

암석시편의 균열조사를 위한 탄성과 주시 및 진폭 변화에 관한 연구

서백수¹⁾ · 백환조¹⁾ · 민경원¹⁾

Study of seismic traveltime and amplitude effect to detect cracks in rock

Baek-Soo Suh, Hwanjo Baek, Kyung-Won Min

ABSTRACT Cracks have influence on the physical and mechanical and, more importantly, on the engineering properties of the rock. Physical properties including the volumetric deformation coefficient, electrical resistivity, seismic wave velocity, and the mechanical properties such as the elastic constants and strength of rock are affected significantly by the presence of cracks of various sizes. An experimental program was undertaken to investigate the effect of a finite line crack on the diffraction of the plane compressional wave. Horizontal and vertical components of displacement and acceleration curve were obtained using a single-source and multi-receivers system. A theoretical model from numerical analysis implementing the finite element method was compared with the measured data.

1. 서 론

암반내에 존재하는 균열은 암반의 물리적, 역학적 특성을 비롯하여 공학적 특성에도 중요한 영향을 미친다. 석재에 발달한 균열은 석재의 질적 특성 및 내구성과 연관이 있으며 암석의 물리적, 역학적 특성에 중요한 영향을 미친다. 암석내의 균열은 암석의 체적변형계수, 전기비저항, 탄성과 속도 등의 물리적 특성 뿐만 아니라 암석의 탄성계수 및 강도 등의 역학적 특성에 많은 영향을 미친다.

본 연구에서는 폐석 연구에 있어 기본 연구로써 균열에 의한 탄성과 산란효과에 관한 기본 연구를 진행하고자 한다. 암반내의 균열부위에 공기나 물로 채워져 있을 경우 변위 및 가속도를 수신 위치를 달리하면서 계산하였으며 수치계산 방법은 유한요소법을 이용하였다.

2. 이 론

2.1 기본 방정식

매질이 균질하고 등방성이며 탄성체라고 가정하고

응력-변형률, 응력-변위, 변형률-변위 관계를 tensor로 나타내면

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{pq} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} U_{k,l} \quad (2)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (U_{i,j} + U_{j,i}) \quad (3)$$

$$\text{이때 } (\theta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \vec{\nabla} \cdot \vec{U})$$

가 되며, 이때의 C_{ijkl} 은 forth-order tensor로써, 모암의 탄성계수(elastic moduli)를 나타내며

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있다. 이때 λ, μ 는 Lamé's constant이며 δ_{ij} 는 Kronecker's delta 이다.

만약 이러한 매질에 P파가 입사되었다고 할 때 시스템의 운동 방정식을 벡터로 표시하면

1) 정희원, 강원대학교 자원공학과 교수

$$\rho \left(\frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} \right) = (\lambda + \mu) \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{U}) + \mu \vec{\nabla} \nabla^2 \vec{U} \quad (5)$$

가 된다.

또한, Helmholtz theorem 에 의해서 변위 U 는 2개의 포텐셜(potential) 로 나타낼 수 있으며

$$\vec{U} = \vec{\nabla} \psi + \vec{\nabla} \times \Psi \quad (6)$$

여기서 및 Ψ 는 각각 종파 변위 포텐셜(compressional displacement potential), 횡파 변위 포텐셜(shear displacement potential) 이 된다. 상기 식들에 의해서

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (8)$$

가 성립하며, 이때 $\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$, $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ 이며, 각각 P파의 속도, S파의 속도를 나타낸다.

2.2 파의 산란(Wave Scattering)

어떤 파동이 불균일 물질에 부딪힐 때 파의 산란이 일어나며 이 현상은, 상변화나 진폭의 변동을 가져오므로 이것은 탐사 자료의 해석에 중요한 요소가 된다. 균질한 매질(ρ_0, λ_0, μ_0)에 밀도(ρ) 및 속도(λ, μ)의 차이가 있는 불연속물이 존재한다고 하자. 이때 임의로 입사파에 의한 매질의 변위를 $u^{(i)}$ 라 하면, 산란파에 의한 변위를 $u^{(s)}$ 라 한다.

