

물리탐사법을 이용한 콘크리트 구조물의 결함조사에 관한 연구

A Study of Flaw Detection in the Concrete Structure Using Geophysical Prospecting Method

서 백 수* 손 권 익** 장 선 웅***
Suh, Beak-Soo Shon, Kwon-Ik Jang, Sun-Woong

Abstract

Various nondestructive prospecting method were applied to detect the flaws of concrete structure, but the satisfactory result could not be obtained, yet.

Fracture and cavities existing concrete structure will have a bad effect on physical and mechanical characteristic of concrete.

This study deal with detection of flaws using seismic first arrival and various inversion method in theoretical model. And ultrasonic seismic method is tried to experimental model to detect fracture and cavity.

키워드 : 비파괴, 탄성파, 콘크리트, 영상화단면
keywords : nondestructive, seismic, concrete, image reconstruction

1. 서론

최근까지 콘크리트 구조물의 안전 진단에 기존의 여러 가지 비파괴 검사법이 적용되고 있으나 아직까지 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 콘크리트 구조물에 존재하는 균열은 구조물의 물리적, 역학적 특성 및 안전성에도 중요한 영향을 끼친다. 본

선택을 위한 실험과 탐사에 적합한 기기의 제작을 하고자 하며 실험실이나 현장에서 측정된 자료의 해석을 위한 기법과 역산을 위한 정확한 역산 기법을 개발코자 한다. 본 연구가 성공적으로 진행될 경우 교량뿐 아니라 댐 시설, 항만, 지하철 공사, 지하 공간 활용 시설 등에 많은 대형 공사의 안전성 점검도 가능 할 것이다.

2. 주시(travel time) 토모그래피

Fig.1에서와 같이 탄성파가 물체를 통과한다고 가정하면 이때 걸린 시간 t_i 는

$$t_i = \int_{R_i} \frac{dl}{u(x, z)}$$
$$= \int_{R_i} S(x, z) dl \dots \dots \dots (1)$$

* 강원대학교 지구시스템공학과 교수
** 강원대학교 산업공학과 교수
***강원대학교 대학원 지구시스템공학과 석사과정
연구에서는 속도와 전기전도도의 차이를 이용하는 탄성파 탐사와 전기탐사를 적용하고자 하며 기존의 방법과 지구물리학적 방법을 이용하고자 한다. 콘크리트 구조물 조사에 적합한 파동원이나 수신기의

이 된다. 이때 $V(x,z)$ 는 파의 진행방향 R_i 의 속도이며, $S(x,z)$ 는 점 (x,z) 에서의 slowness이다. 식 ①은 유한의 합으로서 선형방정식의 군으로 Fig.2과 같이 표시할 수 있다.

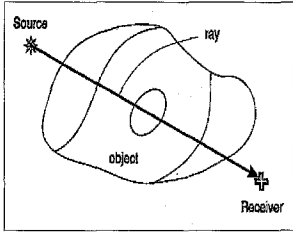


Fig. 1 The propagation of waves

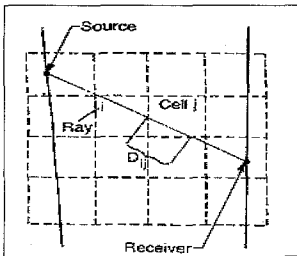


Fig. 2 Penetrating wave into the pixel

$$t_i = \sum_{j=1}^L D_{ij} S_j \dots \dots \dots (2)$$

이때 t_i : 측정치

D_{ij} : j^{th} cell에서 i^{th} 과가 진행한 거리

S_j : slowness

이것을 행렬의 개념으로 나타내면

$$t = \check{D} s$$

$$s = \check{D}^{-1} t \dots \dots \dots (3)$$

가 된다. 이때 \check{D} 행렬은 거리를 나타내는 행렬이며 매우 크고 0이 많으면 (sparse) 역산이 용이하지 않은 특성이 있다. 측정치 t_i 와 이론계산치 t_p 의 차이를 residual error ΔT 라고 하면

$$\Delta t = \check{A} \Delta S \dots \dots \dots (4)$$

가 되며 대부분의 역산 알고리즘은 이 값을 최소화 하는데 역점을 둔다.

