

## 가스 하이드레이트 탄성과 자료 코다 파 (coda waves) 연구

장 성형<sup>1)</sup>, 서 상용<sup>2)</sup>, 김 영완<sup>3)</sup>

### Seismic coda waves for gas-hydrate seismic data

Seonghyung Jang, Sangyong Suh, Youngwan Kim

**Key words** : Gas hydrate(가스 하이드레이트), BSR(해저면 기인 고진폭 반사파), Coda wave(코다 파), Virtual source (가상음원)

**Abstract** : 탄성과 코다 파는 두 수진기에서 기록된 탄성파 자료의 상호상관으로부터 두 신호에 대한 순간응답을 구하고 이로부터 지층정보를 구하는데 이용된다. 여기에서는 인공합성 탄성파 자료와 가스 하이드레이트 현장자료에 적용하여 상호상관 모음도와 가상음원 모음도 (virtual source)를 구하고자 하였다. 인공합성자료는 해저면 탄성파 탐사법 (ocean bottom seismic)을 모델로 이용하여 인공합성 탄성파 단면도를 제작하였으며, 탄성파 코다 파를 살펴보기 위해 인공 OBS 자료 중 첫 번째 트레이스를 가상음원으로 정하고 모든 음원 모음도와 상호상관으로 가상음원 단면도를 제작하였다. 현장자료 적용으로는 해저면 기인 고진폭 반사파인 BSR (bottom simulating reflection)을 포함하고 있는 자료를 선정하여 상호상관 단면도와 가상음원 단면도를 제작하였다. 중합단면도상에 나타난 가스 분출지역은 상호상관 단면도에서도 나타났으며, 중합단면도상 BSR부분은 vs 단면도에서 강한 반사파를 보여줌을 알 수 있었다.

#### Nomenclature

$\Gamma$  : gamma function  
 $\chi$  : Hurst number  
 $K\chi$  : modified second order Bessel function  
 $\epsilon$  : standard deviation  
 $a$  : correlation length

#### subscript

BSR : bottom simulated reflection  
OBS : ocean bottom seismic  
SI: seismic interferometry  
VS: virtual source

### 1. 서론

지층 경계면을 통과한 투과파의 자기상관은 반사파와 반사파의 역시간의 합으로부터 구할 수 있는 사실이 Clearbout<sup>(1)</sup>(1968)에 의해 발표된 후 이 방법은 지층구조를 영상화하는 기본원리로 이용되어 왔다. 즉, 지하매질에서 P파의 응답을 지표면에서 측정할 때 반사파의 응답은 관측된 응답의 자기상관의 “+” 영역을 취하는 것을 의미한다. 초기 반사파, 다중 반사파는 이와 같은 방법

으로 구별할 수 있으며, 획득된 반사파 응답에 존재하는 음원과형은 지하내부에서 음원신호의 자기상관과 같음을 의미한다. 일반적으로 코다파를 이용하는 연구는 두 곳에서 기록된 신호의 상호상관으로 두 곳의 신호에 대한 순간응답 (impulse response)을 구하는 방법을 말하며, 탄성파 탐사에 적용할 경우 탄성파 간섭과 이용 연구 (seismic interferometry: SI) 로 불린다 (Wapenaar<sup>(2)</sup>, 2006). 간섭양상은 상관과 지구내부 물리적 특성을 포함하고 있는 탄성파 트레이스의 합으로 구할 수 있다. 일반 탄성파 탐사에서는 반사파 신호음을 최대화하고 그 외 기록된 신호는 잡음으로 간주하여 제거하는 방법을 적용하지만, SI에서는 잡음으로 여겨지는 신호음으로부터도 정보를 얻기 위해 적용된다. SI 목적은 수진기에 기록된 신호음으로부터 각각의 다른 속도를 지니고 있는 파들을 분리하는 것으로 탄성파 탐사에서는 다중 반사파제거와 반사파 신호를 증진시키는데 이용되고 있다. 각각의 수진기들은 이웃하는 수진기 기록에 영향을 주므로 SI에서는 상호상관에 이용되는 기준 수진기에서의 기록을 가상음원이라 말할 수 있다. 가상음원 모음도 (virtual source gathers)는 주어진 임의의 수진기에 기록된 파동장의 상호상관의 결과로부터 구해진다. 최근 SI 방법은 지질구조 영상화하는 여러 분야에서 응용되고 있는데 Schuster<sup>(3)</sup> (2001)는 상관이론을 지진파 연구뿐 아니라 탄성파 탐사에 적용하였다. Wapenaar et al<sup>(4)</sup>. (2002)은 3D

