

선형최소2제곱법을 리용한 접수합수 해석으로부터 지각속도구조추정

최창철, 허준, 리경성

지진 및 화산예보와 지하자원탐사 등 여러 분야에서 지각속도구조를 추정하는것은 매우 중요한 의의를 가진다. 지난 기간 지각속도구조를 추정하기 위한 지진학적 및 지구물리학적방법들[1-3]이 많이 제기되었다. 특히 접수합수방법[2, 3]을 리용하면 개별적인 지진관측소근방에서 먼거리지진기록자료로부터 지각의 체적파속도구조를 추정할수 있으며 나아가서 지각의 구조와 조성에 대한 정보를 얻어낼수 있다.

접수합수방법에 의한 지각속도구조의 추정문제는 관측기록과 매우 유사한 모의기록을 주는 지각속도구조의 최량모형을 탐색하는 문제[4]에 귀착된다.

우리는 접수합수방법과 선형최소2제곱탐색알고리즘[4]을 리용하여 η 지구의 지각속도구조를 추정하였다.

1. 접수합수방법의 이론적기초

일반적으로 먼거리지진기록은 체적파기록과 결면파기록으로 이루어진다.

접수합수방법은 시간적으로 앞선 먼거리체적파기록자료로부터 관측소근방의 지각속도구조를 추정하는 방법이다.

먼거리체적파의 전파문제는 다층매질에서 평면파의 반사/굴절/전환현상문제로 볼수 있는데 그것에 대한 정량적인 취급방법[1]은 이미 잘 알려져있다.

먼거리체적파의 파형전환과 임펄스기록은 그림 1과 같다.

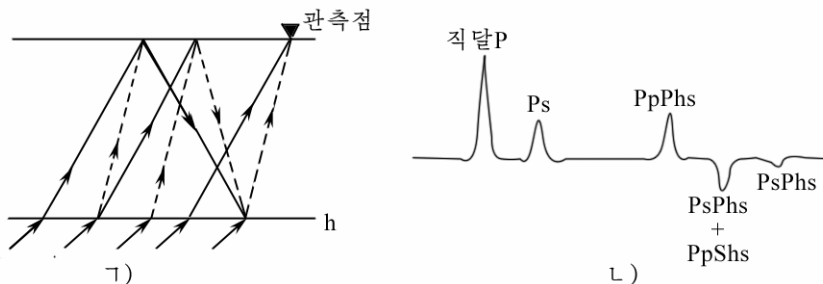


그림 1. 먼거리체적파의 파형전환(Γ)과 임펄스기록(L))

실선은 P파, 점선은 S파, 화살표는 전파방향, h는 경계면,

p, s는 굴절 및 반사된 P, S파

그림 1에서 보는바와 같이 만틀과 지각경계면에 평면파가 입사할 때 여러가지로 파형이 전환된다.

일반적으로 먼거리체적파기록은 다음과 같이 표시된다.

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= W(t) * E(t) * I(t) \\ S(t) &= W(t) * E(t) * RF(t) * I(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서 $P(t)$ 는 초동(P파)기록, $S(t)$ 는 전환파(S파)기록, $W(t)$ 는 진원시간함수, $E(t)$ 는 맨틀응답, $I(t)$ 는 지진계응답, $RF(t)$ 는 지각응답 즉 접수함수이며 $*$ 은 합성적연산기호이다.

식 (1)로부터 전환파기록을 초동기록으로 거꾸합성적하면 접수함수를 결정할수 있다. 시간표시에서 합성적연산이 주파수표시에서 곱하기연산으로 넘어가므로 접수함수스펙트르는

$$RF(\omega) = \frac{S(\omega)}{P(\omega)} = \frac{R(\omega)}{Z(\omega)}, \quad RF(t) = F^{-1}[RF(\omega)]. \quad (2)$$

여기서 $RF(\omega)$ 는 접수함수의 푸리에변환 즉 접수함수의 스펙트르이며 $S(\omega)$, $P(\omega)$ 는 각각 전환파기록, 초동기록의 스펙트르이고 $R(\omega)$, $Z(\omega)$ 는 먼거리체적파기록의 동경성분과 수직성분의 스펙트르이다. 식 (2)에서 일반적으로 먼거리체적파는 지면에 거의 수직으로 입사한다는 사실을 고려하였다.

