

이방성 매질에서의 탄성과 거동에 관한 연구

구준모^{1)*}, 이호용²⁾, 민동주³⁾, 권병두¹⁾,
김성렬⁴⁾, 유해수⁵⁾, 허식⁵⁾

Study on behavior of elastic wave considering anisotropic media

June Mo Koo^{1)*}, Ho-Yong Lee²⁾, Dong-Joo Min³⁾, Byung-Doo Kwon¹⁾,
Seong-Ryeol Kim⁴⁾, Hai Soo You⁵⁾, Sik Huh⁵⁾

1. 서론

탄성과 자료처리, 수치모델링, 역산 및 구조보정은 지하매질의 속도분포 및 구조를 정확하게 파악하기 위하여 실시한다. 따라서 뚜렷한 지하영상을 얻기 위해서는 실제 지하매질의 탄성과 거동 특성에 대해 바르게 이해할 필요가 있다. 탄성과 자료처리를 수행할 경우 일반적으로는 지하매질이 등방성이라고 가정해왔으나, 선행연구자들의 연구결과 지하 암석들이 이방성을 가지는 경우가 있음이 밝혀졌다 (Thomsen, 1986; Tsvankin, 1997). 퇴적분지에서 나타나는 대표적인 이방성 매질인 셰일은 주로 TI (Transversely Isotropy) 의 전형적인 특성을 가지고 있으며 (Tsvankin, 1997), 석유 및 가스의 집적을 위한 덮개암 (cap rock)으로 작용하는 경우가 많으므로, 석유 및 가스 지하자원탐사에서 이방성은 중요한 연구과제로 부각되고 있다.

이 연구에서는 셀 기반 유한차분법 (Min et al., 2004)을 적용하여 구성한 주파

1) 서울대학교 지구과학교육과, whitewolf121@empal.com

Dept. of Earth Science Education, Seoul National University

2) 서울대학교 에너지자원인력양성사업단

Research Division of Seoul National University for Energy Resources

3) 서울대학교 에너지자원공학과

Dept. of Energy Resources Engineering, Seoul National University, KORDI

4) 한국해양연구원 해양위성/관측기술연구부

Ocean Satellite Remote Sensing & Observation Technology Research Department, KORDI

5) 한국해양연구원 심해/해저자원연구부

Deep-sea & Marine Georesources Research Department, KORDI

수영역 2차원 TI 모델링 알고리즘을 이용하여, 간단한 2 층 구조에 대하여 모델링을 수행함으로써 탄성과 거동에 미치는 TI의 영향을 살펴보았다. 또한 TI 모델링을 통해 획득한 탄성과 자료를 가지고 지하매질을 등방성이라고 가정한 역산을 수행함으로써 암석의 TI가 역산에 미치는 영향도 살펴보았다.

2. TI 매질의 탄성 특징 및 탄성과동방정식

주파수영역 2차원 TI 매질에서의 탄성과동방정식은 다음과 같다.

$$-\omega^2 \rho U_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{11} \frac{\partial U_x}{\partial x} + C_{13} \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(C_{44} \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) \right) \quad (1)$$

$$-\omega^2 \rho U_z = \frac{\partial}{\partial z} \left(C_{13} \frac{\partial U_x}{\partial x} + C_{33} \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{44} \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) \right) \quad (2)$$

Thomsen (1986)에 의하면 2차원 TI 매질에서 수직방향의 P 및 S 파의 속도는 각각 다음과 같다.

$$V_{p_{ver}} = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}} \quad (3)$$

$$V_{s_{ver}} = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (4)$$

또한 다음과 같이 두 가지의 이방성 계수 (Anisotropic parameter)가 정의된다.

