

GPU를 이용한 이방성 탄성 거꿀 참반사 보정의 계산가속

최형욱 · 설순지 · 변중무*

한양대학교 자원환경공학과

Acceleration of Anisotropic Elastic Reverse-time Migration with GPUs

Hyungwook Choi¹, Soon Jee Seol¹, and Joongmoo Byun^{1*}

¹Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering, Hanyang Univ.

요약: 탄성 거꿀 참반사 보정(elastic reverse-time migration)을 통해 물리적으로 의미가 있는 영상을 얻기 위해서는 탄성 파동방정식(elastic wave equation)을 통해 재구성된 벡터 파동장(reconstructed vector wavefield)으로부터 P파와 S파를 분리하는 파분리 알고리즘이 필요하다. 그리고 이방성을 고려한 탄성 거꿀 참반사 보정으로의 확장을 위해서는 이방성을 고려한 탄성 모델링 알고리즘 뿐만 아니라 이방성을 고려한 파분리가 필요하다. 이방성 탄성매질에서의 파분리는 등방성 탄성매질에서 주로 이용하는 Helmholtz decomposition과는 달리 탄성매질의 수직 속도 및 이방성 계수에 따라 계산된 유사미분필터(pseudo-derivative filter)를 이용한다. 이 필터는 적용에 많은 계산이 필요하기 때문에 이 연구를 통해 많은 양의 병렬계산을 효율적으로 수행할 수 있는 GPU (Graphic Processing Unit)를 이용하여 이방성 파분리를 수행하는 알고리즘을 개발하였다. 또한 GPU를 이용해 파분리를 수행하는 알고리즘을 포함하고 MPI (Message-Passing Interface)를 이용하는 효율성 높은 이방성 탄성 거꿀 참반사 보정 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘의 검증에 위해 Marmousi-II 탄성모델을 기초로 수직 횡등방성(vertically transversely isotropy; VTI) 탄성모델을 구축하여 수치모형 실험을 수행해 다 성분 합성탄성파탐사자료를 생성하였다. 이 합성탄성과 자료에 개발된 이방성 탄성 거꿀 참반사 보정 알고리즘을 적용하여 GPU와 MPI를 효과적으로 이용한 계산속도 향상과 이방성 파분리에 의한 영상결과의 정확도 향상을 보여주었다.

주요어: 이방성 탄성 거꿀 참반사 보정, 이방성 파분리, GPU, MPI

Abstract: To yield physically meaningful images through elastic reverse-time migration, the wavefield separation which extracts P- and S-waves from reconstructed vector wavefields by using elastic wave equation is prerequisite. For expanding the application of the elastic reverse-time migration to anisotropic media, not only the anisotropic modelling algorithm but also the anisotropic wavefield separation is essential. The anisotropic wavefield separation which uses pseudo-derivative filters determined according to vertical velocities and anisotropic parameters of elastic media differs from the Helmholtz decomposition which is conventionally used for the isotropic wavefield separation. Since applying these pseudo-derivative filter consumes high computational costs, we have developed the efficient anisotropic wavefield separation algorithm which has capability of parallel computing by using GPUs (Graphic Processing Units). In addition, the highly efficient anisotropic elastic reverse-time migration algorithm using MPI (Message-Passing Interface) and incorporating the developed anisotropic wavefield separation algorithm with GPUs has been developed. To verify the efficiency and the validity of the developed anisotropic elastic reverse-time migration algorithm, a VTI elastic model based on Marmousi-II was built. A synthetic multicomponent seismic data set was created using this VTI elastic model. The computational speed of migration was dramatically enhanced by using GPUs and MPI and the accuracy of image was also improved because of the adoption of the anisotropic wavefield separation.

Keywords: anisotropic elastic reverse-time migration, anisotropic wavefield separation, GPU, MPI

Received: 24 April 2015; Final version Received: 15 May 2015; Accepted: 26 May 2015

*Corresponding author

E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr

Address: Dept. of Natural Resources & Environmental Eng., Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Korea

©2015, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

다성분 탐사자료를 이용한 영상화 기술은 P파에만 의존하던 해석에서 벗어나 가스 침니(gas chimney)지역과 같이 P파만으로는 영상화가 힘들었던 지하구조의 영상화를 가능하게 함으로써 다양한 관점에서 하부매질을 해석할 수 있는 기회를 제공한다(Stewart, 2003). 따라서 다성분 탐사자료를 이용하여 복잡한 지질구조에서도 경사에 대한 제약 없이 P파와 S파로 분리된 영상을 제공할 수 있는 탄성 거꿀 참반사 보정(elastic reverse-time migration)은 파선이론에 기초한 탄성 키르히호프 참반사 보정(elastic Kirchhoff migration) (Hokstad, 2000)등에 비해 계산 시간이 많이 필요함에도 불구하고 많은 주목을 받고 있다.

탄성 거꿀 참반사 보정은 다성분 탐사자료에 기록된 벡터 파동장(vector wavefield)을 P파와 S파로 지표근처에서 분리하고 분리된 P파와 S파를 각각의 속도에 따라 음향 파동방정식(acoustic wave equation)을 이용하여 전파시키는 방법(Sun *et al.*, 2006)과 탄성 파동방정식(elastic wave equation)을 이용하여 벡터 파동장으로 전파하다가 영상조건(imaging condition) 적용 직전에 P파와 S파로 분리하는 방법(Yan and Sava, 2008)으로 나눌 수 있다. 후자의 경우가 전자에 비해 계산 시간은 많지만 보다 정확한 탄성파의 거동(모드변환 등)을 모사할 수 있다. Lu *et al.* (2009)과 Jiao *et al.* (2012)은 음향 거꿀 참반사 보정과 탄성 거꿀 참반사 보정을 통해 얻은 P-P 영상의 비교를 통해 모드 변환을 다룰 수 있는 탄성 거꿀 참반사 보정이 개선된 영상을 제공하는 것을 확인하였다.

탄성 거꿀 참반사 보정을 이방성 탄성매질에서 적용하기 위해서는 이방성을 고려한 탄성 파동방정식뿐만 아니라 이방성 파분리가 필요하다. 등방성 탄성매질의 파분리는 Helmholtz decomposition을 이용하여 P파와 S파 성분으로 빠르게 분리할 수 있다(Aki and Richard, 2009). 하지만 이방성을 갖는 탄성 매질에서 전파하는 변위벡터 파동장은 입자의 운동방향이 파의 전파방향과 평행하거나 수직하지 않아 변형된 파분리 기법이 요구된다(Dellinger and Etgen, 1990). Dellinger and Etgen (1990)은 이방성 파분리의 한 방법으로 크리스토펠(Christoffel) 방정식을 이용하여 파수영역에서 qP (quasi-P)파와 qS (quasi-S)파의 분극 벡터(polarization vector)를 각각 구하고, 이를 변위벡터 파동장들과의 내적을 통해 이방성 매질에서 qP파와 qS파로 파분리를 할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 실제로 공간영역에서의 파분리 계산은 분극벡터를 공간영역으로 넘겨 유사미분필터(pseudo-derivative filter)를 구하고, 이 유사미분필터를 벡터파동장에 적용하는 순으로 이루어진다(Yan and Sava, 2009; 2012). 이러한 파분리 방법은 Lu *et al.* (2010)에 의해 P-P 영상에서 등방성 파분리에 비해 정확한 영상을 제공해 줄 수 있는 것이 확인 되었으나 계산 시간이 많이 요구되는 단점을 가진다. 따라서 최근에 이방성 파분리에 필요한 많

은 계산 시간을 개선하기 위한 연구들이 여러 연구자들에 의해 수행되고 있다(Yan and Sava, 2011; Cheng and Fomel, 2013; Fomel *et al.*, 2013).