먼거리체적파관측기록으로부터 계산된 관측접수함수에는 관측소근방의 지각구조에 대한 정보가 반영된다. 그러므로 관측접수함수로부터 해당 관측소근방의 지각구조를 추정할수 있다. 즉 적당히 설정된 지각구조모형으로부터 전파행렬법[1]을 리용하여 모형접수함수를 결정하고 관측접수함수와 비교하여 편차가 크면 모형을 수정하고 편차가 허용값범위에 들어가면 해당 모형을 연구지역의 지층구조에 대한 근사모형으로 택하는 방법이 바로 접수함수방법이다.

2. 지각속도구조추정

2013년 8월부터 2014년 8월까지의 기간에 B지구에 배치된 3개의 수자지진관측소들에 기록된 먼거리체적파기록자료들을 분석하고 관측소별로 관측접수함수들을 계산하였다.

본문에서는 지층구조모형의 탐색문제를 층별S파속도에 관한 선형최소2제곱문제로 설정하고 특이값분해법알고리즘[4]을 리용한 탐색프로그램을 작성하였다.

연구지역에서 관측소별로 지하 50km까지의 구간을 1~2km 간격으로 분할하고 체적파의 파선파라미터를 0.06으로, 깊이에 따르는 뽕뽕비를 0.22~0.32로 설정하였다.

뽕뽕비와 파속도사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\mu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{(v_p/v_s)^2 - 1} \right) \quad (3)$$

여기서 μ 는 뽕뽕비이고 v_s 와 v_p 는 각각 S파속도와 P파속도이다.

그리고 매질밀도와 P파속도사이에는 다음과 같은 경험식[2]이 성립한다고 가정하였다.

$$\rho(h) = 0.32 \times v_p(h) + 0.77 \quad (4)$$

여기서 $\rho(h)$, $v_p(h)$ 는 각각 해당 깊이에서 밀도와 P파속도이다.

일반적으로 접수함수는 지각에서 깊이에 따르는 체적파속도들과 매질밀도 그리고 파선파라미터 등에 관한 비선형함수[1]이지만 접수함수로부터 지각속도구조를 탐색하는 접수함수방법의 거꾸문제는 선형방정식으로 정식화할수 있다.

실지 지각의 S파속도구조모형을 \mathbf{m} , 초기모형을 \mathbf{m}_0 , 20Hz로 표본화된 관측접수함수 시계열의 j 번째 값을 d_j 라고 하고 초기모형이 실지모형에 매우 가깝다고 가정하면 지각 구조모형의 탐색문제는 다음과 같은 선형대수방정식을 만족시키는 모형 \mathbf{m} 을 찾는 문제라고 말할수 있다.

$$(\mathbf{D} \cdot \mathbf{m})_j \approx d_j - F_j[\mathbf{m}_0] + (\mathbf{D} \cdot \mathbf{m}_0)_j \quad (5)$$

여기서 $F_j[\cdot]$ 는 모형으로부터 접수함수시계열의 j 번째 값을 얻어내는 함수로서 전파행렬법[1]에 의하여 계산되며 \mathbf{D} 는 \mathbf{m}_0 에서 $F_j[\mathbf{m}]$ 의 편미분들로 이루어지는 행렬이다. 식 (5)는 \mathbf{m}_0 에서 $F_j[\mathbf{m}]$ 의 테일러전개식(고차항 무시)과 등가이며 최소제곱법으로 풀수 있다.

히지구에 배치된 지진관측소 1-3들에서 모형접수함수와 지각속도구조추정결과는 그림 2-4와 같다.

관측접수함수와 모형접수함수사이의 상대오차는 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^N (d_j - F_j[\mathbf{m}])^2 \bigg/ \sum_{j=1}^N d_j^2 \quad (6)$$

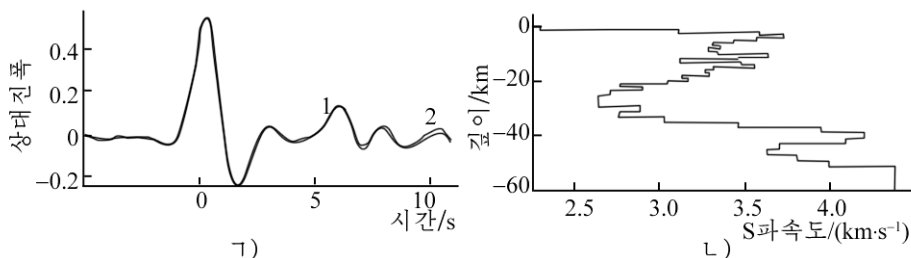


그림 2. 관측소 1에서 모형접수함수(1)와 지각속도구조추정(2)결과
1-모형접수함수, 2-관측접수함수; $\varepsilon = 1.456 \cdot 10^{-2}\%$

