

## 시간 영역에서의 나머지 파동장 전처리를 적용한 주파수 영역 파형역산

손우현<sup>1)</sup>, 편석준<sup>2)</sup>, 신창수<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 에너지시스템공학부, son0228@gpl.snu.ac.kr

<sup>2)</sup>인하대학교 에너지자원공학과

### Frequency-domain Waveform Inversion using Time-domain Residual Wavefield Preprocessing

Woohyun Son<sup>1)</sup>, Sukjoon Pyun<sup>2)</sup> and Changsoo Shin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Energy Systems Engineering, Seoul National University

<sup>2)</sup>Dept. of Energy Resources Engineering, Inha University

탄성과 자료에 대한 완전 파형역산은 1980년대 이후로 활발히 연구되어 왔다. Talantola (1984) 이후로 많은 연구자들은 완전 파형역산 시 계산의 한계를 극복하기 위해 파동 방정식의 수반 행렬 특성을 적용하여 그래디언트 기법에 기초한 알고리즘을 개발하였다. 그러나 완전 파형역산은 국부 최소값 문제, 불량 조건(ill-posed) 문제, 잡음에 민감한 문제점 등이 존재하며, 이를 해결하기 위해 다중격자 역산 (Bunks et al., 1995), 견고한 오차법(robust criteria)에 관한 연구(Djikpesse and Tarantola, 1999; Shin et al., 2007) 등이 수행되었다. 이들 중  $l_1$  노름(norm)을 이용한 최소절대 오차법(least-absolute criteria)은 완전 파형역산에 직접 적용될 수 있는 유용한 알고리즘 중의 하나이다. 최소절대 오차법은 시간 영역(Djikpesse and Tarantola, 1999)과 주파수 영역(Pyun et al., 2009)의 완전 파형역산에 이미 적용되었다.

본 연구에서는  $l_1$  노름을 이용하여 시간 영역에서 나머지 파동장을 계산하고, 이를 주파수 영역 파형역산에 적용하는 연구를 수행하였다. 시간 영역에서  $l_1$  노름에 의해 정의된 나머지 파동장들은 부호 함수(signum function)로 표현된다. 이것은 전처리된 나머지 파동장으로 생각할 수 있으며, 주파수 영역 파형역산에 적용될 수 있다. 의미 없는 오차의 영향을 배제하기 위해 오차의 크기에 따른 나머지 파동장 자름 기법을 적용한다. 본 연구에서 제안된 방법을 검증하기 위해서 SEG/EAGE 암염동 모델에 대해 파형역산을 수행하고, 기존의 주파수 영역 파형역산 결과와 비교한다.

#### 나머지 파동장 자름과 수정기법

시간 또는 주파수 영역 파형역산은 저주파수 성분이 부재할 경우에 큰 규모의 구조를 구

현할 수 없다(Jannane et al., 1989). 본 연구에서는 나머지 파동장의 저주파수 성분을 강조하기 위해 시간영역에서 나머지 파동장 자름과 부호 함수로의 수정기법을 적용한다. 먼저, 시간 영역에서의 나머지 파동장을 다음과 같이 정의하였다.

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\omega)e^{i\omega t} d\omega - d(t) \quad (1)$$

여기서  $r(t)$ 는 시간 영역의 나머지 파동장,  $u(\omega)$ 는 주파수 영역의 모델링 파동장,  $\omega$ 는 각 주파수,  $d(t)$ 는 관측 파동장이다. Fig. 1은 유한 차분 모델링으로 얻은 공통 송신원 모습이다. 식 (1)을 이용하여 나머지 파동장을 생성하고, 나머지 파동장의 양상을 분석하였다. Fig. 2a는 송신원이 8.0 km 위치에 있을 때 나머지 파동장이다. Fig. 2b는 Fig. 2a에서 최대값의 90 % 보다 큰 값들만 남기고, 그 이외의 값들은 잘라낸 나머지 파동장이다. Fig. 2c는 Fig. 2a에서 중간 값보다 작은 나머지 파동장 중에서 최대값의 90 % 보다 큰 값들을 도기한 것이다. Fig. 2d는 Fig. 2c에서 중간 값보다 작은 나머지 파동장 중에서 최대값의 90 % 보다 큰 값이다. Fig. 2b-d를 통하여 각 단계에서 나머지 자름 기법으로 추출된 파들은 반사파와 유사한 형태임을 알 수 있었다. 잘려진 시간영역 나머지 파동장은 부호 함수를 적용하여 수정하고, 이를 푸리에 변환하여 주파수 영역 나머지 파동장을 얻는다.

$$\tilde{r}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{sgn}[\text{Trc}\{r(t)\}]e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

여기서  $\tilde{r}(\omega)$ 는 주파수 영역 나머지 파동장,  $\text{sgn}(g)$ 는 부호 함수,  $\text{Trc}$ 는 자름 연산자이다. Fig. 2b-d의 세 가지 나머지 파동장을 이용하여 각각의 그래디언트 방향을 계산하고, 이를 평균하여 최종 그래디언트 방향을 결정하였다.

