

스트리머 방식 탐사 자료의 동시 송신원 전파형 역산을 위한 Global correlation 기반 목적함수 최적화 연구

손우현¹ · 편석준^{2*} · 장동혁² · 박윤희²

¹서울대학교 에너지시스템공학부

²인하대학교 에너지자원공학과

A Study on Optimization of the Global-Correlation-Based Objective Function for the Simultaneous-Source Full Waveform Inversion with Streamer-Type Data

Woohyun Son¹, Sukjoon Pyun^{2*}, Donghyuk Jang², and Yunhui Park²

¹Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

²Department of Energy Resources Engineering, Inha University

요 약: 동시 송신원 전파형 역산 기법은 계산량을 획기적으로 줄여 전파형 역산의 적용성을 높여준다. 그러나 다수의 송신원 모음 자료를 동시에 모델링하여 사용하기 때문에 관측 자료의 수진기 위치가 송신원에 따라 다른 경우, 나머지(residual) 파동장에 불필요한 값을 생성하게 되고 이는 파형역산의 수렴성을 저해하게 된다. 특히, 제한된 벌림 거리(offset)를 갖는 스트리머 방식의 탐사자료는 동시 송신원 기법을 적용하기에 가장 어려운 자료 형태이다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 최근에 global correlation에 기반한 목적함수가 제안되었고, 시간영역 전파형 역산에 성공적으로 적용되었다. 그러나 이 기법은 변형된 목적함수를 사용하기 때문에 나머지 파동장이 왜곡되고 경우에 따라 역산 결과에 부정적인 영향을 주기도 한다. 또한, 여러 가지 장점을 갖고 있는 주파수 영역 파형역산에 적용된 사례는 아직 보고된 적이 없다. 본 논문에서는 이러한 나머지 파동장의 왜곡을 최소화하기 위해 global correlation 계산 시 사용하는 자료에 진폭감쇠 기법을 적용한다. 진폭감쇠를 적용한 자료는 global correlation의 특성을 최적화하여 나머지 파동장의 왜곡을 줄이고 파형역산 결과를 향상시킨다. 시간 영역에서 구한 나머지 파동장을 주파수 영역에서 역전파시킴으로써 global correlation 기법을 주파수 영역에서 구현한다. 스트리머 방식의 합성 탐사자료를 이용한 예제를 통해 본 논문에서 제안한 기법이 기존의 global correlation 목적함수에 기반한 동시 송신원 전파형 역산보다 향상된 결과를 얻을 수 있음을 보여준다.

주요어: 전파형 역산, 동시 송신원, 주파수 영역, 스트리머 탐사 자료, global correlation

Abstract: The simultaneous-source full waveform inversion improves the applicability of full waveform inversion by reducing the computational cost. Since this technique adopts simultaneous multi-source for forward modeling, unwanted events remain in the residual seismograms when the receiver geometry of field acquisition is different from that of numerical modeling. As a result, these events impede the convergence of the full waveform inversion. In particular, the streamer-type data with limited offsets is the most difficult data to apply the simultaneous-source technique. To overcome this problem, the global-correlation-based objective function was suggested and it was successfully applied to the simultaneous-source full waveform inversion in time domain. However, this method distorts residual wavefields due to the modified objective function and has a negative influence on the inversion result. In addition, this method has not been applied to the frequency-domain simultaneous-source full waveform inversion. In this paper, we apply a time-damping function to the observed and modeled data, which are used to compute global correlation, to minimize the distortion of residual wavefields. Since the damped wavefields optimize the performance of the global correlation, it mitigates the distortion of the residual wavefields and improves the inversion result. Our algorithm incorporates the global-correlation-based full waveform inversion into the frequency domain by back-propagating the time-domain residual wavefields in the frequency domain. Through the numerical examples using the streamer-type data, we show that our inversion algorithm better describes the velocity structure than the conventional global correlation approach does.

Keywords: full waveform inversion, simultaneous-source, frequency-domain, streamer data, global correlation

2012년 6월 19일 접수; 2012년 7월 4일 수정; 2012년 7월 13일 채택;

*Corresponding author

E-mail: pyunsj@inha.ac.kr

Address: Department of Energy Resources Engineering, Inha University,
253 Yonghyun-dong Nam-gu, Incheon 402-751, Korea

서 론

컴퓨터 기술의 진보와 더불어 전파형 역산과 중합전 심도 구조보정(*prestack depth migration*)과 같은 지하 영상화 기술이 발전하고 있지만, 이를 3차원 문제나 수천 개의 송신원 자료에 적용할 경우 여전히 방대한 계산 시간과 비용이 요구되고 있다. 이러한 계산능력의 한계점을 해소하기 위해 전파형 역산 및 중합전 심도 구조보정 등의 영상화 기술에 사용될 수 있는 동시 송신원 기법이 제안되었다(Capdeville *et al.*, 2005). 이 기법은 다수의 송신원을 동시에 모델링함으로써 기존의 방법에 비해 송신원 개수에 비례하는 계산시간 단축효과가 있다. 물론 다중 송신원의 동시 모델링에 의한 혼선 잡음(*crosstalk noise*) 등의 문제점이 있지만, 이러한 혼선 잡음은 위상 부호화(*Phase encoding*) 기법 등으로 해결할 수 있다(Morton and Ober, 1998; Jing *et al.*, 2000; Romero *et al.*, 2000). 파형 역산과 중합전 구조보정 알고리즘의 기본적인 형태는 유사하므로 구조보정에서 이용되던 위상 부호화 기법은 동시 송신원 파형 역산에도 손쉽게 적용되었다. 최근에는 혼선 잡음을 효과적으로 제거하기 위해 무작위 위상 부호화(*random phase encoding*) 기법을 이용한 동시 송신원 역산 알고리즘이 제안되었다(Krebs *et al.*, 2009; Ben-Hadj-Ali *et al.*, 2009, 2011).