불균질 음향/탄성 매질에 대한 적용성을 일반화하였으며, Draganov et al.<sup>(5)</sup> (2003) 수평으로 변화는 속도모델에 대해 수치모형실험을 연구하였다. 한편, Bakulin and Calvert<sup>(6)</sup> (2006) 는 가상 음원을 이용하여 지하구조를 영상화하는 연구를 하였으며, Snieder et al.<sup>(7)</sup> (2006)는 정상위상(stationary phase) 법을 이용하여 수진기에 기록된 신호음의 상관관계로부터 파동전파에 대한 그린함수를 규명하는 연구를 하였다. 본 연구에서는 현실적인 수치모형실험을 적용하기 위해 불균질 매질에서 속도모델을 결정하고, 수진기를 해저면에 고정시키고 음원을 해수면에 설치하여 이동하면서 자료를 획득하는 해저면 탄성과 탐사법(ocean bottom seismic: OBS)을 이용하여 인공합성 탄성과 단면도를 작성하였으며 이로부터 가상 음원과 음원모음단면도의 상호상관으로부터 가상 음원 단면도를 구하고자 하였다. 또한 현장자료에 적용하여 상호상관 모듬도와 가상음원 모듬도를 작성하여 탄성과 자료로부터 지하정보를 구하고자 하였다.

한국지질자원연구원에서는 1997년부터 동해에서 메탄 하이드레이트 부존 유망지역을 조사하기 위해 탄성과 탐사를 수행해 왔으며 여기에서는 2003년 동해에서 취득된 탄성과자료에 대해 일반적인 자료처리를 Geobit-2.10.12 (서 상용<sup>(8)</sup>, 2004)을 이용하여 실시하여 중합단면도를 작성하였다. 가스 하이드레이트는 고압 저온 조건하에서 물과 메탄가스가 결합하여 형성된 고체상 화합물로 영구 동토지역과 수심이 깊은 해저의 천부 퇴적층에 광범위하게 분포되어 있는 것으로 알려져 있다(Makogon<sup>(9)</sup>, 1997). 가스 하이드레이트 부존 확인은 탄성과 단면도에 나타나는 BSR, AVO 해석 그리고 시추자료로부터 직접 확인하는 방법 등이 있다. AVO 분석(Ostrand<sup>(10)</sup>, 1984; 양 동우 외 1인<sup>(11)</sup>, 1996)은 BSR 상부에서 진폭감소현상이 발생하고 하부에는 가스에 의한 진폭증가 현상(Shipley et al.<sup>(12)</sup>, 1979; Andreassen et al.<sup>(13)</sup>, 1997) 이 나타난다. 여기에서는 중합단면도상에서 BSR 징후를 보이는 가스 하이드레이트 자료에 대해 상호상관 단면도를 구하고 가상음원 모듬도를 작성하여 이로부터 지하정보를 살펴보고자 하였다.

## 2. 탄성과 코다 파

탄성과의 간섭효과를 분석하여 매질의 특성을 규명하는 방법인 SI는 지표면에서 기록된 탄성과 배경잡음의 상호상관으로 반사파 응답(reflection response)을 구하고 이로부터 유효한 정보를 추출하는 것을 말한다. 가상음원 모듬도를 구하기 위해서는 상호상관 적용시 필요한 가상음원을 정하고 이를 모든 수진기에 기록된 신호와 상호상관을 취하여 상호상관 모듬도를 구한다. 이때 기준 수진기를 통과하는 신호음이 음원 역할을 하여 다음 수진기 기록에 영향을 미치므로 가상음원이라 하는데, 이는 역시간 구조보정문제에서 속도에 대한 편미분을 구할 때 이용되는 가상음원과

