

# 수신함수와 표면파 분산곡선의 연합역산과 H- $\kappa$ 를 이용한 원주 KSRS 광대역관측소 지각속도구조 연구

전태현<sup>1)</sup>, 김기영<sup>2)</sup>, 박용철<sup>3)</sup>, 강익범<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>한국지질자원연구원 국토지질연구본부, thjeon@kigam.re.kr

<sup>2)</sup>강원대학교 지구물리학과

<sup>3)</sup>극지연구소 극지지구시스템연구부

<sup>4)</sup>한국지질자원연구원 국토지질연구본부

## Crustal Velocity Structure beneath Wonju, Korea Using the H- $\kappa$ Stacking Method and Joint Inversion of Receiver Functions and Surface-wave Dispersion Curves

Taehyeon Jeon<sup>1)</sup>, Ki Young Kim<sup>2)</sup>, Yongcheol Park<sup>3)</sup>, Ik-Bum Kang<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Geological Research Division, KIGAM

<sup>2)</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University

<sup>3)</sup>Division of Polar Earth System Sciences, KOPRI

<sup>4)</sup>Geological Research Division, KIGAM

### 1. 관측소

원주 KSRS는 CTBT에서 운영되는 관측소 중 하나로서(PS31, Primary Station 31) 19 개소의 단성분 단주기 속도관측소와 6 개소의 3성분 장주기 그리고 1 개소의 3성분 광대역 가속도관측소를 가지는 총 26 개의 관측소로 구성되어있는 배열식 관측소이다. 그 규모는 약 1,200 km<sup>2</sup> (30 km × 40 km) 로서 동아시아에서 가장 큰 규모의 지진 관측망이다. 본 연구에서는 KSRS의 관측소 중 광대역 관측소(KS31)에서 획득한 40 sample/sec 데이터를 이용하여 그 하부의 지각속도구조를 연구하고자 하였다.

### 2. 데이터

분석에 사용된 이벤트는 2002년 10월 ~ 2011년 03월 13일 사이에 KS31 광대역관측소에 기록된 이벤트 중 규모 Mw 5.5 이상(Minoo Kosarian, 2006)의 1,848 개 이벤트를 획득하여 검토 후 분석에 사용되었다. 표면파 분산곡선은 Imaging the upper crust of the Korean Peninsula by surface-wave Tomography(

K. H. Cho 외, 2007)에서 0.5 초에서 20.0 초의 주기를 갖는 Love 및 Rayleigh wave의 Group Velocity가 사용되었다. 이는 한반도에서 noise analysis를 이용한 토모그래피 결과에서 산출된 것이다. 한반도 전체 관측소를 하나의 배열식 관측소로 가정하고 원격 지진자료를 이용하여 p-omega technique을 사용하여 산출한 약 10초에서 150초의 주기범위를 가지는 Rayleigh Phase Velocity(H. J. Yoo 외, 2007) 역시 적용하여 테스트 되었다.

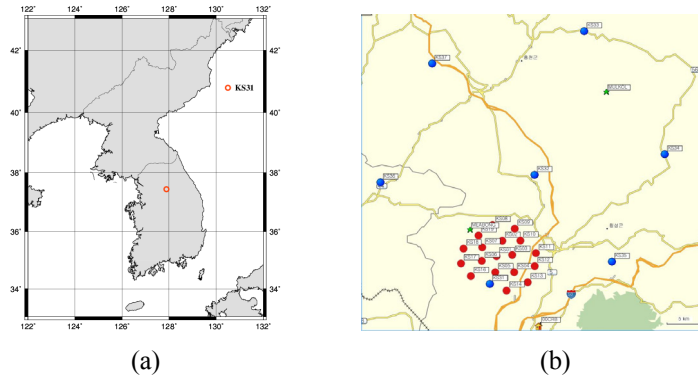


Fig. 1. Map of station. : (a) Map of KS31 station. (b) Map of KSRS. It consists of 26 stations.

