

암염돔 하부 구조의 구조보정 영상 개선을 위한 파형역산 기법 연구

하완수¹ · 편석준^{2*} · 손우현¹ · 신창수¹ · 고승원³ · 서영탁³

¹서울대학교 에너지시스템공학부

²서울대학교 에너지자원신기술연구소

³한국석유공사

A Study of Waveform Inversion for Improvement of Sub-Salt Migration Image

Wansoo Ha¹, Sukjoon Pyun^{2*}, Woohyun Son¹, Changsoo Shin¹, Seungwon Ko³ and Youngtak Seo³

¹Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

²Research Institute of Energy and Resources, Seoul National University

³Korea National Oil Company

요약: 석유탄사 분야에서 탐사대상이 되는 저류층이 갈수록 심부화되고 복잡한 지층 구조로 옮겨감에 따라 암염층 하부 구조를 영상화하는 기술은 석유 및 가스층의 탐지를 위해 매우 중요하게 부각되고 있다. 그러나 암염돔 구조의 특성상 암염돔 하부로부터의 반사 에너지가 미약하기 때문에 하부구조의 정확한 영상을 얻기는 힘들다. 이러한 어려움을 극복하고자 본 연구에서는 암염돔 하부 구조 영상화를 위해 다중격자(multi-grid) 기법을 사용하여 파형역산을 수행하였다. 고정격자를 이용한 통상적인 주파수 영역 파형역산 기법으로 얻은 결과와의 비교를 통해 암염돔 구조 및 하부 구조의 영상화에서 다중격자를 적용한 파형역산 기법의 장점을 확인하였다. 본 연구 결과를 통해 고정격자를 이용한 파형역산 기법으로는 정확한 영상을 얻기 어려웠던 암염돔 구조에서도 다중격자를 적용하여 향상된 영상을 얻을 수 있음을 보여 주었다.

주요어: 파형역산, 역시간 구조보정, 암염돔 하부, 다중격자

Abstract: The sub-salt imaging technique becomes more crucial to detect the hydro-carbonates in petroleum exploration as the target reservoirs get deeper. However, the weak reflections from the sub-salt structures prevent us from obtaining high fidelity sub-salt image. As an effort to overcome this difficulty, we applied the waveform inversion by implementing multi-grid technique to the sub-salt imaging. Through the comparison between the conventional waveform inversion using fixed grid and the multi-grid technique, we confirmed that the waveform inversion using multi-grid technique has advantages over the conventional fixed grid waveform inversion. We showed that the multi-grid technique can complement the velocity estimation result of the waveform inversion for imaging the sub-salt structures, of which velocity model cannot be obtained correctly by the conventional fixed grid waveform inversion.

Keywords: waveform inversion, reverse time migration, sub-salt, multi-grid

서론

탄성과 자료의 구조보정은 석유 및 가스의 시추 위치 선정과 매장 심도 추정, 매장량 평가 등을 위한 유용한 자료처리 도구로서 많이 이용되어 왔다. NMO (normal move out) 보정이나 DMO (dip move out) 보정 등을 이용한 전통적인 중합 기술 이후에 현재 많이 이용되는 Kirchhoff 타입의 심도 구조

보정은 최대에너지 도달 주시를 이용하는 수준까지 발전하였다(Shin *et al.*, 2003). 그 밖에도 파동방정식에 기초한 역시간 구조보정 기술은 구조보정 기술 중 가장 정밀한 지하구조 영상을 제공하는 기술로서 많이 연구되었지만(Hemon, 1978; Baysal *et al.*, 1983; Loewenthal and Mufti, 1983; McMechan, 1983; Whitmore, 1983) 아직까지 계산시간적인 측면에서 경제성이 부족하여 널리 사용되지 않고 있다. 구조보정 기술은 여러 가지 기법으로 나뉘어 발전해 왔지만 실제적으로 구조보정의 성패를 결정하는 가장 중요한 요소는 실제 지하구조에 근접한 속도모델을 구축하는 것이다.

지하 심도에 따라 탄성과 속도가 일반적으로 증가하는 퇴적층의 경우에는 RMO (residual move out) 속도분석, MVA

2008년 4월 17일 접수; 2008년 5월 20일 채택

*Corresponding author

E-mail: pyunsj@gpl.snu.ac.kr

Address: Research Institute of Energy and Resources,

Seoul National University 599 Gwanak-ro,

Sillim 9-dong, Gwanak-gu, Seoul, 151-744, Korea

(migration velocity analysis) 또는 토모그래피 등의 일반적인 속도 모델링 방법을 이용하여도 구조 보정을 위한 적절한 속도 모델과 구조보정 영상을 얻을 수 있다. 그러나 지하에 탄성파 속도가 매우 높은 암염층이 존재하는 경우에는 암염층 상부 경계면이 강한 반사면으로 작용하여 파동 에너지의 대부분을 반사시킨다. 또한, 하부 경계면에서는 속도 구조가 역전되어 암염층 하부로부터 도달한 반사파는 대부분 반사되거나 굴절되어 지표의 수진기에 도달하는 에너지는 매우 미약하다. 따라서, 일반적인 속도역산 방법으로는 암염층 및 암염층 하부의 정확한 속도모델과 구조보정 영상을 얻는 것이 매우 어렵다. 특히, 반사 신호의 해석을 필요로 하는 중합 속도 분석법은 암염층 하부 경계면에 대한 해석이 매우 어렵기 때문에 파형역산과 같은 자동화된 기법이 필요하다.

