

동시 송신원을 이용한 주파수영역 탄성과 완전파형역산

정우돈¹⁾, 손우현¹⁾, 편석준²⁾, 민동주¹⁾

¹⁾서울대학교 에너지시스템공학부, woodon.jeong@gmail.com

²⁾인하대학교 에너지자원공학과

Frequency-domain elastic full waveform inversion using simultaneous sources

Woodon Jeong¹⁾, Woohyun Son¹⁾, Sukjoon Pyun²⁾ and Dong-Joo Min¹⁾

¹⁾Dept. of Energy Systems Engineering, Seoul National University

¹⁾Dept. of Energy Resources Engineering, Inha University

1. 서론

지하매질의 성질을 규명하는데 있어서 탄성과 파형역산 기술이 핵심적인 역할을 해오고 있는 가운데 많은 연구가 보다 견고하고 정밀한 파형역산 알고리즘을 개발하기 위해 진행되어 왔다(Tarantola, 1984; Pratt *et al.*, 1998). 하지만 다중 성분의 자료 해석이 가능해지고 3차원 탐사자료에 대한 파형역산 연구가 수행되면서, 파형역산 알고리즘 자체의 견고함이나 정확도가 아닌 계산에 소요되는 시간과 비용이 커다란 문제로 부상하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Romero *et al.*(2000) 가 위상 부호화(Phase encoding) 기법을 중합전 구조보정에 적용한 이후로, 많은 연구들이 위상 부호화를 통한 동시 송신원 파형역산을 개발하여 계산 시간과 비용을 획기적으로 절감하고 있다(Krebs *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2010; Ben-Hadj-Ali *et al.*, 2011). 현재까지의 동시 송신원 파형역산 알고리즘은, 그것이 제안된 이후로 시간영역에서 주파수영역, 2차원에서 3차원 파형역산에 까지 확장되어 왔지만 탄성매질에 대한 연구 사례는 아직까지 없었다.

본 연구에서는 탄성 매질을 고려한 주파수 영역 동시 송신원 파형역산 알고리즘을 개발하였다. 개별 송신원을 하나로 묶어 동시 송신원으로 사용하며 발생하는 혼선잡음(Crosstalk noise)은 무작위 위상 부호화 함수에 의하여 서로 상쇄시킬 수 있으며, 이를 통하여 얻는 결과는 일반적인 파형역산의 결과에 견줄만한 양질의 결과를 보여준다. 본 연구에서 제안된 알고리즘을 검증하기 위해서 탄성 Marmousi-2 모델에 대해 파형역산을 수행하고, 기존의 일반적인 탄성과 파형역산 결과와 비교한다.

2. 위상 부호화를 통한 동시 송신원 기술

개별의 송신원은 위상 부호화를 통하여 하나의 동시 송신원으로 결합 할 수 있다. 이를 통하여 주파수 영역 파형 역산 알고리즘에서의 송신원 루프(loop)를 간결화 하여 계산 시간과 비용을 절감할 수 있게 된다. 완전 파형 역산을 수행할 때의 효율성을 위하여 파동방정식의 수반 행렬 특성을 적용하여 최대급경사 기법에 기반한 알고리즘을 사용하는 경우, 일반적인 파형 역산에서 두 개의 송신원과 하나의 수신기만을 가정하여 잔차에 대한 목적함수와 최대급경사는 간소화 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{1}{2}(u_1 - d_1)\overline{(u_1 - d_1)} + \frac{1}{2}(u_2 - d_2)\overline{(u_2 - d_2)} \quad (1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial p} = \frac{\partial u_1}{\partial p}\overline{(u_1 - d_1)} + \frac{\partial u_2}{\partial p}\overline{(u_2 - d_2)} \quad (2)$$

u 와 d 는 각각 주파수 영역 모델링 파동장과 관측 파동장을 나타내며, p 는 매질의 매개변수를, 아래첨자는 각각의 송신원 번호를 나타낸다. 식 (1), (2)에 동시 송신원을 적용할 경우 목적함수와 최대급경사는 다음과 같이 정의 된다.

