

원격 수신함수를 이용한 서울과 인천 관측소 하부의 지각 속도구조와 Moho 불연속면 특성 연구

이승규* · 김소구*

Crustal Structure Study and Characteristics of Moho Discontinuities beneath the Seoul and Incheon Stations using Teleseismic Receiver Functions

Seoung Kyu Lee* and So Gu Kim*

ABSTRACT: The purpose of this study is to find P-wave crustal velocity structure and the Moho characteristics beneath Seoul (SEO) and Incheon (INCN) stations using broadband teleseismic records. The use of broadband receiver function analysis is increasing to estimate the fine-scale velocity structure of the lithosphere. The broadband receiver functions are developed from teleseismic events of P waveforms recorded at Seoul (SEO) and Incheon (INCN) stations, and are analyzed to examine the crustal structure beneath the stations. The teleseismic receiver functions are inverted in the time domain of the vertical P wave velocity structures beneath the stations. The crustal velocity structures beneath the stations are estimated using the receiver function inversion method (Ammon *et al.*, 1990). The general features of inversion results are as follows: (1) For the Seoul station, the Conrad and Moho discontinuities exist at 22 km and 30 km depth in the south (BAZ=180°) direction. (2) For the Incheon station, the Conrad discontinuity exists at 22 km depth in the direction of SE (BAZ=145°) and the Moho discontinuity exists at 30~34 km depth with a 4 km thick, which consists of a laminated velocity transition layers with thickness, whereas a crust-mantle boundary beneath the Seoul station consists of a more sharp boundary compared with the Moho shape of INCN station.

서 론

지진파를 이용한 한반도의 지각 속도구조 연구는 지진자료의 부족으로 인해 정량적인 연구되지 못한 상태였다. 지진파를 이용한 지각구조 연구 사례로 김상조, 김소구 (1983)는 한반도의 평균 지각두께를 32 km, 김성균, 정부홍 (1985)은 한반도 남부지역의 평균 지각두께를 29 km, 김소구, 이승규 (1994)는 Ray Method을 이용하여 32~34 km, Chung (1995)은 32 km, Kim, Lee (1996)는 강원도 지역을 대상으로 34 km의 결과를 얻었다. 1994년 이후 한반도 내에 지진 관측망 (기상청, 12개 관측소; 자원연구소, 12개 관측소; 인천 IRIS 관측소; 원주 KSRS 관측망; 포항의 POSEIDON 관측소; 한양대 임시관측소, 10개 등)의 확

충으로 양질의 근거리, 국지, 그리고 원격 지진자료를 이용할 수 있다. 따라서 이들 관측자료를 이용한 다양한 연구 방법 (수신함수 분석, 3차원 속도 토모그래피 방법 등)을 이용하여 지각구조 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 1994. 11부터 1995. 6까지 서울 기상청에 설치한 IRIS (The Incorporated Research for Seismology) 임시관측소 (SEO)의 광대역 원격지진자료와 1995년 6월 이후로 IRIS 관측망 중의 하나인 인천 (INCN) 관측소가 인천 기상청에 설치되어 관측한 광대역 원격지진을 이용하였다.

수신 함수 (Receiver Function)를 이용한 지각과 상부 맨틀의 연구는 Helmberger, Wiggins (1971)에 의해 시도 되었으며, 이들은 3성분 원격 지진을 이용하여 진원과 파선 경로의 영향을 제거하는 진원 및 경로의 균일화 (source and path equalization)을 위해 디콘볼루션 방법을 적용하였다. 그 후 Burdick, Langston (1977a, b), Langston (1979), 그리고 Langston, Isaacs (1981)은 장주

* 한양대학교 지진연구소 (The Seismological Institute, Hanyang University, Ahnsan 425-791, Kyonggi-do, Korea)

기 원격 지진의 Ps 전환파의 진폭과 주행시간을 이용하여 관측소 하부의 지각구조를 연구하였다. Langston (1979) 등에 의해 제시된 수신합수를 이용한 지각구조 연구방법은 Owens *et al.* (1984, 1987), Ammon *et al.* (1990) 등에 의해 수신합수 역산방법 (inversion method)으로 개발되었다. 그 후 많은 지진 학자들은 수신합수를 이용한 지각구조 모델 방법을 개발, 보완하여 활용하고 있다 (Owens, 1987; Owens, Crosson, 1988; Priestly *et al.*, 1988; Regnier, 1988; Ammon *et al.*, 1989, 1990; Ammon, 1991; Cassidy, 1992; McNamara, Owens, 1993; Zhu *et al.*, 1995; Peng, Humphreys, 1997). 이들이 제안한 방법은 다소 차이가 있으나 근본적으로는 광대역 원격지진의 수신합수를 이용하여 관측소 하부 지각내의 속도구조와 경사층 해석, 지각내의 이방체 (anisotropic body), 단층에서의 파형변화 (Langston, 1989) 등을 연구한다는 점에서는 일치하고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 서울 (SEO), 인천 (INCN) 관측소에서 관측한 광대역 원격지진 ($\Delta \geq 30^\circ$)의 수신합수를 분석하여 관측소 하부의 수직 지각 속도구조와 Moho 불연속면 두께 특성을 찾는 것이다.

