

원거리 지진자료로부터 유추된 한반도의 P파 도달시간 이상에 대한 연구

이덕기 · 오석훈 · 윤용훈 · 양준모
기상청 기상연구소 해양기상지진연구실

요 약

기상청 광대역 관측소에서 2000~2001년 포착된 원거리 지진들의 종파 초동 시간의 상대적 도달 시간차이를 분석하여 관측소 하부 지각구조차이에 의한 평균 도달시간이상을 도출하였다. 각 광대역 지진 관측소에서 측정되어진 종파의 상대적 도달시간차이들은 최대 1.5 초로 측정되었다. 각 관측소들의 평균적인 도달시간이상은 최대 0.6초의 차이를 보이며 향후 지진요소 결정 시 이런 차이를 보정하여 주변 보다 정밀한 지진요소를 산출할 수 있을 것이다. 각 관측소의 속도 대비차원에서는 최대 -4~4%의 속도 대비를 가질 수 있는 것으로 추정되었다. 전반적으로 서울, 춘천, 강릉, 울진, 그리고 울릉도 광대역 관측소에서는 상대적으로 0.05~0.3초 늦은 평균도달시간 이상을 보이며 속도대비로는 0~4% 늦은 것으로 계산되었다. 한편 서산, 대전, 광주, 대구, 서귀포, 그리고 부산 광대역 관측소에서는 0.05~0.3초 빠른 평균도달시간 이상을 보여주며 속도대비로는 약 0~4% 빠른 것으로 계산되었다.

주요어: 종파, 속도대비, 도달시간 차이

Duk-Kee Lee, Seok-Hoon Oh, Yong-Hoon Youn and Jun-Mo Yang, 2002, P wave travel-time delays at the KMA broad-band stations. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 5, n. 2, p. 87-97

ABSTRACT: P wave travel-time delays have been analyzed and average travel-time anomalies due to lateral variation of the crustal structure have been calculated at the broad-band earthquake observatories of Korea Meteorology Administration (KMA) using the teleseismic data collected during the period from 2000 to 2001. Maximum variation in the relative travel-time residuals is almost 1.5 seconds. Azimuthal variation in the travel-time residuals is observed to indicate the existence of lateral P velocity heterogeneity beneath the stations with velocity contrasts of -4~4%. The estimated average travel-time delays are ranging from 0.05 to 0.3 seconds at the stations including Seoul, Chuncheon, Kanneung, Uljin, and Ulleung Island showing slow velocity contrasts of 0~4% P through the crust. Faster velocity contrasts of 0~4% have been observed at the stations including Seosan, Taejeon, Kwangju, Daegu, Seoguiipo, and Busan showing average travel-time delays ranging from -0.05 to -0.3 seconds.

Key words: P wave, travel-time residual, velocity contrast

(Duk-Kee Lee, Seok-Hoon Oh, Yong-Hoon Youn, and Jun-Mo Yang, Marine Meteorology and Earthquake Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration, 460-18 Shindaebang-dong, Dongjak-Gu, Seoul, Korea Email: dukkee@metri.re.kr)

1. 서 론

한반도 하부의 차별적인 지각구조에 의한 지진 파 도달시간 이상의 정도를 수치화 하는 것은 국내 지진의 정밀탐지를 위한 속도구조연구의 기초이다. 한반도 지각구조연구의 직접적인 방법중의

하나는 수신함수 및 표면파 분산 역산을 통한 관측소 하부의 지각속도를 유추하는 방법이 있으며 더 직접적인 방법으로는 관측소 근처에서 인공 지진 발파시험을 통한 지역적 속도구조 결정이 있다. 그러나 상기 방법들은 현재 많은 과학자들에 의하여 진행중이지만 특정지역에 국한되어 있

어서 한반도의 광역적인 특성을 반영하지는 못한다. 기상청은 전국적으로 균등하게 12개소의 초광역대역 및 광대역 관측소를 운영하고 있으며 현재 양질의 광대역 지진자료를 생산하고 있다. 따라서 기상청 광대역 지진자료를 분석하고 원거리 지진파 도달시간 이상을 측정하여 이를 바탕으로 한반도 규모의 저해상도 속도구조대비를 계산할 수 있다. P파나 S파의 상대적 도달시간 차이를 이용한 도달시간 이상이나 속도대비 계산을 위하여서는 먼저 하나의 지진에 대하여 각 관측점에서 측정되어진 P파나 S파의 상대적 도달시간의 차이를 분석하여야 한다. 예를 들면 미국의 중부나 서부에서 연구된 P파나 S파의 상대적 도달시간의 차이 (Cleary and Hales, 1966; Doyle and Hales, 1967; Dziewonski and Anderson, 1983; Lee and Grand, 1996)들은 미국 서부와 중부의 지각구조차이에 의한 P파나 S파의 도달시간 차이를 잘 나타내어 준다. 일례로서 Clearly와 Hales (1966)는 북미 대륙의 P파의 이론적인 도달시간을 계산하여 서부의 Basin and Range 지역에서는 상대적으로 늦게 그리고 중부지역에서는 빠르게 도달한다고 결론지었다. 이와 같이 지진들의 각거리 및 역방위각의 변화에 따른 도달시간 이상을 이용하여 관측소 하부의 평균도달시간이상이나 속도구조 대비를 계산할 수 있게 된다. 도달시간 자료가 충분하다면 조사 지역 하부의 속도구조 대비를 3차원으로 잘 나타낼 수 있다(Humphreys *et al.*, 1984; Lefevre and Helmberger, 1989; Lee and Grand, 1996).

한반도에서 원거리지진의 도달시간을 이용한 광역적인 도달시간 연구는 현재 시작단계이다. 그러나 앞으로 기상청이 설치 운영하고 있는 12개소의 광대역 지진관측소 및 기타 다른 기관에서 많은 자료가 축적이 되고 있으므로 관측소 하부의 도달시간이상 연구 및 속도구조대비연구를 시작하는 것이 필요하다고 생각된다. 이 연구는 기상청 광대역 지진관측소에서 포착된 27개의 원거리 지진자료를 이용하여 상대적 도달시간이상을 분석하고 시험적 의미의 속도구조대비 연구를 통하여 향후 정밀 지진 탐지 알고리즘에 이용되게 하는데 목적이 있으며 또한 자료 축적 후에 쉽게

결과를 갱신하는 것을 목표로 한다.