$$E = \frac{1}{2}\{(u_1 + u_2) - (d_1 + d_2)\}\overline{\{(u_1 + u_2) - (d_1 + d_2)\}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial p} = \frac{\partial u_1}{\partial p}\overline{(u_1 - d_1)} + \frac{\partial u_2}{\partial p}\overline{(u_2 - d_2)} + \frac{\partial u_1}{\partial p}\overline{(u_2 - d_2)} + \frac{\partial u_2}{\partial p}\overline{(u_1 - d_1)} \quad (4)$$

식 (4)에서 볼 수 있듯이 식 (2)에서는 관찰 할 수 없었던 혼선잡음 항들이 발생한 것을 알 수 있다. 이를 제거하기 위하여 동시 송신원에 대한 위상 부호화를 수행하게 되며 이때 파형 역산에서 사용되는 동시 송신원은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{f} = \sum_{j=1}^{N_s} a_j f_j \quad (5)$$

여기서 \tilde{f} 와 f_j 는 각각 동시 송신원 벡터와 개별 송신원 벡터, a_j 는 무작위 위상 부호화 함수이다. 무작위 위상 부호화 함수는 $|a_j| = |\exp(i\phi_j)| = 1$ 이며 여기서 $i = \sqrt{-1}$ 이다. 위상 부호화 된 동시 송신원 벡터를 통하여 파형 역산을 수행할 경우, 식 (4)에서 발생하는 혼선잡음 항은 각각 부호화 되어 상쇄된다.

3. 수치 예제

탄성 Marmousi-2 모델에 대하여 본 연구에서 제안하는 동시 송신원 파형 역산 알고리즘을 검증하였다. 본래의 모델은 물 층과 아주 낮은 속도의 S 파 속도 모델을 가지고 있기 때문에 많은 수의 격자를 필요로 한다. 컴퓨터의 메모리 사용과 계산 비용을 줄이기 위하여 모델의 좌, 우 부분과 상부의 물 층을 잘라내었으며, S 파 속도 모델은 포아송비를 0.25 로 고정시켜 재생성하였다. 인공합성 탄성과 자료를 만들기 위하여 유한요소법을 사용하여 모델링을 수행하였으며, 최대 주파수는 10Hz, 송신원 파형은 일차 미분 가우스 함수를 사용하였다. 파형 역산에 사용되는 초기 모델은 각 변수 모두 깊이에 따라 값이 선형적으로 증가하는 모델을 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 탄성 Marmousi-2의 실제 모델이며 동시 송신원 파형 역산 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 일반적인 파형 역산 알고리즘을 사용하였을 때 계산 시간과 동시 송신원을 사용할 때의 계산 시간은 Table 1에 제시 하였다. Fig. 2에는 파형 역산으로부터 얻은 P 파 속도, S 파 속도, 밀도를 제시 하였으며 동시 송신원을 사용할 경우에도 각각의 변수가 비교적 정확하게 해를 찾아가고 있는 것을 알 수 있다.

4. 결론

위상 부호화 기술을 사용하여 동시 송신원 파형 역산 기술을 개발하였다. 위상 부호화를 통하여 동시 송신원을 이용한 파형 역산을 수행 할 경우, 혼선잡음을 효과적으로 제거 할 수 있으며 계산 시간과 비용을 절감할 수 있게 된다. 본 연구에서 제안한 방법의 검증 을 위하여 탄성 Marmousi-2 모델에 적용해 보았으며, 결과를 통하여 동시 송신원 기술의 탄성과 파형 역산에의 적용 가능성을 확인 할 수 있다. 향후, 인공 합성 자료가 아닌 실제 탐사 자료에 대하여 적용해 보아야 할 것이며, 고정된 포아송비가 아닌 모델에 대한 검증도 필요하다.

5. 사사

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NO.2010T100200133).

6. 참고문헌

Ben-Hadj-Ali, H., S. Operto, and J. Virieux, 2011, An efficient frequency-domain full waveform inversion method using simultaneous encoded sources, *Geophysics*, **76**, NO. 4, R109-R124.

Gao, F., A. Atle, and P. Williamson, 2010, Full waveform inversion using deterministic source encoding, *80th Annual International Meeting, SEG*, Expanded Abstract, **29**, 1013-1017.