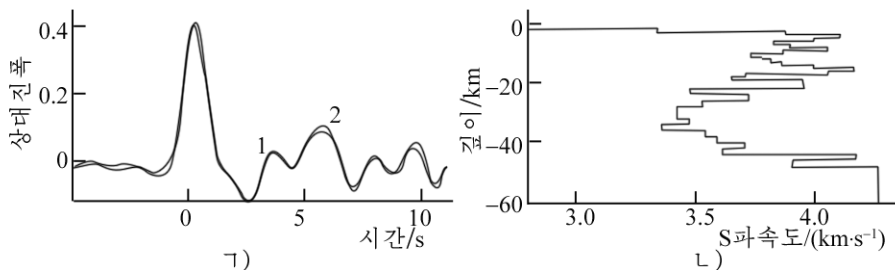


그림 3. 관측소 2에서 모형접수함수(1)와 지각속도구조추정(2)결과
1, 2는 그림 2에서와 같음; $\varepsilon = 2.435 \cdot 10^{-2}\%$

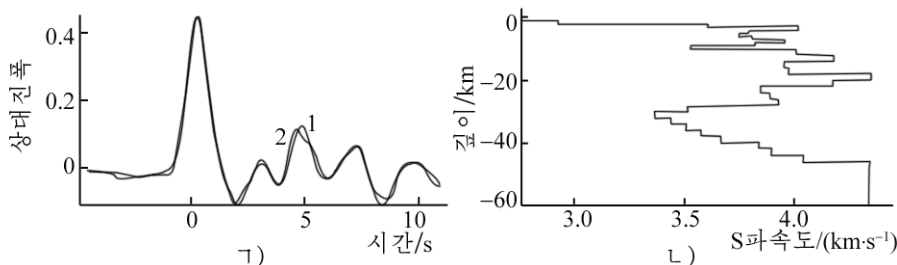


그림 4. 관측소 3에서 모형접수함수(1)와 지각속도구조추정(2)결과
1, 2는 그림 2에서와 같음; $\varepsilon = 1.953 \cdot 10^{-2}\%$

그림 2-4에서 보논바와 같이 3개의 관측소들에서 다같이 깊이 8~10km근방과 33~35km근방에서 S파속도의 극소점들이 존재한다. 지면근방을 제외하면 깊이 33~35km근방에서 S파속도의 최소값이 나타나는데 그 값은 관측소 1에서는 2.6km/s정도이고 관측소 2와 관측소 3에서는 3.3km/s정도이다. 그리고 33~35km이하에서 심한 속도비약이 나타난다.

그림 2-4에서 S파속도구조모형으로 얻어지는 모형접수합수는 1.5~2.5%의 오차로 관측접수합수와 거의 일치한다.

이와 같이 日지구에서는 8~10km근방에 S파저속도층이, 33~35km근방에 모호경계가 존재한다.

맺 는 말

접수합수방법과 선형최소2제곱법을 리용하여 日지구의 지각속도구조를 추정하였다.

연구결과 日지구에서 깊이 8~10km근방에 S파저속도층이, 깊이 33~35km근방에 모호경계가 존재한다고 추측할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] B. Kennett; Seismic Wave Propagation in Stratified Media, ANU E Press, 195~208, 2009.
- [2] E. A. Hetland et al.; Tectonophysics, 386, 157, 2004.
- [3] C. Schiffer et al.; Geophysical Journal International, 204, 1579, 2016.
- [4] W. H. Press et al.; Numerical Recipes in Fortran 77, Cambridge University Press, 665 ~ 674, 2001.

주체106(2017)년 6월 5일 원고접수

Estimating the Crustal Velocity Structure from the Receiver Function Analysis using the Linear Least Square Method

Choe Chang Chol, Ho Jun and Ri Kyong Song

We estimated the crustal velocity structure in 日 region from the receiver function analysis using the linear least square method. In this region we found the low velocity layer to be in about 8~10km of depth and the ambiguity boundary to be in about 33~35km of depth.

Key words: receiver function, crustal velocity structure, seismic wave