

불균질 가스하이드레이트 층을 고려한 탄성과 모델링

김 영완¹⁾, 장 성형²⁾, 윤 왕중³⁾, 서 상용⁴⁾

Seismic modeling consider of inhomogeneous gas hydrate layer

Youngwan Kim, Seonghyung Jang, Wangjoong Yoon, Sangyong Suh

Key words : BSR(해저면 기인 고진폭 반사파), inhomogeneous gas-hydrate layer(불균질 가스 하이드레이트 층), seismic modeling(탄성과 모델링), autocorrelation function(자기상관함수)

Abstract : The P-wave velocity at the formation which contains gas hydrate varies very wide upon gas hydrate existence. These features on seismic shot gather can not be simulated normally by numerical modeling of homogeneous medium so that we need that of random inhomogeneous medium instead. We, in this study generated random inhomogeneous medium using gaussian ACF, exponential ACF and von Karman ACF and that we supposed the random inhomogeneous medium be gas hydrate formation to execute numeric modeling. The modeling result shows the typical effect by scattering caused by random hydrate formation as is observed from seismic shot gather where hydrate exist.

1. 서 론

새로운 에너지원으로 다양한 연구가 진행되고 있는 가스 하이드레이트는 고압, 저온 조건하에서 물과 메탄가스가 결합하여 형성된 고체상 화합물로 적절한 조건이 갖춰진 해저 퇴적층에 광범위하게 분포되어 있다.¹⁾ 가스 하이드레이트 안정영역(Gas hydrate stability zone)은 하이드레이트가 형성되어 해리되지 않고 안정하게 존재할 수 있는 영역을 말하며 안정영역의 하한에서 BSR(Bottom Simulating Reflector)이 나타난다. 탄성과 탐사 자료에서 가스 하이드레이트의 부존 가능성을 확인하는 방법은 탄성과 단면도상에 나타나는 BSR과 AVO(Amplitude Variation with Offset)분석 등을 통하여 BSR 상부에는 전형적인 진폭감소 현상(Amplitude blanking)을 볼 수 있으며 하부에는 가스에 의한 진폭증가 양상을 보인다.^{2), 3)} 가스 하이드레이트를 포함하는 퇴적층의 P파 속도는 실험실 실험 및 탄성과 탐사자료의 분석을 통하여 하이드레이트 안정영역에서 매우 불규칙하게 분포하고 있다고 보고되어져 왔다.^{4), 5), 6)} 가스 하이드레이트는 이를 포함하는 퇴적층의 구간속도를 증가시키며 그 증가하는 정도는 하이드레이트의 양에 비례하는 것으로 알려져 있다.⁷⁾

대부분의 탄성과 탐사에서 지하구조를 균질층으로 가정한다. 이러한 모델은 시추공 검층이나 시추 코어에 의해 확인되는 소규모 불균질성을

고려할 수 없다. 또한 이러한 모델로 만든 합성 탄성과 단면도는 현장 자료에서 보이는 다양한 변화를 설명할 수 없다. 탄성과의 산란은 전파되는 탄성과와 매질 내에 포함된 불균질성과의 상호작용에 의해 나타난다. 이러한 산란은 신호의 왜곡과 진폭 손실을 가져와 암염동 하부 또는 현무암 하부등과 같은 복잡한 지역의 해석을 매우 어렵게 만든다.^{8), 9)} 실제 지구 내부는 불균질성을 포함하고 있어 이에 대한 고려를 포함하여야 보다 현실적인 수치 모델링이 수행될 수 있을 것이다.

이 연구에서는 불균질 매질을 생성하는 방법과 산란 현상에 대하여 살펴보고, 균질 매질과 불균질 매질로 이루어진 수평 5층 구조모델에 대해 유한차분 음향 파동방정식을 이용하여 음원 모음도를 작성하였다. 불균질 가스 하이드레이트 층을 모사하기 위해 균질 모델에 무작위 불균질 층

- 1) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail : linuxyoung@hanmail.net
Tel : (042)868-3402 Fax : (042)861-0264
- 2) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
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 석유해저자원연구부
E-mail : sysuh@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3400 Fax : (042)861-0264

을 추가하여 각각의 음원 모음도를 만들었다. 이 음원 모음도로부터 불균질 가스 하이드레이트 층이 탄성과 단면도에 미치는 영향을 균질 모델의 경우와 비교하여 분석하고자 하였다.