이때 전체의 변위 u 는

$$u = u^{(i)} + u^{(s)} \quad (9)$$

로 표현할 수 있으며, 이때의 $u^{(s)}$ 는

$$|u^{(s)}| \ll |u^{(i)}| \quad (10)$$

가 된다. 산란 현상에 의한 변위 $u^{(s)}$ 도 마찬가지로

$$u^{(s)} = \vec{\nabla} \phi_s + \vec{\nabla} \times \psi_s \quad (11)$$

로 나타낼 수 있으며, ϕ_s 는 종파에 ψ_s 는 횡파에 의한 산란 효과이다. 산란파의 진폭은 입사파의 크기, 강성률, 밀도, 산란 대상의 모양, 입사파의 주파수 등에 의해서 주로 좌우된다. 이 중에서 입사파의 주파수에 대한 산

란파의 진폭 변화는 탄성과 탐사의 야외 작업과 탐사 자료의 해석에 대단히 중요한 영향을 주며, Knopoff (1967)는 평균 주파수를 이용하였으며, 고주파와 저주파에 있어서의 산란파의 진폭을 주파수의 함수로서 계산하였다. 또한 Drensen(1977)은 실험에 의해서 주파수 효과를 연구하였으며, Sesma(1983) 등은 정규화 주파수 등을 이용하여 진폭과 산란대상(scatter)의 크기와의 관계를 지형의 영향 연구에 응용하였다.

3. Modelling

모형의 크기는 암석 시료의 NX 기준으로 가로 5.4 cm, 세로 10.4 cm로 하였다. 모형 요소의 크기는 가로, 세로 각각 1 mm로 하였으며 모형 격자수는 가로 54개, 세로 108개로 하였다. 균열의 크기는 가로 2 mm, 세로 6 mm로 하였으며 변위 및 가속도의 χ 성분, z성분의 진폭과 도착시간의 변화를 관찰하였다.

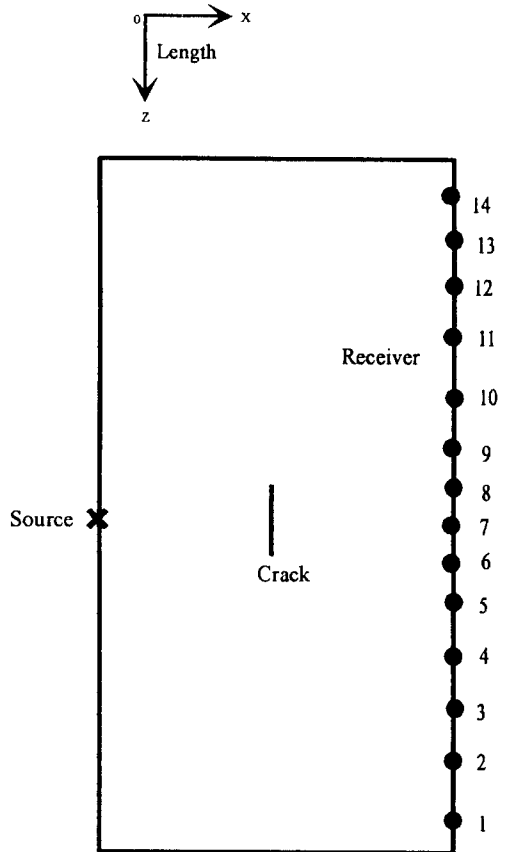


Fig. 1. The configuration of theoretical model.

파동원은 좌측 시추공에 균열의 중앙에 위치하게 하고 우측 시추공에는 14개의 수신기를 설치하여 동시에 수신케하여 진폭변화와, 도착시간의 변화를 관찰하였다(그림 1).

4. 계산 방법 및 결과 고찰

상기 모형에 대한 이론적인 계산은 유한요소법을 이용하였으며 시추공-시추공 탐사법을 사용하였다. 파동원은 길이가 3.23×10^{-6} 인 Gaussian pulse를 사용하였으며 계산은 2.7×10^{-5} sec까지 계산하였다.