이 연구에서는 이방성 파분리에 많은 계산 시간이 필요한 문제를 GPU (Graphic Processing Unit)를 통한 병렬 처리를 이용하여 해결하고자 하였다. 그리고 이를 이용하여 송신원 별로는 MPI (Message-Passing Interface)를 이용하고 이방성 파분리는 CUDA (Computer Unified Device Architecture)를 통해 GPU에서 계산하는 이방성 탄성 거꿀 참반사 보정 알고리즘을 개발하였다. 또한 개발한 알고리즘을 합성탄성파탐사자료에 적용하여 이 알고리즘의 효율성과 이방성 파분리가 탄성 거꿀 참반사 보정의 영상에 미치는 영향을 비교분석하였다.

탄성 거꿀 참반사 보정

중합 전 탄성 거꿀 참반사 보정은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 1) 송신 파동장을 수신기의 기록시간(recording time (t_{max}))까지 시간에 따라 전파, 2) 송신 파동장과 수신 파동장을 역시간으로 전파시켜 각각의 벡터 파동장 재구성, 3) 재구성된 벡터 파동장을 각각 P파와 S파로 분리, 4) 영상조건을 적용하는 4 단계로 구성되어 있다. 참반사 보정을 통해 송신 파동장으로부터 분리된 P파와 수신 파동장으로부터 분리된 P파에 영상조건을 적용하여 얻은 P-P 영상, 송신 파동장에서 분리된 P파와 수신 파동장에서 분리된 S파가 만든 P-S 영상, 이와 같은 방법으로 S-P, S-S 영상들이 생성된다. 그리고 이방성 탄성매질에서의 탄성 거꿀 참반사 보정을 위해서는 이방성 매질을 전파하는 벡터파동장의 정확한 구현을 위해 이방성을 고려한 탄성 모델링 알고리즘이 필요하다. 또한 이 벡터파동장의 파분리를 위해서는 이방성을 고려한 파분리가 필요하다.

2차원 횡등방성 탄성매질에서 전파하는 탄성파의 전파는 식

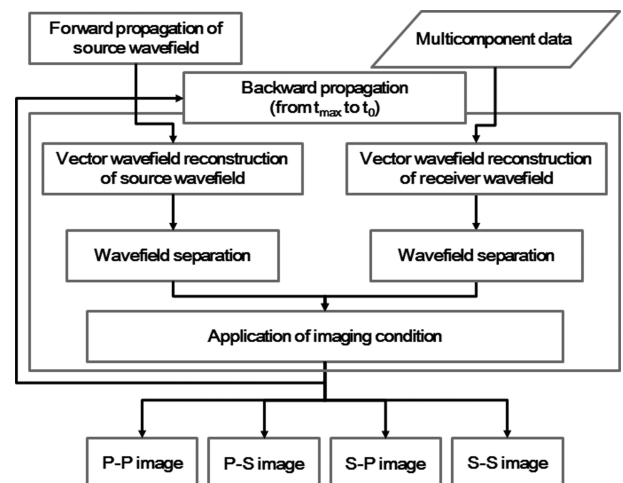


Fig. 1. Flowchart of the elastic reverse-time migration for a single shot.

(1)과 같은 2차원 속도-응력 공식을 통해 모사 될 수 있다(Han *et al.*, 2012).

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} &= C_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} + C_{15} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} &= C_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} + C_{35} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} &= C_{15} \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{35} \frac{\partial v_z}{\partial z} + C_{55} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 v_x 와 v_z 는 입자 속도(particle velocity), σ_{xx} , σ_{zz} 은 수직응력성분(normal stress component) 그리고 σ_{xz} 는 전단응력 성분(shear stress component)을 나타낸다. ρ 는 밀도이고, C_{11} , C_{13} , C_{15} , C_{33} , C_{35} , 그리고 C_{55} 는 탄성계수이다. 2차원 수직 횡등방성(Vertically Transversely Isotropy; VTI) 탄성매질에서는 위의 탄성계수들 중 0이 되는 값이 생기며 식 (2)와 같은 탄성계수를 갖는다.

$$[C^{TTI}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{13} & 0 \\ C_{13} & C_{33} & 0 \\ 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix}\quad (2)$$

식 (2)의 탄성계수들은 다음의 식 (3) ~ 식 (6)에 나타난 관계를 통해 계산할 수 있다.

$$v_{p_z} = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}\quad (3)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{C_{55}}{\rho}}\quad (4)$$

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

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{55})^2 - (C_{33} - C_{55})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{55})}\quad (6)$$

여기서 v_{p_z} 는 수직 P파 속도, v_s 는 SV파의 속도를 나타낸다. ε 과 δ 는 Thomsen (1986)에 의해 정의된 무차원 이방성 변수들이다.

2차원 경사진 횡등방성(Tilted transversely isotropy; TTI) 탄성매질의 탄성계수는 식 (2)에 정의된 수직 횡등방성 탄성매질에 경사각(θ)를 갖는 회전텐서(식 (7))를 식 (8)과 같이 적용하여 계산한다.

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}\quad (7)$$

$$\tilde{C}^{TTI} = \tilde{R} \tilde{R}^T \tilde{C}^{VTI} \tilde{R} \tilde{R}^T\quad (8)$$

계산된 2차원 경사진 횡등방성 탄성매질의 탄성계수는 식 (9)와 같이 6개의 서로 다른 탄성계수를 갖는다.

$$[C^{TTI}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{13} & C_{15} \\ C_{13} & C_{33} & C_{35} \\ C_{15} & C_{35} & C_{55} \end{bmatrix}\quad (9)$$

이 연구에서 구현하는 이방성 탄성매질에서의 파의 전파는 식 (1)을 기초로 엇갈린 격자법(staggered grid)을 이용한 시간영역 유한차분 모델링 알고리즘을 이용하였다.

등방성과 이방성 탄성매질에서의 파분리

식 (1)을 통해 계산된 변위 벡터 파동장(u_x, u_z)은 P파 성분과 S파 성분이 혼재되어 있다. 따라서 이 벡터 파동장에 바로 영상조건을 적용하면 혼선잡음(crosstalk noise)의 영향으로 해석이 어려운 영상을 얻는다(Yan and Sava, 2008). 따라서 역시 간으로 전파하는 송신 파동장과 수신 파동장들에 영상조건을 적용하기 전에 P파와 S파 성분을 추출하는 파분리가 선행되어야 한다. 등방성 탄성매질의 파분리는 입자의 운동방향이 파의 전파방향과 평행(P파)하거나, 수직(S파)하기 때문에 Helmholtz decomposition을 이용하여 P파와 S파 성분을 분리할 수 있고, 2차원인 경우에는 식 (10)과 식 (11)처럼 나타낼 수 있다(Aki and Richard, 2009).

$$P = \nabla \cdot \vec{W} = D_x[W_x] + D_z[W_z] = \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_z}{\partial z}\quad (10)$$

$$\vec{S} = \nabla \times \vec{W} = D_x[W_z] - D_z[W_x] = \frac{\partial W_z}{\partial x} - \frac{\partial W_x}{\partial z}\quad (11)$$

여기서 $\vec{W} = \{W_x, W_z\}$ 는 임의의 벡터 파동장을 D_x 와 D_z 는 x 와 z 방향의 미분 연산자를 나타낸다. 한편 이방성을 갖는 탄성매질에서 전파하는 변위벡터 파동장은 입자의 운동방향이 이방성 탄성계수에 따라 변화하기 때문에 입자의 운동방향이 파의 전파방향과 평행하지 않고(quasi-P파), 수직하지도 않다(quasi-S파). Dellinger and Etgen (1990)은 크리스토펠(Christoffel) 방정식을 이용하여 qP (quasi-P)파와 qS (quasi-S)파의 분극 벡터(polarization vector)를 각각 구하고, 이를 변위 벡터 파동장들과의 내적을 통해 이방성 매질에서 qP파와 qS파로 파분리를 할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 그리고 Yan and Sava (2009; 2012)는 분극벡터를 공간영역으로 변환하여 유사미분필터를 구할 때, 이 유사미분필터가 수직 횡등방성 매질과 경사진 횡등방성 매질에서 보다 잘 적용될 수 있도록 파수영역 상의 분극 벡터에 적용하는 tapering 함수들에 관한 연구를 수행하였다. 2차원 횡등방성 탄성매질에서의 파분리는 Yan and Sava (2009; 2012)가 제안한 유사미분필터($L_x,$

