

불균질 매질에서 탄성과 모델링

김영완^{1*} · 장성형¹ · 윤왕중²

¹한국지질자원연구원, ²전남대학교 지구시스템공학과

Seismic Modeling for Inhomogeneous Medium

Youngwan Kim^{1*}, Seonghyung Jang¹ and Wangjung Yoon²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral resources, ²Geosystem Engineering in Chonnam National University

The seismic velocity at the formation varies widely with physical properties in the layers. These features on seismic shot gathers are not capable of reproducing normally by numerical modeling of homogeneous medium, so that we need that of random inhomogeneous medium instead. In this study, we conducted Gaussian autocorrelation function (ACF), exponential autocorrelation function and von Kármán autocorrelation function for getting inhomogeneous velocity model and applied a simple geological model. According to the results, von Kármán autocorrelation function showed short wavelength to the inhomogeneous velocity medium. For numerical modeling for a gas hydrate, we determined a geological model based on field data set gathered in the East sea. The numerical modeling results showed that the von Kármán autocorrelation function could properly describe scattering phenomena in the gas hydrate velocity model which contains an inhomogeneous layer. Besides, bottom-simulating-reflectors and scattered waves which appear at seismic shot gather of the field data showed properly in the inhomogeneous numerical modeling.

Key words : Inhomogeneous medium, Autocorrelation function, Hurst number, Seismic modeling

탄성과 속도는 지층 물성에 따라 다양하게 분포한다. 탄성과 음원 모음도 상에 나타나는 이러한 특성은 균질 매질을 고려한 수치 모델링에서는 정상적으로 모사할 수 없으므로 무작위 불균질 매질을 고려한 수치 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 불균질 매질 모델을 설정하고, 가우스 자기상관 함수, 지수 자기상관 함수, 폰 카르만 자기상관 함수를 이용하여 단순 지층 구조에 적용하고 각각의 특성을 살펴보았으며, 이 가운데 폰 카르만 자기상관 함수가 단파장 불균질 속도매질을 잘 표현함을 알 수 있었다. 가스 하이드레이트 수치모델링은 동해 현장자료를 바탕으로 해저면과 모델크기를 결정하였으며, 수치모델링 결과 폰 카르만 자기상관함수가 불균질 지층구조를 포함하는 가스 하이드레이트 속도모델에서 산란현상을 가장 적절하게 구현함을 알 수 있었다. 또한 동해 탄성과 탐사자료의 탄성과 음원 모음도에서 나타나는 해저면 기인 강진폭 위상역전 반사파(BSR: bottom simulated reflector)와 산란파들이 불균질 수치 모형실험에서 적절하게 구현되었음을 알 수 있었다.

주요어 : 불균질 매질, 자기상관함수, 허스트 수, 탄성과 모델링

1. 서 론

탄성과의 산란은 전파되는 탄성과와 매질 내에 포함된 불균질성과의 상호작용에 의해 나타난다. 불균질 매질에서 속도와 밀도 분포는 탄성과 단면도상에서 도달된 파의 겉보기 감쇄뿐만 아니라 파형, 위상, 주시, 진

폭 등의 변화를 일으키는 원인이 된다. 이러한 원인에 의한 산란의 영향은 신호 왜곡과 진폭 손실을 초래하여 반사의 일관성 또는 반사계수에 영향을 미치며, 압입돌 하부, 현무암 하부, 단층, 습곡 등과 같은 복잡한 지역의 해석을 매우 어렵게 만든다(Wu and Aki, 1985; Martini, 2001). 따라서 이러한 산란현상을 발생

*Corresponding author: linuxyoung@hanmail.net

시키는 불균질 매질 지층모델을 구축하고, 이러한 불균질 지층 모델을 이용한 수치 모형실험을 통하여 실제 음원 모음도 상에서 나타나는 다양한 현상에 매질의 불균질성도 큰 영향을 미침을 확인하고자 하였다.

탄성과 산란에 관한 연구는 주로 지진 연구 분야에서 활발히 이루어져 왔다. Aki and Chouet(1975)는 탄성과 코다의 존재로부터 지각의 소규모 속도 불균질성을 예측하였고, Frankel and Clayton (1986)은 코다 감쇄율과 지각의 통계적 특성을 정량적으로 조사하기 위해 유한 차분 모델링을 수행하였다. 반사법 탄성과 탐사에 적용된 경우는 Powell(1984)이 속도 분석에서 무작위 파동장에 의한 영향을 연구하여 무작위 교란 매질에 의한 비쌍곡선 경로시차(moveout)가 알 · 엠 · 에스(RMS) 속도를 추정하는데 큰 오차를 일으킬 수 있음을 보였다. Gibson and Levander (1990)은 무작위 영역에 의해 산란된 신호의 공통중간점(common midpoint) 중합의 영향을 시험하기 위해 음향 유한 차분 모델링을 수행하였다. Kamei *et al.*(2005)은 가스 하이드레이트 탐사를 가정한 모델에서 이중모드 속도 분포를 갖는 무작위 불균질 매질을 생성하여 수치 모델링을 수행하였다. 그 결과 무작위 모델의 속도변화가 파의 산란에 영향을 줌으로써 현장 자료에서 나타나는 심한 감쇠가 산란에 의한 부가적인 진폭 감쇠에 의한 것임을 보였다.

대부분의 탄성과 탐사에서 지층구조를 균질 층으로 가정할 경우 물리검층이나 시추 코어에 의해 확인되는 소규모 불균질성을 고려할 수 없으며 또한 이러한 지층모델에서 합성 탄성과 단면도는 현장 자료에서 보이는 다양한 변화를 설명하기 어렵다. 따라서 불균질 매질 지층 모델을 구현하는 방법이 필요하며 본 연구에서는 확률분포를 나타내는 가우스, 지수, 폰 카르만 자기상관 함수에 의한 불균질 모델을 설정하고, 각각에 해당하는 음원 모음도를 작성하여 산란과 거동 특성을 파악하고자 한다.