1개의 격자를 파동 k 가 통과할 때의 보정은

$$S_i^{n+1} = S_i^n + \Delta S_{ki}^{n+1} \dots \dots \dots (5)$$

가 되며, 만약 N 개의 파동이 통과한다고 할 경우 각각의 격자에서의 평균 보정은

$$\Delta S_i^n = \frac{1}{M_i} \sum_{k=0}^n \Delta S_{ki}^n \dots \dots \dots (6)$$

이 된다. 이때 M_i 는 격자 i 를 통과하는 파동의 수이다. [1], [2]

3. 이론 모형

실험모형과 동일하게 하기 위하여 가로 40cm×세로 130cm의 2차원 이론 모형을 제작하였다. 격자의 수는 가로 40개, 세로 130개로 하여 1개 격자의 길이는 1cm로 하였다. Fig.3과 같이 구조물의 왼쪽에는 파동원(송신 센서)을 위치하고 오른쪽에는 수신기(수신센서)를 위치하여 자료를 계산하였다. 파동원과 수신기의 배열은 평행하게 각각 40개씩 3cm 간격으로 배열하였다. 1개의 파동원에 대한 각각의 수신자료는 40×40개이다. 이때 콘크리트부분의 탄성과 속도는 3.0km/s로 하였으며 균열 및 공동부분의 탄성과 속도는 공기, 물 등 여러 가지로 추정되었다고 가정하여 0.4~2.2 km/sec로 하였다.

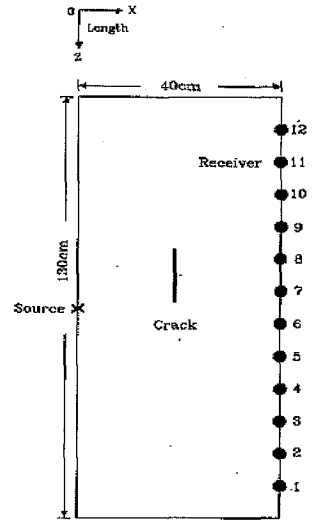


Fig. 3 Theoretical model

3.1 파선법 (Ray tracing)

파(ray)선은 파면에 수직되는 선으로 정의할 수 있으며, 탄성과가 전진하는 방향으로서의 탄성과파의 선이라고 할 수 있다. 이는 결코 물리적인 실체는 아니고 해석의 편의상 도입된 추상적이나 매우 강력한 개념이다. 이러한 파선의 진행에서 구조물의 이상부분(균열대 혹은 공동)에서 주시지연(travel time-delay)이 나타나며 이러한 현상을 이용하여 교각의 안전진단에 응용하는 계산법이다. 토모그래피 응용에서 파동원으로 부터 수신기에 이르는 주시는 식 (1)에서와 같이 두 가지 변수, 즉 통과되는 각 격자(cell)의 파선 길이와 그 격자의 속도와 관계가 있다.

직선 토모그래피에서는 각 파동원과 수신기 사이의 파선은 직선으로 간주되기 때문에 그의 파선의 길이는 결정된다. 이러한 계산결과는 교각의 균열 등과 같은 이상대에 있어서 정상부분과의 속도변화가 차이가 많을 경우에는 계산에 오류가 생길 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 유한요소법을 이용하여 파동의 도착시간을 계산하였다. [3]

3.2 역산법

프로그램 구성은 Fig.4의 계산흐름도와 같이 3개의 블록으로 나누어지며 각각 몇 개의 부프로그램을 가지고 있다. 블록1에서는 유한요소법, 파선법에서 계산한 주시(travel time)을 입력시켜 속도파일을 만들거나 현장 측정자료를 그대로 입력시켜 속도파일을 만들 수 있다. 또한 역산모형을 만들기 위하여 전제요소 및 격자크기를 입력시킨다.

