

# CPML 경계조건을 적용한 Tilted Transversely Isotropic (TTI) 매질에서의 탄성과 모델링

한병호<sup>1)</sup>, 설순지<sup>1)</sup>, 변중무<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 자원환경공학과, qmams@hanyang.ac.kr

## Elastic modeling in Tilted Transversely Isotropic media with CPML boundary condition

Byeongho Han<sup>1)</sup>, Soon Jee Seol<sup>1)</sup> and Joongmoo Byun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Natural Resources and Geoenvironmental Engineering, Hanyang Univ.

### 1. 서론

지하매질 내에서 파의 전파방향에 따라 속도가 변화하는 이방성은 실제로는 대부분의 지하매질에 나타난다고 알려져 있다(Thomsen, 1986). 따라서 최근에 연구되는 정밀한 탄성과 자료처리 및 해석을 위해서는 이방성을 정확히 구현해 낼 수 있는 수치모형 알고리즘이 요구된다. 지금까지는 퇴적층 내의 세일의 이방성을 잘 표현하는 VTI (Vertical Transversely Isotropic) 매질이나 수직적으로 발달된 균열대를 나타내는 HTI (Horizontal Transversely Isotropic) 매질을 가정한 수치모형 알고리즘에 대한 연구가 주로 수행되어 왔다(Faria and Stoffa, 1994; Alkhalifah, 2000). 그러나 실제 지하구조와 같이 이방성 매질이 복잡한 경사를 가지는 overthrust 구조를 모사할 수 있는 모형반응 계산에 대한 연구는 많지 않으며 특히 국내에서는 아직 발표된 바가 없다.

이 연구에서는 이방성을 띄는 매질의 대칭축이 경사를 갖는 TTI (Tilted Transversely Isotropic) 매질을 정확히 모사할 수 있는 2차원 탄성과 수치모형 알고리즘을 개발하였다. 또한 개발된 알고리즘은 지표면에서의 정확한 경계조건을 구현하였고 인위적 경계면에서의 반사파는 가장 효과적이라고 알려진 CPML (Convolutional Perfectly Matched Layer) 경계조건을 적용하여 제거하였다. 지표 경계조건의 증명을 위해 해석적 해와 비교하였으며 이방성의 대칭축이 경사를 갖는 3층 경사모델을 설정하여 탄성과 수치모형반응을 계산하였다.

### 2. TTI 매질의 구현 및 검증

이방성의 대칭축이 회전된 TTI 매질의 구현은 사암 저류층 상부의 경사진 세일층과 같은 덮개암에 대한 정확한 모사를 가능하게 한다. 사암과 세일의 정확한 경계면을 찾는 것은 시추 지점 및 매장량 평가에 있어서 중요한 요소로 작용하므로(Juhlin, 1995) TTI 매질의 구현은 중요한 의미를 갖는다. 이러한 TTI 매질의 탄성계수는 VTI 매질의 탄성계수를 회전텐서를 이용하여 변환시킴으로 구해낸다. Fig. 1은 이방성 매질에 대한 대칭축의 회전 정도에 따른 파의 양상을 나타낸 것으로 이 연구에서 개발된 알고리즘이 대칭축의 회전을 잘 구현해 내고 있음을 확인할 수 있다.

### 3. 자유면 경계조건 및 CPML 경계조건

이 연구에서 사용된 엇갈린 격자법에서의 자유면 경계조건의 적용을 위해서는 자유면에 수직 및 전단으로 작용하는 응력을 0으로 만들어 주어야 한다. 여기서 수직응력은 경계점에 정의되지만 경계점 위치가 아닌 곳에 정의되는 전단응력은 경계점을 기준으로 부호를 반대로 적용함으로써 경계점에서의 응력을 0으로 만들어 줄 수 있다(Juhlin, 1995). Fig. 2는 반무한 매질에서 송수신기가 지표면에 위치한 경우의 Lamb의 문제에 대한 해석적인 해와 이 연구에서 개발된 모형반응계산 알고리즘에 의한 수치적인 해를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 개발된 알고리즘이 자유면 경계조건을 정확히 모사하고 있음을 확인할 수 있다. 인위적 경계면의 반사파를 제거하기 위한 기존의 PML은 다른 경계조건에 비해서 탁월한 성능을 보인다. 하지만 PML 경계조건의 경우 유한차분법에 있어서 축에 수직 방향과 수평 방향으로 파동방정식을 분리하여야 하고 입사각이 큰 경우의 감쇠가 비효율적이라고 알려져 있다(Komatitsch and Martin, 2007). 이에 반해 PML 경계조건을 개선시킨 CPML 경계조건의 경우 파동방정식을 분리할 필요없이 적용이 가능하고 시간과 공간에 대한 감쇠항의 추가로 입사각이 큰 경우에 대해서도 효율적인 감쇠를 기대할 수 있다. 이 연구에서는 이러한 CPML 경계조건을 적용시켜 TTI 매질을 포함하는 모형에 대해서도 인위적 경계면에서의 반사파를 효과적으로 감쇠시켰다.

