

접수함수해석에 의한 파속비분포의 추정

허준, 문성철

지난 시기 접수함수해석을 리용한 지각구조추정에서는 주로 지각에서 파속비 (V_P/V_S)를 고정하고 S파속도분포만을 추정하는것이 보편적인 경향으로 되어왔다.

본문에서는 접수함수해석에 의한 지각구조추정에서 풀이의 초기모형에 대한 의존성을 낮추고 정확도를 높일 목적으로 제한조건이 있는 비선형최소2제곱법을 리용하여 지각에서 깊이에 따르는 P파속도분포와 파속비분포를 동시에 추정하는 방법을 제기하였다.

1. 접수함수해석의 역문제

접수함수해석의 역문제를 제한조건이 있는 비선형최소2제곱문제로 정식화하고 TRR(Trust-Region-Reflective)알고리즘을 리용하여 역문제풀이를 진행하였다.

접수함수계산을 위한 파라미터는 지층별두께, 체적파속도 그리고 매질밀도와 파선파라미터, 가우스인수 등이다.[1, 2]

지각에서 층분할은 직달P파와 P_S 전환파사이의 지연시간과 층두께사이의 다음과 같은 관계식을 리용하여 층별로 지연시간을 할당하는 방식으로 진행하였다.

$$\Delta z = \Delta t_{PS} \left(\sqrt{V_S^{-2} - p^2} - \sqrt{V_P^{-2} - p^2} \right)^{-1} \quad (1)$$

여기서 Δz 는 개별적인 지층두께, Δt_{PS} 는 해당 지층에서의 지연시간, V_P 와 V_S 는 해당 지층에서 P파와 S파의 전파속도, p 는 파선파라미터이다. 이러한 지연시간분할방식은 역문제풀이의 수렴성을 높여준다.[3]

매질밀도는 P파속도와 밀도사이의 버취경험식[3]을 리용하여 결정한다. 그리고 모형탐색을 위한 자료벡토르는 접수함수시계렬과 겹보기S파속도렬벡토르로 구성하였다.

균일반공간에서 겹보기S파속도는 다음과 같이 계산된다.

$$V_{SA} = \frac{\sin(\bar{i}_P/2)}{p}, \quad \bar{i}_P = \arctan \left[\frac{R_{RF}(t_{PS}=0)}{Z_{RF}(t_{PS}=0)} \right] \quad (2)$$

여기서 t_{PS} 는 지연시간, R_{RF} 와 Z_{RF} 는 각각 동경접수함수와 수직접수함수의 진폭, \bar{i}_P 는 직달P파의 겹보기입사각, p 는 파선파라미터, V_{SA} 는 겹보기S파속도이다.

가우스러파대역너비 (T)를 1~10s구간에서 0.02s간격으로 변화시키면서 식 (2)에 따라 겹보기S파속도를 계산하여 렬벡토르를 구성한다.

접수함수해석의 역문제를 다음과 같이 표시한다.

$$\mathbf{m}_0 = \arg \min (\|\mathbf{E}(\mathbf{m})\|_2^2 + \sigma \|\Delta_2 \mathbf{m}\|_1), \quad \mathbf{m}_L \leq \mathbf{m}_0 \leq \mathbf{m}_U \quad (3)$$

여기서 \mathbf{m} 은 층별P파속도와 파속비로 이루어진 모형파라미터벡토르, $\Delta_2 \mathbf{m}$ 은 모형의 2계계차, \mathbf{m}_0 은 추정결과, \mathbf{m}_L 과 \mathbf{m}_U 는 모형파라미터벡토르의 아래한계와 윗한계, $\mathbf{E}(\mathbf{m})$ 은

관측자료와 계산자료사이의 차벡토르이다. 그리고 $\| \cdot \|_n$ 은 n -노름($n=1, 2$)이고 σ 는 균형인수이다. 균형인수 σ 는 모형의 원활성과 관측자료와 계산자료의 잔차사이균형을 맞추어주는 역할을 한다.

