였다.

각 분석에 대해서 본 연구의 토모그래피 방법을 이용하여 분석한 핫가이도의 결과와 비교 분석 하였다. 이는 우리나라의 경우 현재까지도 데이터에서 여러 오차(관측소의 주행시간 보정 및 초기 진원위치 및 깊이의 부정확성 등)를 가지고 있지만, 일본의 경우 1962년부터 진원위치 오차 값이 ± 5 km에서 계산 되어지며 또한, 모든 관측소에 대해서 주행시간 보정이 되어있기 때문이다(Zhao *et al.*, 2002). 그러므로, 두 지역을 같은 방법을 이용함으로써 본 연구에 사용된 프로그램의 정확성, 안정성 그리고, 데이터상의 문제점을 비교 분석 할 수 있다.

2. 자료 수집 및 분석

이번 연구에서 일본의 핫가이도, 북한, 남한 3 가지의 데이터를 이용하여 결과를 도출하고, 비교 분석 하였다. 데이터는 지진 발생 후 관측소에 처음 도착한 P파와 S파의 위상을 이용하였으며(Pg, Sg, Pn 그리고 Sn), PmP, SmS는 모호면 반사파로서 모호 깊이 변화에는 민감한 결과를 주지만, 본 연구의 지각내의 3D 속도구조를 위해선 큰 영향을 미치지 못하므로 이용하지 않았다.

북한 데이터는 데이터 획득이 매우 어려우며, 그에 따라서 개수도 매우 적다. 그래서 여러 방법 및 관측망을 이용하여 데이터를 획득하였다. 북한 데이터는 LEDO (Lamont-Doherty Earth Observatory)에서 설립한 KEDO (Korean Peninsula Energy Development Organization)의 Sinpo 관측소(11/05/1995-12/31/1999), IRIS의 PASSCAL ARRAY, 북한과 중국에서 얻은 Bulletins, 그리고, 남한에서 관측된 자료들은 위상을 직접 읽어 획득 하였다. 본 연구에서는 217개의 관측소에 기록된 138개(M: 2.0-5.5)의 지진과 그에 따른 P파 704개, S파 614개, 전체 1318개를 이용하였다. 남한 데이터는 국지지진(M: 2.5-5.5) 375개에 대한 P파 2688개, S파 2416개, 그리고 전체 5104개가 본 연구에 이용되었다. 남한의 대부분 데이터는 KMA (기상청), KIGAM (한국 지질 자원 연구원)으로부터 획득 되었으며, 직접 위상을 읽어 데이터로 이용하였다. 이외에도 IRIS 관측소, ISC Bulletin, 북한을 포함한 일본, 중국의 데이터를 같이 이용하였는데 이는 동해, 서해 등 해양지역의 해상도를 높이기 위함이며, 하나의 이벤트에 대해서 관측소의 개수가 3개 이하이거나 관측소의 방향성이 좋지 않아, 진원 재결정시 오차가 커지거나, 재결정을 하지 못할 때를 대비해 데이터를 보완하기 위

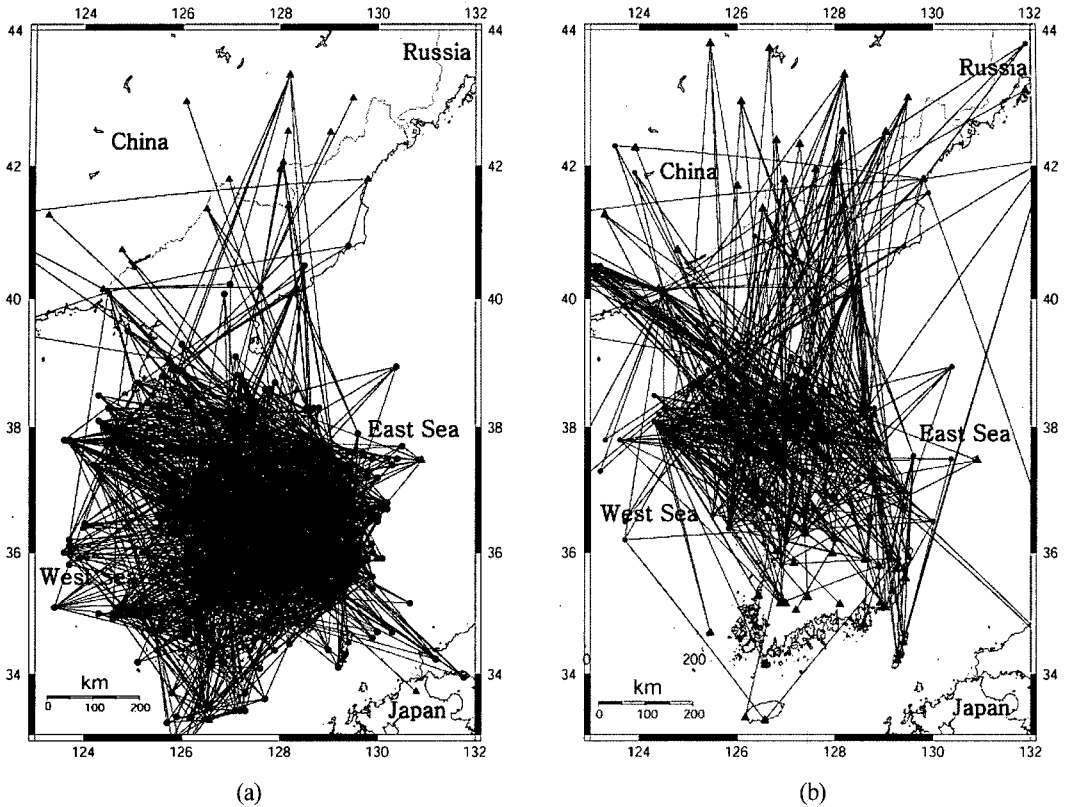


Fig. 3. Distribution of seismic stations (triangles) and local earthquakes (circles) and ray paths used for inversion in (a) Southern Korea and (b) Northern Korea.

함이다.

남한의 데이터도 훗가이도 데이터에 비해 북한과 마찬가지로 여러 오차를 포함한다. 우선 관측소의 주행 시간 보정이 부정확하며, 서로 다른 위상 읽기 프로그램(KMA: EAS, KIGAM: ANALYST)으로 진원시 및 P, S 도착시간에서 약간의 차이를 보였다. 이를 보정하여 사용하였으나, 정확성과 신뢰성은 떨어질 수밖에 없다. 하지만, 남한의 경우 하나의 event당 평균 관측소 개수가 12개이며, 또한 남한은 파선 밀도가 전체적으로 잘 분배되어 있어 좋은 토모그래피를 보여 준다. Fig. 3a와 3b은 이번 연구에 사용된 관측소의 위치와 이벤트 그리고, 파선 경로를 보여주고 있다.

우리는 간단한 연속적인 1-D 모델을 사용하였다 (Table 1). Level들 사이의 속도는 선형적으로 보간(interpolation)하였다. 초기 모델에서 남한의 경우 모호(Moho)면 깊이 32 km, 북한은 35 km로 고려하여 연구에 적용하였다 (Kim and Gao, 1997; Kim and Li, 1998a; Kim and Li, 1998b).

3. 역산 알고리즘의 기본 이론

본 프로그램은 3 부분으로 나뉜다. 1) 주행 시간 계산과 진원위치 재결정, 2) 각 4개의 그리드 방향(0° , 45° , 90° , 135°)과 레벨, 그리고 파선밀도에 따라서 노드의 위치를 결정하고 분배한 후 사면체를 구성하여 속도 이상에 대한 역산, 3) 각 방향에 대해 역산된 노드에서의 값을 거리 계수 값에 따라 평균화하여 영상화하였다. 본 프로그램의 처음 사용은(Kim and Shin, 2003) 지진 데이터 부족으로 잘 알려지지 않은 북한 지각구조에 적용해서 북한의 구조적, 지질학적 특성을 연구했다. 본 프로그램의 이점 중의 하나는 파선 밀도가 떨어지는 지역에 대해서, 각 그리드의 방향에 따른 노드 분포에 의한 속도 평균과 사면체 크기의 조절에 의해 이를 보완할 수 있게 하고, 파선 밀도가 많은 지역에 대해서 사면체를 더욱 세분화 하여 해상도를 높일 수 있다는 것이다. 본 프로그램은 미리 정의된 최소값보다 큰 진폭(amplitude)에 대해서 모든 가능

한 해를 구하도록 하였다. 여기서 진폭은 $Amp = dx/d\alpha$ 로서 $d\alpha$ 는 들어오는 파의 경사각(dipping angle)의 변화율을 dx 는 진앙거리 변화율을 나타낸다.

진원의 위치를 재결정하기 위해서 페르마의 원리(Fermat's principal)에 의한 j-th 지진의 주행시간의 오차(residual time)가 최소화 되는 지점으로 재결정 되도록 하였다(Pulliam *et al.*, 1993):

$$\delta T_j = T_j^{obs} - T_j^{cal} = \delta T_j^{hypo} + \delta T_j^{model} + \delta T_j^{station} \quad (1)$$

진원항은 4개의 요소로 되어있다:

$$\delta T_j^{hypo} = \partial T_j / \partial h_1 \delta h_{1j} + \partial T_j / \partial h_2 \delta h_{2j} + \partial T_j / \partial h_3 \delta h_{3j} + \partial T_j / \partial h_4 \delta h_{4j} \quad (2)$$

where

- δT_i i 선의 주행시간 보정($i=1, 2, \dots, m_i$);
- δh_{1j} j 번째 이벤트의 진원시 수정요소($j=1, 2, \dots, n_j$);
- δh_{2j} j 번째 이벤트의 위도(X) 수정요소;
- δh_{3j} j 번째 이벤트의 경도(Y) 수정요소;
- δh_{4j} j 번째 이벤트의 깊이(Z) 수정요소;
- m_j j 번째 이벤트의 도착시간 개수;
- n_e 데이터에서의 이벤트 개수.