### 4. 탄성과 수치모형반응 계산

TTI 매질에서의 탄성과 수치모형반응 계산을 위해 Fig. 3과 같은 30° 각도의 경사층을 포함하는 3층 모델을 설정하였다. 배경매질은 등방성을 띄는 매질이고 경사층은 수평면을 기준으로 30° 방향의 속도가 가장 빠른 TTI 물성을 띄는 매질을 가정하였다. 탄성계수와 밀도는 Table 1에 제시하였으며 송신원은 주주파수가 10 Hz인 2차 미분 가우스 함수를 사용해 수직방향의 변위를 주었다. Fig. 4는 수신기에서 획득된 변위의 수평 및 수직 성분을 나타내는 합성탄성과 단면이다. TTI 경사층에 대한 반사파 및 표면에서 발생하는 강한 진폭의 레일리파가 잘 묘사되었으며 인위적 경계에서 발생하는 반사파는 CPML 경계조건에 의해 효과적으로 제거되었음을 보여준다.

### 5. 결론

이 연구에서는 이방성의 대칭축이 회전된 TTI 매질을 포함하는 지하구조에 대하여 CPML 경계조건을 적용한 탄성과 수치모형 알고리즘을 개발하고 검증하였다. 먼저 엇갈린 격자법에서 자유면 경계조건 적용시 해석적인 해와 수치적인 해의 유사성을 보여 지표면에서의 lamb의 문제에 대한 정확한 해를 구현하였다. 또한 인위적 경계면에서 나타나는 인공적인 반사파도 충분한 흡수감쇠를 보임을 확인하였다. 따라서 이 연구에서 개발된 모형반응계산 알고리즘을 이용하면 향후 복잡한 경사를 갖는 이방성 매질에 대해서도 안정적인 탄성과 수치모형반응 계산 및 정확한 해석이 가능하다.

### 6. 사사

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2009T100200049) 이 연구에 있어서 해석적인 해에 대한 모듈을 제공해주신 한국지질자원연구원의 조창수 박사님께 감사드립니다.

## 7. 참고문헌

Alkhalifah, T., 2000, An acoustic wave equation for anisotropic media, *Geophysics*, **65**, no. 4, 1239–1250

Faria, E. L. and Stoffa, P. L., 1994, Finite-difference modeling in transversely isotropic media, *Geophysics*, **59**, no. 2, 282–289

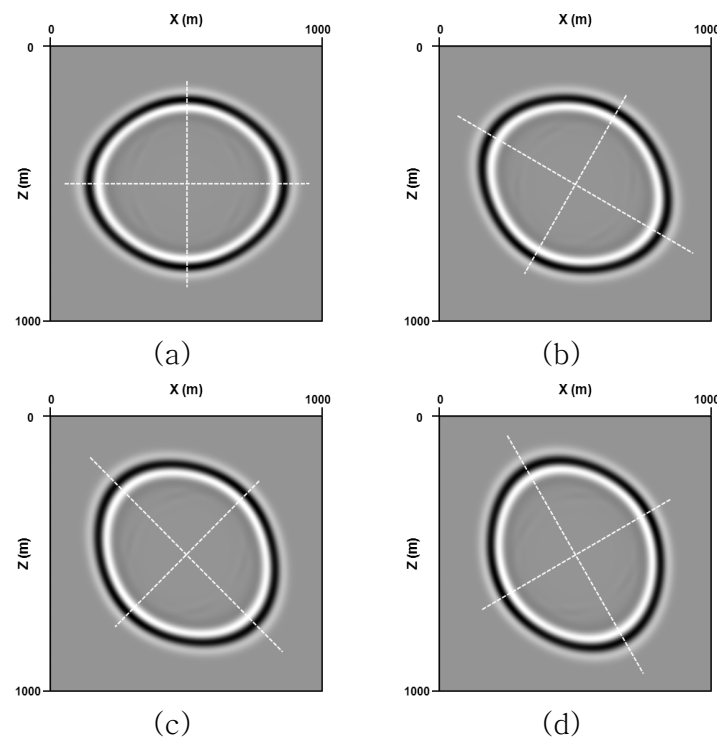
Juhlin, C., 1995, Finite-difference elastic wave propagation in 2D heterogeneous transversely isotropic media, *Geophysical Prospecting*, **43**, 843–858.

Komatitsch, D. and Martin R., 2007, An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation, *Geophysics*, **72**, no. 5, SM155–SM167.