무작위 위상 부호화를 통해 제거할 수 있는 혼선 잡음과는 별개로 동시 송신원 기법은 관측 자료와 모델링 자료 간의 자료 획득 배열(*acquisition geometry*)이 다를 경우 추가적인 문제가 발생한다. 관측 자료에서 별첨거리의 제한으로 자료가 기록되지 않는 부분에도 모델링 자료는 파동장이 기록되고 이는 나머지 파동장을 심각하게 왜곡시키게 된다. Choi and Alkhalifah (2011)와 Routh *et al.* (2011)은 이러한 이벤트를 제거하기 위해 *global correlation* 기법(Fomel, 2007)에 기반한 목적함수를 적용하여 시간영역의 동시 송신원 전파형 역산을 수행하였다. 이 기법은 관측 자료와 모델링 자료간의 유사성을 측정함으로써 자료 획득 구조의 차이로부터 생성된 불필요한 이벤트를 감소시킨다. 그러나 *global correlation*에 기반한 목적함수는 관측 자료와 모델링 자료의 상관성에 따라 나머지 파동장의 진폭을 임의로 변조하기 때문에 전파형 역산 결과에 부정적인 영향을 줄 가능성이 있다.

본 연구에서는 나머지 파동장의 왜곡 현상을 최소화하기 위해서 진폭감쇠를 수행한 후 *global correlation*을 적용하는 동시 송신원 전파형 역산 알고리즘을 제안한다. *Global correlation*을 적용한 기존의 동시 송신원 역산 기법이 시간 영역에서 수행된 것과 달리 본 논문에서는 주파수 영역에서 수행하고, *global correlation*의 특성을 최적화하기 위해 나머지 파동장을 시간 영역에서 분석한다. 역산 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 제안된 동시 송신원 파형역산 결과를 진폭감쇠가 적용되지 않은 기법과 비교한다.

이 론

동시 송신원 전파형 역산 기법을 보다 명확하게 이해하기 위해 송신원이 2개인 경우를 가정하여 이론을 전개하기로 한다. 먼저, 기존의 주파수 영역 l_2 -노름(*norm*) 목적함수(*objective function*)는 다음과 같이 정의된다.

$$E = \sum_j (\tilde{u}_{1,j} - \tilde{d}_{1,j})(\tilde{u}_{1,j} - \tilde{d}_{1,j})^* + \sum_j (\tilde{u}_{2,j} - \tilde{d}_{2,j})(\tilde{u}_{2,j} - \tilde{d}_{2,j})^*, \quad (1)$$

여기서 $\tilde{u}_{i,j}$ 와 $\tilde{d}_{i,j}$ 는 주파수 영역 모델링 자료와 관측 자료, *는 켈레 복소수, $i(1,2)$ 와 j 는 송신원과 수신기 번호를 의미한다. 목적함수에 대한 경사 방향(*gradient direction*)은 역전파 기법(Shin *et al.*, 2007)에 의해 효율적으로 계산할 수 있다. k 번째 모델 변수 m_k 에 대한 식 (1)의 경사 방향은 다음과 같다.

$$\frac{\partial E}{\partial m_k} = \text{Re} \left[\left(-\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial m_k} \tilde{\mathbf{u}}_1 \right)^T \mathbf{S}^{-1} (\tilde{\mathbf{u}}_1 - \tilde{\mathbf{d}}_1)^* + \left(-\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial m_k} \tilde{\mathbf{u}}_2 \right)^T \mathbf{S}^{-1} (\tilde{\mathbf{u}}_2 - \tilde{\mathbf{d}}_2)^* \right], \quad (2)$$

여기서 \mathbf{S} 는 복소 임피던스(*impedance*) 행렬, T 는 전치행렬, $\tilde{\mathbf{u}}_i$ 와 $\tilde{\mathbf{d}}_i$ 는 i 번째 송신원에 대한 주파수 영역의 모델링 파동장 벡터와 관측 파동장 벡터를 의미한다.