### 수치 예제

SEG/EAGE 암염동 모델에 대해 본 연구에서 제안한 알고리즘의 테스트 수행하였다(Fig. 3a). 먼저, 시간 영역에서 유한 차분 모델링 기법을 이용하여 인공합성 자료를 생성하였다. 송신원 파형은 일차 미분 가우스 함수를 사용하였고, 최대 주파수는 20 Hz 이다. 역산을 위해 인공합성 자료에 고주파 차단 필터를 적용하여 5 Hz의 최대 주파수를 가지는 자료로 재생성하였다. 초기 속도 모델은 1.679부터 4.45 km/s까지 깊이에 따라 선형적으로 증가한다. 역산 알고리즘은 주파수 영역에서의 유한 요소 모델링 기법을 기반으로 한다. 앞 절에서 설명한 규칙에 따라 시간 영역에서 나머지 파동장을 잘라 내고, 이를 부호 함수에 의해 수정하였다. 수정된 나머지 파동장은 주파수 영역으로 변환시키고, 그래디언트 방향을 결정하기 위해 사용하였다. Fig. 3b는 잘림 과정을 수행하지 않고, 부호 함수를 적용하여 수정한 나머지 파동장을 사용하여 역산된 속도 모델이다. 이 결과는 부호 함수만을 적용한 시간 영역에서 나머지 파동장 수정 기법이 주파수 영역 파형 역산에 적절

치 않음을 보여준다. 그러나, 자름 기법과 부호 함수를 동시에 적용하면 Fig. 3c에서와 같이 더 향상된 역산 결과를 얻을 수 있다. 모델의 암염 구조가 잘 영상화되고, 암염돔 하부의 저속도대가 뚜렷하게 역산된다. 기존 방법과의 비교를 위해 통상적인 나머지 파동장을 이용한 주파수 영역 파형역산을 수행하였다. Fig. 3d는 일반적인 그래디언트 방법을 기반으로 주파수 영역 파형 역산을 적용하여 역산된 속도 모델이다. 암염 구조는 잘 역산된 것처럼 보이지만, 암염돔 하부의 저속도대는 제대로 구현하지 못한다. 역산결과를 통하여 본 연구에서 제안한 나머지 자름과 수정 기법이 역산 결과를 향상시킨다는 것을 확인할 수 있다.

## 결 론

나머지 파동장의 자름과 수정 기법을 적용하여 주파수 영역 완전 파형역산을 실시하였다. 나머지 파동장의 자름 기법은 주된 나머지 오차들을 강조하고 잡음 수준의 나머지 오차를 배제하는 효과를 준다. 이는 자동화된 반사 토모그래피를 파형역산기법으로 구현한 것으로 해석할 수 있다. 잘려진 나머지 파동장은 부호 함수를 적용하여 수정함으로써 견고한 최소절대 오차법(least-absolute criteria)의 특징을 수용할 수 있었다. 수치 예제를 통하여 본 연구에서 제안한 방법이 암염돔 하부의 저속도층 역산 결과를 향상시키는데 효과적임을 보여주었다.

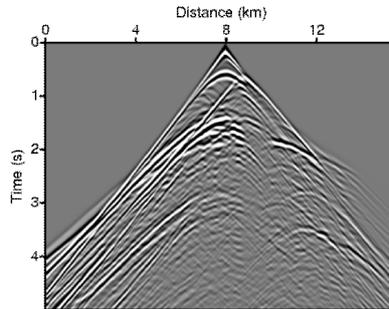
## 사 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010T100200133)