### 3. 연구방법

수신함수를 계산하는 방법에는 계산영역에 따라 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 Clayton and Wiggins(1976)의 frequency-domain water-level method를 이용한 주파수 영역에서 계산되는 Langston의 방법이며, 다른 하나는 Gurrola et al. (1990), Ammon (1992) and Ligorria and Ammon에 의해 사용되었던 time-domain method이다. 본 연구에서는 Kikuchi와 Kanamori(1982)에 의해 제안된 방법을 적용하여 Ligorria와 Ammon(1999)에 의해 사용된 방법으로, 시간영역에서의 반복적인 디컨볼루션을 수행하여 수신함수를 계산하는 Iterative time-domain receiver estimation method를 사용하였다. 참고로, 수신함수를 계산하는 이 두 가지 방법에 대한 비교는 Ligorria and Ammon(1999)에 의해 수행되었다.

수신함수는 P파와 그 전환파들의 상대적인 주행시간을 이용하고 있기 때문에 속도와 깊이 간에 상쇄작용이 나타날 수 있다. 즉, 상대적으로 얇고 속도가 느린 층과 두껍고 속도가 빠른 층의 수신함수 결과가 같게 나타날 수 있다. 따라서 역산을 통해 구해지는 속도 모델은 유일하게 결정되지 못한다(Ammon et al. 1990). 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 수직 Sv파(Sv)의 속도 평균에 민감한 표면파 분산곡선을 함께 역산 수행하였다. 즉, 수신함수 데이터와 표면파 분산 데이터를 연합하여 역산을 수행함으로써 비유일성(non-uniqueness)을 보완하고자 하였다. 이를 위해 Julia et al. (2000)은 두 관측된 결과의 불일치율(misfit)이 최소가 되도록 하는 반복적 최소제곱법(iterative least square approach)을 소개하였다. 이는 점핑 알고리즘(jumping algorithm)과 평활도(smoothness) 개념이 적용되었으며, 연역적 모델을 사용하는 선형 최소제곱 역산(linearized least-square inversion) 방법으로 본 연구에 적용되었다.

또한 계산된 수신함수를 이용하여 H- $\kappa$  ( $\kappa$ 는 Vp/Vs 비율) 영역에서의 grid searching을 수행함으로써 지각의 두께와 Vp/Vs 비를 산출한 후 연합역산 결과와 비교하였다.

## 4. 결과

### 4-1. 수신함수

수신함수를 계산하기 위해 Gaussian Filter band-width parameter로써 2.5가 사용되었으며, 그 결과 총 1,848개 중 310 개의 이벤트가 90% 이상의 일치율을 보여 분석에 사용되었다. 각 수신함수를 분석하기 위하여 Fig. 2.와 같이 8개의 그룹으로 세분화하였으며, 신호 대 잡음비를 높이기 위하여 중합(stack)을 실시하였다.

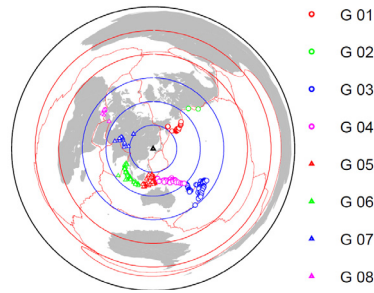


Fig. 2. Map of events. It is split into 8 groups for teleseismic events.

### 4-2. 연합역산

본 연구에서는 균질한 수평 평면층의 IASP91모형을 초기 역산모델로서 사용되었으며, 심도 3km 까지는 층을 1km와 2km로 나누었으며, 이후 60.5 km까지는 2.5 km로, 이후 105.5 km 까지는 5 km로 층을 세분화 하였다. 많은 수신함수를 분석해본 결과 적정하다고 판단된 평활도(smoothness)는 0.5 이었으며, 0.5의 평활도에서 영향 계수(influence factor)로는 0.25를 선정하였다.

연합역산은 Fig. 2.와 같이 진앙거리 30° ~ 90°에서 발생한 원격지진 이벤트를 8개의 그룹으로 나누어 각 그룹의 수신함수를 중합한 후 수행되었다. 각 그룹별 이벤트에 대한 정보는 Table 1.과 같다.

Table 1. Information of teleseismic events used for this study.