L_z 를 식 (12), (13)에 나타난 바와 같이 적용하면 분리된 P파와 S파를 얻을 수 있다.

$$qP = L_x[W_x] + L_z[W_z] \quad (12)$$

$$\vec{qS} = L_x[W_z] - L_z[W_x] \quad (13)$$

이렇게 분리된 P파와 S파(이방성의 경우에도)의 경우, P파는 스칼라, S파는 벡터이다. 하지만 2차원의 경우, 분리된 S파는 $\vec{S} = \{0, S_y, 0\}$ 와 같이 S_y 성분만을 갖기 때문에 하나의 송신원에 대해 식 (14)와 같은 zero-lag crosscorrelation 영상조건의 적용이 가능하다(Yan and Sava, 2008).

$$I_{ij}(\vec{x}) = \sum_m SF_i(\vec{x}, t) RF_j(\vec{x}, t) \quad (14)$$

여기서 $SF_i(\vec{x}, t)$ 와 $RF_j(\vec{x}, t)$ 는 $\vec{x} = \{x, z\}$ 위치와 t 시간에서의 분리된 송신 파동장과 수신 파동장을 나타낸다. i 와 j 는 분리된 파의 성분 {P,S}을 나타낸다. 그리고 m 는 영상조건이 적용되는 횟수이다.

실제로 식 (12)를 이용하여 qP 파를 추출하기 위해 x 방향의 유사미분필터(L_x)를 적용하는 계산 과정은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_x[W_x] = \sum_{i=1}^{NFE} L_x^i W_x^i \quad (15)$$

여기서 NFE 는 필터를 구성하는 2차원 격자의 총 개수이고, L_x^i 와 W_x^i 는 L_x 와 W_x 의 i 번째 요소를 나타낸다. 식 (15)에서의 곱하기 연산을 수행하는 횟수는 필터의 격자개수와 같고 더하기 연산은 필터의 격자개수보다 1회 덜 수행하다. 따라서 한 지점에서의 분리된 qP 파와 \vec{qS} 파의 값을 얻으려면 이러한 곱하기와 더하기가 각각에 대해 x 와 z 방향으로 두 번이 필요하므로 식 (16)과 (17)에 나타난 바와 같이 NM 번의 곱하기 연산과 NS 의 더하기 연산이 필요하다.

$$NM = NFE \times 2 \times 2 \quad (16)$$

$$NS = \{(NFE-1) \times 2 + 1\} \times 2 \quad (17)$$

이방성 매질에서의 파분리를 위해 유사미분필터의 크기를 Yan and Sava (2009)가 제안한 바와 같이 (51×51 , 65×65 격자) 설정할 경우, 이에 필요한 더하기와 곱하기 연산수는 Table 1과 같다. 65×65 격자를 갖는 유사미분필터의 연산수와 등방

Table 1. Number of + and \times processes respect to the sizes of pseudo derivative filters.

Size of pseudo derivative filter	Number of "+" processes	Number of " \times " processes
51×51	10402	10404
65×65	16898	16900

성 매질에서 전파하는 벡터 파동장의 파분리에 주로 사용되는 Helmholtz decomposition에 필요한 연산수를 비교해보면 더하기 연산은 2800배, 곱하기 연산은 4200배 정도의 추가적인 연산이 필요하다. 하지만 다행스럽게도 유사미분필터의 적용은 하나의 점마다 개별적으로 계산이 가능하기 때문에 많은 계산을 병렬로 수행할 수 있는 GPU를 이용한다면 계산시간을 줄일 수 있다.

GPU를 이용한 파분리

GPU를 이용하여 병렬계산을 수행하기 위해서는 CUDA (Compute Unified Device Architecture)와 같은 프로그래밍 언어가 필요하다. Fig. 2는 CUDA를 이용하여 GPU를 구동하는 전체적인 작업 순서도이다. CUDA에서 CPU는 호스트(host), GPU는 디바이스(device)라고 한다. 작업 순서는 우선 시스템 메모리상에 있는 입력자료를 GPU 내부에 있는 디바이스 메모리로 복사하고, GPU에 작업을 명령한다. 그러면 GPU 내에 있는 계산 코어들을 이용하여 병렬적으로 작업을 수행하고 그 결과를 다시 시스템 메모리로 복사한다. 따라서 GPU를 이용하여 병렬작업을 수행할 때 순수한 계산시간 이외에 자료를 복사하는데 드는 추가적인 시간 역시 고려되어야 한다. Fig. 3은 CUDA가 호스트와 디바이스 상에서 어떻게 작업을 처리하는지 나타낸 그림이다. 우선 호스트에서 프로그램 순서에 따라 작업을 진행하다가 디바이스에서 작업이 필요하면 GPU에서 실행되는 함수인 커널(kernel)을 호출한다. 커널은 CUDA에서 병렬 처리 연산을 수행하는 가장 작은 단위인 스레드(thread)로 나뉜다. 스레드들의 집합을 블록(block)이라고 하고 이 블록들의 집합을 그리드(grid)라고 한다. 하나의 커널을 처리하는 모든 스레드들은 하나의 같은 그리드에 속한다. 본 연구에서 사용된 GPU는 하나의 GPU 마다 최대 65,536개의 블록을 포함할 수 있고, 각 블록은 최대 1,024개의 스레드로 작업을 나눌 수 있다. Fig. 3은 커널1을 수행할 때 블록당 스레드를 15

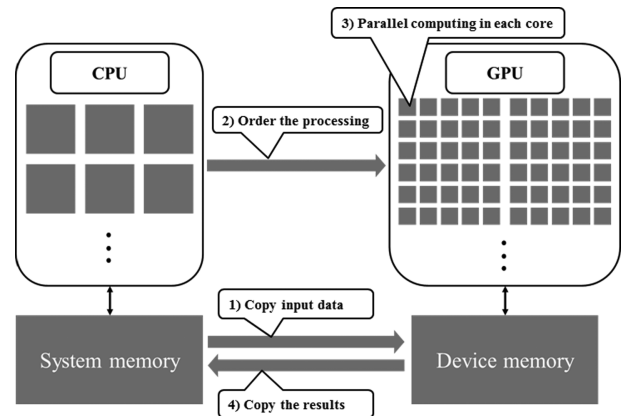


Fig. 2. Processing flow on CUDA (Compute Unified Device Architecture).

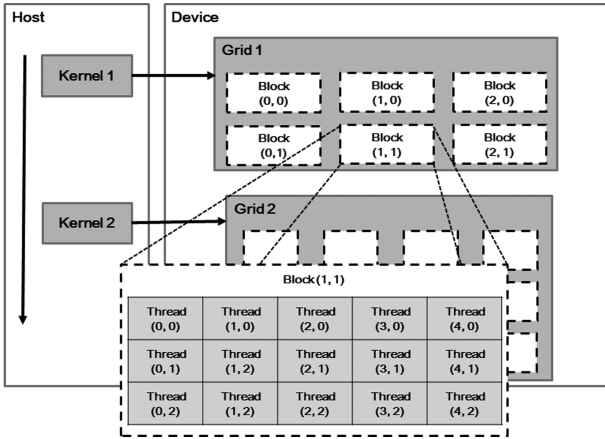
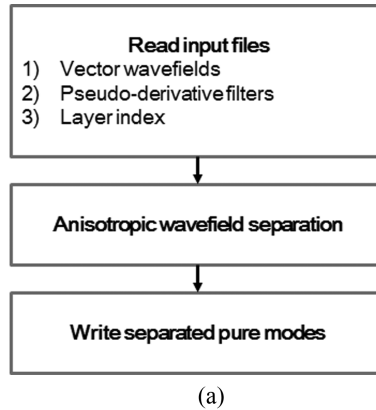


