



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년04월21일
(11) 등록번호 10-1614138
(24) 등록일자 2016년04월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01V 1/00 (2006.01) G06F 19/00 (2011.01)
(21) 출원번호 10-2014-0158567
(22) 출원일자 2014년11월14일
심사청구일자 2014년11월14일
(56) 선행기술조사문헌
논문1(B. OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 2004)
논문2(GEOPHYSICAL RESEARCH LETTER, 1998)
논문3(J. OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH, 2013)
논문4(J. OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH)

(73) 특허권자
한국지질자원연구원
대전광역시 유성구 과학로 124 (가정동)
(72) 발명자
조창수
대전광역시 유성구 엑스포로 448 엑스포아파트 505동 1002호
선창국
대전광역시 유성구 도안동로 523, 208동 2002호
(74) 대리인
김정수

전체 청구항 수 : 총 9 항

심사관 : 김려원

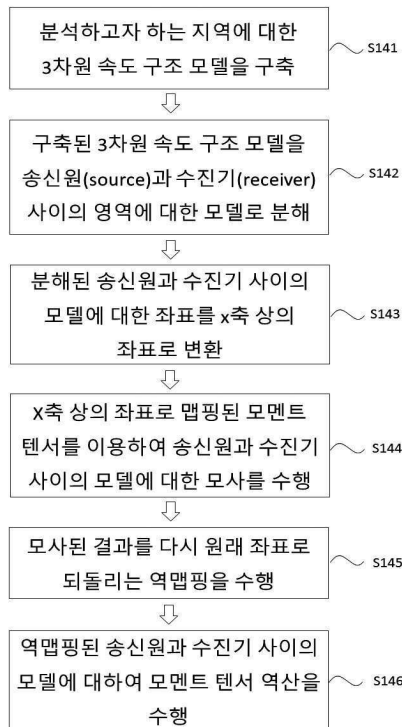
(54) 발명의 명칭 **모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법**

(57) 요약

본 발명은 지진발생시 단층의 방향을 파악하기 위하여 사용되는 모멘트 텐서 역산(moment tensor inversion)기법에 관한 것으로, 본 발명에 따르면, 지진학 연구 분야에서 중규모 이상의 지진에 대한 파형 모사 및 수압파쇄시 발생하는 진원의 모사를 위해 사용되는 모멘트 텐서 역산기법에 있어서, 모멘트 텐서 파형 역산시 계산시간을 줄

(뒷면에 계속)

대표도 - 도14



이기 위해 1차원 모형을 가정하여 해석적인 해를 구해야 하는 제약이 있고, 이를 극복하기 위하여 3차원 모형을 적용하면 많은 계산시간과 경제적 비용이 요구되는 문제가 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산 기법들의 문제점을 해결하기 위해, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형의 전체 영역을 송신원과 수신기 사이의 모형으로 분해하여 계산하는 동시에, 시간영역 3차원 점탄성 유한차분법에 PML(perfectly matched layer)을 적용함으로써, 계산시간 및 비용을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법이 제공된다.

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	GP2014-002
부처명	미래창조과학부
연구관리전문기관	산업기술연구회
연구사업명	주요사업-기관고유임무형
연구과제명	한반도 동부지역 잠재적 위험 지진원 평가
기 여 율	1/1
주관기관	한국지질자원연구원
연구기간	2012.01.01 ~ 2014.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

지진발생시 단층방향의 파악과 지진에 대한 파형 모사를 위해 사용되는 모멘트 텐서 역산(moment tensor inversion)시 3차원 모델에 전체에 대한 파형을 모사해야 함으로 인해 계산시간이 오래 걸리고 비용이 요구되는 문제가 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산방법들의 문제점을 해결하기 위한 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법에 있어서,

분석하고자 하는 지역에 대한 3차원 속도 구조(3D velocity structure) 모델을 구축하는 모델링 단계;

상기 모델링 단계에서 구축된 상기 3차원 속도 구조 모델을 송신원(source)과 수신기(receiver) 사이의 영역에 대한 모델로 분해하는 모델링 영역 분해단계;

상기 모델링 영역 분해단계에서 분해된 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 모델에 대한 모멘트 텐서의 좌표를 X축 상의 좌표로 변환하는 맵핑단계;

상기 맵핑단계에서 상기 X축 상의 좌표로 맵핑된 모멘트 텐서를 이용하여 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 모델을 모사하는 모사단계;

상기 모사단계에서 계산된 결과를 다시 원래 좌표로 되돌리는 역맵핑단계; 및

상기 역맵핑단계에서 구해진 상기 송신원과 수신기 사이의 모델에 대하여 모멘트 텐서 역산을 수행하는 모멘트 텐서 역산단계를 포함하는 처리를 컴퓨터나 전용의 하드웨어에 실행시키도록 구성됨으로써,

상기 3차원 속도 구조 모델 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 모델에 대한 역산만을 수행하는 것에 의해 계산해야 할 모델 영역을 감소하여 계산시간 및 비용을 감소할 수 있도록 구성되는 것을 특징으로 하는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 맵핑단계는,

이하의 수학적식에 나타난 회전연산자(R)를 이용하여 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 각만큼 상기 모멘트 텐서의 축을 회전시키는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 하는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법.

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 모사단계는,

모멘트 텐서(m)를 이하의 수학적식으로 나타낼 때,

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix}$$

이하의 수학적식을 이용하여 상기 맵핑단계에서 맵핑된 좌표계에 대한 새로운 모멘트 텐서(m')를 계산하고, 상기 새로운 모멘트 텐서(m')를 이용하여 모사를 수행하는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 하는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법.

$$\mathbf{m}' = \mathbf{R}\mathbf{m}\mathbf{R}^t$$

(여기서, R^t는 R의 전치행렬(transpose matrix)임)

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 역맵핑단계는,

이하의 수학적식에 나타낸 회전연산자(R')를 이용하여 상기 모사단계에서 계산된 성분들을 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 각만큼 회전시키는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 하는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법.

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 역맵핑단계는,

이하의 수학적식을 이용하여, 계산된 합성파(S')의 성분을 회전시킴으로써 원래의 합성파(S)를 구하는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 하는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법.

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}'\mathbf{S}'$$

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 모멘트 텐서 역산단계는,

3차원 점탄성 유한차분법을 이용하여 3차원 모멘트 텐서 역산을 수행하며,

계산영역 감소에 의해 유한 경계에서 발생하는 인공 반사파를 줄이기 위해, 상기 3차원 점탄성 유한차분법에 ADE(Auxiliary Differential Equations)-PML(Perfectly Matched Layer)에 따른 경계조건을 적용하도록 구성되는 특징으로 하는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법.

청구항 7

제 6항에 있어서,
상기 역산방법은,

상기 모멘트 텐서 역산단계에서, 상기 유한차분법 대신에, SEM(Spectral Element Method)이나 유한요소법(Finite Element Method ; FEM)을 이용하여 3차원 모멘트 텐서 역산을 수행하는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 하는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법.

청구항 8

청구항 1항 내지 7항 중 어느 한 항에 기재된 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법에 따른 처리를 컴퓨터에 실행시키도록 구성되는 프로그램이 기록된 기록매체.

청구항 9

청구항 1항 내지 7항 중 어느 한 항에 기재된 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법을 이용하여 모멘트 텐서 역산을 수행하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 모멘트 텐서 역산시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 지진발생시 단층의 방향을 파악하기 위하여 사용되는 모멘트 텐서 역산(moment tensor inversion)기법에 관한 것으로, 더 상세하게는, 지진학 연구 분야에서 중규모 이상의 지진에 대한 파형 모사 및 수압파쇄시 발생하는 진원의 모사를 위해 사용되는 종래의 모멘트 텐서 역산기법은 모멘트 텐서 파형 역산시 많은 시간이 걸리는 단점이 있었던 문제를 개선하기 위해, 계산시간을 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법에 관한 것이다.

[0002] 또한, 본 발명은, 계산시간을 줄이기 위해 1차원적인 모형을 가정하여 해석적인 해를 구해야 했던 종래기술의 제약을 극복하기 위하여 3차원 모형에 대한 파형 모사를 이용한 모멘트 역산 기법을 적용하면, 3차원 모형 파형을 모사하기 위해 많은 계산시간과 경제적 비용이 요구되는 문제가 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산 기법들의 단점을 해소하기 위해, 전체 영역을 송신원과 수신기 사이의 모형으로 분해하고, 시간영역 3차원 점탄성 유한차분법에 PML(perfectly matched layer)을 적용함으로써, 계산시간 및 비용을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 일반적으로, 파형 역산(wave inversion) 기법은, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 탐사환경과 동일한 환경을 구축하여 모델링을 실시한 후, 실제 측정된 데이터와의 오차를 측정하여 그 오차값이 최소가 되도록 지하매질 속도 분포를 업데이트 하여 탄성과 전파속도를 구하는 기술로, 시행자의 주관적 판단을 완전히 배제할 수 있는 장점으로 인해 최근 전세계적으로 널리 주목받고 있다.

[0004] 또한, 탄성과 영상화 기술은, 탐사기술의 가장 중요한 부분을 차지하는 분야로서, 실제 탄성과 탐사자료를 이용하여 회절과 산란된 자료를 한 지점으로 모으고, 반사면을 정확한 위치로 보정하여 지하매질의 물성값이 아닌 실제 지하매질의 구조를 파악하는 기술로, 최근 컴퓨터 성능의 발전으로 인해 양방향 파동방정식(wave equation)을 이용한 역시간 영상화 기법이 현재 전 세계적으로 활발히 연구되고 있다.

[0005] 즉, 상기한 바와 같은 파형 역산을 이용한 탄성과 탐사방법에 대한 종래기술의 예로는, 예를 들면, 한국 등록특허공보 제10-1262990호에 제시된 "단계별 파형역산을 통한 지하매질 구조 추정 방법 및 장치" 및 한국 등록특허공보 제10-1092668호에 제시된 "파형 역산을 이용한 지하 구조의 영상화 장치와 방법"와 같이, 파형 역산을 이

용하여 지하 구조의 영상화를 위한 방법들이 제시된 바 있다.