블록2에서는 역산의 방법을 선정하는 프로그램이다. 블록3은 역산 결과를 속도군에 따라 토모그래피를 작성하며 이론모형과 비교할 수 있도록 하였다. 이 프로그램의 계산 결과는 Table 1에서 볼 수 있다. [4], [5]

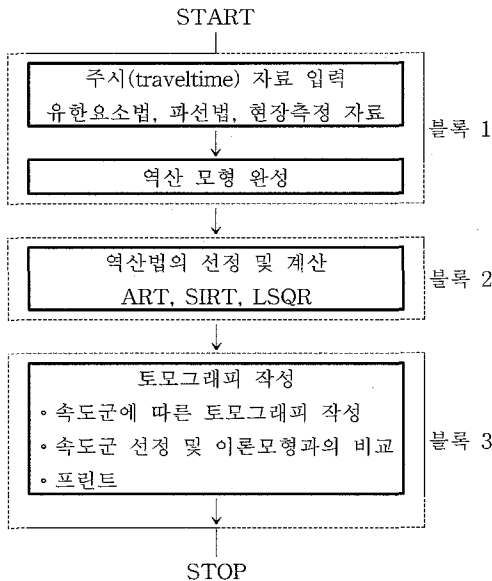


Fig. 4 Flow chart of inversion calculation program

Table 1. Calculation result of ART inversion method.

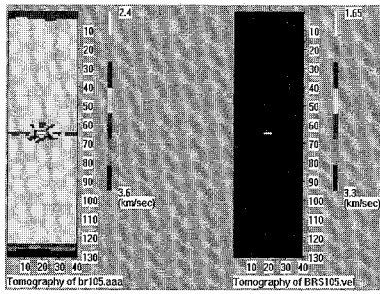
dsaa				
40 130				
1 40				
1 130				
40 130				
10737.1	10737.1	10739.9	10744.8	10750.4
10755.2	10757.7	10756.7	10751.9	10743.2
10731.3	10717.1	10701.6	10685.8	10670.7
10657	10645.3	10635.9	10629.1	10625
10623.6	10624.9	10628.8	10635.3	10644.1
10654.9	10667.3	10680.7	10694.3	10707.2
10718.6	10727.7	10733.8	10736.8	10736.9
10734.9	10731.8	10728.9	10727.1	10727.1
10737.1	10737.1	10739.9	10744.8	10750.4
10755.2	10757.7	10756.7	10751.9	10743.2
10731.3	10717.1	10701.6	10685.8	10670.7
10657	10645.3	10635.9	10629.1	10625
10623.6	10624.9	10628.8	10635.3	10644.1
10654.9	10667.3	10680.7	10694.3	10707.2
10718.6	10727.7	10733.8	10736.8	10736.9
10734.9	10731.8	10728.9	10727.1	10727.1
10803.6	10803.6	10808.1	10816.2	10825.8
10834.9	10841.4	10843.8	10841.4	10834.2
10822.9	10808.4	10792	10775	10758.6

3.3 콘크리트 모형계산

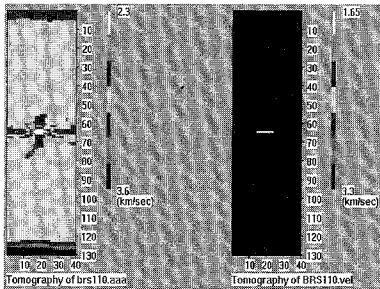
상기의 계산 방법에 의해서 여러 가지 형태의 콘크리트에 대한 이론적인 계산을 시도하였다.

(1) 균열의 길이 변화

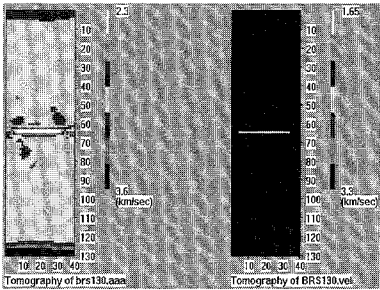
균열의 길이를 수평 20cm로 하고 균열 내에는 물 및 이 물질이 충전되었다고 가정하여 균열대의 탄성과 속도는 콘크리트의 1/2인 1.5km/sec로 하였다. 균열의 길이를 5cm, 10cm, 30cm로 변화시켰을 때의 ART방법에 의한 역산 결과는 Fig.5 (a),(b),(c)에서 볼 수 있으며 균열의 길이 변화에 따라 역산 결과도 정확하게 나타남을 볼 수 있다. [6]



(a) 5cm



(b) 10cm



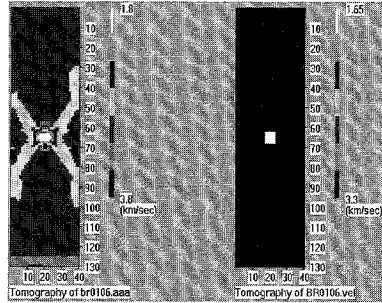
(c) 30cm

Fig.5 The tomography of theoretical calculation result used ART inversion method changing crack length model.