광대역 원격지진 자료

원격지진 ($\Delta \geq 30^\circ$)의 경우 진원 깊이에 따라 P, pP, 그리고 sP 위상이 발생한다. pP와 sP 위상은 자유표면에서 반사되는 위상들로 심발지진에서 잘 관측되고, P파는 pP나 sP 위상보다 가장 빨리 관측소에 도달한다. 이때 가장 먼저 도달되는 직접 P파는 관측소 하부의 Moho 불연속면에서 P에서 SV로 전환되는 Ps 전환파가 발생되며 이는 pP나 sP의 위상보다 먼저 도달된다. 따라서 본 연구에서는 가장먼저 도달되는 직접 P파가 관측소 하부의 Moho면에서 전환된 Ps파를 이용하여 관측소 하부의 지각속도구조를 연구하고자 한다. 원격지진의 전파과정은 크게 진원 (source), 파선 경로 (ray path), 그리고 관측소 하부의 수신지각 응답 (receiver structure response)의 과정으로 구분할 수 있다. 진원 균일화 과정이란 3성분 광대역 지진 자료로부터 복잡한 진원 함수와 파선 경로, 지진기록 장비에 의한 응답효과를 제거하여 순수한 관측소 하부의 지각 수신합수를 계산하는 것을 말한다 (Langston, 1979). 이와 같이 계산된 Radial과 Tangential 수신합수로부터 전환파 (Ps)의 도달 시간과 에너지 (진폭)크기를 이용하여 관측소 하부의 속도 불연속면의 깊이와 속도 분포를 결정한다.

수신합수 분석을 위한 지진자료의 선택은 중요한 과정

중의 하나이다. 대부분의 연구에서 진앙 거리가 30° 에서 90° 이내에 있는 광대역 또는 장주기 원격지진 자료를 사용하고 있다. 또한 진원깊이가 100 km 이상의 중·심발 지진으로 진앙거리 20° 이내의 국지거리 지진을 사용한 연구 사례도 있다 (Regnier, 1988). 수신 합수를 이용한 지각구조 연구에서 직접 P파의 입사각 (지각-맨틀 경계면)은 자료선택에 있어 중요한 조건이 된다. 또한 진앙 거리가 30° 이상의 지진에 대해서는 관측소 하부에서 초동 P파가 거의 수직으로 입사한다는 것을 밝혔으며 (Langston, 1979), 특히 지각하부의 불연속면에서 전환된 Ps 전환파는 거의 수직입사하기 때문에 이와 같은 전환파의 주행시간과 진폭을 이용하면 관측소 하부의 지각 속도 불연속면 깊이와 속도를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 IRIS 관측망의 하나인 서울 (SEO), 인천 (INCN) 관측소의 광대역 원격 지진자료만을 사용하였다. 서울 관측소는 1994년 11월~1995년 6월까지 약 7개월간 속도형 광대역 지진계 (very broadband seismometer; STS-1)를 임시로 설치하여 지진파를 기록하였다. 그 후 1995년 6월부터는 인천 (INCN) 관측소에서 관측을 하고 있다. 본 연구에서 사용한 지진기록은 서울 관측소의 경우는 40 SPS (samples per second) 그리고 인천 관측소는 20 SPS의 원격지진자료를 이용하였다.

원격 지진자료의 취득시 거의 동일한 지역에서 발생한 큰 규모 ($M \geq 6.0$)의 지진만을 취득하였다. 이는 각 Event 별 수신합수의 S/N비 (signal-to-noise ratio)를 향상시키기 위해 진앙거리와 후방위각 (back azimuth; station to epicenter)이 거의 같은 것만을 모아 스택킹 (stacking)을 하였다. Fig. 1은 연구에 사용한 지진자료를 진앙 (별모양)과 각 관측소 (삼각형) 위치별로 나타낸 것이다. Table 1은 지진자료의 진원인자 (진원시, 진앙, 깊이, 규모 등)를 PDE (Preliminary Determinations of Epicenters) 자료에 근거하여 나타낸 것이다. 각 관측소에서 취득한 원격지진의 특징은 후방위각 (BAZ)과 진앙거리를 고려하여 선택한 것이다. 수신합수 계산은 Ammon (1991)에 의해 개발된 디콘볼루션 알고리즘을 이용하였다. 디콘볼루션은 주파수 영역에서 실시하였다. 이때 디콘볼루션을 안정되게 하기 위해 Water-level은 0.001 (Radial성분의 최소 허용 진폭은 수직성분 최대진폭의 0.001)의 값과 Gaussian Pulse의 폭은 2.5 (약 0.5 Hz저주파 통과필터)를 사용하여 실시하였다. Fig. 2는 서울 (a), 인천 (b) 관측소의 각 후방위각별 관측한 Radial 수신합수와 스택킹한 수신합수를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 2의 상단에 P는 파선계수 (ray parameter; sec/km)를 나타낸 것이다. 각 수신합수의 특징으로 서