- [0006] 아울러, 상기한 바와 같은 파형 역산을 이용한 탄성과 탐사방법에 대한 종래기술의 다른 예로는, 예를 들면, 한국 등록특허공보 제10-1182838호에는 "송신원 추정을 통한 주파수 영역 역시간 구조보정 방법 및 장치"가 제시된 바 있고, 한국 공개특허공보 제10-2013-0054236호에는 "시변 필터들을 이용하는 전체 파동장 역산"이 제시된 바 있다.
- [0007] 상기한 바와 같이, 종래, 탄성과 탐사를 통하여 지하의 구조를 추정하고 영상화 하기 위해 파형 역산을 이용하는 여러 가지 방법들이 제시된 바 있으나, 상기한 종래기술의 내용들에는, 이러한 파형 역산 방법을 지진 탐사에 적용하기 위한 기술내용에 대하여는 제시된 바 없었다.
- [0008] 즉, 종래, 지진학 연구에 있어서, 지진발생시 발진기구, 즉, 단층의 방향을 파악하기 위하여 사용되는 방법으로, 예를 들면, 초동의 수직성분 극성과 진폭비를 이용하는 FOCMEC(참고문헌 1 참조) 방법과, 파형의 일치율을 이용하는 모멘트 텐서 역산(moment tensor inversion) 기법(참고문헌 2 참조)이 가장 널리 사용되고 있다.
- [0009] 여기서, 최근, 지진학 분야에서는, 중규모 이상의 지진에 대한 파형 모사를 위해 모멘트 텐서 역산이 많이 사용되고 있으며, 또한, 최근에는, 수압파쇄시 발생하는 진원에 대하여도 모멘트 텐서 역산 기법이 많이 사용되고 있다.
- [0010] 더 상세하게는, 종래에는, 모멘트 텐서 파형 역산시 많은 시간이 걸림으로 인해 1차원적인 모형을 가정하고 해석적인 해를 이용하는 방법이 많이 이용되었으나, 최근에는, 이러한 1차원적인 모형의 제약을 극복하기 위해 3차원 모형에 대한 파형 모사를 이용한 모멘트 역산 기법이 적용되고 있다.
- [0011] 그러나 종래의 3차원 모형에 대한 모멘트 역산 기법은, 3차원 모형에 대한 탄성과 모사를 위한 송신원과 수신기에 대한 영역을 모두 계산하여야 하므로 계산영역이 많아 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있는 것이었다.
- [0012] 더욱이, 종래의 3차원 모형에 대한 모멘트 텐서 역산 기법은, 3차원 모형의 파형을 모사하기 위해 복잡한 계산 과정을 반복하여 수행해야 하는 문제점이 있으며, 즉, 모멘트 텐서 역산을 수행시 7번에서 9번의 탄성과 모사를 수행하여야 하므로 많은 계산시간과 경제적 비용이 요구된다는 단점이 있는 것이었다.
- [0013] 따라서 상기한 바와 같은 종래기술의 모멘트 텐서 역산 기법들의 문제점을 해결하기 위하여는 3차원 모형에 대한 탄성과 모사에 걸리는 처리시간을 감소하는 것이 요구되며, 이를 위해서는, 예를 들면, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형을 분해하여 송신원과 수신기 사이의 모형 부분만을 계산하는 것에 의해 계산시간을 단축하도록 하는 것이 바람직하나, 아직까지 그러한 요구를 모두 만족시키는 장치나 방법은 제공되지 못하고 있는 실정이다.
- [0014]
- [0015] [참고문헌]
- [0016] 1. Snoke, J. A., J. W. Munsey, A. C. Teague, and G. A. Bollinger, 1984, "A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV -P amplitude ratio data", Earthquake Notes, Vol. 55, pp. no. 3. pp. 15
- [0017] 2. Minson, S. E. and Dreger, D. S., 2008, "Stable inversions for complete moment tensors", GJI, Vol. 174, pp. 585-592.
- [0018] 3. 조창수, 손민경, 2012, "속도-응력 변분식을 이용한 3차원 SEM 탄성과 수치 모사에 대한 ADE-PML경계조건의 적용", 지구물리와 물리탐사, 제15권, 제2호 pp.57-65.
- [0019] 4. Komatitsch, D., and Martin, R., 2007, "An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation", Geophysics, Vol. 72, pp. SM155-SM167.
- [0020] 5. Robertsson, J., Blanch, J., and Symes, W., 1994, "Viscoelastic finite-difference modeling", Geophysics, Vol. 59, pp. 1444-1456
- [0021] 6. Carcione, J. M., 2001, Wave Fields in Real Media : Wave Propagation in Anisotropic, Anelastic and Porous Media, Elsevier, New York.
- [0022] 7. Ben-Menahem and Singh, 1981, Ben-Menahem A and Singh S J 1981 Seismic waves and sources, Springer-

Verlag, New York.

- [0023] 8. Carcione, J. M., Kosloff, D. and Kosloff, R., 1988, "Wave propagation simulation in a linear viscoelastic medium", Geophys. J. R. Astr. Soc. vol 95, 597-611.
- [0024] 9. Diaz, J., Ezziani, A., and Le Goff, N., 2011, "Version 2.0 Gar6more3D", <http://web.univ-pau.fr/~jdiaz1/gar63DCecill.html>.
- [0025] 10. Kang, T. S. and Shin, J. S., 2006, "Surface-wave tomography from ambient seismic noise of accelerograph networks in southern korea", GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 33, L17303, doi:10.1029/2006GL027044
- [0026] [선행기술문헌]
- [0027] 1. 한국 등록특허공보 제10-1262990호 (2013.05.03.)
- [0028] 2. 한국 등록특허공보 제10-1092668호 (2011.12.05.)
- [0029] 3. 한국 등록특허공보 제10-1182838호 (2012.09.07.)
- [0030] 4. 한국 공개특허공보 제10-2013-0054236호 (2013.05.24.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0031] 본 발명은 상기한 바와 같은 종래기술의 문제점을 해결하고자 하는 것으로, 따라서 본 발명의 목적은, 지진발생 시 단층방향의 파각과 중규모 이상의 지진에 대한 파형 모사 및 수압파쇄시 발생하는 진원 모사를 위해 사용되는 모멘트 텐서 역산(moment tensor inversion) 기법에 있어서, 모멘트 텐서 파형 역산시 많은 시간이 걸리는 단점이 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산기법들의 문제점을 해결하기 위해, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형의 전체 영역을 송신원과 수신기 사이의 모형으로 분해하여 계산하도록 구성됨으로써, 계산시간을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법을 제공하고자 하는 것이다.

[0032] 또한, 본 발명의 다른 목적은, 모멘트 텐서 역산시 계산시간을 줄이기 위해 1차원적인 모형을 가정하여 해석적인 해를 구해야 했던 제약이 있으며, 이를 극복하기 위하여 3차원 모형에 대한 모멘트 역산 기법을 적용하면 계산시간이 오래 걸리고 그만큼 경제적 비용이 증가되는 문제가 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산 기법들의 문제점을 해결하기 위해, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형의 전체 영역을 송신원과 수신기 사이의 모형으로 분해하는 동시에, 시간영역 3차원 점탄성 유한차분법에 PML(perfectly matched layer)을 적용함으로써, 계산시간 및 비용을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법을 제공하고자 하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0033] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위해, 본 발명에 따르면, 지진발생시 단층방향의 파각과 지진에 대한 파형 모사를 위해 사용되는 모멘트 텐서 역산(moment tensor inversion)시 3차원 모형에 전체에 대한 파형을 모사해야 함으로 인해 계산시간이 오래 걸리고 비용이 요구되는 문제가 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산방법들의 문제점을 해결하기 위한 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법에 있어서, 분석하고자 하는 지역에 대한 3차원 속도 구조(3D velocity structure) 모델을 구축하는 모델링 단계; 상기 모델링 단계에서 구축된 상기 3차원 속도 구조 모델을 송신원(source)과 수신기(receiver) 사이의 영역에 대한 모델로 분해하는 모델링 영역 분해단계; 상기 모델링 영역 분해단계에서 분해된 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 모델에 대한 모멘트 텐서의 좌표를 X축 상의 좌표로 변환하는 맵핑단계; 상기 맵핑단계에서 상기 X축 상의 좌표로 맵핑된 모멘트 텐서를 이용하여 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 모델을 모사하는 모사단계; 상기 모사단계에서 계산된 결과를 다시 원래 좌표로 되돌리는 역맵핑단계; 및 상기 역맵핑단계에서 구해진 상기 송신원과 수신기 사이의 모델

에 대하여 모멘트 텐서 역산을 수행하는 모멘트 텐서 역산단계를 포함하는 처리를 컴퓨터나 전용의 하드웨어에 실행시키도록 구성됨으로써, 상기 3차원 속도 구조 모델 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 모델에 대한 역산만을 수행하는 것에 의해 계산해야 할 모델 영역을 감소하여 계산시간 및 비용을 감소할 수 있도록 구성되는 것을 특징으로 하는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법이 제공된다.

[0034] 여기서, 상기 맵핑단계는, 이하의 수학식에 나타낸 회전연산자(R)를 이용하여 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 각만큼 상기 모멘트 텐서의 축을 회전시키는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 한다.

[0035]

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0036] 또한, 상기 모사단계는, 모멘트 텐서(m)를 이하의 수학식으로 나타낼 때,

[0037]

$$m = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix}$$

[0038] 이하의 수학식을 이용하여 상기 맵핑단계에서 맵핑된 좌표계에 대한 새로운 모멘트 텐서(m')를 계산하고, 상기 새로운 모멘트 텐서(m')를 이용하여 모사를 수행하는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 한다.

[0039]

$$m' = RmR^t$$

[0040] (여기서, R^t는 R의 전치행렬(transpose matrix)임)

[0041] 아울러, 상기 역맵핑단계는, 이하의 수학식에 나타낸 회전연산자(R')를 이용하여 상기 모사단계에서 계산된 성분들을 상기 송신원과 상기 수신기 사이의 각만큼 회전시키는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 한다.

[0042]

$$R' = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0043] 더욱이, 상기 역맵핑단계는, 이하의 수학식을 이용하여, 계산된 합성파(S')의 성분을 회전시킴으로써 원래의 합성파(S)를 구하는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 한다.

$$S = R' S'$$

[0044]

[0045]

또한, 상기 모멘트 텐서 역산단계는, 3차원 점탄성 유한차분법을 이용하여 3차원 모멘트 텐서 역산을 수행하며, 계산영역 감소에 의해 유한 경계에서 발생하는 인공 반사파를 줄이기 위해, 상기 3차원 점탄성 유한차분법에 ADE(Auxiliary Differential Equations)-PML(Perfectly Mached Layer)에 따른 경계조건을 적용하도록 구성되는 특징으로 한다.

[0046]

여기서, 상기 역산방법은, 상기 모멘트 텐서 역산단계에서, 상기 유한차분법 대신에, SEM(Spectral Element Method)이나 유한요소법(Finite Element Method ; FEM)을 이용하여 3차원 모멘트 텐서 역산을 수행하는 처리가 수행되도록 구성되는 특징으로 한다.

[0047]

아울러, 본 발명에 따르면, 상기에 기재된 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법에 따른 처리를 컴퓨터에 실행시키도록 구성되는 프로그램이 기록된 기록매체가 제공된다.

[0048]

더욱이, 본 발명에 따르면, 상기에 기재된 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법을 이용하여 모멘트 텐서 역산을 수행하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 모멘트 텐서 역산시스템이 제공된다.

발명의 효과

[0049]

상기한 바와 같이, 본 발명에 따르면, 지진발생시 단층방향의 좌와우와 중규모 이상의 지진에 대한 파형 모사 및 수압파쇄시 발생하는 진원 모사를 위해 사용되는 모멘트 텐서 역산(moment tensor inversion) 기법에 있어서, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형의 전체 영역을 송신원과 수신기 사이의 모형으로 분해하여 계산하도록 구성됨으로써, 계산시간을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법이 제공됨으로써, 모멘트 텐서 파형 역산시 많은 시간이 걸리는 단점이 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산기법들의 문제점을 해결할 수 있다.

[0050]

또한, 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형의 전체 영역을 송신원과 수신기 사이의 모형으로 분해하여 계산하는 동시에, 시간영역 3차원 점탄성 유한차분법에 PML(perfectly matched layer)을 적용하는 것에 의해 계산시간 및 비용을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법이 제공됨으로써, 모멘트 텐서 역산시 계산시간을 줄이기 위해 1차원적인 모형을 가정하여 해석적인 해를 구해야 하는 제약이 있으며, 이를 극복하기 위해 3차원 모형에 대한 모멘트 역산 기법을 적용하면 계산시간이 오래 걸리고 경제적 비용이 증가하게 되는 문제가 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산 기법들의 문제점을 해결할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0051]

도 1은 속도-응력 엇갈린 유한차분 격자를 나타내는 도면이다.

도 2는 유한차분법에서 모멘트 텐서 송신원의 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.

도 3은 3차원 모형에 대한 영역 분해 및 모멘트 텐서 성분의 회전에 대하여 설명하기 위한 도면이다.

도 4는 분해된 모형 영역에 대한 계산을 용이하게 하기 위해 X축으로 맵핑하는 개념을 설명하기 위한 도면이다.

도 5는 본 발명에 적용된 3차원 유한차분법 알고리즘의 검증에 대한 검증시험에 적용된 속도 구조 모형 및 그 송신원과 수신기 배치를 개략적으로 나타내는 도면이다.

도 6은 도 5에 나타난 바와 속도 구조 모형을 이용하여 수행된 검증시험의 결과를 나타내는 도면이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 방법을 이용하여 장시간 수치 모형 계산시의 안전성을 검증한 결과를 나타내는 도면이다.

도 8은 도 3에 나타난 3차원 모형에 모멘트 텐서로 단층 주향 45°, 경사 45°, 이동방향 45°가 주어졌을 때 전체 3차원 모형에 대한 합성과 본 발명의 실시예에 따라 송신원 수진기 사이의 모형으로 분해한 경우의 합성과를 비교하여 나타내는 도면이다.

도 9는 도 3에 나타난 3차원 모형에 모멘트 텐서로 단층 주향 45°, 경사 45°, 이동방향 45°가 주어졌을 때 전체 3차원 모형에 대한 합성과 본 발명의 실시예에 따라 송신원 수진기 사이의 모형으로 분해한 경우의 합성과를 비교하여 나타내는 도면이다.

도 10은 본 발명의 실시예에 따른 모멘트 텐서 역산방법을 검증하기 위해 적용되는 3차원 속도 구조 모형을 나타내는 도면이다.