기존의 파형 역산 기법은 각각의 송신원에 대해 모델링 자료와 관측 자료의 차이로 나머지 파동장을 정의하는 반면에, 동시 송신원 역산 기법은 여러 개의 송신원을 동시에 사용하여 얻은 모델링 자료와 관측 자료의 차이로 나머지 파동장을 계산하고 다음과 같이 목적함수를 정의한다.

$$E = \sum_j (a_1 \tilde{u}_{1,j} + a_2 \tilde{u}_{2,j} - a_1 \tilde{d}_{1,j} - a_2 \tilde{d}_{2,j})(a_1 \tilde{u}_{1,j} + a_2 \tilde{u}_{2,j} - a_1 \tilde{d}_{1,j} - a_2 \tilde{d}_{2,j})^*, \quad (3)$$

여기서 무작위 위상 부호화 함수 a_i 는 $|a_i| = |e^{i\theta}| = 1$ ($i = 1, 2$)와 같이 정의된다(Ben-Hadj-Ali *et al.*, 2009, 2011). 식 (3)에 대한 경사방향 또한 역전파 기법을 적용하면 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial E}{\partial m_k} = \text{Re} \left[\begin{aligned} & a_1^2 \left(-\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial m_k} \tilde{\mathbf{u}}_1 \right)^T \mathbf{S}^{-1} (\tilde{\mathbf{u}}_1 - \tilde{\mathbf{d}}_1)^* + a_1 a_2 \left(-\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial m_k} \tilde{\mathbf{u}}_1 \right)^T \mathbf{S}^{-1} (\tilde{\mathbf{u}}_2 - \tilde{\mathbf{d}}_2)^* \\ & + a_2 a_1 \left(-\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial m_k} \tilde{\mathbf{u}}_2 \right)^T \mathbf{S}^{-1} (\tilde{\mathbf{u}}_1 - \tilde{\mathbf{d}}_1)^* + a_2^2 \left(-\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial m_k} \tilde{\mathbf{u}}_2 \right)^T \mathbf{S}^{-1} (\tilde{\mathbf{u}}_2 - \tilde{\mathbf{d}}_2)^* \end{aligned} \right]. \quad (4)$$

식 (4)의 첫 번째 항과 네 번째 항의 a_1^2 과 a_2^2 은 항상 1이 되므로, 결국 식 (2)와 같아짐을 알 수 있다. 식 (4)의 두 번째 및 세 번째 항은 동시 송신원 기법을 적용할 때 송신원 간의 간섭에 의해 발생하는 혼선 잡음(*crosstalk noise*)이다. 이 혼선잡음을 제거하기 위해 무작위 위상 부호화 기법(Ben-Hadj-Ali *et al.*, 2009, 2011)을 적용하면 $a_1 a_2$ 는 1 또는 -1의 무작위 값을

가지게 되며, 역산 반복횟수가 증가할수록 혼선 잡음(두 번째 및 세 번째 항)은 일관성 없이 합쳐지므로 점차 상쇄되어 작아진다.

나머지(residual) 파동장 분석

앞 장에서 설명한 동시 송신원 역산 기법은 스트리머 탐사 자료에 적용하기 어려운 한계를 지닌다(Krebs *et al.*, 2009). 본 연구에서는 스트리머 탐사 자료에 대해 효과적으로 동시 송신원 기법을 적용할 수 있는 알고리즘을 구축하기 위해 나머지(residual) 파동장을 분석하였다. Fig. 2 (a)와 Fig. 2 (b)는 2개의 송신원을 동시에 사용하여 Marmousi 모델(Fig. 1 (a))로부터 생성된 관측 자료, 초기 속도 모델(Fig. 1 (b))로부터 생성된 모델링 자료를 각각 도시한 것이며, 이 때 전체 벌림(full-offset) 거리는 9.2 km이다. 전체 벌림 거리를 갖는 관측 자료와 모델링 자료를 이용하여 생성된 나머지 파동장(Fig. 2 (c))은 각각의 송신원으로부터 생성된 나머지 파동장을 중첩한 결과와 동일하기 때문에 동시 송신원 기법의 적용이 가능하다.

스트리머 탐사 자료에 대한 동시 송신원 기법의 적용 가능

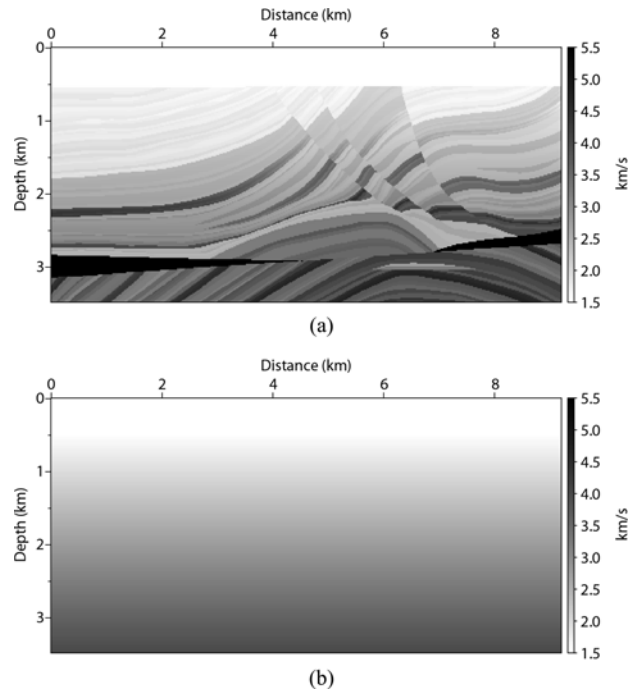


Fig. 1. (a) The Marmousi model and (b) the initial model.

