

유한차분법을 이용한 3차원 지진파 전파 모의

Three-Dimensional Simulation of Seismic Wave Propagation in Elastic Media Using Finite-Difference Method

강태섭* 박창업**
Kang, Tae-Seob Baag, Chang-Eob

ABSTRACT

The elastic wave equation is solved using the finite-difference method in 3D space to simulate the seismic wave propagation. It is based on the velocity-stress formulation of the equation of motion on a staggered grid. The nonreflecting boundary conditions are used to attenuate the wave field close to the numerical boundary. To satisfy the stress-free conditions at the free-surface boundary, a new formulation combining the zero-stress formalism with the vacuum one is applied. The effective media parameters are employed to satisfy the traction continuity condition across the media interface. With use of the moment-tensor components, the wide range of source mechanism parameters can be specified. The numerical experiments are carried out in order to test the applicability and accuracy of this scheme and to understand the fundamental features of the wave propagation under the generalized elastic media structure. Computational results show that the scheme is sufficiently accurate for modeling wave propagation in 3D elastic media and generates all the possible phases appropriately in under the given heterogeneous velocity structure. Also the characteristics of the ground motion in an sedimentary basin such as the amplification, trapping, and focusing of the elastic wave energy are well represented. These results demonstrate the use of this simulation method will be helpful for modeling the ground motion of seismological and engineering purpose like earthquake hazard assessment, seismic design, city planning, and etc..

1. 서 론

컴퓨터를 이용한 지진파 전파 및 강지진동의 수치모의는 지진원의 발생 과정, 복잡한 파동의 전파, 지질구조와 관련된 상호작용 및 지반의 응답 해석과 같은 지진학 및 지진공학의 다양한 분야에서 아주 효율적인 수단으로 사용되어 왔다. 1970년대 이후 급속도로 발전한 컴퓨터의 연산능력과 기억용량에 힘입어 수치모의의 접근방식 및 시간적, 공간적 해석의 범위 역시 빠르게 변화하고 있다. 이러한 발전은 매우 불균질한 지질특성을 단순화하지 않고 가능한 한 정확하게 근사하여 지진파의 전달 특성을 파악하려고 하는 요구를 자극하였고, 지진학 및 공학에서 관심이 있는 주파수

* 서울대학교 대학원 지구환경과학부 박사과정, 학생회원

** 서울대학교 대학원 지구환경과학부 교수, 정회원

의 지진파 전파 모의를 가능하게 하였다. 기존의 해석학적인 방법에서는 매질구조를 최대한 단순하고 부드럽게 함으로서 미분방정식의 해를 구할 수 있도록 하였다. 그러나 지진재해와 관련된 많은 현상들은 주로 구조의 불균질한 특성, 복잡한 지질경계 및 지형적인 특성에 따라 좌우된다. 현재 진행되고 있는 많은 공학적 설계 역시 그러한 현실적인 여건을 고려한 토대 위에서 비로소 실질적인 의미를 지닌다고 할 수 있다²⁾.

실제적인 3차원 모델에 대하여 지진파의 전파를 모의하기 위한 가장 일반적인 방법으로 유한차분법 (FDM), 유한요소법 (FEM), 경계요소법 (BEM), 유사스펙트럼법 (PSM) 등이 사용된다. 지금까지 이러한 방법을 이용한 다양한 알고리즘이 개발되었고, 이와 함께 어느 방법이 효율과 정확성의 측면에서 가장 정확한 방법인지에 대한 토의가 계속되고 있지만 이 모든 방법들은 각기 장점과 단점을 모두 가지고 있다. 이 연구에서는 속도와 응력으로 표현된 운동방정식을 모사하기 위하여 속도와 응력의 각 성분 및 기타 탄성매질의 물성값이 서로 엇갈리게 격자 상에 배치한 유한차분법 (staggered-grid finite-difference scheme)을 사용하였다. 이 알고리즘을 이용하여 지진이 발생하였을 때 불균질한 3차원 탄성매질의 속도구조를 통하여 지진파 에너지가 전파되는 양상을 모의하고, 모델에서 가정한 반구형의 분지에서 지진파 에너지의 증폭, 간섭, 집중 및 경계를 통한 반사, 굴절 현상 등을 분석하였다.