(2) 공동모형

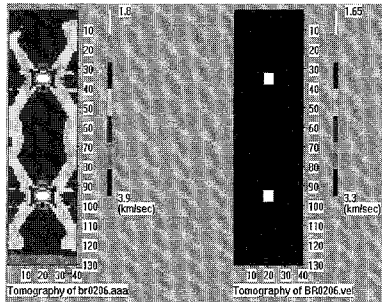
공동의 크기가 가로 6cm×세로 6cm이고 공동 내에는 물 및 이물질이 존재하여 콘크리트의 탄성과 속도 3.0km/sec 의 1/2인 1.5km/sec를 공동의 탄성과 속도로 가정하였다. 구조물의 왼쪽에는 40개의 파동원을 우측에도 40개의 수신기를 설치하였으며 ART 역산법에 의한 계산 결과는 Fig.6(a),(b)와 같다. 이때 우측 그래프는 이론 모형을 나타낸다. Fig.13는 상기 그림에서 계산결과를 4개에서 15개의

속도군으로 분류하여 토모그래피를 작성한 결과이며 속도군의 분류에 따라 공동의 모양이 달라짐을 볼 수 있다. 계산결과와 비교를 위하여 이론모형과 가장 근접한 7개 속도군을 선정하여 여러 가지 역산법 및 모형계산을 시도하였다.



(a) cavity one (b) model

Fig.6 - (a),(b) The tomography of theoretical calculation result of 6cm×6cm size cavity model used ART inversion method.



(a) two cavity (b) model

Fig.7 - (a), (b) The tomography of theoretical calculation result of two 6cm×6cm size cavity model used ART inversion method.

2개의 공동이 존재할 경우의 ART 역산법에 의한 토모그램은 Fig.7에서 볼 수 있으며 공동의 위치가 정확하게 나타남을 볼 수 있다. 이때 Fig.7(a)는 역산 결과이며 Fig.7(b)는 이론모형을 나타낸다. [7]

4. 실내 콘크리트 모형실험

4.1 콘크리트 모형

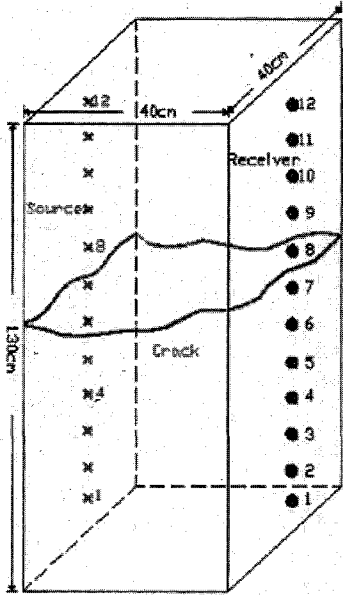


Fig.8 Experimental model

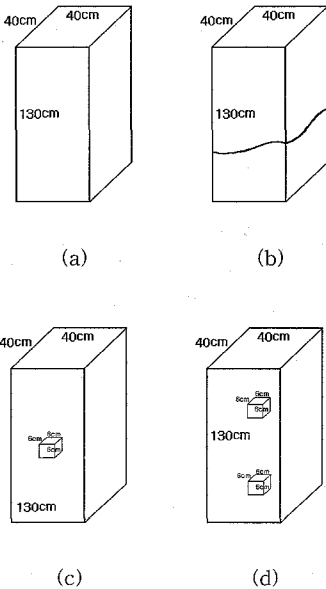


Fig.9 Various experimental models

Fig.8과 같이 가로40cm, 세로 40cm, 높이 130cm 크기의 콘크리트 모형을 제작하였다. 구조물에는 인공적인 균열과 공동을 만들었으며 Fig.9의 (a)는 완전모형, (b)는 균열 모형, (c)는 6cm×6cm×6cm의 공동이 존재하는 모형, (d)는6cm×6cm×6cm의 공동이 2개 존재하는 모형이다.