최근 연구되고 있는 대부분의 파형역산 기법은 Lailly (1983)와 Tarantola (1984)가 제시한 역전과 알고리즘에 기반하고 있다(Kolb *et al.*, 1986; Gauthier *et al.*, 1986; Geller and Hara, 1993; Pratt *et al.*, 1998). 이러한 국부 최적화(Local optimization) 기법에 기반한 파형역산은 전역 최적화(Global optimization) 기법에 기반한 파형역산에 비해 계산 속도가 빠르다는 장점이 있다. 그러나 초기 속도모델과 실제 지층 속도의 차이가 클 경우 목적함수의 비선형적 거동으로 인해 역산 결과가 국부 최소값에 빠지는 문제가 존재한다. 이러한 국부 최소값 문제를 해결하기 위해 다중격자(multi-grid) 기법(Bunks *et al.*, 1995)을 파형역산에 적용하거나 주파수를 단계적으로 역산하는 기법(Sirgue and Pratt, 2004) 및 디퍼렌셜 쉘블런스(differential semblance)를 이용하여 속도 모델을 구하는 기법(Symes and Carazzone, 1991) 등이 제안되었다.

본 논문에서는 암염층을 포함하는 모델에 대해 일반적인 고정격자 파형역산과 다중격자 기법을 이용하여 속도모델을 구축하고 구조보정을 실시하였다. 암염층을 포함하는 속도모델은 합성 모델과 SEG/EAGE 3차원 암염층 모델의 2차원 단면을 사용하였다. 또한 현장 자료에 대해 다중격자 기법을 적용하여 고정격자 파형역산 결과와 비교하였다.

파형역산 이론

주파수 영역에서 파동 방정식은 다음의 일반화된 행렬식으로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{S}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{S}=\mathbf{S}(\mathbf{p})$ 는 모델 매개변수 벡터 \mathbf{p} 의 함수인 복소 임피던스 행렬이고, $\mathbf{u}=\mathbf{u}(\omega)$ 는 푸리에 변환된 파동장, \mathbf{f} 는 송신원 벡터이다. 측정된 탐사자료의 주파수영역 파동장을 \mathbf{d} 라 할 때, 목적함수는 다음과 같이 정의된다.

$$E = \|\mathbf{u} - \mathbf{d}\|_2^2 \quad (2)$$

목적함수 E 를 국부 최적화 기법으로 최소화하기 위해서는 그 그래디언트 방향 ∇E 를 구해야 하는데, 그래디언트 방향은 편미분 파동장과 잔여 파동장의 상호상관(cross-correlation)으로 구성된다. 편미분 파동장은 식 (1)을 l 번째 요소의 속도 매개변수 p_l 로 미분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial p_l} \mathbf{u} + \mathbf{S} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial p_l} = \mathbf{0} \quad (3)$$

식 (3)을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial p_l} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{v}_l \quad (4)$$

여기서,

$$\mathbf{v}_l = -\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial p_l} \mathbf{u} \quad (5)$$

는 l 번째 요소의 속도 매개변수를 교란시킴으로써 정의되는 가상 송신원 벡터이다. 목적함수의 최대 급경사 방향은 그래디언트 방향의 역방향으로 표현되는 벡터이며 그 벡터의 l 번째 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla_{p_l} E = - \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial p_l} & \frac{\partial u_2}{\partial p_l} & \dots & \frac{\partial u_{n_r}}{\partial p_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (u_1 - d_1)^* \\ (u_2 - d_2)^* \\ \vdots \\ (u_{n_r} - d_{n_r})^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, n_r 은 수진기의 개수, *는 공액복소수를 의미한다. 식 (6)으로 구성되는 최대 급경사 방향은 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 간접적으로 구할 수 있다.

$$\nabla E = -\mathbf{V}' \mathbf{S}^{-1} \mathbf{r}^* \quad (7)$$

여기서, $\mathbf{V}'=[\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \dots \ \mathbf{v}_{n_p}]'$ 는 가상 송신원 벡터로 구성된 행렬, n_p 는 전체 매개변수의 개수, \mathbf{r} 은 잔여 파동장 벡터이다. 이렇게 구한 최대 급경사 방향을 Levenberg-Marquardt 방법으로 정규화하여 속도 모델을 갱신하게 된다(Shin *et al.*, 2007).