2. 운동방정식

2.1 유한차분식

Cartesian 좌표계 (x, y, z) 를 고려하였을 때, 운동량의 보존 (momentum conservation)과 응력-변형 (stress-strain) 관계로부터 속도와 응력으로 표현되는 다음과 같은 각각의 성분별 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \rho \partial_t v_x &= \partial_x \tau_{xx} + \partial_y \tau_{xy} + \partial_z \tau_{xz} + f_x, \\
 \rho \partial_t v_y &= \partial_x \tau_{xy} + \partial_y \tau_{yy} + \partial_z \tau_{yz} + f_y, \\
 \rho \partial_t v_z &= \partial_x \tau_{xz} + \partial_y \tau_{yz} + \partial_z \tau_{zz} + f_z, \\
 \partial_t \tau_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \partial_x v_x + \lambda (\partial_y v_y + \partial_z v_z), \\
 \partial_t \tau_{yy} &= (\lambda + 2\mu) \partial_y v_y + \lambda (\partial_x v_x + \partial_z v_z), \\
 \partial_t \tau_{zz} &= (\lambda + 2\mu) \partial_z v_z + \lambda (\partial_x v_x + \partial_y v_y), \\
 \partial_t \tau_{xy} &= \mu (\partial_y v_x + \partial_x v_y), \\
 \partial_t \tau_{yz} &= \mu (\partial_z v_y + \partial_y v_z), \\
 \partial_t \tau_{zx} &= \mu (\partial_x v_z + \partial_z v_x).
 \end{aligned} \tag{1}$$

이 식에서 (v_x, v_y, v_z) 는 속도 성분, $(\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$ 는 응력 성분, (f_x, f_y, f_z) 는 체내력 (body-force) 성분, ρ 는 밀도, λ 와 μ 는 Lamé 상수이고 $\partial_x, \partial_y, \partial_z$ 는 공간에서의 성분별 1차 편미분도함수를, ∂_t 는 시간에 대한 1차 편미분도함수를 나타낸다.

식 (1)은 그림 1에 표현된 방식으로 파동장에 대한 변수와 매질의 특성변수를 격자 상에 엇갈리게 배열함으로써 다음과 같이 유한차분식으로 이산화할 수 있다 (그림 1).