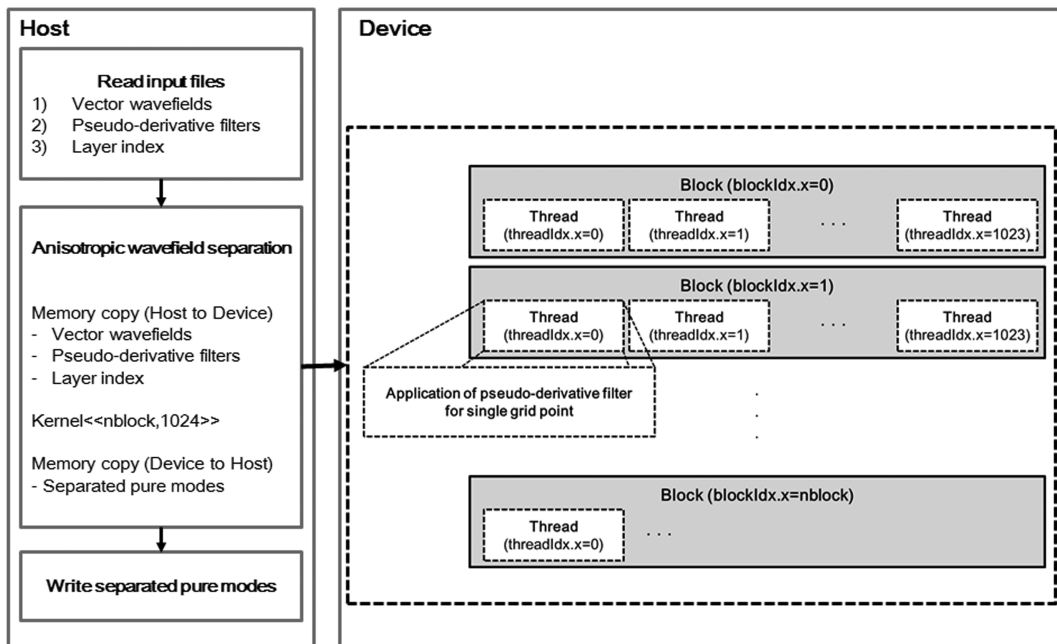
Fig. 3. CUDA architecture (reproduced from Ghorpade *et al.*, 2012).

개, 블록을 6개 사용한 예제를 나타낸 것이다.

이 연구에서는 우선 이방성 파분리 계산을 수행 할 때 GPU를 이용한 병렬 계산이 CPU내에 코어 하나만을 이용한 것에 비해 이방성 파분리에 소요되는 계산시간을 얼마나 감소시킬 수 있는지 시험해 보기 위해 Fig. 4와 같은 두 개의 알고리즘을 구성하였다. Fig. 4(a)는 CPU내에 코어 하나만을 사용하여 벡터 파동장의 격자마다 식 (12)와 (13)을 순차적으로 적용하는 Fortran90을 사용한 알고리즘이고, Fig. 4(b)는 GPU를 사용하여 병렬로 모델의 격자 수 만큼 스레드를 나누어 각 스레드마다 파분리 계산이 한 번만 수행되도록 하는 CUDA C를 이용한 알고리즘이다. 두 개의 알고리즘 모두 1) 이방성 탄성 수치모형 실험을 통해 생성한 변위 벡터 파동장 u_z (Fig. 5(b))와 u_x (Fig. 5(c)), 2) 이방성 탄성모델로부터 각 층별로 계산한 유사미분필터(Fig. 6(b), (c)) 그리고 3) Fig. 6(a)와 같이 각 격자



(a)



(b)

Fig. 4. Flowchart of anisotropic wavefield separation (a) by using single core in CPU and (b) by using GPU.

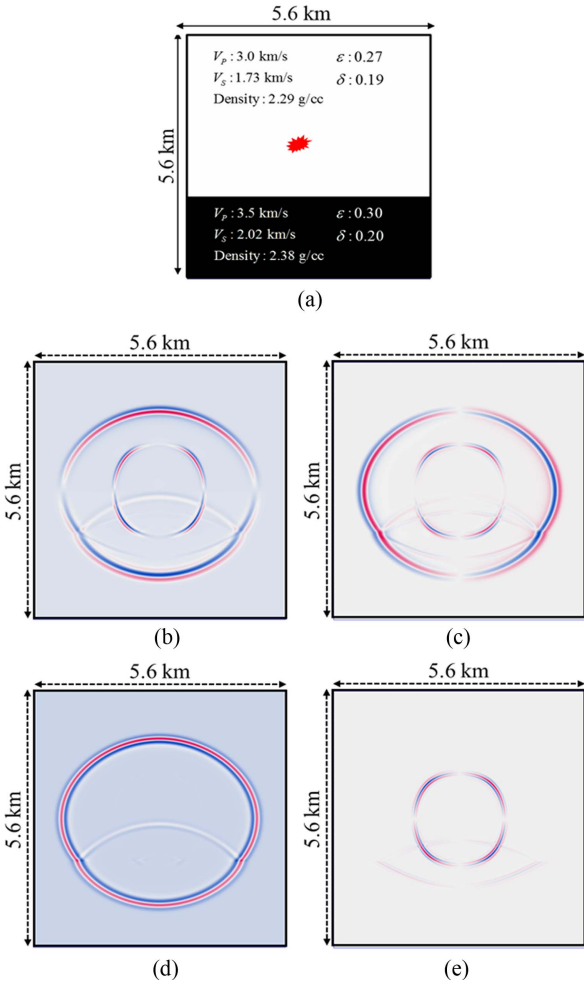


Fig. 5. (a) Elastic properties of a model which contains VTI characteristics. Snapshots of displacement vector wavefields of (b) z component (u_z) and (c) x component (u_x) at 0.6 s and extracted (d) P- and (e) S-waves from the displacement vector wavefields by using anisotropic wavefield separation (reproduced from Choi *et al.*, 2015).

점에 어떤 유사미분필터가 적용될지 지시하는 이방성 탄성모델의 층별 색인(layer index) 이렇게 3가지 종류의 입력 자료를 필요로 한다. 층별 색인을 이용하면 같은 값을 갖는 매질에 대해 하나의 유사미분필터를 사용할 수 있기 때문에 탄성모델의 격자마다 유사미분필터를 나누어 사용할 때보다 메모리 사용량을 줄일 수 있다. GPU를 이용하는 이방성 파분리 알고리즘(Fig. 4(b))을 자세히 살펴보면, Fig. 3에서 설명한 바와 같이 전체적인 작업은 호스트 상에서 위에서 아래로 순차적으로 진행되며 디바이스에서 병렬로 작업을 실행하는 명령은 커널함수를 호출함으로써 이방성 파분리가 수행된다. 모델의 격자수를 기준으로 병렬화하면 각 격자마다 적용되는 파분리 계산량과 유사미분필터의 크기가 같기 때문에 작업이 할당된 스레드 별로 계산량과 메모리 사용량을 예측하기가 용이하다. 또한 추후 언급할 하나의 노드에 설치된 CPU의 코어수와 GPU의 수