2. 자료

본 연구에 사용된 지진들은 2000년에서 2001년 사이에 기상청 광대역 지진관측소에서 포착된 지진들로서 대부분 원거리 지진들이다(Fig. 1). 대부분 지진들의 각거리는 30°에서 80°사이이며 따라서 복잡한 지각이나 상부맨틀 속도구조에 의한 효과 - 즉 초동이 Pn 이거나 속도구조의 급격한 변화에 의한 triplication 현상 -를 배제할 수 있다. 진앙의 위치에 대한 정보는 지진목록(National Earthquake Information Center, 1999)을 이용하였으며 대부분 Harvard 대학의 CMT(Centeroid Moment Tensor)자료를 이용하였다(Table 1). 원거리 지진의 진앙위치오류는 집중관측이 이루어지지 않는 한 약 0.5°까지 발생할 수 있으나 각거리 30° 이상의 원거리 지진의 P파 도달시간을 측정할 경우 각거리가 진앙위치오류보다 60배 이상 크기 때문에 도달시간이상 측정의 오차는 ±0.05 초라고 할 수 있고, 만약 도달시간 변화폭이 1.0 초 이상이면 진앙위치오류는 무시할 수도 있다고 사료된다. Fig. 2에 본 연구에 사용된 지진의 예

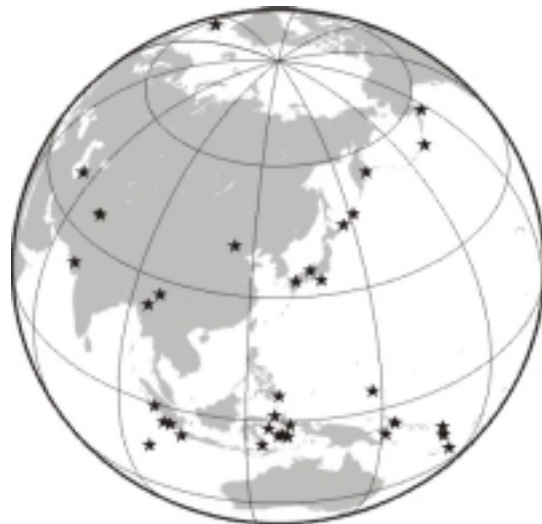


Fig. 1. Distribution of earthquake epicenters (solid stars) used in this study.

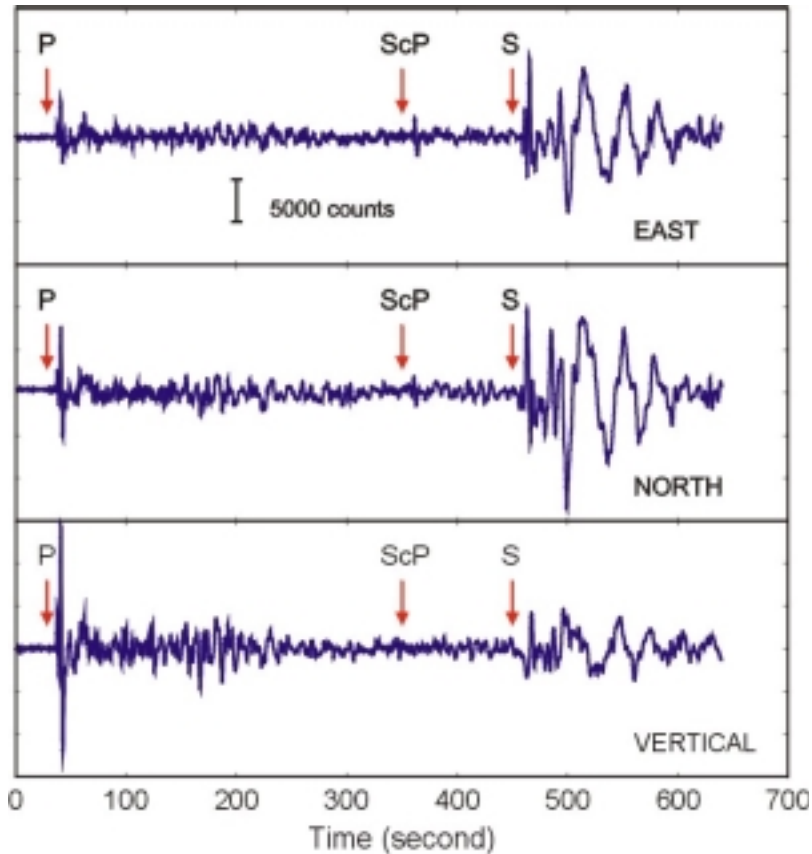


Fig. 2. An example of earthquake data used in this study. This earthquake took place in Oct. 25, 2000 near the Sunsa Strait, Indonesia (7.28S, 105.43E) at the depth of 45.6 km.

를 나타내었다. 지진목록에 의하면(NEIC, 2002) 이 지진은 2000년 10월 25일 인도네시아 선사 협에서 깊이 45 km에서 발생하였다. P파와 S파의 초동이 뚜렷하며 P파와 S파 사이에 ScP로 추정되는 파형이 관찰된다. 이 ScP 파는 IASP91 속도모델로 모델링한 결과 도달시간이 일치하였다.

3. 도달시간이상 산출

광대역 지진관측소에서의 평균 도달시간이상 및 속도대비는 각 지진이 각 관측점에 도착하는 상대적인 도달 시간을 이용한다. 이를 위해서는 각 지진에 대하여 이론적인 도달시간을 계산하는 과정이 필요하다. 지진 진원의 위도 및 경도를 각각 θ 및 ψ 라고 하고 한 관측소의 위도 및 경

도를 θ' 및 ψ' 라고 하자. 진원의 기본 방향 벡터(X_e) 및 관측소의 기본 방향 벡터(X_s)를 Fig. 3를 참조하여 직교 좌표계에서 표시하면

$$X_e = (x, y, z) = (\cos \theta \cos \psi, \cos \theta \sin \psi, \sin \theta) \quad (1a)$$

$$X_s = (x', y', z') = (\cos \theta' \cos \psi', \cos \theta' \sin \psi', \sin \theta'). \quad (1b)$$

그러므로 두 지점 사이의 각거리는 기본 방향 벡터의 내적을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_e \cdot X_s &= l^2 \cos \angle \\ &= \sin \theta \sin \theta' + \cos \theta \cos \theta' \cos(\psi - \psi') \end{aligned}$$

상기 식을 정리하여 각거리로 나타내면 식 (2)와

Table 1. Earthquakes used in this study.