행렬 표시는(matrix notation) 다음과 같으며,

$$T_j^{hypo} = H_j \delta h_j \quad (3)$$

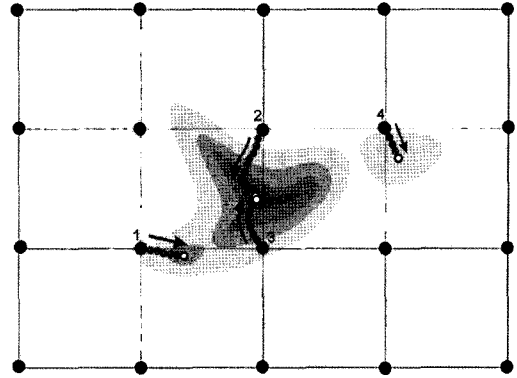


Fig. 4. The way of searching the best position for the hypocenter.

$H_j = \partial T_j / \partial h_l$ 은 잘못된 진원 위치의 편미분 행렬을 나타내고 ($l=1, 2, 3, 4$), δh_j 은 j번째 지진에 대한 진원 보정에 대한 벡터이다. 비선형적인 것을 선형화한 진원 결정 방법은 많은 방식으로 연구가 되어져왔다(Kim, 1978). 방정식에서 모델의 변수는 δT_j^{model} 로서 지구 구조에 의한 주요 perturbation인 속도모델에 의해 예측된 주행시간의 미분함수로 나타낼 수 있다.

$\delta T_j^{station}$ 은 관측 장비와 위상 읽기로 발생할 수 있는 오차에 의한 변수로서 나타낼 수 있다.

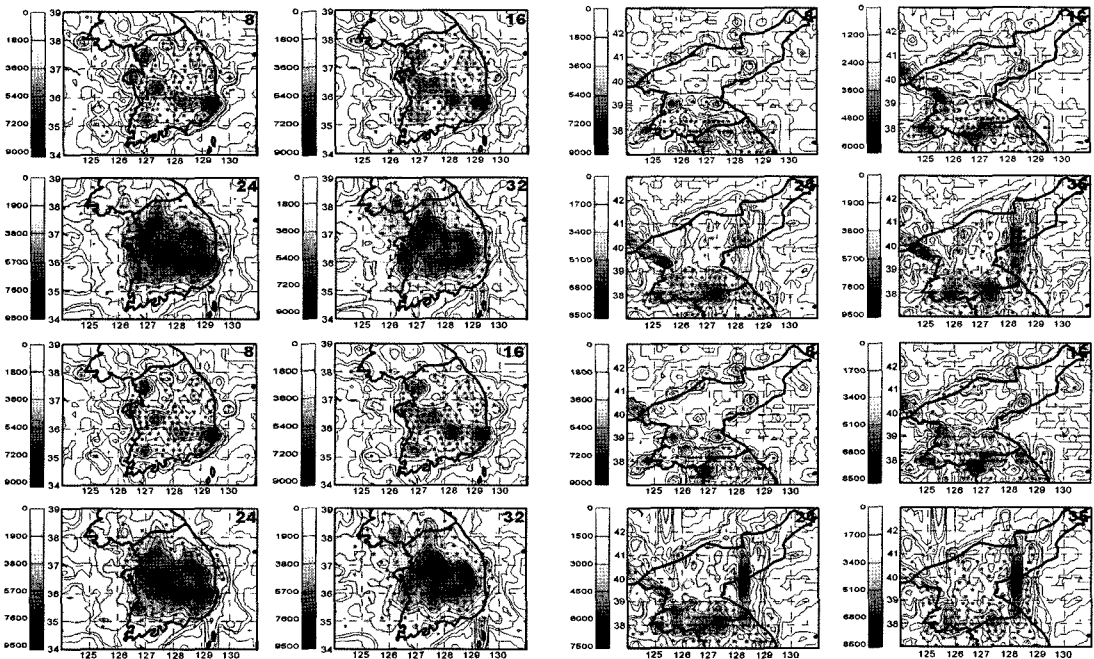


Fig. 5. Plots of the ray density at different depth levels and distribution of the parameterization nodes in (a) Southern part of the Korean Peninsula and (b) Northern part of the Korean Peninsula.

국지 지진 토모그래피는 진원과 모델 속도 결정의 동시 역산에 기초한다. 본 연구의 알고리즘은 주행시간의 오차(residual time)의 최소 절대값(least absolute values)은 l^1 -norm의 기준에 의거하여 최소화하였다 (Tarantola, 1987; Pulliam *et al.*, 1993). l^1 주행시간 오차의 최소화(residual norm minimization)는 데이터 분포가 l^1 norm이 위상 읽기 오차, 계측 오차, 진원 결정 오차와 같은 오차에 대한 민감도가 떨어지기 때문

에 Gaussian 보다 두개 양측지수(two-sided exponential)에 더욱 유사하다는 가정 하에 적용 되었다(Pulliam *et al.*, 1993).

$$\min[\sum_i^m |\sum_j^n (G_{ij}x_i - b_j)|] \tag{4}$$

m 은 파선 경로(ray path)의 개수를 나타내고, n 은 속도 블록의 개수, 또는 모델의 개수를 나타낸다. $G_{ij}x_i$ 와 b_j 은 주행시간 행렬의 예측 값과 관측 값을 나타낸

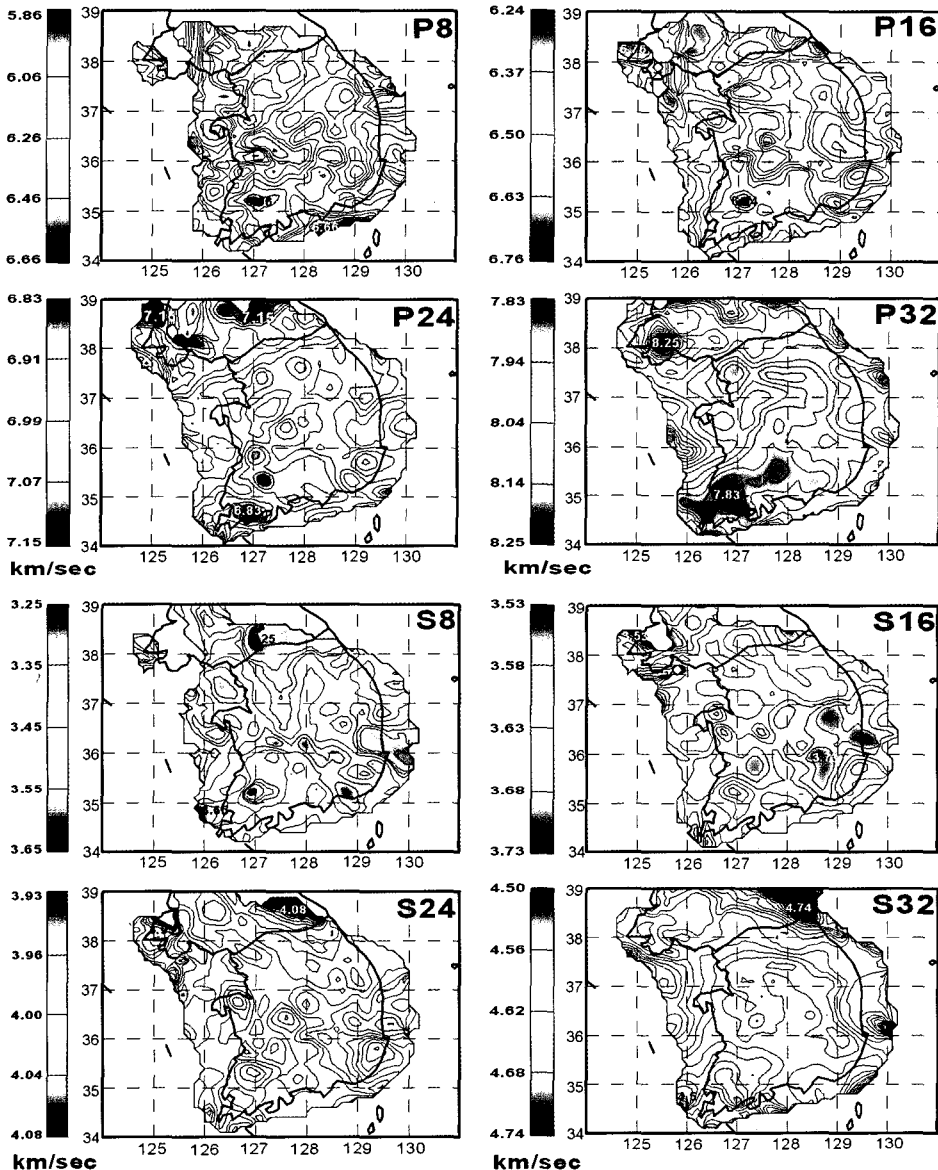


Fig. 6. P- and S-wave velocity anomalies for horizontal sections at different depth levels for Southern part of the Korean Peninsula.

다. Fig. 4에서 등고선은 진원 위치 값을 결정하는 방법을 보여준다. 최소값은 어두운 색으로 표시되었다. 초기에 진원 위치는 모델에서의 입력 데이터로부터 근사되었다. 실제적으로 진원위치 결정시 잘못된 최소값을 포함 할 것이다. 그런 경우를 피하기 위해서 Fig. 4로부터 1, 4번은 계산에서 제외하고, 2, 3번의 격자에서 계산 된 최소값만을 선택하였다. 정교한 진원 위치는 기울기 방법(*gradient method*)와 파선 경로 추적 알고리즘(*ray tracing algorithm*)을 이용하여, 하나의 진원에 대한 모든 파선 경로로부터 주행시간 오차를 최소 절대값(*least absolute values*)을 통해 최소화 하도록 계산 되어졌다. 진원 위치 재결정 후 주행시간 오차가 ($T^{obs} - T^{cal}$) 남한의 경우 ± 4 sec, 북한은 ± 5 sec, 일본의 홋카이도는 ± 7 sec 의 범위를 벗어나는 데이터는 제외하도록 하였다. 진원 재결정 후 노드를 파선 밀도(*ray density*)에 따라 각 레벨과 다른 방향에 대해서 분배 후 사면체를 구성하였다. 사면체를 통과하는 파선 경로에 대해서 연속적인 1-D 초기 모델(*reference model*)을 이용하여, 속도 기울기(*velocity slowness*)를 구한다. dV/dT_i (i 번째 파선의 주행시간에 대한 j 번째 노드에서의 속도 변위의 영향) 1차 미분 행렬은 이러한 값의 평균을 통해 사면체를 구성하는 각 노드에서의 속도 변위 값을 결정하고, 이를 역산하여, 상대속도(%)로 결과를 나타냈다. 사면체의 개수는 파선 밀도에 따른 노드의 수에 의해 결정되며, 한반도의 5개의 레벨(8, 16, 24, 32(35), 40 km 깊이)에 대해서 위와 아래로 레벨을 형성하여, 총 6개의 층에서 사면체를 형성한다. 단편(*segment*) dS 에서 i 번째 시간 지연은 j 번째 노드에서의 속도 변화에 기인하며 다음과 같이 계산된다.

$$dt_i = -\Delta V_j(s) ds / V^2 \quad (5)$$

V 는 파선의 한 점에서의 평균 속도이고, ΔV_j 는 j 번째 노드에서의 속도 변화량이다. 각 노드의 영향은 i 번째 파선을 따라서 적분 된다. 그리고, j 번째 노드에서 속도 변위에 의해 나누어진다. 파선경로에 대한 적분은 1차 미분 행렬의 A_{ij} 항들(*elements*)로부터 주어진다. 획득된 행렬은 변수의 개수와 진원의 개수가 동일한 세로 열을 가지며, 파선의 개수와 동일하다. l^1 norm 방법은 각 노드에서 상대속도를 결정하기위해 행렬에서 계산을 하는데 사용 되었다. LSQR (최소자승법) 방법은 행렬의 역산(*inversion*)을 푸는데 적용되었다(Paige Saunders, 1982; van der Sluis and van der Vorst, 1987).