다중격자(multi-grid) 기법을 이용한 파형역산

다중격자 기법은 응용수학 분야에서 널리 연구되어 왔고 탐사 분야에서는 Bunks *et al.* (1995) 등에 의해 연구된 바 있다. 본 논문에서는 주파수 영역 파형역산 기법을 적용한 Shin *et al.* (2007)의 알고리즘을 기초로 하여 다중격자 기법을 사용하여 역산을 수행하였다. 주파수 영역 파형역산의 경우 저주파수 대역 성분을 먼저 사용하고 점차 고주파수 대역으로 옮겨가면서 역산을 수행함으로써 국부 최소값 문제를 다소 완

화할 수 있다는 장점이 있다(Pratt, 1999). 이를 구현하는 알고리즘은 순차적인 구조를 갖기 때문에 병렬화하기 어려운 단점이 있는 반면에 모든 주파수 대역을 동시에 역산하는 방법은 병렬화하기 쉽지만 국부 최소값에 빠지는 문제를 완화할 수 없다. 다중격자 기법은 상대적으로 큰 격자를 사용하여 저주파수 대역에서 파형역산을 수행하고 격자 간격을 줄여가면서 고주파수 대역 성분을 역산하는 방법이다. 이 기법을 이용하면 저주파수 성분으로 장파장 형태의 속도모델을 얻고 이로부터 고주파수 성분을 이용하여 세부적인 속도 변화를 역산하여 국부 최소값에 빠지는 문제점을 완화시킬 수 있다. 또한 병렬화를 통한 계산효율 향상도 기대할 수 있다.

수치 예제

합성 암염돔 파형 역산 예제

기존의 파형 역산 기법과 다중격자 기법을 비교하기 위해 우선 합성 예제(Fig. 1a)에 두 가지 방법을 적용시켜 비교하였다. 탐사 자료는 주파수 영역 유한 요소법을 이용하여 얻었다. 격자 간격은 15 m, 총 송신원 개수는 240개, 총 수신기 개수는 242개를 사용하였다. 최대 오프셋 거리는 3.615 km이고 송신원과 수신기 간격은 15 m이다. 역산을 위한 초기 속도모델

은 속도가 깊이에 따라 1.5 km/s에서 3.5 km/s까지 선형적으로 증가하는 모델을 사용하였다(Fig. 1b).

Fig. 1c는 고정격자를 사용한 주파수 영역 파형역산으로 300회의 반복 역산 후 얻은 속도모델이다. 수치분산을 고려하여 0.25 ~ 19.75 Hz의 주파수 대역의 자료를 역산에 사용하였다. 역산으로 얻은 속도모델은 암염돔 상부의 구조는 잘 나타내고 있으나 하부의 형상은 왜곡되어 있음을 알 수 있다. 암염돔 내부의 속도가 균일하게 정의되지 않아 굴곡을 보이고, 암염돔 하부 경계면의 심도를 정확하게 역산해내지 못하였음을 알 수 있다.

다중격자 기법을 이용한 역산에서는 두 단계를 통해 역산을 수행하였다. 첫 번째 단계에서 격자 간격은 30 m, 주파수 대역은 수치분산을 고려하여 0.25 ~ 9.75 Hz, 총 송신원 개수는 120개, 총 수신기 개수는 122개를 사용하였다. 초기 속도모델은 Fig. 1b와 같다. 100회의 반복 역산 결과를 통해 얻은 속도모델(Fig. 2a)을 보면 큰 격자의 사용으로 인해 속도모델의 해상도는 낮지만 전체적으로 암염돔의 형상을 근사하게 영상화하고 있음을 알 수 있다. 첫 번째 단계의 역산 결과를 초기 속도모델로 사용하고 두 번째 단계의 역산을 수행하였다. 200회의 역산을 통해 얻은 속도모델(Fig. 2b)을 보면, 고정격자 파형역산을 통해 얻은 속도 모델과는 달리 암염돔 상부 및 암염돔 내부 구조, 암염돔 하부 경계면까지 거의 정확하게 영상화되었음을 알 수 있다. 다중 격자 기법에서는 첫 번째 단계에서 큰 격자를 사용하고 두 번째 단계에서는 고정격자 기법과 동일한 격자를 사용하여 계산시간을 줄일 수 있었다. 최종 반복역산에서의 주파수별 오차를 비교해보면 진폭 오차와 위상 오차 모두 다중격자 방법을 사용했을 때 고정격자를 사용한 경우보다 작은 오차를 나타냄을 알 수 있다(Fig. 3).