$$\begin{aligned}
 \frac{v_{x_{i+1/2,j,k}}^{n+1/2} - v_{x_{i+1/2,j,k}}^{n-1/2}}{\rho \Delta t} &= \frac{\tau_{xx_{i+1,j,k}}^n - \tau_{xx_{i,j,k}}^n}{\Delta x} + \frac{\tau_{xy_{i,j+1,k}}^n - \tau_{xy_{i,j,k}}^n}{\Delta y} + \frac{\tau_{xz_{i,j,k+1}}^n - \tau_{xz_{i,j,k}}^n}{\Delta z}, \\
 \frac{v_{y_{i,j+1/2,k}}^{n+1/2} - v_{y_{i,j+1/2,k}}^{n-1/2}}{\rho \Delta t} &= \frac{\tau_{xy_{i+1,j,k}}^n - \tau_{xy_{i,j,k}}^n}{\Delta x} + \frac{\tau_{yy_{i,j+1,k}}^n - \tau_{yy_{i,j,k}}^n}{\Delta y} + \frac{\tau_{yz_{i,j,k+1}}^n - \tau_{yz_{i,j,k}}^n}{\Delta z}, \\
 \frac{v_{z_{i,j,k+1/2}}^{n+1/2} - v_{z_{i,j,k+1/2}}^{n-1/2}}{\rho \Delta t} &= \frac{\tau_{xz_{i+1,j,k}}^n - \tau_{xz_{i,j,k}}^n}{\Delta x} + \frac{\tau_{yz_{i,j+1,k}}^n - \tau_{yz_{i,j,k}}^n}{\Delta y} + \frac{\tau_{zz_{i,j,k+1}}^n - \tau_{zz_{i,j,k}}^n}{\Delta z}, \\
 \frac{\tau_{xx_{i,j,k}}^{n+1} - \tau_{xx_{i,j,k}}^n}{\Delta t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{v_{x_{i+1/2,j,k}}^{n+1/2} - v_{x_{i-1/2,j,k}}^{n+1/2}}{\Delta x} \\
 &\quad + \lambda \left(\frac{v_{x_{i,j+1/2,k}}^{n+1/2} - v_{x_{i,j-1/2,k}}^{n+1/2}}{\Delta y} + \frac{v_{x_{i,j,k+1/2}}^{n+1/2} - v_{x_{i,j,k-1/2}}^{n+1/2}}{\Delta z} \right), \\
 \frac{\tau_{yy_{i,j,k}}^{n+1} - \tau_{yy_{i,j,k}}^n}{\Delta t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{v_{y_{i,j+1/2,k}}^{n+1/2} - v_{y_{i,j-1/2,k}}^{n+1/2}}{\Delta y} \\
 &\quad + \lambda \left(\frac{v_{y_{i+1/2,j,k}}^{n+1/2} - v_{y_{i-1/2,j,k}}^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{v_{y_{i,j,k+1/2}}^{n+1/2} - v_{y_{i,j,k-1/2}}^{n+1/2}}{\Delta z} \right), \\
 \frac{\tau_{zz_{i,j,k}}^{n+1} - \tau_{zz_{i,j,k}}^n}{\Delta t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{v_{z_{i,j,k+1/2}}^{n+1/2} - v_{z_{i,j,k-1/2}}^{n+1/2}}{\Delta z} \\
 &\quad + \lambda \left(\frac{v_{x_{i,j+1/2,k}}^{n+1/2} - v_{x_{i,j-1/2,k}}^{n+1/2}}{\Delta y} + \frac{v_{y_{i+1/2,j,k}}^{n+1/2} - v_{y_{i-1/2,j,k}}^{n+1/2}}{\Delta x} \right), \\
 \frac{\tau_{xy_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1} - \tau_{xy_{i+1/2,j+1/2,k}}^n}{\Delta t} &= \mu \left(\frac{v_{x_{i+1/2,j+1,k}}^{n+1/2} - v_{x_{i+1/2,j,k}}^{n+1/2}}{\Delta y} + \frac{v_{y_{i+1,j+1/2,k}}^{n+1/2} - v_{y_{i,j+1/2,k}}^{n+1/2}}{\Delta x} \right), \\
 \frac{\tau_{yz_{i,j+1/2,k+1/2}}^{n+1} - \tau_{yz_{i,j+1/2,k+1/2}}^n}{\Delta t} &= \mu \left(\frac{v_{y_{i,j+1/2,k+1}}^{n+1/2} - v_{y_{i,j+1/2,k}}^{n+1/2}}{\Delta z} + \frac{v_{z_{i,j+1,k+1/2}}^{n+1/2} - v_{z_{i,j,k+1/2}}^{n+1/2}}{\Delta y} \right), \\
 \frac{\tau_{zx_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1} - \tau_{zx_{i+1/2,j+1/2,k}}^n}{\Delta t} &= \mu \left(\frac{v_{x_{i+1/2,j,k+1}}^{n+1/2} - v_{x_{i+1/2,j,k}}^{n+1/2}}{\Delta z} + \frac{v_{z_{i+1,j,k+1/2}}^{n+1/2} - v_{z_{i,j,k+1/2}}^{n+1/2}}{\Delta x} \right).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

식 (2)에서 각 변수에 대한 위 첨자와 아래 첨자는 각각 시간 영역과 공간 영역에 대한 격자 상의 위치를 나타낸다. 속도장과 응력장은 매 시간단계에서 반복적으로 계산되어 서로에 대한 독립변수로서의 역할을 수행한다. 즉 위의 유한차분식을 통해 공간 영역뿐만 아니라 시간 영역에서도 속도장과 응력장의 계산 단계에서 엇갈린 격자 (staggered-grid) 방법이 적용되고 있음을 알 수 있다. 격자상에서 매질의 특성값 (밀도, Lamé 상수 등)은 Graves (1996)¹⁾에 의하여 엇갈린 격자법에 적용된 유효 매질 특성값 (effective media parameters)을 사용하였다.