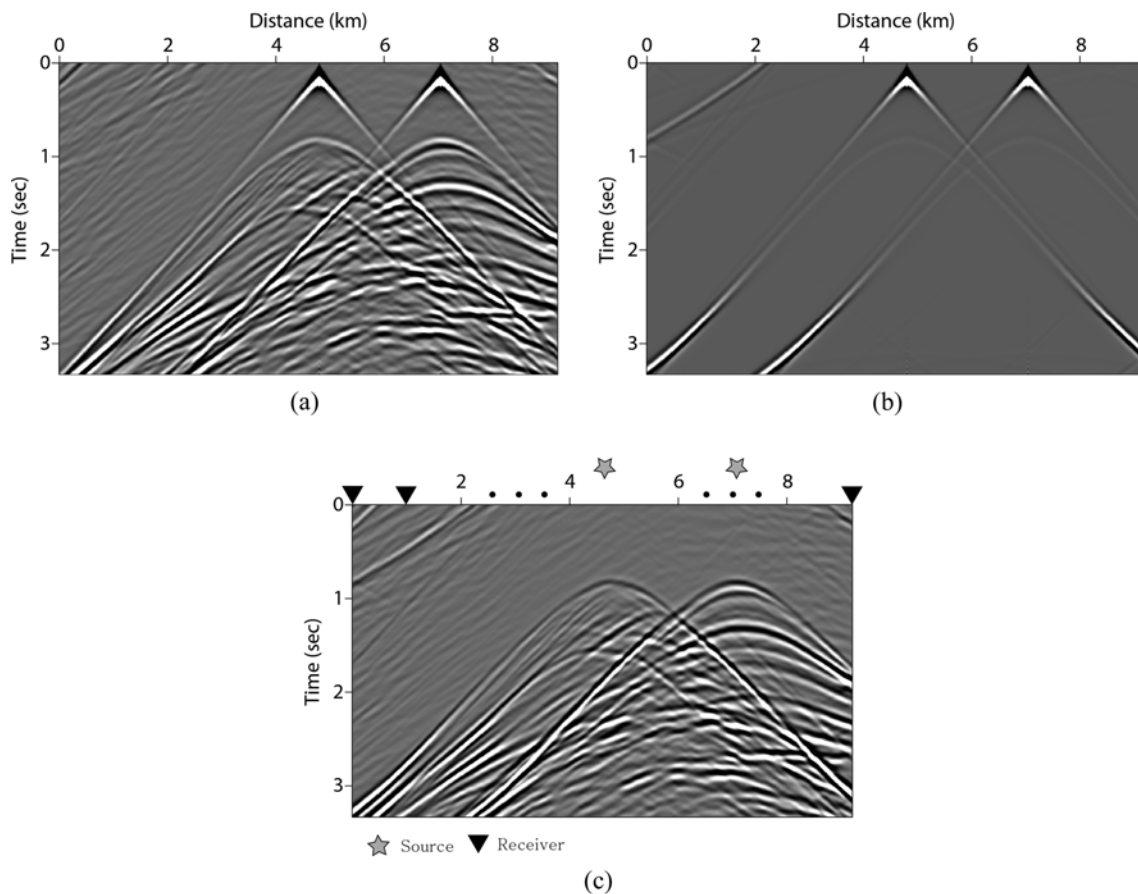


Fig. 2. (a) The full-offset synthetic data from the Marmousi model (Fig. 1 (a)), (b) the modeled data from the initial velocity model (Fig. 1 (b)), and the residual seismogram calculated by (c) simple subtraction.

성을 확인하기 위해 제한된 벌림(limited offset) 거리를 갖는 관측 자료를 생성하여 나머지 파동장을 분석하였다. Fig. 3 (a)는 2개의 송신원을 동시에 사용하여 Marmousi 모델(Fig. 1 (a))로부터 생성된 6.4 km의 제한된 벌림 거리를 갖는 관측 자료, Fig. 3 (b)는 초기 속도 모델(Fig. 1 (b))로부터 생성된 9.2 km의 전체 벌림 거리를 갖는 모델링 자료이다. 스트리머 탐사 자료와 같이 제한된 벌림 거리를 갖는 관측 자료를 이용할 경우에는 모델링 자료와의 수진기 배열 차이에 의해서 나머지 파동장에 불필요한 이벤트(Fig. 3 (c)의 원)가 남기 때문에 기

존의 동시 송신원 기법을 적용하기 어렵다.