한편 가스 하이드레이트는 새로운 에너지원에 대한 가능성으로 다양한 연구가 진행되고 있으며 고압, 저온 조건하에서 물과 메탄가스가 결합하여 형성된 고체상 화합물로 적절한 조건이 갖춰진 해저 퇴적층에 광범위하게 분포되어 있다고 알려져 있다(Kvenvolden, 1993). 가스 하이드레이트 안정영역(Gas hydrate stability zone)은 하이드레이트가 형성되어 해리되지 않고 안정하게 존재할 수 있는 영역을 말하며 안정영역의 하한에서 BSR이 나타난다. 탄성과 탐사 자료에서 가스 하이드레이트의 부존 가능성을 확인하는 방법은 탄성과

단면도상에 나타나는 BSR과 에이·브이·오(Amplitude Variation with Offset: AVO) 분석 등을 통하여, BSR 상부에는 전형적인 진폭감소 현상을 볼 수 있으며 하부에는 가스에 의한 진폭증가 양상을 보인다(Shipley *et al.*, 1979; Andreassen *et al.*, 1997). 가스 하이드레이트를 포함하는 퇴적층의 P파 속도는 실험실 실험 및 탄성과 탐사자료의 분석을 통하여 하이드레이트 안정영역에서 매우 불규칙하게 분포하고 있는 것으로 알려져 있다(Whalley, 1980; Rowe and Gettrust, 1993; Holbrook *et al.*, 1996). 또한 가스 하이드레이트는 이를 포함하는 퇴적층의 구간속도를 증가시키며 그 증가하는 정도는 하이드레이트의 양에 비례하는 것으로 알려져 있다(Stoll and Bryan, 1979). 본 연구는 동해 가스 하이드레이트 탄성과 자료로부터 지층 모델을 구하고, 가스 하이드레이트를 포함하는 지층을 무작위 불균질 매질로 가정하여 수치 모형실험을 수행하였다. 이러한 방법으로 작성한 합성 탄성과 단면도를 통해 가스 하이드레이트 현장 탄성과 자료와 비교하여 균질 매질을 가정한 수치 모델링에서 확인할 수 없었던 산란에 의한 음원 모음도의 변화를 보고, 이를 통하여 보다 현실적인 수치모델링 수행에 불균질 매질을 포함하여야 함을 확인하고자 하였다.

2. 무작위 매질(Random medium)

일반적으로 불균질 매질은 확률분포 특성을 나타내는 가우스 자기상관 함수, 지수 자기상관 함수, 폰 카르만 자기상관 함수 등을 이용하여 구현된다. 여기에서 각각의 특성을 살펴보고 탄성과 산란현상을 가장 잘 나타낼 수 있는 불균질 속도모델에 적합한 함수를 결정하고자 한다.

매질 특성의 시간에 대한 변화는 일반적으로 매우 느리기 때문에, 매질의 특성을 표현하는 무작위 함수는 공간에 대해서만 변화한다고 간주할 수 있다. 불균질성을 포함하는 복잡한 매질은 매질의 물리적인 특성(P파, S파 속도, 밀도 등)이 공간에서 통계적으로 분포하는 무작위 매질로 설명될 수 있다. 지질구조를 매질 매개변수(material parameter) u 의 공간적 분포 $u=u(x)$ 로 표현된다고 하자. 여기에서 매질 매개변수 u 는 P파 속도, S파 속도, 밀도 등이 될 수 있다.

무작위 불균질 매질에서 속도분포를 평균 속도 v_0 와 미소 변화량 $\delta v(\vec{x})$ 의 중첩으로 나타내면

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

이다(Klimeš, 2002). 여기서 \vec{x} 는 공간의 위치 벡터, $\xi(\vec{x})$ 는 속도의 미소 변화를 의미한다. 평균 속도 및 속도변화량의 평균은 각각 $v_0 = \langle v(\vec{x}) \rangle$, $\langle \xi(\vec{x}) \rangle = 0$ 이며, $\langle \rangle$ 는 평균(ensemble average)을 의미한다.

매질의 무작위성을 나타내는 자기 상관함수는

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

으로 정의되며, 여기서 \vec{x} 는 지연거리(lag distance)를 의미한다. 자기상관함수는 매질의 변화 강도와 공간 상관의 통계적 측정이며, 지연거리 \vec{x} 에 의해 매질 매개변수의 유사성 정도를 설명하며, 등방성 매질일 경우 자기상관함수는 공간거리 $r = |\vec{x}|$ 에만 의존한다.

본 논문에서 불균질 매질은 평균이 0이며, 표준 편차는 1, 그리고 상관길이 a 를 갖는 균질, 등방 무작위 장이라 가정하였다. 그러므로 매질의 무작위 속도변화는 배경 매질에 대한 미소 변화로 나타나며, 무작위 장의 상관함수는 지연거리 \vec{x} 에만 의존하며, 이 때 속도 변화의 크기는 미소 변화의 평균 제곱근으로

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

이며, 여기서 ε^2 은 분산을 의미한다. 상관함수의 푸리에 변환은 파워스펙트럼 밀도함수(power spectral density function), $P(k)$, 는

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

이며, 여기서 \vec{k} 는 파수 벡터이다.

지질 구조를 모사하는데 주로 사용되는 자기 상관함수는 가우스 함수, 지수함수, 폰 카르만 등의 세 가지를 들 수 있다. 가우스 자기상관 함수는

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

이며, r 은 공간에서의 거리, a 는 상관길이를 의미한다. 이 함수는 저주파수 대역을 통과한 백색 잡음으로, 불균질 매질이 지나치게 평활화 되어 탄성파의 산란이나 주시 변화 표현에 적절하지 않다(Wu and Aki, 1985; Sato and Fehler, 1998).

또한 지수 자기상관함수는

$$F(r) = \varepsilon^2 e^{-\frac{r}{a}} \quad (6)$$

으로 가우스 함수와 지수 함수 매질에서 상관길이 a 는 매질 불균질성의 특성 길이와 직접적으로 관련이 있고 상관함수의 기울기는 매질의 상관 길이와 관련이 있다.

폰 카르만 함수는

$$F(r) = \frac{\varepsilon^2 2^{1-\kappa}}{\Gamma(\kappa)} \left(\frac{r}{a}\right)^\kappa K_\kappa\left(\frac{r}{a}\right) \quad (7)$$

이며, Γ 는 감마함수(gamma function), κ 는 허스트 수(Hurst number), K_κ 는 κ 차수의 제 2종 변형 베셀 함수이다. 폰 카르만 함수는 다른 상관함수보다 소규모 불균질 특성을 나타낼 수 있으며 자기유사(self-similar) 매질을 의미하기도 하며 또한 단파장 성분이 많아 일반적인 지질 구조를 모델화하는데 이용된다. 허스트 수가 감소하면 지층 매개변수 분포(속도, 밀도 등)가 증가하고, $\kappa=1$ 이면 지층 매개변수 분포도가 최대가 되며, $\kappa=0.5$ 이면 지수함수와 같게 된다. $\kappa=1.0$ 이면 부드러운 유클리디안 무작위 장(euclidean random field)이 된다. 무작위 매질은 백색 잡음을 계산한 다음, 이 스펙트럼을 파수 영역(wavenumber domain)에서 상관함수의 파워 스펙트럼 밀도함수의 제곱근으로 필터링한 후, 역 푸리에 변환을 하면 만들 수 있다.