4.2 초음파 실험 및 역산

상기 모형 Fig.9에 대하여 초음파 탐사를 실시하였다. 탐사는 2개의 주파수인 37kHz와 54kHz를 사용하였다. Fig.9와 같이 송신 센서는 왼쪽에 위치케 하고 수신 센서는 오른쪽에서 10cm 간격으로 12개를 측정하였다. 그리고 송신 센서를 10cm 이동하고 수신 센서를 앞의 방법과 동일하게 10cm 간격으로 12개를 측정하였다.

우선 Fig. 9(a)와 같이 콘크리트 모형에 균열이나 공동이 존재하지 않을 경우 37kHz 초음파 센서를 이용한 상기 측정법에 의한 측정자료의 LSQR 역산법에 의한 계산 결과는 Fig. 10에서 볼 수 있다. [8]

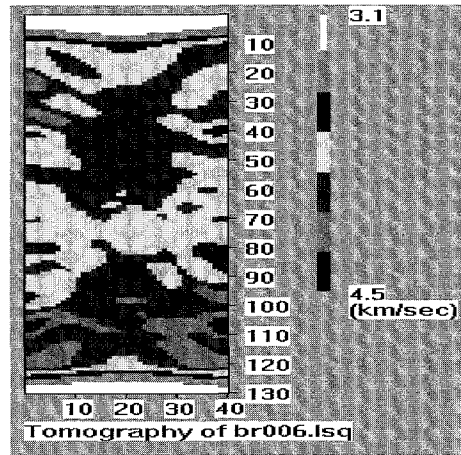


Fig.10 The tomography of experimental data result used LSQR inversion method when crack and cavity is not located in concrete model.

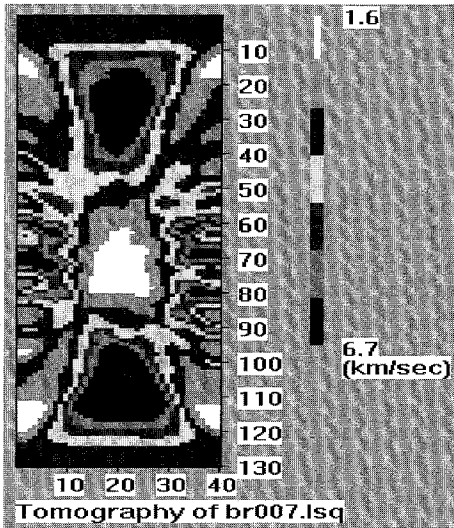


Fig.11 The tomography of experimental data result used LSQR inversion method when crack is located in concrete model.

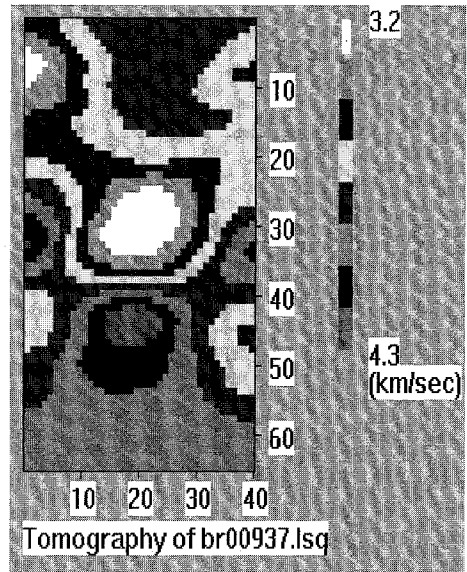


Fig.12 The tomography of experimental data result used LSQR inversion method when one cavity is located in concrete model. (37 kHz)

그림에서와 같이 콘크리트 모형에 공동이 존재하지 않을 경우 역산결과에서는 어떠한 징후를 발견하기 어려움을 알 수 있다.

Fig. 9(b)와 같이 콘크리트 모형에 균열이 존재할 경우 54kHz 초음파 센서를 이용한 측정자료의 LSQR 역산법에 의한 계산 결과는 Fig.11에서 볼 수 있다. 그림에 의하면 균열이 위치하는 중앙에 탄성과 저속도 부분이 공동처럼 크게 나타남을 볼 수 있으며 이것은 모형제작에 있어 균열대가 매우 큰 때문인 것으로 생각된다.