Origin Time GMT (year/month/day)	Epicenter		Depth (km)	Mag- nitude
	Latitude ($^{\circ}$)	Longitude ($^{\circ}$)		
2000/06/07	26.70	97.15	37.0	6.3
2000/06/17	63.99	-20.47	15.0	6.5
2000/06/18	-13.47	97.17	15.0	7.9
2000/06/21	63.98	-20.85	15.0	7.9
2000/07/16	-7.54	150.96	15.0	6.6
2000/07/17	36.24	70.82	145.5	6.3
2000/08/03	-11.93	166.17	51.4	6.6
2000/08/07	-6.95	123.53	648.3	6.5
2000/08/28	-4.18	127.59	15.0	6.8
2000/08/28	-4.124	127.027	12.0	6.3
2000/09/10	-1.10	129.430	15.0	6.1
2000/10/04	-15.51	166.77	15.0	7.0
2000/10/11	23.580	94.63	122.3	5.6
2000/10/25	-7.28	105.43	45.6	6.8
2000/11/16	-4.56	152.79	24.0	8.0
2000/11/16	-5.030	153.170	31.2	7.8
2000/12/06	39.6	54.870	33.0	7.0
2000/12/22	44.833	147.157	134.0	5.9
2001/01/01	6.73	127.07	44.0	7.5
2001/01/09	-14.90	167.11	114.4	7.0
2001/01/10	56.990	-153.56	21.0	7.0
2001/01/16	-4.38	101.42	20.0	6.8
2001/01/26	23.63	70.24	19.8	7.7
2001/02/13	-4.618	102.937	28.9	6.2
2001/02/24	1.463	126.268	41.1	6.6
2001/03/19	-3.914	127.965	21.0	6.1
2001/03/17	46.779	151.214	114.8	5.3

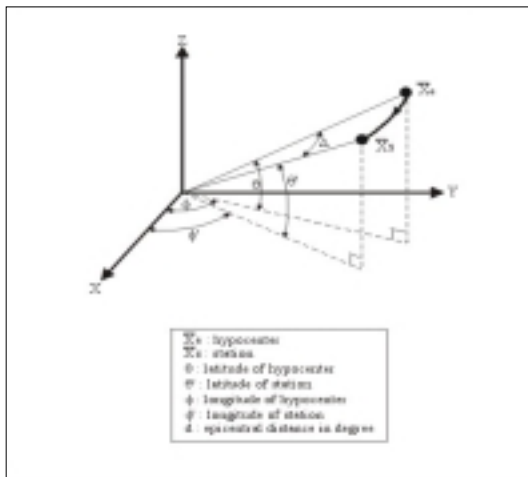


Fig. 3. Geometry between an epicenter and a station in spherical coordinate. X_e and X_s represent epicenter and station, respectively (after Lee *et al.*, 2001).

같다.

$$\Delta = \frac{180}{\pi} \arccos\{\sin(\theta) \sin(\theta') + \cos(\theta) \cos(\theta') \cos(\phi - \phi')\} \quad (2)$$

그러나 식 (2)는 지구 평면도를 고려하지 않은 수식이며 본 연구에서는 지구 평면도를 고려하여 거리를 구하였다.

이론적인 지진파 도달시간 및 파선상수를 구하기 위하여 Chapman이 1978년 고안한 WKBJ 기법 중 일부분을 사용하여 해당 거리 및 진원의 깊이에 해당하는 파선의 굴절깊이, 파선상수 및 이론적인 도달시간을 계산한 후 상대적 도달시간 차이를 실제 관측치에서 아래식과 같이 측정한다.

$$T_i^j = R_i^j - W_i^j \quad (3)$$

식 (3)에서 W_i^j 및 R_i^j 는 j 번째 지진에 대하여 i 번째 관측점에서 측정되어진 이론적인 도달시간 및 실제 도달시간이며 T_i^j 는 j 번째 지진에 대하여 i 번째 관측점에서 측정되어진 상대적인 도달시간 차이이다. 조사지역 지각의 속도구조 대비를 나타내기 위하여서는 먼저 각 관측소 하부의 두께가 지각두께 및 퇴적구조에 의한 상대적 도달시간의 차이를 보정하여야 한다. 그러나 본 연구에 있어서 아직은 지각두께나 퇴적층의 두께에 대한 지질학적인 조건들이 부재함으로 이에 대한 보정은 고려하지 않았다.

광대역 관측소하부 지각구조에 의한 평균개념의 도달시간이상을 산출하기 위하여서는 관측소 지각하부 외에 도달시간에 영향을 미치는 요소를 제거할 필요성이 있다. 이런 제거대상의 요소 중 하나는 진앙의 위치 오류 및 이론적 도달시간 계산을 위한 속도구조를 들 수 있다. 이런 요소 보정의 간단한 방법은 각 지진에 대하여 관측소들에서 측정되어진 상대적 도달시간들의 평균값을 각 상대적 도달시간 차이에서 빼어주는 방법이다. 그러나 이 방법은 모든 관측소에서 지진이 관측되지 않았을 때에는 비록 적지만 오차를 수반한다. 따라서 본 연구에서는 한 지진에 대하여 관측되지 않은 관측소들이 많이 존재하는 만큼 아래와 같은 방법을 사용하여 각 관측점에서 측정되어진 P파

의 상대적인 도달시간 차이를 보정하였다(Lee *et al.*, 2001).