4.1 계산 방법

유한요소법에 의한 편미분 파동방정식 (7),(8)의 해를 구하기 위해서 변분법을 사용하여 다음과 같은 운동방정식을 유도한다.

$$M\{\dot{U}\} + K\{U\} - F = 0 \quad (12)$$

이때 M, K, F 를 각각 질량(Mass)행렬, 강성(stiffness)행렬, 힘(force)행렬이라고 한다.

상기 운동방정식을 계산하기 전에 계산을 용이하게 하기 위해서 경계조건을 이용하여 시스템의 행렬 방정식을 변화시킬 필요가 있다. 이 행렬 방정식을 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$[S] \{A\} = \{F\} \quad (13)$$

이때 $[S]$ 는 시스템 행렬이라고 하며 대칭적이며, 0이 많은 대각선 행렬로 이루어진 것이 특징이다. $\{A\}$ 는 경계조건이며 자연 경계조건과 기하학적 경계조건이 필요하며, 각각 Neumann 경계조건과 Dirichlet 경계조건이라고 한다.

그러나 파의 전파문제에 있어서는 유한 경계면에서 반사파가 생기므로 이러한 유한조건만으로는 반사파의 제거가 불가능하기 때문에 본 연구에서는 Neumann 경계조건과 Dirichlet 경계조건을 동시에 주어 더하므로써 반사파를 제거시키는 무반사 경계조건을 도입하였다(Smith,1975). 따라서 본 연구모델에서는 좌단에 Dirichlet 경계조건을, 그 외의 경계면에서는 무반사 경계조건을 주어 계산을 하였다.

식(13)은 변위가 구속되는 Dirichlet 경계조건인 $\{A_2\}$ 와 그렇지 않는 경우의 경계조건인 $\{A_1\}$ 에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있으며

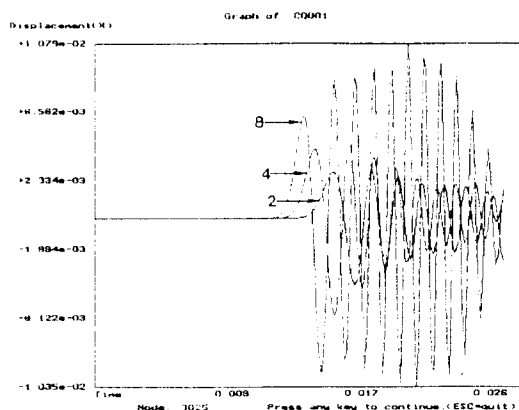


Fig. 2. The horizontal component of displacement curve receiving number 2,4 and 8(no crack).

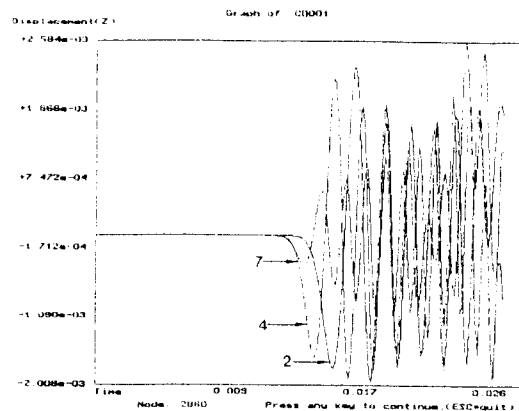


Fig. 3. The vertical component of displacement curve receiving number 2,4 and 7(no crack).

$$\begin{bmatrix} [S_{11}] & [S_{12}] \\ [S_{21}] & [S_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A_1\} \\ \{A_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

계산하고자 하는 행렬 방정식은 다음과 같다.