도 11은 도 9에 나타난 3차원 속도 구조 모형을 이용하여 SEM에 의해 계산된 합성과 결과와 본 발명의 실시예에 따라 모형 분해 영역으로 계산된 합성과 결과를 각각 비교하여 나타내는 도면이다.

도 12는 기존의 3차원 SEM을 이용한 모멘트 역산 결과를 나타내는 도면이다.

도 13은 본 발명의 실시예에 따라 분해 영역 3차원 FDM을 이용한 모멘트 역산 결과를 나타내는 도면이다.

도 14는 본 발명의 실시예에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 플로차트이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0052] 이하, 첨부된 도면을 참조하여, 본 발명에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법의 구체적인 실시예에 대하여 설명한다.
- [0053] 여기서, 이하에 설명하는 내용은 본 발명을 실시하기 위한 하나의 실시예일 뿐이며, 본 발명은 이하에 설명하는 실시예의 내용으로만 한정되는 것은 아니라는 사실에 유념해야 한다.
- [0054] 또한, 이하의 본 발명의 실시예에 대한 설명에 있어서, 종래기술의 내용과 동일 또는 유사하거나 당업자의 수준에서 용이하게 이해하고 실시할 수 있다고 판단되는 부분에 대하여는, 설명을 간략히 하기 위해 그 상세한 설명을 생략하였음에 유념해야 한다.
- [0055] 즉, 본 발명은, 후술하는 바와 같이, 지진발생시 단층방향의 파악과 중규모 이상의 지진에 대한 파형 모사 및 수압과쇄시 발생하는 진원 모사를 위해 사용되는 모멘트 텐서 역산(moment tensor inversion) 기법에 있어서, 모멘트 텐서 파형 역산시 많은 시간이 걸리는 단점이 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산기법들의 문제점을 해결하기 위해, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형의 전체 영역을 송신원과 수진기 사이의 모형으로 분해하여 계산하도록 구성됨으로써, 계산시간을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법에 관한 것이다.
- [0056] 또한, 본 발명은, 후술하는 바와 같이, 모멘트 텐서 역산시 계산시간을 줄이기 위해 1차원적인 모형을 가정하여 해석적인 해를 구해야 했던 제약이 있으며, 이를 극복하기 위하여 3차원 모형에 대한 모멘트 역산 기법을 적용하면 계산시간이 오래 걸리고 그만큼 경제적 비용이 증가되는 문제가 있었던 종래기술의 모멘트 텐서 역산 기법들의 문제점을 해결하기 위해, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형의 전체 영역을 송신원과 수진기 사이의 모형으로 분해하여 계산하는 동시에, 시간영역 3차원 점탄성 유한차분법에 PML(perfectly matched layer)을 적용함으로써, 계산시간 및 비용을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법에 관한 것이다.
- [0057] 계속해서, 도면을 참조하여, 상기한 바와 같이 구성되는 본 발명에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법의 구체적인 실시예에 대하여 설명한다.
- [0058] 여기서, 본 발명에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법의 구체적인 내용에 대하여 설명하기 전에, 모멘트 텐서 역산을 적용하기 위한 점탄성 과동방정식 및 그 해를 구하는 알고리즘에 대하여 설명하면, 먼저, 운동방정식은 이하의 [수학식 1]과 같이 나타낼 수 있다.

[0059] [수학식 1]

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} + f_1 = \rho \dot{v}_1$$

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} + f_2 = \rho \dot{v}_2$$

$$\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} + f_3 = \rho \dot{v}_3$$

[0060]

[0061] 여기서, ρ 는 밀도, v 는 속도 성분, σ 는 응력, f 는 힘, 1은 x축, 2는 y축, 3은, z축을 나타낸다.

[0062] 또한, 입자속도-응력 관계식은 [수학식 2]와 같이 나타낼 수 있다(참고문헌 5 참조).

[0063] [수학식 2]

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{11} = & (\lambda + 2\mu) \left[1 - 1/L \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\tau_{el}^P}{\tau_{\sigma l}} \right) \right] \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) \\ & - 2\mu \left[1 - 1/L \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\tau_{el}^S}{\tau_{\sigma l}} \right) \right] \left(\frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) + 1/L \sum_{l=1}^L e_{11}^l \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{22} = & (\lambda + 2\mu) \left[1 - 1/L \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\tau_{el}^P}{\tau_{\sigma l}} \right) \right] \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) \\ & - 2\mu \left[1 - 1/L \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\tau_{el}^S}{\tau_{\sigma l}} \right) \right] \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) + 1/L \sum_{l=1}^L e_{22}^l \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{33} = & (\lambda + 2\mu) \left[1 - 1/L \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\tau_{el}^P}{\tau_{\sigma l}} \right) \right] \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) \\ & - 2\mu \left[1 - 1/L \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\tau_{el}^S}{\tau_{\sigma l}} \right) \right] \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right) + 1/L \sum_{l=1}^L e_{33}^l \end{aligned}$$

$$\dot{\sigma}_{12} = \mu \left[1 - 1/L \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\tau_{el}^S}{\tau_{\sigma l}} \right) \right] \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \right) + 1/L \sum_{l=1}^L e_{12}^l$$

$$\dot{\sigma}_{13} = \mu \left[1 - 1/L \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\tau_{el}^S}{\tau_{\sigma l}} \right) \right] \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_3} + \frac{\partial v_3}{\partial x_1} \right) + 1/L \sum_{l=1}^L e_{13}^l$$

$$\dot{\sigma}_{23} = \mu \left[1 - 1/L \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\tau_{el}^S}{\tau_{\sigma l}} \right) \right] \left(\frac{\partial v_2}{\partial x_3} + \frac{\partial v_3}{\partial x_2} \right) + 1/L \sum_{l=1}^L e_{23}^l$$

[0064]

[0065] 여기서, λ 는 라메 상수, μ 는 전단 계수이다.

[0066] 아울러, 메모리 변수는, 이하의 [수학식 3]과 같이 나타낼 수 있다.

[0067] [수학식 3]

$$\begin{aligned} \dot{e}_{11}^l &= \frac{(\lambda + 2\mu)}{\tau_{\sigma l}} \left(1 - \frac{\tau_{\epsilon l}^P}{\tau_{\sigma l}}\right) \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3}\right) \\ &\quad - \frac{2\mu}{\tau_{\sigma l}} \left(1 - \frac{\tau_{\epsilon l}^S}{\tau_{\sigma l}}\right) \left(\frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3}\right) - \frac{e_{11}^l}{\tau_{\sigma l}} \\ \dot{e}_{22}^l &= \frac{(\lambda + 2\mu)}{\tau_{\sigma l}} \left(1 - \frac{\tau_{\epsilon l}^P}{\tau_{\sigma l}}\right) \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3}\right) \\ &\quad - \frac{2\mu}{\tau_{\sigma l}} \left(1 - \frac{\tau_{\epsilon l}^S}{\tau_{\sigma l}}\right) \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3}\right) - \frac{e_{22}^l}{\tau_{\sigma l}} \\ \dot{e}_{33}^l &= \frac{(\lambda + 2\mu)}{\tau_{\sigma l}} \left(1 - \frac{\tau_{\epsilon l}^P}{\tau_{\sigma l}}\right) \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3}\right) \\ &\quad - \frac{2\mu}{\tau_{\sigma l}} \left(1 - \frac{\tau_{\epsilon l}^S}{\tau_{\sigma l}}\right) \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2}\right) - \frac{e_{33}^l}{\tau_{\sigma l}} \\ \dot{e}_{12}^l &= \frac{\mu}{\tau_{\sigma l}} \left(1 - \frac{\tau_{\epsilon l}^S}{\tau_{\sigma l}}\right) \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1}\right) - \frac{e_{12}^l}{\tau_{\sigma l}} \\ \dot{e}_{13}^l &= \frac{\mu}{\tau_{\sigma l}} \left(1 - \frac{\tau_{\epsilon l}^S}{\tau_{\sigma l}}\right) \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_3} + \frac{\partial v_3}{\partial x_1}\right) - \frac{e_{13}^l}{\tau_{\sigma l}} \\ \dot{e}_{23}^l &= \frac{\mu}{\tau_{\sigma l}} \left(1 - \frac{\tau_{\epsilon l}^S}{\tau_{\sigma l}}\right) \left(\frac{\partial v_2}{\partial x_3} + \frac{\partial v_3}{\partial x_2}\right) - \frac{e_{23}^l}{\tau_{\sigma l}} \end{aligned}$$

[0068]

[0069] 여기서, $\tau_{\epsilon l}^P$ 및 $\tau_{\epsilon l}^S$ 는 각각 이하에 제시되는 $\tau_{\epsilon pl}$ 및 $\tau_{\epsilon sl}$ 과 같고, $\tau_{\sigma l}$ 는 $\tau_{\sigma pl} = \tau_{\sigma sl}$ 과 같다.

[0070] 또한, 특정한 주파수 영역에서 상수 Q 값에 맞추기 위하여 완화 시간(relaxation time)으로부터 완화 주파수(relaxation frequency)로 먼저 변수화하여야 하며, 이때, 적합(fitting)은 등분할 로그 주파수 영역 스케일(scale)로 이루어져야 하고, 이는, 점탄성 모델을 위한 최적의 적합을 제공한다.

[0071] 즉, 탄성과 매질에서 P파와 S파는 각 Q값의 차이에 의해 감쇠와 분산이 일어나는 특성이 있으며(참고문헌 6 참조), S파에 대한 비완화 전단파 계수(unrelaxed shear wave modulus)는 이하의 [수학식 4]와 같다.

[0072] [수학식 4]

$$M_u^s(\omega) = M_R^s / L \sum_{l=1}^{L_s} \frac{1 + i\omega\tau_{\epsilon sl}}{1 + i\omega\tau_{\sigma sl}}$$

[0073]

[0074] 또한, 비완화 계수(unrelaxed modulus)는 이하의 [수학식 5]와 같다.

[0075] [수학식 5]

$$M_R^s = 2\rho v_s^2$$

[0076]

[0077] 여기서, v_s 는 S파 속도이고, ρ 는 밀도이다.

[0078] 아울러, S파에 대한 Q값은, 이하의 [수학식 6]과 같다.

$$Q_s^{-1}(\omega) = \frac{Im[M_u^s(\omega)]}{Re[M_u^s(\omega)]}$$

[0079]

[0080] 더욱이, L_s 는 완화 메커니즘을 위한 최대 개수, $\tau_{\sigma sl}$ 및 $\tau_{\epsilon sl}$ 은 전단응력(shear stress)과 전단변형(shear strain)에 대한 완화(relaxation) 시간을 나타내는 것으로 할 때, 완화 주파수는 이하의 [수학식 7]과 같이 나타낼 수 있다.

[0081] [수학식 7]

$$\omega_{sl} = \frac{1}{\tau_{\sigma sl}}, \quad l = 1, \dots, L_s$$

[0082]

[0083] 여기서, 가중치 요소는 이하의 [수학식 8]과 같다.

[0084] [수학식 8]

$$a_{sl} = 1 - \frac{\tau_{\epsilon sl}}{\tau_{\sigma sl}}, \quad l = 1, \dots, L_s$$

[0085]

[0086] 따라서 p파에 대한 Q값을 정의하기 위한 완화 주파수는 이하의 [수학식 9]와 같이 나타낼 수 있다.

[0087] [수학식 9]

$$\omega_{pl} = \frac{1}{\tau_{\sigma pl}}, \quad l = 1, \dots, L_p$$

[0088]

[0089] 또한, 가중치 요소는, 이하의 [수학식 10]과 같다.

[0090] [수학식 10]

$$a_{pl} = 1 - \frac{\tau_{\epsilon pl}}{\tau_{\sigma pl}}, \quad l = 1, \dots, L_p$$

[0091]

[0092] 여기서, L_p 는 P파 감쇠 메커니즘의 개수이고 $\tau_{\sigma pl}$ 과 $\tau_{\epsilon pl}$ 은 팽창응력(dilatation stress) 및 팽창변형(dilatation strain)에 대한 완화(relaxation) 시간을 나타낸다.

