

불균질 매질에 따른 인공 합성 탄성과 자료 비교

김영완¹⁾, 장성형¹⁾, 윤왕중²⁾, 서상용¹⁾

¹⁾한국지질자원연구원 석유해저자원연구부, linuxyoung@hanmail.net

²⁾전남대학교 지구시스템공학과

Comparison of synthetic seismograms referred to inhomogeneous medium

Youngwan Kim¹⁾, Seunghyung Jang¹⁾, Wangjoong Yoon²⁾, Sangyong Suh¹⁾

¹⁾Petroleum & Marine Div., KIGAM

²⁾Geosystem Engineering, Chonnam National University

Abstract: Most of seismic reflection prospecting assumes subsurface formation to be homogeneous media. These models are not capable of estimating small scale heterogeneity which is verified by well log data or drilling core. And those synthetic seismograms by homogeneous media are limited to explain various changes at field data. So we developed a inhomogeneous velocity model which can estimate inhomogeneity of background medium to implement numerical modeling from homogeneous medium and inhomogeneous medium on the model. Background medium using three autocorrelation functions in order to generate inhomogeneous velocity media was according to dominant wavelength of background medium and correlation length of random medium. And then we compared shot gathers. The results show that numerical modeling implemented at inhomogeneous medium depicts complex wave propagation of field data.

Keywords: random inhomogeneous medium, scattering, autocorrelation function, seismic modeling

1. 서론

탄성과 반사법 탐사를 이용하여 지구내부를 정밀하게 영상화하려는 시도는 계속 되고 있으며, 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 설명하기 어렵다.

무작위 불균질 매질에 관한 연구는 단파장(short-wavelength) 불균질이 파형에 산란을 일으키고, 이러한 산란에 의해 음원 모음도상에서 진폭과 위상의 변화가 반사파의 일관성에 심각한 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 무작위 불균질 매질(random inhomogeneous medium)에서의 탄성과 모델링에 관한 연구로서 탄성과 탐사에 적용된 예는 Powell (1984)이 속도 분석에서 무작위 파동장 변화에 대한 영향을 연구하여, 무작위 교란 매질에 의한 비쌍곡선 무브아웃(nonhyperbolic moveout)이 RMS 속

도를 추정하는데 큰 오차를 일으킬 수 있음을 보였다. Gibson and Levander (1990)은 무작위 매질의 산란된 신호에서 중합의 영향을 시험하기 위해 음향 유한차분 모델링을 수행하였다. Kamei et al., (2005)등은 바이모달(bimodal) 분포형태의 무작위 불균질 매질에 의한 메탄 하이드레이트층 모델을 만들어 합성 탄성과 단면도를 작성하였고, 이를 분석하여 가스 하이드레이트 현장자료에서 보이는 심한 감쇠가 산란에 의한 부가적인 진폭 감쇠에 의한 것임을 발표하였다.

탄성파의 산란은 전파되는 탄성파와 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 (Martini, 2001; Wu and Aki, 1988). 실제 지구 내부는 불균질성을 포함하고 있어 이에 대한 고려를 포함하여야 보다 현실적인 수치 모델링이 수행될 수 있을 것이다.

이 연구에서는 불균질 매질을 생성하는 방법과 불균질 매질을 생성하기 위해 사용되는 자기상관 함수, 산란 현상에 대하여 간단하게 살펴보고, 다양한 조건으로 생성된 균질 매질과 불균질 매질로 이루어진 수평 4층 구조모델에 대해 유한차분 음향 파동방정식을 이용하여 음원 모음도를 작성하였다. 이 음원 모음도로부터 각각 매질 물성 변화에 따른 탄성파 전파 거동의 차이점을 비교 분석해 보고자 하였다.