한편 탄성파와 불균질 매질 사이의 산란 정도는 불균질성의 크기인 a 와 주파장 λ 에 의해 결정되며 무차원 매개변수 $k \cdot a$ ($k = 2\pi/\lambda$)로서 산란 현상을 설명할 수 있다.

$k \cdot a \ll 0.01$ 인 경우 매질은 유사-균질 매질로 간주될 수 있다. 불균질성의 크기는 탄성파의 파장에 비해 매우 작으므로 산란현상은 무시할 수 있을 정도로 작다. 레일리 산란(Rayleigh scattering) 현상은 $0.01 \leq k \cdot a \leq 0.1$ 인 경우로 단일 산란 가정에 근거한 본 근사(Born approximation)로서 설명될 수 있으며 3차원인 경우 산란 에너지의 양은 k^4 에 비례한다. 미에 산란(Mie scattering) 또는 공진 산란(resonant scattering)은 $0.1 \leq k \cdot a \leq 10$ 에 해당하는 경우로 불균질의 크기가 탄성파의 파장과 비슷한 경우이며, 입사파는 입사 방향에 비해 상대적으로 큰 각으로 산란된다. 전방 산란(forward scattering) 현상은 $10 \leq k \cdot a$ 인 경우를 말하며, 탄성파의 파장이 상관 길이에 비해 작다. 그러므로 탄성파의 에너지는 주로 전방으로 산란된다. 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). 레일리 산란에서 감쇠 계수는 주파수의 4승에 비례하며 공진 산란의 경우 파장이 산란체의 크기로 접근할 때 감쇠 계수는 주파수에 비례한다. Fig. 1은 $k \cdot a$ 에 의한 산란 정도를 그림으로 나타낸 것이다. 본 논문에서 수행한 수치 모형실험은 상관 길이를 다양하게 변화시켜

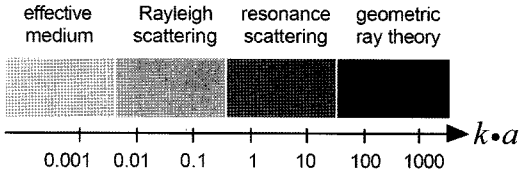


Fig. 1. The scattering regimes for which the magnitude and radiation characteristics of the scattering are controlled by the product of the wavenumber, k , and the size of the scatterer, a (radius) (Pyrak-Nolte, 2002).

각각의 산란 현상을 살펴볼 수 있도록 하였다.

본 논문에서 수행되는 수치 모형실험은 소규모 불균질성을 가정하였다. 여기에서 소규모 불균질성은 평균값의 변화에 의한 변화를 의미하며, 상관길이의 크기가 주 파장보다 작은 것을 의미하고, 이 불균질성은 균질매질 내에 무작위로 분포한다. 그리고 매질 자체가 갖는 본질적인 감쇄는 고려하지 않았다. 그러므로 음원 모음도에서 보이는 모든 감쇄는 무작위 매질의 산란에 의한 것이다.

Fig. 2는 상관 길이를 50으로 동일하게 하여 세 가지 자기상관 함수로 만든 무작위 불균질 매질의 일부

분을 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 가우스 자기상관 함수를 이용하여 만든 무작위 불균질 매질이며, 다른 두 자기상관 함수에 비해 매우 부드러운 매질이 구현되었음을 확인할 수 있다. Fig. 2(b)는 지수 자기상관 함수를 이용하여 만든 무작위 매질이며, Fig. 2(c)는 허스트 수 0.2인 폰 카르만 자기상관 함수를 이용하여 만든 무작위 매질로서 단파장 성분이 충분히 포함되어 있음을 확인할 수 있다.

3. 수치 모형실험

확률분포 특성으로 구한 불균질 속도 모델에서 파동장 특성을 살펴보기 위해 수치 모형실험을 실시하였으며, 이 때 파동방정식의 해는 유한 차분식을 이용하였다. 불균질 매질에서 음향 파동 방정식은

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = KV \cdot (\rho^{-1} \nabla P) \tag{8}$$

으로, 여기서 P 는 압력, K 는 체적 탄성계수, ρ 는 밀도이다. 매질의 밀도를 상수로 가정하여 2차원 시간-공간

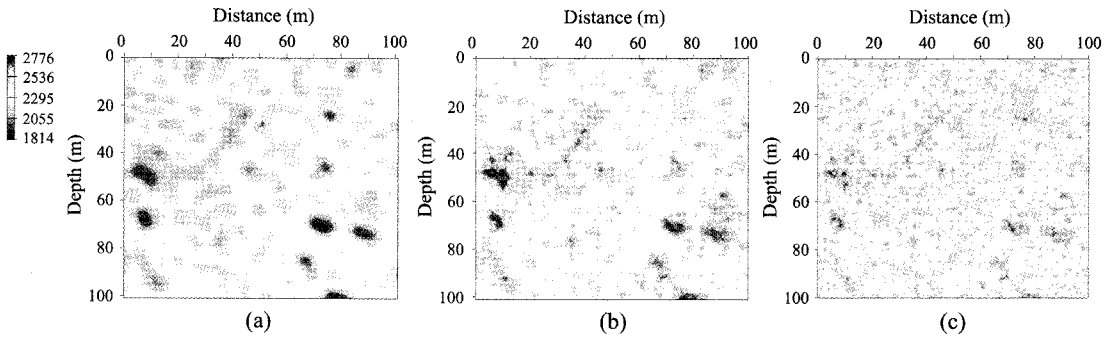


Fig. 2. Random inhomogeneous medium obtained by using (a) gaussian ACF, (b) exponential ACF, (c) von Kármán ACF with Hurst no. of 0.2, correlation length of 50.

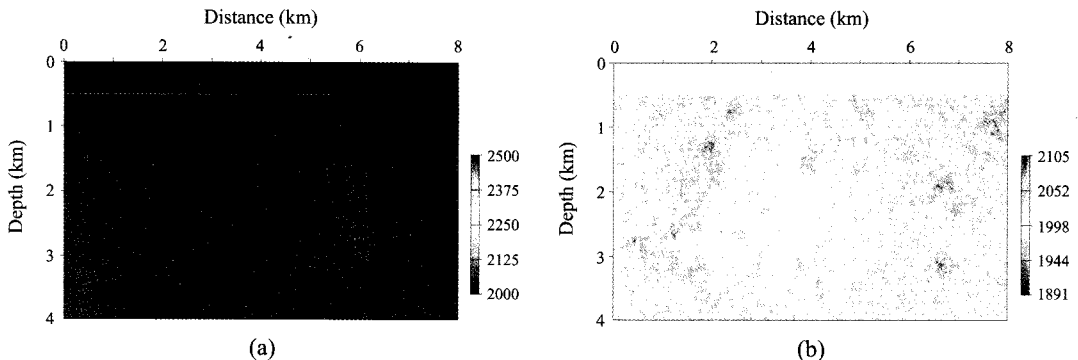


Fig. 3. Velocity model for (a) a homogeneous model, and (b) an inhomogeneous model.