선행연구들[2-4]에서 리용한 선형탐색알고리즘에서는 초기모형이 풀이에 가깝다는것을 전제로 하였으므로 추정결과가 초기모형에 의존하는 경향이 있다. 그러나 식 (3)에서는 이러한 전제를 필요로 하지 않으며 결과적으로 초기모형에 대한 추정결과의 의존성이 훨씬 낮아진다.

식 (3)에서 P 파속도와 파속비로 탐색모형을 구성한 이유는 우선 탐색과정에 파속비의 변화를 물리적으로 타당한 값범위안에서 제한하기 위해서이며 또한 접수함수와 겹보기 S 파속도가 P 파속도구조보다 S 파속도구조에 훨씬 더 심하게 의존하므로 S 파속도를 탐색변수로 설정하면 P 파속도분포의 추정정확도를 충분히 보장할수 없기때문이다.

역문제 식 (3)을 풀기 위하여 TRR알고리즘[5]을 리용하였다. 이 알고리즘의 기본착상은 최소화하려는 다변수스칼라함수 $f(m)$ 을 일명 참구역이라고 부르는 점 m 의 근방에서 이 함수의 변화특성을 반영한 보다 단순한 함수 $q(s)$ 로 근사시키는것이다.

일반적으로 함수 $q(s)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$q(s) = \frac{1}{2} s^T H s + s^T g, \|s\|_2 \leq \Delta \quad (4)$$

여기서 s 는 시험걸음(모형수정량), g 는 점 m 에서 f 의 경사도, H 는 헤씨안행렬이며 Δ 는 참구역의 크기를 나타내는 정의 스칼라이다. 결국 식 (3)은 함수 $q(s)$ 를 최소화하는 문제로 넘어간다.

2. 모 의 해 석

임의로 설정한 지각구조모형에 대한 모의해석을 통하여 제한조건이 있는 비선형최소 2체곱법의 효과성을 검증하였다. 모의지진기록에 대한 접수함수곡선의 표본화주파수는 20Hz, 지연시간분할간격은 0.1s, 역문제의 제한조건은 일반적인 지각구조에 대한 선행연구[6]결과들을 참고로 하여 P 파속도에 대하여 3~8.2km/s, 파속비에 대하여 1.7~2.1로 설정하고 TRR알고리즘을 적용하여 지각속도구조를 추정하였다. 초기모형은 제한조건에 해당하는 구간에서 우연적으로 발생시킨다.

잡음이 없는 모의지진기록에 대한 접수함수해석결과($\sigma=0$)는 그림 1과 같다.

그림 1에서 점선과 실선들은 정확한 모형에 해당하는 결과들과 최종적인 추정결과들을, 연한선들은 중간결과들을 표시한것인데 점선과 실선들은 완전히 일치한다. 잡음이 없는 모의지진기록의 경우 식 (3)에서 균형인수 σ 를 령으로 놓으면 그림 1에서와 같이 초기모형에 거의 무관계하게 풀이를 정확하게 추정할수 있다.

잡음이 있는 모의지진기록에 대한 해석결과는 그림 2와 같다.

잡음이 있는 모의접수함수곡선은 日지구의 1개 지진관측소에서 2년동안 기록한 먼거리 지진관측자료들(진앙거리는 30~90° 사이, 크기는 5.5이상)로부터 계산한 전체 접수함수를 평균한 곡선과 방위각 120~160° 범위안에서 평균한 곡선의 차를 그림 1의 접수함수곡선에 더해주는 방식으로 생성하였다.