차이가 있다. 본 연구에서는 SI를 탄성과 탐사 영상화에 적용하기 위한 기초단계로 불균질 매질에서 인공합성 탄성과 단면도, 상호상관, 가상음원 단면도를 구하고자 하였다. 수치모형실험을 위해 Karman 방정식

$$F(r) = \frac{\varepsilon^2 2^{1-\kappa}}{\Gamma(\kappa)} \left(\frac{r}{a}\right)^\kappa K_\kappa\left(\frac{r}{a}\right) \quad (1)$$

을 이용하여 불균질 매질에서 속도를 구하였으며, 여기서  $\Gamma$  는 감마함수이고,  $\kappa$  는 허스트 수(Hurst number)이며,  $K_\kappa$  는 2종 변형베셀함수이다. 이때 허스트 수는 0.2로 하였다. Fig. 1은 해수층과 불균질 매질로 이루어진 지층모델로 상부층 속도는 1,500 m/s, 하부층은 2,836 m/s - 3,153 m/s 까지 변화는 불균질 속도매질이다. 수진기를 해저면에 설치하는 해저면 탄성과법(OBS) 방식으로 음원 모듬도를 구하였다. 음원은 해수면에서 1,000 m 깊이에서 50 m 간격으로 101개를 설치하였고 수진기는 해저면 깊이 1,000 m에서 음원 진행방향으로 4,000 m에서 7,000 m 까지 25 m 간격으로 120개를 설치하였다. 상호상관 모듬도를 구하기 위해 첫 번째 수진기를 가상음원으로 선택하여 음원번호 21에서 60까지 음원 모듬도에 상호상관을 적용하였다.

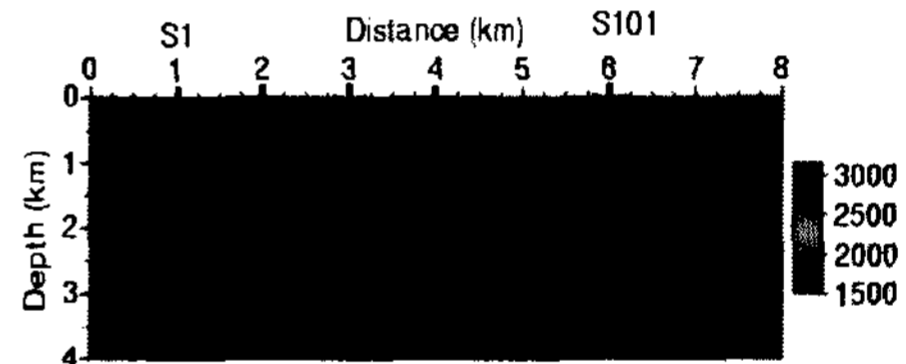
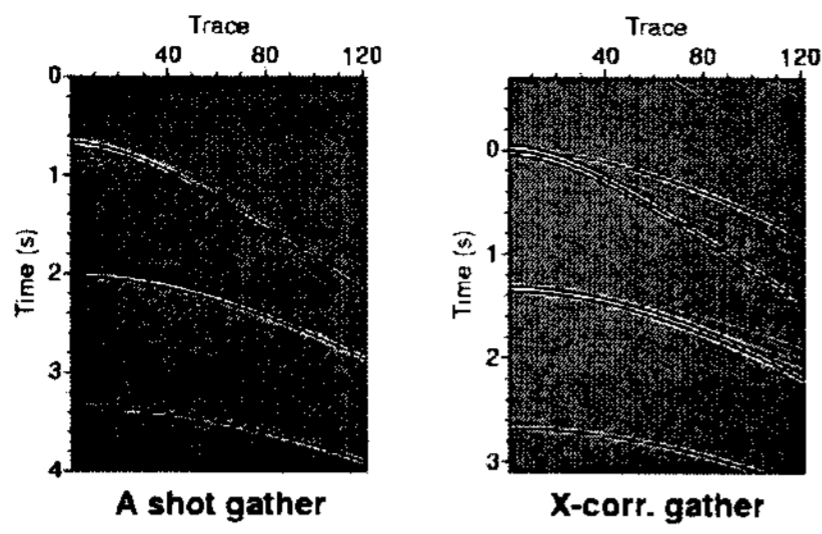


Fig. 1. A geological model for ocean bottom seismic modeling with a inhomogeneous random velocity layer.