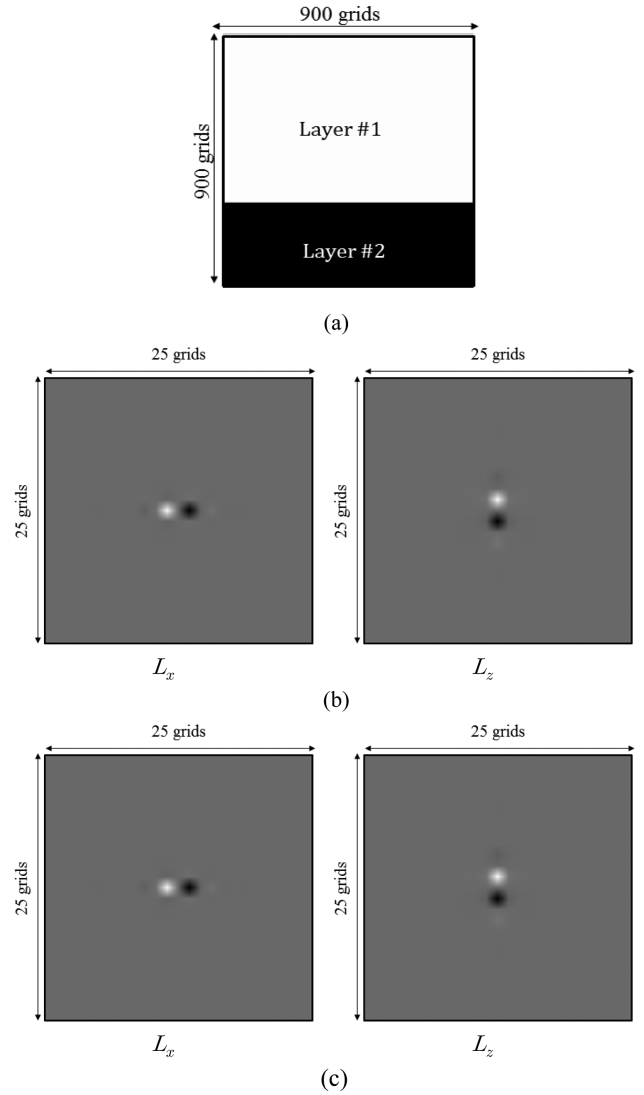


Fig. 6. (a) Layer index for each layer. The different number of index represents the different pseudo-derivative filter. Enlarged views (25×25 samples out of the originally used 65×65 samples around the center) of pseudo-derivative filters of the Layer #1 (b) and the Layer #2 layer (c).

가 다른 상황에서 MPI와 GPU를 동시에 사용하는 알고리즘 개발 시 작업분배에 유리할 것이라고 판단된다. 앞서 언급한 바와 같이 하나의 블록이 포함할 수 있는 최대 스레드 수는 1024로 정해져 있다. 따라서 모델의 격자수를 1024로 나누어 계산에 필요한 블록수(nblock)를 이방성 파분리 커널의 적용 전에 계산하였다. Fig. 2에서 설명한 바와 같이 디바이스에서 작업을 수행하기 전에 호스트 상의 메모리에서 디바이스 상의 메모리로 입력 자료들이 복사되어야 하며, 작업이 끝난 후 분리된 P파와 S파는 디바이스에서 다시 호스트로 복사되어 돌아온다. GPU를 이용한 이방성 파분리의 계산시간을 측정할 때에는 커널을 호출하기 전과 후의 자료들의 복사시간이 모두 포함되어야 한다.

Table 2. Specifications of a node of system used in this study.

Processor	value	Coprocessor	value
CPU	2 × E5-2670 v2 (Intel Xeon)	GPU	4 × Tesla K20xm
Cores per CPU	10	Core per GPU	2688
Clock frequency	2.5 GHz	Clock frequency	0.732 GHz
System memory	256 GB	Device memory	6 GB

Table 3. Comparison of computation times between two strategies.

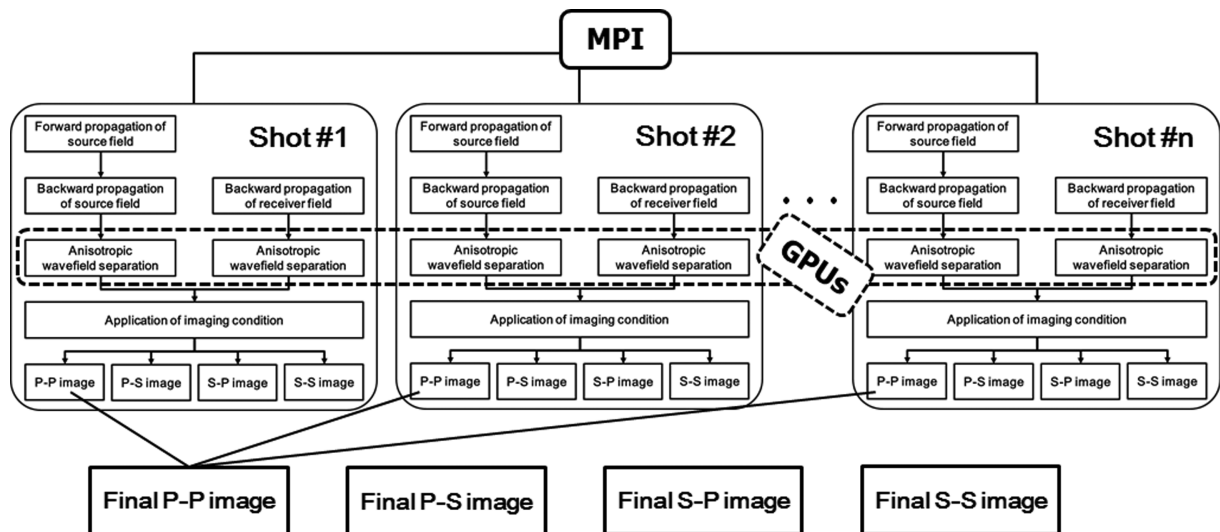
Strategy	Computation time
single core in a CPU	14.56 s
GPU	0.25 s

이렇게 개발된 알고리즘들의 이방성 파분리에 소요되는 계산시간을 비교하기 위해 Fig. 5(a)와 같은 단순한 이방성 탄성 모델을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 장비의 성능은 Table 2와 같다. Fig. 5(a)의 2층 구조는 수직횡등방성 탄성매질이며 모델은 수직과 수평 각각 6.25 m의 900개의 격자를 갖는다. 모델의 중앙에 압력 송신원(주주파수는 15 Hz)을 위치시키고, 수치모형실험을 수행하여 0.6 초에서의 변위 벡터 파동장 u_z (Fig. 5(b))와 u_x (Fig. 5(c))를 기록하였다. 이 변위 벡터 파동장들, 층별 색인(Fig. 6(a)) 그리고 각 층별로 계산한 유사미분필터(Fig. 6(b), (c))를 입력 자료로 이방성 파분리를 수행하여 CPU 내에 코어 하나만을 이용할 때와 GPU를 이용했을 때 모두 Fig. 5(d)와 (e)에 나타난 바와 같이 P파와 S파를 잘 분리하였다. CPU를 통한 계산의 경우에는 각 지점마다 반복적으로 그 지점에 맞는 유사미분필터들을 적용하여 파분리 계산을 모델의 격자수 만큼 반복하였다. Table 3은 변위 벡터 파동장들을 입력자료로 이방성 파분리를 수행할 때 CPU 내에 코어 하나만을 사용하여 순차적으로 계산을 수행했을 때

의 계산시간($T_1 = 14.56$ 초)과 GPU를 이용하여 병렬로 계산을 수행했을 때의 계산시간($T_N = 0.25$ 초)을 비교한 것이다. GPU 이용하여 이방성 파분리를 격자개수 만큼 나누어 병렬로 수행한 것이 CPU내의 코어 하나만을 사용하여 순차적으로 이방성 파분리를 수행한 것에 비해 58.2배의 속도향상(speed-up = T_1/T_N)이 있는 것을 확인 할 수 있다. GPU를 이용한 계산시간에는 2차원 이방성 탄성매질에의 파분리를 수행하기 위한 유사미분필터를 적용하는 계산시간 이외에 두 개의 변위 벡터파동장(u_x, u_z)과 이방성 매질에 따라 각 층별로 계산된 유사미분필터(L_x, L_z)들이 GPU의 디바이스 메모리로 복사되는 시간과 분리된 P파와 S파 파동장이 시스템 메모리로 복사되는 시간이 포함되어 있다.