이번 연구에서 사면체의 구성과 다른 방향($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)으로 역산과정을 이용한 기술은 파선 밀도와 방향에 따라 노드의 위치가 달라지게 되어 각각 결과에 영향을 미친다. 결과적으로 각 4개 방향으로 역산된 값이 가시화 과정에서 노드거리와 거리 계수에 따라 각 노드가 영향을 미치는 격자점에서 평균속도로 결정된다.

4. 토모그래피 결과 해석

한반도 지각의 구조적 특성을 알기 위해 국지 지진의 P파와 S파의 이론적, 실제적 주행시간의 차이를 이용하여, 진원 재결정을 하였다. 각 깊이의 속도 레벨위에 노드를 파선 밀도에 따라 위치 시켰으며(Fig 5a와 5b), 형성된 4면체를 통과하는 파선을 역산하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 7은 본 연구에 사용된 관측소, 주요 진앙지 및 수직 단면도 Profile을 보여준다.

3-D 토모그래피 결과는 수평성분(Fig. 6)과 수직성분(Fig. 8-12)으로 나타났다. Fig. 6은 4개(8, 16, 24, 32(35) km)의 깊이에 대해서 P파와 S파의 수평 속도 토모그래피 이상을 보여준다. 특히 전라남도, 경상도 지역의 8-16 km 에서의 높은 S파 속도 이상대는 옥천벨트

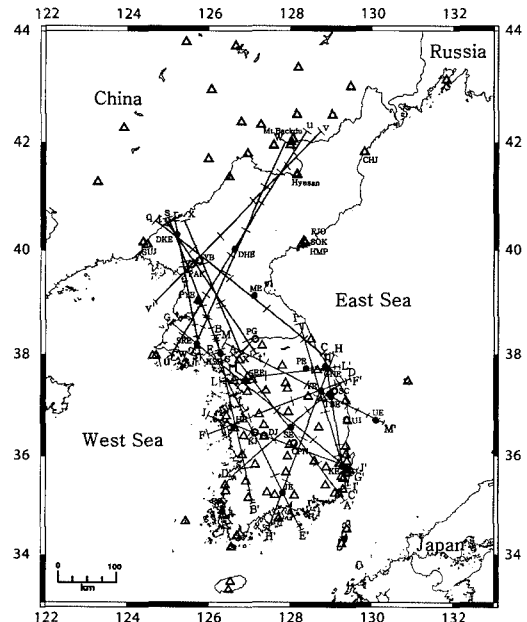


Fig. 7. 20 Profile lines for P and S-wave velocity anomalies at the vertical cross sections in the Korean Peninsula.

와 영남육괴의 경계부근으로서 추측되며 이것에 대한 확인은 더 연구가 필요하다고 본다. Fig. 8-12으로부터 진원 지역과 퇴적 분지의 속도 이상에서 VRD (V_p/V_s ratio discrepancies, V_p/V_s 비율의 차이)와 높은 V_p/V_s 를 찾을 수 있었다. VRD는 홍성, 영월, 서울, 경주, 태백, 울진, 개성, 대관, 대흥 그리고 평창 지진에서 20 km 깊이 이하의 상부지각(<20 km)에서 나타났으며, 속리산, 사리원, 지리산 지진과 추가령 구조곡(CRZ), 아산-온양 지역에선 모호면 깊이에서 나타났다. 높은 V_p/V_s

V_s 의 VRD는 구조운동이 있던 지역에 단층과 파쇄대가 존재하고, 원생수(connate water)가 포화되어 있다가 지진이 발생한 후 탈수화 작용이 발생했음을 지시하며, 결과적으로, 지층의 전단 계수(shear modulus)를 감소시킨다(Zhao *et al.*, 2002; Catchings, 1999). 높은 V_p/V_s 는 원생수 또는 액체와 관련된 불균질한 지질학적 구조를 의미하고, 대부분의 지진은 높고 낮은 VRD 사이에서 발생한다. 또한, 본 연구결과에서 대부분 진원 지역에서 나타난 VRD는 유체 외에도 수직적

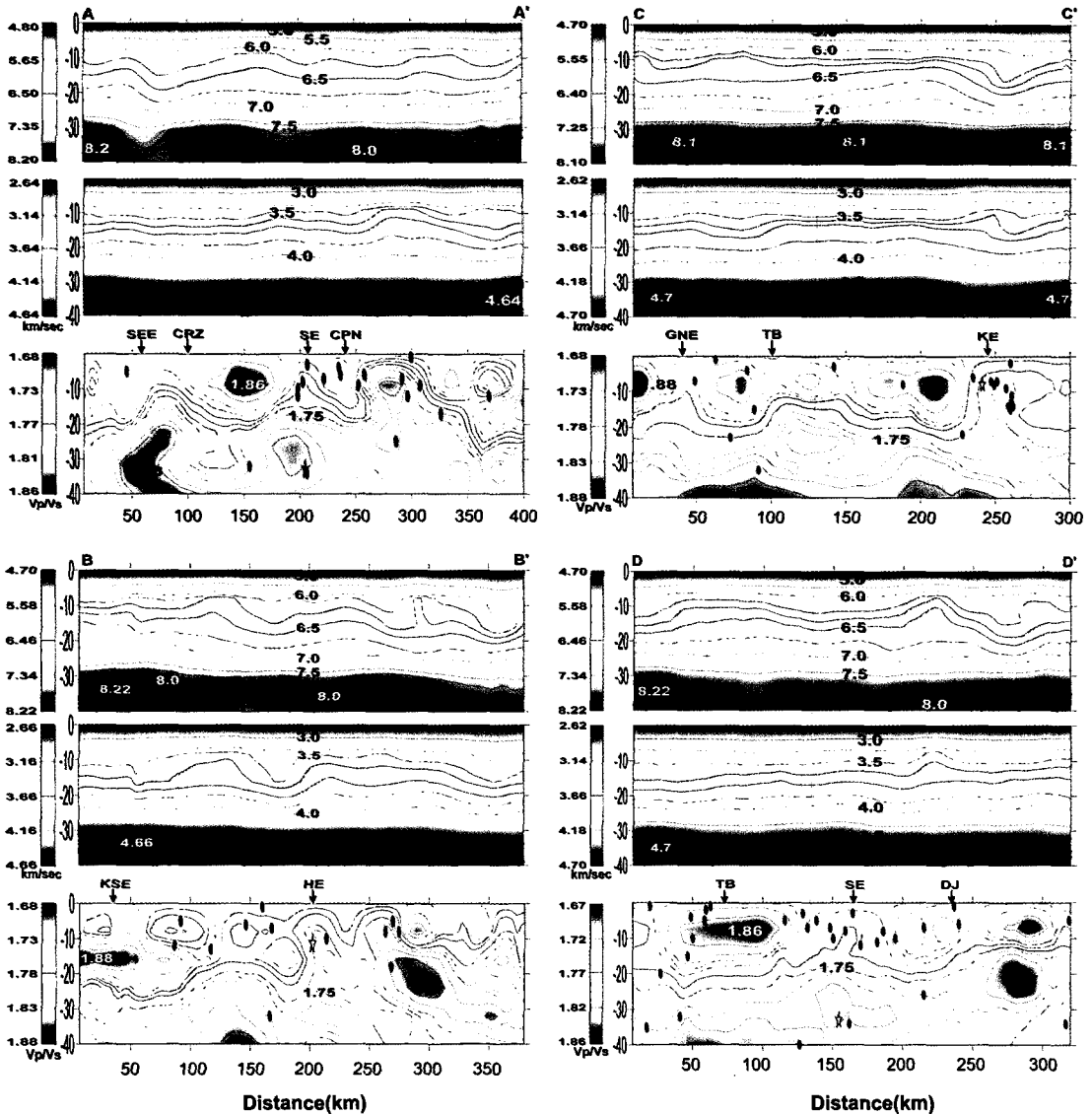


Fig. 8. Vertical sections of P and S-wave velocity anomalies along A-A', B-B', C-C' and D-D'. SEE, SE, KSE, HE, GNE and KE denote Seoul, Mt. Songni, Kaesong, Hongsung, Gangneung and Kyongju earthquakes. CRZ, CPN, TB and DJ stand for Chugaryong Rift Zone, Chupoongryong, Taeback and Daejon, respectively.

으로 단층대가 존재함으로써 물리적 상태의 변화에 따른 속도와 V_p/V_s 가 변화함으로써 나타난 것으로 고려된다(Catching *et al.*, 2002).

영월과 문천 지역에서 크기가 다른 VRD를 찾을 수 있었다. 이는 작은 크기의 새로운 지진이 발생함으로써 나타난 결과로 고려되어진다. 지진 발생지역에서의 VRD는 최근지진 뿐만 아니라 역사지진(Chiu and Kim, 2004)에서도 일치함을 나타냈다(Table 2와 3 참조).