$$T_i^j \approx \Delta(SS)_i + \Delta(ES)^j \quad (4)$$

식 (4)의 $\Delta(SS)_i$ 는 i 번째 관측점의 평균 상대적 도달시간이며, $\Delta(ES)^j$ 는 j 번째 지진의 차별성을 보정하는 요소이다. 실제로 T_i^j 에서 $\Delta(SS)_i$ 와 $\Delta(ES)^j$ 를 빼어주면 그 나머지는 이론상 상부맨틀의 측면 변화요소이거나 아니면 잡음이 된다. j 번째 지진에 대해서 i 번째 관측점에서의 자료가 없을 때는 T_i^j 는 값을 가지지 않는다. 상기 식을 행렬 식으로 표시하면

$$T=GM \quad (5)$$

식 (5)의 G 는 0과 1로 구성된 $N1 \times N2$ 행렬로서 $N1$ 은 P파 도달시간 자료의 개수이며 $N2$ 는 관측점의 수(N_s)와 지진 개수(N_e)를 합한 것이 된다. 그러나 위 행렬의 해는 유일하지 않다. 즉 M 의 해 중에 각 지진의 차별성을 보정하는 해를 M 에서 일정한 양만큼 가감하여도 그 요소들이 관측점의 평균 상대적 도달시간 차이의 형태로 전환되어서 이론적으로 상기 식을 만족하기 때문에 관측점들의 평균 상대적 도달시간 차이의 합은 영이라는 강제적인 제약조건을 적용한 후 M 을 추정한다. 이를 이용하여 관측소들의 고유한 평균 도달시간이상($\Delta(SS)_i$)을 구할 수 있으며 각 관측소에서의 속도대비를 구하기 위하여서 먼저 차별성을 보정하는 요소($\Delta(ES)^j$)들을 각지진의 상대적 도달시간 차이에서 빼어주게 되면 기본자료가 다음과 같이 계산된다.

$$T_i^j = R_i^j - W_i^j - \Delta(ES)^j \quad (6)$$

본 연구에서 이론적인 도달시간을 계산하기 위하여 사용한 P파 속도 모델은 Fig.4에 나타나 있다. T1 모델은 Grand와 Helmlberger 가 1984년 이용한 SNA와 TNA 모델의 중간 값을 취하여 설정한 모델이며 IASP91 모델보다는 지각-맨틀, 410불연속면, 660불연속면에서 속도 구배가 완만하다.

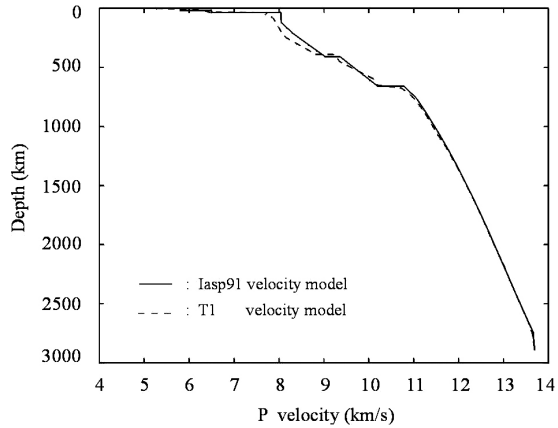


Fig. 4. P velocity model used in this study. Two velocity models have been applied to measure the travel-time residuals.

이 두 모델은 상부 맨틀까지는 속도구조에서 차이를 보이나 하부맨틀로 가면서 그 차이가 적어진다. Fig. 5에는 본 연구에 사용된 지진의 실제 도달시간과 이론적인 도달시간과의 차이를 각 지진 별로 나타내었다. 동그라미는 실제도달시간에서 Fig. 4에 있는 IASP91 속도 모델을 사용하여 구한 이론적 도달시간의 차이를 상대적으로 나타내었으며 십자기는 T1속도구조를 이용하여 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 대부분의 지진의 도달시간이상을 각 관측소에서 분석하면 두 가지 다른 속도구조를 이용하여 측정한 도달시간 이상의 오차 변화폭은 0.05 초 이하라고 판단되며 이는 도달시간 이상 최대 변화폭인 1.5초에 비하면 무시할 만하다고 할 수 있다. 따라서 이론적인 도달시간 이상 계산에 다른 속도 모델을 사용하더라도 도출되는 도달시간 이상 양상에는 큰 영향을 미치지 않는다고 가정할 수 있다. Fig. 6에는 거리에 따른 도달시간 이상 양상이 표시되어 있다. 표기는 Fig. 5와 동일하며 다만 가로축이 각거리로 표시되어 있다. 대부분의 각거리에서 두 속도구조를 이용하여 측정한 도달시간 이상의 양상은 비슷하나 다만 각거리 45°에서 50° 사이(Fig. 6의 "A"라고 표기된 상자)의 거리에서는 두 속도 구조를 이용하여 계산한 도달시간 이상이 차이를 보인다. 이는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 두 모델이 지각 및 상부맨틀의 전이대에서 속도구배가 차이

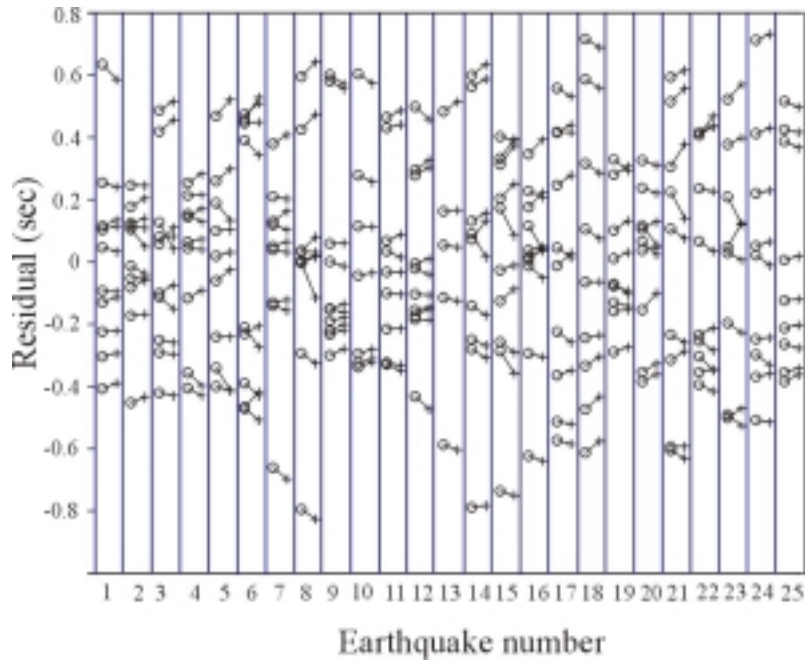


Fig. 5. Calculated travel-time residuals for each earthquakes used in this study. Two velocity models for generating theoretical travel-times of P waves have been applied. Open circle represents the residuals calculated using IASP91 velocity model while cross calculated using T1 velocity model as shown in Fig. 4.