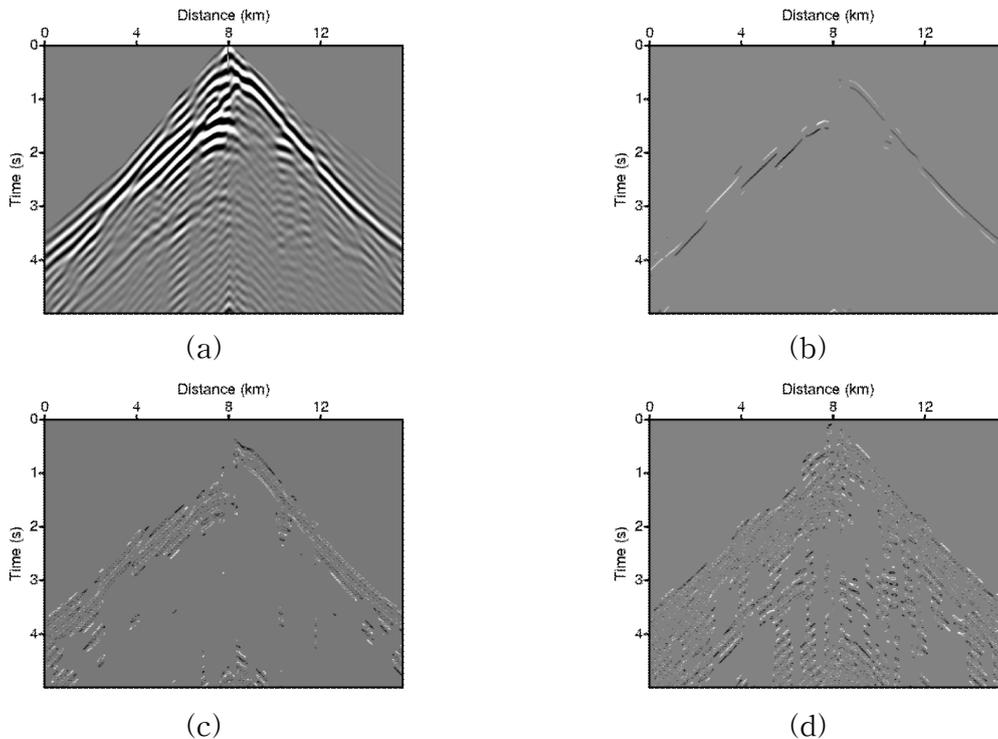
## 참고 문헌

- Bunks, C., F. M. Saleck, S. Zaleski, and G. Chavent, 1995, Multiscale seismic waveform inversion: *Geophysics*, **60**, 1457-1473.
- Djikpesse, H. A., and A. Tarantola, 1999, Multiparameter  $l_1$  norm waveform fitting: Interpretation of Gulf of Mexico seismograms: *Geophysics*, **64**, 1023-1035.
- Jannane, M., W. Beydoun, E. Crase, D. Cao, Z. Koren, E. Landa, M. Mendes, A. Pica, M. Noble, G. Roeth, S. Singh, R. Snieder, A. Tarantola, D. Trezeguet, and M. Xie, 1989, Wavelengths of earth structures that can be resolved from seismic reflection data: *Geophysics*, **54**, 906-910.
- Pyun, S., W. Son, and S. Shin, 2009, Frequency-domain waveform inversion using an  $l_1$ -norm objective function: *Exploration Geophysics*, **40**, 227-232.
- Shin, C., S. Pyun, and J. B. Bednar, 2007, Comparison of waveform inversion, part 1: conventional wavefield vs logarithmic wavefield: *Geophysical Prospecting*, **55**, 449-464.

Tarantola, A., 1984, Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation: *Geophysics*, **49**, 1259–1266.



**Fig. 1.** A common shot gather obtained by a finite-difference method.



**Fig. 2.** (a) The filtered residual seismogram without truncation. (b) The pre-processed residual wavefields with the values less than 90th percentile truncated, (c) with the values less than 90th percentile truncated from the residual wavefields consisting of the values less than its median and (d) with the values larger than 90th percentile from the residual wavefields consisting of the values less than its median.

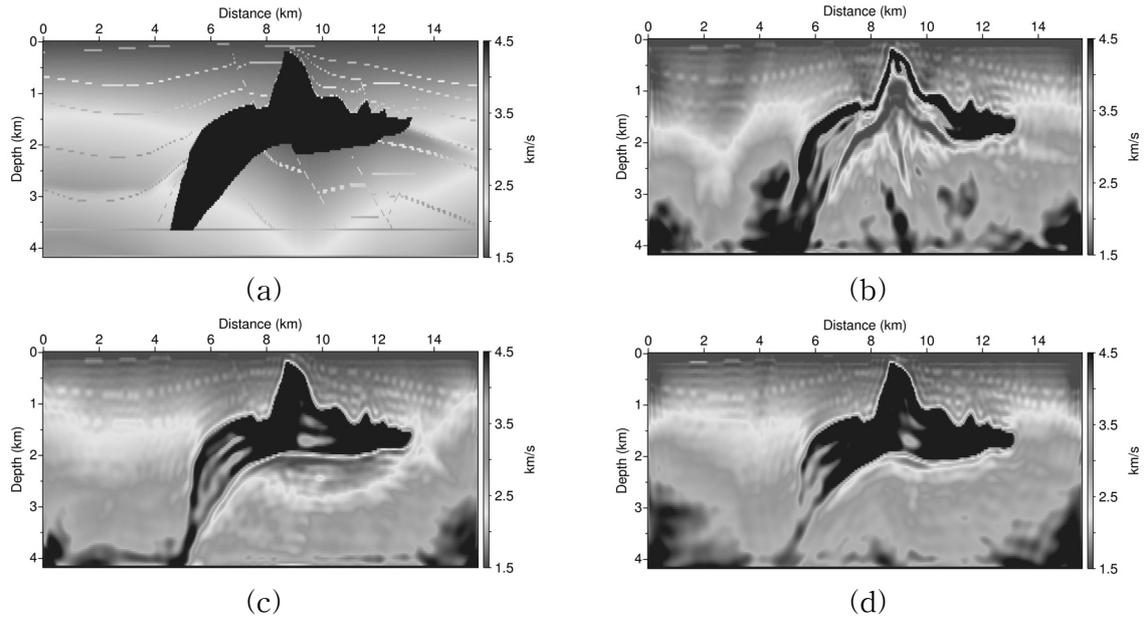


Fig. 3. (a) The SEG/EAGE salt-dome velocity model. (b) The inverted velocity models obtained by using the residual wavefields modified with signum function but without truncation, (c) by using the residual wavefields modified with signum function and truncation and (d) by using the conventional gradient-based frequency-domain waveform inversion algorithm.