

## 탄성과 간섭파를 이용한 중합전 구조보정

\*김 영완<sup>1)</sup>, \*\*장 성형<sup>2)</sup>, 윤 왕중<sup>3)</sup>, 서 상용<sup>4)</sup>

### Prestack migration using seismic interferometry

\*Youngwan Kim, \*\*Seonghyung Jang, Wangjung Yoon, Sangyong Suh

**Key words** : seismic interferometry(탄성과 간섭파), Green's function(그린 함수), virtual source gather(가상음원 모음도), prestack migration(중합전 구조보정)

**Abstract** : Prestack depth migration is used to image for complex geological structure such as faults, folds, and subsalt. In this case, it is widely used the surface reflection data as a input data. However, the surface reflection data have intrinsic problems to image the subsalt and the salt flank due to the complex wavefields and multiples which come from overburden. For overcoming the structural defect of the surface reflection data in the imaging, I used the virtual sources in terms of seismic interferometry to image the subsurface and suppress the multiples using the velocity model of the lower part of the virtual sources. The results of the prestack depth migration using virtual source gathers and velocity model below receivers are similar geological interfaces to the results from shot gathers of the conventional ocean bottom seismic survey. And especially artificial interfaces by multiples were suppressed without applying any other data processing to eliminate multiples. This study results by numerical modeling can make a valuable imaging tool when it is applied to satisfied field data for specific condition.

### 1. 서론

지층 경계면을 통과한 투과파의 자기상관이 반사파와 반사파의 시간역전의 합과 같다는 사실이 Claerbout(1968)<sup>(1)</sup>에 의해 발표된 후 이 방법은 지층구조를 영상화하는 원리로 이용되어 왔다. 즉 지하에 평면파 음원이 있고 지표면에서 측정할 때, 기록된 신호의 자기상관의 “+” 영역이 반사 신호라는 것이다. 지표면에서 기록된 자연 음원 신호의 자기상관으로 충격 반사응답(impulsive reflection response)을 유도하고, 이를 이용하여 지하구조를 영상화하는 방법을 음향 일광 영상화(acoustic daylight imaging)라 하며, 이러한 이론을 탄성과 탐사에 적용할 경우 탄성과 간섭파(Seismic Interferometry, SI)라 한다(Wapenaar et al., 2006)<sup>(2)</sup>.

최근 SI 방법은 지질구조를 영상화하는 여러 분야에서 응용되고 있는데 Schuster et al.(2004)<sup>(3)</sup>은 상관이론을 지진과 연구뿐 아니라 공통 반사점(common depth point, CDP) 자료에 대

한 간섭 영상화 이론을 제시하였다. Wapenaar et al.(2002)<sup>(4)</sup>은 Claerbout(1968)의 수평 층서 매질에서의 1차원 음향 일광 영상화 이론을 3차원 불균질 음향/탄성 매질에 대하여 일반화 하였다. 그러나 이러한 연구들은 자연 음원을 이용한 측정예 음향 일광 영상화 원리를 이용한 것이다. 인공 음원을 이용한 탐사에서 SI 이론을 이용하여 Bakulin and Calvert(2006)<sup>(5)</sup>는 시간역전 원리를 적용한 가상음원을 이용하여 합성 자료와 4 차원 수직 탄성과 탐사(Vertical Seismic Profiling,

- 
- 1) 한국지질자원연구원 석유해저부  
E-mail : linuxyoung@hanmail.net  
Tel : (042)868-3403 Fax : (042)861-0264
  - 2) 한국지질자원연구원 석유해저부  
E-mail : jang@kigam.re.kr  
Tel : (042)868-3402 Fax : (042)861-0264
  - 3) 전남대학교 지구시스템공학과  
E-mail : wjyoon@chonnam.ac.kr  
Tel : (062)530-1725 Fax : (062)530-1729
  - 4) 한국지질자원연구원 석유해저부  
E-mail : sysuh@kigam.re.kr  
Tel : (042) 868-3400 Fax : (042)861-0264

VSP) 현장자료에 대하여 지하구조를 영상화하는 연구를 하였으며, Lobkis and Weaver(2001)<sup>(6)</sup>는 폐곡면에서의 산란 이론과 초음파를 이용하여 간섭을 설명하였고, Wapenaar and Fokkema(2006)<sup>(7)</sup>는 SI에 대한 이론 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 인공 음원을 이용한 탐사에서 대부분의 연구 결과는 이론 연구와 매우 제한적인 경우에서의 수치 모형실험 결과다.