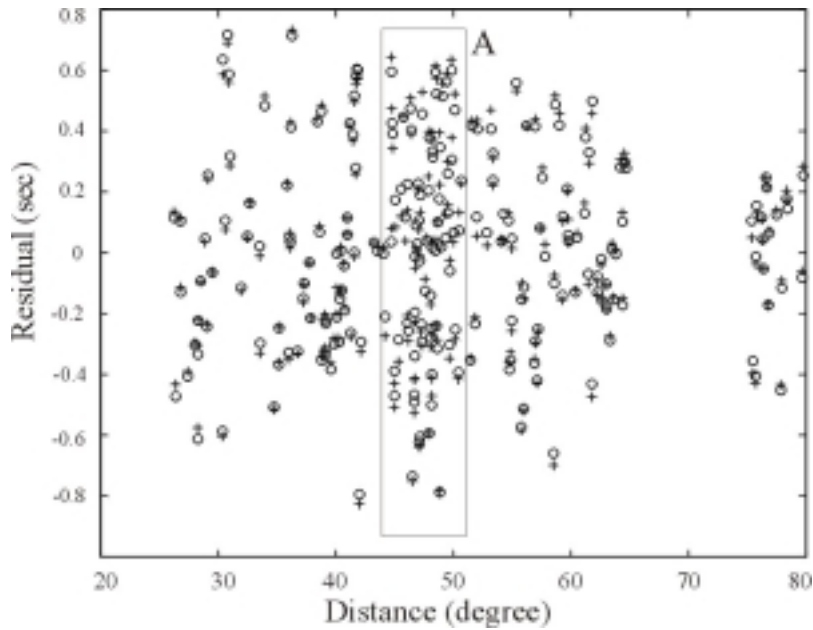


Fig. 6. Calculated travel-time residuals according to the epicentral distances. Two velocity models for generating theoretical travel-times of P waves have been compared. Open circle represents residuals calculated using IASP91 velocity structure while cross calculated using a test velocity model as shown in Fig. 4.

가 있기 때문이라고 사료된다.

4. 광대역 관측소 하부의 평균 도달시간이상 및 속도대비 분석

현재 광대역 관측소 하부의 퇴적층 두께 및 지각 두께에 대한 정확한 정보가 없는 관계로 상기 요소들에 의한 도달시간 효과는 이번 상대적 도달시간 계산에서는 고려하지 않았다. 이번 연구에서 사용된 지진들의 파선을 관측소에서 깊이 35 km 까지 추적하여 도달시간 이상에 영향을 미칠 수 있는 지각의 영향반경을 유추한 결과, 관측소를 중심으로 반경 16~17 km까지 인 것으로 계산되었다. 파선추적에 사용되는 속도구조에 따라 조금씩 차이가 날 수 있지만 본 연구에서 사용된 T1 속도구조 및 IASP91 속도구조의 결과는 거의 일치하였다. Fig. 7에는 춘천관측소(CHU)에서 관측된 지진들의 파선을 지하 35 km까지 추적하여 2차원 평면(위도-경도)으로 투영하였다. 투영된 파선의 길이가 긴 것은 상대적으로 가까운 거리에서 일어난 지진이라는 것을 뜻하며 영향반경이 길어지게 된다. 파선의 길이가 짧은 것은 먼거리 지진의 파형을 투영한 것으로서 파선이 올라오는 각도가 급격하다. Fig. 7에 나타난 반경은 파선길이의 평균값이며 이는 곧 관측소 하부의 도달시간에 영향을 미치는 지각의 반경을 의미한다.

Table 2에는 서울(SEO), 부산(PUS), 광주(KWA와 KWJ), KAN(강릉), TAG(대구), CHU(춘천), TEJ(대전), 울진(ULC와 ULJ), 울릉도(ULL), 그리고 서산(SOS와 SES)에서 측정되어진 도달시간이상이 나타나 있다. 식 (6)을 적용하여 각 관측소에서의 계산된 상대적 도달시간 이상을 Fig. 8에서 역방위각을 고려하여 나타내었다. 화살표의 각도는 역방위각을 나타내며 빨간 화살표는 느린 도달시간 이상을 파란 화살표는 빠른 도달시간 이상을 나타낸다. 화살표의 길이는 느리고 빠름의 크기를 나타낸다. 서울, 춘천, 강릉, 그리고 울진 관측소들에서는 상대적으로 느린 도달시간 이상을 나타내며 서산, 대전, 대구, 부산 관측소들에서는 상대적으로 빠른 도달시간 이상을 나타낸다. 이런 도달시간 이상들을 식 (4)~(6)에 설명된 각 관측소에서의 평

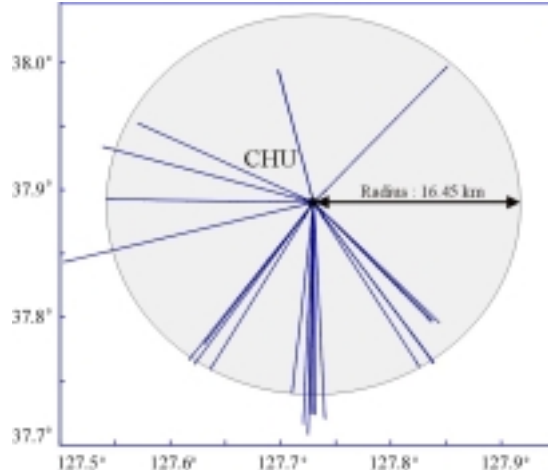


Fig. 7. Ray paths under the station (CHU) projected to the surface. The projected depth is up to 35 km.

균 도달시간이상($\Delta(SS)$)으로 계산한 결과 Fig. 9에 나타난 바와 같이 느린 구조로는 KAN의 0.29 초에서 빠른 구조로는 SOS의 -0.28초까지 계산이 되었다. Fig. 9에 표시된 관측소의 평균 도달시간 이상은 각 지진에 의한 상대적 도달시간이상의 변화폭인 1.5초보다 적은 0.6초의 변화폭을 가지며 이는 파선의 분리가 많은 맨틀의 횡적 변화보다는 관측소 하부 반경 16~17 km의 지각속도구조에 의한 변화폭이라고 사료된다.