Group Name	No. of events	Gap of BAZ	avg. BAZ	Min. BAZ	Max. BAZ	Gap of GCARC	avg. GCARC	Min. GCARC	Max. GCARC
G1	27	21	43.5	33	54	18	41.0	32	50
G2	3	8	45.0	41	49	9	72.5	68	77
G3	73	24	132.0	120	144	29	75.5	61	90
G4	42	35	154.5	137	172	22	48.0	37	59
G5	52	21	186.5	176	197	19	40.5	31	50
G6	81	41	222.5	202	243	18	47.0	38	56
G7	19	35	290.5	273	308	19	40.5	31	50
G8	8	9	305.5	301	310	15	72.5	65	80
SUM	305								

수신함수와 표면파 분산곡선의 연합역산을 통하여 얻어진 각 그룹별 속도구조는 Fig. 3과 Table 3.과 같이 나타났다. 모호면을 S파의 속도가 4.0 km/s 내외에서 급격히 증가하는 구간을 선정하였으며, 그 결과 대부분의 그룹에서 33 km의 모호면 깊이를 보였으며, 그룹 4와 그룹 6에서는 30.5 km의 모호면 깊이를 나타내었다.

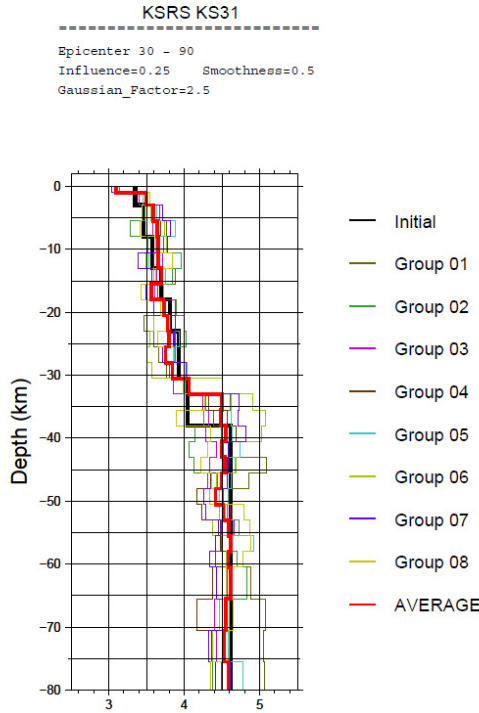


Fig. 3. Plot of inversion results of each groups.

Table 2. Moho Depth of this study. Most of groups represent 33 km but Group4 and Group6 represent 30.5km of Moho.

Group Name (aveg. of BAZ : GCAARC)	Moho Depth (km)	Group Name (aveg. of BAZ : GCAARC)	Moho Depth (km)
G1 (43.5 : 41.0)	33 km	G5 (186.5 : 40.5)	33 km
G2 (45.0 : 72.5)	33 km	G6 (222.5 : 47.0)	30.5 km
G3 (132.0 : 75.5)	33 km	G7 (290.5 : 40.5)	33 km
G4 (154.5 : 48.0)	30.5 km	G8 (305.5 : 72.5)	33 km

### 4-3. H- $\kappa$ 분석

계산된 수신함수를 이용하여 H- $\kappa$  영역에서 Grid search를 통해 최대 진폭을 찾아내어 모호면과  $\kappa$  ( $V_p/V_s$  ratio)를 결정하는 방법인 H- $\kappa$  분석을 실시하였다. 본 연구에서는 H- $\kappa$  method의 가중치를 위해  $W_1=0.5$ ,  $W_2=0.3$ ,  $W_3=0.2$ 로 지정해 주었다. 또한, H- $\kappa$  분석에서 사용될 P파 속도를 결정하기 위하여 Fig. 2와 같이 2008년 수행된 KCRT-2008 측선 중 KS31 광대역 관측소와 가장 인접한 구간인 S2와 S3 사이 중간 지점에서 심도 40 km까지의 P파 속도구조의 평균을 구한 결과  $V_p = 6.3$  km/s를 나타내었다(김기영 외, 2010). 이 결과를 토대로 본 연구에서는 P파 속도로서 6.3 km/s를 적용하여 결과를 산출하였다.