SI 이론은 수진기를 둘러싼 폐곡면에 음원이 위치하지만 실제 탐사 자료를 획득할 때에는 이러한 조건이 만족될 수 없으므로 이와 가장 유사하며 실제 자료 획득 방법으로 많이 사용되는 OBS 탐사법에 SI 이론을 적용하였다. OBS 탐사법은 음원을 해수면에, 수진기를 해저면에 위치하여 자료를 획득하고 처리하여 지하구조를 규명하는 방법으로 해저면에서 P파 뿐 만 아니라 모드변환된 S파를 활용하여 지하구조와 물리적 특성값을 구하는 탐사 방법 중 하나이다. SI 연구에 적용하기 위해 균질/불균질 속도 모델을 사용하여 OBS 속도 모델에 대해 유한차분법에 의한 수치 모형실험을 수행하였다. 그 결과 탄성과 간섭파를 포함하는 OBS 인공 합성 음원 모음도를 획득할 수 있었으며, 이를 SI 연구에 활용하였다.

한편, 탄성과 자료처리 중 중합전 심도 구조보정은 음원 모음도와 속도 모델을 입력자료로 사용하여 지층 경계면을 영상화한다. OBS 속도 모델에서 제작한 가상음원 모음도와 배경 속도 모델을 위상이동 보간법(Phase Shift Plus Interpolation, PSPI) 알고리즘을 이용한 중합전 심도 구조보정 (prestack depth migration)으로 영상화를 시도하여 유용성을 살펴보았다.

## 2. 탄성과 간섭 이론

시간과 공간에 대한 변수로서 압력장  $p(\mathbf{x}, t)$ 의 시간 Fourier 변환  $\hat{p}(\mathbf{x}, \omega)$ 은 다음과 같이 정의될 수 있다(Fokkema and van den Berg, 1993)<sup>(8)</sup>.

$$\hat{p}(\mathbf{x}, \omega) = \int e^{-i\omega t} p(\mathbf{x}, t) dt \quad (1)$$

여기에서  $\mathbf{x}$ 는 직교좌표계에서 벡터  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ 이며,  $i$ 는 허수,  $\omega$ 는 각주파수,  $t$ 는 시간을 의미한다. 공간-주파수 영역에서 임의의 무손실(lossless) 불균질 음향 매질의 압력장과 입자속도는 운동방정식

$$i\omega\rho\hat{v}_i + \partial_i\hat{p} = \hat{f}_i \quad (2)$$

을 만족하며, 또한 응력-변형률 관계

$$i\omega\kappa\hat{p} + \partial_i\hat{v}_i = \hat{q} \quad (3)$$

를 만족한다.

여기에서는 아인슈타인 합 표시 규칙(Einstein

summation convention)에 따라 표기하였으며,  $\partial_i$ 는  $x_i$  방향으로의 편미분을, 아래첨자  $i=1, 2, 3$ ,  $\rho(\mathbf{x})$ 는 매질의 밀도,  $\kappa(\mathbf{x})$ 는 매질의 압축률(compressibility),  $\hat{f}_i(\mathbf{x}, \omega)$ 는 외력 체적밀도(external volume force density),  $\hat{q}(\mathbf{x}, \omega)$ 는 체적분사율 밀도(volume injection rate density)로 표현되는 음원 분포를 나타낸다.

두 지점  $A, B$ 에서 독립적인 음향 상태를 살펴보면, 주파수 영역에서 상호관계량 식은 다음과 같이 표현될 수 있다(de Hoop, 1988; Wapenaar and Fokkema, 2006)<sup>(9,10)</sup>.

$$\hat{p}_A \hat{v}_{i,B} - \hat{v}_{i,A} \hat{p}_B \quad (4)$$

레이리 상반 정리(Rayleigh's reciprocity theorem)는 위의 식에 미분 연산자  $\partial_i$ 를 적용함으로써 구한다.

$$\partial_i \{ \hat{p}_A \hat{v}_{i,B} - \hat{v}_{i,A} \hat{p}_B \} \quad (5)$$

위의 식에  $A, B$ 에서의 운동방정식과 응력-변형률 관계식을 대입하고, 바깥으로 향하는 수직 벡터  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$ 를 갖는 폐곡면  $\partial\mathbb{D}$ 로 닫힌 공간영역  $\mathbb{D}$ 에 대해 적분하고, 가우스의 정리를 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{D}} \{ \hat{p}_A \hat{q}_B - \hat{q}_A \hat{p}_B \} d^3\mathbf{x} \\ = \oint_{\partial\mathbb{D}} \{ \hat{p}_A \hat{v}_{i,B} - \hat{v}_{i,A} \hat{p}_B \} \cdot n_i d^2\mathbf{x} \end{aligned} \quad (6)$$

주파수 영역에서 곱은 시간영역에서 콘볼루션과 같으므로 식 (6)은 콘볼루션 형태의 상반성 정리(reciprocity theorem of convolution type)이며 음향 음원-수진기 상반성이론에 적용된다.

