

지반의 비균질성이 탄성과 전파 특성에 미치는 영향에 대한 추계론적 수치해석 연구

송기일^{1*}

¹정회원, 조교수, 인하대학교 토목공학과

Stochastic numerical study on the propagation characteristics of P-Wave in heterogeneous ground

Ki-Il Song^{1*}

¹Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Inha University.

ABSTRACT: Various elastic wave-based site investigation methods have been used to characterize subsurface ground because the dynamic properties can be correlated with various geotechnical parameters. Although the inherent spatial variability of the geotechnical parameters affects the P-wave propagation characteristics, ground heterogeneity has not been considered as an influential factor. Thus, the effect of heterogeneous ground on the travel-time shift and wavefront characteristics of elastic waves through stochastic numerical analyses is investigated in this study. The effects of the relative correlation lengths and relative propagation distances on the travel-time shift of P-waves considering various intensities of ground heterogeneity were investigated. Heterogeneous ground fields of stiffness (e.g., the coefficient of variation = 10 ~ 40%) were repeatedly realized in numerical finite difference grids using the turning band method. Monte Carlo simulations were undertaken to simulate P-wave propagation in heterogeneous ground using a finite difference method-based numerical approach. The results show that the disturbance of the wavefront becomes more significant with stronger heterogeneity and induces travel-time delays. The relative correlation lengths and propagation distances are systematically related to the travel-time shift.

Keywords: Ground heterogeneity, P-wave, Travel-time, Wavefront, Finite difference modeling, Monte-Carlo simulation

초 록: 현재 다양한 탄성파 기반의 물리탐사 기법들이 지반조사를 위해 널리 이용되고 있는데 이는 지반의 동적 특성들이 공학적 물성과 상관관계를 갖기 때문이다. 하지만, 지반공학적 물성치들의 고유한 비균질성이 탄성파 속도 및 진폭 등의 전파 특성에 영향을 미침에도 불구하고 그에 대한 고려가 안되고 있는 실정이다. 그래서, 본 연구에서는 지반의 고유한 비균질성이 탄성파 전파특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 추계론적 수치해석 방법을 적용하였다. 탄성파의 도달 시간 변화와 파두 특성에 주안점을 두어 분석을 수행하였다. 지반의 공간적 상관 거리와 파장과의 상관성 및 탄성파 전파거리와 파장과의 상관성이 탄성파의 도달 시간 변화에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. Turning band method를 적용하여 변동계수의 범위가 10 ~ 40%인 다양한 비균질 강도를 갖는 지반을 유한차분 그리드에 생성하였다. 유한차분법을 이용하여 비균질 지반에서 탄성파의 전파를 시뮬레이션하였고, 추계론적 기법으로는 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 적용하였다. 추계론적 수치해석 결과, 지반의 비균질 강도가 증가함에 따라 탄성파의 파두 형상의 일그러짐이 현저하게 발생하였고, 그에 따라 탄성파의 도달 시간도 지연되는 것으로 나타났다. 지반의 공간적 상관 거리와 파장과의 상관성 및 탄성파 전파 거리와 파장과의 상관성은 탄성파의 도달 시간 변화와 긴밀한 상관성이 있는 것으로 나타났다.

주요어: 지반의 비균질성, 압축파, 도달 시간 변화, 파두, 유한차분법, Monte-Carlo 시뮬레이션

1. 서론

*Corresponding author: Ki-Il Song

E-mail: ksong@inha.ac.kr

Received November 19, 2012; Revised December 20, 2012;

Accepted January 7, 2013

지반은 그 자체가 고유한 비균질성 및 비등방성을 갖고 있다. 특히, 얇은 지반의 공간적 변이성은 풍화상

태, 압밀 진행에 따른 가변성, 간극수 또는 지표면의 형상 등 다양한 환경에 의해 영향을 받는다. 지반의 비균질성은 지반에 건설되는 구조물들의 정적 안정성에 영향을 미친다(Song et al., 2006; Song et al., 2011). 뿐만 아니라, 이러한 지반의 공간적 변이성은 지반조사 시 불확실한 지반응답을 야기하며, 조사결과의 분산을 유발하고 결국엔 조사의 신뢰성에 큰 영향을 끼친다. 특히, 탄성파를 이용한 지반조사의 경우에는 동적하중과 지반운동을 포함한 전체적인 동적응답에도 영향을 끼친다. 지반의 비균질성 자체에 대한 규명과 그에 대한 수치적 표현은 오랫동안 많은 연구자들에게 관심의 대상이었다. 최근에는 발달된 지반조사 기술과 신호처리 기술에 힘입어 비균질 지반에 대한 충분한 정보 획득이 가능해 졌고, 수치적 방법을 이용한 비균질 지반의 재건이 가능해지고 있다(Schlather, 2001; Yi et al., 2003).

지반의 공간적 변이성이 탄성파 전파 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 크게 지반 매질자체의 이질성에 대한 연구(Li and Hudson, 1996; Tripathi and Ram, 1997; Shapiro et al., 1998; Iooss, 1998; Rahman and Yeh, 1999; Hador and Buchen, 1999; Fehler et al., 2000; Baig et al., 2003)와 지반의 동적 운동의 변칙성에 대한 연구(Nigam, 1983; Zendgui et al., 1999; Horike and Takeuchi, 2000; Zerva and Zervas, 2002)로 구분할 수 있다. 특히, Baig et al. (2003) 와 Yang and Hung (2005)은 수천 킬로미터의 깊이에 달하는 지각과 맨틀에서의 공간적 변이성이 탄성파의 전파에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

지반의 공간적 상관 거리와 비균질성의 강도는 전파되는 탄성파의 응답에 지대한 영향을 미친다. 파장과 탄성파 속도와의 상관관계에 대한 연구는 층상 구조를 중심으로(Mukerji et al., 1995) 또는 비균질 매질을 중심으로(Marion et al., 1994; Mavko et al., 1998; Dahlen et al., 2000; Hung et al., 2000; Zhao et al., 2000) 이루어 졌다. 하지만, 지반 구조물이 시공되는 깊이에서 지반의 공간적 비균질성과 비등방성이

지반조사 결과에 미치는 영향에 대한 연구는 미진한 실정이다.