이러한 관측소 하부의 차별적인 지각구조가 존재한다고 가정하고 약 0.3초의 P파 도달시간에 대한 진앙위치오류는 국내지진의 경우 IASP91 속도 모델을 이용하여 계산한 결과 이론적으로 약 2 km 까지 차이가 날 수 있는 것으로 계산되었다. 계산된 광대역 관측소의 평균 상대적 도달시간차이는 경기도, 충청북도, 강원도, 북부 경상북도에서는 상대적으로 느린 것으로 사료되며 충청남도, 전라도, 그리고 경상도에서는 비교적 빠른 것으로 판명되었다. Table 2의 "SEO"은 서울 광대역 관측소를 의미하며 부호는 "-"의 경우 상대적으로 빠른 도달시간이상을 의미하여 "+"는 그 반대이다. 서울의 경우 전반적으로 느린 도달시간의 이상을 보여주나 서울의 남서쪽에서 전파되어 오는 2개의 지진 (Table 2의 Ear. 12와 Ear. 19 그리고 Fig. 8)에 대하여서는 상대적으로 빠른 도달시간이상을 보여주는 것으로 보아 서울 남서부의 지각구조는 빠른 P

파속도를 보인다고 할 수 있다. 강릉 (KAN)의 경우 거의 모든 방향 및 거리에서 느린 도달시간이상을 보여주는데 Table 2에서 KAN이 Ear. 26에 대하여서는 비교적 빠른 도달시간이상을 보여주는데 이는 각거리가 15도 정도 되는 거리로서 복잡한 상부 맨틀 속도에 의한 삼중도달(triplication)현상과 첫 번째 도달하는 파의 위상이 P파가 아니라 지각-맨틀의 경계를 타고 전파하여 매우 약한 신호를 가지는 Pn파이므로 도달시간 측정에서 상당한 오차를 수반하였다고 해석할 수 있다. 춘천(CHU)의 경우 전반적으로 매우 느린 도달이상을 보여주나 남남서 방향에서 전파되어오는 각거리 50° 이상의 지진에 대하여서는(Table 2의 Ear. 1, Ear. 2, 그리고 Ear. 19, Fig. 8) 비교적 빠른 도달시간이상을 보여준다. 이는 춘천의 남남서에 위치하는 경기육괴의 빠른 속도를 지나는 하부지각에 의한 것이

라고 유추할 수도 있다. 울진(ULC와 ULJ)의 경우 전반적으로 느린 도달시간이상을 보여주나 몇몇 남남동 방향에서 전파되어오는 각거리 45도 이상의 지진들에 대하여서는(Table 2의 Ear. 9, Ear. 10, Ear. 14, Ear. 24 그리고 Fig. 8) 비교적 빠른 도달시간이상을 보여주는 것으로 보아서 울진의 남남동의 하부지각은 비교적 빠른 P파 속도를 가진다고 유추할 수 있다. 서산(SOS와 SES)의 경우 전반적으로 빠른 도달시간이상을 보여 주고 있으나 각거리 45도 이상의 남동 방향의 몇몇 지진들에 대하여서는(Table 2의 Ear. 5, Ear. 13 그리고 Fig. 8) 조금 느린 도달시간이상을 보여준다. 서귀포(SOG)의 경우 방위각에 따라 도달시간이상의 변화가 심하다. 특히 남동방향에서 전파되는 지진의 경우 서귀포 남동지역의 횡적으로 차별적인 구조의 영향을 가정할 수 있다. Table 2의 부산(PUS),

Table 2. P wave travel-time residuals calculated for each station.

	SEO	PUS	KWA	KAN	TAG	CHU	TEJ	ULC	ULL	SOS	SOG	SES	KWJ	ULJ
Ear. 1		-0.31	-0.17	0.44	0.07	-0.1	-0.27	0.5	0.06	-0.43	0.03			
Ear. 2	-0.43	0.15	-0.11	0.11		-0.42	0.05	0.2		0.03	0.27			
Ear. 3		0.11	-0.43	0.28		0.49	0.01	0.09	-0.28	-0.03	-0.42			
Ear. 4		-0.43	-0.52	0.43	-0.21	0.31	-0.44	0.49	0.47	-0.28				
Ear. 5		-0.71	0.01	0.05	0.09	0.37	-0.14	0.19	-0.2	0.15				
Ear. 6		-0.34	-0.84	0.63		0.44	0.01	0.0	0.03	0.0	-0.12			
Ear. 7		-0.22	-0.23	0.54	-0.28	0.54	-0.15	0.05	-0.06	-0.18	-0.17			
Ear. 8		-0.34	-0.33	0.24		0.54	-0.3	0.1		-0.04				
Ear. 9	0.43	-0.36	-0.01	0.07	-0.34	0.45	-0.12	-0.22		-0.04				
Ear. 10	0.29	-0.49	-0.2	0.0	-0.04	0.29	-0.16	-0.11		-0.16	0.44			
Ear. 11		-0.14		0.03				0.15	0.46	-0.61				
Ear. 12	-0.79		-0.01	0.62	-0.27	0.12	-0.32	0.57	0.08	-0.18				
Ear. 13	0.36	-0.37	0.37	-0.09	-0.3	0.36	-0.03		-0.8	0.24	0.07			
Ear. 14	0.38	0.01	0.18	0.02	-0.06	0.19	0.03	-0.32	-0.68	0.03				
Ear. 15	0.0	0.25	-0.53	0.4	-0.35	0.5	-0.6	0.43	-0.03	-0.26				
Ear. 16	0.06	-0.32		0.54	-0.24	0.25	-0.08		0.63		-0.44		-0.62	
Ear. 17	0.12	-0.12		0.02	-0.15	0.27	-0.29		-0.14		0.28		-0.2	
Ear. 18	0.03	-0.38		0.01		0.28	0.11		0.0			-0.34	-0.15	0.2
Ear. 19	-0.6	0.05		0.54		-0.31	-0.27		0.32			-0.65	0.08	0.59
Ear. 20	0.02	-0.23		0.42	-0.35	0.19	-0.43		0.41			-0.36	-0.33	0.41
Ear. 21		-0.11	0.09	0.02	-0.23	-0.32	-0.4	0.23	0.53	-0.12	0.12			
Ear. 22		0.18	-0.45	-0.04	0.13	0.01	-0.18	0.23	-0.1	0.09	-0.06			
Ear. 23				0.56	-0.01	-0.49	-0.24		0.07			-0.54	0.07	0.37
Ear. 24	0.21	-0.35		0.42		0.7	-0.53		0.01			-0.37	-0.06	-0.26
Ear. 25	0.4	-0.36		0.35	-0.37	0.46	-0.22		-0.32			-0.13		-0.01
Ear. 26				-0.23		-0.05	0.17		1.0		-1.01			
Ear. 27	-0.1	-0.47					0.2					0.26	-0.03	