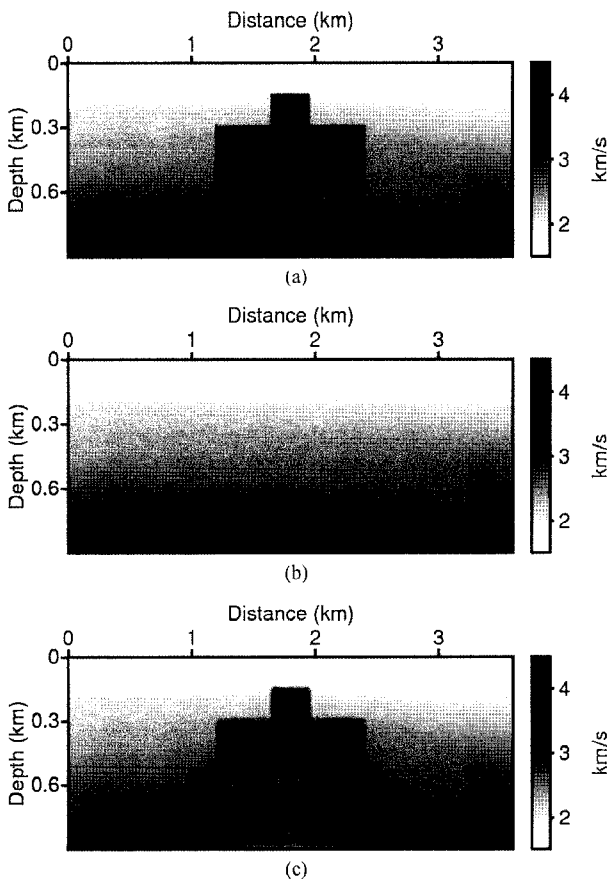


Fig. 1. (a) A salt-dome velocity model, (b) the initial velocity model for waveform inversion, and (c) the inverted velocity model of the conventional waveform inversion after 300 iterations.

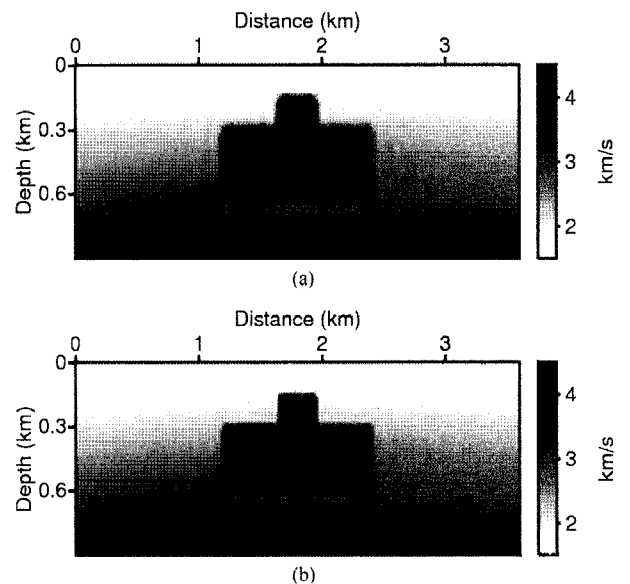


Fig. 2. The inverted velocity models by the multi-grid technique with (a) 30 m grid spacing after 200 iterations and (b) 15 m grid spacing after 200 iterations.

SEG/EAGE 암염돔 모델의 파형 역산 및 역시간 구조보정

암염돔 하부 구조의 영상화를 위해 SEG/EAGE 암염돔 모델의 2차원 단면 속도모델(Fig. 4a)을 이용하여 파형역산을 수행하였다. 이 모델은 대규모 암염층이 발달해 있어 암염층 하부 경계와 하부 단층 구조들을 영상화하기 매우 어려운 구조를 갖고 있다. 탐사자료는 SEG/EAGE 암염돔 모델에 대해 유한차분 모델링을 통해 얻은 2차원 해양 탄성파자료를 가정하였다.

파형 역산을 위한 파동장 모델링은 유한요소법을 사용하였고 초기 속도 모델은 깊이에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델(Fig. 4b)을 사용하였다. 고정격자 파형 역산 방법으로는 20 m 격자와 0.25 ~ 15 Hz 주파수 대역을 사용하여 역산하였다. 다중격자 기법을 이용한 역산에서는 첫 단계에서 40 m 격자 크기로 0.25 ~ 7.5 Hz 주파수 대역 성분을 역산하였고 이로부터 얻어진 속도모델을 초기 속도모델로 하여 20 m 격자 크기로 7.75 ~ 15 Hz 주파수 대역 성분을 역산하였다. 송진원은 80 m 간격으로 195개를 사용하였고, 수진기는 40 m 간격으로 전체 표면에 설치했다고 가정하였다.

고정격자 파형역산 결과는 Fig. 4c와 같이 암염층 구조를 정확하게 역산하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 다중격자 기법으로 Fig. 5a와 같이 저주파수 대역(0.25 ~ 7.5 Hz) 성

분을 이용하여 장파장 형태의 속도 모델을 역산하고 Fig. 5b와 같이 고주파수 대역(7.75 ~ 15 Hz) 성분으로 세밀한 속도 변화를 역산함으로써 성공적인 역산 속도모델을 얻을 수 있었다. 이는 일반적으로 알려져 있는 바와 같이 저주파수 대역 성분이 충분할 경우 장파장 형태의 배경 속도 모델을 역산할 수 있음을 보여준다(Pica *et al.*, 1990; Shin and Min, 2006).

역산결과가 구조보정 영상에 미치는 영향을 확인하기 위해 역산된 속도모델을 이용하여 역시간 구조보정을 실시하였다. 본 논문에서는 Pseudo-spectral method (Gazdag, 1981; Kosloff and Baysal, 1982; Fomberg, 1987)를 이용한 역시간 구조보정 알고리즘을 적용하였다. 고정격자 파형역산으로 얻은 속도모델(Fig. 4c)을 사용한 경우에는 Fig. 6a와 같이 암염층의 하부 경계면이 거의 구별되지 않을 정도로 왜곡된 영상을 얻었다. 반면에 다중격자 기법으로 얻은 속도모델(Fig. 5b)을 사용한 구조보정 영상은 Fig. 6b에서와 같이 암염돔 구조가 거의 정확하게 영상화 되었다. 이러한 결과는 다중격자 기법이 암염층 하부 구조의 속도 역산 기법으로 활용될 수 있는 가능성을 보