동적 지반 응답에 지반공학적 파라미터들의 비균질성이 미치는 영향에 대한 연구는 Rahman and Yeh (1999) 와 Nour et al. (2003)에 의해 수행되었다. 이들의 연구에서는 Monte Carlo 시뮬레이션 기반의 추계론적 유한요소법을 적용하여 무작위로 생성되는 동적 지반 운동에 의해 발생하는 지반내 응력과 가속도의 응답에 대한 분석을 수행하였다. 기존의 연구결과는 비균질한 지반 매질에서는 전단탄성계수가 동적 응답에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 보고하고 있다.

다양한 탄성파 기반의 물리탐사 기법들이 지반조사를 위해 널리 이용되고 있는데 이는 지반의 동적 특성들이 지반 재료의 공학적 물성과 면밀한 상관관계를 갖기 때문이다(Lee et al., 2002). 실내에서 수행되는 요소실험으로부터 대형 현장실험에 이르기 까지 다양한 탄성파 탐사 시험법이 개발되어왔고, 지반공학적인 이용을 위해 지반을 시각화하는데 적용되고 있다(Kim et al., 2008). 하지만, 지반의 공학적 특성의 고유한 비균질성이 탄성파의 전파 특성에 영향을 미치고, 그 결과 탄성파의 속도에 까지 영향을 끼치고 있음에도 불구하고 탄성파 속도의 결정이나 계산 시에 지반의 공간적 변이성이 중요한 영향인자로 고려되지 않고 있는 것이 사실이다.

본 연구에서는 지반공학적인 조사 범위의 지반에 대한 지반공학적인 물성치의 비균질성에 초점을 두었다. 본 논문에서는 추계론적 수치해석 절차에 대하여 논하였다. 유한차분 해석 프로그램인 FLAC을 이용하여 비균질 특성을 구축하였고, 지반내 탄성파 전파해석을 수행하였다. Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 지반의 비균질성이 탄성파의 도달 시간과 탄성파의 파도에 미치는 영향을 추계론적으로 분석하였다. 마지막으로, 지반의 공간적 상관 거리와 파장과의 상관성 및 탄성파 전파 거리와 파장과의 상관성이 탄성파의 도달 시간에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 본 연구를 통해서 탄성파를 이용한 지반 조사 시 도달

시간을 합리적으로 도출할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

2. 탄성과 전파 모형화와 비균질 지반의 수치적 생성

2.1 유한차분법을 이용한 탄성과 전파 모형화

탄성과의 전파를 시뮬레이션하기 위해 연구자들은 유한차분법(finite difference method), 유사 스펙트럼법(pseudo-spectral method), 주파수영역법(frequency-domain method), 그리고 유한요소법(finite element method) 등 다양한 방법을 동원하였다. 이에 대한 연구는 Sahimi and Allaei (2008)에 잘 정리되어 있다. 본 연구에서는 비균질한 지반의 생성과 탄성과의 전파를 모사하기 위하여 상용 유한차분법 소프트웨어인 FLAC2D (Itasca, 2002)를 이용하였다. 본 연구에서는 지반의 비균질성에 초점을 맞추었고, 등방성 토압상태로 우선 가정하였다.

FLAC2D는 지반과 같은 연속체를 격자로 이산화하여 각 격자점에서 미지수를 구하기 위해 편미분 방정식을 사용하여 해를 계산한다. 매우 작은 시간 간격에서 임의의 절점에서 발생하는 불균형은 오직 인접한 절점에만 영향을 미친다는 개념으로 문제를 해결하므로 각 절점에서 해를 구하기 때문에 전체 행렬을 작성하여 역행렬을 계산할 필요가 없고 반복 계산에 의하여 해석을 수행한다(You, 2011).

2차원에서 동탄성 구성방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{xx} = (K + 2G) \frac{\delta u_x}{\delta x} + K \frac{\delta u_z}{\delta z} \quad (1)$$

$$\tau_{zz} = (K + 2G) \frac{\delta u_z}{\delta z} + K \frac{\delta u_x}{\delta x} \quad (2)$$

$$\tau_{xz} = G \left(\frac{\delta u_x}{\delta z} + \frac{\delta u_z}{\delta x} \right) \quad (3)$$

여기서, x 는 수평방향을 의미하고 z 는 연직방향을 의미한다. 그리고, u_x 와 u_z 는 변위 벡터를, τ_{xx} , τ_{zz} 와 τ_{xz} 는 응력 텐서를 의미한다. K 와 G 는 각각 체적탄성계수와 전단탄성계수를 나타낸다.

2차원에서 운동법칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\delta \tau_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta z} \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{zz}}{\delta z} \quad (5)$$

여기서, ρ 와 t 는 지반의 밀도와 시간 변수를 각각 의미한다.

수치적 속도벡터는 유한차분상에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{u}_x^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) = & \dot{u}_x^{i,j} \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \tau_{xx}^{i,j}(t) - \tau_{xx}^{i-1,j-1}(t) \right\} \\ & + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta z} \left\{ \tau_{xz}^{i,j}(t) - \tau_{xz}^{i-1,j-1}(t) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{u}_z^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) = & \dot{u}_z^{i,j} \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \tau_{xz}^{i,j}(t) - \tau_{xz}^{i-1,j-1}(t) \right\} \\ & + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta z} \left\{ \tau_{zz}^{i,j}(t) - \tau_{zz}^{i-1,j-1}(t) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

격자 i 에서의 운동방정식은 다음과 같이 중앙 유한차분화 하여 이산화할 수 있다. 시간 $t+\Delta t/2$ 에서 수치적 응력은 $t+\Delta t/2$ 에서의 속도와 시간 t 에서의 응력으로 부터 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_{xx}^{i,j}(t+\Delta t) &= \tau_{xx}^{i,j}(t) + (K+2G)^{i,j} \\ &\cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \dot{u}_x^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \dot{u}_x^{i-1,j-1} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} \quad (8) \\ &+ K^{i,j} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta z} \left\{ \dot{u}_z^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \dot{u}_z^{i-1,j-1} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{zz}^{i,j}(t+\Delta t) &= \tau_{zz}^{i,j}(t) + (K+2G)^{i,j} \\ &\cdot \frac{\Delta t}{\Delta z} \left\{ \dot{u}_z^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \dot{u}_z^{i-1,j-1} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} \quad (9) \\ &+ K^{i,j} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \dot{u}_x^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \dot{u}_x^{i-1,j-1} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{xz}^{i,j}(t+\Delta t) &= \tau_{xz}^{i,j}(t) + G^{i,j} \\ &\cdot \frac{\Delta t}{\Delta z} \left\{ \dot{u}_x^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \dot{u}_x^{i-1,j-1} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} \quad (10) \\ &+ G^{i,j} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \dot{u}_z^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \dot{u}_z^{i-1,j-1} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} \end{aligned}$$