2. 본 론

불균질성을 포함하는 복잡한 매질을 설명하는 한 방법은 매질의 물리적인 특성(P파, S파 속도, 밀도 등)이 공간에서 통계적으로 분포하는 무작위 매질로 간주하는 것이다.

논문에서 수행되는 수치 모델링은 소규모 불균질성을 가정하였다. 여기에서 소규모 불균질성은 평균값의 변화에 의한 변화를 의미하며 상관길이의 크기가 주 파장보다 작은 것을 의미하고, 이 불균질성은 균질매질 내에 무작위로 분포한다.

무작위 불균질 매질에서 속도장은 평균 속도 v_0 와 변화량 $\delta v(\vec{x})$ 의 중첩으로 간주할 수 있다.¹⁰⁾

$$v(\vec{x}) = v_0 + \delta v(\vec{x}) = v_0(1 + \xi(\vec{x})) \quad (1)$$

여기에서 \vec{x} 는 공간의 위치 벡터이며 $\xi(\vec{x})$ 는 속도의 미소 변화를 의미한다. 평균 속도 v_0 는 다음과 같다.

$$v_0 = \langle v(\vec{x}) \rangle \quad \text{and} \quad \langle \xi(\vec{x}) \rangle = 0$$

즉, v_0 는 매질의 평균 속도이며 평균 변화량은 0이고, $\langle \dots \rangle$ 는 집합평균(ensemble average)을 의미한다.

자기 상관함수는 다음과 같이 정의 된다.

$$F(x) = \langle \xi(\vec{y})\xi(\vec{y} + \vec{x}) \rangle \quad (2)$$

여기에서 x 는 지연거리(lag distance)이다. 자기상관함수는 매질의 변화 강도와 공간 상관의 통계적 측정이며 지연거리 x 에 의해 매질 매개변수의 유사성 정도를 설명한다. 만약 매질이 등방성이라면 자기상관함수는 단지 $r = |\vec{x}|$ 에만 의존한다. 속도 변화의 크기는 미소 변화의 평균 제곱근으로 주어진다.

$$\epsilon^2 \equiv F(0) = \langle \xi(\vec{x})^2 \rangle \quad (3)$$

여기에서 ϵ^2 은 분산, ϵ 은 표준 편차이다. 상관함수의 푸리에 변환은 파워스펙트럼 밀도함수(power spectral density function)가 되며 다음과 같다.

$$P(\vec{k}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\vec{x}) e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}} d\vec{x} \quad (4)$$

여기에서 \vec{k} 는 파수 벡터이다.

지질 구조를 묘사하는데 주로 사용되는 자기 상관함수는 가우시안(gaussian), 지수함수, 폰 카르만(von Kármán) 등의 세 가지가 있으며 가우시안 자기상관 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$F(r) = \epsilon^2 e^{-\frac{r^2}{a^2}} \quad (5)$$

이 함수는 저주파수 대역 통과된 백색 잡음을 의미한다. 단파장 성분이 적기 때문에 불균질 매질을 표현하기에 너무 부드러운 단점이 있다. 지수 자기상관함수는 다음과 같이 정의된다.

$$F(r) = \epsilon^2 e^{-\frac{r}{a}} \quad (7)$$

여기에서 ϵ 은 표준편차이며, ϵ^2 은 분산을 의미한다. 가우시안과 지수 함수 매질에서, 상관길이 a 는 매질 불균질성의 특성 길이와 직접적으로 관련이 있고 상관함수의 기울기는 매질의 상관 길이와 관련이 있다.