Choi and Alkhalifah (2011)은 불필요한 이벤트를 제거하기 위해서 관측 자료와 모델링 자료 사이의 유사성(similarity)을 측정하는 방법인 global correlation (Fomel, 2007) 기법을 적용하여 시간 영역에서 목적함수를 정의하였다.

$$E = \sum_i \sum_j \left[\frac{\mathbf{u}_{ij} \cdot \mathbf{d}_{ij}}{|\mathbf{u}_{ij}| |\mathbf{d}_{ij}|} \right], \quad (5)$$

여기서 \mathbf{u}_{ij} 와 \mathbf{d}_{ij} 는 시간 영역의 모델링 자료와 관측 자료가

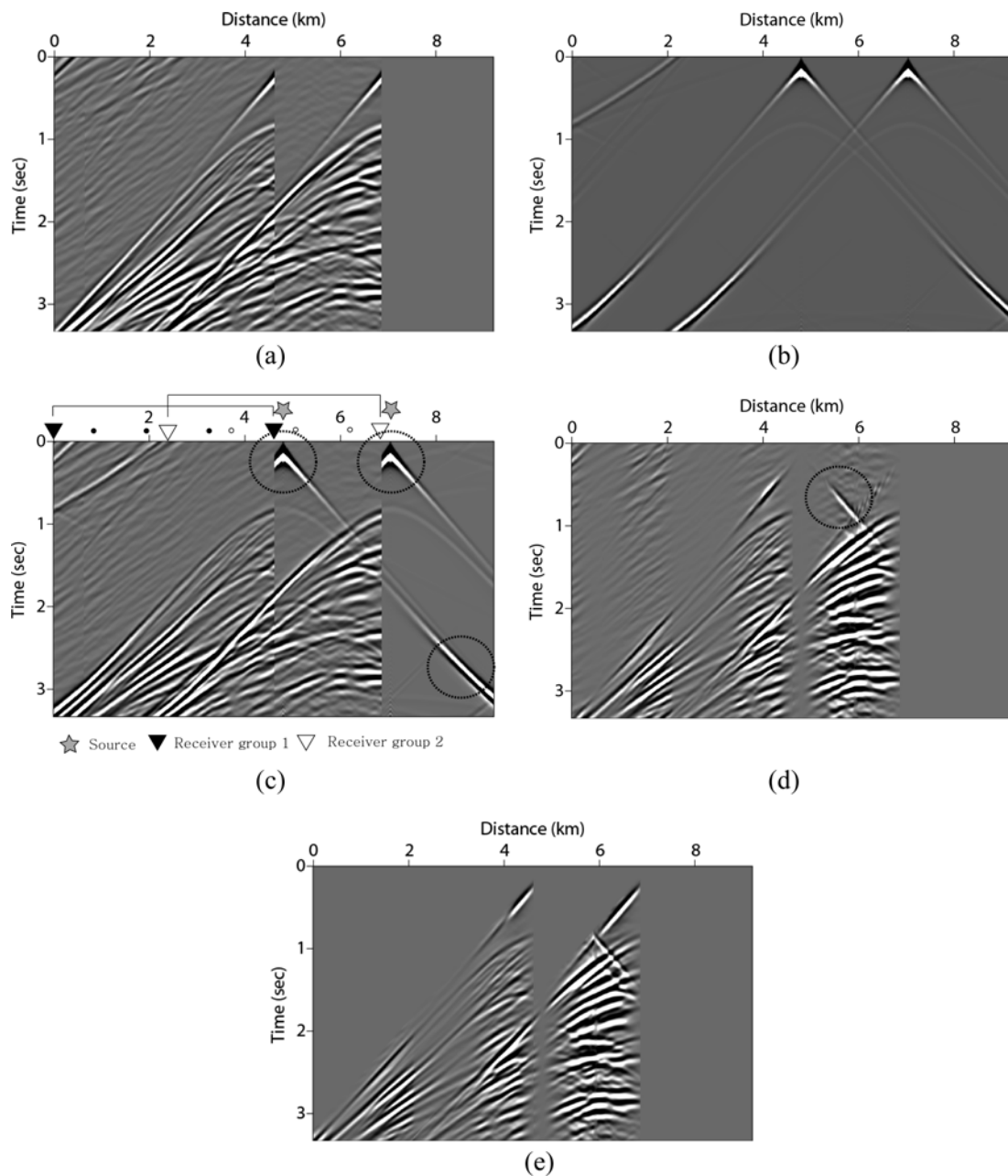


Fig. 3. (a) The limited-offset observed data from the Marmousi model (Fig. 1 (a)), (b) the modeled data from the initial velocity model (Fig. 1 (b)), and the residual seismograms calculated by (c) simple subtraction, (d) global correlation approach, (e) our attenuated global correlation approach.

고, i 와 j 는 송신원과 수신기 번호이다. 이를 통해 global correlation 기법에 기반한 목적함수는 정규화된 두 파동장 간의 영 지연 상호상관(zero-lag cross correlation)으로 정의됨을 알 수 있다. 이 때 상호상관의 값은 두 신호가 동일한 경우에 1의 값을 갖지만, 신호간의 유사성이 낮은 지점에서는 0에 가까운 값을 갖게 된다. 따라서, global correlation 목적함수에 기반한 동시 송신원 기법을 적용하면 관측 자료와 모델링 자료 간의 수신기 배열 차이에 의해 나머지 파동장에서 생성되는 불필요한 이벤트를 효과적으로 줄일 수 있다. Fig. 3 (d)는 global correlation 기법을 적용하여 얻은 나머지 파동장이다. 이 기법은 Fig. 3 (c)에서 벌림(offset) 차이로부터 생성된 이벤트를 제거하는 효과를 보이지만, 여전히 Fig. 3 (d)의 타원으로 표시된 부분에서 신호를 왜곡시킨다.