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{(C_{13} - C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})} \quad (6)$$

$\varepsilon = 0, \delta = 0$ 인 경우에는 각각 $C_{11} = C_{33}, C_{13} + 2C_{44} = C_{33}$ 의 관계가 성립하여 등방성의 경우와 동일하다. 그러나 $\varepsilon \neq 0, \delta \neq 0$ 인 경우에는 각각 $C_{11} \neq C_{33}, C_{13} + 2C_{44} \neq C_{33}$ 의 관계가 성립하여 등방성 매질의 경우와 상이하게 된다. 한편 ε 에 관하여 수평 방향과 수직 방향의 P 파의 속도 사이에 다음의 관계가 성립한다.

$$V_{p_{hor}} = V_{p_{ver}}(1 + \varepsilon) \quad (7)$$

3. 연구방법

TI를 포함한 매질에서와 등방성 매질에서의 탄성과 거동이 어떻게 다른지 알아

보기 위해 셀기반 유한차분법 (Min. et al., 2004)을 적용하여 구성된 주파수영역 2차원 TI 모델링 알고리즘을 이용하여 모델링을 수행하였다.

모델링을 위해 사용한 지질구조는 Fig. 1과 같다. 모델의 크기는 가로 3 km, 세로 1.5 km이고, 격자간격은 0.005 km이다. 탄성상수 외의 다른 변수의 영향을 없애기 위하여 밀도는 전체 모델에서 2.25 g/cm^3 로 일정하게 설정하였다. 상층부의 P 및 S 파의 속도는 각각 3.0 km/s, 1.73 km/s, 하층부의 경우 각각 4.25 km/s, 2.54 km/s로 설정하였다. 각 층의 속도는 모두 수직 속도를 기준으로 하였으며 하층부 TI 매질의 특성은 앞서 언급한 ε 와 δ 를 이용하여 조절하였다. 송신원은 최대주파수 20Hz의 1차 미분 가우스 함수를 수직변위로 하여, 모델의 왼쪽으로부터 0.25 km 떨어진 지표면에 위치시켰다. 모델링의 총 시간은 반사파의 도달시간을 고려하여 1.5 초까지로 하였다. 등방성 매질 및 그 아래에 놓여 있는 TI 매질은 좌우방향 및 아래방향으로 무한히 연장된다고 가정하고 모델의 경계에 흡수경계조건을 적용하였다.

δ 를 0.0 으로 고정하고 ε 을 0.0 에서 0.4 까지 증가시켜가며 실시한 모델링 결과 나타난 수직 변위를 송신원의 오른쪽으로 2 km 떨어진 곳에서 기록하여 Fig. 2에 나타내었다. ε 이 증가할수록 파의 도달시간이 점점 빨라지고 있으며 파의 진폭 또한 증가하고 있음을 알 수 있다

또한 역산 결과를 비교하기 위하여 앞서 모델링에서 사용한 것과 크기만 가로 2 km, 세로 1 km로 다르고 나머지 물성은 같은 모델을 사용하였다. 이 모델을 이용하여 등방성의 경우와 가장 차이가 크다고 생각되는 (ε , δ) 의 조합으로 (0.0, 0.4)의 경우에 해당하는 탄성과 자료를 획득하였으며 이를 가지고 지하매질을 등방성으로 가정한 역산을 시도하였다.

등방성을 가정한 역산 알고리즘은 일반적인 등방성 탄성과동방정식의 λ 와 μ 를 찾아가도록 작성되었으며, 이는 각각 식(1)과(2)의 C13과 C44에 대응된다. 그 결과 등방성을 가정한 역산은 실제 지하구조를 잘 찾아가지 못하는 것으로 확인되었다.

4. 결론.

TI를 고려한 주파수영역 탄성과동방정식을 셀 기반 유한차분법을 이용하여 다양한 이방성을 띄는 2층 구조에 대하여 모델링을 수행한 결과 등방성의 경우와 이방성의 경우 탄성과의 거동이 진폭, 파의 도달시간 및 파형의 관점에서 서로 상이함을 알 수 있었다.

또한 이방성 매질을 포함한 모델에서 얻은 탄성과 자료를 지하매질을 등방성이라고 가정하고 역산을 수행한 결과 지하매질의 탄성상수를 정확히 표현하지 못하는 사실을 확인하였다.