폰 카르만 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$F(r) = \frac{\epsilon^2 2^{1-\kappa}}{\Gamma(\kappa)} \left(\frac{r}{a}\right)^\kappa K_\kappa\left(\frac{r}{a}\right) \quad (6)$$

여기에서 Γ 는 감마함수이고 κ 는 허스트 수(Hurst number)이며, K_κ 는 κ order의 제 2종 변형 베셀함수이다. 다른 상관함수보다 소규모 모델을 묘사하는데 보다 정확하고, 자기유사(self-similar) 또는 자기아핀(self-affine) 매질을 의미한다. 폰 카르만 함수에는 단파장 성분이 많으며 통상 일반적인 지질 구조를 모델화하는데 사용되고 있다. 허스트 수가 감소하면 매질의 거칠기(roughness)가 증가하고, $\kappa = 0$ 이면 공간 채움 장(space-filling field), $\kappa = 0.5$ 이면 지수함수와 같게 된다. $\kappa = 1.0$ 이면 부드러운 유클리안 무작위 장(euclidean random field)이 된다.

무작위 매질은 백색 잡음을 계산한 다음, 이 스펙트럼을 상관함수의 파워 스펙트럼 밀도함수의 제곱근으로 곱한 후 역 푸리에 변환을 하면 만들 수 있다.

서로 다른 산란 현상이 산란체의 크기와 신호의 파장(또는 파수) 사이의 관계에 의해 존재하고 산란 현상에 따라 주파수 의존적인 감쇠 계수도 차이가 있다(Fig. 1). 예를 들어 레일리 산란(Rayleigh scattering, $0.01 \leq k \cdot a \leq 0.1$, k 는 파수, a 는 상관길이)에서 감쇠 계수는 주파수의 4승에 비례한다. 공진 산란(resonance(Mie) scattering, $0.1 \leq k \cdot a \leq 10$)의 경우 파장이 산란체의 크기로 접근할 때 감쇠 계수는 주파수에 비례한다.

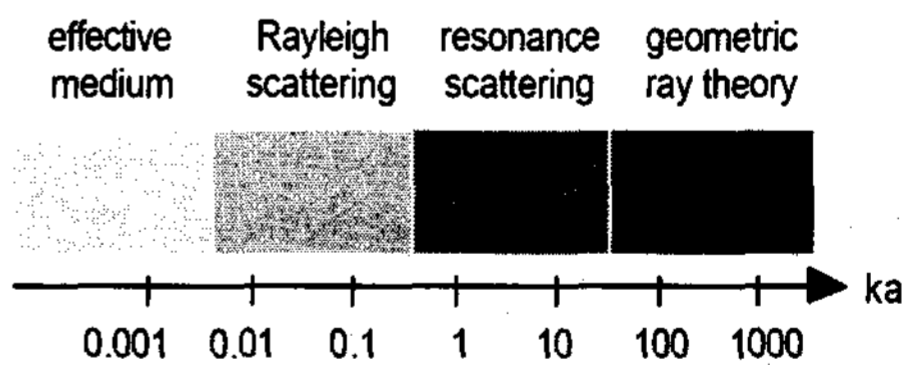


Fig. 1. The scattering regimes for which the magnitude and radiation characteristics of the scattering is controlled by the product of the wavenumber, k , and the size of the scatterer, a (radius) (from Pyrak-Nolte, 2002).

수치 모델링을 수행할 모델의 크기는 1001×401 개, x 와 z 축의 격자 간격은 각각 10 m로 하였다. 음원의 중심 주파수는 10 Hz인 리커 파형을 가정하였으며 최대 주파수는 20 Hz로 하였다. 경계조건은 상부는 자유면(free surface), 좌우와 하부는 흡수 경계조건을 적용하였고 5초까지 기록하였다. 음원은 매 100 m 간격으로 총 101개, 수진기는 매 10 m마다 위치한 것으로 가정하였다.

무작위 매질은 세 가지 자기상관함수를 모두 사용하여 각각 만들었다.

Fig. 2는 모델링에 사용된 각 층의 두께와 속도를 나타내고 있으며, Fig. 3은 이것을 바탕으로 생성된 균질 모델이다.