주요 계기지진 (별표)과 사용한 모든 계기 지진(흑점)

을 표시한 단면도의 수직 토모그래피 결과를 Fig. 8, 9, 10, 11, 그리고 12에 나타냈다.

지리산 지진(JE): Profile(E-E'), (H-H')

속리산 지진(SE): Profile(A-A'), (D-D'), (E-E')

사리원 지진(SRE): Profile(r-r'), (w-w')

홍성 지진(HE): Profile(B-B'), (F-F'), (J-J')

경주 지진(KE): Profile(C-C'), (G-G'), (I-I'), (J-J')

영월 지진(YE): Profile(F-F'), (H-H'), (I-I'), (M-M')

울진 지진(UE): Profile(M-M')

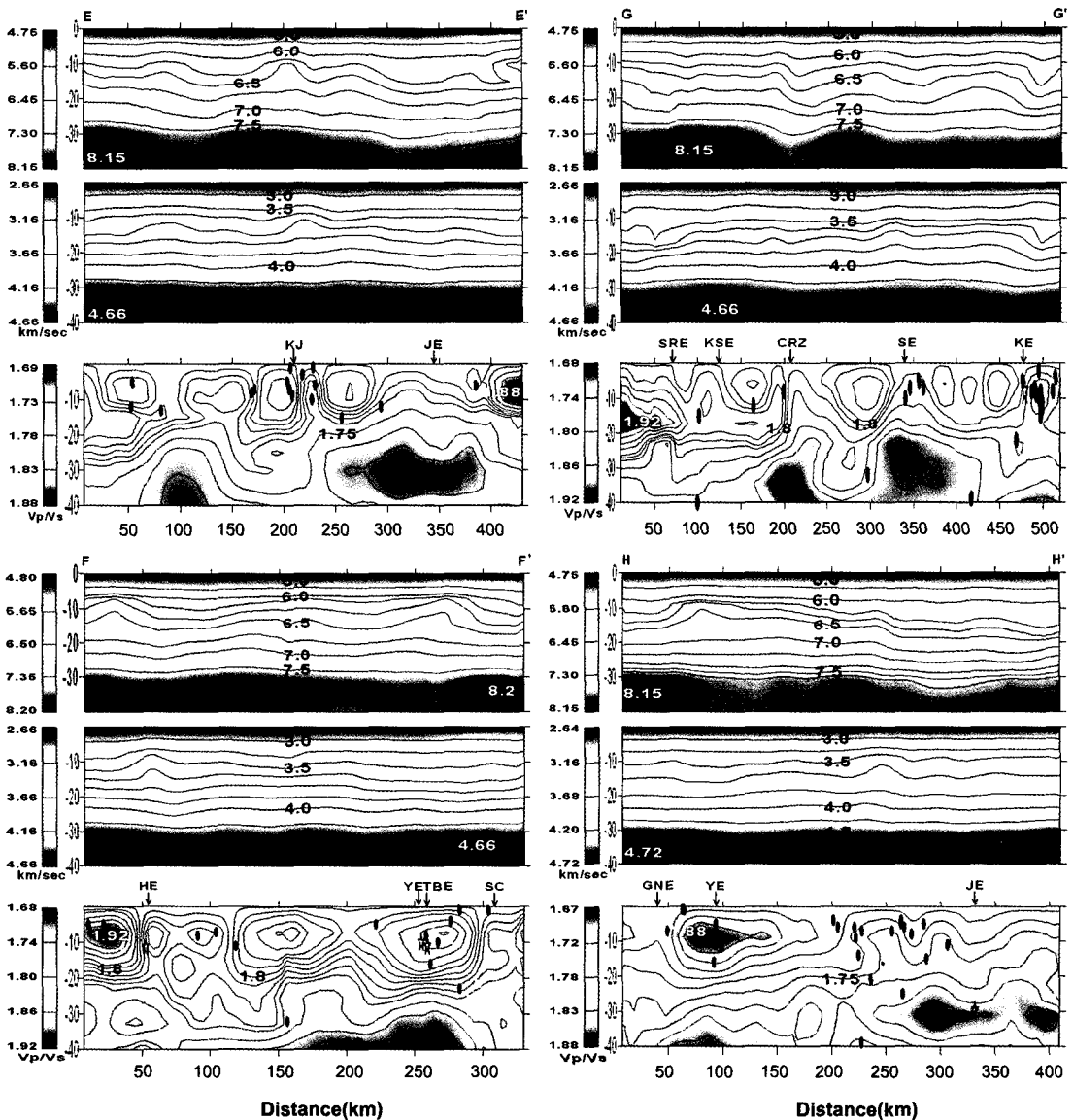


Fig. 9. Vertical sections of P and S-wave velocity anomalies along E-E', F-F', G-G' and H-H'. JE, YE, TBE and SRE denote Mt. Jiri, Youngwol, Taeback and Sariwon earthquakes. KJ and SC stand for Kongju and Samchok, respectively.

대관 지진(DKE): Profile(q-q'), (r-r'), (s-s'), (t-t'), (w-w')

대흥 지진(DHE): Profile(w-w')

이외에 역사지진(SEE, GNE, KSE, PYE, PE 등)의 진원위치는 표시되지 않았지만 Profile에 표시되어 있다. 대부분 지진의 진원은 높고 낮은 VRD 사이에서 많이 나타남을 알 수 있다. 그러나 심부층 지진, 지리산, 속리산 및 사리원 지진들은 낮은 VRD에 진원이

있음을 알 수 있다. 이것은 하부지각에서는 지진 발생 후 탈수작용의 영향이 거의 없는 것으로 추정된다. 그리고 하부지각에서 낮은 VRD는 감람암(peridotite)이나 두나이트(dunite) 같은 초고철질암 혹은 초염기성암(ultramafic rock)에 의한 것으로 추정된다. Profile(C-C')와 (I-I')에서 높은 Vp/Vs 비율이 경상분지 주변 10 km 깊이에서 나타났다. 그러나 영일분지에서는 낮은 Vp/Vs가 나타났는데, 이것은 이곳이 화산 쇄설암

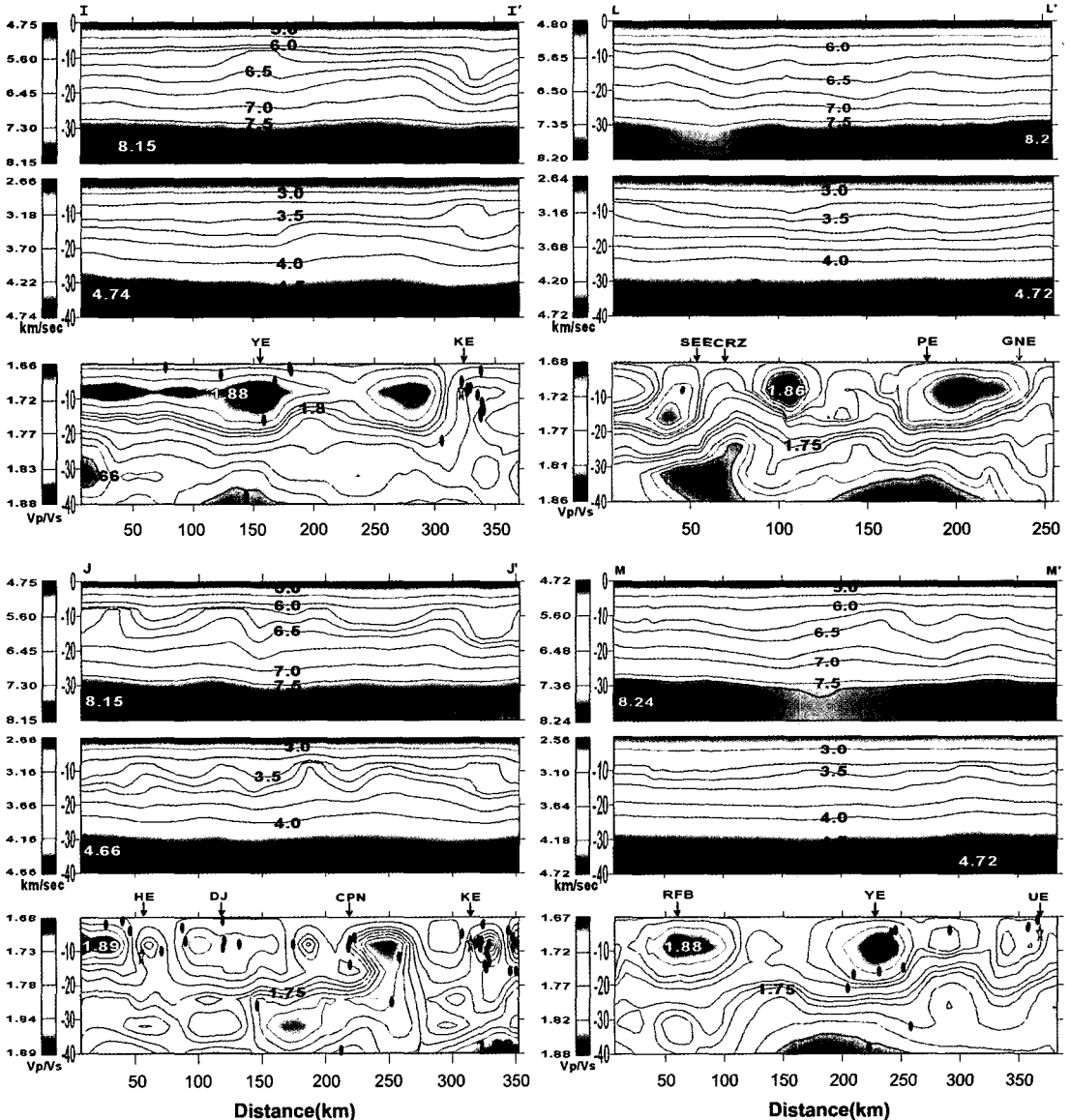


Fig. 10. Vertical sections of P and S-wave velocity anomalies along I-I', J-J', L-L' and M-M'. PE and UE denote Pyongchang-Hoengseong and Ulsjin earthquakes. RFB stands for Rimjingang Fold Belt.