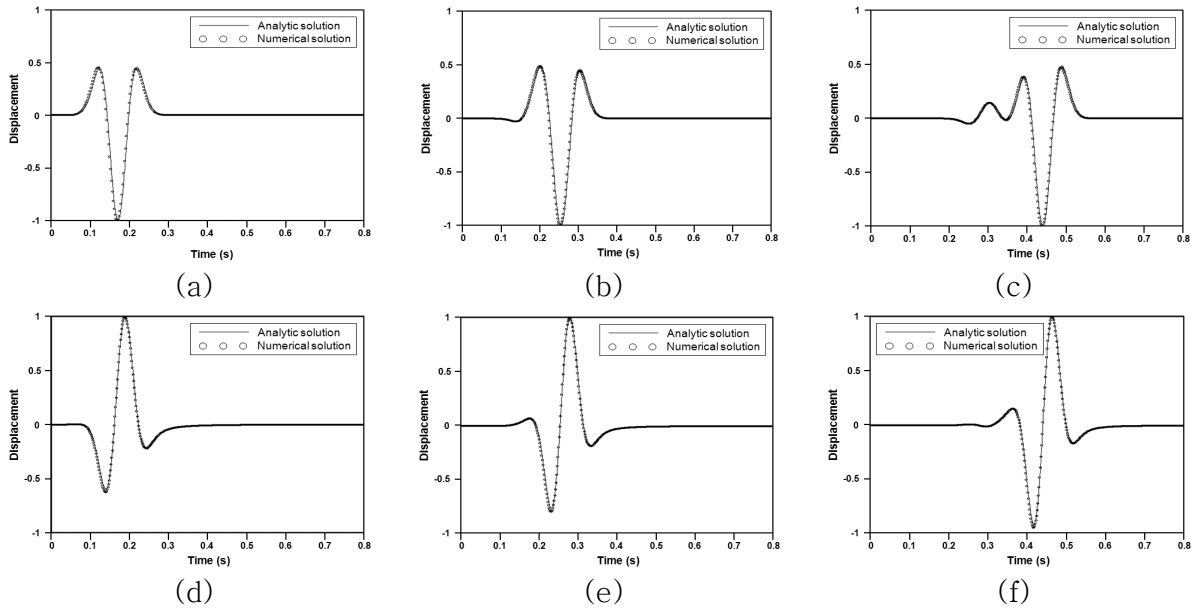
Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy, *Geophysics*, **51**, 1954–1966.

**Table 1.** Elastic constants and densities used in the dipping layered model.

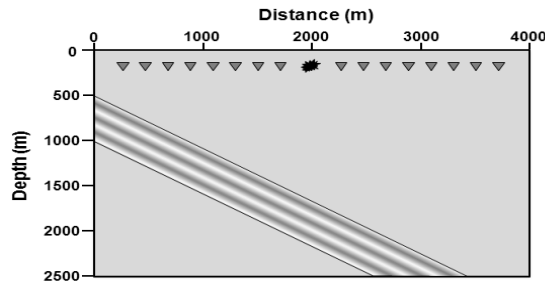
	C11 (GPa)	C12 (GPa)	C22 (GPa)	C33 (GPa)	C13 (GPa)	C23 (GPa)	Rho (kg/m <sup>3</sup> )
Isotropic media	8.0	2.24	8.0	2.88	0.0	0.0	2000
TTI media	25.63	7.95	21.17	8.59	2.68	1.18	2250



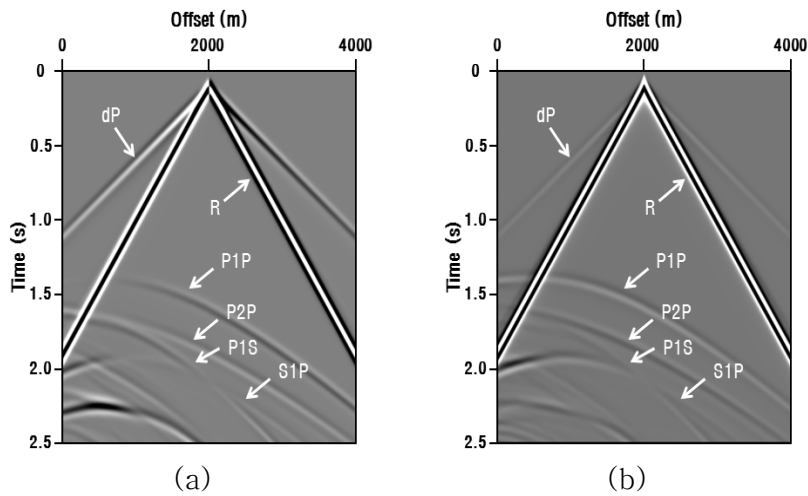
**Fig. 1.** Snapshots for (a) VTI media, (b) TTI media with a symmetry-axis tilt of 30°, (c) 45° and (d) 60° by pressure source at the center of the model.



**Fig. 2.** Comparison of horizontal (a, b, c) and vertical (d, e, f) displacements between analytic and numerical solutions on the free surface at 50 m (a, d), 150 m (b, e) and 350 m (c, f) locations from the source, respectively.



**Fig. 3.** A dipping layered model with TTI media.



**Fig. 4.** Numerical seismograms of horizontal (a) and vertical (b) displacements obtained from the dipping layered model with TTI media shown in Fig. 3.