[0093] 또한, 계산의 간편성을 위해, $L = L_s = L_p$ 및 $\omega_1 = \omega_{s1} = \omega_{p1}$, $l = 1, \dots, L$ 이라 하면, L의 개수가 증가하면 $Q_s(\omega)$ 와 $Q_p(\omega)$ 에 대한 적합성이 개선되며, 이는, 송신원의 사용 가능한 주파수 영역을 나타낸다.

[0094] 따라서 P파에 대하여 Q를 나타내면, 이하의 [수학식 11]과 같다(참고문헌 7 참조).

[0095] [수학식 11]

$$Q_p^{-1}(\omega) = \frac{\text{Im} [2M_u^s(\omega) + M_u^p(\omega)]}{\text{Re} [2M_u^s(\omega) + M_u^p(\omega)]}$$

$$M_u^p(\omega) = M_R^p 1/L \left[\sum_{l=1}^{L_p} \frac{1 + i\omega\tau_{\epsilon pl}}{1 + i\omega\tau_{\sigma pl}} \right]$$

$$M_R^p = \rho(3v_p^2 - 4v_s^2)$$

[0096]

[0097] 여기서, v_p 는 완화된(relaxed) P파 속도이고, v_s 는 완화된 S파 속도이다.

[0098] 다음으로, 지표면 경계조건(Free Surface boundary condition)에 대하여 설명하면, 3차원 점탄성 매질의 자유 경계면에 대한 식은 이하의 [수학식 12]와 같다.

[0099] [수학식 12]

$$\sigma_{iz} = 0, \quad i = x, y, z \text{ or } 1, 2, 3$$

[0100]

[0101] 여기서, 응력의 식을 사용하면 이하의 [수학식 13]과 같이 나타낼 수 있다.

[0102] [수학식 13]

$$\frac{\partial v_3}{\partial x_3} = -1 - \frac{2\mu [1 - 1/L \sum_{l=1}^L (1 - \frac{\tau_{el}^S}{\tau_{ol}})]}{(\lambda + 2\mu) [1 - 1/L \sum_{l=1}^L (1 - \frac{\tau_{el}^P}{\tau_{ol}})]} (\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2})$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_3} = -\frac{\partial v_3}{\partial x_1}$$

$$\frac{\partial v_2}{\partial x_3} = -\frac{\partial v_3}{\partial x_2}$$

[0103]

[0104] 또한, 응력의 이미징 방법(imaging method)을 사용하여, 표면경계면을 대상으로 반대칭(antisymmetry)하게 설정하여 준다.

[0105] 계속해서, 인위적인 반사파를 제거하기 위해 PML 경계조건을 적용하는 과정에 대하여 설명하면, 종래의 PML은 감쇠지역에 대한 수직성분과 수평성분으로 분리하는 과정이 필요하지만 CFS-PML(Complex frequency Shifted PML)을 이용한 ADE(Auxiliary Differential Equations)-PML은 고전적인 PML처럼 성분 분리를 할 필요가 없이 사용함으로써 기억 용량을 줄일 수 있고 파동방정식 자체를 변형할 필요가 없다는 장점이 있다.

[0106] 즉, PML은 공간적인 변수에 복소수 영역을 취함으로써 공간과 시간에 따라 파동을 감쇠시키고자 하는 것으로, 방향에 대한 미분은 이하의 [수학식 14]와 같이 나타낼 수 있다.

[0107] [수학식 14]

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} = \frac{1}{s_x} \frac{\partial}{\partial x}$$

[0108]

$$s_x = k_x + \frac{d_x}{\alpha_x + i\omega}$$

[0109] 여기서, α_x 는 감쇠상수이며, $k \geq 1$ 는 ω 는 주파수를 나타낸다.

[0110] 또한, $k_x = 1$, $\alpha_x = 0$ 이면, 이하의 [수학식 15]와 같이, 이는 종래의 PML과 동일하게 된다.

[0111] [수학식 15]

$$\frac{1}{s_x} = \frac{1}{k_x} - \frac{d_x}{k_x^2} \frac{1}{(d_x/k_x + \alpha_x) + i\omega}$$

[0112]

[0113] 여기서, [수학식 15]를 다시 나타내면 이하의 [수학식 16]과 같다.

[0114] [수학식 16]

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} = \frac{1}{k_x} \frac{\partial}{\partial x} - \psi_x$$

[0115]

[0116] 이때, ψ_x 는 이하의 [수학식 17]과 같이 다시 쓸 수 있다.

[0117] [수학식 17]

$$\psi_x = \frac{d_x}{k_x^2} \frac{1}{(d_x/k_x + \alpha_x) + i\omega} \frac{\partial}{\partial x}$$

[0118]

[0119] 또한, [수학식 17]을 다시 전개하여 시간영역으로 변환하면 이하의 [수학식 18]과 같게 된다.

[0120] [수학식 18]

$$[(d_x/k_x + \alpha_x) + \frac{\partial}{\partial t}] \psi_x = \frac{d_x}{k_x^2} \frac{\partial}{\partial x}$$

[0121]

[0122] 아울러, [수학식 18]을 PML 적용을 위한 부가방정식(ADE; Auxiliary Differential Equation)이라 하며, 이를 시간에 대한 차분식으로 표현하면 이하의 [수학식 19]와 같이 나타낼 수 있다.

[0123] [수학식 19]

$$\psi_x^{n+1} = b(x) \psi_x^n + a(x) \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)^{n+1/2}$$

$$\text{단, } b(x) = \frac{2 - (\alpha_x + d_x/k_x) \Delta t}{2 + (\alpha_x + d_x/k_x) \Delta t}, \quad a(x) = \frac{1}{k_x^2} \frac{2d_x \Delta t}{2 + (\alpha_x + d_x/k_x) \Delta t} \text{이다.}$$

[0124]

[0125] 여기서, PML의 변수는 $d_x(0) = -(N_{\text{POWER}} + 1) * V_p(\text{max}) * \log_{10}(R_{\text{coef}})/(2 * L_{\text{PML}})$, $\alpha_x = \alpha_{\text{max}} * (1 - (x/L_{\text{PML}})^2)$, $\alpha_{\text{max}} = \pi * f_m$ 이 사용되었다.

[0126] 이때, N_{POWER} 는 2, f_m 은 송신원의 주 주파수이고, $R_{\text{coef}} = 0.001$ 반사계수를 나타낸다.

[0127] 계속해서, 수치 적용 알고리즘에 대하여 설명하면, 먼저, 도 1을 참조하면, 도 1은 속도-응력 엇갈린 유한차분 격자를 나타내는 도면이다.

[0128] 즉, 본 발명자들은, 상기한 바와 같은 탄성과 모사를 위해, 도 1에 나타낸 바와 같은 유한차분법(Staggered

Grid Finite Difference)을 이용하였다.

[0129] 여기서, 이하에 설명하는 본 발명의 실시예에서는, 상기한 바와 같이 탄성과 모사를 위해 유한차분법을 이용하는 경우를 예로 하여 본 발명을 설명하였으나, 본 발명은 반드시 이러한 경우로만 한정되는 것은 아니며, 즉, 본 발명은, 상기한 유한차분법 이외에, SEM(Spectral Element Method) 방법이나 유한요소법(FEM)에도 그대로 적용 가능한 것임에 유념해야 한다.

[0130] 즉, 도 2를 참조하면, 도 2는 유한차분법에서 모멘트 텐서 송신원의 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.

[0131] 더 상세하게는, 유한차분법에 있어서, 모멘트 텐서 송신원은, 도 2에 나타난 바와 같이, 모멘트 텐서 성분의 9개 성분($M_{xx}(t)$, $M_{yy}(t)$, $M_{zz}(t)$, $M_{yx}(t)$, $M_{xy}(t)$, $M_{yz}(t)$, $M_{zx}(t)$, $M_{zy}(t)$, $M_{zz}(t)$)이 주어지게 된다.

[0132] 또한, 도 3을 참조하면, 도 3은 3차원 모형 영역 분해 및 모멘트 텐서 성분의 회전에 대하여 설명하기 위한 도면으로, 도 3a는 종래기술의 방법과 마찬가지로 하여 구축된 3차원 모형이고, 도 3b는 5번 수진기와 송신원 사이의 모델 영역을 분해하여 나타내는 도면이다.

[0133] 더 상세하게는, 도 3a에 나타난 바와 같이, 3차원 모형에 대한 탄성과 모사를 위한 송신원과 수진기가 있을 때, 종래의 방법에서는 이들 영역을 모두 계산하여야 하므로 계산시간이 많이 걸리게 된다.

[0134] 특히, 모멘트 텐서 역산을 수행할 시 7번에서 9번의 탄성과 모사를 반복하여 수행하여야 하므로 많은 시간이 걸리며, 이에, 본 발명자들은, 탄성과 모사 시간을 줄이기 위해, 도 3b에 나타난 바와 같이, 3차원 모형 전체를 계산할 필요 없이, 송신원과 수진기 사이의 모형 부분만을 분해하여 계산을 한다면 계산시간을 현저하게 줄일 수 있다는 점에 착안하여 새로운 역산방법을 구현하였다.

[0135] 여기서, 도 3b에 나타난 바와 같이 3차원 모형을 송신원과 수진기 사이의 모형으로 분해하더라도, 이 부분을 그대로 계산하는 것은 좌표계의 문제로 인하여 매우 어려운 문제가 있으므로, 이에, 본 발명자들은, 수진기와 x축과 이루는 각을 이용하며 분해한 모형을 x축으로 좌표 변환을 행함으로써 계산을 매우 용이하게 수행할 수 있도록 하였다.

[0136] 즉, 도 4를 참조하면, 도 4는 분해된 모형 영역에 대한 계산을 용이하게 하기 위해 X축으로 맵핑하는 개념을 설명하기 위한 도면이다.

[0137] 이때, 모델영역만 회전 맵핑하는 것뿐만 아니라, 모멘트 송신원도 회전을 시켜주어야 하며, 이를 위해서는, $-\theta$ 각만큼 모형과 모멘트 텐서를 회전시켜주면 된다.

[0138] 또한, 이때의 회전연산자는 이하의 [수학식 20]에 나타난 바와 같다.

[0139] [수학식 20]

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0140]

[0141] 아울러, 모멘트 텐서는 이하의 [수학식 20]에 나타난 바와 같이 나타낼 수 있다.

[0142] [수학식 21]

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix}$$

[0143]

[0144] 여기서, 새로운 좌표계에서의 모멘트 텐서 m' 를 계산하여야 하는데, 새로이 계산되는 모멘트 텐서는 이하의 [수학식 22]와 같이 나타낼 수 있다.

[0145] [수학식 22]

[0146]
$$m' = RmR^t$$

[0147] 여기서, R^t 는 R 의 전치행렬(transpose matrix) 이며, 즉, 본 발명의 실시예에 따르면, 이와 같이 하여 새로이 계산된 모멘트 텐서를 이용하여 모사를 수행하면 된다.

[0148] 또한, 모사를 통하여 계산된 성분을 원래대로 회전시켜주어야 하는데, 이때 사용되는 회전변환식은 이하의 [수학식 23]과 같다.

[0149] [수학식 23]

[0150]
$$R' = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0151] 아울러, 모델분해를 이용하여 계산된 합성파를 S' 성분이라 하고, 원하는 합성파를 S 라고 할 때, 이는 이하의 [수학식 24]에 나타낸 바와 같이 회전을 수행하여 얻어질 수 있다.

[0152] [수학식 24]

[0153]
$$S = R'S'$$

 단, $S' = \begin{bmatrix} U' \\ V' \\ W' \end{bmatrix}$, $S = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}$

[0154] 여기서, 상기한 본 발명의 실시예에서는, 유한차분법에 모형 영역 분해 및 모멘트 텐서의 성분 회전을 이용하는 경우를 예로 하여 본 발명을 설명하였으나, 본 발명은 이러한 경우로만 한정되는 것은 아니며, 즉, 본 발명에 제시된 모형 영역 분해 및 모멘트 텐서 성분 회전의 개념은, 예를 들면, SEM(Spectral Element Method) 방법 및 유한요소법(FEM)에도 그대로 적용할 수 있는 등, 필요에 따라 당업자에 의해 적절한 방법을 선택하여 적용 가능한 것임에 유념해야 한다.

[0155] 계속해서, 상기한 바와 같이 구성되는 본 발명의 실시예에 따른 모멘트 텐서 역산방법의 실제 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증한 결과에 대하여 설명한다.