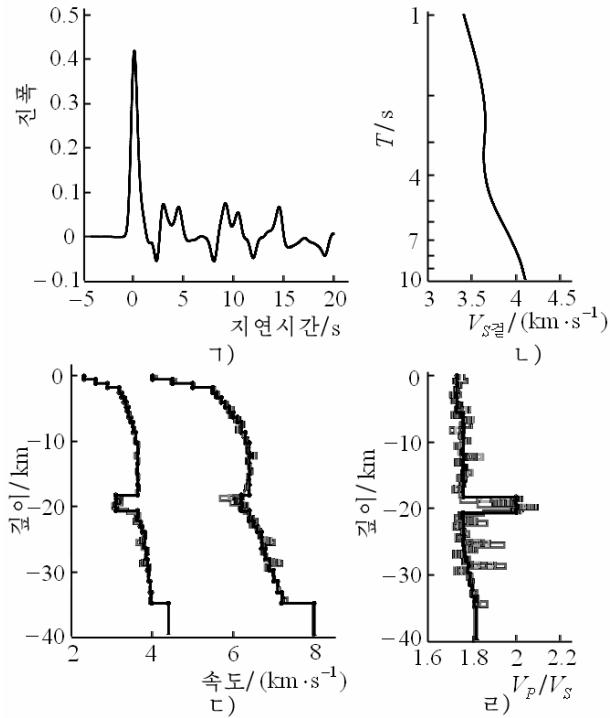


그림 1. 잡음이 없는 모의지진기록에 대한 접수함수해석결과
 가) 접수함수곡선, 나) 결보기S파속도곡선, 다) 속도분포곡선 라) 파속비분포곡선

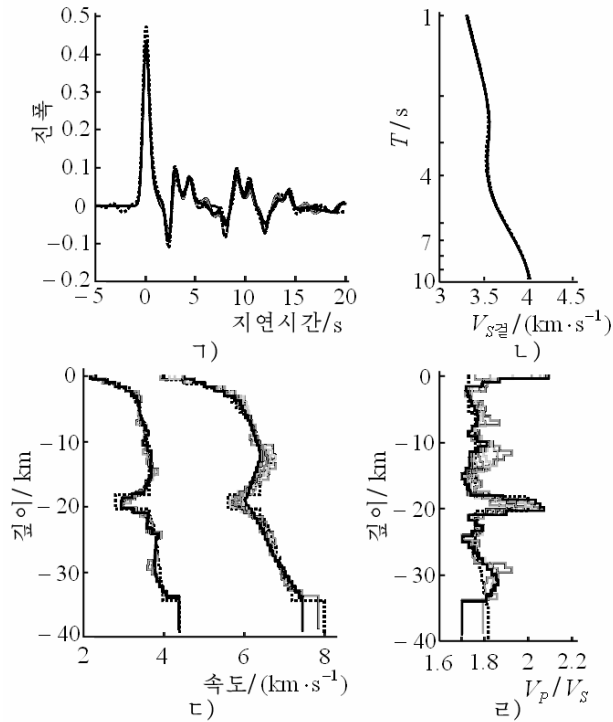


그림 2. 잡음이 있는 모의지진기록에 대한 해석결과
 가)–라)는 그림 1에서와 같음

이 경우 식 (3)에서 균형인수 σ 를 적당히 설정하면 일정한 오차범위안에서 실지 모형에 근사한 풀이를 얻을수 있다.

3. 관측자료의 해석

제안한 지각속도구조추정방법의 적용가능성을 평가하기 위하여 실지 관측자료에 대한 접수함수해석을 진행하였다. B지구의 1개 광대역지진관측소에서 2년동안에 기록한 관측자료들(진앙거리는 $30 \sim 90^\circ$ 사이, 크기는 5.5이상)로부터 EMTRF방법[4]을 적용하여 접수함수들을 계산하였다.

매개 접수함수에 해당하는 결보기S파속도곡선($T-V_{S결}$)을 결정하고 $V_{S결}$ 이 정의 값만을 가지는 곡선들의 중간선을 찾아 해당 지역에 대한 결보기S파속도곡선으로 설정하였다. 그리고 파선파라미터가 $0.06 \sim 0.07\text{s/km}$ 범위에 속하는 지진사건들가운데서 $V_{S결}$ 이 정의 값만을 가지는 사건들을 취하여 평균접수함수곡선을 얻어냈다.

평균접수함수곡선으로부터 지각전체에서의 지연시간 Δt_{PS} 를 검출하고 층별지연시간을 접수함수곡선의 표본화간격(0.05s)으로 똑같이 설정하였으며 이론접수함수계산에서 파선파라미터는 0.065s/km 로 설정하였다. 식 (3)의 제한조건은 모의해석의 경우와 같이 설정하였다. B지구의 1개 지진관측소의 관측기록에 대한 접수함수해석결과는 그림 3과 같다.