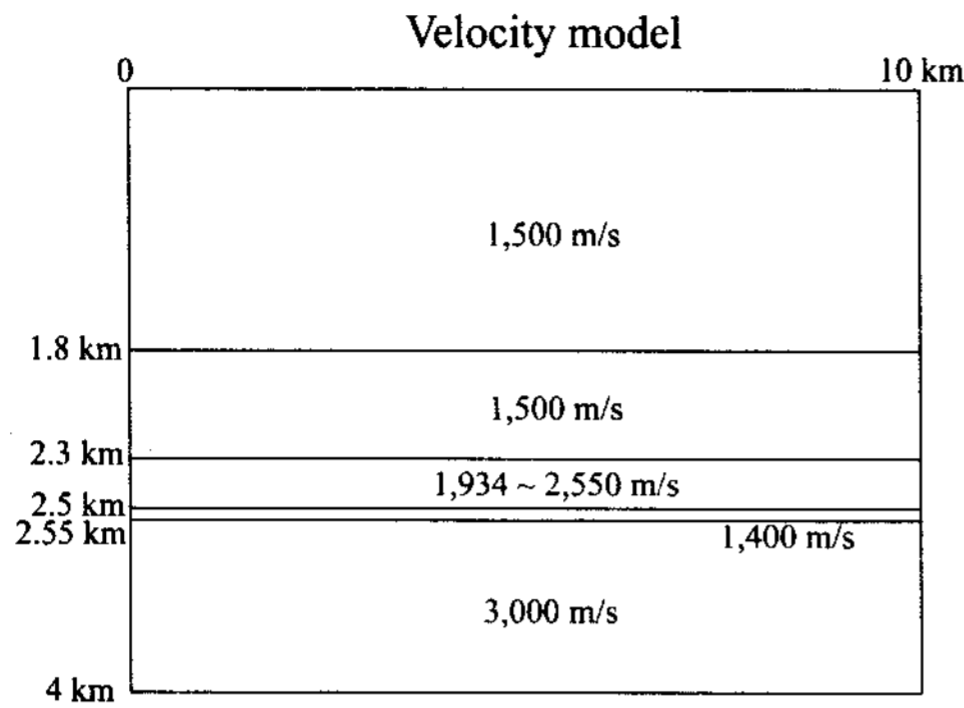


Fig. 2 Velocities and thickness of each layers.

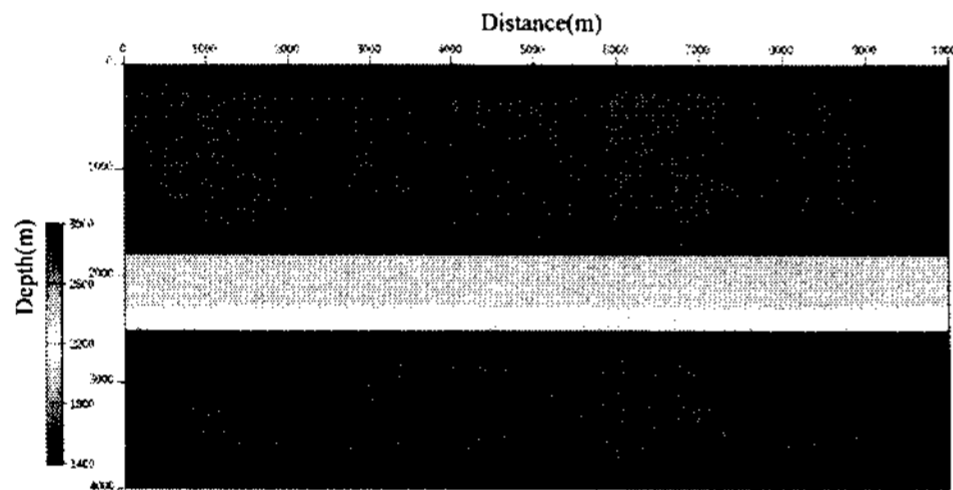


Fig. 3 Homogeneous velocity model.