[0156] 즉, 본 발명자들은, 상기한 바와 같은 본 발명의 실시예에 따른 3차원 유한차분법의 알고리즘이 실제로 잘 맞는 것인지를 검증하기 위해, 램의 문제(Lamb's Problem)에 의한 계산 알고리즘 검증을 수행하였다.

[0157] 더 상세하게는, 도 5를 참조하면, 도 5는 본 발명에 적용된 3차원 유한차분법 알고리즘의 검증을 위한 검증시험

에 적용된 속도 구조 모형 및 그 송신원과 수신기 배치를 개략적으로 나타내는 도면이다.

- [0158] 또한, 도 6을 참조하면, 도 6은 도 5에 나타난 속도 구조 모형을 이용하여 수행된 검증시험의 결과를 나타내는 도면으로, 램의 문제(Lamb's problem)(지표면 수직송신원)에 대한 수신기 자료의 해석적 해로서 Gar6More3D(참고문헌 8 참조)에 의해 얻어진 결과와, SEM 자료 및 본 발명의 실시예에 따른 방법에 의해 계산된 결과를 각각 비교하여 나타내고 있다.
- [0159] 즉, 본 발명자들은, 도 5에 나타난 바와 같이, 송신원(Source)과의 거리 500m와 200m 위치에 수신기(Receiver)를 각각 배치하고, 8Hz의 주 주파수의 파형을 인가하여 수직으로 송신원 힘을 가하였을 때 얻어진 결과를 나타내었으며, 이때, 얻어진 결과의 타당성 비교를 위하여, 종래기술의 방법에 따른 SEM(spectral element method) 결과와 GarMore3D 2.0(참고문헌 9 참조)에 의한 해석적인 해를 구한 결과를 동시에 나타내었으며, 비교 결과, 도 6에 나타난 바와 같이, 각각의 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.
- [0160] 아울러, 도 7을 참조하면, 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 방법을 이용하여 장시간 수치 모형 계산시의 안정성을 검증한 결과를 나타내는 도면이다.
- [0161] 즉, 본 발명자들은, 본 발명의 실시예에 따른 방법을 이용하여 장시간 수치 모형 계산시 발생하는 인위적인 경계면에서의 불안정성을 검증하기 위해, 램의 문제(Lamb's problem)(지표면 수직송신원)에 PML 경계조건을 적용하였다.
- [0162] 이때, PML 계수는, PML의 변수는 $d_x(0) = -(N_{POWER} + 1) * V_p(\max) * \log_{10}(R_{coef}) / (2 * L_{PML})$ 로 적용되었으며, 250,000번의 시간 스텝이 사용되었다.
- [0163] 상기한 바와 같은 안정성 검증 결과, 도 7에 나타난 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 방법은 장시간 모사시에도 발산하지 않고 안정적인 것을 확인할 수 있다.
- [0164] 여기서, 본 발명에서는, 3차원 유한 차분법을 이용하여 계산하면 계산시간이 많이 걸리므로 MPI를 통하여 병렬 계산하도록 구성하였으며, 또한, 경계조건으로 PML을 적용하여 효율적으로 인위적인 유한 경계 반사파를 줄일 수 있도록 구성하였다.
- [0165] 즉, 일반적으로, PML을 적용하게 되면 장시간 모사에 있어서 발산하는 경향을 보이거나, 또는, PML 경계에 송신원이 가까이 있게 되면 PML 경계면에서 갑작스런 진폭이 증가했다가 사라지는 현상이 생길 수 있으나, 본 발명에 따르면, 적절한 PML 계수를 선택함으로써 이러한 문제를 해결할 수 있다.
- [0166] 계속해서, 도 8 및 도 9를 참조하여, 송신원과 수신기 사이 모형 분해를 이용한 알고리즘의 검증결과에 대하여 설명한다.
- [0167] 즉, 도 8 및 도 9를 참조하면, 도 8 및 도 9는 도 3에 나타난 3차원 모형에 모멘트 텐서로 단층 주향 45°, 경사 45°, 이동방향 45°가 주어졌을 때 전체 3차원 모형에 대한 합성파와 본 발명의 실시예에 따라 송신원 수신기 사이의 모형으로 분해한 경우의 합성파를 비교하여 나타내는 도면이다.
- [0168] 더 상세하게는, 본 발명자들은, 상기한 바와 같은 본 발명의 실시예에 따른 송신원과 수신기 사이의 모형 분해를 이용한 3차원 유한차분 방법의 검증을 위해, 도 3에 나타난 바와 같은 모형에 대하여 모멘트 텐서로 단층 주향 45°, 경사 45°, 이동방향 45°의 송신원을 적용하였으며, 이때, 송신원 주 주파수는 100Hz 리커(Riker) 파형을 이용하였고, 수신기는 송신원으로부터 45m 위치에 배치하고 45° 위치마다 수신기를 배치하였으며, 각각의 수신기들의 위치는 도 3에 숫자 1 ~ 8로 표시하였다.
- [0169] 또한, 종래의 방법에 따라 3차원 모형 전체에 대한 합성파와 본 발명의 실시예에 따라 송신원 수신기 사이의 모형으로 분해한 결과의 합성파를 각각 도 8에 나타내었으며, 그 결과, 도 8 및 도 9에 나타난 바와 같이, 두 가지 경우의 합성파가 잘 일치함을 확인할 수 있다.
- [0170] 즉, 상기한 바와 같이, 종래, 3차원 모멘트 텐서 역산을 수행하기 위한 계산 영역이 매우 많고 1번의 반복 계산시 6번의 모형계산이 필요하므로, 본 발명에서는, 3차원 속도 구조 모형이 산란이 커지 않는 복잡하지 않은 모형이라면 3차원 모형 계산과 분해 영역으로 모형을 제한한 것에 차이가 없을 것임에 착안하여, 계산시간의 단축을 위해, 도 3b에 나타난 바와 같이, 3차원 속도 모형과 송신원과 수신기 사이의 모형 영역으로 계산 영역을 제한하였다.
- [0171] 아울러, 도 8 및 도 9는, 이와 같이 모형을 제한한 분해 영역에 근거하여 계산한 결과와 원래 3차원 모형에 근거하여 계산한 결과와 비교하여 나타내고 있으며, 이때, 파형 모사 계산을 위해서 사용한 송신원의 주 주파수는

100Hz인 리커(Ricker) 송신파형을 사용하였고, 송신원은 모멘트 텐서를 위하여 주향(strike) 45°, 경사(dip) 45°, 단층이동 방향(rake) 45°를 사용하였으며, 계산을 위하여 모형영역을 x축 방향으로 맵핑하여 계산하였다.

[0172] 여기서, 모멘트 텐서를 회전하여야 하고, 또한, 계산된 각 성분도 원래 자료 방향의 성분을 계산하기 위하여 회전하여야 하나, 도 8 및 도 9에 나타낸 바와 같이, 결과를 살펴보면 두 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

[0173] 따라서 상기한 바와 같은 내용으로부터, 본 발명에 따른 방법은, 3차원 유한차분 모사법을 이용하고, 모멘트 역산을 위한 3차원 파형 모사 계산시간을 줄이기 위해 3차원 모형 영역을 제한하여 계산하도록 구성됨으로써, 산란장이 많지 않은 3차원 속도 구조의 경우에 매우 효율적으로 계산할 수 있으며, 특히, 저주파수 영역을 이용하는 지진파 모멘트 역산에 매우 유용하다.

[0174] 계속해서, 모멘트 텐서 역산 결과를 통한 검증에 대하여 설명한다.

[0175] 3차원 모멘트 텐서 알고리즘에 있어서, 모멘트 텐서와 지진 위치 정보에 대한 변수 벡터는 이하의 [수학식 25]와 같이 나타낼 수 있다.

[0176] [수학식 25]

$$\mathbf{m} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$$

[0177]

[0178] 또한, 모멘트 텐서 변수와 지진원 위치에 대한 변수에 대한 변화량은 이하의 [수학식 26]과 같이 나타낼 수 있다.

[0179] [수학식 26]

$$\Delta \mathbf{m} = \{\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_n\}$$

[0180]

[0181] 이때, 각 관측소에서 얻어진 관측 자료 D는 이하의 [수학식 27]과 같다.

[0182] [수학식 27]

$$\mathbf{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$$

[0183]

[0184] 아울러, 각 관측소에서 얻어진 합성과 자료를 이하의 [수학식 28]과 같이 S라 할 때, 합성과 자료와 관측 자료 차 r은 이하의 [수학식 29]와 같이 나타낼 수 있다.

[0185] [수학식 28]

$$\mathbf{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$$

[0186]

[0187] [수학식 29]

[0188]
$$\mathbf{r} = \mathbf{S} - \mathbf{D} = \{s_1 - d_1, s_2 - d_2, \dots, s_r - d_r\} = \Delta \mathbf{d}$$

[0189] 따라서 모멘트 텐서 역산은, 각 변수에 대한 합성파의 변화량을 이하의 [수학식 30]과 같다고 할 때, 변수 변화량과 자료 변화량 사이의 관계는 이하의 [수학식 31]과 같이 나타낼 수 있다.

[0190] [수학식 30]

[0191]
$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \frac{\partial s_1}{\partial m_1} & \frac{\partial s_1}{\partial m_2} & \dots & \frac{\partial s_1}{\partial m_n} \\ \frac{\partial s_2}{\partial m_1} & \frac{\partial s_2}{\partial m_2} & \dots & \frac{\partial s_2}{\partial m_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial s_r}{\partial m_1} & \frac{\partial s_r}{\partial m_2} & \dots & \frac{\partial s_r}{\partial m_n} \end{pmatrix}$$

[0192] [수학식 31]

[0193]
$$\mathbf{G} \Delta \mathbf{m} = \Delta \mathbf{d}$$

[0194] 여기서, [수학식 31]은 정방행렬이 아니어서 바로 역산을 수행할 수 없으므로, 이하의 [수학식 32]와 같이 변형함으로써 역산을 수행할 수 있다.

[0195] [수학식 32]

[0196]
$$\mathbf{G}^t \mathbf{G} \Delta \mathbf{m} = \mathbf{G}^t \Delta \mathbf{d}$$

$$\Delta \mathbf{m} = [\mathbf{G}^t \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^t \Delta \mathbf{d}$$

[0197] 계속해서, 상기한 바와 같은 본 발명에 따른 역산방법을 실제 사례에 적용하여 기존의 방법과 비교한 결과에 대하여 설명한다.

[0198] 도 10 및 도 11을 참조하면, 도 10은 본 발명의 실시예에 따른 모멘트 텐서 역산방법을 검증하기 위해 적용되는 3차원 속도 구조 모형을 나타내는 도면이고, 도 11은 도 10에 나타난 3차원 속도 구조 모형을 이용하여 SEM에 의해 계산된 합성파 결과와 본 발명의 실시예에 따라 모형 분해 영역으로 계산된 합성파 결과를 비교하여 나타내는 도면이다.

[0199] 도 10 및 도 11에 나타난 바와 같이, 본 발명자들은, 상기한 바와 같은 본 발명의 실시예에 따른 분해 영역 유한차분 3차원 모사를 이용한 모멘트 역산에 의해 얻어진 결과를 기존의 SEM 3차원 모사를 이용한 역산에 의해

얻어진 결과와 비교하여 검증을 수행하였다.