(volcanic clastic rocks)으로 구성되어 있기 때문이다. 이 결과는 높은 중력이상(Bouguer anomalies)과 일치한다(Cho *et al.*, 1997; Choi *et al.*, 1999). Fig. 10의 Profile(L-L)에서 역사지진 PE (평창-횡성 지진)과 GNE (강릉 지진)에 매우 높은 VRD가 나타남을 알 수 있다(Table. 2).

Fig. 11와 12의 랑남 육괴(Rangnim Massif)를 관통하는 Profile(r-r'), (s-s'), (t-t'), (w-w'), 그리고 (x-x')에서 각각에는 비교적 높은 VRD를 보여주었다. 이것은

랑남 육괴가 심부층으로부터 수직운동으로 침투한 고철질암(mafic rock) 혹은 초고철질암(ultramafic rock)으로 이루어진 시생대 습곡(Archean folding)으로 된 것임을 말한다. 그러나 Profile(q-q')과 (x-x')의 연변지역 혹은 (r-r'), (s-s'), (t-t') 그리고 (v-v')의 10-15 km 깊이에서 낮은 VRD가 발견 되었다. 이것은 랑남 육괴가 시생대-초기 하부 원생대 육괴 습곡(Archean-early Lower Proterozoic Massif folding)의 수직운동으로 상부로 침투하는 고철질암, 초고철질암이 상부층 퇴적

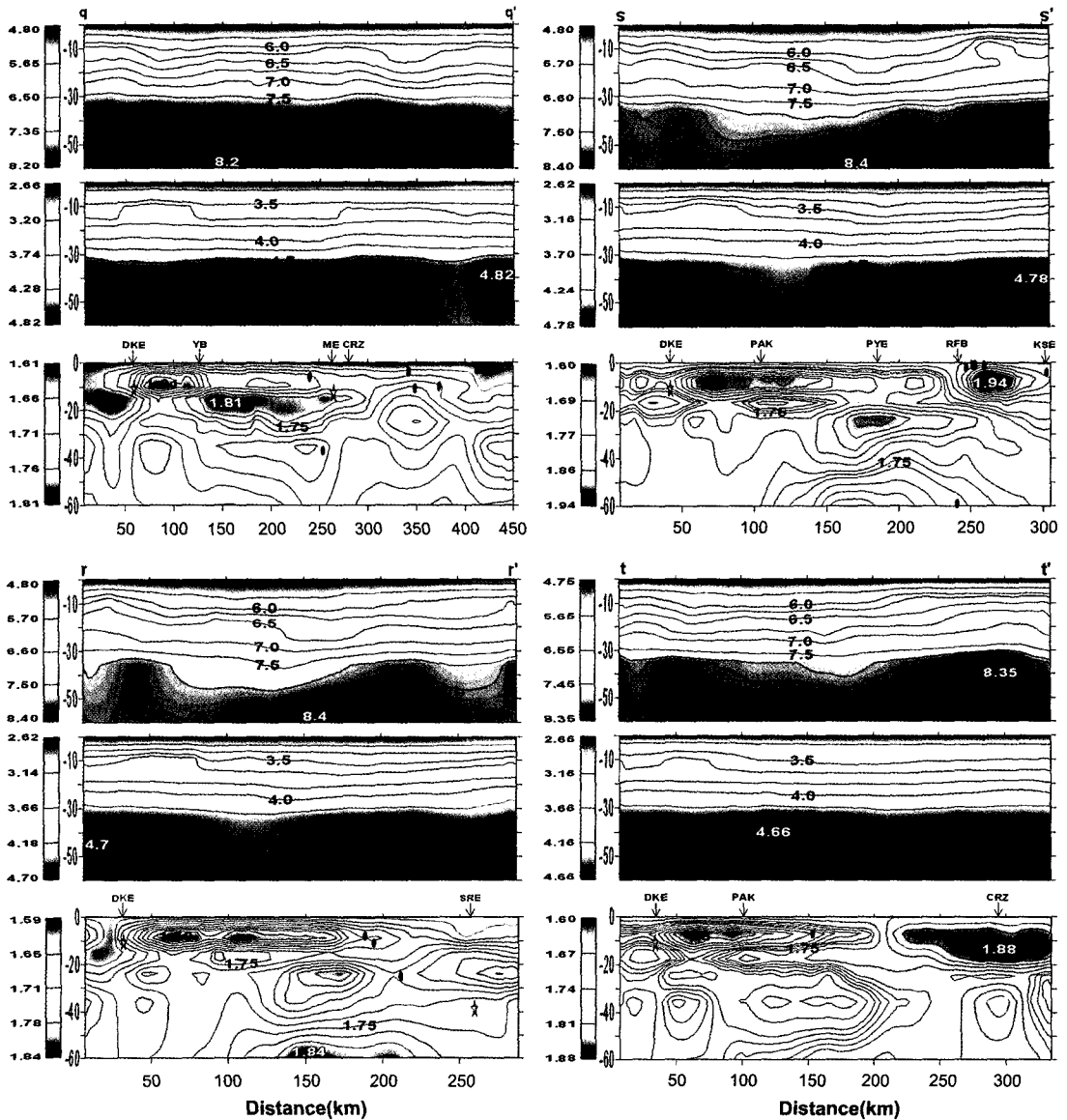


Fig. 11. Vertical sections of P and S-wave velocity anomalies along q-q', r-r', s-s', and t-t'. DKE, ME and PYE denote Daekwan, Moonchon and Pyongyang earthquakes. YB and PAK stand for Yongbyon and Pakchon, respectively.

암(사암) 일부가 접촉하면서 고온, 고압의 영향을 받아 규암(quartzite)의 변성암으로 이루어진 층으로 추정된다(Table 3).

용진 분지내의 사리원 지역은 Profile(w-w')와 (r-r')에서 모호 불연속면(Moho discontinuity)이 50 km 깊이까지 함몰되어 있음을 알 수 있다. 이전 연구(김상조, 1983)에서 1982년 2월 14일에 일어난 사리원 지진의 진원 깊이가 55 km 이하라는 결과와 일치한다.

Profile(u-u')과 (w-w')에서 백두산 지역은 심부 35-

40 km에서 높은 V_p/V_s 가 나타났다. P파는 35 km 이하에서 45 km 깊이까지 높은 속도를 나타내며, 45 km 이하에서는 속도가 감소하였고, S파는 35 km 깊이부터 점점 낮은 속도를 나타냈다. 이것은 마그마가 허부에 부분 용융상태로 존재한다는 것을 의미한다(Fig. 12). Profile(u-u')과 (v-v')에서 혜산, 삼수 부근 40 km 깊이에 높은 VRD가 나타났는데 이것도 부분용융상태로 추정된다.

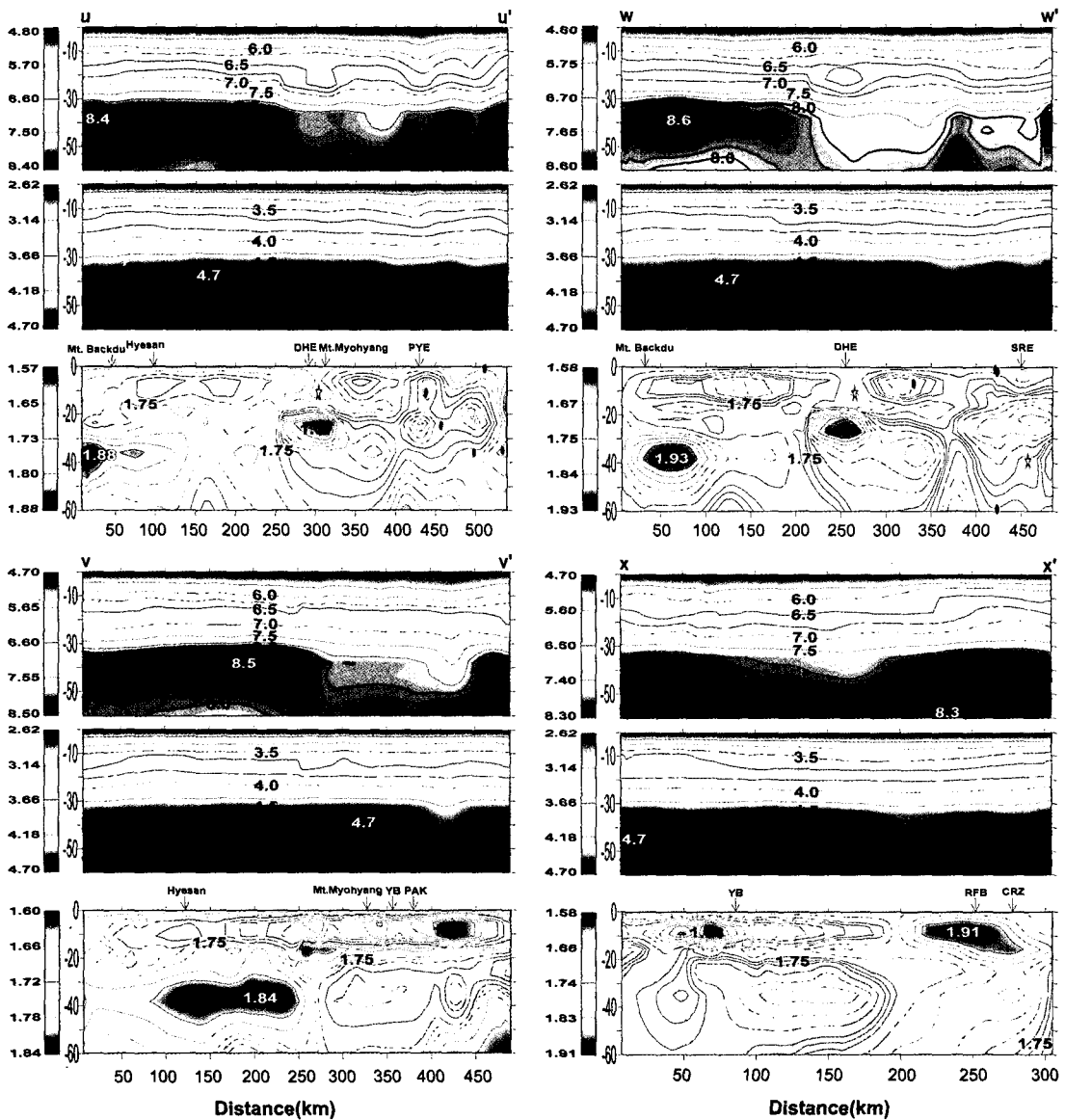


Fig. 12. Vertical sections of P and S-wave velocity anomalies along u-u', v-v', w-w', and x-x'. DHE stands for Daehung earthquake.