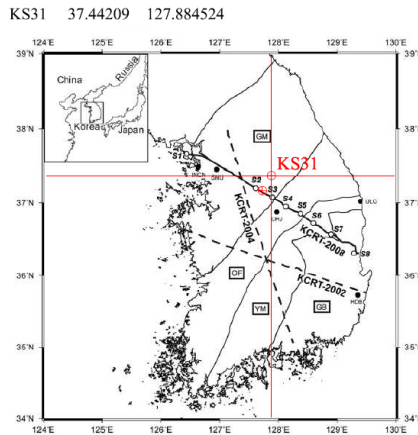


Fig. 2. Layout of KCRT-2008 and KS31 station.

연합역산에서 이용되었던 각 수신함수 그룹에서의 H- $\kappa$  분석의 결과를 Table 4.에 나타내었다. H- $\kappa$  분석은 모호면의 심도로써 31.5 km ~ 33.2 km 범위를 보였으며,  $V_p/V_s$  비로는 1.69 ~ 1.78의 범위를 나타내었다. 모호면의 심도는 대체적으로 연합역산의 결과와 유사하게 나타났다.

Table 4. Results of H- $\kappa$  stacking analysis

Group Name ( avg. of BAZ : GCAARC )	Moho Depth (km)		Vp/Vs ratio	Group Name ( avg. of BAZ : GCAARC )	Moho Depth (km)		Vp/Vs ratio
	Joint	H- $\kappa$			Joint	H- $\kappa$	
G1 (43.5 : 41.0)	33	33.2	1.69	G5 (186.5 : 40.5)	33	32.5	1.72
G2 (45.0 : 72.5)	33	32.7	1.69	G6 (222.5 : 47.0)	30.5	32.0	1.72
G3 (132.0 : 75.5)	33	31.6	1.78	G7 (290.5 : 40.5)	33	32.3	1.70
G4 (154.5 : 48.0)	30.5	32.5	1.75	G8 (305.5 : 72.5)	33	31.5	1.69

## 5. 토의 및 결론

역산에서 Rayleigh Phase Velocity를 시험하였으나, Group Velocity에 비해 매우 불안정한 결과를 보여 결론 도출에는 사용될 수 없었다.

Group Velocity를 이용한 연합역산 결과 KS31 광대역관측소 하부의 모호면의 심도는 대부분의 그룹에서 33 km의 모호면 깊이를 보였으며, 그룹 4와 그룹 6에서는 30.5 km의 모호면 깊이를 나타내었다. 또한, H- $\kappa$  분석결과 모호면은 평균 32.2 km였으며, 이는 연합역산에서의 각 그룹에 대한 평균(32.37 km)과 유사했다. 평균  $V_p/V_s$  비는 1.71 이었으며, 식 (1)을 이용하여 계산한 평균 동 포아송비는 약 0.24이다.

$$v_d = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

원주 KSRS에 대한 기존 연구결과로는 2004년 북동쪽 31 ~ 35 km, 남동쪽 30.5 km ~ 35 km, 북서쪽 33 km으로 모호면의 깊이를 제시한 예가 있다(김소구, 2004). 이는 P파 속도구조를 제시하였으며,  $V_p = \sqrt{3} V_s$ ,  $\rho = 0.32V_p + 0.77$ 이며, 포아송 비는 0.25로 가정하였다. 또한, 모두 7개의 이벤트만이 분석에 사용되었다. 다른 예로, KSRS 데이터가 포함되어 있지는 않으나, 한반도 전역에 대해 토모그래피 결과를 제시하였으며(장성준 외, 2007), KS31 광대역 관측소에 대해 계산된 모호면은 약 32.1km로 본 연구결과와 유사했다.

마찬가지로 KSRS의 데이터가 포함되어있지는 않으나 한반도 지각에 대한 3차원 이미지화 결과에서 KS31 광대역 관측소에 대한 모호면을 약 33.8 km로 계산한 연구가 있다(유현재 외, 2007).

추후 이벤트 커버리지를 높이기 위한 방법으로써 국지지진을 이용한 수신함수 계산에 대한 연구와 원격 지진의 Pierce point를 이용한 모호면 경사 여부 연구가 추가로 진행될 예정이다.