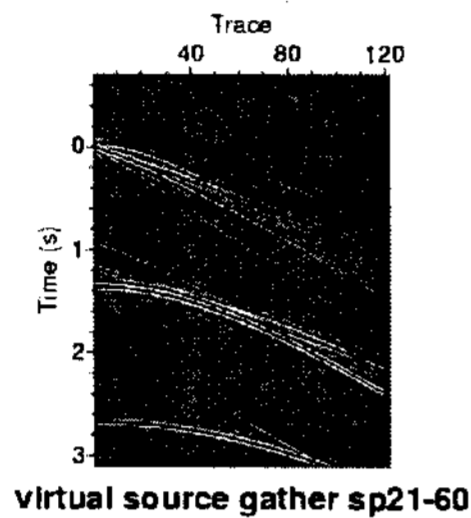
Fig. 2 (a)는 20번 음원에서의 음원모듬도로 직접 파와 해저면 반사파, 굴절파, 다중반사파, 그리고 불균질 속도모델에서 기인하는 산란파 등이 존재함을 보여준다. Fig. 2 (b)는 상호상관의 결과를 일부만 도시한 것이다. 가상음원 모듬도는 상호상관 모듬도를 모두 더한 것으로 그림 Fig. 2 (c)에 있다. 그림에서 보듯이 상호상관 결과는  $t < 0$  인 구간을 포함하고 있지만 본 그림에서는 일부분을 도시한 것이다.  $t=0$  에서는 상호상관 모듬도의 유한성에서 기인하는 인공잡음이 발생하고 특히  $t=1.3$  s 부근에서 강한 반사파가 나타남을 알 수 있다.

## 3. 현장자료 적용

석유 및 가스 탄성과 자료와 마찬가지로 가스 하이드레이트 탄성과 자료에 대한 깊이영역 구조 보정은 음원모듬도를 직접 이용하지만 기본적인 자료처리가 필요하다. 일반적인 자료처리 과정 중 트래이스 편집, 뮤팅, 구형확산 보정, 중합전 디콘, 주파수 대역 필터링 등 잡음과 다중반사파를



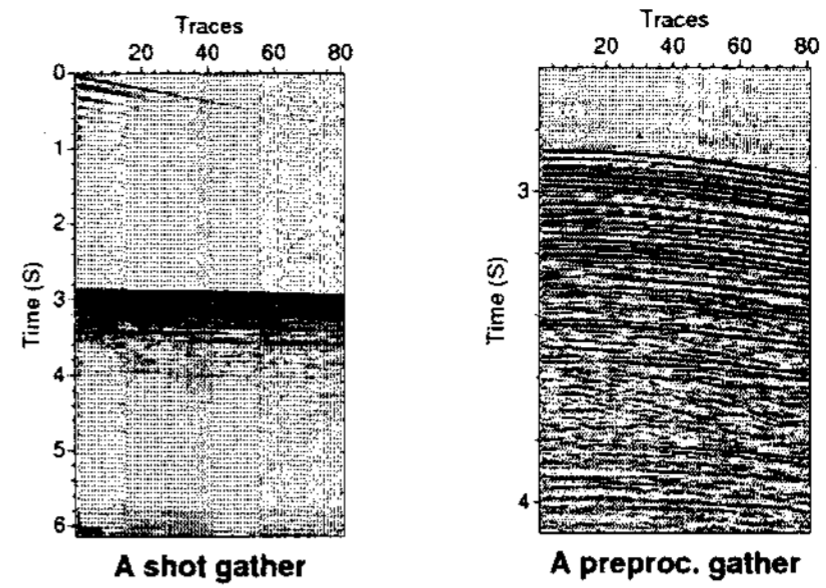
(a) (b)



(c)

Fig. 2. A shot gather at sp3700, its cross-correlation, and virtual source.