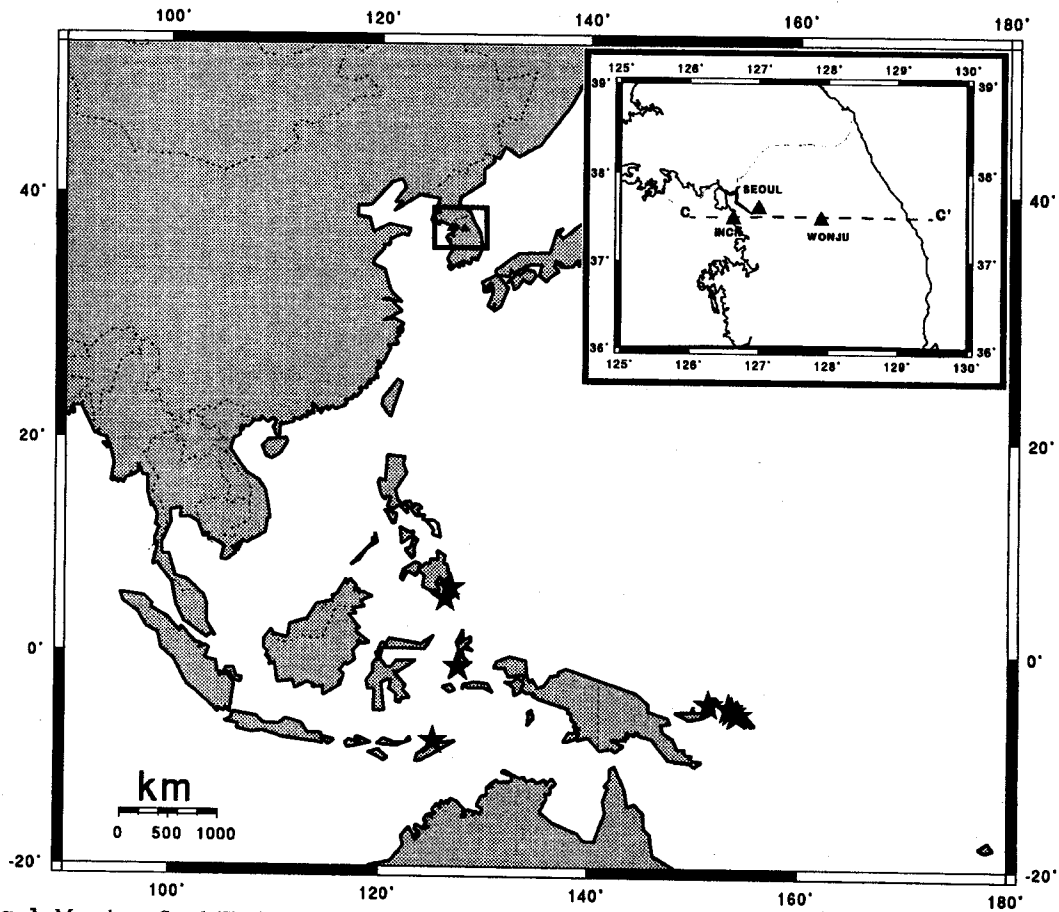


Fig. 1. Map shows Seoul (SEO) and Incheon (INCN) stations (closed triangles) and telescismic events (closed asterisks).

Table 1. Telescismic event parameters for SEO and INCN stations.

Station	DATE m/d/y	O.T. (UT) hr:mn:sec	Dist. (°)	BAZ (°)	Epicenter		Depth (km)	Incident angle (°)	Mag.
					Lat.	Lon.			
Seoul (SEO)	2/13/95a*	8:41:14.90	38.70	179.20	-1.36	179.49	14.0	24.8	6.0
	2/13/95b*	8:43:39.70	38.70	179.30	-1.31	127.42	14.0	24.8	6.3
	2/13/95c*	15: 4:24.00	38.70	179.10	-1.35	127.52	14.0	24.8	6.7
	2/19/95	0:17:45.10	32.20	181.30	5.24	126.26	76.0	26.2	6.1
	4/20/95	8:45:11.60	31.10	180.40	6.28	126.77	94.0	26.2	6.5
Inchon (INCN)	5/14/95*	11:33:18.80	45.70	182.50	-8.38	125.12	11.0	23.6	6.9
	8/14/95*	4:37:17.50	48.10	145.70	-4.84	151.51	128.0	23.0	6.6
	8/16/95a*	10:27:28.60	50.10	143.20	-5.80	154.17	30.0	22.6	7.8
	8/16/95b*	16:24:26.50	49.60	143.40	-5.43	153.77	19.0	22.7	6.7
	8/16/95c*	23:10:23.90	50.20	143.00	-5.77	154.34	33.0	22.6	7.2
	8/17/95*	10: 1:25.90	49.20	143.60	-5.17	153.44	21.0	22.8	6.4

Symbols (*) indicate events for stacking.

을 관측소의 남쪽방향 (BAZ=180°)의 수신합수는 Moho Ps-P시간이 3.5~3.6 sec로 나타났으며 직접 P파와 Moho Ps파 사이에 진폭이 작은 Ps파형이 관측되었다. 인천 관측소의 남동 (BAZ=145°)방향의 수신합수에

서는 Moho Ps-P시간이 3.7~3.8 sec로 관측되었다. Radial 성분의 수신합수에서 직접 P파와 Moho Ps파 사이의 작은 진폭의 Ps 전환파는 지각내의 불연속면에서 P-to-S파로 전환파가 발생되기 때문에 Radial성분의 Ps파

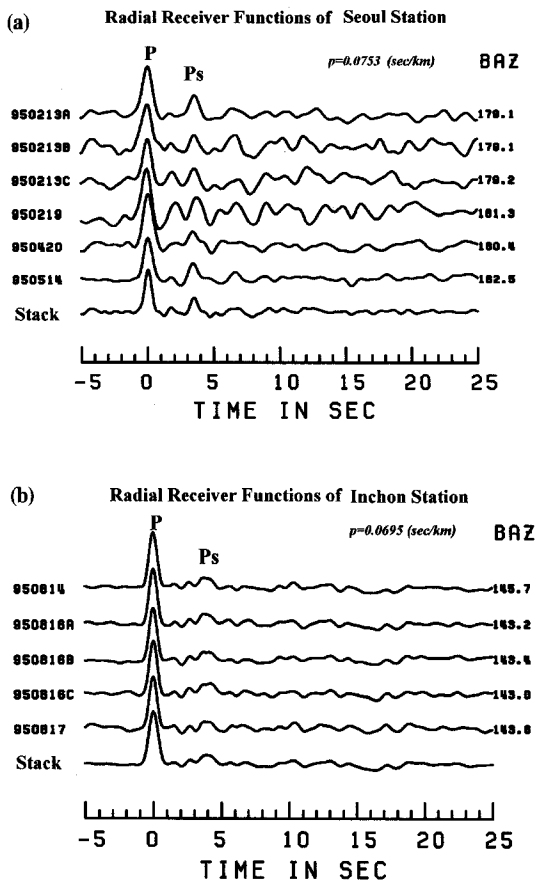


Fig. 2. Stacked and individual radial receiver functions for station SEO (a) and INCN (b).