영역에서 나타내면

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = v^2(x, z) \left[\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right] \quad (9)$$

이다. 여기서 x 는 수평방향 거리, z 는 수직방향 거리이며, $v(x, z)$ 는 속도이다. 일반적으로 파동방정식 모델링은 위상속도(phase velocity)와 군속도(group velocity)가 파장당 격자수와 파선방향에 따라 달라지는 현상이 발생하고 지층모델의 유한성 때문에 모델 지표면을 제

외하고 좌우 양단면과 하부 경계면에서 인위적인 반사파가 발생한다. 또한 시간-공간영역에서 시간적분 과정이 수반되므로 오차 누적이 발생하여 해가 발산하는 경우가 발생한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 안정조건, 격자분산 및 경계조건을 고려해야 한다. 일반적으로 파동방정식 해의 안정성을 유지하기 위해 공간적 시간격(Δ)와 시간적분간격(Δt)이 $\frac{v\Delta t}{\Delta} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$ 이 되도록 설정하고, 파의 진파 방향에 따라 변하는 위상속도 및

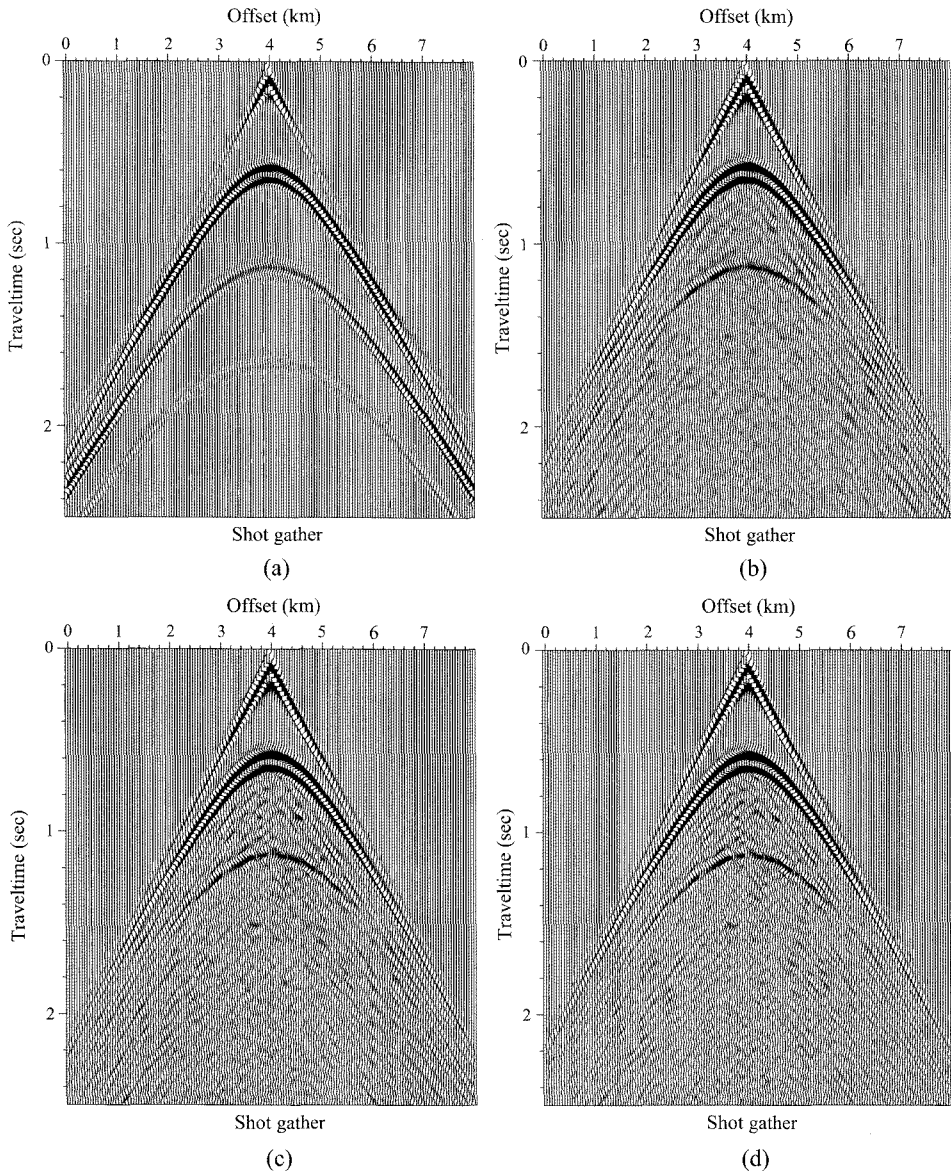


Fig. 4. Synthetic shot gathers obtained by using (a) homogeneous velocity model, (b) gaussian ACF, (c) exponential ACF, (d) von Kármán ACF, Hurst no. of 0.2, correlation length of 50.

균속도 변화에 따른 격자분산을 줄이기 위해 최소 파장당 격자수를 15개 이상으로 설정한다(Alford *et al.*, 1974; Kelly *et al.*, 1974). 파장당 격자수는 해의 정확성과 계산시간에 결정적인 영향을 주므로 해상도를 유지하면서 격자수를 줄일 수 있는 방법이 연구되어 왔으며 가중평균법 (weighted average)을 이용하거나 (Jo *et al.*, 1996; Shin and Sohn, 1998) 또는 고차근사 차분식(high order finite difference)(Loewenthal *et al.*, 1991) 을 이용한다. 여기에서는 파동 방정식의 4차 근사식을 사용하였으며, 위에서 언급한 안정조건이 되도록 공간격자간격과 시간적분간격을 설정하였으며, 파장당 격자수를 13개 이상으로 하여 격자수를 줄이면서 해의 정확도를 유지하도록 하였다. 파동방정식 (9) 를 4차 근사식으로 표현하면

$$P_{i,j}^{k+1} = 2P_{i,j}^k - P_{i,j}^{k-1} + \frac{v^2 \Delta t^2}{\Delta^2} \left[2.5P_{i,j}^k + \frac{16}{12}(P_{i-1,j}^k + P_{i+1,j}^k + P_{i,j-1}^k + P_{i,j+1}^k) - \frac{1}{12}(P_{i-2,j}^k + P_{i+2,j}^k + P_{i,j-2}^k + P_{i,j+2}^k) \right] \quad (10)$$

이며, 이 식은 균질, 불균질 속도 모델에서 파동장을 구하는데 이용된다.