위 식에서 윗첨자 i, j 는 격자의 위치를 의미한다. 위 식에서 전단탄성계수와 체적탄성계수를 격자마다 각각 정의하면 탄성파의 전파 시 지반의 공간적 변이성을 모사할 수 있는 것이다. 따라서, 비균질 지반에서 탄성파 전파와 그 응답을 획득할 수 있다. Lysmer and Kuhlemeyer (1969)에 의해 제안된 Quite 경계조건을 적용하여 경계면에서 탄성파를 흡수하여 반사파를 제어하였다.

2.2 파라미터의 최적화

수치해석을 위해 이용된 가진원은 주파수 $f = 5$ kHz인 사인곡선의 반주기를 이용하였고, 균질 매질의 전단파 속도는 $V_s = 500$ m/s로 정의하였다. 따라서, 가진원의 특성주기는 $T_c = 1/f = 0.2$ ms이다. 전단파

속도의 역수로 정의되는 Slowness는 $S_s = 2,000$ $\mu\text{s/m}$ 이므로 특성파장 λ_c 은 T_c/S_s 로 $\lambda_c = 0.1$ m이다.

파의 전달을 수치해석적으로 모사하기 위해서는 격자의 크기와 시간증분에 대한 최적화를 수행하여야 한다. 최적의 유한차분 격자 크기는 전파되는 탄성파의 최저 속도(V_{min})와 최대 주파수(f_{max})를 고려하여 합리적으로 결정되어야 한다. 합리적으로 파의 전달을 시뮬레이션하기위해 유한차분망의 격자 크기(Δx_{max})는 $\Delta x_{max} \leq \chi \cdot \lambda_{min}$ 조건을 만족하여야 한다(Zerwer et al., 2002). 여기서, λ_{min} 은 최단 파장을 의미하고, 최저 속도(V_{min})와 최대 주파수(f_{max})로부터 구할 수 있다 ($\lambda_{min} = V_{min} / f_{max}$). 그리고, χ 는 수치해석 고유특성에 기인하는 상수로 집중질량행렬(lumped mass matrices)의 경우에는 $\chi = 0.2$ 를 일관질량행렬(consistent mass matrices)의 경우에는 $\chi = 0.25$ 를 적용한다.

표면파인 레일리파(V_R)는 일반적으로 자유면을 갖는 균질 매질에서 최저의 속도를 갖는 탄성파로 알려져 있다. 레일리파의 속도는 전단파 속도의 약 90% 정도이다($V_R \approx 0.9 V_s$). 따라서, 본 연구에서 레일리파의 속도는 $V_R = 450$ m/s이다. 그러므로, 가진원의 최대 주파수가 5 kHz일때 최단 파장은 $\lambda_{min} = 0.09$ m가 된다. FLAC은 집중질량행렬 개념을 이용하기 때문에 $\chi = 0.2$ 를 적용하는 경우 유한차분망에서 최대 격자 크기는 0.018 m이내여야 한다. 또한, 유한차분 격자는 Courant 기준 $\Delta x_{max} \leq \lambda_{min} / 6$ (Robertsson et al., 1994)을 만족하여야 하므로 0.015 m가 최대 격자 크기가 된다. 본 연구에서는 위 두 조건을 모두 만족시키기 위해 유한차분 격자의 크기를 $\Delta x = 0.01$ m로 결정하였다.

다음 식 (11)과 같이 격자의 크기(Δx)와 압축파의 속도(V)를 고려하여 공간적 Nyquist 한계를 만족하는 시간증분(Δt)의 범위를 결정할 수 있다(Villiappan and Murti, 1984).

$$\frac{\Delta x}{10 \cdot V} \leq \Delta t \leq \frac{\Delta x}{V} \quad (11)$$

시간증분은 공간적 Nyquist 한계 뿐만 아니라 시간적 Nyquist 한계($\Delta t < 1/2 \cdot f_{max}$)도 만족하여야 한다 (Zerwer et al., 2002). 본 연구에서는 두 Nyquist 한계를 모두 만족하도록 $\Delta t = 2 \mu s$ 를 시간증분으로 결정하였다. 파의 전파는 0.006초에 걸쳐 이루어지며 총 3,000개의 데이터를 획득하였다.

지반을 통해 전파되는 파의 파장은 탄성파의 속도와 가진원의 주파수로부터 획득할 수 있다. 그러므로, 지반내 파장은 가진원의 주파수 특성에 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 상대적 상관 거리(ζ)를 도입하여 가진원의 주파수 특성과 지반의 공간적 변이와의 상관성에 대한 분석을 수행하고자 하였다. 상대적 상관 거리는 공간적 상관 거리(α)와 가진원의 특성파장(λ_c)의 비로 정의하였다(즉, $\zeta = \alpha / \lambda_c$). 본 연구에서는 가진원의 주파수가 5 kHz, 지반 매질의 전단파 속도가 500 m/s, 그리고 특성파장(λ_c)이 0.1 m일 때 상대적 상관 거리 0.2, 1.0, 그리고 3.0의 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다.

또한, 탄성파의 전파 거리(D)와 특성파장(λ_c)과의 비를 상대 전파 거리($A = D / \lambda_c$)로 정의하여 탄성파의 전파 거리에 따른 도달 시간 변화를 분석하였다. 비균질성의 강도는 변동계수(coefficient of variance, COV)를 통해 표현할 수 있다. 변동계수는 분산(σ)과 평균(μ)의 비로 정의할 수 있다(즉, $COV = \sigma / \mu$). 일반적으로 지반의 공학적 물성치들의 변동계수는 최대 40%로 보고되고 있으므로(Jones et al., 2002), 본 연구에서는 변동계수가 10%부터 40%까지의 범위에서 변화하는 것으로 고려하였다.