제거하기 위한 필수적인 전처리를 실시한 후 음원 영역에서 구조보정을 실시한다. 여기에서는 2003년 동해에서 취득된 탄성과 자료에 대해 지오벳을 이용하여 기본 자료처리를 음원번호 3700에서 4250 까지 551개 음원 모음도에 대해 적용하여 기본 자료처리를 실시하고 중합단면도를 제작하였다. 본 자료는 자료취득시 1 ms 샘플링 간격으로 6초 동안 기록되었으며, 음원간격은 25 m, 수진기 간격은 12.5 m 이며 최단 읍셋거리는 50 m 이다. 전처리 과정을 통해서 샘플링간격은 4 ms, 기록시간은 4.1 s, 대역필터링은 10, 20, 80, 100 Hz인 사다리꼴 필터를 적용하였고, 직접파를 제거하기 위해 2.7 초 대 이전 잡음을 제거하기 위해 퓨팅을 적용하였다. Fig. 3는 음원번호 3700에서 현장 음원모음도와 전처리 과정을 마친 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 음원영향을 받은 직접파와 첫 번째 반사파가 2.8초 이후에서 보이고 있어 해저면 수심이 약 2 Km 이상 되는 해수면 깊은 자료임을 짐작할 수 있다. 전처리과정을 마친 자료에 대한 중합단면도는 Fig. 4에 있다. 그림에서 보듯이 SP 3800, 3950, 4200 부근에서 천부가스 분출현상을 짐작할 수 있으며 해저면 위상과 반대이며 상대적으로 고진폭을 나타내는 BSR이 구간 SP 4070-4200, 왕복주시 3.07 초 부근에서 나타남을 보여준다.



(a) (b)

Fig. 3. A field shot gather at shot point 3700 and its preprocessed gather by Geobit.

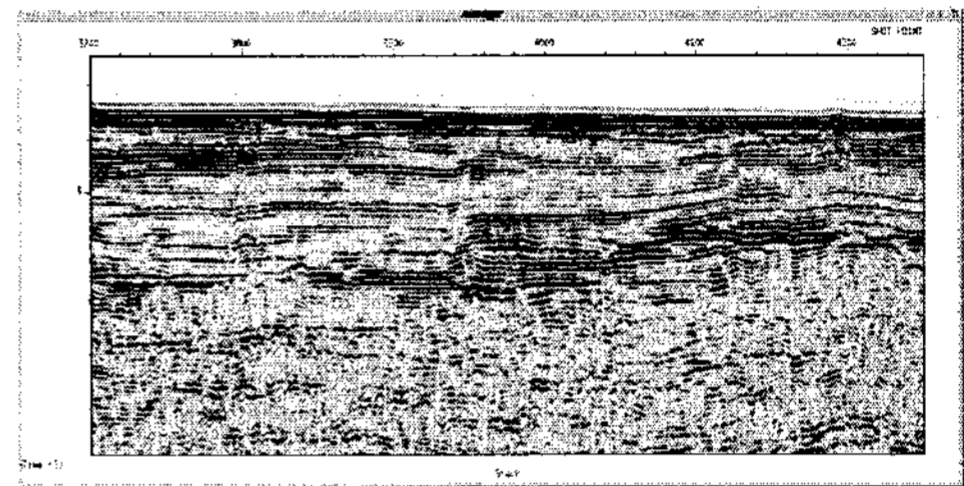


Fig. 4. A stack image.

#### 4. 현장자료에 대한 가상음원

가스 하이드레이트 자료에 코다 파 분석을 적용하기 위해 전처리과정을 마친 현장자료를 이용하였다. 첫 번째 트레이스와 마지막 트레이스와 상호상관을 모든 음원모음도에 적용하면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보듯이 SP3800, 3950, 4120, 4190 등 중합단면도에서 나타나는 가스 분출현상을 확인할 수 있으나 SP 3950-4100 사이에는 지층경계면 연속성이 중단된 것으로 보인다. 가상음원은 상호상관 모음도를 참고로 그룹별로 나누어 실시하였다. 이때 첫 번째 트레이스와 각 음원 모음도의 모든 트레이스 상호상관을 적용하고 100 개 음원모음도에 합하여 구했다. Fig. 6 (a) 음원번호 sp3700-2801까지 가상음원 모음도를 도시한 것이고 (b)는 sp4101-4250 까지 구한 가상음원 모음도를 나타낸다.