4. 수평 2층 모형에 대한 수치 모델링

균질 속도모델과 불균질 속도 모델로 이루어진 수평 2층 구조(Fig. 3)에 대한 수치 모형실험에서 모델의 크

기는 8×4 km 축의 격자 간격은 각각 10 m, 격자수는 801×401개이다. 음원의 중심 주파수는 10 Hz인 리커 (ricker) 파형을 가정하였으며 최대 주파수는 20 Hz로 하였다. 경계조건은 상부는 자유면(free surface), 좌우와 하부는 흡수 경계조건(absorbing boundary condition)을 적용하였고 2 ms 간격으로 2.5초까지 기록하였다. 음원은 지표면 4km에 위치하였고, 수신기는 매 10 m마다 위치하였다. 모델 상부층의 P파 속도와 밀도는 각각 2,000 m/s, 1.5 g/cm³이며, 하부층은 2,500 m/s와 2.0 g/cm³으로 가정하였다. 하부층 불균질 속도 모델(Fig. 3(b))은 세 가지 자기상관 함수를 이용하여 만들었으며, 평균 속도는 2,000 m/s, 표준 편차는 1.2%, 속도 변화는 1,891~2,105 m/s로 하였고, 폰 카르만 자기상관 함수의 경우 허스트 수 0.2, 상관 길이를 50으로 하였다.

Fig. 4(a)는 균질 속도모델(Fig. 3(a))에 대한 음원 모음도이며, (b), (c), (d)는 각각 가우스 자기상관 함수, 지수 자기 상관함수, 폰 카르만 자기상관 함수를 이용하여 만든 불균질 속도 모델에서의 음원 모음도이다. 이 때 음원의 위치는 4,000 m, 수신기는 지표면에 위치한 것으로 가정하였다. Fig. 4(a)의 음원 모음도에서 직접파와 굴절파, 일차 반사파, 다중 반사파 등이 정상적으로 나타남을 확인할 수 있었고, 불균질 속도 모델을 사용한 음원 모음도가 실제 현장 자료에서 보이는 다양한 파동 현상을 보임을 볼 수 있다. 특히 폰 카르만 자기상관 함수를 사용한 Fig. 4(d)의 음원 모음도가

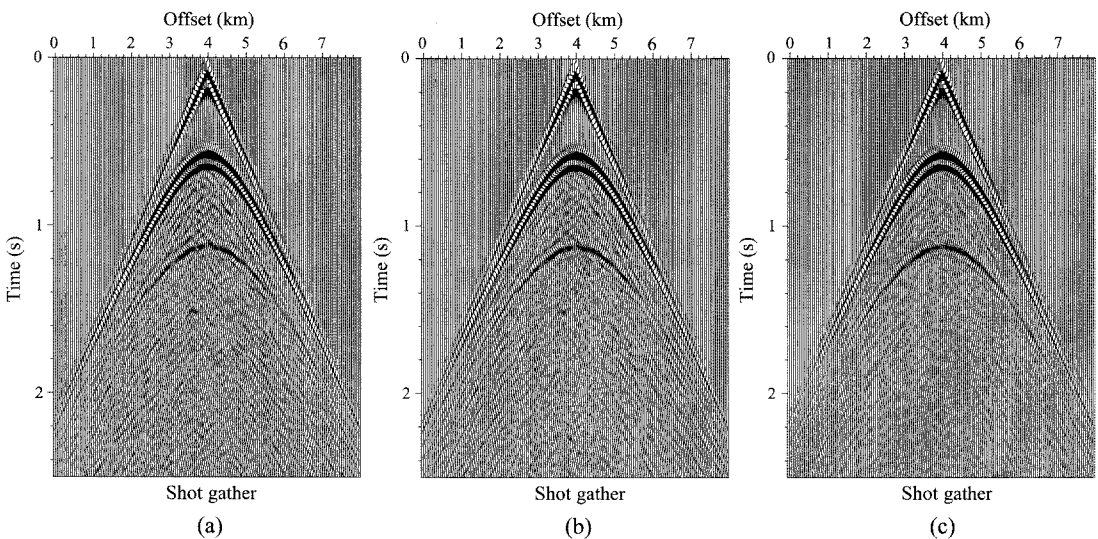


Fig. 5. Shot gathers generated by using von Kármán ACF, Hurst no. of 0.2 with (a) 10 m correlation length, (b) 200 m correlation length, (c) 3200 m correlation length.

미세한 반사 입자들이 가장 많이 보임에 따라 단파장 성분은 보다 많이 포함되어 있음을 볼 수 있다.

자기 상관함수의 상관길이에 따른 음원 모음도의 변화를 살펴보기 위해 상관길이만을 변화시켜가며 수치 모형실험을 실시하였다. Fig. 5는 폰 카르만 자기 상관함수를 이용하여 불균질 매질을 생성할 때 허스트 수를 0.2로 동일하게 하고 상관 길이만을 변화시켜 만든 음원 모음도이다. 상관 길이가 작을수록 단파장 산란이 많이 일어나고, 상관길이와 주파장이 비슷할 때 가장 많은 산란이 일어남을 볼 수 있었으며, 상관길이를 매우 크게 하면 균질 속도모델을 사용한 음원 모음도와 유사한 합성 단면도가 생성됨을 볼 수 있다. 세 가지 자기 상관함수를 모두 이용하여 상관길이를 시험한 결과 유사한 결론을 얻을 수 있었고, 여기에서는 폰 카르만 자기 상관함수를 이용한 결과만을 도시하였다.

5. 가스 하이드레이트 모형에 대한 수치 모델링

한국지질자원연구원에서는 가스 하이드레이트 부존 지역 탐사를 위해 1998년부터 동해 일원에서 탄성과 탐사를 실시하고 있다. 취득된 탐사자료는 약 1,500 m 이상의 깊은 해저면에서 기인한 해저면 반사파와 강한 진폭을 가지며 위상이 반대이고 해저면과 평행하게 발달한 해저면 기인 고진폭 반사파(BSR)가 관측되었다 (Fig. 6). Fig. 6은 자료처리결과인 중합단면도로 왕복 주시 약 2,950 ms에서 BSR이 명확하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. Jang *et al.*(2006)에 의해 구해진 중합 단면도를 참고로 하여 동해 가스 하이드레이트 현장자료와 유사한 지층모형을 설정하기 위해 모델크기를 해저면 깊이 4 km, 수평거리를 10 km로 하였으며, 가스 하이드레이트를 포함하는 지층을 불균질 매질로

정의하여 속도모델을 제작하고 수치 모형실험을 실시하였다.