파동장을 모의할 때, 모든 변수를 같은 위치에 배열하는 일반적인 격자 배열에 비하여 변수를 엇갈리게 격자 상에 배열하는 방법은 프로그램을 작성할 때 좀 더 신중한 고려를 해야한다는 점을 제외하면 적용성의 측면에서 보다 많은 이점이 있는데 상세한 설명은 Graves (1996)¹⁾에 제시되어 있다. 한편 일반적인 격자 배열을 이용한 간단하고 정확한 유한차분 방법 역시 최근에도 계속 발전하고 있다.⁸⁾

2.2 경계조건

지진파의 전파를 수치모의할 때 고려해야 할 경계조건은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 한정된 계산 영역의 경계로부터 발생하는 인위적인 반사파를 피하기 위한 것이고, 또 다른 하나는 자유 표면에서의 경계조건이다. 인위적인 반사파를 제거하는 것은 수치모의 결과를 해석할 때 의미있는 응답으로부터 물리적으로 존재할 수 없는 신호에 의한 간섭을 피해야 하기 때문에 필요하다. 또한 자유 표면에서의 경계조건은 다양한 위상을 갖는 신호가 혼합되어 있는 탄성파를 고려할 경우에 특히 계산된 응답의 수치적 안정성과 정확성에 밀접하게 관련되기 때문에 유한차분법의 적용에서 신중하게 고려해야만 한다.

인위적인 반사파를 제거하기 위한 경계조건으로 가장 많이 사용되는 방법에는 흡수경계조건^{9),10)}과 비반사경계조건⁴⁾ 등이 있다. 흡수 경계조건은 계산 용량에 효율적인 반면, 모든 종류의 파에 대한 흡수가 불완전하다. 비반사 경계조건은 대략 10 내지 20%의 부가적인 기억용량과 계산의 부담이 있는 반면, 경계지역에서 모든 에너지가 점진적인 감쇠를 하도록 제어하기 때문에 파의 종류 및 특성에 관계없이 거의 완전한 지진파 에너지의 흡수효과를 얻을 수 있다. 향후 지속적인 컴퓨터의 발전과 해석에 있어서의 정확성 요구가 증가하는 추세에 비추어 볼 때, 인위적인 경계에서 에너지의 완전흡수를 보장하는 비반사 경계조건의 적용이 보다 바람직할 것으로 판단한다. 따라서 이 연구에서는 Cerjan et al. (1985)⁴⁾의 비반사 경계조건을 사용하였다.

한편 자유 표면에서의 경계조건은 자유 표면에서의 응력을 직접 0으로 만들어주는 무응력 방법(zero-stress formulation)¹¹⁾과 자유 표면 위의 영역에 대하여 종파와 횡파 및 밀도를 0으로 제어하는 진공 방법(vacuum formulation)^{12),13),14)}이 있다. 전자의 방법은 적용이 쉽고 정확하며 수치적인 안정성이 있는 반면 기록이 있는 지형의 경우에는 유한차분 격자에서 다루기가 까다롭다. 후자의 방법은 자유 표면에서 별도의 유한차분식을 고려하지 않고 지형의 기록 여부와 관계가 없기 때문에 편리하지만 유한차분식의 전개 방법에 따라 수치적 안정성을 보장하지 못하는 단점이 있다. 이 연구에서는 무조건적인 안정성을 보장하기 위하여 전자의 방법을 적용하였고, Graves (1996)¹¹⁾에 제시된 방법에서의 오류와 불필요한 부분을 개선하였으며 지형효과를 고려하여 Pitarka and Irikura (1996)¹⁴⁾의 개선된 진공 방법을 결합한 복합 형태의 자유 표면 경계조건을 개발하였다 (Kang and Baag, 준비중). 새로운 복합법에서는 격자 배열과 자유 표면에서의 각 성분의 위치가 일치할 때는 무응력 방법을 사용하고 일치하지 않을 경우에는 진공 방법을 사용한다.