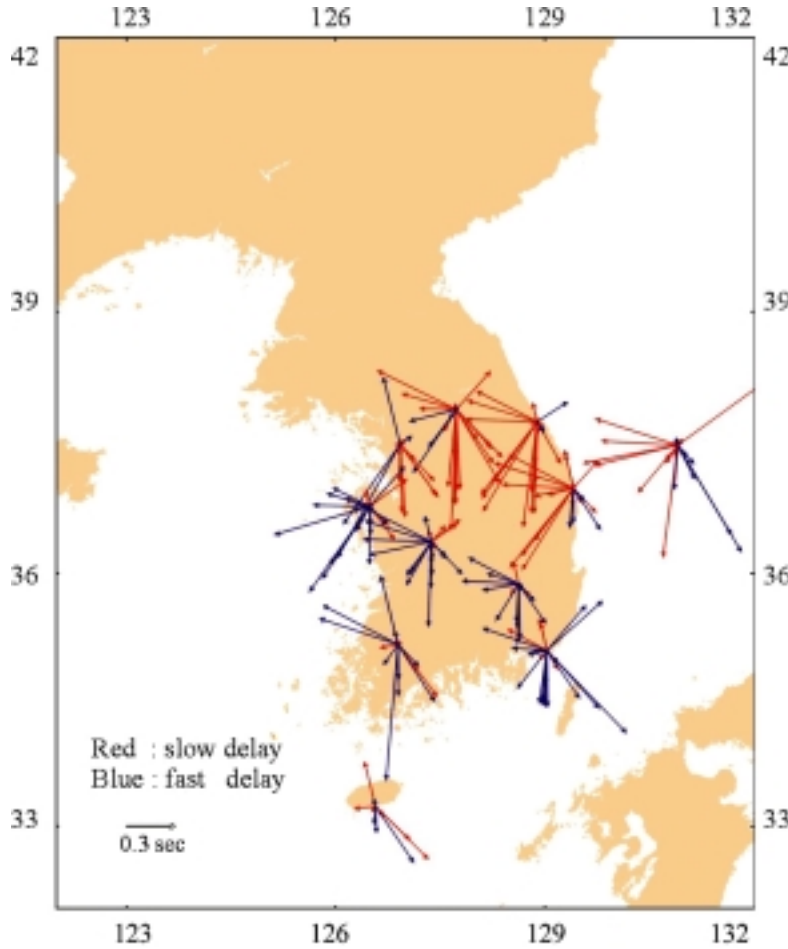


Fig. 8. Travel-time residuals at KMA broad-band stations. Angle of the arrow represents the back-azimuths of the earthquakes. Red arrow shows slow delay while blue one fast delay. Size of the delay is scaled as in the figure.

광주(KWA와 KW), 대구(TAG), 그리고 대전(TEJ)는 빠른 도달시간이상을 가지며 울릉도(ULL)는 비교적 느린 도달시간이상을 보여준다.

이와 같이 상대적 도달시간분석에 의하면 몇몇 관측점에서 관찰된 지진들이 역방위각 및 각거리에 따라서 상대적으로 빠르고 늦음을 보여주므로 그 관측점들 하부 속도 대비를 나타낼 수 있게 한다. 지각을 몇 개의 블록으로 나누어서 파선들이 그 블록을 통과하는 양을 계산하여 이를 그 블록의 파선 밀도로 정의하였는데 블록의 수평적 크기는 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ 으로 설정하였다. 각 블록의 파선밀도는

$$d_j = (1/2^{w-1} l_i^j) / 100.0 \quad (7)$$

로 정의하였고 d_j 는 j 번째 블록의 파선밀도이며, w 는 i 번째 지진의 품질 보정요소이며 l_i^j 는 i 번째 지진이 j 번째 블록을 통과하는 길이이다. 대체로 관측소들이 속해 있는 블록들은 파선의 빈도가 상대적으로 좋으나 그 외의 지점은 비교적 파선밀도가 낮다. 속도구조대비 계산 결과 -4%에서 4%까지의 속도 대비가 관측소 하부에서 지각 전반에 걸쳐 존재할 수 있는 것으로 계산되었다.