가스 하이드레이트 지층모형은 현장 자료로부터 가로, 세로 격자 크기는 10 m, 격자 수는 1001×401개, 기록 시간은 5초, 최초 음원은 2,500 m에서 시작하여 매 100 m 마다 증가시키며 총 76개, 수신기는 240 채널을 가정하였으며, 음원의 주 주파수는 20 Hz, 최대 주파수는 40 Hz인 리커(ricker) 파형을 사용하였다. Fig. 7은 수치 모형실험에 사용된 속도 모델이다. 균질 모델의 경우 제 1층은 해수층을 가정하였으며, 제 2층은 2,300 m/s, 제 3층은 가스층을 가정하여 약 1,400 m/s, 제 4층은 기반암 층으로 3,000 m/s로 가정하였다. 불균질 모델의 경우 제 2층을 배경 매질의 평균 속도가 2,300 m/s, 표준 편차를 5%로 가정하여 매질의 속

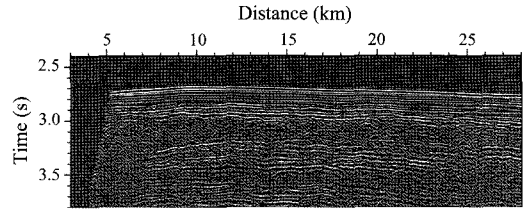


Fig. 6. A stack section of field data in East sea.

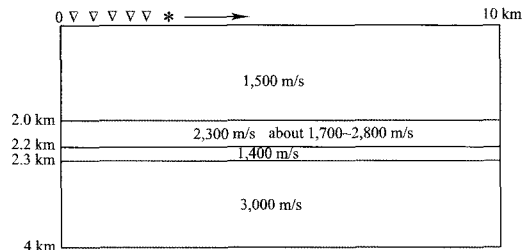


Fig. 7. Velocities and thickness of each layers.

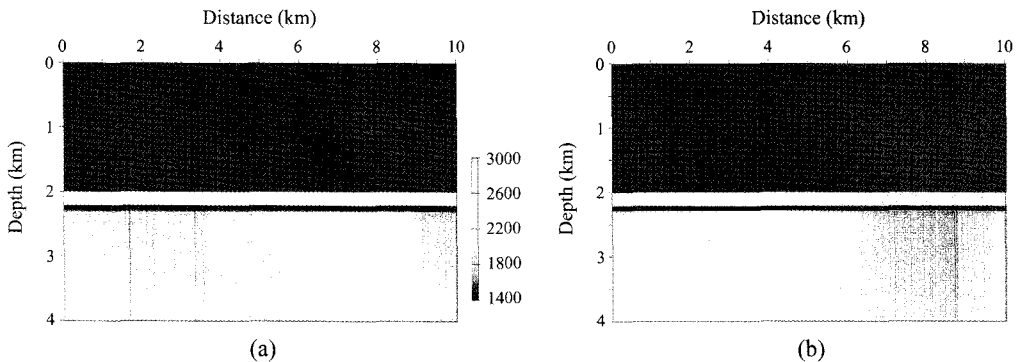


Fig. 8. Velocity model: (a) homogeneous, and (b) inhomogeneous model using von Kármán ACF with Hurst no. of 0.2, correlation length of 50.

도 변화가 약 1,700~2,800 m/s의 범위에서 무작위로 변하는 불균질 속도 모델을 생성하였다(Fig. 8). Fig. 8(a)는 이를 바탕으로 생성된 균질 속도 모델이고, (b)는 불균질 속도 모델로, 이러한 모델의 심도에 따른 속도 변화를 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9(a)는 균질

모델에서의 심도에 따른 속도를 나타내고 있다. 그림을 살펴보면 균질 모델을 가정한 속도 모델이 정상적으로 생성되었음을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 불균질 모델에서 한 점에서의 심도에 따른 속도를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 속도변화가 없는 해수층, 속

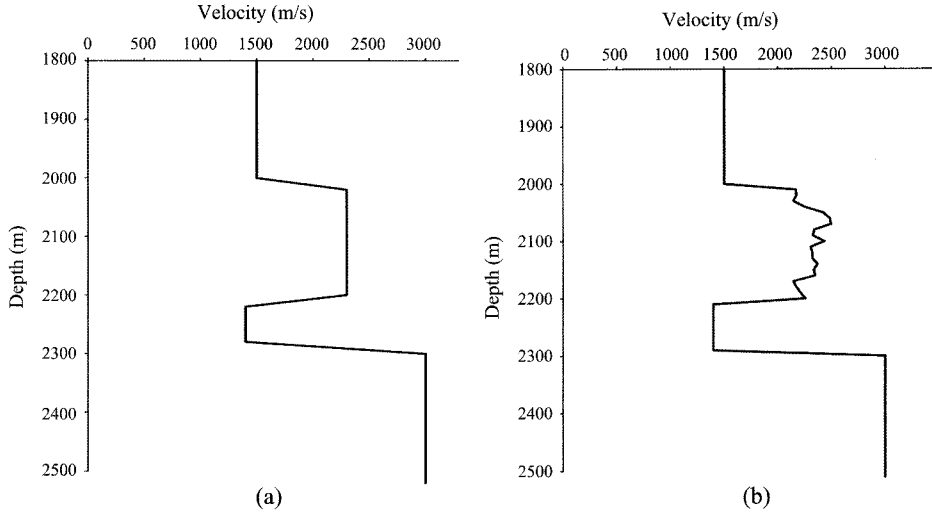


Fig. 9. Depth profile of P-wave velocity. (a) is the homogeneous model, (b) is the inhomogeneous model.