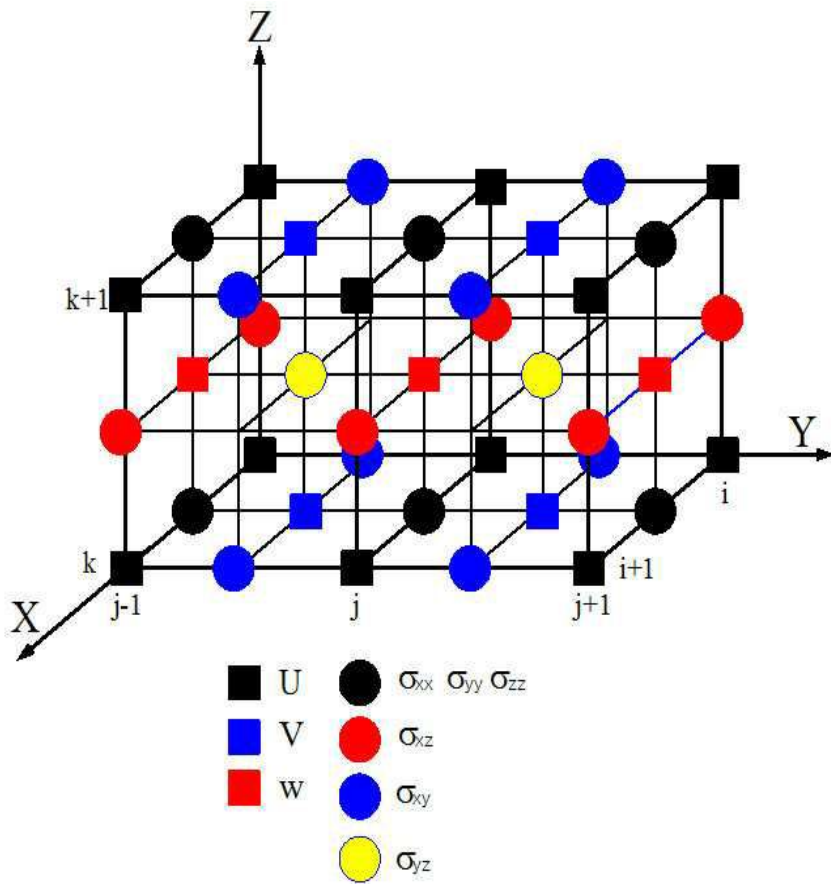
- [0200] 즉, 본 발명자들은, 2007년 1월 20일 발생한 오대산 지진에 대하여 기존의 SEM 3차원 모사를 이용한 역산 결과와 본 발명에서 적용된 분해 영역 유한차분 3차원 모사를 이용한 역산을 비교하여 검증을 수행하였다.
- [0201] 더 상세하게는, 2007년 1월 20일 오대산 지진에 대한 모멘트 역산 비교를 위하여, 모멘트 텐서 계산을 위해 도 10에 나타낸 바와 같은 한반도 3차원 속도 구조 모형을 이용하여(참고문헌 9 참조), CHC 관측소에 대하여 SEM에 의해 계산된 합성과 결과와 본 발명의 실시예에 따라 모형 분해 영역으로 계산된 합성과 결과를 각각 비교하여 도 11에 나타내었다.
- [0202] 이때, 모형분해를 위해서 y 방향으로 30개의 격자를 사용하였고, 한 개의 격자 간격은 500m로 하였다.
- [0203] 그 결과, 도 11에 나타낸 바와 같이, 도 10에 나타낸 3차원 속도 구조에 대하여 CHC 관측소 위치에서 0.04 ~ 0.1Hz 사이의 그린함수 합성과를 비교한 결과를 살펴보면, 두 가지 방법에 의한 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다.
- [0204] 또한, 도 12 및 도 13을 참조하면, 도 12는 기존의 3차원 SEM을 이용한 모멘트 역산 결과를 나타내는 도면이고, 도 13은 본 발명의 실시예에 따라 분해 영역 3차원 FDM을 이용한 모멘트 역산 결과를 나타내는 도면이다.
- [0205] 도 12 및 도 13에 나타낸 결과로부터, 두 가지 방법에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있으며, 도 13에 나타낸 바와 같이 본 발명의 실시예에 따라 분해 영역을 이용한 경우가 도 12에 나타낸 기존의 SEM 방법보다 좀 더 나은 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다.
- [0206] 따라서 상기한 바와 같이 하여 본 발명의 실시예에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법을 구현할 수 있다.
- [0207] 즉, 도 14를 참조하면, 도 14는 본 발명의 실시예에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 플로차트이다.
- [0208] 더 상세하게는, 도 14에 나타낸 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법은, 먼저, 분석하고자 하는 지역에 대한 3차원 속도 구조(3D velocity structure)모형을 구축하는 모델링 단계(S141)와, 상기 단계에서 구축된 3차원 속도 구조 모델을 송신원(source)과 수신기(receiver) 사이의 영역에 대한 모델로 분해하는 모델링 영역 분해단계(S142)와, 상기 단계에서 분해된 송신원과 수신기 사이의 모델에 대한 모멘트 텐서의 좌표를 x축 상의 좌표로 변환하는 맵핑단계(S143)와, 상기 단계에서 맵핑된 모멘트 텐서를 이용하여 상기 송신원과 수신기 사이의 모델에 대한 모사를 행하는 모사단계(S144)와, 상기 단계에서 계산된 결과를 다시 원래 좌표로 되돌리는 역맵핑단계(S145) 및 상기 단계에서 역맵핑된 상기 송신원과 수신기 사이의 모델에 대하여 모멘트 텐서 역산을 수행하는 모멘트 텐서 역산단계(S146)를 포함하여 구성될 수 있다.
- [0209] 여기서, 상기한 모델링 단계(S141) 및 모델링 영역 분해단계(S142)는, 도 1 내지 도 3을 참조하여 상기한 바와 같이 하여 수행될 수 있고, 또한, 상기한 맵핑단계(S143), 모사단계(S144) 및 역맵핑단계(S145)는, 도 3 및 도 4와 [수학식 20] 내지 [수학식 24]를 참조하여 상기한 바와 같이 하여 수행될 수 있다.
- [0210] 아울러, 상기한 모멘트 텐서 역산단계(S146)는, [수학식 1] 내지 [수학식 19]와 [수학식 25] 내지 [수학식 32]를 참조하여 상기한 바와 같이, 3차원 점탄성 유한차분법에 PML(Perfectly Mached Layer) 경계조건을 적용하여 3차원 모멘트 텐서 역산을 수행하도록 구성될 수 있다.
- [0211] 더욱이, 상기한 바와 같은 본 발명의 실시예에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법은, 상기한 유한차분법 이외에, SEM(Spectral Element Method)이나 유한요소법(Finite Element Method ; FEM)에도 적용 가능한 것임에 유념해야 한다.
- [0212] 또한, 본 발명은, 상기한 바와 같이 구성되는 본 발명의 실시예에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법을 이용하여, 도 14에 나타낸 바와 같은 처리단계들을 포함하는 일련의 처리를 수행하도록 구성되는 전용의 하드웨어로서 구성되거나, 또는, 컴퓨터나 전용의 하드웨어에 상기한 각 단계들을 실행시키도록 구성되는 프로그램의 형태로 구현될 수도 있으며, 그것에 의해, 기존의 모멘트 텐서 역산방법에 비해 계산시간이 단축될 수 있는 모멘트 텐서 역산장치 및 역산시스템을 용이하고 저렴하게 구현할 수 있다.
- [0213] 이상, 상기한 바와 같이, 본 발명에 따르면, 종래, 3차원 모멘트 역산시에는 3차원 점탄성과 모사가 필요하나, 예를 들면, 한반도 지진의 경우, 합성과 모사시 전체 모형을 각 시간 스텝마다 모두 계산을 해야 하므로 많은 계산시간이 요구되었던 문제점을 해결하기 위해, 전체 모형을 송신원과 수신원 사이의 모형으로 분해하여 최소

한의 계산 영역을 가지도록 함으로써 계산시간을 획기적으로 감소할 수 있다.

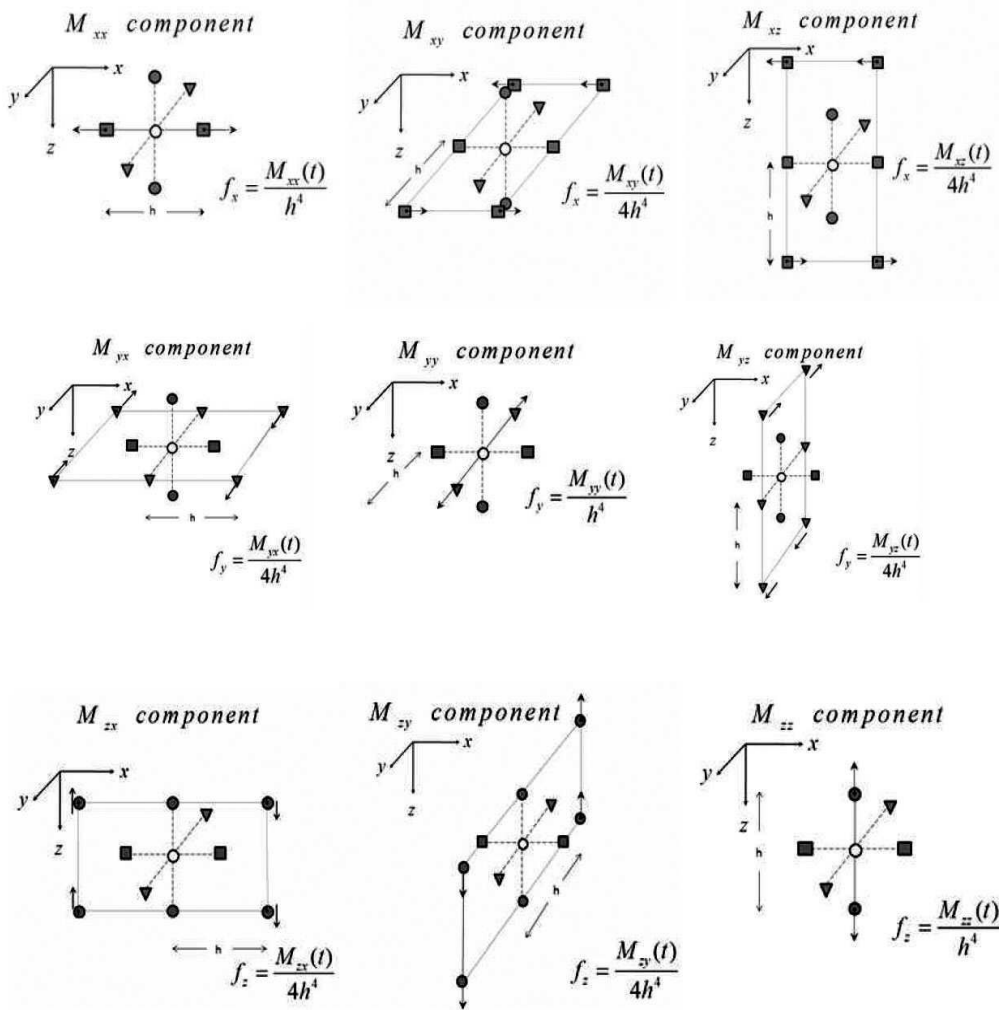
- [0214] 아울러, 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이 모델 영역을 줄임으로써 발생할 수 있는 유한 경계에서 발생하는 인공 반사파를 줄이기 위해, ADE-PML을 적용하여 계산시간을 매우 효율적으로 줄일 수 있으며, 더욱이, 속도 구조 모형을 송신원과 수신기 사이의 모형으로 분해하면 모멘트 텐서와 성분이 달라지게 되는 문제를 해결하기 위해, 송신원과 수신기 사이에 이루어지는 각만큼 모멘트 텐서의 축을 회전시키고, 마지막으로 계산된 성분 자체도 회전되어 있으므로 계산된 성분을 송신원과 수신기 사이의 각만큼 회전시키며, 다중 MPI를 사용하여, 분해된 모형 영역을 다중 CPU 또는 클러스터 머신에서 연산이 가능하도록 분해하여 계산할 수 있다.
- [0215] 즉, 본 발명에 따르면, 종래와 같이 3차원 모멘트 역산시 전체 영역을 계산하지 않고 전체 모델 영역을 송신원과 수신기 사이의 작은 영역으로 분해하고, 유한 경계면 반사파에 ADE(Auxiliary Differential Equations)-PML을 적용하여 인공반사파를 제거하며, 송신원과 수신기의 모델 영역으로 변환함으로써 발생하는 회전을 모멘트 텐서와 수신기 성분에도 적용하여 계산시간을 현저히 줄일 수 있으며, 이때, 모멘트 역산시 계산되는 주파수 대역이 저주파수이므로, 실제 3차원 모사 결과와 이러한 방법에 의한 차이가 거의 없게 된다.
- [0216] 따라서 상기한 바와 같이 하여 본 발명에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법을 구현할 수 있다.
- [0217] 또한, 상기한 바와 같이 하여 본 발명에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법을 구현하는 것에 의해, 본 발명에 따르면, 지진발생시 단층방향의 파악과 중규모 이상의 지진에 대한 파형 모사 및 수압파쇄시 발생하는 진원 모사를 위해 사용되는 모멘트 텐서 역산(moment tensor inversion) 기법에 있어서, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형의 전체 영역을 송신원과 수신기 사이의 모형으로 분해하여 계산하도록 구성됨으로써, 계산시간을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법이 제공됨으로써, 모멘트 텐서 파형 역산시 많은 시간이 걸리는 단점이 있었던 종래 기술의 모멘트 텐서 역산기법들의 문제점을 해결할 수 있다.
- [0218] 아울러, 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이, 3차원 모형 전체에 대한 역산을 수행할 필요 없이, 3차원 모형의 전체 영역을 송신원과 수신기 사이의 모형으로 분해하여 계산하는 동시에, 시간영역 3차원 점탄성 유한차분법에 PML(perfectly matched layer)을 적용하는 것에 의해 계산시간 및 비용을 현저하게 감소할 수 있도록 구성되는 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법이 제공됨으로써, 모멘트 텐서 역산시 계산시간을 줄이기 위해 1차원적인 모형을 가정하여 해석적인 해를 구해야 하는 제약이 있으며, 이를 극복하기 위해 3차원 모형에 대한 모멘트 역산 기법을 적용하면 계산시간이 오래 걸리고 경제적 비용이 증가하게 되는 문제가 있었던 종래 기술의 모멘트 텐서 역산 기법들의 문제점을 해결할 수 있다.
- [0219] 이상, 상기한 바와 같은 본 발명의 실시예를 통하여 본 발명에 따른 모델링 영역 분해를 이용한 3차원 모멘트 텐서 역산방법의 상세한 내용에 대하여 설명하였으나, 본 발명은 상기한 실시예에 기재된 내용으로만 한정되는 것은 아니며, 따라서 본 발명은, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 설계상의 필요 및 기타 다양한 요인에 따라 여러 가지 수정, 변경, 결합 및 대체 등이 가능한 것임은 당연한 일이라 하겠다.