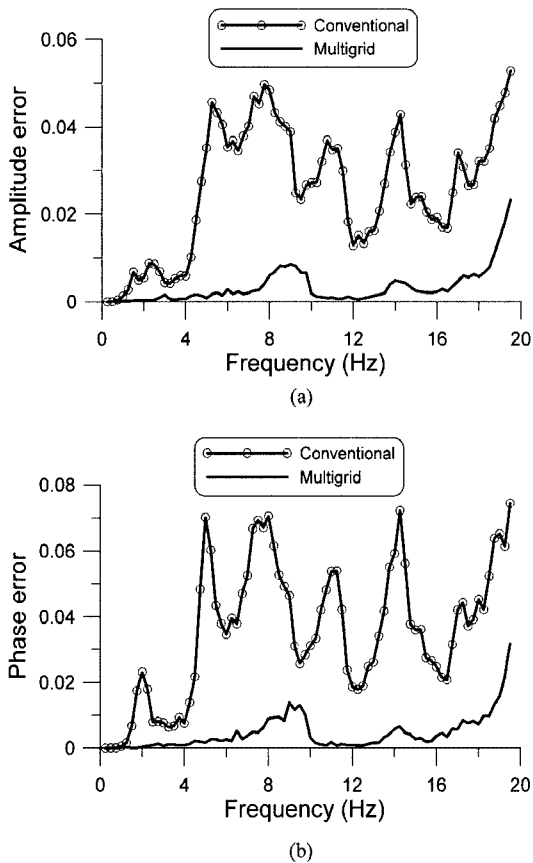


Fig. 3. Errors of the modeled data obtained using the inverted velocity models from the fixed grid waveform inversion and the multi-grid technique. (a) Amplitude error and (b) phase error.

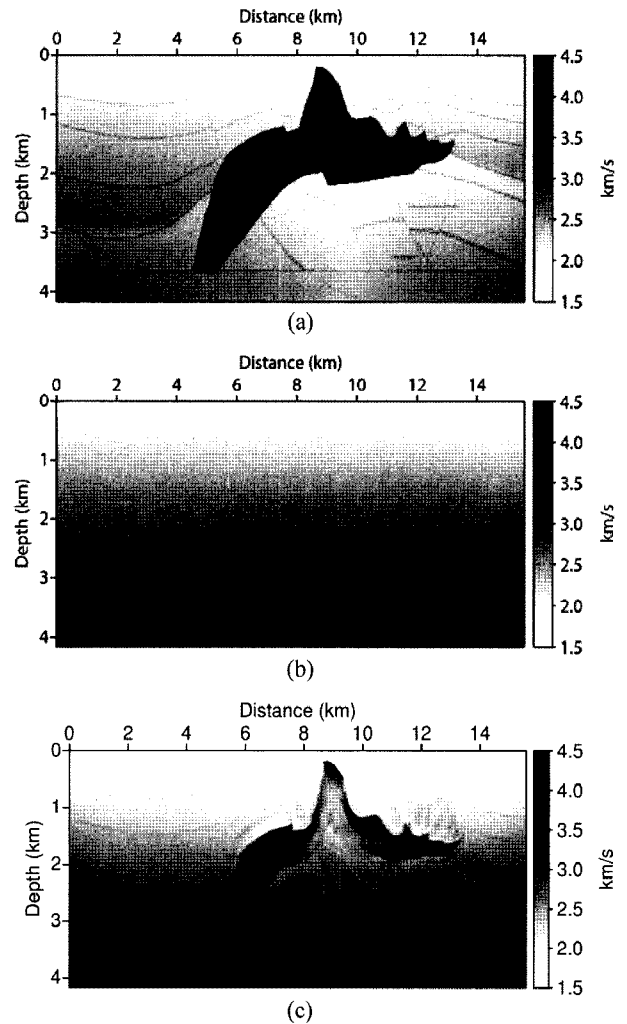


Fig. 4. (a) The SEG/EAGE salt-dome velocity model, (b) the initial velocity model for waveform inversion, and (c) the inverted velocity model by the fixed grid waveform inversion.

여준다.

멕시코만 탐사 자료의 역산

다중 격자 기법이 암염동을 포함하는 실제 자료에 적용 가능한지 알아보기 위해 Fig. 7에 제시된 멕시코만 탐사 자료를 역산하였다. Fig. 7a는 탐사 자료 중 하나의 공통 송신원 모습