2.3 비균질 지반의 생성

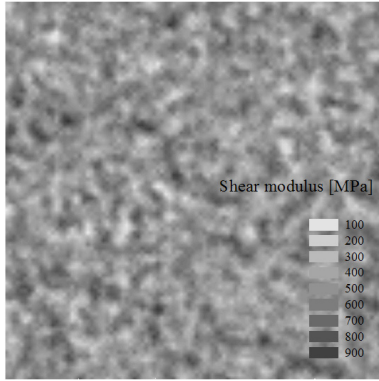
비균질 지반의 생성은 Turning Bands Method (TBM) (Matheron, 1973)을 이용하였다. TBM 방법은 2차원 또는 3차원 공간상에 등방의 비균질장을 시뮬레이션하는 방법으로, 특정 공간을 가로지르며 랜덤데이터를 갖는 다수의 일차원 직선을 생성하여 공간상에서 적분하는 방법이다. 본 연구에서는 공개형 통계 프로그래밍 R (R Development Core Team, 2004)의 패키지 구성요소인 RandomFields package (Schlather, 2001)를 이용하였고, 랜덤 필드의 생성은 TBM3 코드를 이용하였다. 공간상에서 생성되는 랜덤 필드의 해상도와 정밀도를 높이기 위해 본 연구에서 적용한 일차원 직선의 수는 500개이다.

일차원 랜덤필드는 Poisson point process (Lantuéjoul, 1994)를 이용하여 생성할 수 있다. 일반 안정형 공분산 함수는 다음 식 (12)와 같이 표현될 수 있다.

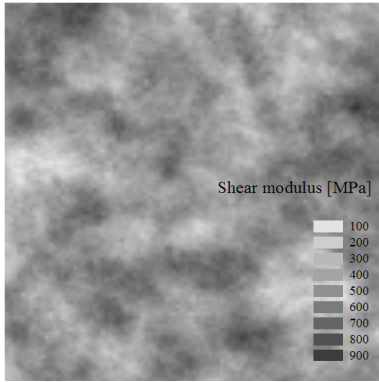
$$C_r(r) = C \exp\left\{-\left(r/\alpha\right)^b\right\} \quad (12)$$

여기서, α 는 공간에서의 상관 거리, r 은 행렬 또는 벡터 형태의 임의의 지반공학적 물성치, C 는 sill, 그리고 b 는 지수이다. 임의의 분산, nugget, 상대적 거리(r/α)등의 인자를 취하는 공분산 모델은 벡터 또는 행렬의 값을 갖는다. 일반적으로 공분산 함수에서 지수 b 가 1인 경우는 지수형 공분산 모델이라 하고 지수 b 가 2인 경우는 Gaussian형 공분산 모델로 정의한다. 본 연구에서는 TBM3에서 지수가 2인 Gaussian형 공분산 함수를 적용하여 랜덤필드를 생성하였다.

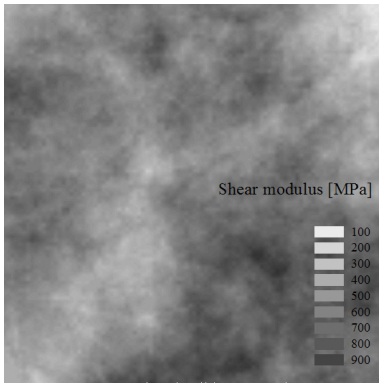
입력물성으로 사용되는 각 변수에 대한 확률적인 특성은 시험자료를 통계적으로 분석하여 주요 확률변수를 결정할 수 있다. 또한, 2차원 및 3차원 탄성파 토모그래피 탐사를 통해 탄성계수의 자기상관특성과 비균질 특성을 획득할 수 있다. 본 연구에서 고려한 지반재료는 단위중량 1,800 kg/m³, 탄성계수 1.17E9 Pa, 포와송비 0.3의 평균값을 갖는 단단한 사질토이다. TBM3를 이용하여 생성한 랜덤필드를 유한차분 격자상에 일대일 맵핑하여 비균질 지반을 생성할 수 있다. 유한차분상에 생성된 모델은 가로 세로 각각 1 m의 정사각형의 지반이고, 가로방향 격자 100개와 세로방향 격자 100개로 총 10,000개의 유한차분 격자로 구성되어 있다. 탄성계수의 변동계수가 30%일 때, 0.2, 1, 3.0의 상대적 상관 거리에 따른 랜덤필드의 특징을 Fig. 1로부터 확인 할 수 있다. 상대적 상관 거리가



(a) $\zeta = 0.2$



(b) $\zeta = 1.0$



(c) $\zeta = 3.0$

Fig. 1. Ground heterogeneity depending on the relative correlation length (ζ)

길어질수록 상관성을 갖는 재료가 먼 거리에 위치하게 된다. 즉, 공간적 상관 거리가 지반의 비균질성의 규모를 제어하는 것을 쉽게 확인할 수 있다.

2.4 도달 시간 변화의 산정

비균질 지반에서 탄성파의 전파 특성을 획득하는 것이 본 연구의 주요한 주제이다. 우선 탄성파의 전파 특성 중 도달 시간에 대한 분석을 수행하고자 하였다. 탄성파 도달 시간 변화는 균질지반에서의 탄성파 도달 시간과 비균질 지반에서의 탄성파 도달 시간과의 차이로 다음과 같이 정의할 수 있다.

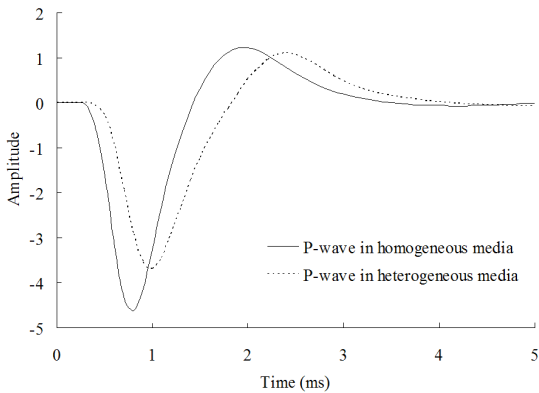
$$t_s = t_{het} - t_{hom} \quad (13)$$

여기서, t_{het} 은 비균질 지반에서의 도달 시간 및 t_{hom} 은 균질 지반에서의 도달시간이고, 이 두 도달 시간의 차이인 t_s 는 도달 시간 변화량이 된다.