MPI와 CUDA를 이용한 이방성 탄성 거울 참반사 보정

MPI를 이용하여 송신원에 따라 병렬적으로 탄성 거울 참반사 보정에 필요한 계산을 수행하다가 이방성 파분리는 Fig. 4(b)에 설명한 바와 같이 CUDA를 통해 GPU를 이용하여 유사미분필터를 모델의 격자마다 병렬로 계산하는 이방성 탄성 거울 참반사 보정 알고리즘을 개발하였다(Fig. 7). 이 연구에서는 Table 2에 나타난 바와 같이 하나당 10개의 계산 코어를 갖는 2개의 CPU와 4개의 GPU가 각각 설치된 두 개의 노드를 사용하였다. 이와 같이 노드마다 m개의 코어와 n개의 GPU가 설치된 환경($m, n > 1$; 정수)에서는 같은 노드 안에서 어떤 MPI 코어가 어느 GPU를 사용할 것인지 이방성 파분리의 적용 전에 결정해야 한다. 계산에 사용되는 코어를 고르게 GPU에 할당하기 위해서는 우선 노드별로 계산에 사용되고 있는 코어에 색인(nodeRank)을 지정 하고, CUDA의 내장함수인 cudaGetDeviceCount를 이용하여 노드에 설치된 사용 가능한

**Fig. 7.** Flowchart of anisotropic elastic reverse-time migration with MPI and CUDA.

GPU의 수(ndevice)를 구한다. nodeRank를 ndevice로 나누었을 때의 정수형 나머지(id)를 CUDA의 또 다른 내장함수인 cudaSetDevice를 이용하여 이 숫자에 해당하는 GPU에 계산 코어를 할당한다(von Alftan, 2011). 이 연구에서 nodeRank를 지정할 때는 노드별로 사용되는 계산 코어의 숫자가 같고 이를 알고 있다고 가정하였다. GPU마다 동시에 할당되는 작업의 양과 메모리의 크기를 미리 계산하여 GPU가 수행할 수 있는 최대 작업량과 최대 메모리 크기를 초과하지 않도록 하였다.

이방성 Marmousi-II 모델에 대한 이방성 거골 참반사 보정의 적용

이 연구를 통해 개발한 MPI와 GPU를 이용한 이방성 탄성 거골 참반사 보정 알고리즘의 검증을 위해 Martin *et al.* (2006)에 의해 만들어진 Marmousi-II 탄성 모델을 기반으로 수직 횡등방성 탄성 모델을 구축하였다. 우선 모델링과 참반사 보정 시 계산영역을 줄이기 위해 격자간격이 1.25 m인 기존의 Marmousi-II 모델에서 x방향과 z방향으로 5 격자에 하나씩 다

시 샘플링하여 격자간격 6.25 m의 모델을 만들고, Fig. 8에 나타난 지역의 P파, S파, 그리고 밀도만을 추출하였다. 횡등방성 탄성모델의 구축을 위해 이방성 변수 ε 과 δ 는 밀도를 기준으로 식 (18)과 식 (19)를 이용하여 임의로 생성하였다(Yan and Sava, 2012).

$$\varepsilon = 0.25\rho - 0.3 \quad (18)$$

$$\delta = 0.125\rho - 0.1 \quad (19)$$

이 식을 적용하여 계산된 ε 은 0.0 ~ 0.36의 범위를 갖고 δ 는 0.0 ~ 0.23의 범위를 갖는다. 구축한 횡등방성 탄성매질을 이용하여 OBC (Ocean Bottom Cable) 탐사를 모사한 수치 모델링을 수행하였다. 탐사변수는 Table 4와 같이 125 m의 간격을 갖는 에어건을 모사한 압력성분 송신원(주주파수는 15 Hz)을 사용하였고, 632개의 수신기가 해저면에 고르게 고정되어 있다고 설정하였다. Fig. 9는 수치 모델링을 통해 얻은 다성분 공통 송신원 모습이다. 수평방향으로의 입자속도(v_x)를 측정한다. Fig. 9(a)는 예상대로 후기 시간대에 S파에 의한 신호가 많이

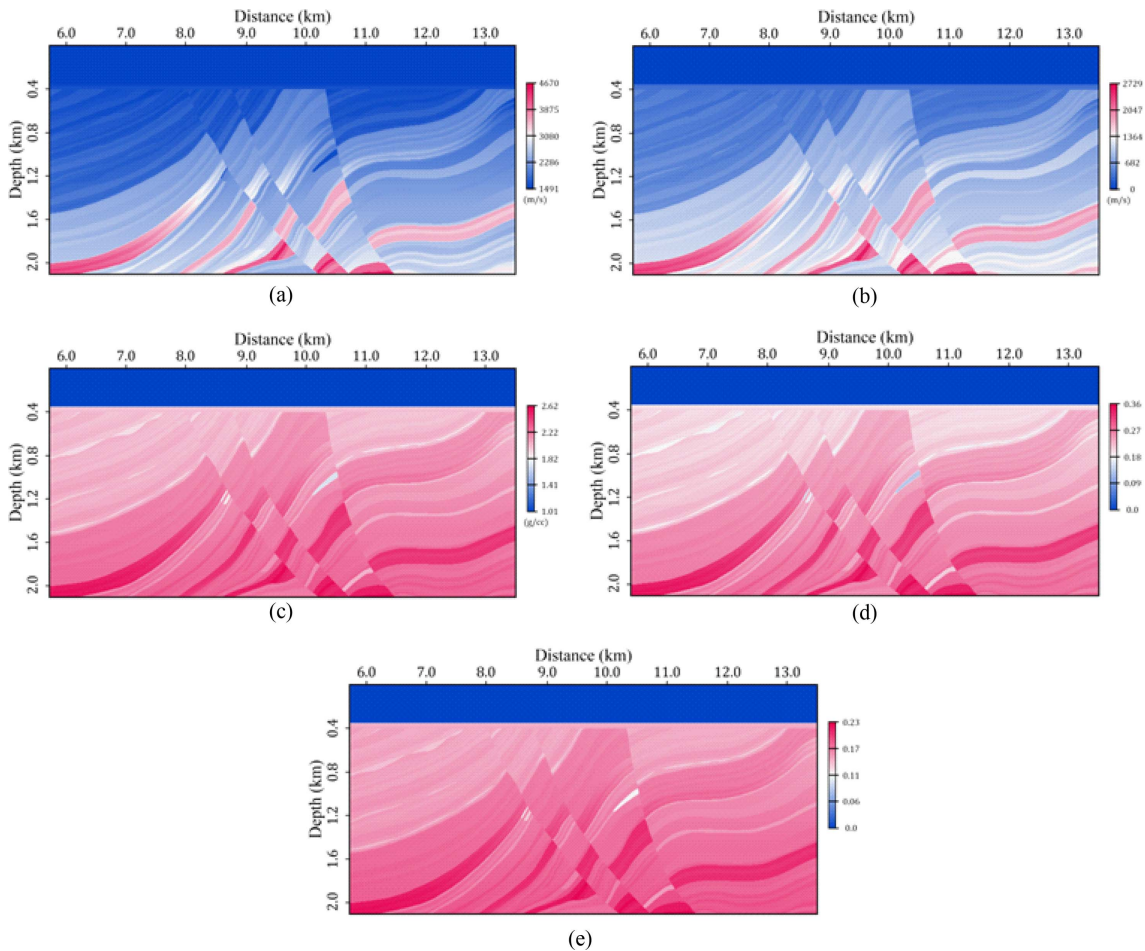
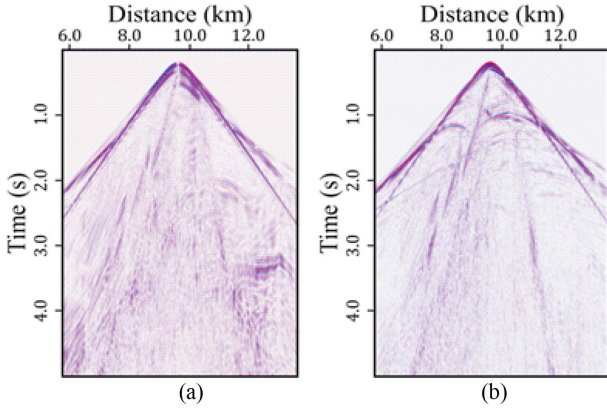


Fig. 8. Modified Marmousi-II elastic model used for the modelling: (a) P-wave velocity, (b) S-wave velocity, (c) density, (d) epsilon (ε) and (e) delta (δ).