$$[S_{12}] \{A_1\} = \{F_1\} - [S_{11}] \{A_2\} \quad (15)$$

4.2 결과 고찰

그림 2는 균열이 없는 경우 (blank test)의 χ 성분의 변위 곡선이며 각각 2, 4, 8번의 수신기에서 수신한 파동의 계산 결과이다. 파동의 도착시간은 1.394×10^{-4} sec, 1.275×10^{-4} sec, 1.224×10^{-4} sec이며, 최대변위가 나타나는 시간은 각각 1.836×10^{-4} sec, 1.683×10^{-4} sec, 2.074×10^{-4} sec이다. 그림 3은 균열이 없는 경우

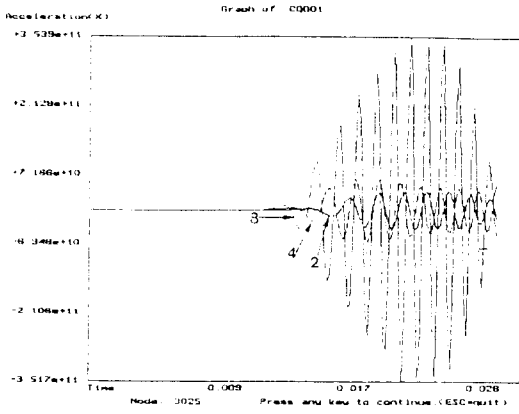


Fig. 4. The horizontal component of acceleration curve receiving number 2,4 and 8(no crack).

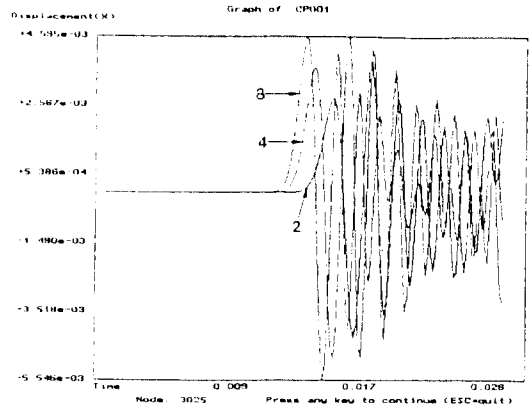


Fig. 6. The horizontal component of displacement curve receiving number 2,4 and 7 when the crack is filled with air.

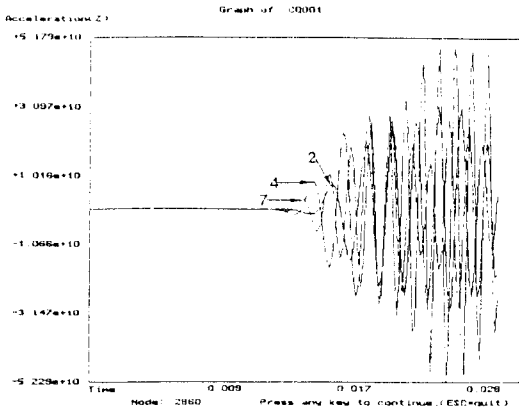


Fig. 5. The vertical component of acceleration curve receiving number 2,4 and 7(no crack).

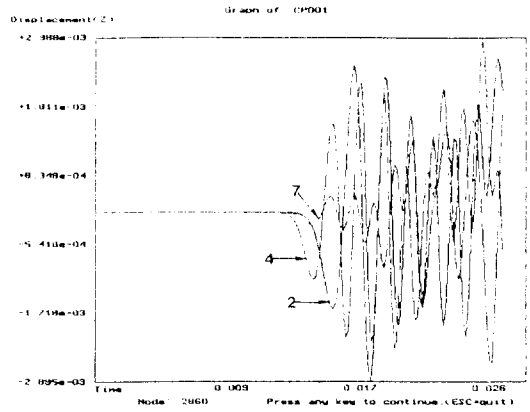


Fig. 7. The vertical component of displacement curve receiving number 2,4 and 7 when the crack is filled with air.