형은 각 불연속면의 존재를 추정할 수 있다. 서울 (SEO) 관측소의 스테킹한 Radial 수신함수의 직접 P파 진폭 (Pr)과 Moho 전환파 Ps의 진폭비 (Ps/Pr)가 0.36인 반면 인천 (INCN) 관측소의 수신함수 진폭비 (Ps/Pr)는 0.18로 서울 관측소의 Moho Ps의 진폭비 보다 훨씬 작게 관측되었다. 또한 Moho Ps의 파형 폭 (beam width)도 서울 관측소의 경우에는 폭이 좁지만 인천관측소의 경우에는 매우 넓게 나타났다. 이는 서울 관측소 하부의 Moho 불연속면은 인천 관측소의 경우보다 지각-맨틀 경계가 더욱 뚜렷하다는 것을 시사하고있다.

각 관측소에서 후방위각별 스테킹한 Radial 수신함수들은 관측소 하부의 지각 속도모델을 계산하기 위해 관측자료로 사용된다. 각 Radial 수신함수의 Moho Ps - P파의 시간차와 Moho Ps파의 진폭이 다르게 나타나는 것은 진앙거리에 따른 입사각의 차이, Moho 불연속면의 경사, 지각 내부에서의 산란, 잡음 등의 원인으로 알려져 있다 (Langston, 1989; Ammon, 1991). 그러나 본 연구에서는

각 지층이 등방성이며 균질하고 수평층으로 되어있다는 가정 하에 수신함수 역산을 실시하였다.

각 관측소의 수신함수 역산 (Receiver Function Inversion)

본 연구에서는 기존 지각 속도구조 모델 6개를 선택하여 각 관측소의 관측 수신함수 파형을 비교하여 간단히 3~5개의 지층과 3-D Tomography (Kim, Li, 1998)연구인 한반도 중부지역의 3-D 지각 속도모델을 이용하여 수신함수 역산의 초기 지각 속도모델을 작성하였다 (Fig. 3). Fig. 3 (a)는 기존 연구결과인 지각속도 모델들을 나타낸 것이다. 이들 지각 모델들의 Moho 불연속면의 깊이는 29~34 km로, Moho면의 P파 속도는 7.7~7.98 km/sec로 차이를 보이고 있다. Conrad 불연속면의 깊이도 15~18 km로 각 연구 결과에 따라 차이를 보이고 있다. Fig. 3 (b)는 이들 6개의 속도 모델을 수신함수의 선행모델 방법 ($p=0.075$ sec/km, water-level=0.001, Gaussian Beam width=2.5)을 이용하여 이론 수신함수 파형을 작성한 것이다. 이 중 Model B, C, F가 관측 Radial 수신함수의 파형과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 이들 3개의 속도모델을 이용하여 수신함수 역산에서 초기모델 (*a priori model*)로 사용했다.

수신함수 역산법은 Ammon *et al.* (1990)에 의해 개발된 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서는 각 관측소에서 진앙거리 및 후방위각에 따라 스테킹한 Radial 수신함수와 선행모델 방법에 의하여 계산한 초기모델을 이용하여 수신함수 역산을 실시하였다. 그리고 수신함수 역산에서 다음과 같은 가정과 조건을 갖고 시행하였다.

1) 주어진 속도 모델을 이용하여 이론 수신함수를 계산할 때 P파의 속도 (Poisson's ratio=0.25)와 밀도는 $V_p = \sqrt{3}V_s$, $\rho = 0.32V_p + 0.77$ 로 가정하여 사용하였다 (Burteussen, 1977).

2) 각 모델의 Smoothness (σ)는 0.1에서 0.3까지의 작은 값을 이용하였다.

3) 지층의 두께는 깊이가 증가함에 따라 0~2 km 깊이에서는 1.0 km, 2~45 km까지는 2 km 두께로 각각 나누었다.

4) 관측소별 근사 초기 속도 모델을 이용하여 36개의 서로 다른 초기 모델을 만들었다. 이때 사용한 깊이에 따른 속도변화는 3차 다항식으로 속도의 최대 변위를 1.0 km/sec로 제한하며, 이때 각 지층의 속도 모델은 20%의 Random 성분으로 이루어진 속도 기복 (roughness) 모델을 만들었다 (Ammon *et al.*, 1990).