본 연구에서는 시간 영역에서 정의된 global correlation 기법을 주파수 영역 동시 송신원 파형역산에 적용하기 위해 주파수 영역에서 생성된 자료를 시간 영역으로 변환시켜 나머지 파동장을 계산하였다(Fig. 4). 이 때 주파수 영역의 자료를 시간 영역으로 변환 시 발생하는 두루마리 현상(wrap around)을 억제하기 위해 직접파 도달 이전의 신호에 대해 뮤팅(muting)을 적용하였다(Fig. 3 (e)). 시간 영역의 관측 자료를 사용할 경우에는 뮤팅을 적용할 필요가 없고, 현장 자료의 경우에는 잡음 수준에 따라 적용 여부를 결정해야 한다. 또한, Fig. 3 (d)에서 나타났던 왜곡 현상을 최소화하기 위해 시간에 따라 지수함수적으로 감쇠하는 가중함수인 $e^{-\alpha t}$ 를 나머지 파동장에 곱해 주었다. 여기서 α 는 감쇠 상수이며 여러 번의 실험을 통해 10으로 결정하였고, t 는 시간을 의미한다. 감쇠함수가 적용된 자료를 이용하여 global correlation 기법에 따라 나머지 파동장을 얻었다(Fig. 3 (e)). Fig. 3 (e)에서 보는 것과 같이 진폭 감쇠를 이용한 나머지 파동장이 좀 더 효과적으로 불필요한 이벤트를 감소시킨 것을 확인할 수 있다. 이는 감쇠함수에 의해 자료의 직접파가 강조되어 수신기 배열에 의한 유사성을 좀 더 효과적으로 대표할 수 있기 때문으로 생각된다.

주파수 영역 동시 송신원 전파형 역산 기법

일반적인 동시 송신원 전파형 역산 알고리즘은 시간 영역(Krebs *et al.*, 2009)과 주파수 영역(Ben-Hadj-Ali *et al.*, 2009, 2011)에서 제안되었고, 기존의 global correlation을 적용한 동시 송신원 역산 기법(Choi and Alkhalifah 2011; Routh *et al.*, 2011)은 시간 영역에서만 수행되었다. 주파수 영역 역산은 시간 영역에 비해 임피던스 행렬의 분해(factorization)를 한번만 수행한 후 전향/후향 대입(forward/backward substitution)을 통해 여러 개의 송신원에 대한 파동장을 모사할 수 있기 때문에 계산 효율성이 높으며, 또한 주파수를 선택할 수 있는 다중스케일(multi-scale) 방식의 역산이 가능하여 비선형성(nonlinearity)에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 장점을 지닌다(Sirgue

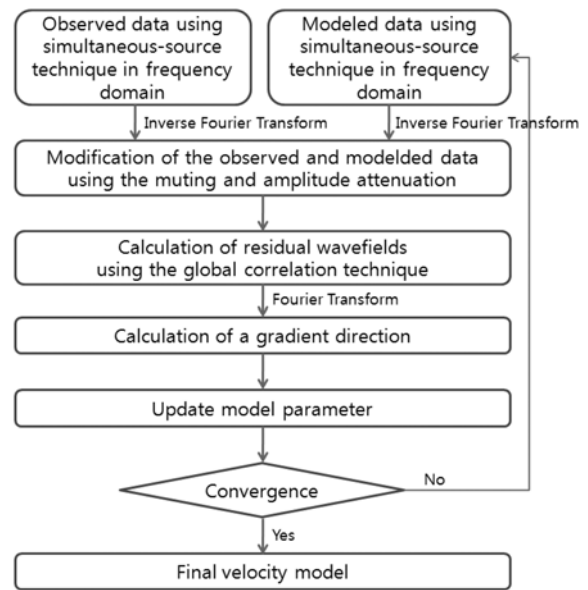


Fig. 4. The flowchart of the simultaneous-source full waveform inversion algorithm using our attenuated global correlation technique.

and Pratt, 2004; Virieux and Operto, 2009; Kim *et al.*, 2011).

본 연구에서는 global correlation 기법을 적용한 동시 송신원 전파형 역산 기법을 주파수 영역에서 구현하는 방법을 제시하였고, 전체적인 역산 과정을 Fig. 4에 나타내었다. 먼저, 동시 송신원 기법을 적용하여 주파수 영역에서 자료를 생성하고, 역 푸리에(Fourier) 변환을 수행한다. 이 때 여러 개의 송신원을 동시에 가하여 하나로 합쳐진 자료를 역 푸리에 변환하기 때문에 추가적인 계산 시간이 많이 요구되지 않아, 기존의 주파수 영역 동시 송신원 전파형 역산과 비슷한 계산 효율성을 지닌다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 시간 영역으로의 역 푸리에 변환 시 관측 자료 및 모델링 자료에 두루마리 현상(wrap around)을 억제하기 위한 전 처리로써 뮤팅을 적용하였다. 또한 global correlation 기법을 최적화하기 위해 진폭감쇠 작업을 수행하였다. 전 처리된 자료에 대해 global correlation 기법을 적용하여 나머지 파동장을 계산하고, 푸리에 변환을 수행한다. 주파수 영역으로 변환된 나머지 파동장을 역전파(Shin *et al.*, 2007)시켜 효율적으로 목적함수의 경사방향을 계산한다. 수렴 속도를 향상시키기 위해 유사-헤시안(pseudo-Hessian)행렬의 대각 성분을 이용하여 경사 방향을 선처리(pre-conditioning)하고, Ha *et al.* (2009)이 제안한 주파수 별 가중평균 기법을 적용하여 최종 경사 방향을 얻는다. 최종적으로 얻은 경사 방향에 따라 모델 변수를 반복적으로 개선하여 역산 속도모형을 구한다.