2.3 지진원

지진원을 모의하기 위하여, 모멘트 텐서(moment-tensor)³⁾를 이용한 전단 변형 점진원(shear dislocation point source)을 엇갈린 격자 상의 진원 위치에서 적용하여 각 성분별로 체내력(body-force)을 계산하고 이 값을 같은 속도 성분에 더하였다^{1),5)}. 모멘트 텐서를 이용하여 체내력의 분포를 묘사하는 방법은 폭발이나 단층변형과 같은 다양한 지진원에 대하여 적용이 가능하다. 또한 격자 상에서 이러한 점진원의 배열을 통한 단층의 파열을 묘사할 수 있는데, 만일 단층운동의 변위분포 및 단층 파열 방향성에 대한 특성 등이 주어진다면 근접장에서의 강지진동 또한 쉽게 모의할 수 있다.

3. 수치모의 예

두 가지의 모델에 대하여 수치모의를 실시하였다. 첫 번째 모델은 수평 2층 구조로 경계면에서 파의 투과와 반사에 의한 효과를 보기 위한 것이다. 두 번째 모델은 반구형태의 분지를 갖는 구조이고 실제 파동의 전파양상과 함께 분지에서의 지진파 에너지 증폭 및 집중과 함께 파의 위상변화를 관찰하기 위한 목적을 갖는다. 지진원 시간함수는 두 모델에서 모두 다음과 같은 Ricker 파형요소를 사용하였다.

$$s(t) = 2\pi^2 f_c^2 (t-t_c)^2 \exp\{-\pi^2 f_c^2 (t-t_c)^2\}. \quad (3)$$

그러나 차단주파수 (cut-off frequency)와 파형요소의 특성주기 (characteristic period)는 두 모델에서 다른 값을 사용하였고 각 모델별 수치모의에서 계산의 안정성 문제와 함께 제시한다.

3.1 수평 2층 구조

수치모의를 통해 계산된 파동장의 경계면을 통한 투과와 반사효과를 알아보기 위하여 수평적으로 균질한 2층 구조에 대하여 속도 파형을 계산하였다. 모델의 형태, 매질의 물성값 및 진원요소는 그림 2에 제시되어 있다. 깊이 9.4km의 위치에서 역단층 지진원을 가정하였고, 그 연직상부에서 지표 0.0km로부터 4.9km까지 수직적인 배열로 50개의 남북방향 (x) 성분 속도 관측점을 0.1km 간격으로 배치하였다. 지진원 시간함수에 사용된 특성주기 (t_c)는 2.55초, 차단주파수 (f_c)는 1Hz 이다. 따라서 전체 계산영역에서 한 파장당 최소 격자 절점수는 10개이다.

그림 3은 각 관측점에서 기록한 모의시간 32초 동안의 정규화된 속도 시간이력을 나타낸다. 그림 상에서 직선으로 그려진 선들은 관측점에 도달한 각 파의 최고치를 연결한 것이다. 상부층에서 반복되는 파형은 저속도 층으로 진행한 파가 자유 표면과 하부층과의 경계 사이에서 다중 반사를 일으키는 것으로 하부층에 위치한 관측점 기록의 진폭에 비하여 증폭되어 있고 에너지의 지속시간이 긴 것을 알 수 있다. 그림에서 상부층의 첫 번째 실선은 수직하부로부터 직접 도달한 파를 가리키고 두 번째는 자유 표면에서 1회 반사한 파, 세 번째는 자유 표면에서 반사한 파가 다시 상하부층의 경계에서 반사한 파를 가리킨다. 이 이후의 실선도 마찬가지로의 경로를 거쳐 다중 반사한 파의 도달을 가리킨다.

또한 하부층에서도 마찬가지로 선두에 나타나는 직접파와 함께 자유표면과 상하부층의 경계에서 발생한 다중 반사파의 존재를 확인할 수 있다. 또 다른 특징적인 것은 깊이 1.0km의 상하부층의 경계면 상에 위치한 관측점에서도 전혀 파형의 왜곡을 발견할 수 없다는 것이다. 이 사실은 물성이 다른 두 매질의 경계에서 유효 매질 특성값을 계산하는 방법이 효과적임을 보여준다.