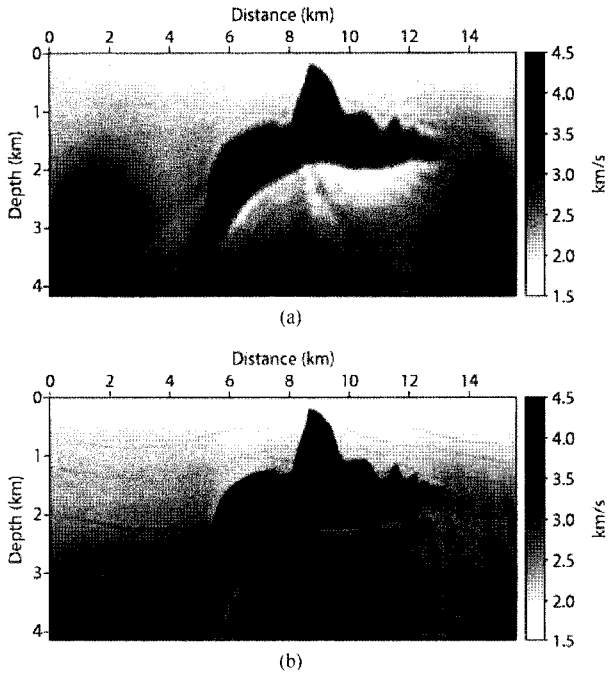


Fig. 5. The inverted velocity models by the multi-grid technique with (a) 40 m grid spacing (0.25 ~ 7.5 Hz) and (b) 20 m grid spacing (7.75 ~ 15.0 Hz).

을 도시한 것이고 Fig. 7b는 이에 대한 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 탐사 자료는 50 m 간격으로 위치한 399개의 송신원에 대해 25 m 간격의 수신기 408개에서 측정되었다. 수신기의 최대 오프셋 거리는 10,292 m 이지만 모드변환 P파 등에

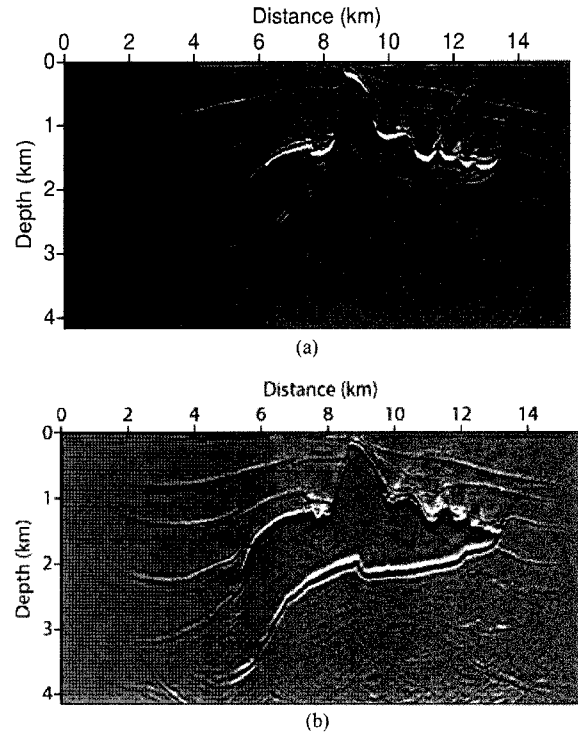


Fig. 6. The migrated images using (a) the inverted velocity model obtained from the fixed grid waveform inversion and (b) the correspondent of the multi-grid technique.

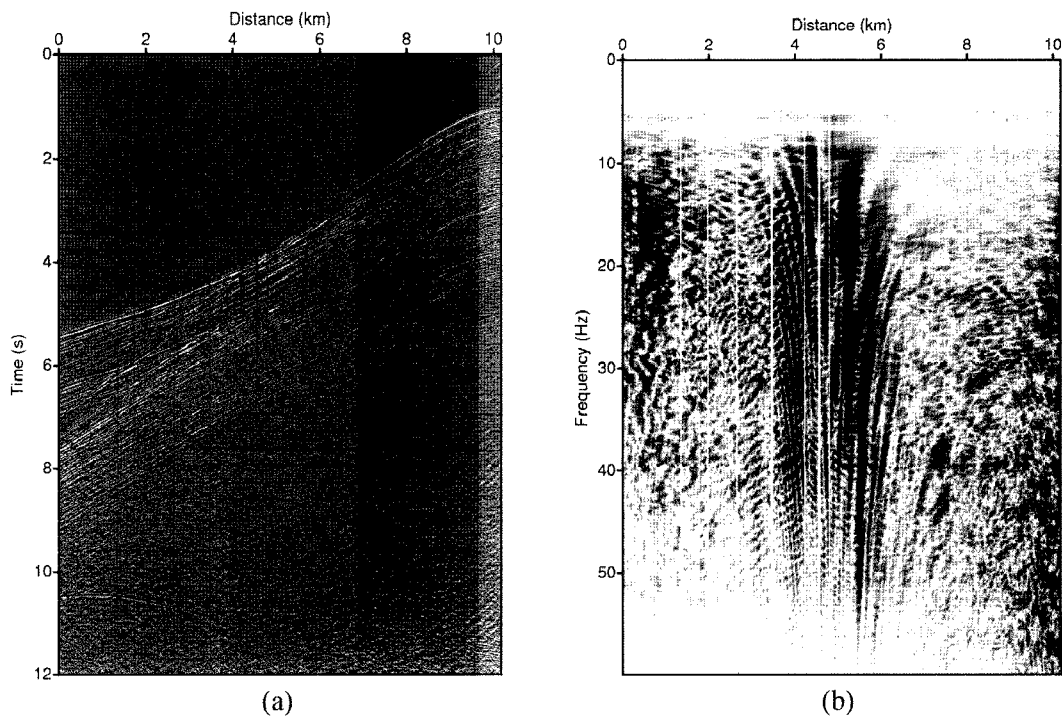


Fig. 7. (a) A common shot gather in the Gulf of Mexico data set and (b) its spectrum.