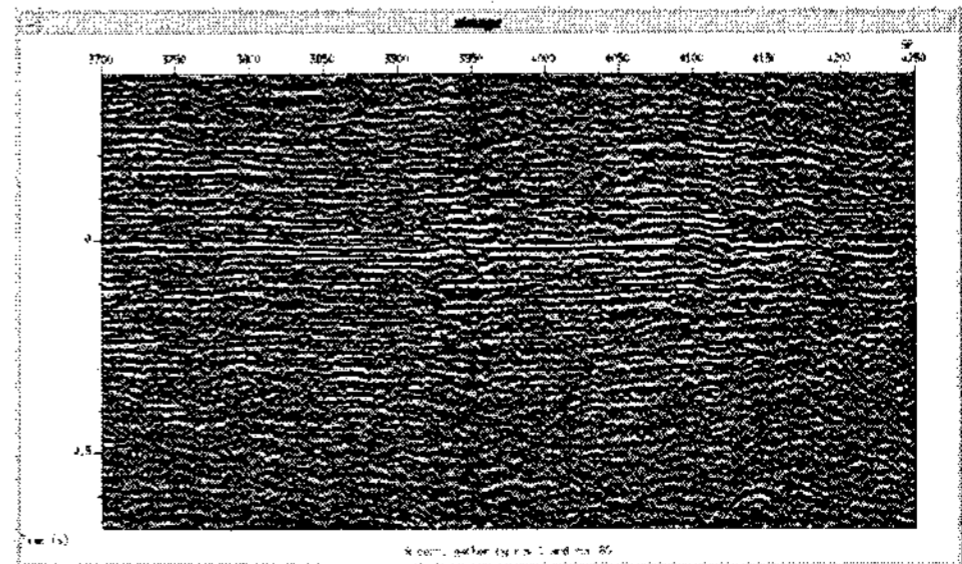


Fig. 5. Result of cross-correlation of 1st trace with 80th trace.

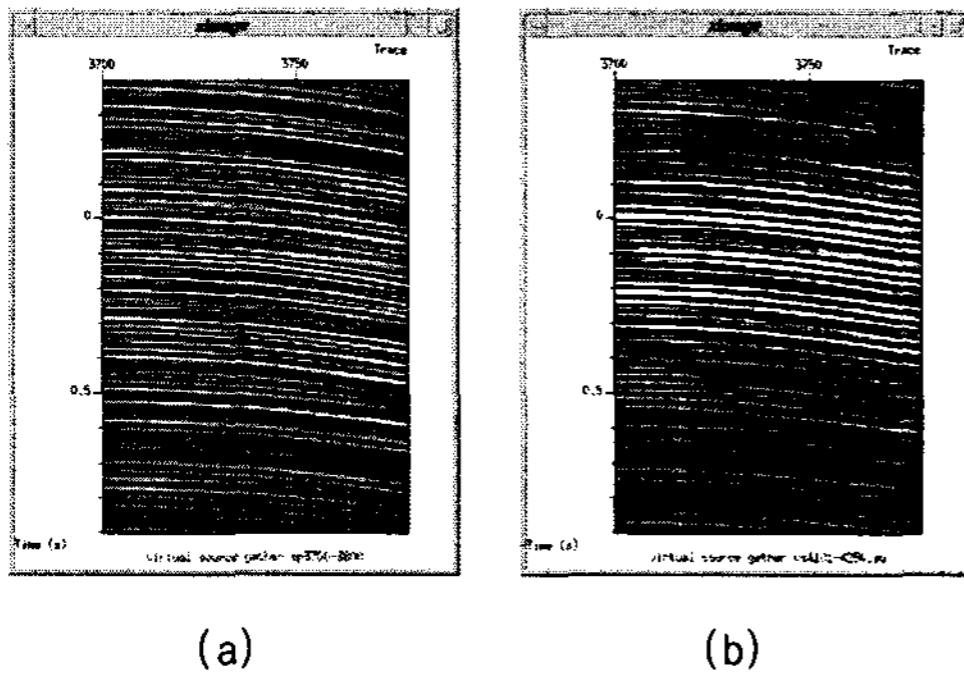


Fig. 6. Result of virtual sources with 1st trace with all traces.(a) is a vs for sp3700-3800 and (d) for sp4101-4250.