3.2 반구형 분지 구조

퇴적분지에서 지진파의 증폭 및 경계면의 기복에 따른 에너지의 집중과 간섭 등의 현상은 다양한 연구를 통해 논의되고 있다.^{5),6),7),14)} 이외에도 입사 또는 분지 내부에서 다시 반사된 실체파 (body-wave)가 분지 경계에서 표면파 (surface-wave)를 생성함으로써 에너지의 증폭과 함께 분지 지역의 지진동 지속시간을 대폭 증가시키는 현상은 지진위험도와 관련하여 아주 중요한 사항이다. 그럼에도 불구하고 기존의 2차원 모의 또는 해석적인 연구에서는 파동의 3차원적인 특성과 수평

적으로 불균질한 매질을 다룰 수 없는 근본적인 한계 때문에 이러한 현상이 과소평가될 수밖에 없었다. 또한 3차원 해석이 가능한 경우일지라도 적용하는 수치적 방법에 따라서 경계요소법과 같이 불규칙적인 실제의 분지지형을 다루기 곤란하거나, 유한요소법과 같이 접근이 가능하다 할지라도 영역을 작은 요소로 분할하는 과정에서 전처리 과정이 별도로 필요하기 때문에 실질적으로 전체 계산에 소요되는 시간이 상당히 증가하게 되는 문제점이 있다. 따라서 분지지형과 같이 실제적인 구조에 대한 지진 지반운동을 모의하는데 있어서 유한차분법을 이용하는 것은 경제적인 측면과 정확성의 측면에서 많은 이점이 있다.

퇴적분지를 가정한 반구형의 저속도 영역을 포함한 반무한체의 구조에 대하여 지진파가 전파되는 양상과 파형을 계산하였다 (그림 4). 전체 계산영역 (x, y, z) 은 $24\text{km} \times 19\text{km} \times 12\text{km}$ 이며, 인위적인 계산영역 경계에서의 반사를 제거하기 위한 비반사 영역으로 수평 양방향과 영역의 바닥에서 각각 1.9km 가 포함되어 있다. 격자 간격은 0.1km 이고 $\Delta t = 0.0125\text{초}$ 의 시간 간격으로 30초 동안 계산하였다. 지진원 시간함수로서 Ricker 파형요소의 차단주파수 (f_c)는 1Hz, 특성주기 (t_c)는 1.25초를 사용하였으며, 한 파장당 최소 격자 절점수는 6개이다. 기타 물성값과 지진원 요소는 그림 4에 제시되어 있다.

그림 5는 5초 간격으로 파동의 전파에 따른 지반의 운동의 변화를 나타내는 속도의 수직성분 스냅샷 (snapshot)을 보여준다. 5초에서 P파가 분지에 도달하여 굴절된 양상과 그림의 좌측 하부에서 S파가 전파되고 있는 것을 확인할 수 있다. 모의시간 10초의 그림에서는 S파가 분지에 도달하여 굴절되고 있는 양상이 보이고 이와 함께 분지 경계면에서 반사하여 진행되는 P파와 S파 및 분지를 통과하여 진행되는 파를 확인할 수 있다. 15초 이후의 그림에서는 분지 내부에서 갇힌 파를 확인할 수 있고 큰 진폭의 표면파를 생성하여 분지 외부로 다시 진행하는 것을 볼 수 있다. 이들 표면파는 큰 에너지와 함께 분지 지역에서 지진동의 지속시간을 증가시킨다. 분지의 북동쪽과 남서쪽 부분은 분지 내부의 입사파와 반사파가 집중하는 부분이다. 따라서 이들 지점에서 지진파의 에너지가 최대가 된다. 한편 지진파의 에너지와 지속시간을 결정하는 또다른 요소는 매질의 비탄성 감쇠효과인데, 이 모의에서는 이를 고려하지 않았기 때문에 시간이 지남에 따라 에너지가 얼마나 빨리 감소하는가에 대한 정보는 알 수 없다. 그림 6은 분지를 가로질러 배열된 관측점에서 관측된 3성분 속도의 파형을 나타낸다. P파, S파 및 표면파와 자유 표면에서의 P-SV 변환을 관찰할 수 있고, 분지 내부에서의 표면파에 의한 지진동의 지속시간이 길게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