수치 예제

본 연구에서 제안한 역산 알고리즘의 효율성을 확인하기 위

해 Fig. 1 (a)와 같이 상부에 물층을 추가한 Marmousi 모델을 사용하였다(Versteeg, 1994). 물층이 추가된 Marmousi 모델의 크기는 수평 거리가 9.2 km이며, 최대 심도가 3.472 km이다. 송신원은 192 m 간격으로 48개를 설정하였고, 각 송신원에 대한 수신기 간격은 16 m이다. 스트리머 탐사 방식의 관측 자료를 생성하기 위해 근거리 벌림(offset)은 176 m, 원거리 벌림은 6.4 km로 설정하였다. 인공합성 관측 자료는 주파수 영역의 유한요소 모델링 기법을 적용하여 생성하였다. 최대 주파수가 18 Hz인 일차 미분 가우스 함수(first derivative Gaussian function)를 송신원 파형으로 이용하였다. 역산을 위한 초기 모델은 심도가 깊어짐에 따라 속도가 1.5 km/s부터 4 km/s까지 선형적으로 증가한다(Fig. 1 (b)).

기존의 동시 송신원 전파형 역산 기법에 의한 결과는 Fig. 5 (a)에 나타내었다. 이를 통해 스트리머 자료에 기존의 동시 송

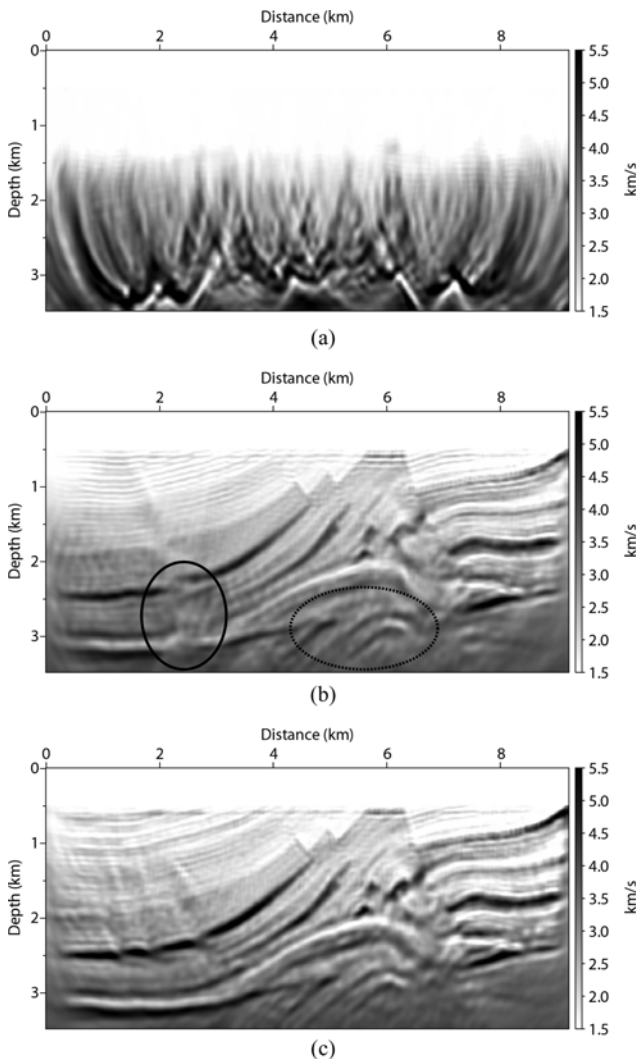


Fig. 5. The inverted velocity models obtained by using the simultaneous-source inversion technique with (a) the conventional, (b) global correlation approaches and (c) the new global correlation approach.

신원 역산 기법을 적용하여 역산할 경우 수렴하지 않음을 확인하였다. 이는 이론에서 설명한 바와 같이 관측 자료와 모델링 자료 사이의 벌림 차이로 인해 나머지(residual) 파동장에 원치 않는 이벤트가 발생하기 때문이다(Fig. 3 (c)). Fig. 5 (b)는 global correlation 목적함수에 기반한 동시 송신원 전파형 역산 결과이다. 이 기법은 Marmousi 모델의 전반적인 속도 구조는 묘사하지만, Fig. 3 (d)에서 확인된 나머지 파동장의 왜곡으로 인해 심부의 배사구조(Fig. 5 (b)의 점선 타원)가 정확하게 나타나지 않으며 불연속적인 속도 구조(Fig. 5 (b)의 실선 타원)를 생성한다. 본 연구에서 제안한 뮤팅과 진폭감쇠를 수행한 후 global correlation 기법을 적용한 동시 송신원 전파형 역산 결과는 Fig. 5 (c)에 나타내었다. 본 기법은 나머지 파동장의 왜곡을 감소시키는 효과(Fig. 3 (e))를 얻을 수 있기 때문에 기존의 global correlation을 적용한 동시 송신원 전파형 역산 기법(Fig. 5 (b))보다 모델의 배사 구조 및 암염 구조의 연속성이 향상된 역산 결과를 얻을 수 있었다.