무손실 매질을 가정하였으므로, 시간역전 불변성 원리(time-reversal invariance principle)를 적용할 수 있다(Bojarski, 1983)<sup>(11)</sup>. 주파수 영역에서 시간역전은 복소공액(complex conjugate)이므로  $\hat{p}$ 와  $\hat{v}_i$ 이 음원항  $\hat{f}_i$ 과  $\hat{q}$ 인 운동방정식과 응력-변형률 관계식의 해가 된다면  $\hat{p}^*$ 과  $-\hat{v}_i^*$ 은 음원항  $\hat{f}_i^*$ 과  $-\hat{q}_i^*$ 을 갖는 방정식을 만족한다. 여기에서 \*는 켈레복소수이다.  $A$  지점에서 이해를 식 (6)에 대입하면

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{D}} (\hat{p}_A^* \hat{q}_B + \hat{v}_{i,A}^* \hat{f}_{i,B} + \hat{q}_A^* \hat{p}_B + \hat{f}_{i,A}^* \hat{v}_{i,B}) d^3\mathbf{x} \\ = \oint_{\partial\mathbb{D}} (\hat{p}_A^* \hat{v}_{i,B} + \hat{v}_{i,A}^* \hat{p}_B) n_i d^2\mathbf{x} \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 위 식은 상관 형태의 상반성 정리(reciprocity theorem of correlation type)로 음향 그린 함수식이 되어 SI에 적용된다.

두 지점  $A, B$ 에서 임펄스(impulse)를 가정하고 그린 함수를 이용하여 상관형태의 상반성 정리식

(7)에 대입하면 다음과 같이 근사할 수 있으며 SI에 사용된다.

$$\begin{aligned}
 & 2R\{\hat{G}(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_B, \omega)\} \\
 & \approx \frac{2}{\rho c} \oint_{\partial\mathbb{D}} \hat{G}^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega) \hat{G}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}, \omega) n_i d^2\mathbf{x} \quad (8) \\
 & \approx \frac{2}{\rho c} \oint_{\partial\mathbb{D}} G^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, -t) * G(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}, t) d^2\mathbf{x}
 \end{aligned}$$

실제 탐사에서는 음원이 폐곡면을 이루지 않기 때문에 인공적인 잡음이 생기게 된다. 또한 그런 함수의 재현에 모든 음원이 동등한 역할을 하는 것이 아니라 정상 점(stationary points)에서 가장 잘 구해진다.

### 3. 수치 모형 실험

#### 3.1 불균질 다층 속도 모델에서 가상음원 모음도

복잡한 다층 구조에서 SI의 가능성을 시험하기 위해 Fig. 1(a)와 같은 균질 5층 속도 모델과 Fig. 1(a)의 제 2층을 무작위 불균질 속도 모델로 가정한 속도 모델을 생성하였다. 음원은 지표면 1 km에서 7 km까지 50 m 간격으로 121개, 수신기는 하부 1 km에서 6 km까지 25 m 간격으로 161개를 가정하였다. 첫 번째 경계면까지의 심도는 1 km, 속도는 1,500 m/s, 두 번째 경계면까지의 심도는 1.5 km, 속도는 2,000 m/s, 세 번째 경계면까지의 심도는 2.1 km, 속도는 2,500 m/s, 네 번째 경계면까지의 심도는 2.8 km, 속도는 3,000 m/s, 다섯 번째 경계면까지의 심도는 3.6 km, 속도는 3,500 m/s를 가정하였다.

Fig. 2는 Fig. 1(a)의 속도 모델을 이용하여 구한 음원 모음도 중 지표면 4 km에 위치한 61번째 음원의 음원 모음도이다. Fig. 1(a)는 균질 속도 모델을 사용하였으며 Fig. 2(b)는 불균질 속도 모델을 사용한 것이다. 불균질 속도 모델을 사용한 경우가 보다 복잡한 파동 전파 양상을 보이고 있으며 후기 시간대에 사선으로 나타나는 파동장은 경계조건이 완벽하게 적용되지 않아 생기는 인위적인 파동장이다.