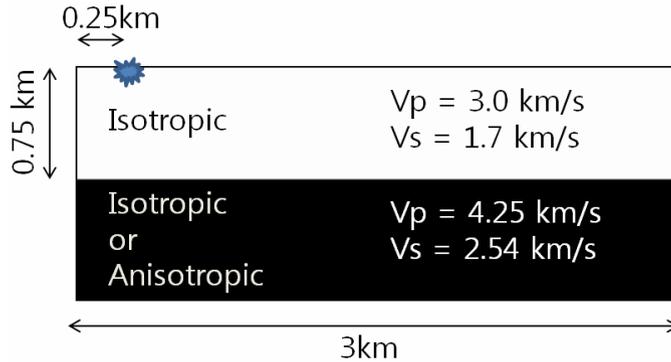


Fig. 1. Horizontally layered model : the upper layer is isotropic, the bottom layer is isotropic or anisotropic depending on ϵ and δ values.

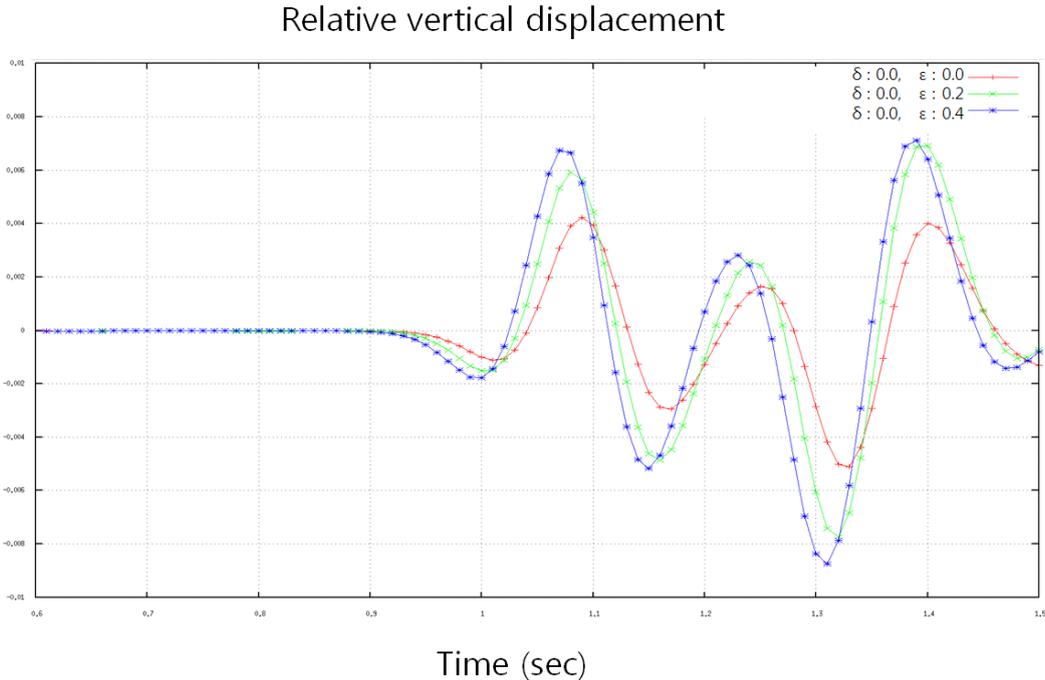


Fig. 2. Seismic traces recorded at the offset of 2 km from the source for different ϵ values.

감사의 글.

본 연구는 한국해양연구원 EEZ 2단계 사업으로부터 지원받았으며 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌.

- Min, D. -J., Shin, C., and Yoo, H. S., 2004, Free-surface boundary condition in finite-difference elastic wave modeling, Bulletin of Seismological Society of America, 94, 237-250
- Thomsen, L. 1986, Weak elastic anisotropy, Geophysics, 51, 1954-1966
- Tsvankin, I., 1997, Anisotropic Parameters and P-wave velocity for orthorhombic media, Geophysics, 62, 1292-1309