5. 오차 및 해상도 분석

이번 연구에서 본 프로그램 및 데이터의 안정성을 분석하기 위해, 1) 데이터 오차 분석, 2) 체커판 실험 (Checkerboard Test), 3) 해상력 (Resolvability)을 수행하였고, 양과 질이 매우 우수한 훗가이도 데이터와 비교 분석하였다.

본 남·북한 연구에서 사용된 초기 입력 데이터의 진원 정보는 다소 부정확하며, 특히 진원 깊이에 대해서는 정보가 전혀 없다. 그래서 모든 진원 깊이는 남한의 경우 10 km, 북한의 경우 15 km로 일정하게 한 후 진원재결정을 하고, 역산하여 값을 도출하였으며 결과적으로 훗가이도와 비교해서 RMS 값이 크게 나왔다 (Fig. 15). 또한, 해양 및 북한에서 발생한 지진의 경우 관측소의 부족과 방향성이 좋지 않아 평균 오차 값이 더욱 커졌다. 결과적으로 역산 과정에서 세 번의

반복 후 P파와 S파의 경우 RMS가 약 1초의 값을 나타냈다. 북한은 P파와 S파 모두 1초보다 큰 RMS 값을 나타냈으며, 훗가이도는 P파는 0.473초, S파는 0.734초의 RMS를 나타냈다 (Fig. 15). 이러한 결과는 다른 진원 토모그래피의 결과와 매우 비슷하다 (Thurber *et al.*, 1995; Zhao *et al.*, 2002; Kim, 2003).

한국 지진의 진원 위치의 부정확성과 다른 여러 요인(위상 읽기 오차, 주행시간 보정의 부정확성 등)으로 인해 훗가이도와 비교해서 수평거리 오차에서 더 큰 오차 값을 나타냈으며, 진원깊이 오차는 구하지 못하였다 (Fig. 14). 훗가이도의 경우 진원 깊이와 수평위치에서 재결정된 후에 수평거리는 0-9 km, 수직거리는 0-10 km의 오차를 나타냈다. 남한의 수평 위치 오차는 약 0-28 km를 북한은 약 0-48 km를 나타냈다 (Fig. 14). Fig. 13은 재결정된 진원 위치로부터의 이론적 시간과 실제 관측시간의 차이를 진양거리에 따라 분포도로 나타낸 것이다. 남한과 북한의 경우 약 4 sec의 범위까지 산란된 양상을 보여 주고 있다. 일반적으로 진양거리가 멀어질수록 데이터의 정확성이 좋지 않음을 고려할 때, 훗가이도는 한반도에 비해서 좋은 분포

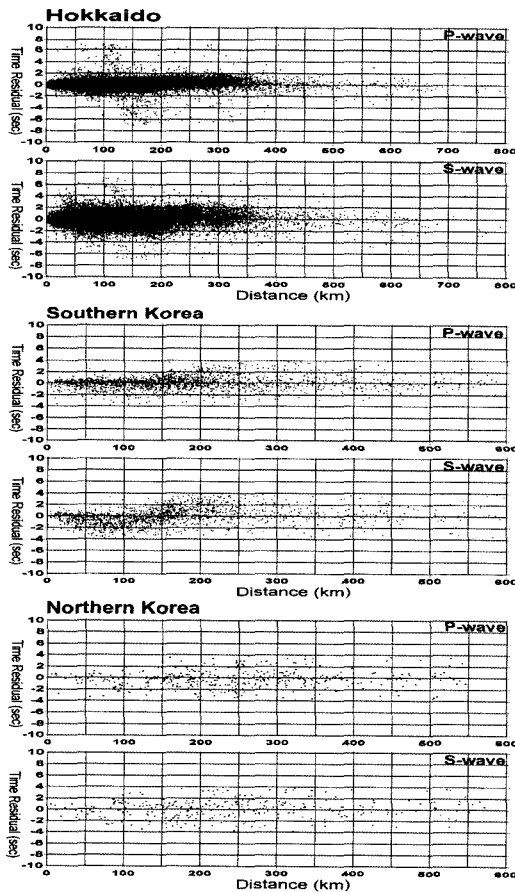


Fig. 13. Travel time residuals as function of epicentral distances.

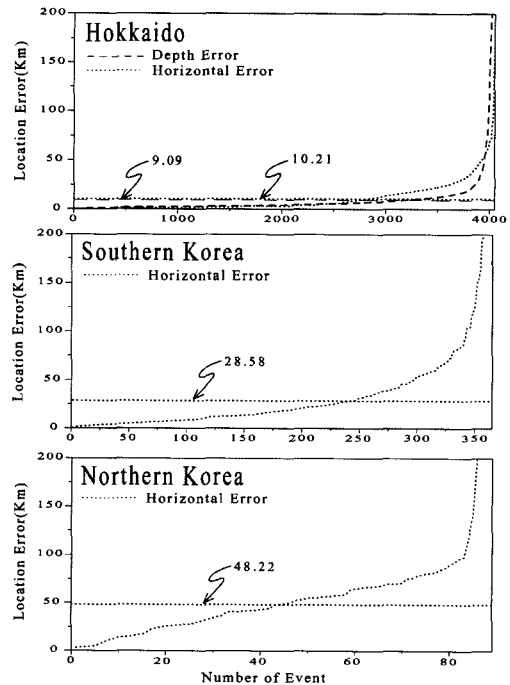


Fig. 14. Location errors after relocation for P and S-wave data of Hokkaido, Southern and Northern parts of the Korean Peninsula.

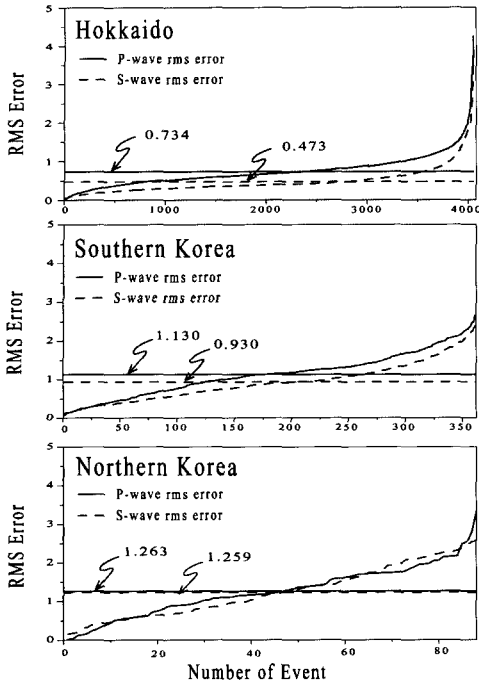


Fig. 15. RMS errors of inversion for P and S-wave data for Hokkaido, Southern Korea and Northern Korea.

를 보여준다. 지진 주행시간 토모그래피의 결과를 해석할 때 속도 해상도는 잘못된 해석을 피하기 위해 필요하며, 특히 데이터가 실제로 비균질한 그리드, 이방성(anisotropic)을 갖는지에 대해서 알 필요가 있다(C. A. Zelt, 1998). 속도 해상도(velocity resolution)는 실험에서 임의의 공간상을 지날 때 속도는 바뀌게 되며, 이를 계산하기 위해, 최종 모델(final model)에서 각 노드에서의 속도 해상도 측정이 필요하다.

데이터에 의한 최소화된 구조 모델과 규칙적인 역산을 통한 토모그래피 방법은 해상도 실험의 부분으로서 사용된다(Zelt & Barton, 1998). 해상도 방법은 흔히 'Checkerboard Test'라 불리우며, 이 실험은 최종 모델에 (-)와 (+)로 바뀌는 속도 유형을 첨가하고, 알고 있는 데이터에 의한 파선 적용범위(ray coverage)의 값을 포함한다. 적용범위(Ray coverage)가 국지 구조의 해상도에 대해 불충분 할 때 수평적으로 균질하게 smooth하게 되는 규칙화가 적용 된다(Zelt & Barton, 1998). 측정은 산출된 모델(recovered checkerboard model)에서 각 노드에 이상 유형이 얼마나 잘 회복(recovered)되었는지에 의해 결정된다.

체커판 실험(Checkerboard test)은 흔히 토모그래피 연구에서 모델 해상도를 평가하기 위해 사용된다(Fig.

16a). 세부적인 실험 방법은 다르지만, 이번 연구에 사용된 방법과 대부분이 비슷하다. 알려진 모델로부터의 이론적 데이터(synthetic data)는 최종 모델(final model)에 (-)와 (+)의 속도 유형이 첨가되어 구성된 모델을 통하여 최종 모델을 획득에 사용했던 똑같은 방법으로 역산된다. 산출된 모델을 양적으로 평가하기 위해 최종 모델과 산출된 모델의 이상 사이의 유사성(semblance)은 각 모델 노드의 중심에서 반경 20km로 (x, y)-수평면에서 원형 오퍼레이터(circular operator)를 사용하여 계산 되어졌다. 반경 20km는 본 연구(홋카이도와 남한)에 사용된 그리드 크기와 동일하다. 유사성은 해상력으로서 말하기도 한다(Fig. 16b).

해상력, R은

$$R = \frac{\sum_{j=1}^M (V_{ij} + V_{ij}')^2 / 2}{\sum_{j=1}^M (V_{ij}^2 + V_{ij}'^2)} \quad (6)$$

로서 표현되고, V_{ij} 및 V_{ij}' 는 각각 실제 속도 이상과 회복된 속도 이상을 M은 노드의 개수를 나타낸다. 즉, R은 j 번째 노드에서의 원형 오퍼레이터(반경 20 km) 내의 실제 속도와 회복된 속도 이상을 나타낸다. 0.7이상의 해상력은 실험적으로 해상도가 좋은 체커판(checkerboard) 구조를 나타낸다.

본 연구에서는 홋카이도와 남한에 대해서만 체커판 실험과 해상력 값을 구하였다. 북한은 데이터의 개수가 두 지역에 비해 매우 적으며, 정확성과 파선 밀도도 떨어지기 때문에 그 신뢰성을 기대하기 어렵다.