속도와 응력으로 표현된 운동방정식을 계산하기 위하여 엇갈린 격자를 이용한 유한차분법 (staggered-grid finite-difference scheme)을 사용하였다. 이 알고리즘을 이용하여 불균질한 3차원 탄성 매질의 속도구조를 통하여 지진파 에너지가 전파되는 양상을 모의하고, 모델에서 가정한 반구형의 분지에서 지진파 에너지의 증폭, 간헐, 집중 및 경계를 통한 반사, 굴절현상 등을 분석하였다. 그 목적은 컴퓨터 모의를 통하여 지진 발생하였을 때 지반의 운동을 추정하고 이 결과를 이용하여 퇴적분지와 같은 특정 지역에서의 지진응답 특성을 파악하는 것이다. 이러한 모의 결과를 토대로 향후 실제적인 3차원 속도구조 및 지반조사 자료를 확보하였을 때 한반도 전체와 같은 큰 규모의

범위에서 실제 지진이 발생하였을 때 지진파 에너지의 전달특성을 파악할 수 있고, 지역적인 규모에서는 퇴적분지에서의 지진파 에너지 집중을 파악함으로써 전반적인 도시계획 및 각종 구조물의 설계단계에서 내진설계를 위한 중요한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. R. W. Graves (1996), "Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.86, pp.1091-1106.
2. P. Somerville (1993), "Engineering applications of strong ground motion simulation", In: F. Lund (Editor), *New Horizons in Strong Motion: Seismic Studies and Engineering Practice*, Tectonophysics, Vol.218, pp.195-219.
3. K. Aki and P. G. Richards (1980), "Quantitative Seismology", W. H. Freeman and Co., San Francisco.
4. C. Cerjan, D. Kosloff, R. Kosloff, and R. Reshef (1985), "A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations", *Geophysics*, Vol.50, pp.705-708.
5. A. Frankel, (1993), "Three-dimensional simulations of ground motions in the San Bernardino Valley, California, for hypothetical earthquakes on the San Andreas fault", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.83, pp.1020-1041.
6. J. Kim and S. A. Papageogiou, (1993), "Discrete wave-number boundary-element method for 3-D scattering problems", *J. Eng. Mech.*, Vol.119, pp.603-624.
7. K. E. Olsen, R. J. Archuleta, and J. R. Matarese, (1995), "Three-dimensional simulation of a magnitude 7.75 earthquake on the San Andreas fault", *Science*, Vol.270, pp.1628-1632.
8. J. Zahradnik, (1995), "Simple elastic finite-difference scheme", *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.85, pp.1879-1887.
9. R. Clayton and B. Engquist, (1977), "Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.67, pp.1529-1540.
10. R. Stacey, (1988), "Improved transparent boundary formulations for the elastic-wave equation", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.78, pp.2089-2097.
11. A. R. Levander, (1988), "Fourth-order finite-difference P-SV seismograms", *Geophysics*, Vol.53, pp.1425-1436.
12. C. J. Randall, (1989), "Absorbing boundary condition for the elastic wave equation: velocity-stress formulation", *Geophysics*, Vol.54, pp.1141-1152.
13. J. P. Zahradnik, P. Moczo, and F. Hron, (1993), "Testing four elastic finite-difference schemes for behavior at discontinuities", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.83, pp.107-129.
14. A. Pitarka and K. Irikura, (1996), "Modeling 3D surface topography by finite-difference method: Kobe-JMA station site, Japan, case study", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.23, pp.2729-2732.