Fig. 4의 (a), (b), (c)는 각각 지수 자기상관함수, 가우시안 자기상관함수, 폰 카르만 자기상관함수를 이용하여 만든 무작위 매질의 일부분을 도시한 것이다.

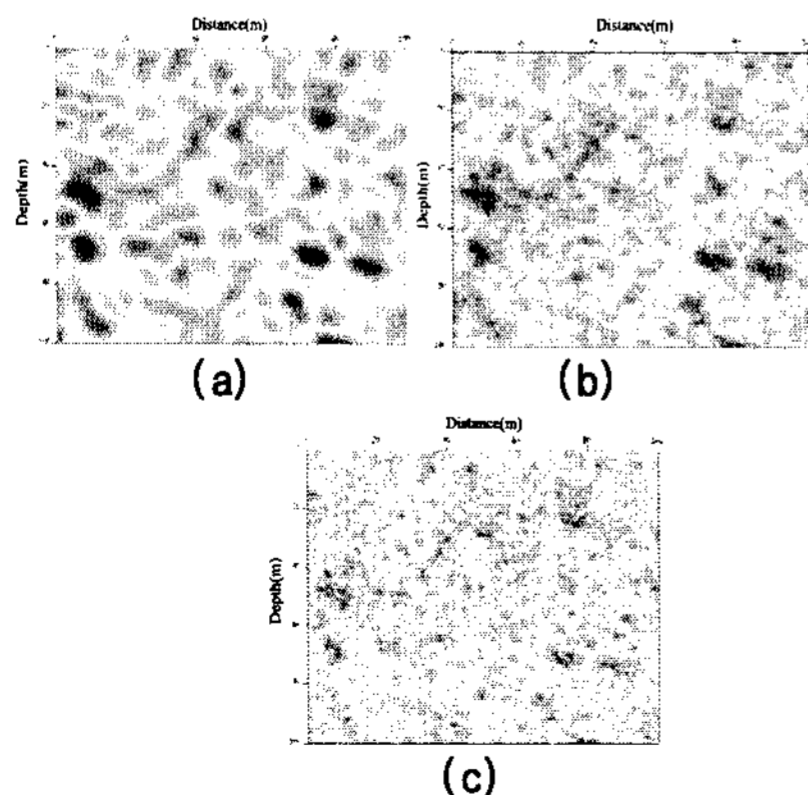


Fig. 4 Random inhomogeneous media. (a) is gaussian ACF, (b) is exponential ACF, (c) is von Karman ACF, Hurst no.=0.2, $cl=50$, respectively.

그림을 살펴보면 지수 자기상관함수가 매질을 가장 부드럽게 나타내고 있음을 볼 수 있고, 폰 카르만 함수가 단파장 성분이 가장 풍부함을 볼 수 있으며, 이러한 특성으로 인하여 폰 카르만 자기상관함수가 통상적인 지질 모델을 모사하는데 가장 많이 사용된다.

Fig. 5는 수치 모델링에 사용된 불균질 가스 하이드레이트 층을 가정한 속도 모델이다. 첫 번째 층은 해수층을 가정하였으며 두 번째 층은 속도가 선형적으로 증가하고, 세 번째 층은 불균질 가스 하이드레이트층을 가정하였다. 네 번째 층은 free-gas 층을 가정하였고 마지막 층은 기반암을 가정하였다.