5. 문제점 및 결론

이번 연구는 앞으로 자료를 첨가함으로써 그 결과 경신이 용이하다는 장점이 있다. 따라서 관

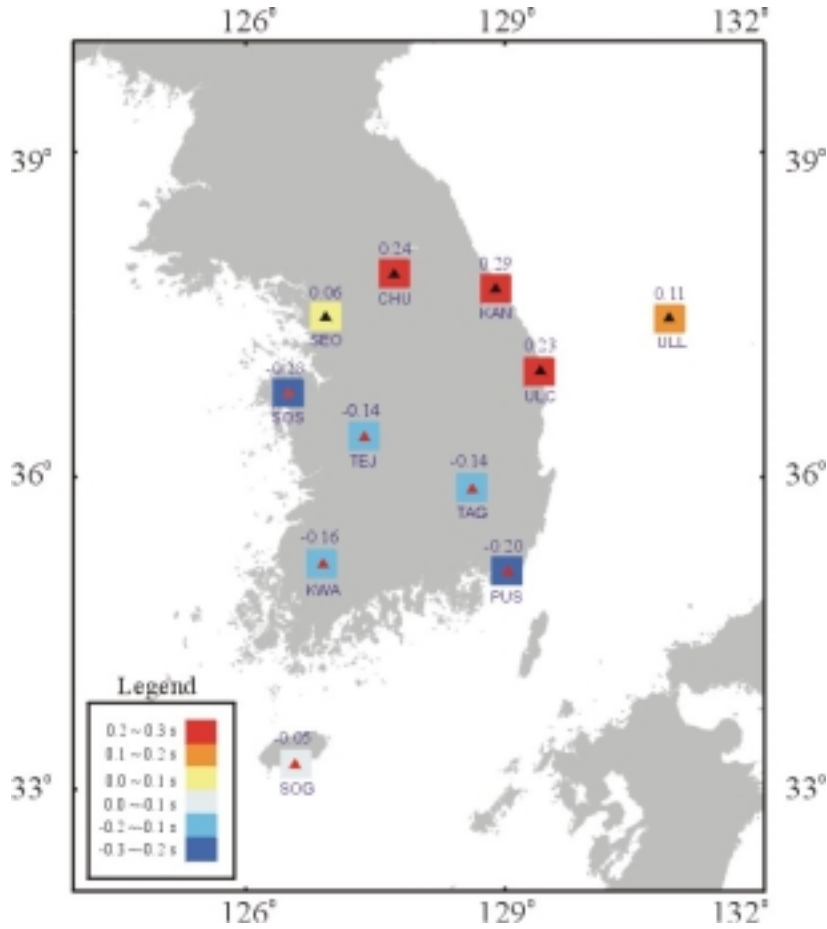


Fig. 9. Calculated average travel-time delays at each stations. Station locations are marked as solid triangle and station names are written at the top of the triangle. Average station delays are written near the station locations.

측소 하부의 평균도달시간이상과 속도대비가 좀더 신뢰성을 가지기 위하여서는 각거리 및 방위각의 변화에 따른 평균도달시간이상 및 속도대비가 될 수 있는 방향으로 자료를 첨가할 필요가 있다. 문제점으로는 대부분의 원거리 지진이 각거리가 멀고 조사지역이 각거리에 비해 매우 작아서 대부분의 경우 도달시간의 이상이 조사지역 하부의 지각 및 맨틀의 횡적 변화에 의한 것이라는 가정을 할 수 있으나 만약 진원이 해구이고 해구축의 방향이 방위각의 방향과 비슷하다면 슬랩(slab)을 차별적으로 통과할 수 있기 때문에 진원근처의 이상 속도 구조에 의하여 도달시간이 영향을 받을 수 있다. 앞으로 판의 수렴대에서 일어난 원거리 지

진자료를 첨가할 때는 해구의 축과 수직에 가까운 각을 이루는 자료를 선정하여야 한다. 속도대비 계산을 위한 블록의 크기는 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ} \times 40 \text{ km}$ 로 정하였는데 이번 연구는 깊이에 대한 분해능이 없기 때문에 이러한 이상구조의 깊이에 대한 제약 조건을 부과할 수 없다.

이 연구의 결과를 종합하면 광대역 관측소 하부 지각들의 평균 상대적 도달시간이상은 최대 0.55초 그리고 상대적 도달시간차이는 최대 1.5초 이상이며 역방위각 및 각거리에 따라 변화양상을 보인다. 국지지진을 이용한 기존의 연구(Song and Lee, 2001) 결과 관측소 하부의 보정치는 0 ~ 1.2 초로 계산되었다. 국지지진을 이용하였으므로 횡적인 속

도구조 차이에 민감하게 반응하므로 본 연구에서 제시한 평균 상대적 도달시간이상의 변화폭인 0.57 초 보다는 약 2배가 크다. 이는 속도대비로 약 -4%에서 4% 정도의 차이를 보인다. 서산, 광주, 부산, 대구, 대전 관측소들은 비교적 빠른 도달시간 이상을 보여주며 춘천, 강릉, 그리고 울진 관측소는 비교적 느린 속도구조 이상을 보여준다. 자료를 축적하여 본 연구의 결과에 대한 신뢰성 검증을 거친 후 정밀지진탐지에 유용하게 사용될 것이다.

사 사

이 연구는 기상청에 의하여 지원되는 기상지진 R&D사업의 단위과제인 “지진예지 및 지진해일 예측기술개발” 사업에 의하여 지원되었음을 알리며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

Chapman, C.H., 1978, A new method for computing synthetic seismograms, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 54, 481-489.
 Cleary, J. and Hales, A.L., 1966, An analysis of the travel times of p waves to North American stations, in the distance range 32° to 100°, *Bulletin of Seismological Society of America*, 56(2), 467-489.
 Dziewonski, A.M. and Anderson, A.L., 1983, Travel times and station corrections for p waves at teleseismic distances, *Journal of Geophysical Research*, 88, 3,

295-3, 314.
 Doyle, H.A. and Hales, A.L., 1967, An analysis of the travel times of S waves to North America in the distance range 28° to 82°, *Bulletin of Seismological Society of America*, 57, 761-771.
 Grand, S.P. and Helmburger, D.V., 1984, Upper mantle shear structure of North America. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 76, 399-438.
 Humphreys, E.D., Clayton, R.W. and Hager, B.H., 1984, A tomographic image of mantle structure beneath southern California. *Geophysical Research Letters*, 11, 625-627.
 Lee, D.K. and Grand, S.P., 1996, Upper mantle shear structure beneath the Colorado Rocky Mountains. *Journal of Geophysical Research*, 101, 22,233-22,244.
 Lefevre, L.V. and Helmburger, D.V., 1989, Upper mantle p velocity structure of the Canadian shield, *Journal of Geophysical Research*, 101, 17,749-17,765.
 National Earthquake Information Center, 1989-1999, *Preliminary Determination of Epicenters*. monthly listings, U.S. Department of the Interior/Geological Survey.
 Lee, D.K., Kyung, J., and Chung, T., 2001, Preliminary tomographic inversion for the crustal characteristics in the central region of South Korea. *Jour. Korean Earth Science Society*, v. 22, no. 1, p. 20-29.
 Song, Seokgoo and Lee, Kiehwa Lee, 2001, Crustal Structure of the Korean Peninsula by Travel Time Inversion of Local Earthquakes, *Journal of the Korean Geophysical Society*, v. 3, no. 1, p. 21-33.

2002년 4월 1일 원고접수
 2002년 6월 21일 원고채택