모든 수신기에서 정상 위상 분석을 통하여 정상 위상 구간을 결정하였으며, 결정된 정상 위상 구간에서만 적분을 실시하였다. 그 결과가 Fig. 3이며, Fig. 3(a)는 Fig. 1(a)의 균질 속도 모델을 사용하여 수신기 81번에서 구한 가상음원 모음도이다. Fig. 3(b)는 Fig. 1(b)의 불균질 속도 모델을 사용하여 수신기 81번에서 구한 가상음원 모음도이다. 두 가상음원 모음도는 인공적인 파동장이 기록되었지만 일차 반사파와 다중 반사파들이 출현하는 시간은 정확하게 일치한다. 따라서 다층 구조에서 SI를 적용하여 그런 함수의 재현이 가능

함을 수치 모형실험을 통하여 입증하였다.

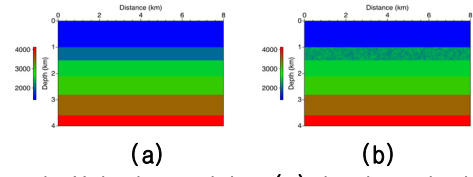


Fig. 1. Velocity models. (a) is the velocity model of 5 horizontal homogeneous layers, and (b) is the 5 horizontal inhomogeneous layers, respectively.

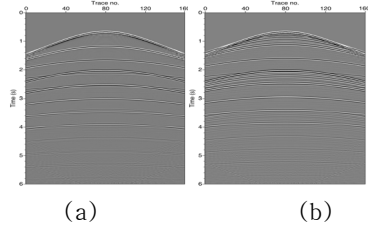


Fig. 2. Synthetic shot gathers in source no. 61 at 4 km. (a) is generated using homogeneous velocity model, and (b) for inhomogeneous velocity model, respectively.

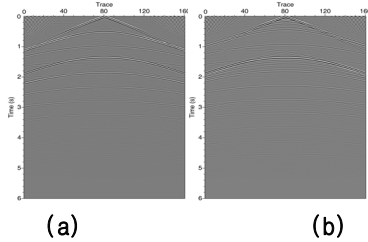


Fig. 3. Virtual source gathers. (a) is the result of a homogeneous velocity model, and (b) for an inhomogeneous velocity model, respectively.

#### 3.2 중합전 구조보정

F-K 법의 일종인 위상이동법은 지층의 경사에 영향을 받지 않고, 2차원 및 3차원 자료에 대한 적용성이 용이할 뿐 아니라 유한차분법이 갖는 미분의 차분 근사오차나 키르히호프법이 갖는 적분의 덧셈 근사오차 등을 포함하지 않아 반사자료 구보조정에 주로 이용된다. 위상이동법은 매질속도가 수직으로 변하는 지역에 적용되며 수평속도 변화지역에서는 수평방향 속도변화를 고려한 PSPI(Gazdag and Sguazzero, 1984)<sup>(12)</sup>를 수정하여 중합전 심도구조보정을 시도하였다.

SI를 이용하여 구한 가상음원 모음도의 장점은 가상음원 위쪽의 속도 모델이 필요치 않다는 점이다. 이를 검증하기 위해 균질 속도 모델에서 구한

가상음원 모음도를 이용하여 전체 속도 모델을 이용한 중합전 심도 구조보정과 수신기 하부의 속도 모델만을 이용한 중합전 심도 구조보정을 수행하였다. 이에 사용된 속도 모델이 Fig. 4이다. Fig. 4(a)는 균질/불균질 수평 5층 구조에서 합성 음원 모음도를 제작할 때 사용하였던 속도 모델이고, Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 일부분인 수신기 하부만의 속도 모델이다. 이 두 속도 모델과 동일한 가상음원 모음도를 이용하여 중합전 심도 구조보정을 수행한 결과가 Fig. 5이다.

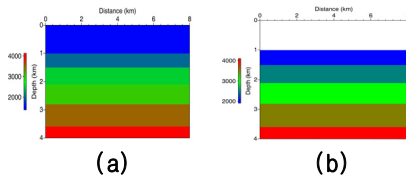


Fig. 4. Input velocity models. (a) is the velocity model of 5 horizontal layers, and (b) is velocity model below receiver, respectively.