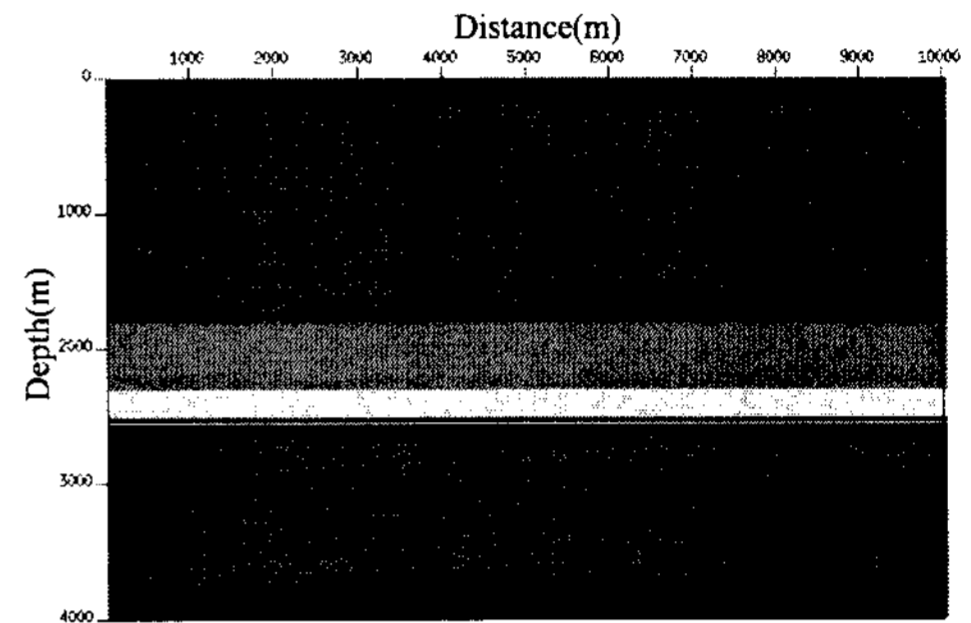


Fig. 5 Velocity model consider of inhomogeneous gas hydrate layer.

Fig. 6은 Fig. 3의 균질 모델을 사용한 음원 모음도이다. 속도 역전층에 의한 위상 역전을 확인할 수 있으며, 동시에 다중 반사파에 의한 영향도 볼 수 있는 것으로 보아 정상적으로 수치 모델링이 수행되었음을 확인할 수 있다.

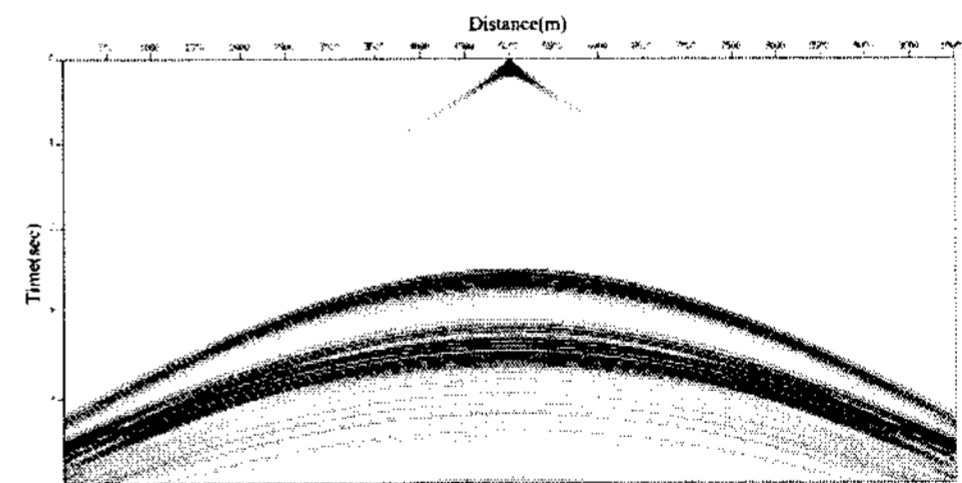


Fig. 6 Shot gather in homogeneous medium.

Fig. 7은 불균질 가스 하이드레이트 층을 가정한 모델을 바탕으로 얻은 음원 모음도이다. 균질 모델에서와 달리 복잡한 파동 전파 양상을 볼 수 있으며 보다 현장 자료와 유사한 단면을 얻을 수 있었다.