의한 탄성과 효과를 최소화하기 위해 역산에는 최대 오프셋 거리가 2,000 m 이하인 자료만 사용하였다. 또한 잡음으로 인한 오차의 효과를 줄이고 안정적인 역산을 위해 l_1 노름 목적 함수(Claerbout and Muir, 1973; Pyun, 2008)를 사용하였다.

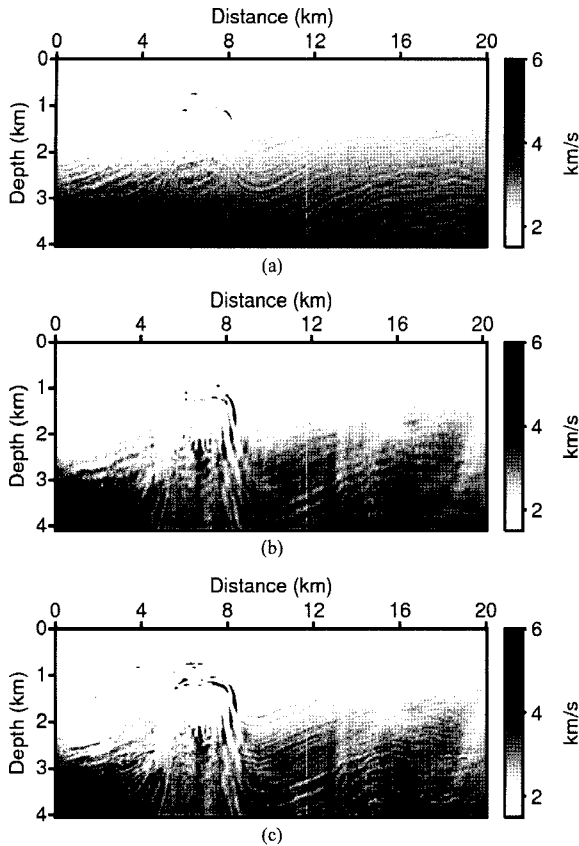


Fig. 8. The inverted velocity models by the waveform inversion using l_1 norm. (a) The fixed grid inversion result and the results obtained by multi-grid technique with (b) 50 m grid spacing and (c) 25 m grid spacing.

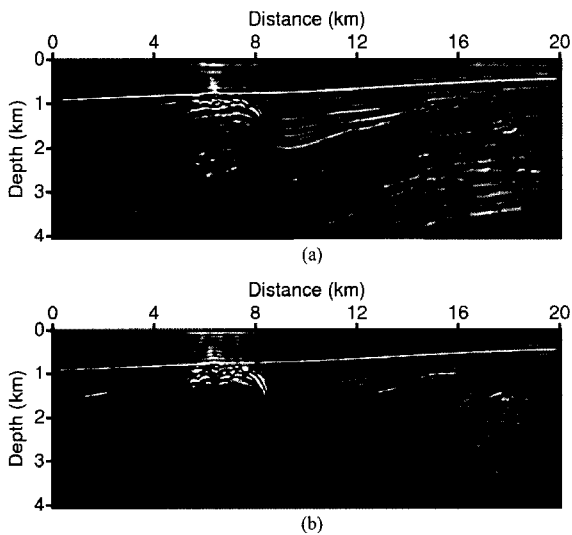


Fig. 9. The migrated images using (a) the inverted velocity model obtained from the fixed grid waveform inversion and (b) the correspondent of the multi-grid technique.

25 m의 고정격자를 이용한 파형 역산 결과는 Fig. 8a와 같다. 주파수는 14.8 Hz까지 사용하였다. Fig. 8b와 Fig. 8c는 앞 절의 예제와 같은 방식으로 50 m 격자를 이용한 역산 결과와 다중격자 기법으로 25 m 격자를 이용한 역산 결과이다. 격자 간격이 50 m 일 때에는 0.0~7.4 Hz, 격자 간격이 25 m 일 때에는 7.6~14.8 Hz의 주파수 대역을 사용하였다. 역산된 속도 모델을 이용한 구조보정 결과는 Fig. 9과 같다. 두 방법 모두 왼쪽으로부터 5~8 km 위치에 있는 암염돔 상부를 잘 영상화하고 있다. 그러나 다중격자를 이용한 역산 결과는 오른쪽 하단에 지층의 왜곡 현상이 보인다. 이는 현장 자료에 5 Hz 미만의 저주파 신호가 매우 약하고, 저주파 잡음의 영향으로 인해 첫 번째 단계의 역산 결과가 심하게 왜곡되기 때문이다. 고정격자 기법과 다중격자 기법으로 역산된 속도모델이 모두 장파장 형태의 배경 속도는 역산하지 못하고 지층의 임피던스 차이만을 영상화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 파형 역산을 현장 자료에 적용할 때 일반적으로 나타나는 현상으로 이를 극복하기 위해서는 계속된 연구가 필요할 것으로 보인다.