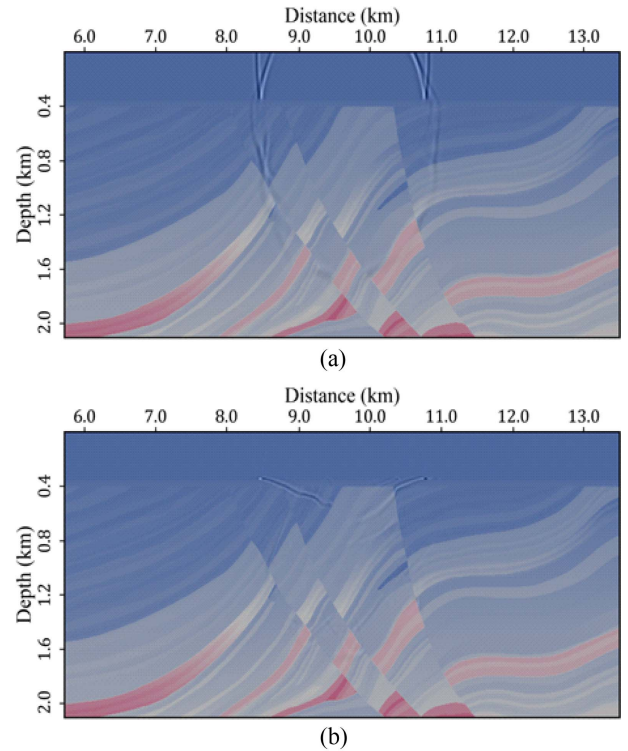
Table 4. Survey geometry for the synthetic data set in Fig. 9.

Number of source	64
Source interval along x-direction	125 m
First source location	(5737.5 m, 25 m)
Number of receiver	632
Receiver interval along x-direction	12.5 m
First receiver location	(5737.5 m, 356.25 m)

**Fig. 9.** Simulated OBC data from the 32th shot: (a) v_x component and (b) v_z component.

들어오는 것을 확인 할 수 있고, 이와 반대로 수직방향으로의 입자속도(v_z)를 측정된 Fig. 9(b)는 S파에 비해 전파속도가 빠른 P파가 주로 기록된 것을 확인 할 수 있다.

개발한 이방성 탄성 거울 참반사 보정 알고리즘이 효율적으로 작동할 것인지 예측하기 위해서 개발한 알고리즘을 이용하여 참반사 보정을 수행하기 전에 이 모델에 대해서 다음과 같은 두 가지 실험을 수행하였다. 첫 번째로 한 번의 이방성 파분리를 GPU를 사용하였을 때와 CPU내에 코어 하나만을 사용하였을 때의 계산시간 비교 실험을 수행하였다. 우선 GPU를 사용하였을 때와 CPU내에 코어 하나만을 사용하였을 때 모두 Fig. 10과 같이 잘 분리된 P파와 S파의 스냅샷을 얻을 수 있었다. 이때의 계산 시간은 Table 5와 같으며 GPU를 사용하였을 때(0.916초)가 CPU의 코어 하나만을 사용하였을 때(18.022초) 보다 19.6배의 속도향상을 보였다. 두 번째로 수행한 실험은 개발한 이방성 탄성 거울 참반사 보정 알고리즘 내에서 가장 많은 계산을 요구할 것으로 판단되는 이방성 파분리 필터 적용 부분(Applying pseudo-derivative filters)과 파동장 모델링 부분(Applying spatial derivatives for modelling)의 계산시간을 비교하는 실험을 수행하였다. 위에서 사용한 모델을 이용하여 개발한 알고리즘 내에 송신 파동장이 한 번의 시간스텝만큼 전파하는 과정을 수행할 때 소요되는 계산시간을 이 송신 파동장의 시간루프를 구성하고 있는 함수별로 나누어 Table 6과 같이 나타내었다. 이방성 파분리 필터를 적용하는 부분이 GPU를 이용한 병렬 프로그래밍을 통해서 첫 번째 실험

**Fig. 10.** Separated (a) P-wave and (b) S-wave snapshots by using anisotropic wavefield separation.

험(Table 5)에서 보인 것처럼 속도향상이 있었음에도 불구하고 한 번의 시간루프를 계산하는 동안 가장 많은 계산시간을 차지하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이 실험은 이 알고리즘 내에서 이방성 파분리 필터 적용하는 부분의 병렬화가 가장 효율적이라는 것을 의미한다.

개발한 이방성 탄성 거울 참반사 보정을 수행 시 Fig. 8을 이용하여 미리 계산한 6,414개로 구분한 층별 유사미분필터(L_x , L_z), 층별 색인과 Fig. 8에 있는 이방성 탄성모델에 각각 평활화(smoothing)를 적용한 모델, 그리고 Fig. 9와 같은 다성

Table 5. Comparison of computation times between two strategies for one time anisotropic wavefield separation (Fig. 10) (modified Marmousi-II data).

Strategy	Computation time
single core in a CPU	18.022 s
GPU	0.916 s

Table 6. Computational time profiling for single iteration of time loop for forward propagation of source wavefield in the developed anisotropic ERTM.

Procedures	Computation time
Applying spatial derivatives for modelling (CPU)	0.28 s
Applying pseudo-derivative filters (GPU)	0.91 s
Storing separated wavefields in harddisk (I/O)	0.05 s

분 탐사자료를 입력 자료로 사용하였다. 이 참반사 보정을 수행할 때 역시 Table 2의 성능을 갖는 CPU와 GPU를 포함한 2개의 노드를 사용하였다. 64개의 송신원에 대해 참반사 보정을 실시하기 위해 참반사 보정 한번에 32개의 CPU 코어(한 노드에 16개의 코어, 4개의 GPU)를 사용하여 각 코어별로는 2번의 참반사 보정이 수행 되었고, 이때 계산시간은 235분이 소요되었다. 이방성 파분리를 위해서는 하나의 GPU마다 4개의 MPI 코어를 할당하였다. 4개의 MPI 코어를 할당한 이후 하나의 MPI 코어가 GPU에서 사용할 스레드 수와 메모리 사용량을 계산하여 4개의 MPI 코어가 GPU를 사용하였을 때 GPU가 지원하는 최대 스레드 수인 67,108,864(65536[blocks] × 1024[threads])과 최대 메모리 사용량인 6GB를 초과하는지 확인 후 나머지 알고리즘이 진행 되도록 하였다. 위 실험에서 하나의 MPI 코어가 이방성 파분리에 사용한 GPU의 스레드는 벡터 파동장의 격자수인 585,450(1301 × 450)개이며, GPU에서의 메모리 사용량은 210 MB로 이는 이방성 파분리의 입력 자료인 변위 벡터 파동장(u_x, u_z), 층별 색인, 그리고 6414개로 구분한 층별 유사미분필터(L_x, L_z)와 이방성 파분리의 결과물인 분리된 P파와 S파의 파동장의 메모리를 모두 합한 값이다. 한 번의 참반사 보정을 수행할 때 이방성 파분리는 송신 파동장을 계산할 때 1000번, 수신 파동장을 계산할 때 1000번 이렇게 모두 2000번이 수행되었다. Fig. 11은 이방성 탄성 거울 참반사 보정을 수행할 때 이방성을 고려한 탄성모델링 알고리