의 z성분의 변위 곡선이며 각각 2, 4, 7번의 수신기에서 수신한 파동의 계산 결과이다. 계산 결과에 의하면 χ 성분의 계산결과(그림 2)와는 극성이 반대 방향으로 나타나며 수신기 2번에서는 진폭이 가장 작은 반면 z성분에서는 가장 크게 나타남을 볼 수 있다. 그림 4는 균열이 없는 경우의 χ 성분의 가속도 곡선이며 각각 2, 4, 8번의 수신기에서 수신한 파동의 계산 결과이다. 계산 결과에 의하면 χ 성분의 변위(그림 2)와는 진폭의 크기 변화가 심하며 최대 변위치도 엄청나게 크게 나타남을 볼 수 있다. 그림 5는 균열이 없는 경우의 z성분의 가속도 곡선이며 각각 2, 7번의 수신기에서 수신한 파동의 계산결과이며 χ 성분의 가속도 곡선과는 극성이 반대로 나타나며 χ 성분에 비해서 진폭의 크기 변화가 심하지

않음을 볼 수 있다. 그림 6은 균열이 존재하는 경우이며 그 안에는 공기로 채워졌다고 가정할 경우의 χ 성분의 변위곡선이며 각각 2, 4, 8번의 수신기에서 수신한 파동의 계산 결과이다. 파동의 도착시간은 각각 1.394×10^{-4} sec, 1.275×10^{-4} sec, 1.241×10^{-4} sec 이며 최대 변위가 나타나는 시간은 각각 1.836×10^{-4} sec, 1.683×10^{-4} sec, 1.394×10^{-4} sec이다. 균열이 존재하지 않는 경우의 변위곡선의 χ 성분(그림 2)과 비교할 경우 균열의 중앙 부분에 위치하는 수신기 번호 8에서의 도착시간과 최대변위가 나타나는 시간은 균열이 존재하지 않는 경우에는 각각 1.224×10^{-4} sec, 1.394×10^{-4} sec로 상당히 차이가 나타남을 알 수 있다. 그림 7은 균

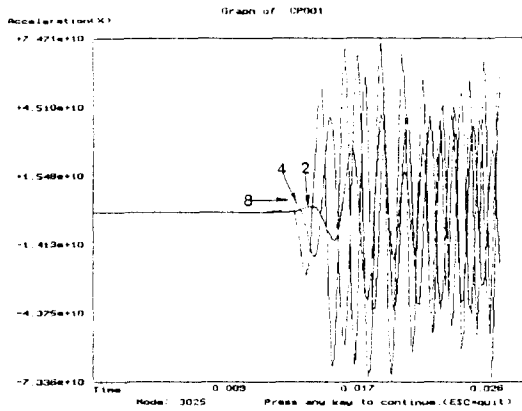


Fig. 8. The horizontal component of acceleration curve receiving number 2,4 and 8 when the crack is filled with air.

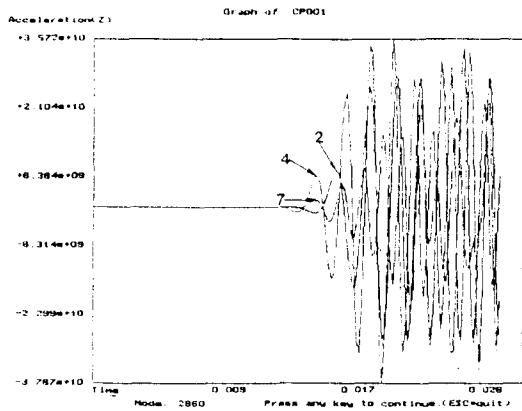


Fig. 9. The vertical component of acceleration curve receiving number 2,4 and 8 when the crack is filled with air.