결론

본 연구에서는 암염층이 존재하는 지질 구조에서 암염층 하부 구조를 영상화하기 위한 파형역산 기법으로 다중격자 기법을 적용하였다. 다중격자 기법을 합성 암염돔 모델, SEG/EAGE 암염돔 단면 자료에 적용한 결과 파형역산의 국부 최소값 문제를 완화시켜 기존의 파형역산 결과보다 향상된 속도 모델을 얻을 수 있었다. 고정격자를 이용하는 기존의 파형역산 기법이 암염돔 상부 경계만을 정확하게 역산하는 것과 달리 다중격자 기법을 적용한 파형역산은 암염돔 내부의 속도와 하부 경계면까지 정확하게 역산하였다. 다중격자 기법에 의한 역산 속도 모델을 사용한 구조보정 결과는 고정격자 기법에 비해 더욱 뚜렷한 암염돔 및 하부 구조 영상을 보여주었다. 현장 자료의 경우에는 저주파 대역의 부재 및 송신원 방사 패턴, 3차원 효과 등으로 인해 다중 격자 기법의 효과가 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 앞으로 현장 자료에 대한 적용성 향상 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사사

이 논문은 2006년도 한국석유공사의 지원에 의하여 연구되었습니다(Sub-salt 구조에 대한 구조보정 연구). 멕시코만 탐사 자료를 제공해 주고 출판을 허락해 준 GX Technology사에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

Baysal, E., Kosloff, D. D., and Sherwood, J. W. C., 1983,

- Reverse-time migration, *Geophysics*, **48**, 1514-1524.
- Bunks, C., Saleck, F. M., Zaleski, S., and Chavent, G., 1995, Multiscale seismic waveform inversion, *Geophysics*, **60**, 1457-1473.
- Claerbout, J. F., and Muir, F., 1973, Robust modeling with erratic data, *Geophysics*, **38**, 826-844.
- Fornberg, B., 1987, The pseudospectral method: Comparisons with finite-differences for the elastic wave equation, *Geophysics*, **52**, 483-501.
- Gazdag, J., 1981, Modeling of the acoustic wave equation with transform methods, *Geophysics*, **46**, 854-859.
- Gauthier, O., Virieux, J., and Tarantola, A., 1986, Two-dimensional nonlinear inversion of seismic waveforms: Numerical results, *Geophysics*, **51**, 1387-1403.
- Geller, R. J., and Hara, T., 1993, Two efficient algorithms for iterative linearized inversion of seismic waveform data, *Geophysical Journal International*, **115**, 699-710.
- Hemon, C., 1978, Equations d'onde et modeles, *Geophysical Prospecting*, **26**, 790-821.
- Kolb, P., Collino, F., and Lailly, P., 1986, Prestack inversion of a 1D medium, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, **74**, 498-506.
- Kosloff, D. D., and Baysal, E., 1982, Forward modeling by a Fourier method, *Geophysics*, **47**, 1402-1412.
- Lailly, P., 1983, The seismic inverse problem as a sequence of before stack migration, *Conference on inverse scattering: Theory and Application, Society for Industrial and Applied Mathematics*.
- Loewenthal, D., and Mufti, I. R., 1983, Reverse time migration in spatial frequency domain, *Geophysics*, **48**, 627-635.
- McMechan, G. A., 1983, Migration by exploration of time-dependent boundary values, *Geophysical Prospecting*, **31**, 413-420.
- Pica, A., Diet, J. P., and Tarantola, A., 1990, Nonlinear inversion of seismic reflection data in a laterally invariant medium, *Geophysics*, **55**, 284-292.
- Pratt, R. G., Shin, C., and Hicks, G. J., 1998, Gauss-Newton and full Newton methods in frequency domain seismic waveform inversions, *Geophysical Journal International*, **133**, 341-362.
- Pratt, R. G., 1999, Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part1: Theory and verification in a physical scale model, *Geophysics*, **64**, 888-901.
- Pyun, S., 2008, Comparison study of frequency-domain waveform inversion using various objective functions, Ph.D. thesis, Seoul National University.
- Shin, C., Ko, S., Marfurt, K. J., and Yang, D., 2003, Wave equation calculation of most energetic traveltimes and amplitudes for Kirchhoff prestack migration, *Geophysics*, **68**, 2040-2042.
- Shin, C., and Min, D. J., 2006, Waveform inversion using a logarithmic wavefield, *Geophysics*, **71**, R31-R42.
- Shin, C., Pyun, S., and Bednar, J. B., 2007, Comparison of waveform inversion, part 1: conventional wavefield vs logarithmic wavefield, *Geophysical Prospecting*, **55**, 449-464.
- Sirgue, L., and Pratt, R. G., 2004, Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies, *Geophysics*, **69**, 231-248.
- Symes, W. W., and Carazzone, J. J., 1991, Velocity inversion by differential semblance optimization, *Geophysics*, **56**, 654-663.
- Tarantola, A., 1984, Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation, *Geophysics*, **49**, 1259-1266.
- Whitemore, N. D., 1983, Iterative depth migration by backward time propagation, *53rd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 827-830.