5) 36개의 초기모델을 이용하여 5회의 반복 역산을 한

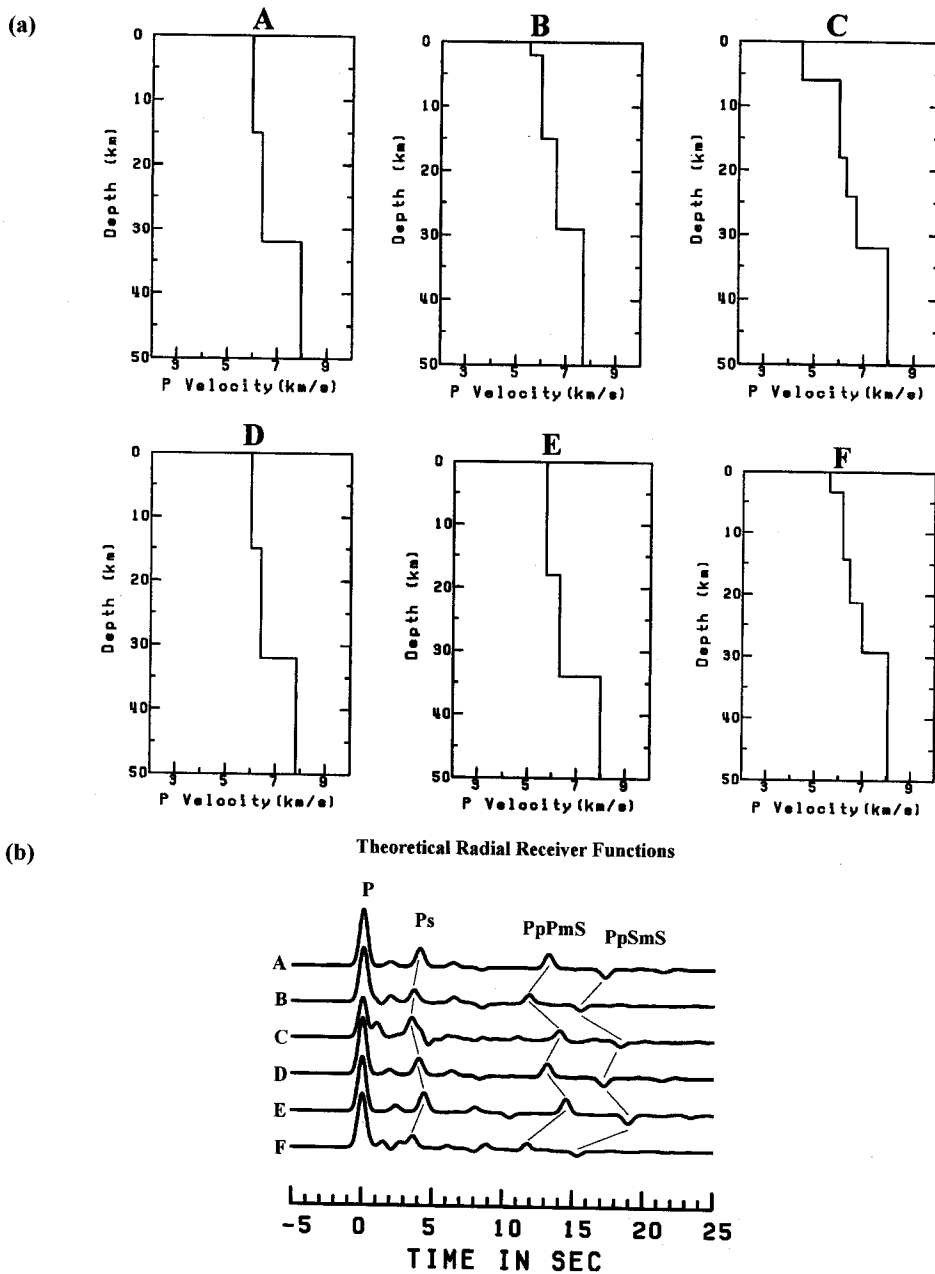


Fig. 3. (a) Velocity models for the Korean Peninsula obtained from previous studies which indicate Model A (Kim and Kim, 1983), B (Kim and Jung, 1985), C (Kim and Lee, 1994), D (Chung, 1995), E (Kim and Lee, 1996), and F (Kim and Li, 1998), respectively. (b) The synthetic radial receiver functions using six models. Among the models, Model B, C, and F are well fitted with a Ps-P arrival time of observed radial receiver function.

후 합당한 지각 모델을 제시한다.

6) 수신 함수 역산에서 비단일해 (nonuniqueness solution)의 문제를 줄이기 위해 각 역산에서 결정된 속도 모델들의 평균 속도 모델을 제시하였다.

서울 (SEO)과 인천 (INCN) 관측소의 수신함수 역산 결과

Fig. 4는 서울 관측소의 남쪽방향의 수신함수 역산결과

Inversion Velocity Models for Seoul Station

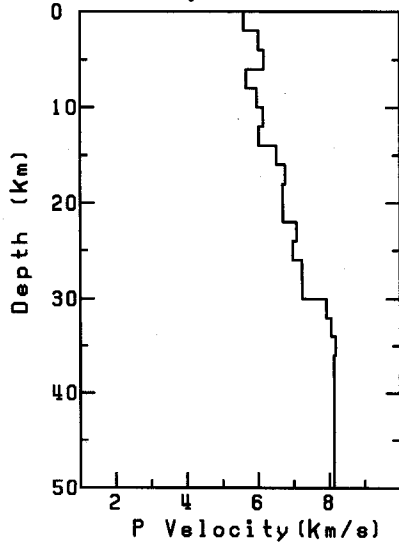


Fig. 4. Inversion results for station SEO in the direction of South direction (BAZ=180°). (Top) Final (thick solid) P wave velocity model takes the mean of acceptable inversion models (thin dashed) from many inversion models. (Bottom) Synthetic (shaded lines) and stacked (thick solid line) radial receiver function waveform fit.

를 나타낸 것이다. Moho Ps전환파형은 진폭이 비교적 크고 뚜렷히 식별할 수 있다. 수신합수 역산결과 5개의 속도 불연속면을 찾을 수 있었다. 각 지층의 평균 속도 불연속면의 깊이 (P파 속도)는 지표로부터 2 km (5.60 km/sec), 14 km (6.01 km/sec), 22 km (6.67 km/sec), 30~34 km (7.22~8.05 km/sec)로 산출 되었다.