그림에서 보듯이 (a)의 경우 해저면 0.5 초 부근에서 중합단면도상에 희미하게 보이는 반사파들이 선명하게 보여주고 있으며 (b)의 경우 BSR 부근에서(해저면에서 0.3초 정도) 반사파들이 선명해졌음을 보여준다.

## 5. 결론

탄성파 코다 파는 다양한 신호음이 기록된 모든 자료를 이용하여 지질정보를 알아내기 위한 방법으로 본 연구에서는 수치모형실험과 현장자료를 통하여 상호상관에 의한 잡음특성과 가상음원 모음도를 제작하였다. 인공자료에 대한 SI분석을 위해 Karman 방정식을 이용한 불균질 속도모델을 구하고 OBS 방식으로 인공합성 탄성파 단면도를 제작하였다. 첫 번째 수진기를 가상음원으로 정하고 모든 수진기와 상호상관으로 상호상관 음원 모음도를 구하고 상호상관 모음도의 합으로 가상음원 모음도를 제작하였다. 가상음원 모음도는 직접 파, 반사파, 굴절파 등을 보이며,  $t=0$ 에서는 상호상관 모음도의 유한성에서 기인하는 인공잡음이 발생하고 특히  $t=1.3$  s 부근에서 강한 반사파가 나타남을 알 수 있다. 또한 현장자료에 대해 기본적인 전처리 과정을 실시한 후 상호상관 모음도와 가상음원 모음도를 구하였으며 이로부터 BSR 로 여길 수 있는 지역에서의 가상음원 특성을 살펴보았다. SI 목적중 하나는 탄성파 탐사에서 다중반사파 특성분석에 있으므로 향후 이 부분에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원 출연사업인 '가스 하이드레이트 지구 물리탐사연구' 과제에서 지원되었습니다.

## References

- [1] Claerbout, J., 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-SI14.
- [3] Schuster, G. T., 2001, Theory of daylight/interferometric imaging: Tutorial: 63rd Annual Int. Conf. and Exhib., EAGE, Extended Abstracts, A32.
- [4] Wapenaar, K., 2002, On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field: Pulse-echo using thermal phonons: *Ultrasonics*, 40, 435-439.
- [5] Draganov, D., Wapenaar, K., and J. Thorbecke, 2003, Synthesis of the reflection response from the transmission response in the presence of white noise sources: 65th Annual Int. Conf. and Exhib., EAGE, Extended Abstracts, P218.
- [6] Bakulin, A. and Calvert, R., 2006, The virtual source method: Theory and case study, *Geophysics*, 71, SI139-SI150.
- [7] Snieder, R., Wapenaar, K., and Larner, K., 2006, Spurious multiple in seismic interferometry of primaries, *Geophysics*, 71, SI111-124.
- [7] Snieder, R., Wapenaar, K., and Larner, K., 2006, Spurious multiple in seismic interferometry of primaries, *Geophysics*, 71, SI111-124.
- [8] 서 상용, 2005, Geobit-2.10.14 - the Seismic Data Processing Tool, 한국지질자원연구원.
- [9] Makogon, Y. F., 1997, Hydrate of hydrocarbons, PennWell Pub., Tulsa, Oklahoma, U.S., 482p.
- [10] Ostrander, W. J., 1984, Plane wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence, *Geophysics*, 49, 1637-1648.
- [11] 양 동우, 양 승진, 1996, AVO 및 복소분석에 의한 천연가스 저류층 탐지에 관한 연구, 한국자원공학회지, 제 33 권, 제 5호, 340-348.
- [12] Shipley, T. H. and Houston, M. H., Buffler, R. Tl, Shaub, F. J., McMilen, K. J., Ladd, J. W., and Worzel, J. L., 1979, Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons continental slopes and rises, *AAPG Bull.*, 63, 2204-2213.
- [13] Andreassen, K., Hart, E. H. and MacKay, M., 1977, Amplitude versus offset modeling of the bottom simulation reflection associated with submarine gas hydrate, *Marine Geology*, 137, 25-40.