콘크리트 모형에 6cm×6cm×6cm크기의 공동이 한 개 존재할 경우 37kHz, 54kHz 초음파 센서에 의한 각각의 측정자료의 LSQR 역산법에 의한 계산 결과는 각각 Fig.12, Fig.13에서 볼 수 있다. 이때 송신, 수신 센서의 간격은 5cm 간격으로 13개씩 측정하였다. 그림에서와 같이 모형실험자료의 역산에서도 공동의 위치가 정확하게 탐지됨을 알 수 있다.

[9]

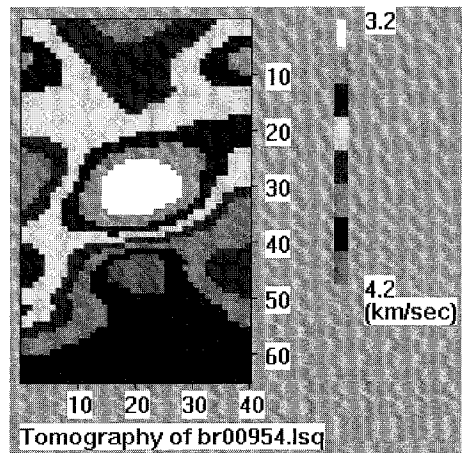


Fig.13 The tomography of experimental data result used LSQR inversion method when one cavity is located in concrete model. (54 kHz)

5. 결론

이상과 같은 실험과 계산에 대하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 최근까지 콘크리트 구조물의 안전진단연구에는 파동의 전파문제를 주파수 영역에서 해석하므로써 균열대 및 공동조사를 시도하였다. 본 연구에서는 주시 (파의 도착시간) 계산에 의한 시간영역 해석을 시도하였다. 탄성과 실험에서 균열이 존재할 경우 초동 및 진폭 변화로써 균열의 위치를 알아낼 수 있었다. 탄성과 실험에서는 균열이 없을 경우와 균열이 존재할 경우에는 수진기 위치와 파동원의 위치에 따라 진폭의 변화가 크게 나타남을 볼 수 있으며 균열이 존재할 경우에는 균열을 기준으로 파동원의 반대편에 위치하는 수진기에는 진폭이 크게 감소함을 볼 수 있다. 진동 실험에 의한 진폭 변화 양상에는 결과해석 연구가 더 요구된다.
- 2) 파선법에 의한 초기도달시간을 계산하여 역산을 행한 결과와 유한요소법에 의한 초기도달시간을 계산한 역산결과를 비교하였다. 파선법에 있어 직선토크모그래피는 속도 변화에 따른 오차가 발생하는 반면 곡선 지오토크모그래피는 막대한 계산시간이 소요되는 단점이 있다. 초음파 탐사의 경우 공동이 존재할 경우 이론 역산 결과와 실험 측정 자료 역산 결과와는 비슷한 양상을 보여 주었다.

참 고 문 헌

- [1] Cooke, D.A. and Schneider, W.A., "Generalized linear inversion of reflection seismic data", Geophysics, Vol. 48, pp.665-676, 1983.
- [2] Gersztenkorn, A. and Scales, J.A., "Smoothing seismic tomograms with alpha-trimmed means", Geophysical Journal, Vol.92, pp.67-72, 1988.
- [3] Calin C, and Pekka H., "Transmission vs. reflection methods for locating fractures in crystalline rocks, Proceedings of 3rd SEGJ /SEG Int. Sym", pp.197-204, 1995.
- [4] Lines, L.R. and Treitel, S., "A review of least squares inversion and its application to geophysics problem", Geophys. Prosp. Vol.32, pp.159-186, 1984.
- [5] Smith, W.D., "The application of finite element analysis to body wave propagation problems", Geophys. J.R. astr. Soc., Vol.42, pp.747-768, 1975.
- [6] McMechan, G.A., "Seismic Tomography in bor-holes", Geophy. Journal of the Royal, Astr. Society, Vol.74, pp.601-612, 1982.
- [7] Peterson, R.G. and Paulsson, B.N., "Applications of algebraic reconstruction techniques to cross-hole seismic data", Geophysics, Vol.50, pp.1556-1580, 1985.
- [8] Pratt, R.G. and Worthington, M.H., "The application of diffraction tomography to cross-hole seismic data", Geophysics, Vol.53, No.10, pp.1284-1294, 1988.
- [9] Suh, B.S. and Hyun, B.K., "Tunnel detection using seismic geotomography", Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol.3, pp.50-53, 1993.