Fig. 5는 인천 관측소의 남동 (NE) 방향 수신합수 역산 결과를 나타낸 것이다. 남동 (NE) 방향의 Radial 수신합수에서 Moho Ps 전환파의 파형은 서울 관측소에서 관측한 수신합수와는 달리 진폭이 작고 Moho Ps 전환파형의 폭이 넓은 것이 특징이다. 수신합수 역산 결과로는 지표로부터 6 km 깊이까지 속도가 계속 증가하며 6~22 km 깊이까지 속도의 변화가 거의 없이 일정한 양상을 갖고 있다. 특히 30~34 km 깊이까지 P파의 속도는 급격히 증가하는 양상으로 보아 지각-맨틀의 경계 (crust-mantle

Inversion Velocity Models for Incheon Station

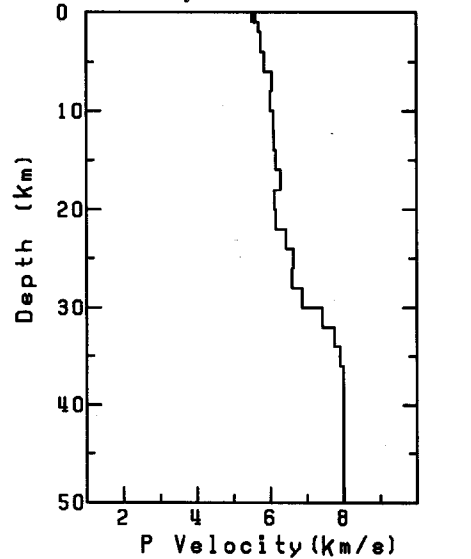


Fig. 5. Inversion results for station INCN in the direction of SE direction (BAZ=145°). (Top) Final (thick solid) P wave velocity model takes the mean of acceptable inversion models (thin dashed) from many inversion models. (Bottom) Synthetic (shaded lines) and stacked (thick solid line) radial receiver function waveform fit.

boundary)가 뚜렷하지 않으며, 이는 모호면이 어느정도 두께를 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 관측 Radial 수신합수에서 Moho전환파의 폭이 3.6~4.2초까지 지속되는 것으로 보아 두꺼운 지각-맨틀 경계가 존재하는 것을 시사하고 있다. 각 지층의 평균 속도 불연속면의 깊이 (P파 속도)는 지표로부터 2 km (5.56 km/sec), 6 km (5.76 km/sec), 16 km (6.06 km/sec), 22 km (6.55 km/sec), 30~34 km (6.87~7.91 km/sec)로 나타났다.

고 찰

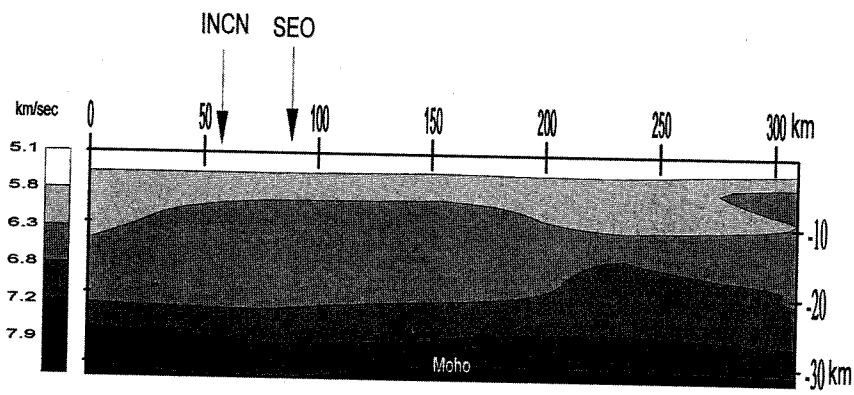
서울 (SEO) 관측소의 남쪽방향 (BAZ=180°)에서 관측한 수신합수 분석결과 Moho 불연속면의 깊이는 30 km (P파 속도=7.98 km/sec)에 존재하며, 또한 30~34 km 깊이에서 속도가 7.22~8.05 km/sec 증가하는 양상으로

불때 서울관측소 하부 30~34 km 깊이에 Laminated Velocity Transition Layer가 존재하는 것으로 추정된다. 지금까지 Conrad 불연속면의 존재에 대해서는 많은 학자들 사이에 논란이 되고 있다. 이는 Moho 불연속면과 같이 뚜렷한 불연속면이 아니며 지역에 따라 존재할 수도 있고 존재하지 않을 수도 있기 때문이다. 본 연구에서는 일반적으로 정의하는 상부지각과 하부지각의 경계인 Conrad 불연속면을 P파 속도가 6.5 km/sec 이상인 속도 경계면을 Conrad 불연속면으로 정의하였다 (Meissner, Wever, 1989). 따라서 서울 관측소 하부의 Conrad 불연속면 깊이는 남동방향으로 22 km 깊이에 존재하는 것으로 추정할 수 있다. 인천 (INCN) 관측소의 남동방향 (BAZ=140°)의 수신합수 분석결과 지각-맨틀의 경계인 Moho 불연속면은 어느정도 두께 (4 km)를 갖는 것으로 나타났다. 또한 Conrad 불연속면의 깊이는 서울과 마찬가지로 22 km 깊이에 존재하는 것으로 추정된다. 이는 지금까지 한반도에서 평균 Conrad 불연속면의 깊이를 15~18 km로 알려져 있는 반면, 본 연구지역인 서울 (SEO), 인천 (INCN) 관측소 하부의 속도구조에서는 선행 연구의 결과보다 다소 깊은 22 km 깊이에 존재하는 것으로 나타났다. Kim, Li (1998)의 한반도 중부지역 3-D 속도 토모그래피 연구 결과와 비교하면 한반도 중부지역인 인천-서울-원주 속도 단면도 (Fig. 6)에서 인천지역은 퇴적층 두께가 3.2 km (5.0~5.6 km/sec), Conrad 불연속면의 깊이가 평균 21.3 km (6.97~7.17 km/sec), Moho 불연속면의 깊이는 30.8 km (7.85~7.97 km/sec) 그리고 서울지역은 퇴적층 두께가 2.5 km (5.0~5.6 km/sec), Conrad 불연속면의 깊이가 평균 21.3 km (6.97~7.17 km/sec), Moho 불연속면의 깊이는 29.3 km (7.97~8.04 km/sec)

인 것으로 나타났다.