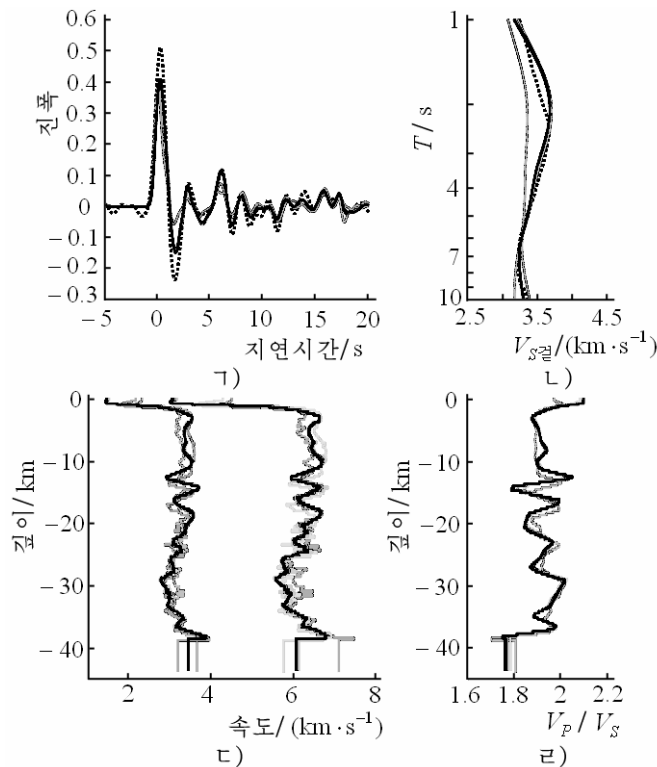


그림 3. B지구의 1개 지진관측소의 관측기록에 대한 접수함수해석결과
 ㉠-㉡)는 그림 1에서와 같음

그림 3에서 보는것처럼 연구지역에서 전반적으로 지진파속도가 작는데 그것은 이 지

역이 화산지대인것과 관련된다고 볼수 있다. 추정결과 연구지역의 지각깊이는 38.5km, 지각에서 평균 P 파속도는 6.16km/s 그리고 평균파속비는 1.92정도로서 이 지역의 지각구조에 대한 선행연구[4]에서 H-k중첩법으로 얻은 결과(지각깊이 (39 ± 1) km, 지각에서 평균 P 파속도 6.2km/s, 평균파속비 (1.94 ± 0.03))와 비교적 잘 일치한다.

결과적으로 제안한 접수함수해석의 역문제풀이방법을 리용하면 지각에서 파속비의 분포를 추정하여 지각속도구조의 추정정확도를 높이고 추정결과의 초기모형에 대한 의존성을 낮출수 있다.

맺는 말

1) 제한조건이 있는 비선형최소2제곱법을 리용하여 접수함수로부터 지각에서 파속비의 분포를 추정하는 한가지 방법을 제기하였다.

2) 모의지진기록과 실지 관측기록에 대한 접수함수해석을 통하여 이 방법의 효과성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] B. Kennett; Seismic Wave Propagation in Stratified Media, ANU E Press, 195~208, 2009.
- [2] C. J. Ammon et al.; Journal of Geophysical Research, **95**, 15303, 1990.
- [3] B. H. Jacobsen et al.; Bulletin of Seismological Society America, **98**, 1756, 2008.
- [4] C. Schiffer et al.; Geophysical Journal International, **204**, 1579, 2016.
- [5] T. F. Coleman et al.; SIAM Journal on Optimization, **6**, 418, 1996.
- [6] N. I. Christensen et al.; Journal of Geophysical Research, **100**, 9761, 1995.

주체108(2019)년 3월 5일 원고접수

Estimation of the Distribution of V_P/V_S Ratios by Using the Receiver Function Analysis

Ho Jun, Mun Song Chol

We proposed an approach to estimate the distribution of V_P/V_S ratios from the receiver function data by using the bounded nonlinear least square algorithm.

Key words: V_P/V_S ratios, receiver function analysis