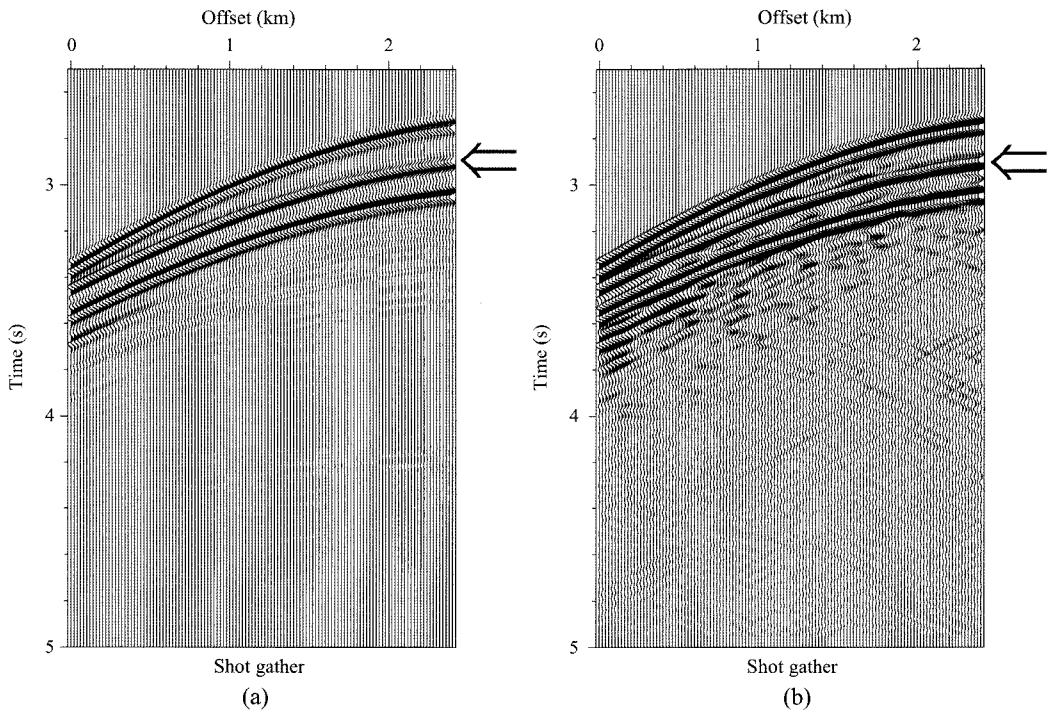


Fig. 10. Synthetic shot gathers. (a) is made using homogeneous velocity model, (b) is made using von Kármán ACF with Hurst no. of 0.2, correlation length of 50, respectively.

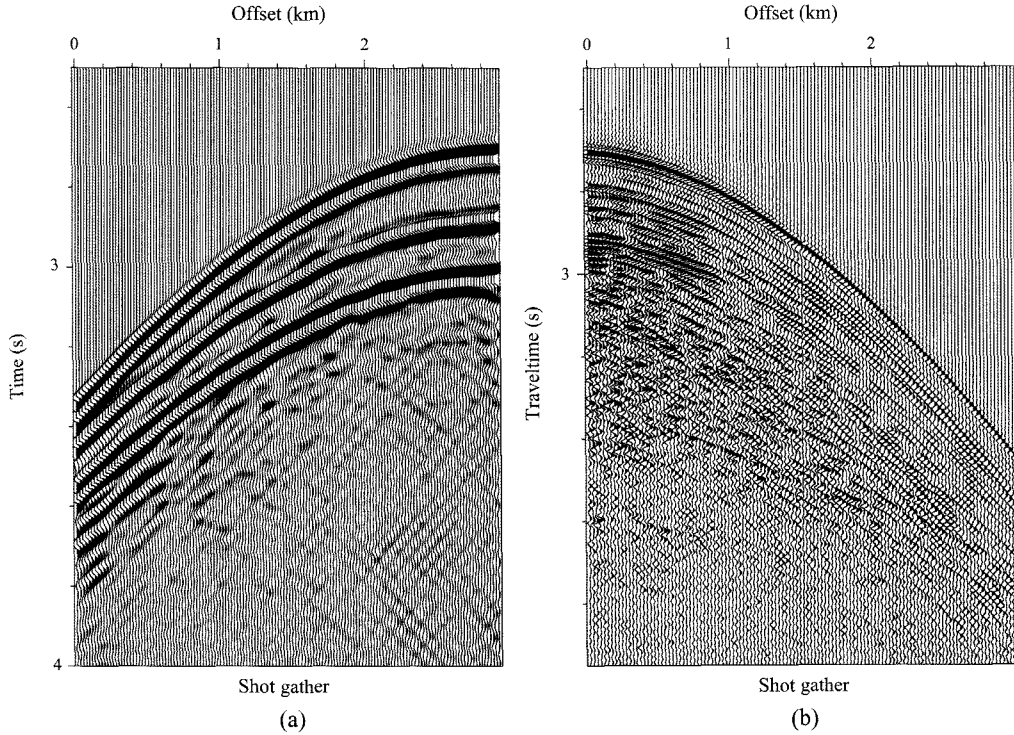


Fig. 11. Comparison of synthetic shot gather obtained by using (a) von Kármán ACF, Hurst no. of 0.2, correlation length of 50, (b) field data in East sea.

도가 선형함수로 증가하는 제 2층, 불균질 가스하이드레이트 속도 모델을 나타내는 제 2층, 그리고 가장 저속도를 가정한 가스층과 기반암층이 정상적으로 생성되었음을 볼 수 있다.

Fig. 10의 수치 모델링 시 음원은 Fig. 8의 모델에서 옴셋 3,040m에 존재하며, 수진기는 지표면에서 10m 간격으로 241 채널이 존재하는 것으로 가정하였다. Fig. 10(a)는 가스 하이드레이트 모델을 가정한 균질 모델에서의 파동장이다. 그림에서 보듯이 다중 반사파와 왕복주사 약 2.95초에서 속도 역전층에 의한 위상 역전을 확인할 수 있고 이를 화살표로 도시하였다. Fig. 10(b)는 허스트 수 0.2, 상관길이 50인 폰 카르만 자기상관 함수를 이용한 불균질 모델에서 수행한 음원 모음도이다. 속도 역전층에 의한 위상 역전을 확인할 수 있고 이를 화살표로 도시하였다. 불균질 모델로 인한 다양한 산란 현상으로 인한 파형 변화를 관찰할 수 있으며, 가스층을 가정한 속도 역전층에서 위상 역전이 발생하고 층 경계면에서 반사의 일관성이 결여되며 보다 많은 작은 반사 이벤트가 나타남을 볼 수 있다.

가스층을 가정한 속도 역전층에 의한 위상 역전과 균질 매질을 가정한 수치 모델링에서 볼 수 없는 불균

질 매질에 의한 파동장의 산란의 영향을 살펴보고자 불균질 매질 가스 하이드레이트 수치 모델링 결과를 통해 획득된 탄성과 자료와 비교하고자 하였다. Fig. 11(a)는 자료 획득 매개 변수 중 수진기 간격을 10m로 하여 현장 자료와 유사하게 일치시키고, 허스트 수 0.2, 상관길이 50인 폰 카르만 자기상관 함수를 이용하여 만든 불균질 모델에서의 합성 음원 모음도의 일부분이며, (b)는 Jang *et al.*(2006)에 의해 동해에서 얻은 실제 탐사 자료를 트래이스 뮤팅, 진폭보정, 디콘볼루션, 대역 필터링 등의 기본 자료처리를 적용한 이후의 음원 모음도의 일부분이다. 그림에서 보듯이 최근접 수진기까지 반사 주시는 유사하지만 마지막 수진기에서의 주시는 차이가 남을 볼 수 있다. 그 이유는 현장 자료 취득 시 수진기 간격이 12.5m이지만 수치 모델링 시에는 10m로 가정하여 수행되었기 때문이다. 현장 음원 모음도는 자료처리에 의해 다중 반사파 및 기타 잡음들이 감소하고 자료의 대역폭이 증가되어 있음을 볼 수 있다. 현장 탐사 자료에서 BSR로 추정되는 위상 역전은 약 2.9초에서 시작된다. 불균질 매질을 이용한 합성 음원 모음도에서도 BSR이 약 2.9초에서 시작됨을 볼 수 있다. 균질 매질을 이용한 합성 음원 모음도보다