본 연구의 결과와 종합하여 비교해볼때 서울, 인천지역에서 Conrad 불연속면의 깊이는 21~22 km 깊이에 존재 가능성이 크며, Moho 불연속면의 깊이는 서울지역에서 29~30 km, 인천 지역에서 Moho 불연속면은 30~34 km의 깊이에 존재하는 것으로 사료된다. Figs. 4, 5, 그리고 7에서 서울, 인천의 지각-맨틀 경계 (CMB)가 나타남을 알 수 있다. 특히 인천지역은 지각-맨틀 경계가 뚜렷하지 않은 두께를 갖는 Laminated Velocity Transition Zone ($d \leq 4$ km)이 존재하는 것으로 추정되어진다. 또한 서울과 인천 관측소의 속도구조는 16~30 km 깊이에서 인천관측소의 지각 속도가 서울관측소 보다 0.8 km/sec 낮게 나타난다. 이는 Fig. 6의 구조적으로 6.6 km/sec 등속도면 (Isovelocity layer)이 서해 (인천)쪽으로 경사를 이루고 있는 Kim, Li (1998)의 결과와 어느정도 일치하고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 지각두께 변화와 지각-맨틀 경계면 (CMB)의 관계는 지구물리학적·지화학적 관점에서 많이 연구되어 왔으며, Moho 두께에 관해서 그동안 많은 지구물리·암석학·지화학자들이 연구하여 왔다 (Lovering, 1958; Willie, 1971). 특히 시생대 순상지 (Proterozoic Shield), 지구대 (Old Rifts), 시생대 탁상지 (Platforms)에서는 두꺼운 지각-맨틀 경계 ($7.1 \leq V_p \leq 7.8$ km/sec)를 갖는 것으로 알려져 있으며, 반면 중생대와 신생대의 조산대 (Orogenic Belts)의 지역에서는 지각-맨틀 경계가 뚜렷한 것으로 알려져 있다 (Meissner, Wever, 1989; Meissner, 1986). 또한 지각 심부에서 압력과 온도가 증가함에 따라 광물조성이 변하며 지각-맨틀경계 부근에서는 많은 화학적 성층 (chemical stratification), 광물학적 위상변화, 맨틀의 부분용융과 분출 등과 같은 복합적인



Profile C-C'

Fig. 6. The cross section of the seismic profile along the vertical plane from the west (37.5°N, 126.0°E) to the East (37.5°N, 129.5°E) in the Central Korean peninsula (after Kim and Li, 1998).

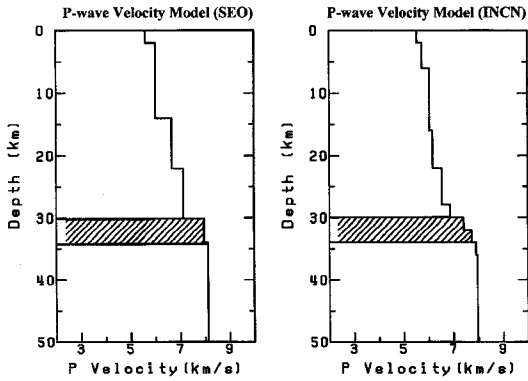


Fig. 7. The 1-D average velocity models beneath the SEO and INCN stations from the inversion results. The shaded zones indicate the crust-mantle boundaries with a thickness and a laminated velocities transition zone.

Table 2. Crustal velocity models beneath the SEO and INCN stations.

Seoul station (SEO)			Incnon station (INCN)		
Layer No.	P-velocity (km/sec)	Thick-ness (km)	Layer No	P-velo-city (km/sec)	Thick-ness (km)
1	5.60	2.0	1	5.56	2.0
2	6.01	12.0	2	5.76	4.0
3	6.67	8.0	3	6.06	10.0
4	7.13	8.0	4	6.18	6.0
5	7.98	4.0	5	6.55	6.0
6	8.13	∞	6	6.87	2.0
			7	7.42	2.0
			8	7.74	2.0
			9	7.91	2.0
			10	7.97	∞

맨틀의 유동학 (rheology)적 성질이 변화되어 얇은 판상의 층 (laminated layer)이 존재하게 되는 원인으로 알려져 있다 (Lay, Wallace, 1995). 물론 본 연구의 결과만으로 단언하기는 이르지만 서울을 포함한 인천 관측소의 SE 방향 (BAZ=145°)의 지각-맨틀 경계면의 속도구조 양상으로 볼때 이방체로 구성된 두께를 갖고 있는 Moho 불연속면의 존재 가능성이 추정된다. 향후 좀더 많은 자료의 취득과 정밀분석 (심부 굴절법과 반사법 탐사)이 병행된다면 이와 같은 현상을 해석하는데 많은 증거를 확보할 수 있으며 생성원인을 규명할 수 있을 것이다.

결 론

1. 인천, 서울 관측소 하부의 속도구조에서 Conrad 불연속면의 깊이는 22 km 깊이에 존재하는 결과를 얻었으

며 이는 지금까지 Conrad 불연속면이 15~18 km에 존재하는 것으로 알려진 깊이보다 4~8 km 더 깊은 곳에 존재하는 것으로 판단된다.

2. 서울·인천 관측소 하부의 Moho 불연속면의 깊이는 30 km에 존재하며 30~34 km깊이에 Laminated Velocity Transition Layer가 존재하는 것으로 추정된다. 특히 인천 관측소 하부의 지각-맨틀 경계면은 뚜렷하지 않고 30~34 km 깊이까지 속도가 증가하는 현상으로 볼때 약 4 km 두께의 지각-맨틀 경계를 갖는 Moho 불연속면이 존재하는 것으로 추정된다.