Fig. 5(a)는 전체 속도 모델을 사용하여 얻은 중합전 심도 구조보정 단면이다. 약 350 m와 700 m에 입력 속도 모델에는 없는 지층 경계면으로 예상되는 인위적인 층이 나타남을 볼 수 있고, 이에 반하여 수신기 하부층의 속도 모델만을 사용한 Fig. 5(b)는 입력 속도 모델과 일치하는 지층 경계면을 영상화하나, 3층의 상부에 인위적인 경계면이 추가되었음을 볼 수 있다. 입력자료로 사용된 가상음원 모음도는 어떠한 다중 반사파 제거 과정이 적용되지 않은 자료이므로 이에 의한 영향으로 인위적인 경계면이 나타난 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 가상음원 모음도를 이용한 중합전 심도 구조보정에는 수신기 상부층의 속도 모델이 필요치 않다는 것을 수치 모형실험을 통하여 확인하였다.

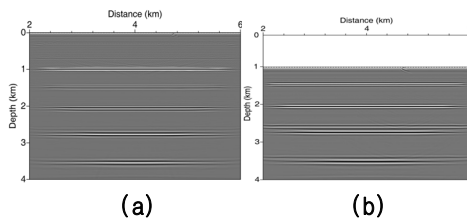


Fig. 5. Result images of the prestack depth migration. (a) is made by full velocity model, and (b) is made by velocity model below receiver, respectively.

#### 4. 결론

통상 잡음으로 취급되어 제거 대상이 되는 탄성과 간섭파를 이용한 지층구조 영상화 연구로,

균질/불균질 속도 모델을 해저면 탄성과 탐사 수치 모형실험에 적용하여 음원 모음도를 획득하였으며, 이를 이용하여 가상음원 모음도를 제작하였다. 탄성과 간섭 이론을 적용하여 제작한 가상음원 모음도와 수신기 하부 속도 모델을 이용하여 구조보정을 할 경우 지표면 탄성과 자료를 이용한 구조보정에서 나타나는 다중 반사파에 의한 영향이 억제되고, 수신기 상부의 속도 모델이 필요 없음을 수치 모형실험을 통하여 입증하였다. 이는 탄성과 간섭을 이용한 방법이 특정한 탐사조건에서 매우 강력한 영상화 방법이 될 수 있음을 의미한다.

#### 후기

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 지식경제부 출연사업인 ‘국내 석유탐사자료 정보화’ 과제에서 지원되었습니다.

#### References

- [1] Claerbout, J. F., 1968, "Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response", *Geophysics*, 33, 264~269.
- [2] Wapenaar, K., Draganov, D., and Robertsson, J., 2006, "Introduction to the supplement on seismic interferometry", *Geophysics*, 71, SI1~SI4.
- [3] Schuster, G. T., J. Yu, J. Sheng, and J. Rickett, 2004, "Interferometric/daylight imaging", *Geophysical Journal International*, 157, 838~852.
- [4] Wapenaar, K., Draganov, D., J. Thorbecke, and J. Fokkema, 2002, "Theory of acoustic daylight imaging revisited", 72nd Annual International Meeting SEG, Expanded Abstracts, 2269~2272.
- [5] Bakulin, A., and R. Calvert, 2006, "The virtual source method: Theory and case study", *Geophysics*, 71, SI139~SI150.
- [6] Lobkis, O. I., and Weaver, R. L., 2001, "On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field", *Journal of the Acoustical Society of America*, 110, 3011~3017.
- [7] Wapenaar, K., and Fokkema, J., 2006, "Green's function representations for seismic interferometry", *Geophysics*, 71, SI133~SI146.
- [8] Fokkema, J. T., and van den Berg, P. M., 1993, "Seismic applications of acoustic reciprocity", Elsevier.
- [9] de Hoop, A. T., 1988, "Time-domain reciprocity theorems for acoustic wave fields in fluids with relaxation", *J. Acoust. Soc. Am.*, 84, 1877~1882.

- [10] Wapenaar, K., and Fokkema, J., 2006, "Green's function representations for seismic interferometry", *Geophysics*, 71, SI133~SI146.
- [11] Bojarski, N. N., 1983, "Generalized reaction principles and reciprocity theorems for the wave equations, and the relationship between the time-advanced and time-retarded fields", *J. Acoust. Soc. Am.*, 74, 281~285.
- [12] Gazdag, J., and Sguazzero P., 1984, "Migration of seismic data by phase shift plus interpolation", *Geophysics*, 49, 124~131.