실제 탐사 자료에서 보이는 파동 전파 양상을 보다 잘 구현한 것으로 판단되며, 이러한 음원 모음도를 이용하여 최종 해석 단면도를 제작한다면 매질의 불균질성에 의한 산란의 영향에 의해 왜곡된 구조해석을 불러 올 수 있을 것이다(Gibson and Levander, 1990). 또한 이러한 산란에 의한 영향은 주시 변화와 진폭 변화, 2차 파의 감쇄와 새로운 음원 작용을 하는 원인이 될 것이며, 고분해능 탄성과 탐사자료에서 이러한 불균질성이 신호를 왜곡시켜 잘못된 해석을 유도할 수 있을 것이다(Korn, 1993; Yao and Xi, 2004). 이러한 불균질 매질을 이용한 수치 모델링은 실제 탐사 자료에서 보이는 다양한 현상이 지하 매질의 구조 변화뿐만 아니라 매질의 불균질성에 의해서도 일어날 수 있음을 보여준다.

6. 결 론

본 연구에서는 확률분포에 따른 불균질 매질을 생성하는 방법과 산란 현상에 대하여 살펴보고, 균질 매질과 불균질 매질로 이루어진 수평 2층과 가스 하이드레이트 모델에 대해 유한차분 음향 파동방정식을 이용하여 파동장을 구하고 그 특성을 살펴보았다. 불균질 속도모델에서 파동장 변화를 살펴보기 위해 상부층은 균질 속도모델, 하부층은 불균질 속도모델로 이루어진 수평 2층 구조에 대해, 가우스, 지수, 폰 카르만 자기상관 함수 모델로부터 음원 모음도를 작성하였으며, 세 가지 자기상관 함수에 의한 불균질 속도모델이 각각의 자기상관 함수 특성에 맞는 산란현상을 볼 수 있었다. 가스 하이드레이트 수치모델링은 동해 현장자료를 바탕으로 해저면과 모델크기를 결정하였으며, 수치모델링 결과 폰 카르만 자기상관함수를 이용한 불균질 매질이 실제 음원 모음도에서 나타나는 다양한 파동현상을 보다 잘 구현함을 알 수 있었다. 또한 하이드레이트 부존 지역의 탄성과 음원 모음도에서 나타나는 해저면 기인 강진폭 위상역전 반사파와 산란파들이 보다 적절하게 구현되었음을 알 수 있었다. 불균질 층을 가정한 속도모델이 산란 등에 의한 영향으로 보다 복잡한 파동 전파양상이 나타남을 확인하였으며, 이는 실제 자료에서 나타나는 파동 현상을 이해하는데 기초가 되리라 판단된다.

사 사

이 논문은 2005년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

- Alford, R. M., Kelly, K. R., and Boor, D. M. (1974) Accuracy of finite difference modeling of the acoustic wave equation, *Geophysics*, 39, p. 834-842.
- Aki, K., and B. Chouet (1975) Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects, *J. Geophys. Res.*, 80, p. 3322-3342.
- 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, p. 25-40.
- Frankel, A., and Clayton, R. W. (1986) Finite difference simulations of seismic scattering: Implications for the propagation of short-period seismic waves in the crust and models of crustal heterogeneity, *J. Geophys. Res.*, Vol. 91, p. 6465-6489.
- Gibson, B. and Levander, A. (1990) Apparent layering in common-midpoint stacked images of two-dimensionally heterogeneous targets, *Geophysics*, 55, p. 1466-1477.
- 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, p. 1840~1843.
- Jang, S. H., Suh, S. Y., and Go, J. S. (2006) Prestack depth migration for gas hydrate seismic data of the East sea, *Korea Society of Economic and Environmental Geology*, Vol. 39, No. 6, p. 711-717.
- Jo, C.-H., Shin, C., and Suh, J. H. (1996) An optimal 9-point, finite-difference, frequency-space, 2-D scalar wave extrapolator, *Geophysics*, Vol. 61, p. 529-537.
- Kamei R., Hato M., and Matsuoka T. (2005) Random heterogeneous model with bimodal velocity distribution for Methane Hydrate exploration, *Mulli-Tamsa*, Vol. 8, No. 1, p. 41-49.
- Kelly K. R., Ward, R. W., Treitel Sven, and Alford, R. M. (1974) Synthetic seismograms: A finite difference approach, *Geophysics*, 41, p. 2-27.
- Klimeš, L. (2002) Correlation functions of random media, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 159, p. 1811-1831.
- Korn, M. (1993) Seismic waves in random media, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 29, p. 247-269.
- Kvenvolden (1993) Gas hydrate - geological perspective and global change, *Reviews of Geophysics*, 31, p. 173-187.
- Loewenthal, D., Wang, C. J., and Johnson, O. G. (1991) High order finite difference modeling and reverse time migration, *Exploration Geophysics*, Vol. 22, p. 533-545.
- Martini F. (2001) Seismic imaging below basalt, Ph. D. thesis, National University of Ireland.
- Powell, J. A. (1984) On the effect of random timing errors on velocity estimates derived from normal moveout estimates, *Geophysics*, Vol. 49, p. 1361-1364.
- Pyrak-Nolte, L. (2002) Seismic imaging of fractured media, 5th International Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering, Toronto, Canada.
- 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 multi-channel seismic data, *J. Geophys. Research*, 98, p. 463-473.
- Sato, H. and Fehler, M. (1998) *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*, Springer-Verlag, New York.
- 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, p. 2204-2213.
- Shin C. S., and Sohn, H. J. (1998) A frequency space 2-D scalar wave extrapolator using extended 25 points finite difference operators, *Geophysics*, Vol. 63, p. 289-296.
- Stoll, E. D. and Bryan, G. M. (1979) Physical properties of sediments containing gas hydrates, *J. Geophys. Res.*, 84, p. 1629-1634.
- Yao, Y., and Xi, X. (2004) Reflected wavefield in random media: a review, *J. Geophys. Eng.*, Vol. 1, p. 147-152.
- Whalley, E. (1980) Speed of longitudinal sound in clathrate hydrates, *J. Geophys. Res.*, 85, p. 2539-2542.
- Wu R. S., and Aki, K. (1985) Elastic wave scattering by a random medium and the small-scale inhomogeneities in the lithosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, p. 10261-10273.

2007년 9월 11일 원고접수, 2007년 12월 17일 게재승인.