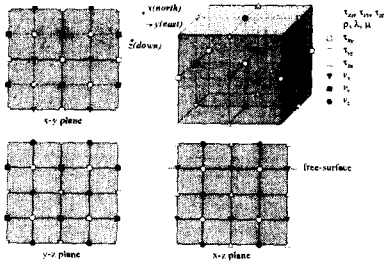


그림 1. 엇갈린 격자 상의 파동장 변수 및 매질 특성값의 배치

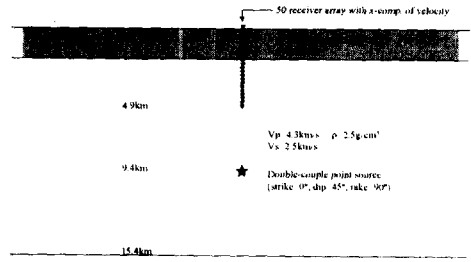


그림 2. 수평 2층 구조 모델의 형태 및 제반 수치모의 요소

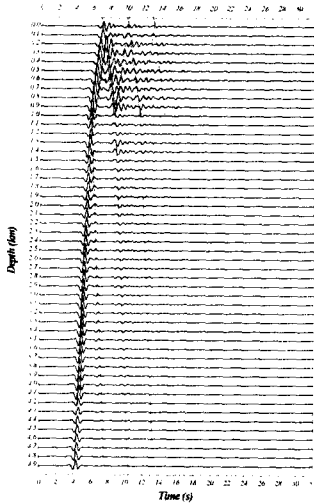


그림 3. 수평 2층 구조에서 수직으로 배열된 남북성분 속도 관측점의 파형

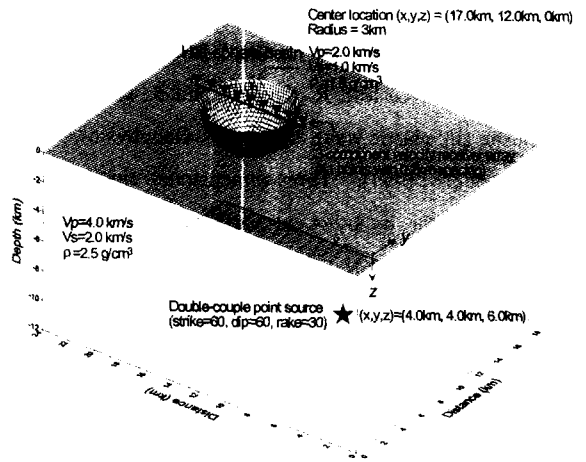


그림 4. 반구형 분지 구조 모델의 형태 및 제반 수치모의 요소

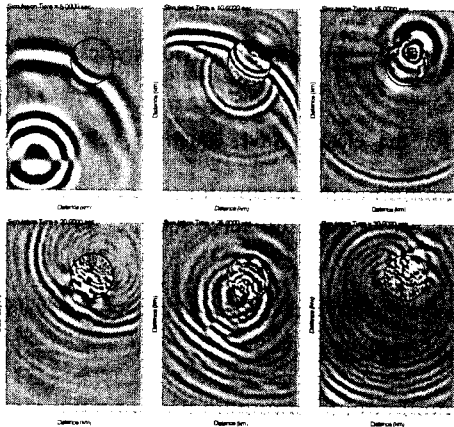


그림 5. 파동의 전파에 따른 속도의 수직성분 스냅샷

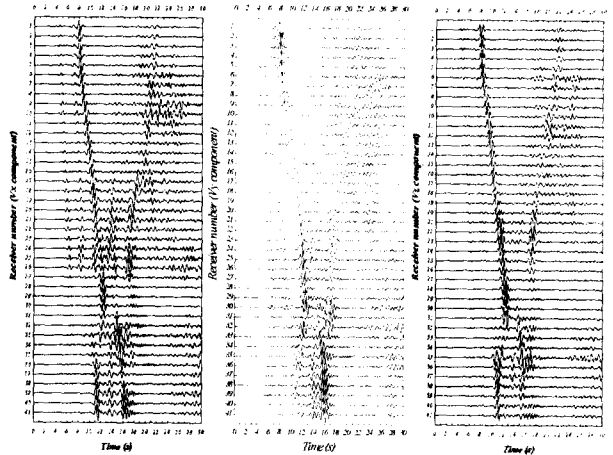


그림 6. 반구형 분지 구조 모델내 관측점에서의 3성분 속도 파형