2. 본론

불균질성을 포함하는 복잡한 매질을 설명하는 한 방법은 매질의 물리적인 특성(P파, S파 속도, 밀도 등)이 공간에서 통계적으로 분포하는 무작위 매질로 간주하는 것이다. 무작위 불균질 매질에서 속도장은 평균 속도 v_0 와 변화량 $\delta v(\vec{x})$ 의 중첩으로 간주할 수 있다 (Klimes, 2001).

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

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.

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

여기에서 \vec{x} 는 지연거리(lag distance)이다. 자기상관함수는 매질의 변화 강도와 공간 상관의 통계적 측정이며 지연거리 \vec{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.

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

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 모사하는데 주로 사용되는 자기 상관함수는 가우시안(gaussian) 함수, 지수함수, 폰 카르만(von Karman) 함수 등의 세 가지가 있으며 가우시안 자기상관함수는 다음과 같이 정의된다.

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

이 함수는 저주파수 대역 통과된 백색 잡음을 의미한다. 단파장 성분이 적기 때문에 불균질 매질을 표현하기에 너무 부드러운 단점이 있다. 가우시안과 지수 함수 매질에서, 상관길이 a 는 매질 불균질성의 특성 길이와 직접적으로 관련이 있고 상관함수의 기울기는 매질의 상관 길이와 관련이 있다.

지수 자기상관함수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기에서 ϵ 은 표준편차이며, ϵ^2 은 분산을 의미한다.

폰 카르만 함수는 다음과 같이 정의된다.

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

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 정확하다고 알려져 있다. 이 함수는 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.

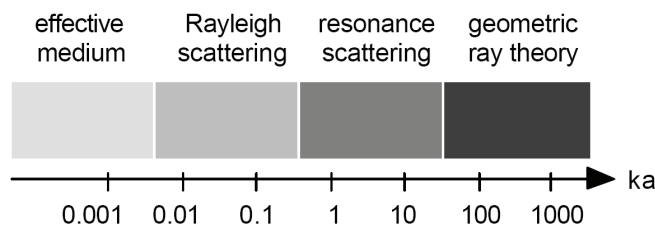


Fig. 1. The scattering regimes for which the magnitude and radiation characteristics of the scattering is controlled by the product of the wavenumber, k , and the size of the scatterer, a (radius). (from Pyrak-Nolte, 2002)

Fig. 2는 각각의 자기상관함수로 만든 무작위 매질을 보여주고 있다. Fig. 2의 (a)는 가우시안 자기상관 함수를 이용하여 만든 무작위 불균질 매질로 매우 부드럽게 변하는 것을 볼 수 있으며 (b)는 지수 자기상관함수를 이용하여 만든 매질이다. (c)는 폰 카르만 자기상관 함수를 이용한 것으로 단파장 성분이 많이 포함된 무작위 불균질 매질을 보여주고 있다.

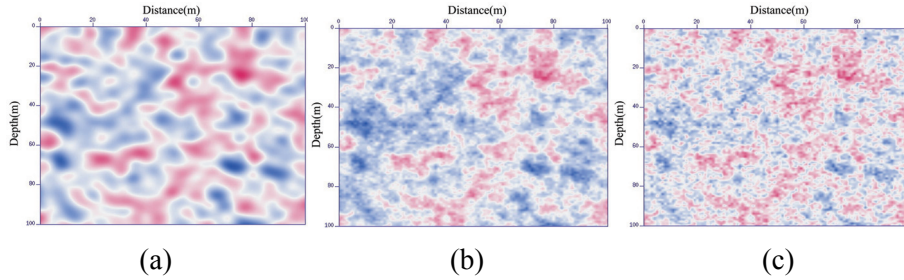


Fig. 2 Random inhomogeneous medium. (a) is gaussian ACF, (b) is exponential ACF, (c) is von Karman ACF in Hurst no.=0.2, correlation length=50, respectively.