결론

본 연구에서는 스트리머 자료에 적용 가능한 효율적인 주파수 영역 동시 송신원 전파형 역산 기법을 제안하였다. 알고리즘의 효용성을 확인하기 위해 나머지 파동장을 분석하였고, 이를 통해 l_2 -노름을 이용한 역산 기법은 모델링 자료와 스트리머 방식의 관측자료 간의 벌림 거리 차이로 인해 불필요한 이벤트가 발생됨을 확인하였다. 또한 기존의 global correlation 목적함수에 기반한 동시 송신원 기법은 이러한 이벤트를 제거하는 효과를 보이나, 일부 구간에서 왜곡된 신호가 생성되었다. 왜곡 현상을 최소화하기 위해 진폭감쇠를 적용한 후 global correlation에 기반한 동시 송신원 기법을 수행하였다. 진폭감쇠는 신호에 감쇠함수를 곱해주어 직접파의 에너지를 강조시키는 효과가 있으므로, 직접파에 가중치를 주고 global correlation을 수행하면 효과적으로 탐사 자료 획득 구조에 맞는 나머지 파동장을 얻을 수 있었다. 주파수 영역에서 생성된 자료를 시간 영역으로 변환하여 나머지 파동장을 계산하는 과정에서 발생하는 두루마리 현상(wrap around)을 억제하기 위해 선처리 작업으로써 뮤팅을 적용하였다. 수치 예제를 통해 진폭감쇠와 global correlation 기법에 기반한 본 알고리즘은 기존의 global correlation 기법만을 적용하는 동시 송신원 전파형 역산에 비해 모델의 심부 및 암염 구조에서 향상된 역산 결과를 생성하며, 스트리머 방식의 탐사 자료에 대한 역산에 적합함을 확인하였다. 진폭감쇠를 적용한 본 파형역산 기술은 global correlation의 특성을 최적화하여 나머지 파동장의 왜곡을 줄이고 파형역산 결과를 향상시키는 것으로 생각된다. 향후 현장 자료에 대한 적용성 연구를 통해 자동화된 최적 감쇠계수 선택 기법을 개발해야 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 자원개발 특성화대학 사업 및 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2010T100200376).

참고문헌

- Ben-Hadj-Ali, H., Operto, S., and Virieux, J., 2009, Three dimensional frequency-domain full waveform inversion with phase encoding, *79th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 2288-2292.
- Ben-Hadj-Ali, H., Operto, S., and Virieux, J., 2011, An efficient frequency-domain full waveform inversion method using simultaneous encoded sources, *Geophysics*, **76**, R109-R124.
- Capdeville, Y., Gung, Y., and Romanowicz, B., 2005, Towards global earth tomography using the spectral element method: A technique based on source stacking, *Geophysical Journal International*, **162**, 541-554.
- Choi, Y., and Alkhalifah, T., 2011, Application of encoded multi-source waveform inversion to marine-streamer acquisition based on the global correlation, *73rd Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts*, F026.
- Fomel, S., 2007, Local seismic attributes, *Geophysics*, **72**, A29-A33.
- Ha, T., Chung, W., and Shin, C., 2009, Waveform inversion using a back-propagation algorithm and a Huber function, *Geophysics*, **74**, R15-R24.
- Jing, X., Finn, C. J., Dickens, T. A., and Willen, D. E., 2000, Encoding multiple shot gathers in prestack migration, *70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 786-789.
- Kim, Y., Cho, H., Min, D.-J., and Shin, C., 2011, Comparison of Frequency-Selection Strategies for 2D Frequency-Domain Acoustic Waveform Inversion, *Pure and Applied Geophysics*, **168**, 1715-1727.
- Krebs, J. R., Anderson, J. E., Hinkley, D., Neelamani, R., Lee, S., Baumstein, A., and Lacasse, M.-D., 2009, Fast full-wavefield seismic inversion using encoded sources, *Geophysics*, **74**, WCC177-WCC188.
- Morton, S. A., and Ober, C. C., 1998, Faster shot-record depth migration using phase encoding, *68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 1131-1135.
- Romero, L. A., Ghiglia, D. C., Ober, C. C., and Morton, S. A., 2000, Phase encoding of shot records in prestack migration, *Geophysics*, **65**, 426-436.
- Routh, P. S., Krebs, J. R., Lazaratos, S., Baumstein, A. I., Chikichev, I., Lee, S., Downey, N., Hinkley, D., and Anderson, J. E., 2011, Full-wavefield inversion of marine streamer data with the encoded simultaneous source method, *73rd Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts*, F032.
- 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.
- Versteeg, R., 1994, The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set, *The Leading Edge*, **13**, 927-936.
- Virieux, J., and Operto, S., 2009, An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics, *Geophysics*, **74**, WCC1-WCC26.