3. 본 연구의 결과인 서울과 인천 관측소 하부의 평균 지각 속도모델 (Fig. 7, Table 2)은 근거리 지진의 진원인자 (진원시, 진앙, 진원깊이 등) 결정에 사용하면 유용하리라 판단된다.

사 사

본 연구는 교육부 기초과학 육성 연구비 (BSRI-97-5420)와 과기처 (특정연구)의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

김상조, 김소구 (1983) 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 광산지질, 16권, p. 51-61.
 김성균, 정부홍 (1985) 한국 남부지역의 지각구조. 광산지질, 18권, p. 151-157
 김소구, 이승규 (1994) 지진관측 및 Ray Method에 의한 한반도 남부지역 지각구조 연구. 한국자원공학회지, 31권, p. 549-558
 Ammon, C.J., Zucca, J. and Kasameyer, P. (1989) An S-to-P converted phase recorded near Long Valley/Moho Craters Region. California, J. Geophys. Res., v. 94(B12), p. 17721-17727.
 Ammon, C.J., Randall, G., and Zandt, G. (1990) On the nonuniqueness of receiver function inversions. J. Geophys. Res., v. 95(B10), p. 15303-15318.
 Ammon, C.J. (1991) The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms. Bull. Seism. Soc. Am., v. 81, p. 2504-2510.
 Berteussen, K.A. (1977) Moho depth determinations based on spectral ratio analysis of NORSAR long-period P waves. Phys. Earth Planet. Inter., v. 31, p. 313-326.
 Burdick, L.J. and Langston, C.A. (1977) Modeling crustal structure through the use of converted phases in teleseismic body-wave forms. Bull. Seism. Soc. Am., v. 67, p. 677-691.
 Chung, T.W. (1995) A quantitative Study on the Crustal Structure of the Korean Peninsula based on the Earthquakes from 1991 to 1994. J. Korean Earth Science Soc., v. 16(2), p. 152-157.
 HelMBERGER, D. and Wiggins, R.A. (1971) Upper mantle structure of midwestern United States. J. Geophys. Res., v. 76, p. 3229-3245.

- Kim, S.G. and Lee, S.K. (1996) Seismic velocity structure in the Central Korean Peninsula using the artificial explosions. *Bull. Seism. Assoc. Far East, SAFE* v. 2, p. 4-17.
- Kim, S.G. and Li, Q. (1998) 3-D crustal velocity tomography in the Central Korean Peninsula. *Shaleveth Freier First International Workshop on Advanced Method in Seismic Analysis, High Precision Hypocenter Location and Seismic Tomography*. Dead Sea, January 12-15, 1998.
- Langston, C.A. (1977a) Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 67, p. 713-724.
- Langston, C.A. (1977b) The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 67, p. 1029-1050.
- Langston, C.A. (1979) Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *J. Geophys. Res.*, v. 84(B9), p. 4749-4762.
- Langston, C.A. (1989) Scattering of teleseismic body waves under Pasadena, California. *J. Geophys. Res.*, v. 94, p. 1935-1951.
- Lay, T. and Wallace, T.C. (1995) *Modern Global Seismology*, Academic Press, 521p.
- Lovering, J.F. (1958) The nature of the Mohorovicici discontinuity. *Trans. Am. Geophys. Un.*, v.39, p. 947-955.
- McNamara, D.E. and Owens, T.J. (1993) Azimuthal shear wave velocity anisotropy in the basin and range province using moho Ps converted phases. *J. Geophys. Res.*, v. 98(B7), p. 12003-12017.
- Meissner, R. (1986) *The continental crust: A geophysical approach*, London: Accademic Press, 426p.
- Meissner, R. and Wever, T. (1989) Continental crustal structure. In "The Encyclopedia of Solid Earth Geophysics" (D. James, ed.), Van Nostrand-Reinold, New York, p. 75-89.
- Owens, T.J., Zandt, G. and Taylor, S.R. (1984) Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms. *J. Geophys. Res.*, v. 89(B9), p. 7783-7795.
- Owens, T.J., Taylor, S.R. and Zandt, G. (1987) Crustal structure at regional seismic test network stations determined from inversion of broadband teleseismic P waveforms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 77, p. 631-662.
- Owens, T.J. (1987) Crustal structure of the Adirondacks determined from broadband teleseismic waveform modeling. *J. Geophys. Res.*, v. 92(B7), p. 6391-6401.
- Owens, T.J. and Crosson, R.S. (1988) Shallow structure effects on broadband teleseismic P waveforms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 78, p. 96-108.
- Peng, X. and Humphreys, E.D. (1997) Moho Dip Crustal Anisotropy in Northwestern Nevada from Teleseismic Receiver Functions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 87, p. 745-754.
- Priestly, K.F., Zandt, G., and Randall, G.E. (1988) Crustal structure in Eastern Kazakh, U.S.S.R. from teleseismic receiver functions. *Geophys. Res. Lett.*, v. 15(6), p. 613-616.
- Reginer, M. (1988) Lateral Variation of Upper Mantle structure beneath New Caledonia determined from P-wave receiver function: evidence for a fossil subduction zone. *Geophysical J.*, v. 95, p. 561-577.
- Zhu, L., Owens, T.J. and Randall, G.E. (1995) Lateral variation in crustal structure of the northern Tibetan Plateau inferred from teleseismic receiver functions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 85, p. 1531-1540.
- Willie, P.J. (1971) *The Dynamic Earth: Textbook in Geosciences*, John Wiley & Sons, Inc., 416p.