도면

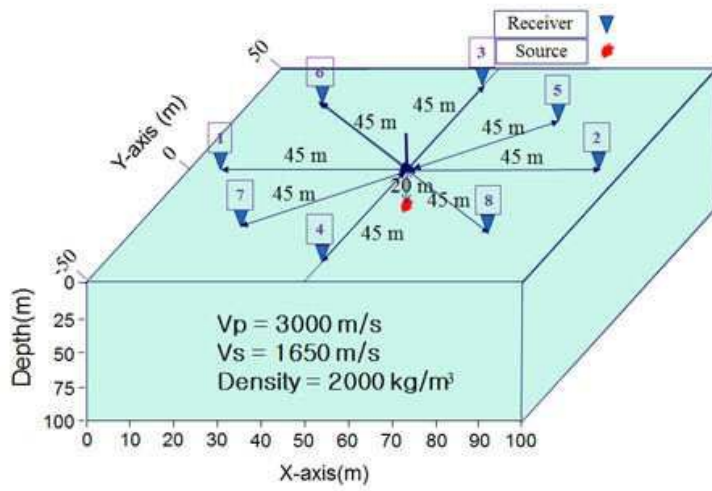
도면1



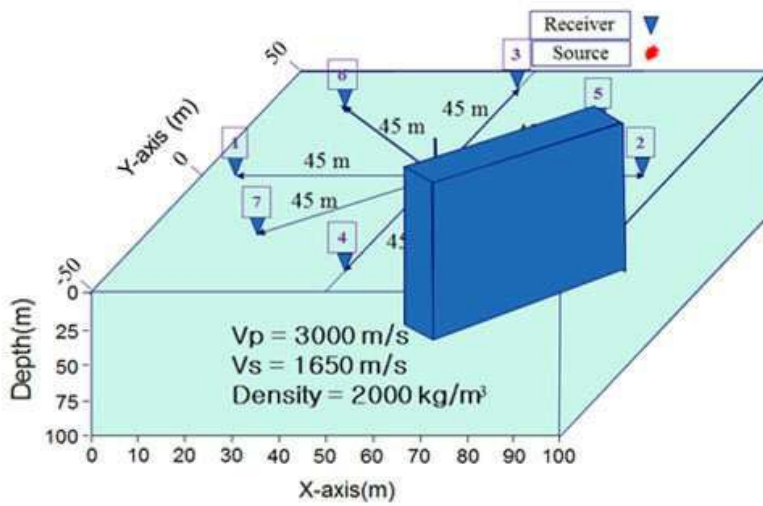
도면2



도면3

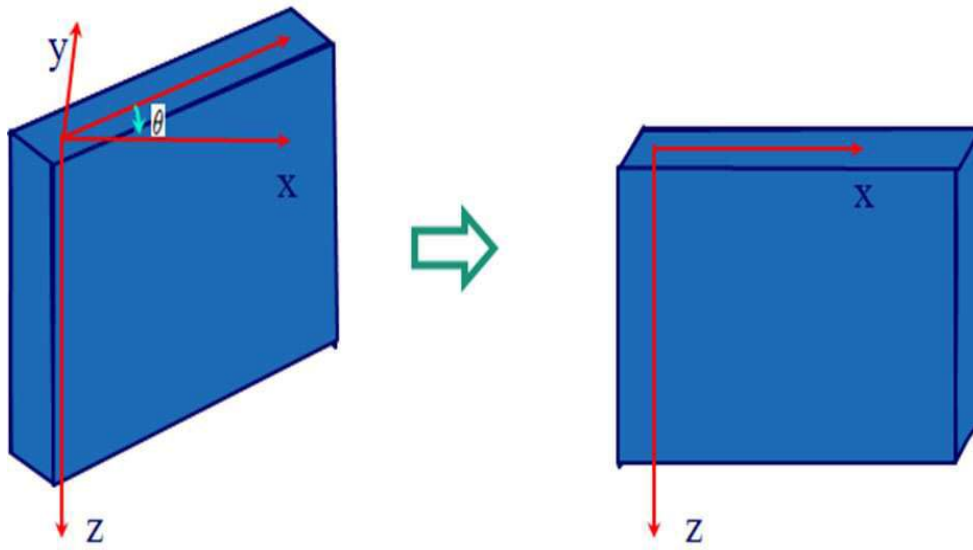


(a)

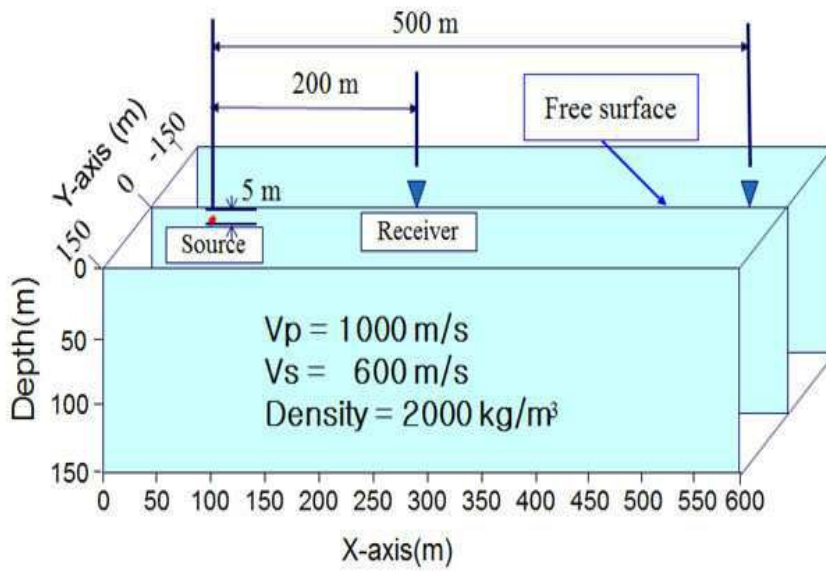


(b)