즘을 이용하고 파분리 시 이방성을 고려한 파분리를 수행하여 얻은 P-P 영상(Fig. 11(a))과 등방성 파분리를 수행하여 얻은 P-P 영상(Fig. 11(b))을 비교하기 위해 나타낸 그림이다. 두 결과 모두 이방성을 고려한 탄성모델링 알고리즘을 사용하였기 때문에 예상대로 반사 이벤트들의 위치 정보는 정확한 것을 확인 할 수 있다. 하지만 등방성 파분리를 통해서 얻은 P-P 영상인 Fig. 11(b)상에 표시한 하얀색 점선 상자부분을 살펴보면 완전히 분리되지 않은 S파의 영향으로 Fig. 11(a)에서처럼 원래 연속적으로 나타나야 할 반사 이벤트들이 불연속적으로 끊겨 보이는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 정확한 이방성 탄성 거울 참반사 보정의 영상을 얻기 위해서는 이방성 탄성 모델링 알고리즘을 통해 정확한 벡터파동장의 구현이 필요할 뿐만 아니라 P파와 S파의 분리를 위해 이방성 파분리가 필요하다는 것을 확인 할 수 있다.

결론

본 연구에서는 이방성 탄성 거울 참반사 보정에는 필수적이지만 많은 계산을 요구하는 이방성 파분리를 GPU를 이용하면 계산시간을 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였다. 이를 기초로 송신원별로는 MPI를 이용하고 이방성 파분리 계산은 CUDA를 통해 GPU를 이용하는 이방성 탄성 거울 참반사 보정 알고리즘을 개발하였다. 개발한 알고리즘의 검증에 위해 Marmousi-II 탄성모델을 이용하여 수직 횡등방성 탄성모델을 구축하였다. OBC 탐사를 모사한 수치모형 실험을 통해 다성분 합성탄성파탐사자료를 생성하고 이를 이용하여 개발한 알고리즘의 속도향상을 확인하였다. 또한 이방성 탄성 모델링 알고리즘은 같이 사용하였지만 파분리 시 등방성 파분리 기법인 Helmholtz decomposition을 이용하여 얻은 P-P 영상과 이방성 파분리를 통해 얻은 P-P 영상을 비교해 보았다. 이방성 파분리를 통해 얻은 P-P 영상과 등방성 파분리를 사용한 P-P 영상 모두 이방성 탄성 모델링 알고리즘을 사용하였기 때문에 전체적인 구조정보는 정확하게 나타나는 것을 확인하였다. 하지만 등방성 파분리를 사용한 경우에는 완전히 분리 되지 않은 S파에 의해 반사 이벤트들이 불연속적으로 나타나는 왜곡된 결과를 가져왔다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20134010200520)입니다.

References

Aki, K., and Richard, P., 2009, *Quantitative seismology*, 2nd

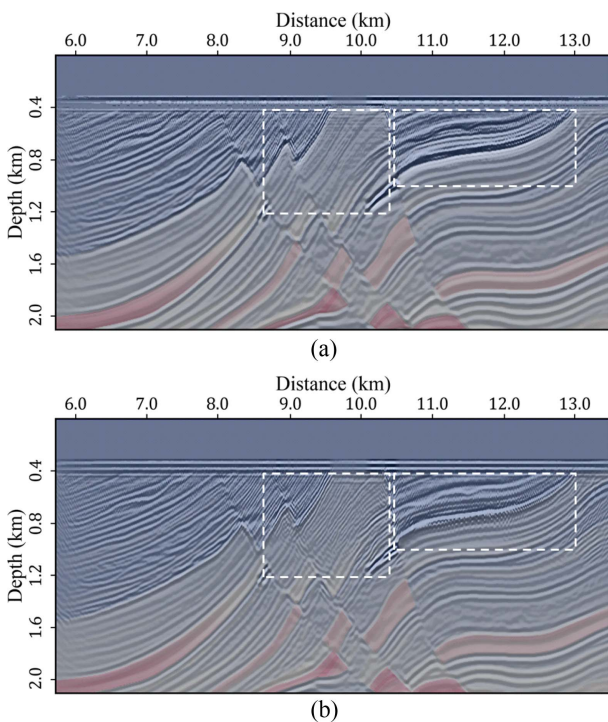


Fig. 11. P-P images from anisotropic elastic reverse-time migration (a) by using anisotropic wavefield separation (pseudo-derivative filter) and (b) by using isotropic wavefield separation (Helmholtz decomposition).

- Ed., University Science Books.
- Cheng, J., and Fomel, S., 2013, Fast algorithms for elastic-wave-mode separation and vector decomposition using low-rank approximation for anisotropic media, *83th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 991-997.
- Choi, H., Seol, S. J., and Byun, J., 2015, GPU를 이용한 이방성 탄성매질에서의 파분리, *Proc. of the 104th Joint Spring Conference*, KSMER, KIGAM, Daejeon, Apr. 29-30, 62-64.
- Dellinger, J., and Etgen, J., 1990, Wave-field separation in two-dimensional anisotropic media, *Geophysics*, **55**, 914-919.
- Fomel, S., Ying, L., and Song, X., 2013, Seismic wave extrapolation using lowrank symbol approximation, *Geophysical Journal International*, **61**, 526-536.
- Ghorpade, J., Parande, J., Kulkarni, M., and Bawaskar, A., 2012, GPGPU Processing in CUDA Architecture, *Advanced Computing: An International Journal*, **3**, 105-120.
- Han, B., Seol, S. J., and Byun, J., 2012, Elastic modelling in tilted transversely isotropic media with convolutional perfectly matched layer boundary conditions, *Exploration Geophysics*, **43**, 77-86.
- Hokstad, K., 2000, Multicomponent Kirchhoff migration, *Geophysics*, **65**, 861-873.
- Jiao, K., Huang, W., Vigh, D., Kapoor, J., Coates, R., Starr, E. W., and Cheng, X., 2012, Elastic migration for improving salt and subsalt imaging and inversion, *82th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, doi: 10.1190/segam2012-0791.1.
- Lu, R., Traynin, P., and Anderson, J. E., 2009, Comparison of elastic and acoustic reverse-time migration on the synthetic elastic Marmousi-II OBC dataset, *79th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 2799-2803.
- Lu, R., Yan, J., Traynin, P., Anderson, J. E., and Dickens, T., 2010, Elastic RTM: anisotropic wave-mode separation and converted-wave polarization correction, *80th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 3171-3175.
- Martin, G. S., Wiley, R., and Marfurt, K. J., 2006, Marmousi2: An elastic upgrade for Marmousi, *The Leading Edge*, **25**, 156-166.
- Stewart, R. R., Gaiser, J. E., Brown, R. J., and Lawton D. C., 2003, Converted-wave seismic exploration: Application, *Geophysics*, **68**, 40-57.
- Sun, R., McMechan, G. A., Lee, C. S., Chow, J., and Chen, C. H., 2006, Prestack scalar reverse-time depth migration of 3D elastic seismic data, *Geophysics*, **71**, S199-S207.
- Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy, *Geophysics*, **51**, 1954-1966.
- von Althaus, S., 2011, Parallel programming with CUDA and MPI, http://www.training.prace-ri.eu/uploads/tx_pracetmo/CUDA_MPI.pdf.
- Yan, J., and Sava, P., 2008, Isotropic angle-domain elastic reverse-time migration, *Geophysics*, **73**, S229-S239.
- Yan, J., and Sava, P., 2009, Elastic wave-mode separation for VTI media, *Geophysics*, **74**, WB19-WB32.
- Yan, J., and Sava, P., 2011, Improving the efficiency of elastic wave-mode separation for heterogeneous tilted transverse isotropic media, *Geophysics*, **76**, T65-T78.
- Yan, J., and Sava, P., 2012, Elastic wave mode separation for tilted transverse isotropic media, *Geophysical Prospecting*, **60**, 29-48.