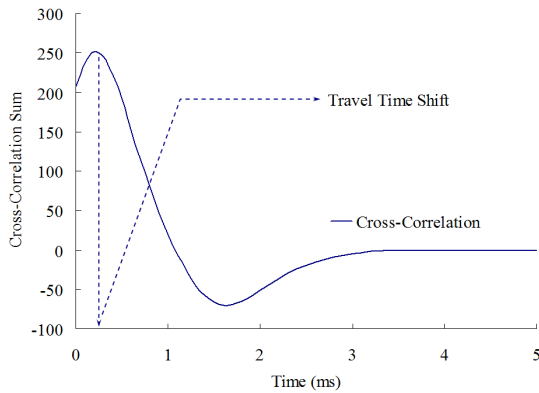
본 연구에서는 도달 시간 변화를 추정하기 위하여 교차상관법(cross-correlation method)을 적용하였다. 교차상관법은 균질 지반에서 획득한 신호(XHo)와 비균질 지반에서 획득한 신호(XHe)와의 유사성을 정의하는 기법으로 비균질 지반내 발생될 수 있는 심각한 노이즈에도 불구하고 유용하게 적용될 수 있는 방법이다. 교차상관함(CC_k)은 수학적으로 식 (14)와 같이 정의 할 수 있다(Santamarina and Fratta, 2005).

$$CC_k = \sum_i XHo_i XHe_{i+k} \quad (14)$$

교차상관법은 탄성파의 도달 시간 결정을 위해 다양한 연구자들에 의해 사용되어오고 있다. 물론, 이러한 기법은 균질한 지구와 비균질 지구내의 탄성파 전파 특성 분석에도 이용되어 왔다(Baig et al., 2003; Yang and Hung, 2005). Fig. 2는 균질 지반과 비균질 지반에서 반주기 사인파의 가진에 의한 압축파의 응답과 도달 시간 변화를 추정하기 위한 교차상관함을 보여주고 있다. Fig. 2(a)에서는 비균질 지반에서 획득한 압축파의 응답이 균질 지반에서 획득한 것보다 지연되어 나타나는 매우 전형적인 특성을 보여주고 있다. Fig. 2(b)에서는 시간 0인 지점으로부터 교차상



(a) Response of P-wave in heterogeneous and homogeneous media



(b) Cross-correlation sum and travel time shift

Fig. 2. Determination of travel time shift with cross-correlation sum (CC_k)

관합의 최대점이 발생하는 지점까지의 시간이 비균질 지반에 의한 도달 시간 지연효과를 의미한다. 이러한 교차상관법을 이용하여 지반의 비균질성에 의한 탄성과 전파 특성을 보다 정량적으로 획득할 수 있다.

3. 결과 분석 및 논의

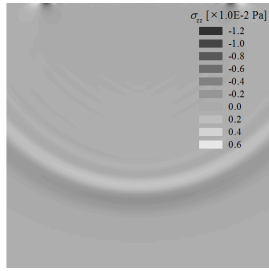
비균질 지반이 탄성과 도달시간 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 추계론적 수치해석 기법을 도입하였다. 본 연구에서 추계론적 방법은 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 적용하였다. Monte Carlo 시뮬레이션 기법은 특정 통계치를 갖는 확률분

포함수로부터 획득한 샘플을 이용하여 대상 문제를 반복적으로 계산하여 나타나는 결과의 분포가 허용 가능한 정도의 정밀도로 정의되도록 해석을 수행하는 것이다(Metropolis and Ulam, 1949). TBM3를 이용하여 특정 통계치를 갖는 랜덤필드의 재생성이 용이하고, 생성된 전단탄성계수와 체적탄성계수는 자동으로 FLAC의 입력데이터로 전환되도록 프로그램 되었다. 그리고, 생성된 FLAC의 입력 데이터를 이용하여 연속으로 동해석이 수행된다. 이러한 방법으로 Monte Carlo 시뮬레이션이 효과적으로 수행되도록 하였다. 본 연구에서는 앞서 대상으로 정한 상대적 상관 거리에 대하여 100번의 해석을 수행하였고, 도달 시간 변화를 획득하였다. 우선, 지반의 비균질성이 탄성과 파도에 미치는 영향에 대해 논의하고, 더 나아가 상대적 상관 거리 및 상대 전파 거리가 탄성과 도달 시간에 미치는 영향에 대해 논의 하고자 한다.

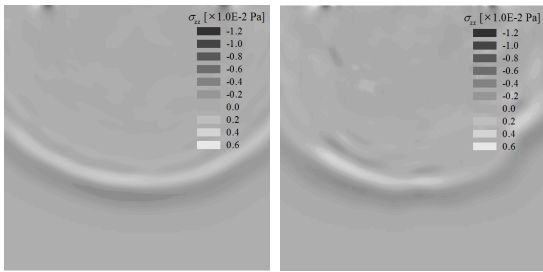
3.1 지반의 비균질성이 파도에 미치는 영향

파두는 유한한 두께를 갖는 입자로 구성된 매질을 통해 전달되는 파의 전파면으로 정의할 수 있다(Ostojca-Starzewski, 1989). Fig. 3은 모델의 상부 중앙에서 가해진 압축파가 가진 0.0008초 후 균질 지반과 비균질 지반을 통해 전달되고 있는 압축파의 전파 특성을 보여주고 있다. Fig. 3에서 묘사된 비균질 지반의 상대적 공간거리는 $\zeta = 1.0$ 이다. Fig. 3에서 밝은 색부분은 $\sigma_{zz} > 0$ 인 조건의 압축영역을 의미하고, 어두운 부분은 $\sigma_{zz} < 0$ 인 조건의 인장영역을 의미한다. Fig. 3(a)에 나타난바와 같이 균질 지반에서는 반사파나 교란의 효과가 전혀 없기 때문에 원호형상의 선명한 파두가 형성되며 이상적인 상태로 탄성파가 전파되는 것을 확인할 수 있다.