열이 존재할 경우의 z성분의 변위곡선이며 각각 2, 4, 7번의 수신기에서 수신한 파동의 계산결과이며 χ 성분의 변위곡선과는 극성이 반대이며 진폭의 크기도 달라짐을 볼 수 있다. 그림 8은 균열이 존재할 경우의 χ 성분의 가속도곡선이며 각각 2, 4, 8번의 수신기에서 수신한 파동의 계산결과이며 그림 9는 z성분의 가속도곡선이며 각각 2, 4, 7번의 수신기에서 수신한 파동의 계산결과이다. 이상의 계산결과에 의한 고찰에서 P파에 의한 암석시료의 탄성과 변위 변화는 가속도 측정보다는 변위 측정, z 방향보다는 χ 방향의 측정이 더 양호함을 알 수 있었으며 균열이 존재할 경우와 존재하지 않는 경우에 있어서 도착시간의 차이, 최대 진폭의 차이

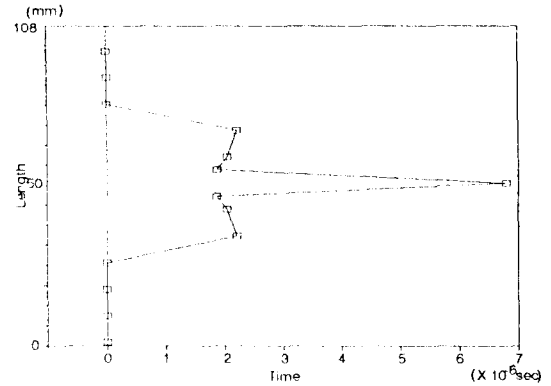


Fig. 10. The diagram of peak arrival time difference in case of horizontal component displacement curve.

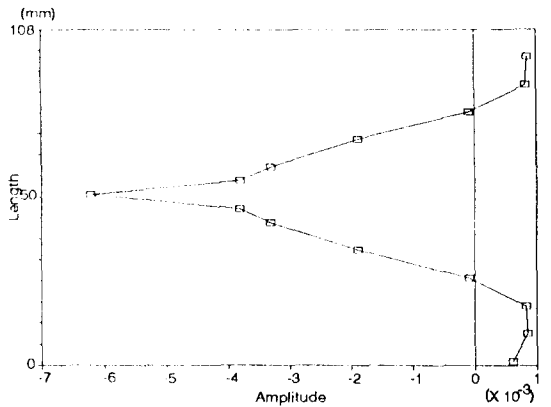


Fig. 11. The amplitude diagram of horizontal component displacement curve.

를 계산하였다. 그림 10은 χ 성분의 변위곡선에서 최대 진폭일 경우의 시간차이를 나타낸 그림이며 균열의 중앙부근에서는 상당히 늦어짐을 알 수 있다. 그림 11은 χ 성분의 변위 곡선에서 최대 진폭의 변화를 나타낸 그림이며 균열의 중앙부근에서 진폭이 상당히 줄어들음을 알 수 있다.

5. 결 론

이상과 같은 계산 결과에 의해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 암석 시료에 한 개의 진원과 여러개의 수신기를 설치하여 변위 곡선 및 가속도 곡선을 계산한 결과 변

위 곡선에서 균열의 유무를 더욱 확실하게 판단할 수 있었으며 z-방향의 변위보다는 χ -방향의 변위가 더욱 좋은 자료를 제공하였다.

2) 파동의 도착시간은 균열의 중앙 부근에서는 가장 자리 보다는 7×10^{-7} sec 만큼 다소 늦게 도착하며 최대 진폭은 중앙 부근에서 7×10^{-3} 만큼 다소 다소 낮게 나타남을 알 수 있었다. 차후에 균열의 크기 및 길이, 파동원의 주파수에 따른 탄성과 산란효과에 대한 연구는 앞으로 암석시료의 균열 관별에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

6. 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 RRC(지역 협력 연구 센터)의 1995년도 연구비 지원에 의하여 행하였으며 관계기관에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Drensen, L., 1977, Locating and mapping of cavities at shallow depths by the seismic transmission method, Proceedings of DMSR 77, Vol. 3, pp. 149-171.
2. Knopoff, L. and Hudson, J. A., 1967, Frequency dependence of amplitude for scattered elastic waves, Geophysics, Vol. 42. pp. 18-20.
3. Sanchez-Sesma, F. J., 1983, Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, pp. 1621-1636.
4. Smith, W. D., 1975, The application of finite element analysis to body wave propagation problems, Geophys. J.R. astr. Soc., Vol. 42, pp. 747-768.