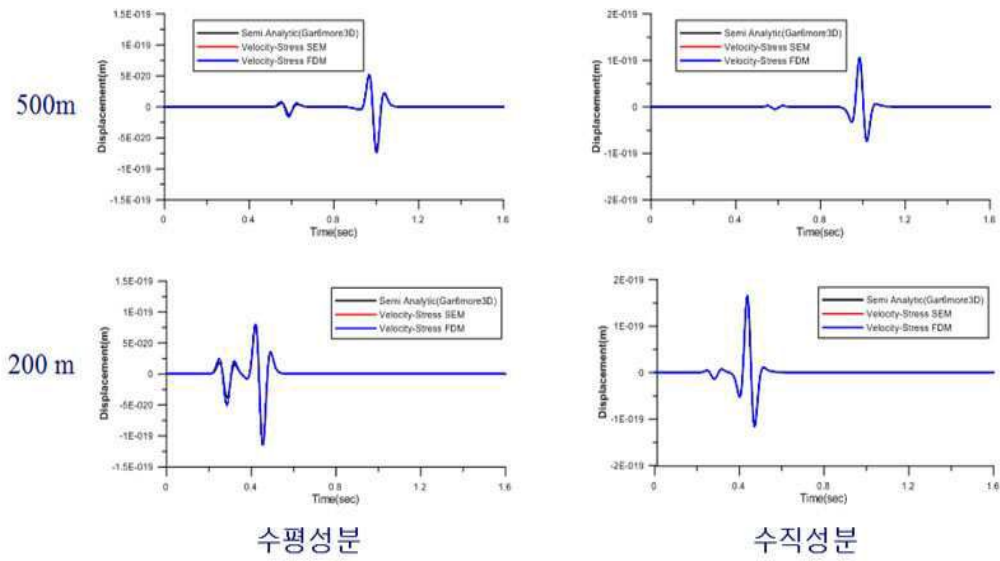
도면4



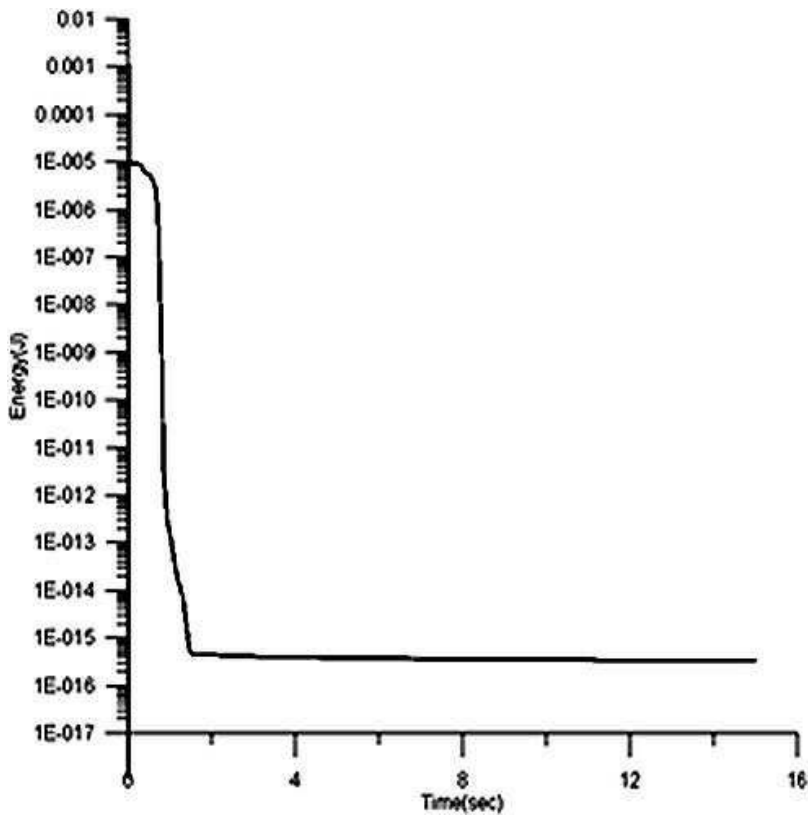
도면5



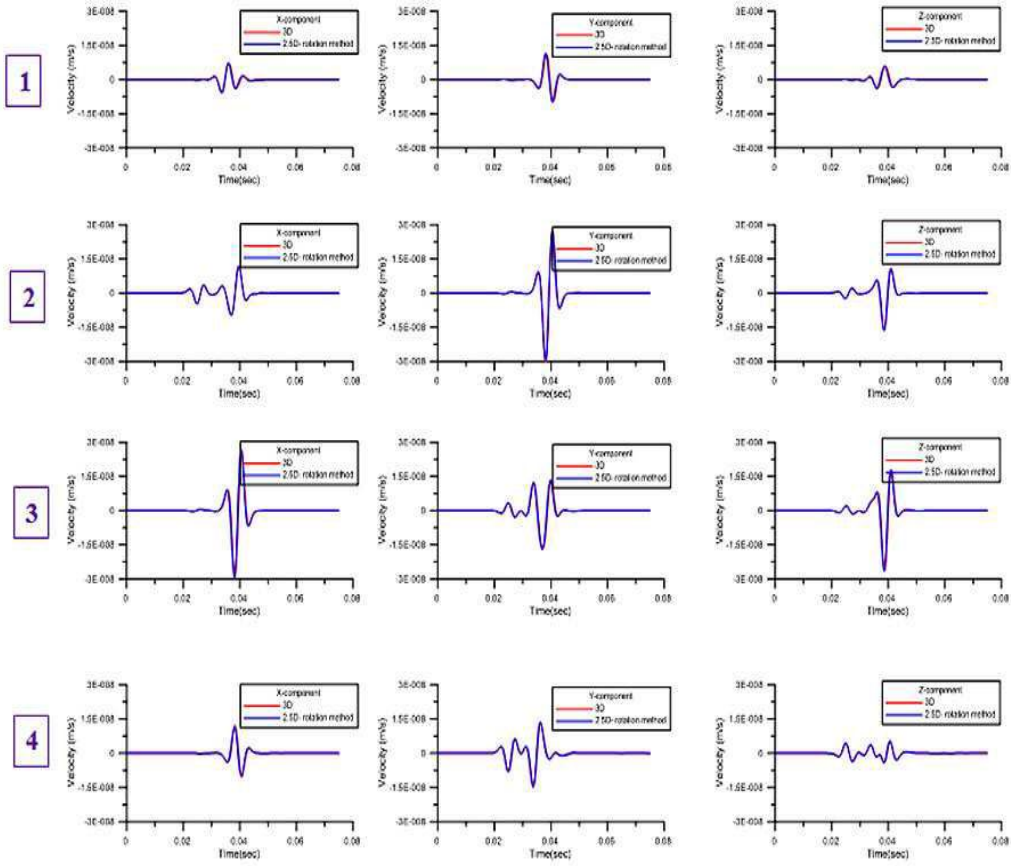
도면6



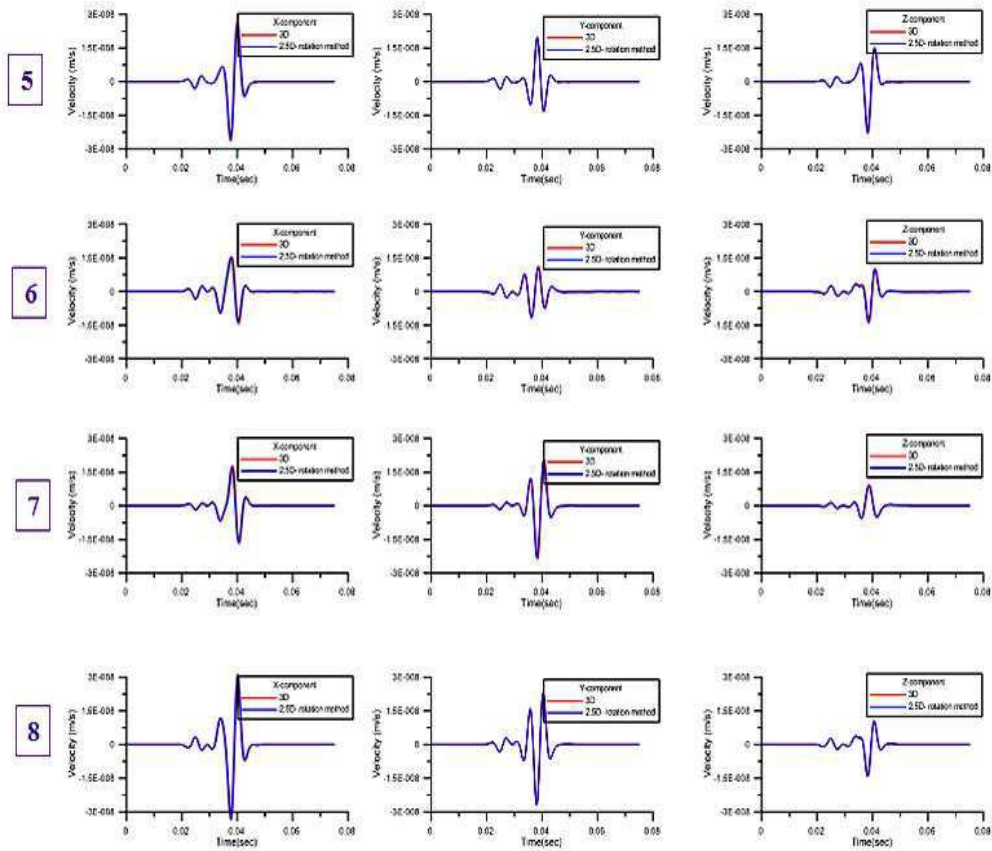
도면7



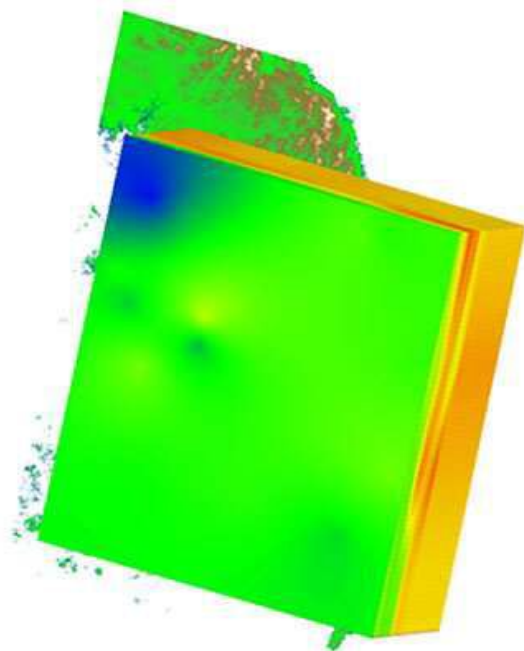
도면8



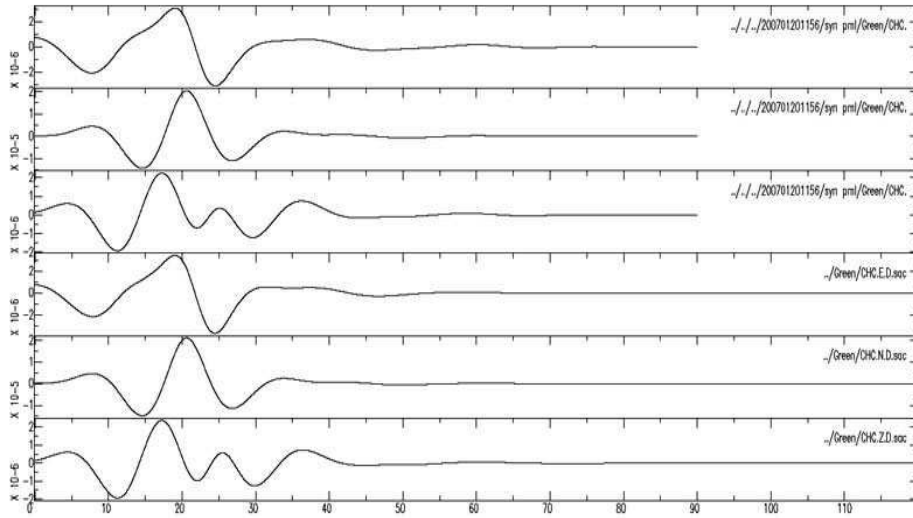
도면9



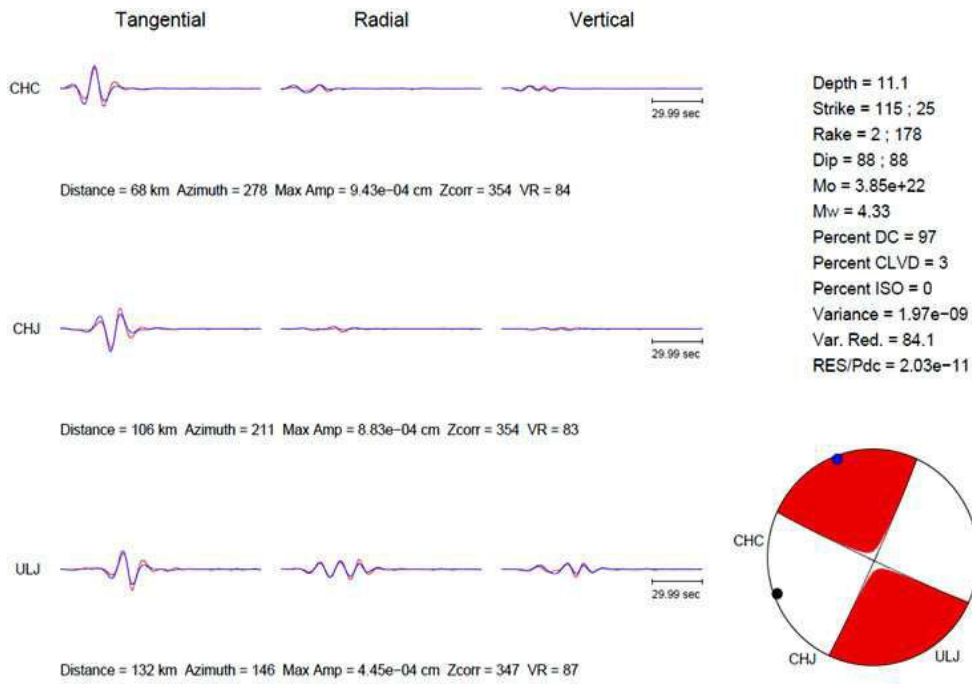
도면10



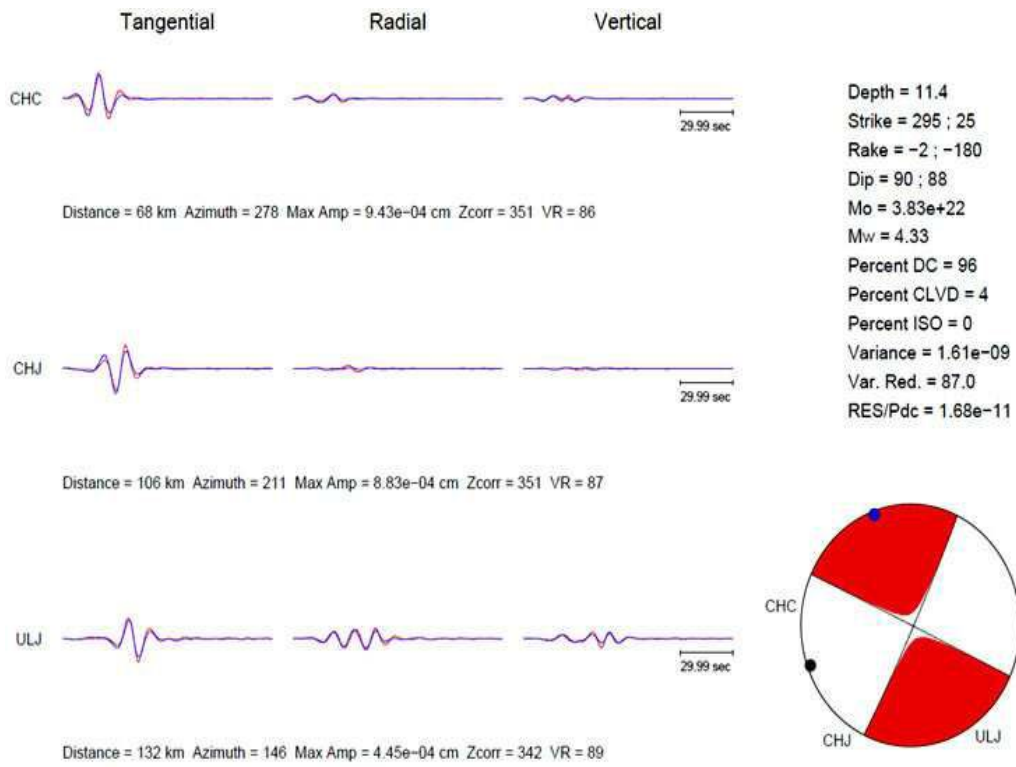
도면11



도면12



도면13



도면14