그러나, 지반이 비균질한 경우 탄성파의 진행에 따라 파가 산란되어 파두의 주름에 분명한 영향을 미치고 있는 것을 Fig. 3(b)~Fig. 3(e)로부터 확인할 수 있다. 지반의 비균질 강도가 커질수록(즉, 변동계수가 10%에서 40%로 증가할수록), 파두의 교란도 증가

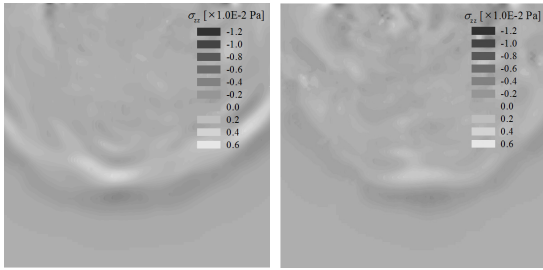


(a) Wave front in homogeneous ground (COV = 0%)



(b) COV = 10%

(c) COV = 20%



(d) COV = 30%

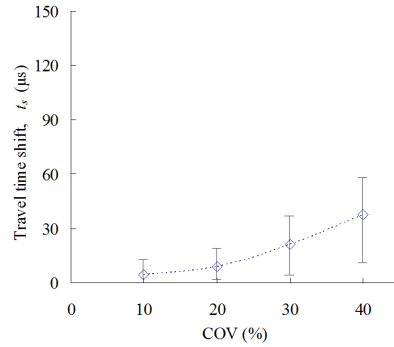
(e) COV = 40%

Fig. 3. The effect of heterogeneity on the wavefront (0.0008 sec after impact, relative correlation length $\zeta = 1.0$)

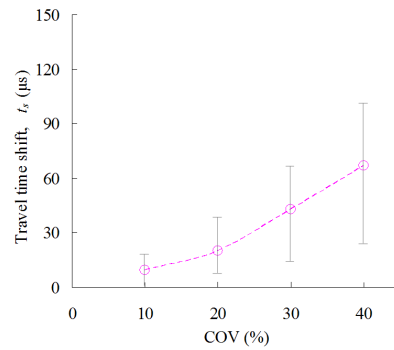
하고 그로 인해 후방산란이 심화되는 것을 확인할 수 있다. 고도의 비균질성이 존재하는 경우 이러한 압축파의 응답은 도달 시간에도 지대한 영향을 미치게 되는 것이다.

3.2 상대적 상관거리의 영향

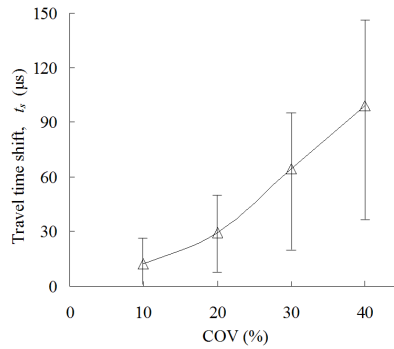
Fig. 4는 비균질 지반의 변동계수를 고려하여 상대적 상관 거리(ζ)가 도달 시간 변화(t_s)에 미치는 영향을 분석한 결과다. 이 결과는 상대 전파 거리(Δ)가 4.5인 경우(즉, 모델의 중심부)에 획득한 결과이다. 각각의



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. The effect of relative correlation length on the travel time shift when the relative propagation distance (Δ) is 4.5 (at the center of model) (a) $\zeta = 0.2$ (b) $\zeta = 1.0$ (c) $\zeta = 3.0$

경우 도달 시간 변화량의 최대 및 최고값의 범위와 평균을 각각 도시하였다.

Fig. 4에 도시된 바와 같이 상대적 상관 거리가 증가함에 따라 도달 시간 변화량도 증가하게 된다.

그리고, 그 범위도 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 변동계수가 증가할수록 도달 시간 변화량도 증가하고 그 범위도 넓어진다. 이러한 특성은 모든 경우에서 동일하게 나타나고 있다. 결국, 지반의 비균질성의 강도와 공간적 상관 거리는 탄성파의 도달 시간 지연에 지대한 영향을 미치는 중요한 요소라는 것을 재확인 확인할 수 있다. Baig et al. (2003)에 따르면 탄성파의 파두는 연약한 부분과 강한 부분이 혼재되어 있는 매질을 지나면서 파의 에너지가 집중되었다가 해제되는 과정을 반복하게 됨으로 탄성파의 도달 시간 지연 효과를 유발하는 것으로 설명하고 있다.

3.3 상대 전파 거리의 영향

상대적 상관 거리(ζ)가 1.0일 때 탄성파의 진폭 이력을 모델의 중앙부분에서 다섯개의 서로 다른 상대 전파 거리(즉, $\Lambda = 1.5, 3.0, 4.5, 6, \text{ 그리고 } 7.5$)에 대하여 측정하였고, 그 결과를 Fig. 5, 6, 7에 각각 나타내었다. Fig. 5에 도시된 바와 같이 탄성파가 상대적으로 긴 거리를 통해 전달될 때 전달되는 응력 에너지(즉, 진폭)는 급격하게 감소되는 것을 알 수 있다. 이러한 감소는 재료감쇠와 기하학적 감쇠에 주로 기인한다.