남한은 전체적으로 P파와 S파 모두가 중부지방에서 가장 높은 파선 밀도와 해상도를 보여 준다(Fig. 16a와 16b). 경기육괴 지역인 임진강 습곡 단층대는 8 km에서 낮은 해상도를 나타내는데 이는 북한이나 남한에서 지진이 발생을 하더라도 관측소가 부족하고 데이터를 얻기가 어려워 파선 밀도 및 진원 재결정시 정확성이 부족하기 때문이다. 그러나, P_g나 S_g와 같은 직접파는 적지만 철원, 서울, 백령도, 문산, 속초, 간성, 춘천, 대관령 등 북쪽에 위치한 관측소로 인해 굴절과 데이터는 직접파에 비해 많은 편이다. 그래서, 결과적으로 P파의 경우 16-32 km 까지 S파는 32 km에서 좋은 해상도를 나타냈다. 한반도는 내륙에 비해 바이칼-코리아 판(Kim *et al.*, 2004)의 영향으로 서해 및 동해와 같은 해양에서도 많은 지진이 발생한다. 하지만, 관측소의 부족 및 시간 보정이 제대로 이루어지지 않아 정확한 진원 결정이 어려우며, 그로 인해 해양에서의 해상도가 내륙에 비해 좋지 않은 결과를 나타냈다.

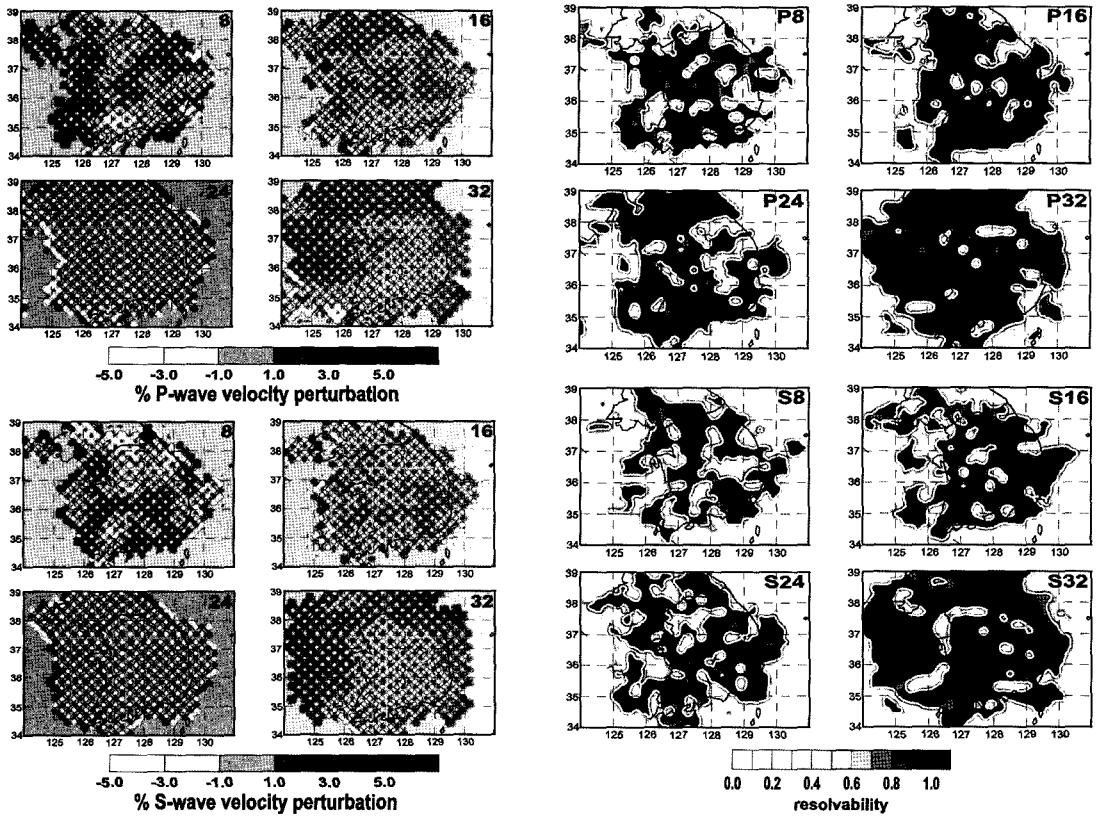


Fig. 16. (a) Recovered checkerboard models of P and S-wave data for Southern Korea. (b) Corresponding resolvabilities for Southern Korea. The white curves contour the zones in which resolvability values are greater than 0.7.

6. 결론 및 논의

이번 연구는 이전의 국지 토모그래피 연구들에 비해 좋은 해상도를 보여주며 이전 연구지역보다 넓은 지역을 포함 한다(Kim and Li, 1998a; Kim and Li, 1998b; Catchings *et al.*, 2002). 이번 연구에서 VRD는 한반도의 북한과 남한에 대해서 결정 되었다. 모든 이벤트의 진원위치는 초기 진원깊이가 남한의 경우 10 km, 북한은 15 km로 고려하여 재결정 되었으며, 그로인해 높은 RMS 오차를 나타냈다. 남한에서 P파와 S파 주행시간은 3번의 반복을 통해 산출 되어졌다. 그 결과 다른 지역의 토모그래피 연구와 일치함을 알 수 있었다(Zhao *et al.*, 2002; Kim, 2003).

VRD는 진원의 물리적 변화가 있음을 나타낸다. 높은 V_p/V_s 비율은 화강암 지역의 단층 및 파쇄대가 포함되어 있다가 지진이 발생한 후 탈수작용이 일어났음을 지시 한다(Table 2 와 3 참조).

이번 연구에서 높고 낮은 V_p/V_s 비율의 경계면에서

진원이 존재한다는 것은 매우 중요하다. TBE, HE, ME, GNE, SEE, YE 그리고 KE(Fig. 8-12 그리고 Table 2)와 같은 대부분의 지진에 대해서 높은 VRD의 경계면의 깊이는 20 km 깊이보다 더 얕은 깊이에서 나타났다. SE, JE, SRE의 경우만 하부지각 또는 모호면 깊이에서 VRD가 나타났다. Profile(u-u'), (v-v') 그리고 (w-w)에서 마그마 방이 존재하는 북한의 백두산과 해산지역에서 높은 VRD에 의한 경계면을 40 km 깊이 아래에서 찾을 수 있었다. 또한, 대관(DKE), 대흥(DKE) 지진의 진원에 대한 VRD를 깊이 10km에서 찾을 수 있었다(Fig. 11과 12).

이번 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) P파와 S파의 속도 이상은 과거 지진의 진원을 포함하는 지진의 진원에 대해서 높은 VRD로 나타났다. 대부분의 지진은 높은 VRD의 경계면에서 발생하였으며, 이것은 구조력을 받는 지역에 존재하는 많은 단층과 파쇄대가 원생수에 의해 포화되어 있다가 지진 발생 후 탈수 작용(dehydration)에 의한 것임을 지시하

Table 2. High Vp/Vs ratio discrepancies (VRD) for hypocenters in Southern Korea.

Profiles	Region	Date	Location		M
A-A'	Mt. Songni E.(SE)	09/16/1978	36.6	127.9	5.2
	Seoul(SEE)	07/02/1518	37.6	126.9	6.7
B-B'	Hongsung E.(HE)	10/07/1978	36.6	126.6	5.0
		07/20/1594	36.5	126.6	6.5
C-C'	Kyongju E.(KE)	06/26/1997	35.8	129.3	4.2
		07/23/1036	35.9	129.3	7.0
D-D'	Youngwol E.(YE)	12/13/1996	37.2	128.8	4.8
	Mt. Songni E.(SE)	09/16/1978	36.6	127.9	5.2
E-E'	Mt. Jiri E.(JE)	07/04/1936	35.2	127.6	5.3
	Hongsung E.(HE)	10/07/1978	36.6	126.6	5.0
F-F'		Youngwol E.(YE)	07/20/1594	36.5	126.6
	Taeback E.(TBE)	12/13/1996	37.2	128.8	4.8
G-G'	Mt. Songni E.(SE)	01/14/1999	37.0	128.8	3.3
	Ulsan	09/16/1978	36.6	127.9	5.2
H-H'	Mt. Jiri E.(JE)	07/24/1643	35.5	129.3	6.7
	Youngwol E.(YE)	07/04/1936	35.2	127.6	5.3
I-I'	Gangneung E.(GNE)	12/13/1996	37.2	128.8	4.8
	Kyongju E.(KE)	06/17/1681	37.8	128.8	6.8
J-J'	Pyongchang E.(PE)	06/26/1997	35.8	129.3	4.2
	Hongsung E.(HE)	07/23/1036	35.9	129.3	7.0
K-K'	Pyongchang E.(PE)	06/17/1681	37.8	128.8	6.8
	Ulsan	10/07/1978	36.6	126.6	5.0
L-L'	Kyongju E.(KE)	07/20/1594	36.5	126.6	6.5
	Ulsan	06/26/1997	35.8	129.3	4.2
M-M'	Gangneung(GNE)	07/24/1643	35.5	129.3	6.7
	Pyongchang(PE)	06/17/1681	37.8	128.8	6.8
N-N'	Pyongchang(PE)	07/21/1527	37.7	128.4	5.0
	Youngwol E.(YE)	12/13/1996	37.2	128.8	4.8
O-O'	Uljin E.(UE)	05/29/2004	36.8	130.2	5.2

며, 결과적으로 이것은 전단계수(shear modulus)를 감소시킨다. 일반적인 유형의 진원은 진원에서의 부피와 전단 파쇄대(shear fracture) 그리고 강성률(rigidity)의 변화를 포함하는 모멘트 텐서(moment tensor)에 의해서 표현될 수 있다.