수치 모델링을 수행할 모델의 크기는 1001×401 개, x 와 z 축의 격자 간격은 각각 10 m로 하였다. 음원의 중심 주파수를 각각 달리하는 리커 파형을 가정하여 수치 모델링을 수행하였다. 경계조건은 상부는 자유면(free surface), 좌우와 하부는 흡수 경계조건을 적용하였고 5초까지 기록하였다. 음원은 매 100 m 간격으로 총 81개, 수진기는 매 10 m마다 위치한 것으로 가정하였다. 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.

Fig. 3 (a)는 모델링에 사용된 균질 모델이며, 각 층의 P파 속도와 밀도는 제 1층은 1,500 m/s, 1.0 kg/m³, 제 2층은 1,550 m/s, 1.8 kg/m³, 제 3층은 2,500 m/s, 2.0 kg/m³, 제 4층은 4,000 m/s, 2.2 kg/m³, 제 2층과 3층은 속도가 선형적으로 증가한다고 가정하였으며, (b)는 다른 조건은 동일하며 제 3층만 불균질 매질로 바꾼 불균질 모델이다.

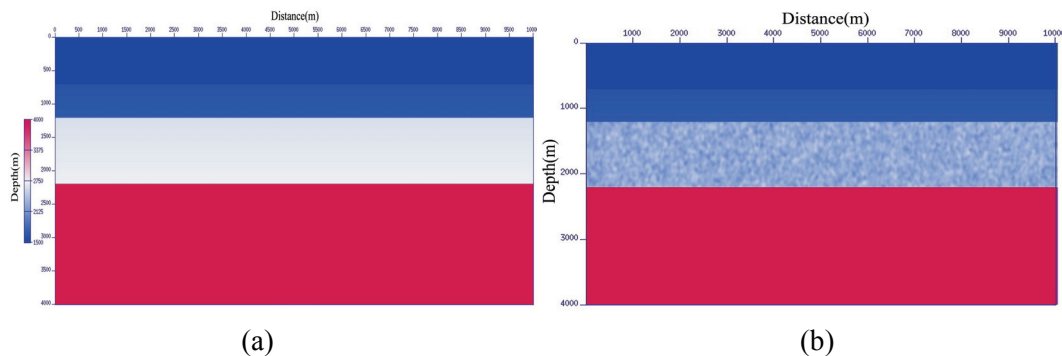


Fig. 3. Velocity model. (a) is a homogeneous, (b) is a inhomogeneous, respectively.

음원 모음도를 작성하기 위해 Seismic Unix (Stockwell, 2005)의 모듈을 사용하였고, 시간에 대해서는 2nd-order, 공간에 대해서는 4th-order 유한 차분 방정식을 이용하였

다. 이 유한차분 방정식을 이용하여 Fig. 3의 속도 모델에서 모델링을 수행하여 보았고, 그 결과가 Fig. 4이다. Fig. 4의 (a)는 균질 모델을 사용한 음원 모습도이며, 가로축은 수진기 위치이고 세로축은 왕복주사이다. 결과를 보면 직접파와 굴절파가 보이고 경계면의 일차 반사파와 다중 반사파가 나타남을 알 수 있어 수치 모델링이 정상적으로 수행되었음을 확인할 수 있다. Fig. 4의 (b)는 가우시안 불균질 매질을 사용하여 얻은 음원 모습도이다. 균질 매질에서와 달리 실제 탐사 자료에서 관찰되는 다양한 파동 전파양상이 나타남을 확인할 수 있고, (c)는 폰 카르만 함수를 사용하여 얻은 음원 모습도이다. 상관길이를 크게 함으로서 매질의 거칠기가 감소하여 보다 부드러운 단면도가 생성됨을 알 수 있다. 불균질 모델에 따른 합성 탄성과 단면도의 차이는 위클 트레이스로 도시하면 보다 잘 구별되나 여기에서는 도시하지 않았다.