Fig. 6은 변동계수가 40%일때 상대 전파 거리에 따른 탄성파의 전형적인 전파 양상을 보여주고 있다. 실선은 균질 지반을 통과한 탄성파의 전파 양상이고, 점선은 비균질 지반을 통해 전파되는 탄성파를 나타낸다. 후방산란과 교란효과에 의해 비균질 지반을 통해 전파되는 탄성파의 진폭이 균질 지반을 통해 전파되는 탄성파의 진폭보다 작아지고, 또한 지연되어 전파되는 특징을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 상대 전파 거리 및 변동계수가 도달 시간 변화량에 미치는 영향에 대해 분석한 결과이다. 동일한 상대 전파 거리에서 변동계수가 증가할수록 지반의 비균질 강도가 증가하고 이는 산란을 유발을 증대시켜 결국 탄성파의 도달 시간 지연이 증가되는 것으로 확인된다. 또한, 상대 전달거리가 증가할수록 산란

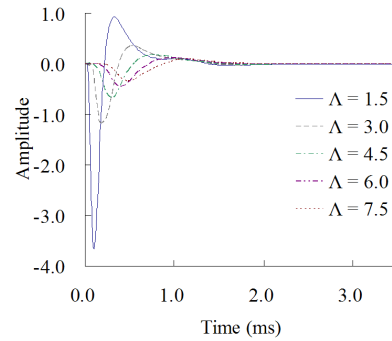


Fig. 5. The effect of relative propagation distance (Λ) on amplitude when relative correlation length (ζ) is 1.0

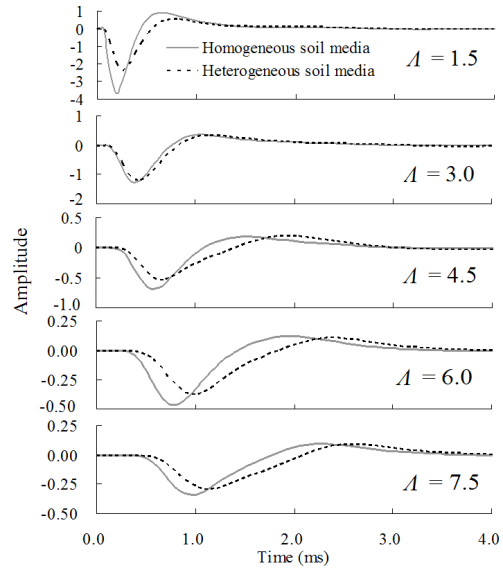


Fig. 6. Seismogram depending on the relative propagation distance (Λ) when COV = 40%

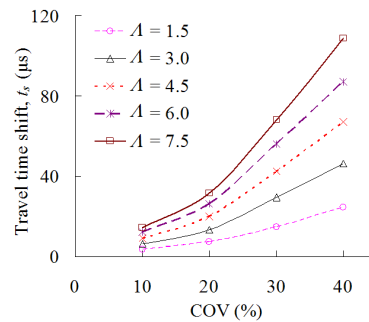


Fig. 7. The effect of relative propagation distance (Λ) and COV on travel time shift

효과는 더욱 심화되어 도달 시간 지연효과는 증대되어 나타난다. 비균질 강도가 증가할수록 지반내에 회절되는 잔류파도 더불어 증가하는 것을 Fig. 3으로부터 역시 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 지반 공학적 물성치의 비균질성이 탄성파에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 특히, 지반의 비균질성의 강도가 탄성파의 도달 시간 지연에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 이를 위해 2차원 유한차분법인 FLAC을 이용하여 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 도입하여 추계론적 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서는 이러한 해석 절차를 체계적으로 정리하여 제시하였다. 본 연구에서 소개된 접근법은 다양한 변동계수와 다양한 상관 거리를 갖는 비균질 지반이 수치적으로 재건될 수 있음을 보였고, 그러한 비균질 지반이 탄성파 전파에 미치는 영향도 효과적으로 분석할 수 있는 기본 틀이 될 수 있음을 시사하고 있다. 상대적 상관 거리(ζ)와 상대 전파 거리(A) 등의 정규화된 인자들을 이용하여 비균질성의 강도와 공간적 상관 거리가 탄성파의 도달 시간 변화에 미치는 영향에 대해서 조사하였다.

본 연구에서는 지반의 비균질성이 탄성파의 파동 특성에 미치는 영향을 조사하였고, 상대적 상관 거리와 상대 전파 거리에 따른 도달 시간 변화에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 탄성파의 속도는 비균질 지반에서 작아지는 것으로 나타났다. 또한 비균질성의 강도는 탄성파의 파동의 형상에 분명한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 비균질성의 강도가 증가할수록, 파동의 교란과 후방산란을 심화시키는 것으로 나타났다. 그리고, 지반내에 회절되는 잔류파도 비균질 강도에 따라 증가된다.

연구 결과, 상대적 상관 거리가 증가할수록, 도달 시간 변화량은 증가하였으며, 그 범위도 넓어지는 것으로 나타났다. 모든 경우 공통적으로 변동계수가 증

가할수록, 도달 시간 변화량은 증가하였으며 그 범위는 넓어졌다. 그러므로, 지반의 비균질 강도와 공간적 상관성은 탄성파의 도달시간 지연을 유발하는 주요한 영향 인자이다.

본 연구에서는 지반의 비균질성이 탄성파 전파특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 하지만, 현장시험으로부터 지반의 비균질성을 획득하는 것은 난해한 일이 분명하다. 따라서, 향후에는 획득한 탄성파의 속도, 도달 시간 지연분, 진폭, 그리고 동적응답의 분포 등 다각적인 통계적 인자들을 고려하여 지반의 비균질 특성을 역으로 산정할 수 있는 기술이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

“This work was supported by the Inha University Research Grant (INHA-46436).”

참고문헌

1. Song, K.I., Cho, G.C. (2006), “Effect of spatial distribution of geotechnical parameters on tunnel deformation”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 8, No. 3, pp. 249-257.
2. Song, K.I., Cho, G.C., Lee, S.W. (2011), “Effects of spatially variable weathered rock properties on tunnel behavior”, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 26, No. 3, pp. 413-426.
3. Baig, A.M., Dahlen, F.A., Hung, S.H. (2003), “Traveltimes of waves in three-dimensional random media”, Geophys. J. Int., Vol. 153, pp. 467-482.
4. Dahlen, F.A., Hung, S.H., Nolet, G. (2000), “Fréchet kernels for finite frequency traveltimes-I. Theory”, Geophys. J. Int., Vol. 141, pp. 157-174.
5. Fehler, M., Sato, H., Huang, L.J. (2000), “Envelope broadening of outgoing waves in 2D random media: a comparison between the Markov approximation and numerical simulations”, Bull. Seismol. Soc.