2) Profile(r-r'), (s-s'), (t-t'), (v-v') 그리고 (x-x')에서 개마고원(평안도와 자강도 지역)의 10-15km 깊이 까지 낮은 VRD가 나타났다. 이는 높은 전단 계수(강성률)를 갖는 심부층 암석, 고철질암(mafic rock)이나 초고철질암 즉 초염기성암이 심부지각으로부터의 올라와 시생대 습곡을 형성함으로써 나타난 결과로 고려된다. 즉 심부층 암석 고철질암 또는 초고철질암이 수직운동으로 침투하며 올라오면서 상부층의 퇴적암(사암)에 접촉하면서 이것이 고온, 고압으로 인해 변성암으로 변화한 규암(quartzite) 층으로 간주된다. 왜냐하면 규암은 Poisson 비율이 최소이기 때문에 Vp/Vs 비율은 크게 떨어진다. 초염기성암은 Andol Complex에서 찾을 수 있었다. 그리고, 다이아몬드를 포함하지 않는 킴블라이트(kimberlite)는 박천과 기성지역에서 찾을 수 있었다.

산동과 요녕성을 덮고 있는 한-중 대륙괴(Sino-Korean craton)의 산동과 랑닝 육괴 지역에서는 다이아몬드가 없는 킴블라이트가 발견되었다(Kharkiv *et al.*, 1997).

3) Profile(u-u'), (v-v') 그리고 (w-w')에서 부분 용융의 마그마 방이 존재하는 북한의 백두산과 혜산지역에서 높은 VRD에 의한 경계면을 40 km 깊이 아래에서 찾을 수 있었다. 이것은 이 지역 아래에 정지기에 있는 휴화산의 존재 가능성을 의미한다.

4) 15 km 깊이까지의 높은 VRD와 지각 하부 층에 나타난 낮은 VRD는 추가령 구조곡(CRZ)을 따라서 나타났다. 이는 상부지각에 많은 단층과 파쇄대가 존재하고 원생수로 포화되어 있음을 나타내며, 하부지각에서는 낮은 VRD는 감람암(peridotite)이나 두나이트(dunite) 같은 초고철질암에 의한 것으로 추정된다.

결과적으로, 지각에서의 높은 VRD의 측정은 지진위험도와는 관련이 적은 진원의 단층대가 존재함을 찾는 데 유용할 것이다(Catchings, 1999). Vp/Vs 비율 차이

Table 3. VRD for hypocenters and postvolcanic areas in Northern Korea.

Profile Lines	Anomalous Region	Date	Location		M	Remark		
			Lat	Long				
q-q'	Daekwan E. (DKE)	01/08/1980	40.2	125.0	5.3	High VRD of DKE at a depth of 20 km.		
	Moonchon E. (ME)	07/19/1992	39.1	127.1	3.1			
r-r'	Daekwan E. (DKE)	01/08/1980	40.2	125.0	5.3	High VRD at depth of 20 km.		
	Sariwon E. (SRE)	02/14/1981	38.3	125.0	5.1	Low VRD at 10km in the Rangnim Massif. Focal depth=53 km		
s-s'	Daekwan E. (DKE)	01/08/1980	40.2	125.0	5.3	VRD at depth of 20. Low VRD of quartzite - formation in the Rangnim Massif at a depth of 10 km. Historical earthquakes		
	Kaesong E. (KSE)	03/06/1260	38.0	126.5	6.3			
		09/01/1385	38.5	126.5	6.3			
t-t'	Daekwan E. (DKE)	01/08/1980	40.2	125.0	5.3	High VRD in CRZ at 20km, Low VRD in the Rangnim Massif at 10 km.		
u-u'	Mt. Backdu and Heysan		40.3	126.9	3.7	High VRD at a depth of 40 km for magma chambers around Mt. Backdu, Heysan and Samsu.		
	Daehung E. (DHE)	04/15/1988						
	Pyongyang E.(PYE)	06/30/1546					39.1	126.0
v-v'	Heysan vicinity					High VRD of partial melting around Heysan and Samsu.		
	Mt. Myohyang					Low VRD in the Rangnim Massif at a depth of up to 15 km		
w-w'	Mt. Backdu					Magma chamber at a depth of 40 km, erupted in 1199,1200, 1668, 1702, 1903 and 1413, 1597, 1702,1724, 1898 near surroundings.		
	Daehung E. (DHE)	04/15/1988				40.3	126.9	3.7
	Sariwon E. (SRE)	02/14/1982				38.3	125.7	5.1
x-x'	Rimjingang Fold Belt (RFB)					High VRD from surface through Moho beneath RFB and CRZ.		
	Chugaryong Rift Zone (CRZ)					Low VRD of quartzite - formation in the Rangnim Massif at 10 km .		

(VRD)는 $(V_p/V_s)^2 = (1-\sigma)/(0.5-\sigma)$ 에 의해서 파선경로가 통과되는 진원 매질의 유형을 나타낸다(여기서 σ 는 포아송 비율(Poisson's ratio)을 나타내며 매질의 특성에 따라 $0.05 \leq \sigma < 0.5$ 사이의 값을 가진다). 이번 연구는 한반도에서의 지각 구조와 지진원의 이해를 돕기 위해서 수행시간 역산 방법을 이용하여 한반도 전체에 대한 3차원 지각 속도 구조와 V_p/V_s 의 이상대를 분석한 첫 번째 연구이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부 산하 기상청의 지원으로 이루어졌으며, Data를 제공해준 IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology), 한국 기상청, 한국지질자원 연구원, 그리고 일본 홋카이도 대학 및 중국 국가지진청(CEA)의 지구물리연구소에 감사드립니다.

참고문헌

- 김상조 (1983) 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 한양대학교 석사학위 논문, 68 pp.
- Bijwaard, H., W. Spakman and E. R. Engdahl (1998) Closing gap between regional and global travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, vol. 103, 30055-30078.
- Catchings, R. D. (1999) Regional V_p , V_s , V_p/V_s , and Poisson's ratios across earthquake source ones from Memphis, Tennessee, to St. Louis Missouri. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 89, 1591-1605.
- Catchings, R. D. (2002) M. R. Rymer, J. A. Goldman, J. A. Hole, R. Huggins, and C. Lippus, High-resolution seismic velocities and shallow structure of the San Andreas Fault Zone at Middle Mountain. *Parkfield, California, Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 92, 2493-2503.
- Chiu, J. and S. G. Kim (2004) Estimation of regional seismic hazard in the Korean Peninsula using historical earthquake data between A. D. 2 and 1995. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 94, 269-284.
- Cho, J.D., J. H. Choi, M. T. Lim, and I. H. Park (1997) The study on the Bouguer gravity anomaly of the southern part of Korea. *Bulletin of the Seismological Association of the Far East*, vol. 3, 212-224.

- Choi, K. S., G. V. R., Kumar and K. Y. Kim (1999) Qualitative interpretation of Bouguer anomaly in the southern part of the Korean Peninsula. *Geoscience Journal*, vol. 3, 49-54.
- Kharkiv, A. D., N. Zinchuk, and B. M. Zuev (1997) *Diamond History* (in Russian). Nedra, Moscow, 601 pp.
- Kim, S. G. (1978) Linear inversion technique in seismo-acoustic processing. *Kor. Inst. Mineral and Mining Engineer Soc.*, vol. 15, 186-196, 1978.
- Kim, S.G. and F. Gao (1997) Preliminary crustal studies of the Korean Peninsula using Lg-coda Q, *Bulletin of the Seismological Association of the Far East*, vol. 3, 121-139.
- Kim, S.G. and Q. Li (1998a) 3D crustal velocity tomography in the southern part of the Korean Peninsula. *Econ. Environ. Geol.*, vol. 31, 127-139.
- Kim, S.G. and Q. Li (1998b) 3D crustal velocity tomography in the Central Korean Peninsula. *Econ. Environ. Geol.*, vol. 31, 235-247.
- Kim, S.G., Q. Li, E. Lkhasuren, J. Lee, and H. S. Jang (2000) 3D seismic tomography using travel-times and waveform of multi-phase. *CT Theory and Applications*, vol. 9, 44-47.
- Kim, S. G. and J. S. Shin (2003) Study of crustal structure in North Korea using 3D velocity tomography. *Korean Soc. of Engineering Geology*, vol. 13, 293-308.
- Kim, S. G., E. Lkhasuren, P. H. Park (2004) The low seismic activity of the Korean Peninsula surrounded by high earthquake countries. *Journal of Seismology*, vol. 8, 91-103.
- Lee, D. S. (ed.) (1987) *Geology of Korea*. The Kyohak-Sa Publishing Co., Seoul, Korea, 514 pp.
- Masaitisa, V. L. (1964) *Geology of Korea* (in Russian). Nedra, Moscow, 263pp.
- Pak, C. S. (1993) Earthquakes, in *Geology of Korea*, edited by Foreign Language Book Publishing House, Pyongyang, DPRK, 619 pp.
- Paige, C. C. and M. A. Saunders (1982) LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM trans. Math. Soft.*, vol. 8, 43-71.
- Pulliam, R. J., Vasco, D. W. and Johnson L. R. (1993) Tomographic Inversions for Mantle P Wave Velocity Structure Based on the Minimization of l^2 and l^1 norms of International Seismological Centre Travel time Residuals. *J. Geophys. Res.*, vol. 98(B1), 669-734.
- Roecker, S. W. (1993) Tomography in zones of collision: practical considerations and examples. In: H. M. Iyer and K. Hirahara (Editors), *Seismic Tomography, Theory and Practice*, Chapman and Hall, London, 584-612.
- Tarantola, A. (1987) *Inverse Problem Theory, Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*. Elsevier, 613 pp.
- Thurber, C. H., S. R. (1995) Atré and D. Eberhart-Phillips, Three-dimensional Vp and Vp/Vs structure at Loma Prieta, California, from local earthquake tomography. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, 3079-3082.
- Van der Sluis, A., and H. A. Van der Vorst (1987) Numerical solution of large, sparse linear algebraic systems arising from tomographic problems. In: G. Nolet (Editor), *Seismic Tomography*, Reidel, Dordrecht, 49-83, 1987.
- Zelt, A. C. (1998) Lateral velocity resolution from three-dimensional seismic refraction data. *Geophys. J. Int.*, vol. 135, 1101-1112.
- Zelt, C. A., P. J. Barton (1998) Three-dimensional seismic refraction tomography: a comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin. *Journal of geophysical research*, vol. 103, 7187-7210.
- Zhao, D., O. P. Mishra, and R. Sanda (2002) Influence of fluids and magma on earthquakes: seismological evidence. *Phys. Earth Planet Int.*, vol. 132, 249-267.