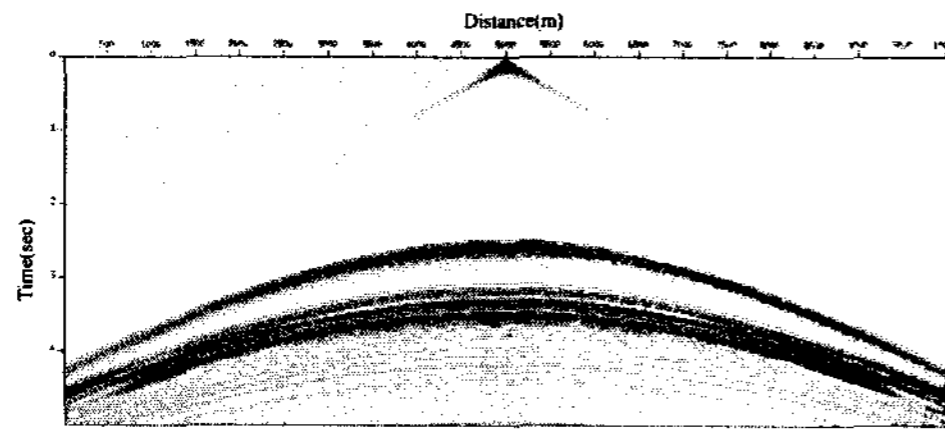


Fig. 7 Shot gather consider of inhomogeneous gas hydrate layer.

3. 결론

연구에서는 불균질 매질을 생성하는 방법과 산란 현상에 대하여 살펴보고, 균질 매질과 불균질 매질로 이루어진 수평 5층 구조모델에 대해 유한차분 음향 파동방정식을 이용하여 음원 모음도를 작성하였다. 불균질 가스 하이드레이트 층을 모사하기 위해 균질 모델에 무작위 불균질 층을 추가하여 각각의 모델로부터 음원 모음도를 만들었다. 그 결과 불균질 층을 가정한 모델이 산란등에 의한 영향으로 보다 복잡한 파동 전파양상이 나타남을 확인하였으며, 이는 실제 자료에서 나타나는 파동 현상을 이해하는데 기초가 되리라 판단된다. 차후 복잡한 모형, 3-D, 구조보정 등으로 확장하여 보다 현실에 맞는 모델링을 구현하는 것이 필요하리라 생각된다.

4. 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 “국내대륙붕 탐사정보 종합 DB구축” 과 “(주)아시아지오 컨설턴트” 의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- [1] Kvenvolden, 1993, Gas hydrate - geological perspective and global change, *Reviews of Geophysics*, 31, 173-187.
- [2] Shipley, T. H., Houston, M. H., Buffler, R. T., 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.
- [3] Andreassen, K., Hart, E. H. and MacKay, M., 1997, "Amplitude versus offset modeling of the bottom simulation reflection associated with submarine gas hydrate", *Marine Geology*, 137, 25-40.
- [4] Whalley, E., 1980, Speed of longitudinal sound in clathrate hydrates, *J. Geophys. Res.*, 85, 2539-2542.
- [5] Rowe, M. M., and Gettrust, J. F., 1993, Fine structure of methane hydrate-bearing sediments on the Blake Outer Ridge ad determined from deep-tow multichannel seismic data, *J. Geophys. Research*, 98, 463-473.
- [6] Holbrook, W. S., Hoskins, H., Wood, W. T., Stephen, R. A., Lizarralde, D., and the Leg 164 Scientific Party, 1996, Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling, *Science*, 273, 1840-1843.
- [7] Stoll, E. D. and Bryan, G. M., 1979, "Physical properties of sediments containing gas hydrates", *J. Geophys. Res.*, 84, 1629-1634.
- [8] Wu, R. -S., and Aki, K., 1988, Introduction: Seismic wave scattering in three-dimensionally heterogeneous earth, *PAGEOPH*, Vol., 128, 1-6.
- [9] Martini F., 2001, Seismic imaging below basalt, National University of Ireland, Ph. D. thesis.
- [10] Ludek Klimes, 2001, Correlation functions of random media, *Seismic waves in complex 3-D structure*, Report 11, p. 91-109.