Krebs, J., J. Anderson, D. Hinkley, R. Neelamani, S. Lee, A. Baumstein, and M. D. Lacasse, 2009, Fast full wavefield seismic inversion using encoded simultaneous sources, *Geophysics*, **74**, No. 6, WCC177-WCC188.

Pratt, R. G., C. Shin, G. J. Hicks, 1998, Gauss-Newton and full Newton methods in frequency-space seismic waveform inversion, *Geophys. J. Int.*, **133**, 341-362.

Romero, L. A., D. C. Ghiglia, C. C. Ober, and S. A. Morton, 2000, Phase encoding of shot records in prestack migration, *Geophysics*, **65**, 426-436.

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

Table 1. Elapsed time for an iteration.

	Time (s)
Individual sources	79.45
Simultaneous sources	4.08

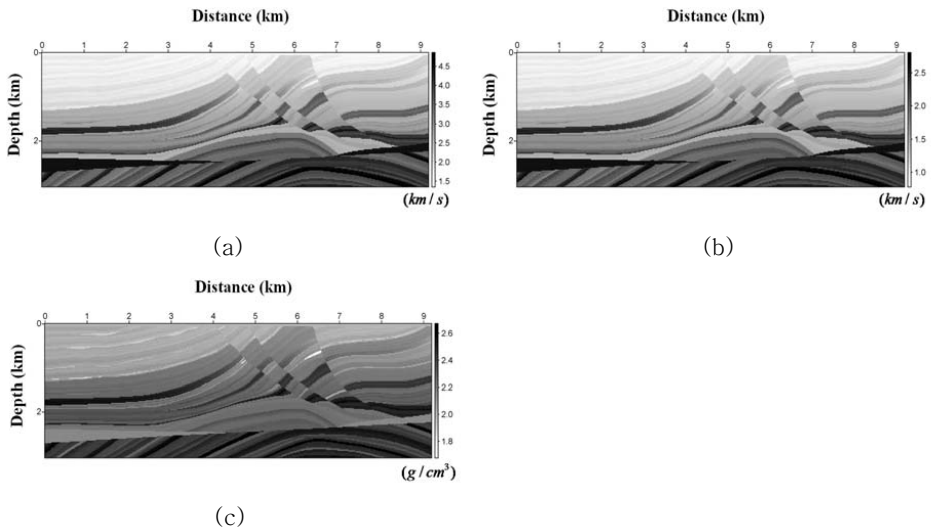


Fig. 1. The true elastic Marmousi-2 model: (a) P- and (b) S-wave velocities, and (c) density.

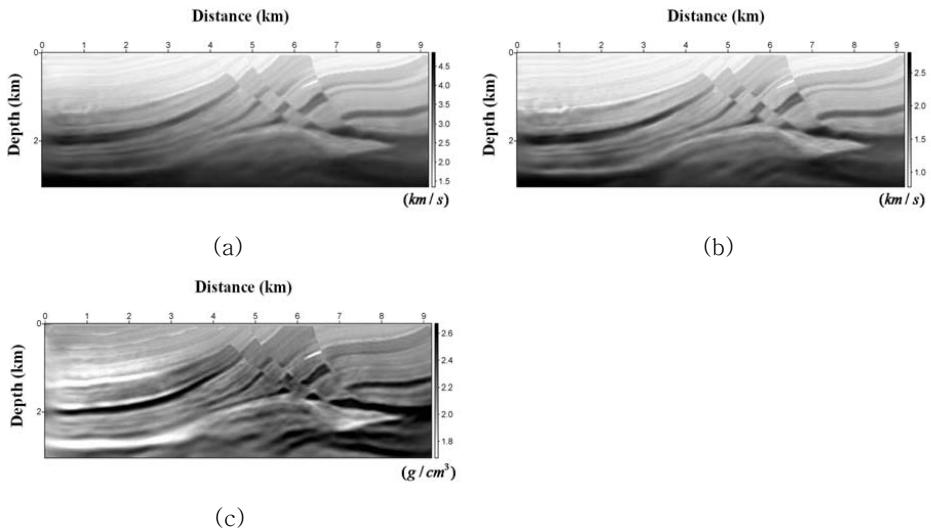


Fig. 2. Reconstructed models by the simultaneous-source full waveform inversion: (a) P- and (b) S-wave velocities, and (c) density.