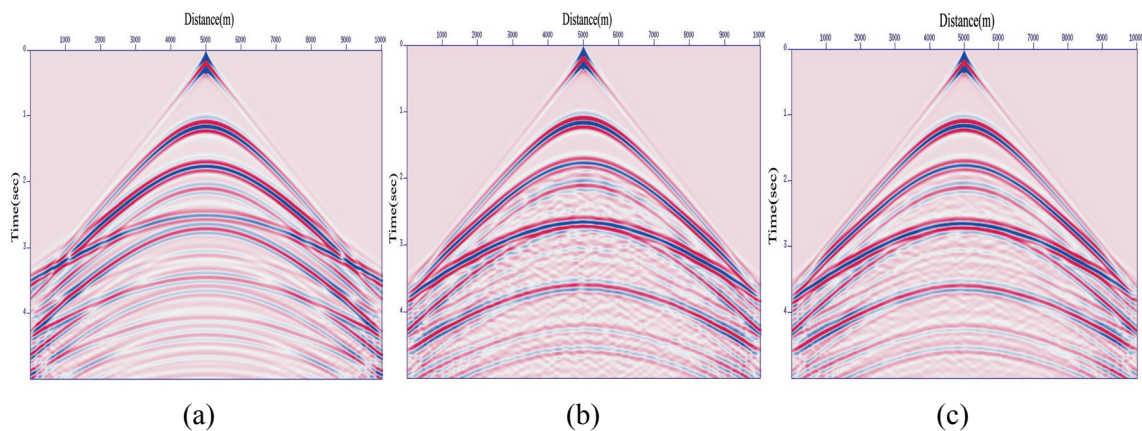


Fig. 4. Synthetic shot gather. (a) is used homogeneous velocity model, (b) is used inhomogeneous velocity model in gaussian ACF, (c) is used inhomogeneous velocity mode in von Karman ACF Hurst no.=0.2, cl=500, respectively.

5. 결론

본 연구에서는 불균질 매질을 생성하는 방법과 불균질 매질을 생성하기 위해 사용되는 자기상관 함수와 산란 현상에 대해 살펴보고 균질 매질과 불균질 매질로 이루어진 수평 4층 구조모델에 대해 음향 유한차분 방정식을 이용하여 음원 모습도를 작성하였다.

균질 매질에서 작성된 음원 모습도는 일차 반사파와 다중 반사파, 직접파, 굴절파 등이 잘 구현되었고, 세 가지의 자기상관 함수를 이용하여 만든 불균질 매질에서의 음원 모습도는 실제 현장자료에서 나타나는 산란 특성이 잘 구현된 것으로 판단되며, 특히 폰 카르만 자기상관함수를 이용한 불균질 매질은 소규모 불균질성을 잘 모사한 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 수치 모델링과 현장 자료를 비교함으로써 암염 돔 하부 또는 현무암 하부 영상화등과 같은 복잡한 매질에서 탄성과의 거동을 이해하는데 기초가 될 것이라 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

- Gibson, B. S., and Levander, A. R., 1990, Apparent layering in common-midpoint stacked images of two-dimensionally heterogeneous targets, *Geophysics*, **55**, 1466-1477.
- Kamei R., Hato M., Matsuoka T., 2005, Random heterogeneous model with bimodal velocity distribution for Methane Hydrate exploration, *Mulli-Tamsa*, **8**, 41-49.
- Ludek Klimes, 2001, Correlation functions of random media, *Seismic waves in complex 3-D structure*, **Report 11**, p. 91-109.
- Martini F., 2001, Seismic imaging below basalt, *National University of Ireland*, Ph. D. thesis.
- Powell, J. A., 1984, On the effect of random timing errors on velocity estimates derived from normal moveout estimates, *Geophysics*, **49**, 1361-1364.
- Pyrak-Nolte, L., 2002. Seismic imaging of fractured media. *5th International Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering*, Toronto, Canada, 5-13.
- Stockwell, J., 2005, *Seismic Unix home page*. www.cwp.mines.edu/cwpcodes.
- Wu, R. -S., and Aki, K., 1988, Introduction: Seismic wave scattering in three-dimensionally heterogeneous earth, *PAGEOPH*, **128**, 1-6.