- Am., Vol. 90, No. 4, pp. 914-928.
6. Hador, R.B., Buchen, P.W. (1999), "Love and rayleigh waves in non-uniform media", *Geophys. J. Int.*, Vol. 137, pp. 521-534.
 7. Horike, M., Takeuchi, Y. (2000), "Possibility of spatial variation of high-frequency seismic motions due to random-velocity fluctuation of sediments", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 90, No. 1, pp. 48-65.
 8. Hung, S.H., Dahlen, F.A., Nolet, G. (2000), "Fréchet kernels for finite frequency traveltimes-II. examples", *Geophys. J. Int.*, Vol. 141, pp. 175-203.
 9. Iooss, B. (1998), "Seismic reflection traveltimes in two-dimensional statistically anisotropic random media", *Geophys. J. Int.*, Vol. 135, No. 3, pp. 999-1010.
 10. Itasca Consulting Group Inc. (2002), *FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua User's Guide*, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, MN.
 11. Jones, A.L., Kramer, S.L., Arduino, P. (2002), "Estimation of uncertainty in geotechnical properties for performance-based earthquake engineering", PEER report 2002/16.
 12. Kim, J., Song, K.I., Cho, G.C., Lee, S.W. (2008), "Evaluation of the time-dependent characteristics of grouted particulate", *Modern Physics Letters B*, Vol. 22, No. 11, pp. 899-904.
 13. Lantuéjoul, C. (1994), "Non conditional simulation of stationary isotropic multigaussian random functions", In: Armstrong, M., Dowd, P.A. (Eds.), *Geostatistical Simulations*, Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 147-177.
 14. Lee, I.M., Choi, S.S., Kim, S.T., Kim, C.K., Jun, J.S. (2009), "3D analysis of fracture zones ahead of tunnel face using seismic reflection", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 4, No. 4, pp. 301-317.
 15. Li, X., Hudson, J.A. (1996), "Multiple scattering of elastic waves from a continuous and heterogeneous region", *Geophys. J. Int.*, Vol. 126, pp. 845-862.
 16. Lysmer, J., Kuhlemeyer, R.L. (1969), "Finite Dynamic Model for Infinite Media", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 95, pp. 859-877.
 17. Marion, D., Mukerji, T., Mavko, G. (1994), "Scale effects on velocity dispersion: from ray to effective medium theories in stratified media", *Geophysics*, Vol. 59, pp. 1613-1619.
 18. Matheron, G. (1973), "The intrinsic random functions and their applications", *Advances in Applied Probability*, Vol. 5, pp. 439-468.
 19. Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J. (1998), *The rock physics handbook*, Cambridge University Press.
 20. Metropolis, N., Ulam, S. (1949), "The monte carlo method", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 44, No. 247, pp. 335-341.
 21. Mukerji, T., Mavko, G., Mujica, D., Lucet, N. (1995), "Scale-dependent seismic velocity in heterogeneous media", *Geophysics*, Vol. 60, No. 4, pp. 1222-1233.
 22. Nigam, N.C. (1983), *Introduction to Random Vibrations*, MIT Press, Cambridge, MA.
 23. Nour, A., Slimani, A., Laouami, N., Afra, H. (2003), "Finite element model for the probabilistic seismic response of heterogeneous soil profile", *Soil Dyn Earthquake Engng*, Vol. 23, No. 5, pp. 331-348.
 24. Ostoja-Starzewski, M., (1989), "Wavefront propagation in discrete random media via stochastic Huygens' minor principle", *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 326, No. 2, pp. 281-293.
 25. R Development Core Team (2004), *R: a language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, (<http://www.r-project.org>).
 26. Rahman, M.S., Yeh, C.H. (1999), "Variability of seismic response of soils using stochastic finite element method", *Soil Dyn Earthquake Engng*, Vol. 18, pp. 229-245.
 27. Robertsson, J.O.A., Blanch, J.O., Symes, W.W. (1994), "Viscoelastic finite-difference modeling", *Geophysics*, Vol. 59, No. 9, pp. 1444-1456.
 28. Sahimi, M., Allaei, S.M.V. (2008), "Numerical simulation of wave propagation, Part II: parallel computing", *Computing in Science & Engineering*,

- Vol. 10, No. 4, pp. 76-83.
29. Santamarina, J.C., Fratta, D. (2005), *Discrete Signals and Inverse Problems*, England: John Wiley & Sons Ltd.
 30. Schlather, M. (2001), "Simulation and analysis of random fields", *R News*, Vol. 1, No. 2, pp. 18-20.
 31. Shapiro, N.M., Campillo, M., Singh, S.K., Pacheco, J. (1998), "Channel seismic waves in the accretionary prism of the middle america trench", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 25, pp. 101-104.
 32. Tripathi, J.N., Ram, A. (1997), "Elastic-wave scattering in a random medium characterized by the von karman correlation function and small-scale inhomogeneities in the lithosphere", *Geophys. J. Int.*, Vol. 131, No. 3, pp. 682-698.
 33. Villiappan, S., Murti, V. (1984), *Finite Element Constraints in the Analysis of Wave Propagation Problem*, UNICV Report No. R-218, The University of New South Wales, School of Civil Engineering.
 34. Yang, H.H., Hung, S.H. (2005), "Validation of ray and wave theoretical travel-times in heterogeneous random media", *Geophys. J. Int.*, Vol. 32, L20302.
 35. Yi, M.J., Kim, J.H., Chung, S.H. (2003), "Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing", *Geophysics*, Vol. 68, No. 3, pp. 931-941.
 36. You, K.H. (2011), "Analysis on the effect of strength improvement and water barrier by tunnel grouting reinforcement", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 4, pp. 291-304.
 37. Zendgui, D., Berrah, M.K., Kausel, E. (1999), "Stochastic deamplification of spatially varying seismic motions", *Soil Dyn Earthquake Engng*, Vol. 18, No. 6, pp. 409-421.
 38. Zerva, A., Zervas, V. (2002), "Spatial variation of seismic ground motions: an overview", *Applied Mechanical Review*, Vol. 55, No. 3, pp. 271-297.
 39. Zerwer, A., Cascante, G., Hutchinson, J. (2002), "Parameter Estimation in Finite Element Simulations of Rayleigh Waves", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 128, No. 3, pp. 250-261.
 40. Zhao, L., Jordan, T.H., Chapman, C.H. (2000), "Three-dimensional Fréchet differential kernels for seismic delay times", *Geophys. J. Int.*, Vol. 141, pp. 558-576.